

UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

Discipline : Eaux continentales et Société

Ecole doctorale : Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie,
Géosciences, Hydrosiences, Environnement

présentée et soutenue publiquement

par

Guillaume Lacombe

le 24 octobre 2007

TITRE :

**EVOLUTION ET USAGES DE LA RESSOURCE EN EAU
DANS UN BASSIN VERSANT AMENAGE SEMI-ARIDE.
LE CAS DU MERGUELLIL EN TUNISIE CENTRALE.**

JURY

Bernard Cappelaere	Ingénieur de Recherche	IRD	Invité
Claude Cosandey	Directeur de Recherche	CNRS	Rapporteur
Jean-Claude Deutsch	Professeur émérite	ENPC	Rapporteur
Richard Escadafal	Directeur de Recherche	CESBIO	Examineur
Patrick Le Goulven	Directeur de Recherche	IRD	Directeur de thèse
Christian Leduc	Directeur de Recherche	IRD	Président du jury
Mohamed Slimani	Professeur	INAT	Examineur

Remerciements

Cette thèse est certes le résultat d'un travail personnel mais qui n'aurait pu aboutir sans l'intervention et l'aide de plusieurs personnes que je tiens à remercier.

Je remercie Patrick Le Goulven, directeur de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et ex-directeur de l'US Dynamiques, Impacts et Valorisation des Hydro-Aménagements et Eric Servat, directeur de recherche à l'IRD et directeur de l'UMR Hydrosciences Montpellier (HSM), pour avoir accepté de co-diriger cette thèse. Je les remercie d'avoir mis à ma disposition tous les éléments qui m'ont permis de réaliser cette thèse dans d'excellentes conditions ; merci pour leurs suggestions, le suivi de mon travail et pour la confiance qu'ils m'ont accordée.

Ma gratitude s'adresse également à Christian Leduc, directeur de recherche à l'IRD et directeur adjoint de l'UMR Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages (G-EAU) qui a co-encadré ce travail de recherche et qui a accepté de présider le jury de cette thèse. Je tiens ici à souligner ses compétences remarquables d'encadrant. Très exigeant, il a toujours su par ses critiques, ses conseils et ses idées, donner de l'élan à mon travail. Ainsi, ai-je eu la chance de bénéficier de son expérience et de sa clairvoyance.

J'exprime toute ma reconnaissance à Bernard Cappelaere, hydrologue, ingénieur de recherche hors classe à l'IRD, qui a contribué de façon significative à l'encadrement de mes recherches et qui a bien voulu être membre du jury de cette thèse. Sa grande rigueur dans l'abord des questions hydrologiques et son savoir faire en analyse numérique m'ont beaucoup apporté. Je le remercie infiniment pour le temps qu'il a bien voulu me consacrer et pour les nombreuses discussions que nous avons eues, toujours très enrichissantes.

Madame Claude Cosandey, directeur de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) à Meudon et vice présidente de la section française de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (AISH), a accepté d'être rapporteur de cette thèse. Je la remercie pour sa lecture minutieuse. Ses corrections ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire.

Monsieur Jean-Claude Deutsch, professeur émérite à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), a été rapporteur de cette thèse. Je voudrais le remercier d'avoir accompli cette tâche fastidieuse. Ses remarques et critiques ont été, pour moi, très constructives.

Monsieur Richard Escadafal, directeur de recherche à l'IRD et responsable du projet *SudMed* au Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère (CESBIO) à Toulouse, a examiné attentivement ce travail. Je tiens à le remercier pour ses remarques pertinentes.

Monsieur Mohamed Slimani, Professeur à l'Institut National Agronomique de Tunis (INAT), a été examinateur de cette thèse. Je lui sais gré d'avoir lu, corrigé et commenté ce document.

Je remercie Antoine Cornet, directeur de recherche et représentant de l'IRD en Tunisie pour son accueil au centre de Tunis. Merci à Roger Calvez, hydrologue à l'IRD, qui m'a fait découvrir le bassin versant du Merguellil (aux sommets enneigés !) un matin de mars, et qui m'a présenté les principaux partenaires tunisiens du projet *Mergusie*.

Je remercie Jean-Christophe Poussin, chargé de recherche en agronomie à l'IRD qui m'a conseillé dans la préparation de mes enquêtes in situ. Mohamed Ben Younes, Saïd Khalfallah, Zakia Jenhaoui et Noura Ayashi m'ont successivement accompagné sur le terrain pour traduire les conversations entretenues avec les agriculteurs arabophones. Je tiens à les remercier pour leur aide très précieuse.

Merci à Monique Oï, technicienne à l'IRD et à Mohamed Ayashi, ingénieur au Commissariat Régional de Développement Agricole (CRDA) de Kairouan, pour la collecte et la vérification des mesures qu'ils m'ont transmises. Je remercie Ayet Ben Mansour, Mohamed Kefi et Abdelaoui Thameur du département de Conservation des Eaux et des Sols du CRDA de Kairouan qui ont toujours été disponibles pour répondre à mes questions sur les aspects techniques des aménagements de conservation des eaux et des sols. Je les remercie pour les diverses informations qu'ils m'ont transmises. Les données des retenues collinaires équipées dans le cadre du projet *Hydromed* ont été fournies par Jean Albergel, directeur de recherche à l'IRD et Jean-Marie Lamachère, chargé de recherche à l'IRD, membres du Laboratoire d'étude des Interactions – Sol – Agrosystème (UMR LISAH). Je leur adresse ma reconnaissance pour la mise à disposition de ces données.

Je tiens à remercier Chloé Borgel-Diouf, Nicole Couesnon, Kristine Gujda et Christine Legrand à Montpellier, Anne-Marie Ouertani et Christiane Ouertani en Tunisie pour leur soutien administratif et logistique.

J'adresse mes remerciements à François-Noël Cres, maître de conférence à l'université Montpellier II, pour son aide précieuse en programmation Visual Basic et pour les sympathiques heures de co-encadrement de TP à l'Institut Polytechnique Universitaire de Montpellier. Merci à Chrystelle Bancon-Montigny, Christelle Batiot, Hervé Jourde, Jean-Louis Perrin, Séverin Pistre et Marie-Georges Tournoud, enseignants et chercheurs de l'UMR HSM avec qui j'ai eu le plaisir de co-encadrer les TP sur le terrain en hydrogéologie et en hydraulique.

Je remercie François Molle, chargé de recherche en politiques de l'eau à l'International Water Management Institute (IWMI) et à l'IRD et Eric Roose, directeur de recherche en pédologie à l'IRD. Ils m'ont apporté des éléments de réflexion intéressants sur les problèmes de gestion des aménagements de conservation des eaux et des sols.

Je tiens à remercier tout particulièrement François Bousquet, Marcel Kuper et Guy Trébuil, chercheurs au Centre International de Recherche en Agronomie pour le Développement (CIRAD). Tous trois m'ont encadré en stage de DEA, une étape primordiale qui m'a donné un avant goût de la recherche et qui m'a permis de continuer en thèse.

Un grand merci enfin à tous les collègues et amis qui ont rendu agréables ces années de thèse. A Montpellier, Arthur, danseur de salsa devant l'éternel, Catherine, Christine, Fabiola, Julien, l'homme qui court plus vite que son ombre, Kenza à l'humour intarissable, Linda, Marcos, Marion 1, Marion 2, Matthias, Odile, Paulina, Perrine, Tahina, Vincent, Wilson et Yin,... la joyeuse troupe des thésards de la Maison des Sciences de l'Eau qui a égayé ces journées laborieuses. Merci à Bernard, généreux pilote du convoi « cantine » et à son personnel d'accompagnement, Nanée, Nicolas qui ont oxygéné mes longs mois de rédaction, à Aïssata et Rim, mes compagnes de bureau au calme olympien. Je ne peux clore ce paragraphe montpelliérain sans évoquer les expéditions régénératrices de fin de semaine à travers la garrigue en compagnie de Claire-Sophie, Kasama, Nanée, Pierre et Roger, épisodes mémorables.

En Tunisie, merci à Christian pour les services rendus au delà de l'appel du devoir, particulièrement au début de mon premier séjour. Merci aux stagiaires, VI et thésards à Tunis avec lesquels j'ai eu le plaisir de partager les pauses « déjeuner » et quelques voyages dans le pays. Je remercie en particulier Céline, Charlotte, Claire, Hella, Jihène, Lassad, Mohamed, Nathalie, Olf, Oumeïma et Pierre.

Enfin, je témoigne ma profonde reconnaissance à ma famille et tout particulièrement à mon épouse qui a toujours été présente pour m'encourager et me soutenir.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION GENERALE.....	10
1.1. <i>Problématique</i>	12
1.1.1. Une répartition inégale des ressources en eau sur la planète	12
1.1.2. Eau et sol, facteurs limitant la production agricole en milieu semi-aride	12
1.1.3. Impacts des aménagements de conservation des eaux et des sols sur la ressource en eau..	13
1.1.4. Le site d'étude.....	14
1.2. <i>Cadre scientifique de la thèse</i>	15
1.2.1. Le projet MERGUSIE	15
1.2.2. Orientations scientifiques du projet	15
1.3. <i>Démarche</i>	16
2. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE.....	18
2.1. <i>L'agriculture et l'eau en Tunisie</i>	20
2.1.1. Le secteur agricole	20
i. Historique depuis la prise d'indépendance du pays	20
ii. Principales productions agricoles du pays.....	20
iii. Importance de l'irrigation	22
2.1.2. Ressource et gestion de l'eau.....	22
i. La ressource en eau	22
ii. La gestion de l'eau	23
2.2. <i>Gestion de la lutte contre l'érosion des sols et contre la sécheresse</i>	24
2.2.1. Dans le monde	24
i. Asie et Moyen Orient	24
ii. Afrique	25
iii. Amérique	27
iv. Europe.....	27
2.2.2. En Tunisie	28
i. Avant la présence française.....	28
ii. Pendant l'occupation française.....	28
iii. A l'indépendance	29
iv. Depuis les années 1990.....	31
2.3. <i>Site d'étude</i>	34
2.3.1. Le bassin versant du Merguellil.....	34
i. Environnement physique.....	34
Géomorphologie et géologie	35

Les sols.....	36
Climat.....	38
Ø Pluviométrie.....	38
Ø Température.....	43
Ø Vent.....	44
Ø Humidité de l'air.....	44
Ø Evaporation.....	45
Ø Bilan climatique.....	46
Réseau hydrographique.....	49
ii. L'occupation des sols.....	49
L'agriculture.....	49
Les aménagements de conservation des eaux et des sols.....	51
Ø Les retenues collinaires.....	54
Ø Les banquettes.....	56
2.3.2. Les retenues collinaires du réseau HYDROMED.....	59

3. BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB 62

3.1. Les mesures.....	65
3.1.1. Représentativité.....	65
3.1.2. Les instruments de mesure.....	66
3.1.3. Vérification des données et calcul des incertitudes.....	67
i. La pluie.....	67
ii. L'évaporation du bac (E_{PAN}).....	68
Détection et correction des mesures douteuses.....	68
Comparaison de E_{PAN} avec l'évapotranspiration de référence E_{To}	73
Estimation de l'incertitude sur E_{PAN}	75
iii. La cote du plan d'eau.....	78
iv. Les courbes hauteur-surface-volume.....	80
Evolution de la géométrie des retenues collinaires.....	81
Estimation des incertitudes sur les courbes d'étalonnage.....	85
3.2. Les flux de déstockages naturels.....	88
3.2.1. Etat de l'art.....	88
i. Détermination de l'évaporation.....	88
Mesures sur bac évaporatoire.....	89
Les modèles météorologiques.....	91
Le bilan hydrologique.....	91
Les méthodes chimiques.....	92
Les méthodes isotopiques.....	92
ii. Détermination de l'infiltration.....	92
Les méthodes directes.....	92

Les méthodes indirectes	93
3.2.2. Traitement des données	94
i. L'évaporation	94
ii. L'infiltration.....	95
Sélection des épisodes de déstockage naturel strict.....	96
Relation entre l'intensité de l'infiltration et la hauteur d'eau.....	101
iii. Modélisation linéaire des flux de déstockage	105
Calage du modèle.....	106
Prise en compte de l'envasement des retenues.....	109
Détermination du coefficient de transposition C_T	110
iv. Résultats.....	110
Variabilité de la drainance (K).....	110
Ø Variations de K entre les retenues.....	110
Ø Variations temporelles de K.....	113
Variabilité du coefficient de transposition (C_T).....	116
Ø Relation entre C_T et la surface du plan d'eau.....	117
Ø Relation entre C_T et la saison.....	119
Redéfinition d'une incertitude sur l'infiltration	122
3.3. <i>Les flux de déstockages volontaires</i>	123
3.3.1. Méthode de calcul.....	123
3.3.2. Distinction des prélèvements et des lâchers.....	125
3.3.3. Validation de la méthode avec les mesures du barrage El Haouareb.....	127
3.3.4. Résultats.....	129
3.4. <i>Les apports</i>	132
3.4.1. Caractéristiques de la pluie	133
3.4.2. Estimation des apports.....	134
i. Méthode	134
ii. Estimation des incertitudes sur les apports.....	136
iii. Variabilité temporelle des apports	138
Ecoulements et déversements annuels	138
Ecoulements mensuels	139
Durée et fréquence des crues.....	141
3.4.3. Relation pluie-débit sur les bassins versants des retenues collinaires.....	142
i. Calcul des lames précipitées et ruisselées	142
ii. Modélisation linéaire.....	144
iii. Modélisation globale conceptuelle GR4J	145
iv. Interprétation des résultats.....	146
3.5. <i>Simulations de la dynamique de stockage/ déstockage des retenues</i>	151
3.5.1. Structure du modèle.....	151

3.5.2.	Les variables du modèle	152
i.	La pluie	152
ii.	Evapotranspiration et pan évaporation.....	154
3.5.3.	Estimation de la fiabilité des retenues collinaires par simulations.....	155
i.	Définition d'une fonction « prélèvement »	156
ii.	Prise en compte de l'envasement des retenues collinaires	156
iii.	Résultats des simulations	158
	Ressource disponible pendant la saison sèche.....	158
	Variabilité de la probabilité de défaillance.....	162
	Sensibilité des résultats aux critères de défaillances choisis	163
3.6.	<i>Conclusion</i>	165
4.	USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES	166
4.1.	<i>Connaissances sur la gestion des retenues collinaires en Tunisie</i>	169
4.2.	<i>Démarche</i>	170
4.3.	<i>Résultats</i>	171
4.3.1.	Caractérisation des usages de l'eau.....	171
i.	L'exploitation des retenues collinaires en quelques chiffres.....	171
ii.	Critères expliquant l'exploitation éventuelle des retenues collinaires	173
iii.	Gains en rendement liés à l'irrigation	178
4.3.2.	Estimation des volumes prélevés	179
4.3.3.	Comparaison des résultats obtenus par enquêtes et par bilan hydrique	184
4.3.4.	Synthèse.....	186
4.4.	<i>Conclusion</i>	188
5.	IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL	190
5.1.	<i>Modification de la relation pluie-débit</i>	192
5.1.1.	Etat de l'art sur les études d'impact hydrologique.....	192
5.1.2.	Problèmes liés à la détection des changements hydrologiques	193
i.	Particularités des grands bassins versants	193
ii.	Facteurs contrôlant la relation pluie-débit.....	194
5.1.3.	Mesures disponibles et période d'étude	195
i.	Mesures hydrométéorologiques	195
	Débits	195
	Météorologie	196
ii.	Les aménagements de conservation des eaux et des sols	196
5.1.4.	Analyse des données.....	197
i.	Variabilité hydro-pluviométrique.....	197

Cumuls hydro-pluviométriques annuels.....	197
Pluie journalière	198
Définition des évènements pluie-débit	199
Intensités sub-journalières des pluies	200
Pluies antérieures	201
ii. Comparaison du ruissellement dans les deux bassins versants emboîtés	202
Ruissellement produit par les pluies spatialement homogènes.....	202
Ruissellement produit par toutes les pluies	203
iii. Modélisation hydrologique et tests non paramétriques.....	205
iv. Quantification de la baisse de production du ruissellement dans la zone aval.....	209
5.1.5. Causes probables de la réduction du ruissellement.....	211
i. Le climat	211
ii. L'occupation des sols.....	212
iii. Le niveau des nappes souterraines	212
iv. Les aménagements de conservation des eaux et des sols.....	213
5.1.6. Conclusions	215
5.2. <i>Redistribution de la ressource en eau</i>	217
5.2.1. Impacts respectifs des retenues collinaires et des banquettes sur les écoulements	217
5.2.2. Bilan hydrique global des aménagements.....	219
i. Les retenues collinaires	219
ii. Les banquettes.....	220
Estimation des transferts d'eau vers la nappe.....	221
Estimation des volumes d'eau valorisés par l'agriculture	221
Conclusion	223
5.3. <i>Résultats et discussion</i>	224
6. CONCLUSION GENERALE	230
6.1. <i>Synthèse des résultats</i>	232
6.1.1. Au niveau de l'aménagement : échelle locale.....	232
6.1.2. Au niveau du bassin versant : échelle régionale	234
6.1.3. Intégration des résultats obtenus aux échelles locale et régionale	235
6.2. <i>Limites de l'étude et perspectives</i>	236
6.2.1. A l'échelle des aménagements de conservation des eaux et des sols.....	236
i. Retenues collinaires	236
ii. Banquettes.....	236
6.2.2. A l'échelle du bassin versant du Merguellil.....	237
i. Impact des aménagements de conservation des eaux et des sols sur les écoulements	237
ii. Extrapolation spatiale des bilans hydriques locaux.....	238
iii. Bilan global du bassin versant	238

6.2.3.	Enseignements sur la gestion des ressources en eau pour le développement.....	238
7.	ANNEXES.....	240
7.1.	<i>Sigles</i>	242
7.1.1.	Acronymes.....	242
7.1.2.	Variables.....	242
i.	Variables du chapitre 3.....	242
ii.	Variables du chapitre 5.....	243
7.2.	<i>Calcul de ETo</i>	244
7.2.1.	Calcul de R_n	244
7.2.2.	Calcul de e_s	245
7.2.3.	Calcul de Δ	245
7.2.4.	Calcul de e_a	245
7.2.5.	Calcul de γ	245
7.3.	<i>Résultats annexes de simulations</i>	246
7.4.	<i>Caractéristiques des pompes</i>	247
7.5.	<i>Formulaires d'enquêtes</i>	248
7.6.	<i>Article soumis à Journal of Hydrology</i>	252
7.7.	<i>Table des illustrations</i>	276
7.7.1.	Liste des figures.....	276
7.7.2.	Liste des tableaux	282
8.	BIBLIOGRAPHIE.....	286

1. INTRODUCTION GENERALE

1.1 Problématique.....	12
1.2 Cadre scientifique de la thèse.....	15
1.3 Démarche.....	16

1.1. Problématique

1.1.1. Une répartition inégale des ressources en eau sur la planète

L'eau est inégalement répartie à la surface du globe. Quelques chiffres généralement admis illustrent cette hétérogénéité. Les milieux arides et semi-arides, avec une pluviométrie annuelle inférieure à 500 mm, couvrent environ le tiers des surfaces émergées et reçoivent moins de 5% des précipitations continentales. Ils regroupent le tiers de la population mondiale qui exploite environ 5% des ressources en eau utilisées dans le monde. A l'intérieur de cet ensemble, les pays du versant sud du bassin méditerranéen (Maroc, Algérie, Tunisie, Libye, Egypte, Israël, Liban, Syrie) figurent parmi les 14 pays les plus déficitaires en eau de la planète disposant de moins de 1000 m³ d'eau par an et par habitant (FAO, 2000), le seuil de stress hydrique ayant été fixé à 1700 m³.hab⁻¹.an⁻¹ par Falkenmark (1986). Un scénario tendanciel envisage une réduction de moitié de ce volume disponible entre 1995 et 2025, liée notamment au doublement de la population méditerranéenne.

1.1.2. Eau et sol, facteurs limitant la production agricole en milieu semi-aride

Dans les pays sud méditerranéens, l'agriculture qui occupe entre 15 et 20% du territoire emploie environ le quart de la population et consomme 80% des ressources en eau (FAO, 2004). Les rendements agricoles sont très faibles en raison des conditions pédoclimatiques très défavorables. Dans les régions semi-arides, les périodes propices à la croissance végétale (pluie > évapotranspiration potentielle) varient entre 2 et 4,5 mois par an (Kanemasu et al., 1990). Non seulement rares, les pluies sont irrégulières. Issues pour la plupart d'orages convectifs, elles sont intenses avec une variabilité spatio-temporelle extrême. Il s'en suit des risques élevés de sécheresses annuelles et intra-saisonnières. Les cumuls annuels de pluie oscillent fréquemment entre le tiers et le double des moyennes annuelles (Stewart, 1988). Les chutes de rendements agricoles liés aux sécheresses surviennent en moyenne deux années sur cinq et la perte totale des récoltes une année sur dix (Falkenmark et al., 2001). La pauvreté des sols est le second facteur limitant la production agricole. Formés sous des couverts végétaux peu denses dans des environnements secs, les sols sont peu évolués. De faible épaisseur, ils contiennent peu de matière organique. Ils sont lessivés et érodés par les pluies et le ruissellement. L'érosion hydrique des sols est particulièrement intense dans les régions montagneuses où les pentes accroissent l'érosion le ruissellement. En Tunisie, un peu moins de la moitié de la superficie du pays est menacée par l'érosion.

1 INTRODUCTION GENERALE

Les pertes en terre varient généralement entre 50 et 200 tonnes par hectare et par an dans les régions les plus sensibles à l'érosion du Maghreb (FAO, 1980). Ces chiffres sont plus de 10 fois supérieurs à ce que la pédogenèse peut produire sous les climats semi-arides (Klingebiel et Montgomery, 1966).

Dès l'antiquité, les populations montagnardes développent des techniques freinant ou stockant le ruissellement pour réduire l'érosion des sols et/ou créer une ressource en eau supplémentaire pour minimiser les pertes agricoles en période de sécheresse. Plus récemment, les aménagements de CES¹ sont construits mécaniquement et à grande échelle. Des objectifs supplémentaires leur sont attribués : protéger les régions aval contre les inondations, réduire l'envasement des grands réservoirs collectant le ruissellement pour les périmètres irrigués. Dans les zones de piedmont, l'irrigation intensive est pratiquée dans les plaines alluviales qui offrent des terres plus fertiles et plus facilement irrigables grâce à une ressource en eau plus abondante prélevée dans les aquifères.

1.1.3. Impacts des aménagements de conservation des eaux et des sols sur la ressource en eau

En retenant le ruissellement sur les reliefs, les aménagements de CES réduisent la ressource en eau disponible dans les régions aval et l'augmentent sur le lieu de leur implantation. Jusqu'à présent, la plupart des études d'impact se sont positionnées à l'échelle des aménagements pour analyser leur bilan hydrique et/ou leur valorisation agricole ou à l'échelle du bassin versant pour caractériser leur impact sur les écoulements. L'une ou l'autre de ces approches ne permet pas de caractériser la redistribution spatiale de la ressource en eau et de ses usages induite par les aménagements de CES. Elle n'offre qu'une vue partielle, incomplète pour estimer l'impact global et l'utilité générale de ces aménagements. Cette thèse propose de développer conjointement ces deux approches, locale et régionale dans un bassin versant semi-aride largement aménagé au cours des deux dernières décennies. Cette double approche est conduite pour comparer les bénéfices locaux en ressource hydrique au niveau des aménagements aux pertes occasionnées à l'aval par réduction des écoulements. Ces deux analyses devront permettre finalement d'estimer l'impact des aménagements de CES sur le bilan hydrique global d'un bassin versant de plus de 1000 km² et donc d'apprécier leur utilité à l'échelle régionale.

¹ Aménagement de CES : aménagement de conservation des eaux et des sols.

1.1.4. Le site d'étude

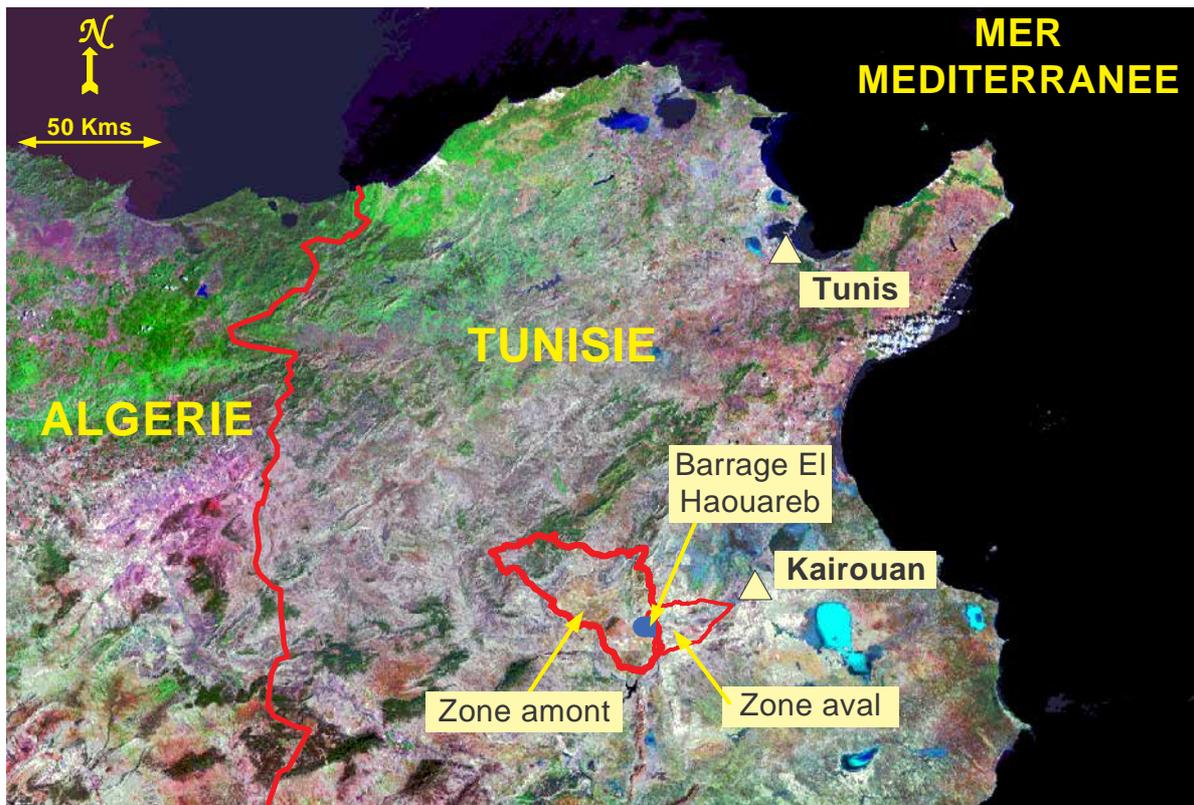


Figure 1. Localisation des zones amont et aval du bassin versant du Merguellil.

Le site d'étude est le bassin versant du Merguellil situé en Tunisie centrale (figure 1). Sa situation lui confère des caractéristiques représentatives des problèmes de gestion de l'eau dans le bassin méditerranéen. Il se compose de deux entités géographiquement contrastées. La partie amont correspondant au bassin versant du barrage El Haouareb est montagneuse et présente une géomorphologie hétérogène. Sa faible population vit principalement de l'élevage et d'une agriculture pluviale de subsistance. La partie aval s'inscrit dans la plaine alluviale de Kairouan, densément peuplée et intensivement irriguée à partir de l'aquifère de Kairouan, première ressource hydrique de la région. Le barrage El Haouareb, construit en 1989 pour protéger la ville de Kairouan des crues dévastatrices de l'oued Merguellil, joint ces deux entités au niveau d'un seuil naturel. Dès lors, tous les écoulements produits par la partie amont sont retenus dans le barrage qui a mis fin au processus de recharge naturelle de l'aquifère de Kairouan par épandage des crues de l'oued Merguellil dans la plaine. La recharge s'effectue à présent par infiltration sous le barrage El Haouareb construit sur un karst.

La construction des aménagements de CES dans le bassin amont s'intensifia après l'apparition du barrage El Haouareb, pour réduire son envasement, limiter l'érosion des

terres agricoles, favoriser la recharge des aquifères de l'amont par infiltration et offrir une ressource en eau complémentaire pour l'agriculture. Deux catégories principales d'aménagements de CES existent dans ce bassin amont : les banquettes (talus en terre installés sur les versants suivant les courbes de niveau) et les retenues collinaires (barrages en terre construits dans les talwegs). En retenant le ruissellement, les aménagements de CES réduisent les écoulements vers le barrage El Haouareb et par conséquent limitent la recharge de la nappe de Kairouan. Ils créent une nouvelle ressource en eau sur les reliefs. Ce mémoire de thèse se concentre sur la partie amont de la zone décrite, i.e. le bassin versant du barrage El Haouareb, que nous dénommerons par la suite le bassin versant du Merguellil.

1.2. Cadre scientifique de la thèse

1.2.1. Le projet MERGUSIE

Cette thèse s'inscrit dans le programme de recherche MERGUSIE (**ME**rguellil : **R**essources, **G**estion et **US**ages Intégrés de l'**E**au). Ce programme vise à enrichir les connaissances sur la variabilité de la ressource en eau et les modalités de ses usages dans la vallée du Merguellil. Cette région avait été identifiée par le gouvernement tunisien comme zone pilote pour améliorer la gestion de l'eau en milieu semi-aride, du fait de son caractère pleinement représentatif des problèmes de gestion de l'eau dans le bassin méditerranéen. Le programme MERGUSIE réunit plusieurs organismes partenaires tunisiens et français : la DGRE², l'INAT, le CRDA de Kairouan, la DGGR, l'ENIT, les universités de Tunis 1 et de Sfax et l'IRD. Ce programme couvre la période 1998-2007.

1.2.2. Orientations scientifiques du projet

Deux questions principales ont guidé les travaux de recherche réalisés dans le cadre du programme MERGUSIE : comment réduire la surexploitation de la nappe aquifère de Kairouan dans la zone aval, initiée dès 1985 ? Quelles sont les causes expliquant la réduction des écoulements observée depuis une vingtaine d'années dans la zone amont ? La première question a été traitée principalement par Feuillette (2001) qui s'est intéressée à la gestion de la demande en eau et aux interactions entre ressource et usages de l'eau et par Faysse (2001) qui a étudié l'influence des règles collectives d'allocation de l'eau sur les choix stratégiques des agriculteurs. Deux études principales ont tenté de répondre à la seconde question. Dridi (2000) a développé une approche basée sur la géométrie des

² Cf. annexe 7.1 pour l'explication des sigles.

1 INTRODUCTION GENERALE

aménagements de CES pour mesurer leur impact hydrologique à l'échelle du bassin versant. Elle a conclu que la réduction des écoulements dans la zone amont est égale à la proportion des surfaces aménagées. Kingumbi (2006) a modélisé les écoulements de surface et souterrains à l'aide d'un modèle physique maillé pluie-débit. Il a conclu que la réduction des écoulements observée dans la zone amont est principalement due à la réduction des débits d'étiage consécutive au rabattement des nappes alors que les aménagements de CES ont un impact hydrologique négligeable. L'étude développée dans le présent travail s'inscrit dans la thématique de recherche initiée par Dridi (2000) et Kingumbi (2006) qui ont révélé la difficulté à identifier clairement les processus à l'origine de la réduction des écoulements à l'amont du barrage El Haouareb.

1.3. Démarche

Deux approches sont conjointement développées. La première se positionne à l'échelle de chaque aménagement pour déterminer son fonctionnement hydrique, les modalités de valorisation de la ressource en eau qu'il fournit et son taux d'exploitation. La seconde approche se positionne au niveau du bassin versant du Merguellil et consiste à construire un modèle hydrologique structurellement adapté à la configuration spatiale du réseau de mesures hydrométéorologiques et à la répartition des zones aménagées. L'impact hydrologique des aménagements est ensuite étudié à l'aide de simulations pluie-débit. Enfin, une synthèse des résultats obtenus par les approches locale et régionale permet de caractériser l'impact des aménagements de CES sur la redistribution de la ressource en eau et de ses usages à l'échelle du bassin versant. Le développement de ce mémoire s'organise en quatre chapitres numérotés de 2 à 5.

Le chapitre 2 se subdivise en trois parties. La première présente le secteur agricole tunisien et les problèmes de gestion de l'eau dans le pays. La deuxième partie démontre l'importance du problème de l'érosion, des sécheresses et des stratégies de lutte adoptées dans les milieux semi-arides montagneux depuis l'antiquité puis retrace les principales étapes historiques de la gestion des eaux et des sols en Tunisie. La troisième partie décrit le site étudié en présentant les principaux aspects géomorphologiques, pédologiques et climatiques. Les pratiques agricoles de la région sont détaillées. Les aménagements de CES situés dans le bassin versant du Merguellil sont inventoriés et leurs caractéristiques physico-techniques sont présentées.

1 INTRODUCTION GENERALE

Le chapitre 3 caractérise le fonctionnement hydrologique de douze retenues collinaires et du barrage El Haouareb. Ces retenues collinaires ont été choisies pour leur proximité au bassin versant du Merguellil, leur conférant un caractère représentatif des aménagements non jaugés du site d'étude. La capacité des retenues collinaires à satisfaire les besoins en eau des cultures irriguées est estimée à l'aide d'une fréquence de défaillance obtenue par modélisation de la dynamique de stockage-déstockage des réservoirs.

Le chapitre 4 présente les modalités d'utilisation de l'eau stockée dans les retenues collinaires de la région étudiée à partir des résultats d'enquêtes réalisées en milieu paysan. Les surfaces et les cultures irriguées à partir de chaque retenue collinaire sont déterminées. Les volumes d'eau moyens apportés aux cultures sont estimés pour les principales productions agricoles irriguées. Cette analyse aboutit finalement à l'estimation des volumes moyens annuels prélevés dans chaque retenue collinaire du bassin versant du Merguellil. La cohérence entre les estimations des volumes prélevés obtenues par bilan hydrique et à partir des enquêtes est vérifiée.

Le chapitre 5 analyse l'impact hydrologique des aménagements de CES à l'échelle du bassin versant. Ce chapitre est subdivisé en trois parties. La première caractérise la modification de la relation pluie-débit induite par les aménagements de CES. La deuxième partie estime la proportion des écoulements produits dans le bassin versant et collectés par chaque catégorie d'aménagements de CES. Le bilan hydrique global de chacune de ces catégories d'aménagements est évalué. Enfin, la troisième partie intègre les résultats des deux premières. Elle caractérise la redistribution spatiale de la ressource en eau et de ses usages induite par les aménagements de CES dans le bassin versant du Merguellil.

2. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

2.1 L'agriculture et l'eau en Tunisie.....	20
2.2 Gestion de la lutte contre l'érosion des sols et contre la sécheresse.....	24
2.3 Site d'étude.....	34

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Après avoir présenté le contexte hydro-agricole tunisien (§ 2.1), ce chapitre souligne l'importance des actions de conservation des eaux et des sols à travers le monde et depuis les temps les plus anciens (§ 2.2). Le site d'étude est finalement présenté (§ 2.3).

2.1. L'agriculture et l'eau en Tunisie

La Tunisie compte 9,9 millions d'habitants en 2004. Le quart de la population vit de l'agriculture qui représente 16% du PIB (FAO, 2004).

2.1.1. Le secteur agricole

i. Historique depuis la prise d'indépendance du pays

Entre 1960 et 1980, le secteur agricole est délaissé par les politiques gouvernementales qui favorisent les industries orientées vers l'exportation. La plupart des agriculteurs pratiquent une agriculture traditionnelle de subsistance. La production alimentaire stagne alors que la population s'accroît. La dépendance alimentaire vis à vis de l'étranger augmente. De 1960 et 1980, la proportion des produits alimentaires importés passe de 30% à 70%. Au début des années 1980, la Tunisie souhaite préparer son entrée dans le marché international et ajuster les prix du marché intérieur aux prix mondiaux. Dans cette optique, le gouvernement met en place en 1986 un programme d'ajustement structurel qui prévoit le rétablissement de l'équilibre de la balance alimentaire et l'amélioration de la production agricole. Il vise la vérité des prix et la suppression progressive des subventions (Bachta Salah et Ben Mimoun, 2003). En 1990, le secteur agricole se porte globalement mieux avec cependant de grands écarts de réussite en fonction des produits. L'agriculture tunisienne reste toujours confrontée aux aléas climatiques et au déficit de la balance agricole et alimentaire. Parallèlement, les progrès techniques (utilisation d'intrants, accroissement des surfaces irriguées) augmentent les rendements.

ii. Principales productions agricoles du pays

En 2005, l'agriculture emploie 22% de la population active et représente en masse monétaire 9% des exportations. Le tiers de la surface du pays (5 millions d'hectares) est cultivé. Le reste est formé de steppes et de terres de parcours principalement pour le cheptel ovin. Environ 45% des surfaces cultivées sont réservées aux grandes cultures (céréales, fourrage, légumineuse), 52% reviennent à l'arboriculture et le reste (3%) est utilisé pour le maraîchage (Institut National de la Statistique, 2005). En 2004, ces surfaces ont respectivement produit 1,7 Mt de céréales, 2,2 Mt de produits maraîchers et 0,9 Mt de fruits issus de l'arboriculture. La figure 2 représente l'évolution de ces productions depuis 1961.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

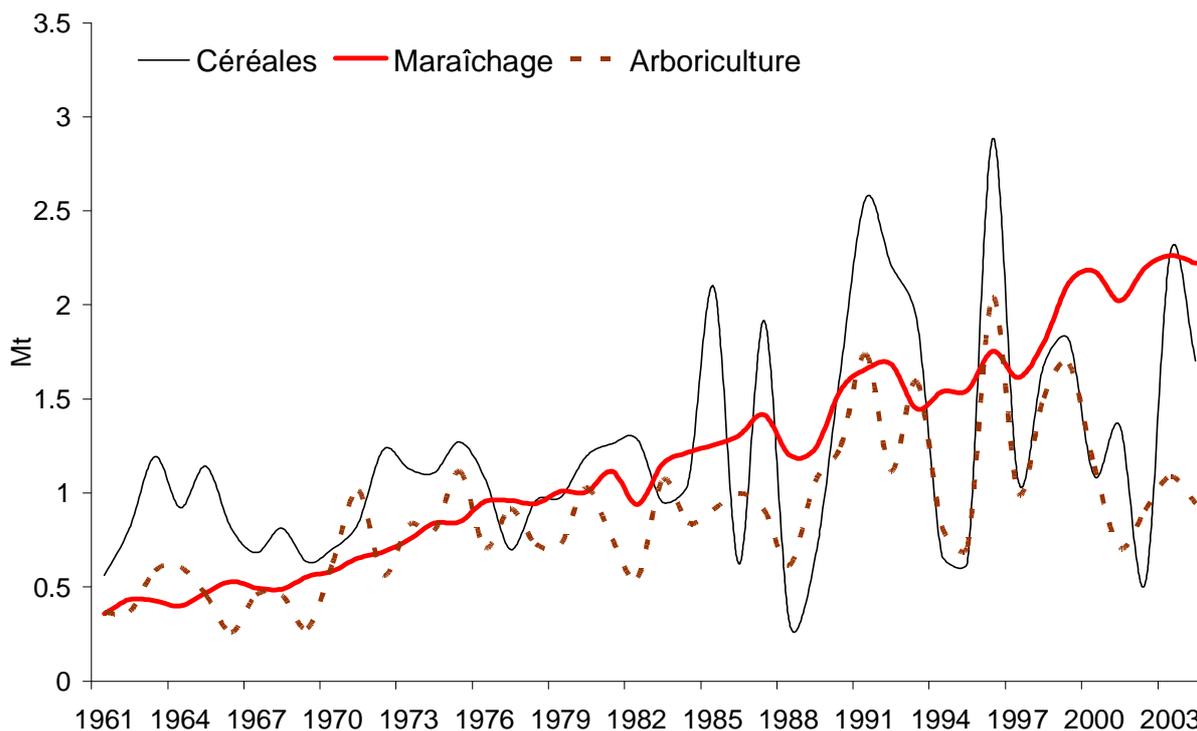


Figure 2. Evolution des principales productions agricoles tunisiennes (FAO, 2004).

Non irriguée, la production céréalière est irrégulière. En années sèches, les pertes sont considérables et réduisent souvent les rendements de plus de moitié. En 1988 et en 1995, années particulièrement sèches, la production céréalière n'a représenté que 15% des volumes normalement produits en années humides. La production maraîchère, issue de l'agriculture irriguée, est beaucoup moins sensible aux variations pluviométriques.

La majorité des variétés arbustives autre que l'olivier sont également irriguées (amandiers, abricotiers, pommiers, poiriers, pêchers, orangers, dattiers). L'olivier représente près de 50% des plantations (56 millions d'arbres). Les oliveraies sont majoritairement non irriguées. 57% des exploitations agricoles pratiquent l'oléiculture et 99% des oliveraies sont destinées à la production d'huile (Ministère de l'Agriculture et République Tunisienne, 1996). Sur les dix dernières années, la production d'olives représente en moyenne 13% du tonnage de l'ensemble des productions agricoles du pays et 4% de la production oléicole mondiale. 13% de la production oléicole tunisienne est exportée, contribuant à hauteur de 41% aux entrées de devises issues des exportations de produits agricoles.

En ce qui concerne l'élevage, la Tunisie a produit respectivement 7 et 1,4 millions de têtes d'ovins et caprins en 2004. Les bovins restent minoritaires avec 760 000 têtes (FAO, 2004).

iii. Importance de l'irrigation

Sur les cinq millions d'hectares cultivés, 360 000 (7,2%) sont irrigués. Ils représentent plus de 20% de la production agricole nationale. L'introduction de l'irrigation est le facteur principal de changement du monde rural. Elle s'accompagne d'un changement d'exploitation collective à l'appropriation privative et individuelle du sol avec une orientation de l'exploitation agricole vers l'arboriculture fruitière irriguée (les surfaces cultivées sont passées de 1 à 2 millions d'hectares entre 1960 et 2005). Ce développement entraîne des modifications déterminantes dans l'utilisation de la main-d'oeuvre agricole provoquant une forte diminution de la petite paysannerie (Picouet et al., 2006).

2.1.2. Ressource et gestion de l'eau

i. La ressource en eau

Il pleut en moyenne 313 mm/an en Tunisie (moyenne interannuelle de 1961 à 1990) soit 51,2 km³. Seulement 4,6 km³ sont accessibles et utilisables par la population soit 470 m³/habitant (FAO, 2004). Ils se répartissent entre les eaux de surfaces (2,7 km³) et les eaux souterraines (1,9 km³). Le reste (46,6 km³) retourne directement dans l'atmosphère par évapotranspiration ou rejoint la mer. La répartition géographique de la pluviométrie implique de forts déséquilibres entre un Nord très arrosé et un Sud désertique (figure 3). Les eaux de surface qui représentent près de 60% des ressources potentielles totales, sont réparties à 80% dans le Nord; tandis que 72% des ressources souterraines sont concentrées dans le Sud. Sur les 4,6 km³ de ressources annuelles renouvelables, 2,5 km³ sont utilisées : 82% pour l'irrigation, 16% pour les besoins domestiques et 2% pour l'industrie. 61% des eaux d'irrigation proviennent des aquifères, 37% sont issues des réservoirs de surface (barrages, lacs). 2% ont des origines non conventionnelles comme le retraitement des eaux usées ou le dessalement des eaux de mer (FAO, 2000).

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

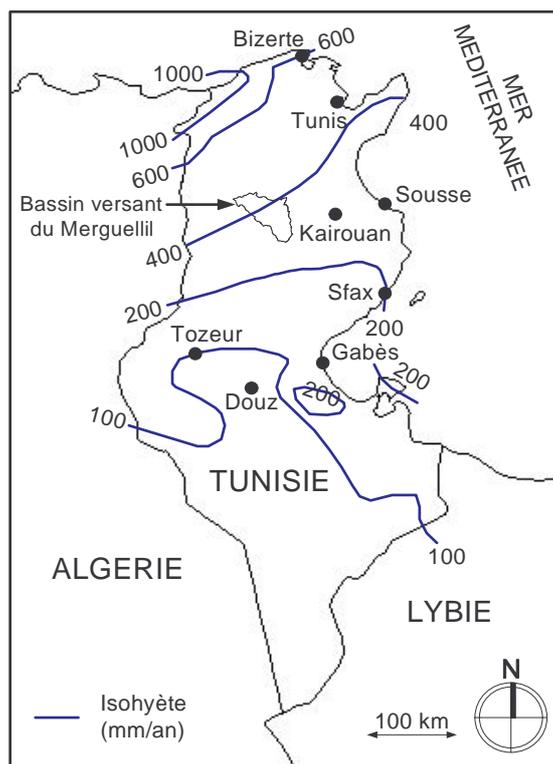


Figure 3. Répartition des pluies en Tunisie. D'après Sethom et Kassab (1981)

ii. La gestion de l'eau

Jusqu'en 1990, le ministère de l'agriculture est seul en charge de la gestion des ressources en eau du pays. Il mise sur la mobilisation des ressources disponibles avec la construction de grands barrages pour assurer le développement rural. Sur les 2,7 km³ de ressources renouvelables en eau de surface, 2,1 km³ sont stockés dans les ouvrages hydrauliques et seulement 0,8 km³ sont pompés pour l'irrigation. Les eaux de surfaces pourtant mieux adaptées à l'irrigation car moins salées, sont sous-exploitées car leur accès est plus onéreux.

Bien que la marge entre la demande en eau et les volumes disponibles globaux soit encore significative et garantisse un équilibre entre offre et demande pour la décennie à venir, une analyse plus fine des bilans hydrologiques à l'échelle régionale révèle déjà des situations de pénurie. Plusieurs nappes phréatiques sont surexploitées comme la nappe de Kairouan dont le niveau baisse continuellement depuis plus de 30 ans (Leduc et al., 2004). Le renouvellement naturel des réserves n'est plus assuré. Si la situation actuelle se poursuit, le rabattement continu de la nappe va accroître les discriminations sociales entre les agriculteurs riches qui auront les moyens d'accéder à l'eau à des prix devenus prohibitifs et les plus pauvres, marginalisés. Bien que l'Etat se soit officiellement engagé dans une politique de décentralisation, il reste le seul décideur.

2.2. Gestion de la lutte contre l'érosion des sols et contre la sécheresse

Sur les massifs tunisiens comme dans la plupart des milieux semi-arides montagneux, l'économie repose majoritairement sur l'agriculture. La production est conditionnée avant tout par la disponibilité en terre et en eau. Les sols, peu profonds, sont fragiles et sensibles à l'érosion : la faible teneur en matière organique associée à un couvert végétal peu dense les rend vulnérables à l'agressivité des pluies, particulièrement fortes en milieu semi-aride. Ils se désagrègent facilement et les couches superficielles sont entraînées avec les eaux de ruissellement. Quant aux besoins en eau des cultures, ils sont rarement totalement satisfaits par les apports pluviaux directs, sporadiques et inégalement répartis sur les cycles culturaux. Les cultivateurs ont de tout temps développé des techniques pour réduire l'érosion des terres cultivées et stocker l'eau de pluie soit directement dans les sols des cultures, en favorisant l'infiltration, soit dans des réservoirs collectant les eaux de ruissellement.

Avant de retracer l'histoire de la gestion des eaux et des sols en Tunisie, cette partie montre que la conservation des eaux et des sols a concerné l'ensemble des régions aux climats arides, semi-arides et méditerranéens, sur tous les continents, et sont encore largement répandues aujourd'hui. Comme nous allons le voir, les techniques anciennes, même si elles contribuent à réduire l'érosion, sont surtout destinées à collecter le ruissellement pour l'irrigation des cultures. L'érosion ne devient un véritable problème qu'avec l'accroissement démographique brutal du siècle dernier, obligeant les agriculteurs à exploiter les terres les plus fragiles.

2.2.1. Dans le monde

i. Asie et Moyen Orient

C'est dans cette région que l'on trouve les vestiges les plus anciens de techniques de collecte du ruissellement et plus particulièrement en Jordanie, en Israël, en Palestine, en Syrie, en Irak, au Yémen et en Arabie Saoudite. Les aménagements les plus anciens remonteraient à plus de 9000 ans (Evenari et al., 1971; Prinz, 1994; Esser, 1999). Dans le désert du Néguev, en Israël, les techniques de capture du ruissellement sont développées entre -300 et +650. Les versants sont organisés en micro-bassins au moyen de levées de terre, de cordons de pierres sèches et de cuvettes, chacun approvisionnant un arbre (Coffey, 2002). Des recherches ont montré que ces techniques étaient d'une très grande efficacité. L'épierrage des surfaces cultivées combiné à l'aménagement des impluviums aurait augmenté de 250% le ruissellement sur les surfaces dégagées, piégé plus en aval au niveau

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

de plantations d'arbres dont les rendements auraient significativement augmenté (Lavee et al., 1997). Parmi les aménagements les plus fréquents, on peut citer les qanâts³, les citernes, les terrasses irriguées, les cordons de pierres, les jardins clos par des murs de pierres et les canaux de captage du ruissellement (Roose, 2002c). Dans le Nord du Yémen, un système de diversion de crues datant de plus de 1000 ans avant J.C. était utilisé pour irriguer 20 000 ha de cultures alimentant près de 300 000 habitants (Adato, 1987). Dès le premier siècle après J.C., les yéménites construisent un grand nombre de petits réservoirs dans les vallées et en aménagent le long des pentes (Conac et al., 1983).

De nombreux aménagements, surtout des réservoirs, sont développés depuis plus de 2000 ans (Agarwal et Narain, 1997) en Inde. Au Pakistan, deux techniques principales étaient utilisées dans les anciens temps. Les premières « Khuskaba », diguettes construites en travers de la pente, étaient destinées à augmenter l'infiltration. Les secondes, « Sailaba », simples levées de terre, interceptaient les inondations provoquées par les cours d'eau (Oosterbaan, 1984). Au Sri Lanka, le développement de petits réservoirs destinés à l'irrigation a été particulièrement intense entre le 4^{ème} et le 13^{ème} siècle après J.C. L'estimation de leur nombre varie considérablement en fonction des sources. On en compte probablement plusieurs milliers. La plupart ont été abandonnés dès la fin du 15^{ème} siècle (Codrington, 1938).

ii. Afrique

Le Soudan est le pays qui présente probablement les techniques de collecte des eaux de ruissellement les plus nombreuses et les plus diversifiées en Afrique sub-saharienne (Critchley et al., 1992). Elles sont pratiquées depuis plusieurs siècles sur les massifs bordant la mer rouge et au nord-est du Soudan. Sans ces techniques, les populations n'auraient pu se développer dans ces régions arides (El Samani et Dabloub, 1996). Il s'agit principalement de puits creusés à la main le long du lit des oueds et destinés principalement aux usages domestiques et à l'abreuvement du bétail. Des digues construites en travers des oueds étaient utilisées pour irriguer les cultures par diversion et favoriser l'infiltration dans les lits sableux.

En Somalie, deux principales techniques ont été pratiquées depuis des temps immémoriaux. Il s'agit des « Caag » utilisés pour contenir le ruissellement en tête de bassins. Une succession de tranchés et de bourrelets de terre sont agencés de manière à

³ Qanât : drain souterrain se présentant sous la forme d'un tunnel légèrement incliné, utilisé pour récupérer les eaux d'infiltration et les conduire vers une parcelle située en contrebas.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

canaliser les écoulements vers les parcelles cultivées pouvant dépasser un hectare (Reij et al., 1988). Les « Gawan » sont utilisés sur les zones plates peu propices au ruissellement. Les parcelles sont quadrillées par des petites levées de terre, chaque case mesurant environ 500 m². Ce système permet de conserver les eaux de pluie au niveau des cultures, de sorgho le plus souvent, et permet souvent de doubler la récolte annuelle (Prinz, 1994).

Au Burkina-Faso, de petits ouvrages de stockage et de maîtrise des crues dans les bas-fonds ont été conçus et aménagés au début des années 1970. Ce sont des retenues de faible capacité (entre 10 000 et 25 000 m³) destinées à l'abreuvement des troupeaux, l'irrigation d'appoint et les usages domestiques (Selmi et Nasri, 1997). Au Zimbabwe, Zirebwa et Twomlow (1999) notent la présence de plus de 600 petits barrages construits dans les parties les plus sèches du pays.

En Afrique du Nord, des ouvrages destinés à stocker l'eau ou réduire l'érosion sont construits dès l'époque préromaine. Les berbères et les phéniciens développent les premières techniques encore construites aujourd'hui (meskats, jessours, mgouds). A l'époque romaine, les techniques préexistantes sont sauvegardées et enrichies⁴. En Egypte, des ruines témoignent de la longue tradition de techniques antiérosives de versants dans le Nord-ouest du pays et dans la partie nord du Sinaï (El Shafei, 1994). Au Maroc, les aménagements sont composés de terrasses, de gradins, de plates-formes terrassées individuelles et de cordons et murets de pierre (Al Karkouri et al., 2002; Naimi et Baghdad, 2002), de talus et de banquettes dans certains cas (Tribak, 2002). Des petites retenues ou *rdirs* aménagées par des associations d'éleveurs d'ovins et de caprins sont construites dans les régions à pluviométrie comprise entre 100 et 400 mm/an. En 1953, le pays compte plus de 200 retenues. A partir de 1985, des retenues collinaires sont construites par le gouvernement marocain dans le cadre d'un vaste programme étatique. En Algérie, c'est au lendemain de l'indépendance que le gouvernement envisage un grand programme d'édification de lacs collinaires sur l'exemple italien. Mais les études technico-économiques lancées à ce sujet révèlent les difficultés à atteindre les mêmes performances de stockage

⁴ Des recherches archéologiques conduites par l'UNESCO dans des vallées libyennes révèlent que la richesse du « grenier des romains » reposait largement sur les techniques de collecte des eaux de ruissellement. Des vestiges d'aménagements hydrauliques ont été dégagés dans des zones du désert libyen où le cumul annuel pluviométrique ne dépassait pas 50 mm. Ce système a duré plus de 400 ans et approvisionnait une large population sédentaire qui pouvait même stocker une partie des récoltes grâce au surplus. Ils produisaient de l'orge, du blé, de l'huile d'olive, du raisin, des figues et élevaient ovins et bovins (Gilbertson, 1986).

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

qu'en Italie. Les résultats s'avèrent rapidement décevants : envasement rapide, eau mal utilisée et coût relativement élevé. Malgré cet échec, l'Etat relance en 1985 un grand programme comprenant 700 lacs et 300 barrages collinaires (Selmi et Nasri, 1997). L'historique des techniques de CES propres à la Tunisie sera décrit en détail dans la partie 2.2.

iii. Amérique

Sur ce continent, les techniques de conservation des eaux et des sols se concentrent dans les zones semi-arides. Au Mexique, des techniques traditionnelles de diversion des crues sont pratiquées dans le désert de Sonora par les indiens Papagos et d'autres groupes (Prinz, 1994). Dans le Nord du pays, des petites retenues appelées « presones » ont été construites pour l'irrigation d'appoint et l'abreuvement du bétail. Elles demeurent largement sous exploitées (Estrada Avalos, 1999). Au Brésil et en particulier dans la région du Nord-est, la construction des premiers aménagements collinaires ou açudes remonte à 1830, suite aux sécheresses de la décennie 1820-1830 (Molle, 1991, 1992). Ils sont utilisés pour lutter contre l'irrégularité des écoulements et atténuer l'effet des sécheresses. A la fin du siècle dernier, le Brésil comptait 450 açudes de capacité supérieure à 1 Mm³ par état et plus de 70 000 petits réservoirs privés (Leprun et al., 1995). Ils ont permis le développement d'une petite agriculture irriguée. Leurs limites de fonctionnement résident essentiellement dans les risques d'assèchement, surtout pour les plus petits réservoirs au cours des mois où la demande en eau est la plus importante. La salinisation de l'eau accumulée dans les açudes constitue aussi une menace importante à la pérennité de la ressource (Cadier, 1991).

iv. Europe

Les techniques de gestion de l'eau et des sols sont surtout présentes dans le pourtour méditerranéen. L'Italie est le pays des retenues collinaires par excellence avant leur implantation dans le Maghreb. Les premières ont été construites par les américains à la fin des années 40. La priorité consistait à trouver une solution pour améliorer l'agriculture des collines du Piémont et de la Lombardie, dont le retard économique sur les exploitations irriguées de la plaine du Pô ne pouvait que s'accroître. Les italiens poursuivent ces travaux en construisant des petits barrages en terre de quelques dizaines de milliers de mètres cubes de capacité pour la micro irrigation. En 1953, un office est créé pour promouvoir le développement des lacs collinaires dont le développement est favorisé par des conditions naturelles propices. En 1969, l'Italie comptait plusieurs milliers de retenues collinaires, permettant de collecter quelques 10 millions de mètres cubes (Carbonnières, 1969). Au Portugal, les principaux aménagements sont des murets de pierres sèches permettant la culture du maïs et du raisin, en terrasses. Les terres sont irriguées par des canaux ouverts

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

courant sur les versants, alimentés par des puits ou des cours d'eau grâce à des norias. La présence de nombreux réservoirs date de l'époque romaine (Coelho et al., 2002). En Espagne, et principalement dans le Sud du pays, les agriculteurs ont développé des techniques de lutte contre l'érosion depuis les temps les plus anciens. Parmi la variété des techniques existantes, trois principales catégories sont identifiables et sont implantées chacune dans une partie spécifique du bassin versant. En tête de bassin les « canada » collectent le ruissellement au niveau des talwegs. Les « boquera », petites digues en terre, dévient les écoulements issus des versants non cultivés vers les parcelles agricoles. La troisième catégorie d'aménagement se rencontre à proximité des exutoires des bassins versants. Il s'agit de digues en pierre concentrant les écoulements vers des canaux qui les acheminent vers des périmètres irrigués (Giraldez et al., 1988). Dans le Sud-est du pays, les « aljibes » sont des citernes enterrées dans lesquelles se déversent les écoulements collectés sur des versants (Van Wesemael et al., 1998). En France, les techniques traditionnelles de gestion de l'eau et des sols concernent surtout le Sud-est du pays : les citernes et les lavognes dans les garrigues du Languedoc, les terrasses sèches de l'Ardèche (accole, traversier), les terrasses irriguées (restanques) des Cévennes et les terrasses drainées (peixes) du vignoble de Banyuls-Collioure sur schistes (Roose, 2002e). Des lacs collinaires sont surtout présents sur les coteaux de Gascogne et les marges pyrénéennes d'une façon générale (Selmi et Nasri, 1997).

2.2.2. En Tunisie

i. Avant la présence française

Les ruines berbères de murs de pierre construits sur les versants attestent des anciennes techniques de collecte des eaux de ruissellement destinées à l'irrigation des plantations arbustives. Avant la colonisation française, les aménagements de CES sont construits et gérés par les populations paysannes.

ii. Pendant l'occupation française

Jusqu'au milieu du 19^{ème} siècle, l'agriculture se caractérise par un système d'élevage extensif sur des terres communes. Avec l'arrivée des colons, l'irruption d'une économie de marché, de nouveaux modes de vie (sédentarisation des populations) et de gestion des ressources naturelles se traduit par une accélération des phénomènes de dégradation des sols. L'agriculture céréalière se développe (Elloumi et al., 1991; Roose, 2002b). La fonctionnalité des structures sociales précoloniales en rapport à la gestion de l'eau, du sol, des parcours s'effrite progressivement. Les colons s'approprient les meilleures terres (700 000 ha). L'agriculture traditionnelle se replie sur les terres les moins bonnes et les plus

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

sensibles à l'érosion (parcours, zones de montagne). De nombreux équilibres sont rompus. L'intensification des systèmes de production est la priorité et les actions de restauration des ressources naturelles sont délaissées, (voir les travaux de Lamary (1992)).

A partir de 1940, l'érosion devient un problème sensible. Les forestiers sont chargés d'associer les techniques de restauration des terrains de montagne et de conservation des eaux et des sols. Ils s'emploient à reboiser les hautes vallées, à corriger les ravines et les torrents et à aménager des banquettes sur les terres cultivées dégradées par l'érosion hydrique. Jusqu'en 1950, les particuliers procèdent aux travaux d'aménagement à leur frais. L'administration ne peut intervenir qu'après acquisition ou expropriation du terrain pour cause d'utilité publique. Les surfaces traitées sont donc peu importantes et presque entièrement prises en charge par les agriculteurs. Les aménagements consistent essentiellement en des cordons de pierres sèches prélevées localement et construits à la main. A partir de 1950, des subventions de l'Etat sont accordées aux agriculteurs pour les encourager à participer à la construction des aménagements anti-érosifs. L'administration s'organise pour exécuter des travaux à plus grande échelle. Des incitations fiscales encouragent les propriétaires à se regrouper, ce qui permet d'intervenir sur de plus grandes surfaces d'un seul tenant. Les retenues collinaires sont introduites au début du XX^{ème} siècle dans la région de Bizerte dont le climat méditerranéen humide est jugé propice à la valorisation de ces aménagements. De petite taille, elles sont entièrement construites en terre, par les populations locales, avec des moyens techniques sommaires (Selmi et Nasri, 1997).

iii. A l'indépendance

Lorsque la Tunisie retrouve son indépendance en 1956, l'administration centrale développe une stratégie de « défense et restauration des sols » imposant le reboisement des hautes terres dégradées. Le service de conservation des eaux et des sols (CES), section de la direction de l'hydraulique, est chargé d'introduire en milieu rural des équipements de petite hydraulique (terrasses et correction torrentielle). Le chômage est alors l'une des préoccupations majeures du gouvernement. Les travaux de CES sont identifiés comme une source d'emploi pour absorber une main d'œuvre abondante.

En 1958, la Tunisie adopte une loi organisant la réalisation des projets CES et leur suivi, sanctionnant les défaillants. La multiplication des chantiers vise la mobilisation des populations rurales. Cependant, les sols continuent d'être violemment sollicités du fait de la pression démographique, l'emploi d'une mécanisation inadaptée et le surpâturage. Comme dans la plupart des pays sous développés, la stratégie de développement adoptée par la

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Tunisie dans les années 60-70 est centrée sur un Etat fort doté d'institutions technico-administratives en charge de la gestion des différents équilibres macro-économiques, socio-économiques et écologiques. En matière de CES, l'Etat multiplie les programmes et projets régionaux. Entre 1968 et le début des années 1980, un programme tuniso-américain permet la construction d'une quarantaine de lacs collinaires dispersés sur toute la zone semi-aride du pays entre les gouvernorats de Nabeul au Nord et de Kairouan au sud.

La multiplication des institutions étatiques, introduites après le départ des colons pour combler le vide institutionnel, déstructure et marginalise les structures sociales traditionnelles. Les populations ne sont pas impliquées dans les programmes de conservation des ressources, ceux-ci étant conçus dans le cadre de projets élaborés, exécutés et financés par l'Etat. La logique n'obéit plus aux principes traditionnels partagés par les paysans et visant l'amélioration de la productivité de la terre et du travail en concentrant la biomasse et la fertilité sur les terres cultivées et en protégeant les sols contre divers types d'érosion. Le nouvel objectif, partagé par les consommateurs d'eau, les citadins et les industriels consiste à protéger la qualité des eaux et les aménagements construits par l'Etat (aménagements des vallées, réseau routier, ouvrages d'art et villes) en réduisant les transports solides (Roose, 2004).

En 1971, et jusqu'en 1983, le service de CES devient une sous-direction de la direction des forêts dont le rôle essentiel est de poursuivre l'aménagement des bassins versants et de reboiser les hautes vallées pour protéger les barrages menacés d'envasement. Face à l'opposition paysanne contre les techniques d'interventions jugées trop brutales et inadaptées, seuls les terres domaniales et les domaines forestiers sont aménagés. Il s'agit principalement de reboisements, de terrassements manuels, de plantations pastorales, de constructions de lacs collinaires, de l'entretien des pistes et des cours d'eau. A partir des années 80, l'aménagement des terres cultivées est à nouveau envisagé. Les autorités modifient leurs méthodes d'interventions et n'agissent qu'avec le consentement préalable des paysans, au prix d'éventuels dédommagements. Au cours des années 80, les enjeux de développement et les priorités changent. Les programmes de grande hydraulique sont privilégiés avec la construction des barrages de Sidi Saad sur le Zéroud (1982) puis d'El Haouareb sur le Merguellil (1989), qui permet de protéger la plaine de Kairouan des inondations et d'y installer des périmètres irrigués.

iv. Depuis les années 1990

Jusqu'en 1990, le nombre de lacs collinaires réalisés dans le pays grâce aux investissements de l'Etat est estimé à 87. Ils permettent de retenir théoriquement 5 Mm³ d'eau par an. En 1990, la Direction de la Conservation des Eaux et des Sols du ministère de l'agriculture tunisien planifie une stratégie décennale (1991-2000), prévoyant l'aménagement en banquettes des versants et la réalisation de 1000 lacs collinaires sur la dorsale tunisienne, sur financements européens et tunisiens. Les objectifs sont de natures conservatoire (protection des versants et des aménagements hydrauliques aval) et économique (développement des zones montagneuses naturellement défavorisées). Le gouvernement remarque que les aménagements antiérosifs ne peuvent être durables sans l'implication paysanne. Il souhaite faire participer davantage les paysans aux travaux de conservation et employer des entreprises privées pour sous-traiter les travaux mécaniques de terrassement. Le but est d'intégrer la lutte antiérosive au développement rural (Roose, 1994) et surtout d'alléger les charges financières de l'Etat en laissant plus de place à l'initiative privée. Ces actions sont sensées conduire à une meilleure appropriation des aménagements par les paysans afin qu'ils prennent en charge les travaux d'entretien et qu'ils les intègrent dans leur activités agricoles en adaptant notamment leur pratiques culturales. Ces méthodes empruntées aux programmes d'ajustements structurels de la politique agricole apparaissent pour les responsables comme des passages obligés et réalisables sans difficultés. Cependant, le document de stratégie décennale de la CES (1991-2001) ne prévoit pas comment atteindre ces objectifs et les travaux de recherche-développement relatifs à ces thèmes sont inexistant. L'approche « participative » se réduit aux principes de motivation (conviction de l'intérêt général des travaux) et de responsabilisation des paysans. Elle s'arrête au stade de la négociation de l'acceptation de l'ouvrage projeté. Les techniciens du développement et notamment ceux de la CES, chargés de mettre en œuvre les éléments de la stratégie, ne possèdent généralement pas les moyens techniques et humains nécessaire à la mise en œuvre de cette approche nouvelle. Ils conservent une vision très réductrice des réalités agricoles qu'ils appréhendent d'un point de vue techniciste (Selmi, 2000). Bien qu'ils soient évoqués dans les programmes étatiques, les ajustements institutionnels devant conduire à une plus grande participation des paysans ne sont pas explicites.

Parallèlement aux actions nationales, les projets de développement financés par des bailleurs internationaux et consacrés à la sauvegarde des ressources naturelles se multiplient à partir du milieu des années 90 (EUROMED Partnership, 2001; Roose, 2002d). Les programmes énoncent la nécessité de favoriser un développement rural viable dans les

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

pays tiers méditerranéens (PTM) pour faciliter leur ouverture aux marchés internationaux dans le cadre de la globalisation des échanges commerciaux. En 1995, les accords de Barcelone définissent le cadre du partenariat entre l'Union Européenne (UE) et les PTM et fixent les grands objectifs de la coopération dans le domaine du développement rural : lutte contre la pauvreté, emploi et stabilisation des populations rurales. L'objectif ultime est de sécuriser les productions agricoles et les approvisionnements alimentaires pour faciliter la transition vers une économie de libre échange à l'horizon 2010 (EuropeAid, 2003).

Ces projets affichent la volonté de développer une approche participative impliquant les populations dans les processus d'identification et de programmation de leurs priorités de développement. Ils doivent s'accompagner du désengagement progressif de l'Etat. Pour atteindre ces objectifs, les programmes proposés prévoient la mise en place de structures locales hiérarchisées : conseils consultatifs de développement des Imadas et des délégations, unités de gestion de projet (FIDA, 2004). Cependant, la réalisation des projets coïncide rarement avec les objectifs projetés. La mise en œuvre de l'approche participative se heurte aux contraintes de temps imposées par les programmes de développement qui souhaitent voir des transformations rapides du paysage en quelques années (Roose, 2004). Ces délais sont trop courts pour que les changements soient acceptés et intégrés aux pratiques des communautés locales. Batchelor (1985) montre que même si les agences de développement sont conscientes du temps nécessaire à l'acceptation d'un projet, la pression imposées par les bailleurs, qui exigent une rentabilité à court terme, oblige à réduire les laps de temps pour la réalisation des programmes. Reij (1991) souligne la tendance des gouvernements et bailleurs de fonds à favoriser les résultats rapides incompatibles avec la prise en compte des perceptions locales.

Pour répondre à certaines pressions et conjonctures régionales, les autorités locales renforcent leur emprise sur les programmes grâce à leur personnel CES (Lamary, 1992). Les actions engagées privilégient les réalisations physiques au détriment des approches participatives. Ainsi l'évaluation à mi-parcours en mars 2004 d'un projet prônant l'approche participative dans le gouvernorat de Siliana révèle que le taux de réalisation d'aménagements en banquettes est de 157% par rapport aux prévisions initiales alors que le nombre de sites où l'approche participative devait être promue a été revu à la baisse (FIDA, 2004). L'approche participative apparaît donc plus comme un leitmotiv utilisé par les Etats

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

pour obtenir une aide financière des bailleurs de fonds (Chéret, 2004), voire pour masquer un mode de gestion reposant sur un pouvoir central fort⁵.

Entre 1990 et 2000, 640 retenues collinaires ont été construites dans le pays, soit davantage qu'au cours des 90 années précédentes. En 2007, le pays en compte plus de 700. En 2000, les banquettes et quelques autres techniques anti-érosives couvrent plus d'un million d'hectares dans le pays. Elles sont réparties sur l'ensemble de la dorsale tunisienne (CES, 1999). En accroissant localement la ressource en eau et en protégeant les sols de l'érosion, ces aménagements sont sensés stabiliser, voire augmenter la production agricole des régions les plus défavorisées.

⁵ Le terme « approche participative » utilisé dans les programmes de développement sert souvent à cacher la véritable nature « top-down » des projets, les faisant apparaître comme des approches « bottom-up ». Ceci permet d'atténuer les critiques et d'attirer l'assistance technique et les capitaux occidentaux (Tsering, 2005).

2.3. Site d'étude

Le site d'étude est localisé dans la région des steppes de Tunisie centrale, sur le versant sud de la dorsale. Il est constitué du bassin versant du barrage El Haouareb, dénommé par la suite bassin versant du Merguellil (figures 3 et 4), situé entre les latitudes 35°25'40" Nord et 35°51'10" Nord et les longitudes 9°09'00" Est et 9°46'30" Est, et de douze retenues collinaires dont neuf sont situées à l'extérieur du bassin versant de l'oued Merguellil (figure 18), s'étendant entre les latitudes 35°14'24" Nord et 36°05'37" Nord et les longitudes 9°00'14" Est et 9°50'42" Est. Le bassin versant du Merguellil et les douze retenues collinaires du réseau HYDROMED sont présentés respectivement dans les parties 2.3.1 et 2.3.2.

2.3.1. Le bassin versant du Merguellil

Dans le cadre de notre étude, le bassin versant du Merguellil correspond au bassin versant du barrage El Haouareb (9°45'0" Est ; 35°34'8" Nord), construit en 1989 pour protéger la ville de Kairouan, située à 35 km à l'Est du barrage, des inondations causées par les crues de l'oued Merguellil (Guillaud et Trabelsi, 1991). Les crues survenues en 1969 avaient été particulièrement destructrices (Lafforgue et Eoche Duval, 1971). Par la suite, ce barrage s'est avéré être le point de recharge principal de la nappe de Kairouan (Kingumbi et al., 2004), largement exploitée pour l'irrigation (plus de 50 000 ha de cultures) (Feuillette, 2001) et l'alimentation en eau potable des villes côtières.

i. Environnement physique

Le contour du bassin versant du Merguellil a été déterminé à partir de dix cartes topographiques (1 :50 000) de la région⁶. Il couvre une superficie de 1183 km². Les altitudes sont comprises entre 200 m (barrage El Haouareb) et 1226 m (djebel⁷ Barbrou). Il est orienté selon un axe nord-ouest sud-est correspondant à la direction des vents dominants (Bouzaiane et Lafforgue, 1986). L'extraction des courbes de niveau distantes de 100 m à partir des cartes topographiques⁶ a permis de constituer une carte du relief du bassin versant (figure 4) sur laquelle figurent les noms des principaux oueds, djebels et villes de la région ainsi que les stations de mesure utilisées pour décrire le climat de la région.

⁶ Nom des cartes : Makthar, Kesra, Ousletia, Ain Jeloula, Ar Rouhiaya, Gabit Kesra, Haffouz, Ash Shbika, Hajibal Ayoun et Nasraalah.

⁷ Djebel = montagne.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

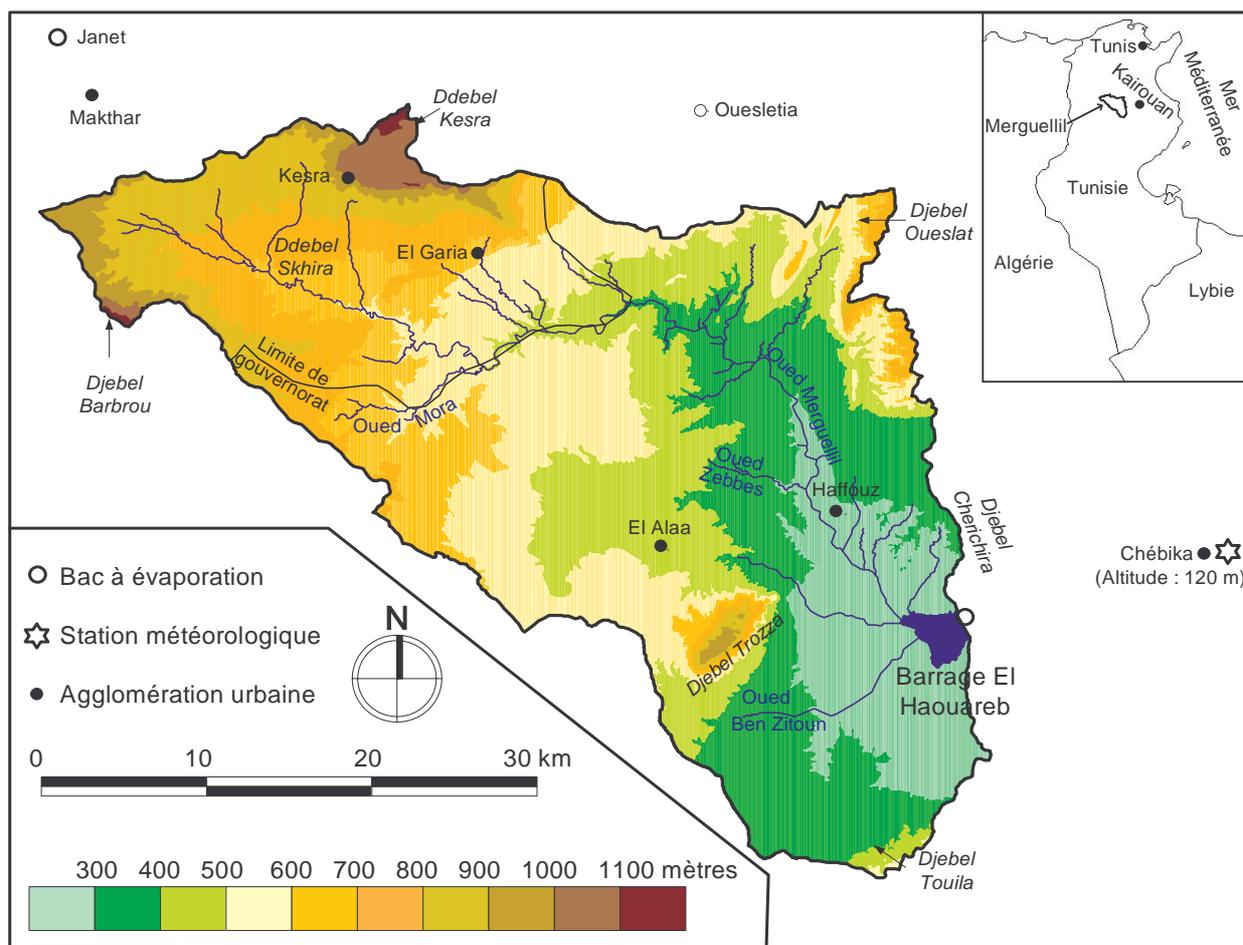


Figure 4. Carte physique du bassin versant du Merguellil. La limite de gouvernorat sépare les gouvernorats de Siliana au nord et de Kairouan au sud.

Géomorphologie et géologie

Dans la partie nord du bassin versant, la dorsale s'étend sur 190 km² de l'amont du bassin (djebel Kesra et djebel Barbrou) jusqu'aux escarpements d'El Garia et du djebel Skhira. Les altitudes s'échelonnent entre 700 m et 1226 m. Le relief de cette zone est assez accidenté. De nombreux affluents ont creusé leurs lits à travers des roches calcaires et marneuses relativement tendres, créant par endroit des escarpements surmontés par quelques sommets (Hamza, 1983). La partie centrale du bassin versant constitue un ensemble pratiquement plat s'étendant sur 300 km², constitué de plaines et de plateaux faiblement disséqués limités au sud par l'oued Mora. Enfin, dans la partie la plus aval du bassin, les hautes steppes couvrent 680 km² à une altitude comprise entre 200 m et 400 m. Elles correspondent aux piedmonts sud et sud-ouest des djebels Oueslat et Trozza et au piedmont nord du djebel Touila. Dans cette partie, le bassin versant est limité à l'Est par le djebel Cherichira et la plaine de Kairouan.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Le bassin du Merguellil présente une large gamme de pentes. Les terrains plats (0 à 5°), situés dans le centre, prédominent (80 % de la superficie du bassin). Les faibles pentes (5° à 10°) sont localisées dans la région d'El Alaa, de Haffouz et des piedmonts du djebel Oueslat. Les pentes supérieures à 10° sont situées dans la partie ouest du bassin et au niveau des djebels Trozza et Oueslat.

La géologie du bassin versant du Merguellil est complexe. Elle est majoritairement composée de formations sédimentaires calcaires, marnocalcaires et marneuses du crétacé et de l'éocène (Ouali, 1985; Bouzaiane et Lafforgue, 1986; Chadly, 1992). La formation la plus ancienne date du Trias. A la suite d'un soulèvement structural, la région a subi une succession de failles et de plissements. Entre les djebels Oueslat, Trozza et Barbrou, des affleurements gréseux sont entrecoupés et drainés par l'oued Merguellil (à proximité d'El Alaa). Les types de terrains affleurants sont multiples. Le crétacé affleure au sud-est sur les flancs du djebel Chérichira et au cœur du djebel Trozza. Le sénonien inférieur constitue l'assise de la forêt de Kesra. Le sénonien supérieur se présente sous forme de plusieurs faciès calcaires. Il affleure au niveau du djebel Skhira. L'éocène est caractérisé par des marnes et par des calcaires à nummulites. Le paléocène affleure au niveau du djebel Skhira. Il est formé de marnes sombres en transition entre le Maestrichtien et le Paléocène. Ces formations superficielles généralement compactées favorisent le ruissellement. L'oligocène comprend deux séries : à la base, des alternances de marnes et de grès à nummulites sont surmontées d'une série continentale de grès azotiques grossiers. Ce sont des massifs très perméables situés essentiellement au centre du bassin. Le pliocène affleure en une terrasse calcaire, au sud du djebel Oueslat. Le quaternaire comprend essentiellement des limons, des sables, des argiles, des cailloutis, et des croûtes calcaires localisés essentiellement dans le haut bassin, le sous-bassin de Zebbes et à proximité du barrage d'El Haouareb (Ouali, 1985; Bouzaiane et Lafforgue, 1986; Chadly, 1992).

Les sols

Les sols présents dans le bassin versant du Merguellil sont constitués essentiellement de la décomposition de la roche mère. La teneur en humus et en complexes argilo humiques est faible, en rapport avec la faible densité du couvert végétal. Exposés à une érosion très forte, ils sont peu évolués et de faible épaisseur. Une carte des sols du bassin du Merguellil, élaborée à partir des travaux de Barbery et Mohdi (1987) et de Mizouri et al. (1990) montre l'existence de quatre principales entités pédologiques : des sols peu évolués, des sols d'association, des sols calcimagnésiques et des sols isohumiques.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

- **Les sols peu évolués** ont deux origines possibles : érosive et d'apports. Il existe plusieurs types de sols peu évolués dans le bassin versant du Merguellil. Les sols argileux sont lessivés en surface par le ruissellement, laissant sur place un couvert pierreux souvent très dense. Les sols à dominante calcaire sont de type squelettique sur roche calcaire fissurée, présentant par endroit des fosses de dissolution. Les sols minéraux bruts se rencontrent sur les affleurements calcaires et grésocalcaires. Les sols d'apports à texture fine sont souvent halomorphes. Ces sols sont localisés principalement dans le centre et dans la partie aval du bassin versant. Couvrant une superficie de 490 km², les sols peu évolués constituent la plus grande couverture du bassin du Merguellil.

- **Les sols d'association** sont constitués de marne, sable, grès et affleurements rocheux. Ils sont également peu évolués et peu propices à l'agriculture. Ces sols sont présents sur les versants des djebels Kesra, Oueslat et sur le plateau d'El Alaa. Ils sont généralement recouverts de forêt. Avec les sols peu évolués, les sols d'associations constituent la quasi-totalité de la couverture du bassin du Merguellil, avec une superficie de 570 km².

- **Les sols calcimagnésiques** sont de type rendzine, brun calcaire ou régosols minces. Ils reposent sur le substrat calcaire des djebels. Peu profonds, ils sont constitués de croûtes calcaires, d'éboulis, de colluvions et de sables (Barbery et Mohdi, 1987). Ces sols occupent une superficie d'environ 138 km². Ils sont présents au niveau de l'extrémité amont du bassin versant et au voisinage nord de Haffouz.

- **Les sols isohumiques.** Sableux, ces sols sont de type bruns sub-arides (Barbery et Mohdi, 1987). Ils sont particulièrement sensibles à l'érosion. Ils sont souvent associés à des sols sur croûte gypseuse beaucoup plus minces, utilisés pour la céréaliculture. Ils sont localisés dans la partie sud du bassin (Mtimet et Dérouiche, 1996; Mtimet et al., 1997). Ils couvrent une superficie d'environ 92 km².

Les terres propices à l'agriculture (pente < 4%, sols de bonne qualité) sont surtout présentes dans la région d'El Alaa et entre le barrage d'El Haouareb et le djebel Trozza. Les terres les plus médiocres, sur roches et/ou sur forte pente, se rencontrent sur les djebels Trozza et Kesra. Elles sont réservées au pâturage.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Climat

Le bassin versant du Merguellil appartient à une zone de transition climatique entre le nord du pays, sous influence méditerranéenne avec des vents dominants venant du nord, relativement frais et humides, et la zone présaharienne au sud, chaude et aride. Entre ces deux zones, la dorsale tunisienne s'étend sur un axe Ouest Sud Ouest – Est Nord Est. Sa présence accentue la brutalité de la transition climatique en arrêtant les vents dominants du nord.

Ø Pluviométrie

Parmi la trentaine de stations pluviométriques de la région, quatorze pluviomètres fournissant des mesures journalières sont sélectionnés pour décrire la pluviosité du bassin versant du Merguellil (tableau 1). Ils sont choisis en fonction de leur localisation (pour assurer une couverture régulière de la zone étudiée) et des chroniques de données disponibles. Le réseau sélectionné permet de couvrir la période 1979-2005 commune à toutes les stations, suffisamment longue pour que chacune des stations soit représentative de la pluviosité moyenne annuelle de sa sous région.

Tableau 1. Pluviomètres utilisés pour décrire la pluviosité du bassin versant du Merguellil.

Stations pluviométriques	Latitude		Longitude		Altitude		Chronique de mesure	
	degré nord	km	degré est	km	mètre	Début	Fin	
Haffouz	35° 38' 10"	561	9° 40' 9"	3 943	270	1945	2005	
Skhira	35° 44' 23"	535	9° 23' 3"	3 955	600	1975	2005	
Kesra	35° 48' 46"	533	9° 21' 53"	3 964	1060	1967	2005	
El Garia	35° 45' 59"	540	9° 26' 49"	3 958	600	1979	2005	
El Alaa	35° 36' 55"	550	9° 33' 29"	3 940	490	1959	2005	
Oueslatia	35° 50' 48"	554	9° 35' 25"	3 967	485	1961	2005	
Sidi Saad	35° 23' 36"	562	9° 41' 47"	3 914	270	1924	2005	
Makthar	35° 51' 10"	518	9° 12' 14"	3 967	900	1900	2005	
Haouareb	35° 34' 8"	568	9° 45' 0"	3 936	230	1929	2005	
Hajeb El Ayoun	35° 23' 49"	550	9° 32' 45"	3 917	340	1979	2005	
Chébika	35° 37' 15"	584	9° 55' 37"	3 942	120	1979	2005	
Cherichira	35° 38' 14"	576	9° 50' 13"	3 944	260	1976	2005	
Sidi Ali Nasrallah	35° 21' 10"	575	9° 49' 47"	3 912	160	1977	2005	
Trozza	35° 31' 54"	553	9° 34' 55"	3932	450	1975	2005	

La variabilité spatiale de la pluviométrie est analysée à partir des moyennes interannuelles des pluies annuelles sur la période 1979-2005. Sur les 14x27 station.année, sept sont incomplètes (1985 et 1986 à Makthar, 1986, 1987, 1994, 1995 et 1996 à El Haouareb). Les pluies annuelles sont estimées par régression linéaire à partir des stations les mieux corrélées : Makthar avec Ouesletia ($R = 87,7\%$) et Haouareb avec Haffouz ($R = 95,7\%$). Les moyennes et écarts-types interannuels sont reportés sur la figure 5.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

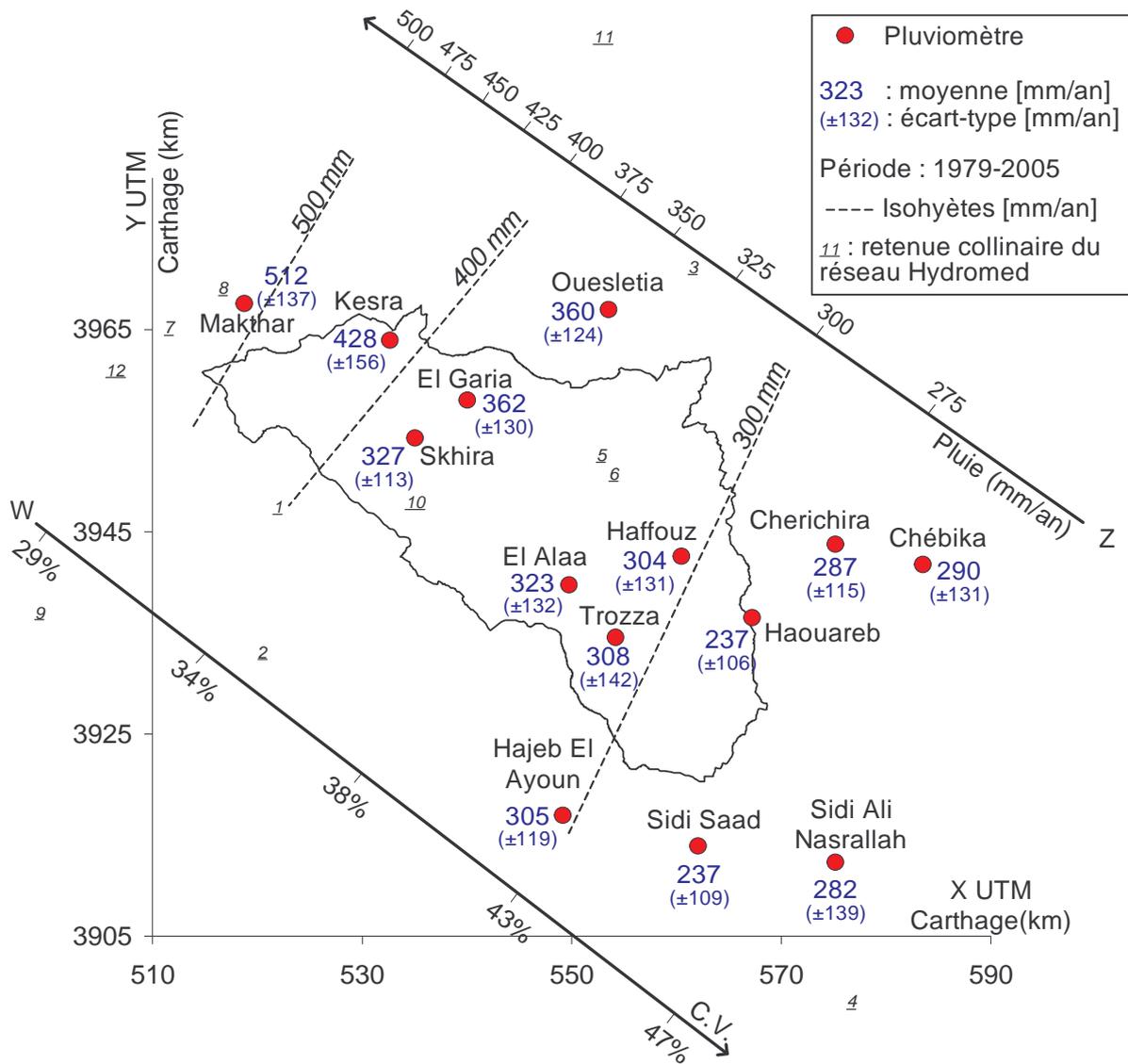


Figure 5. Pluviométrie moyenne annuelle dans la région du Merguellil. Axes obliques : gradients pluviométriques (axe Z) et des coefficients de variation (axe W).

Des régressions linéaires multiples (équations 1 et 2) sont réalisées pour caractériser la variabilité spatiale de la pluie moyenne annuelle et de son coefficient de variation. Les variables exogènes sont les coordonnées géographiques des stations.

équation 1. $P (=Z) = -2,26 \times X + 1,62 \times Y - 4800,60$; $R = 87,7\%$.

équation 2. $CV (=W) = 1,86 \times 10^{-2} \times X - 1,45 \times 10^{-2} \times Y + 5,07$; $R = 93,0\%$.

P : pluie moyenne annuelle sur la période 1979-2005 [mm/an],

CV : coefficient de variation de la pluie moyenne annuelle [adimensionné],

X : longitude en projection UTM Carthage [km],

Y : latitude en projection UTM Carthage [km].

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Les équations 1 et 2 montrent que la pluviométrie annuelle et sa variabilité interannuelle augmentent et diminuent respectivement du Sud-est vers le Nord-ouest, suivant un gradient dont la direction et le sens sont donnés par les axes Z et W sur la figure 5, de coefficients directeurs $Y/X = -1,72$ pour la pluie et $Y/Z = -1.78$ pour le coefficient de variation.

La figure 6 représente les valeurs observées des pluies moyennes annuelles et de leur coefficient de variation en fonction des valeurs estimées (Z et W) respectivement à partir des équations 1 et 2. La figure 6 A indique que le gradient de pluie sur l'axe Z suit une croissance parabolique du Sud-est vers le Nord-ouest selon l'équation 3. Le gradient du coefficient de variation (figure 6 B) est approximativement linéaire sur l'axe W.

équation 3. $P = 4,80 \times 10^{-3} \times (Z - 229,94)^2 + 262,10$

P : pluie moyenne interannuelle sur la période 1979-2005 [mm/an],

Z : variable calculée à partir de l'équation 1 [$2,78 \times \text{km}$].

En remplaçant Z dans l'équation 3 par son expression en fonction de X et Y (équation 1), nous obtenons l'équation 4 qui permet de calculer la pluie moyenne annuelle en tous points de coordonnées (X, Y) de la région du bassin versant du Merguellil avec une excellente précision (R = 93,7%).

équation 4. $P = 4,80 \times 10^{-3} \times (-2,26 \times X + 1,62 \times Y - 5030,54)^2 + 262,10$

P : pluie moyenne sur la période 1979-2005 [mm/an],

X : latitude en projection UTM Carthage [km],

Y : longitude en projection UTM Carthage [km].

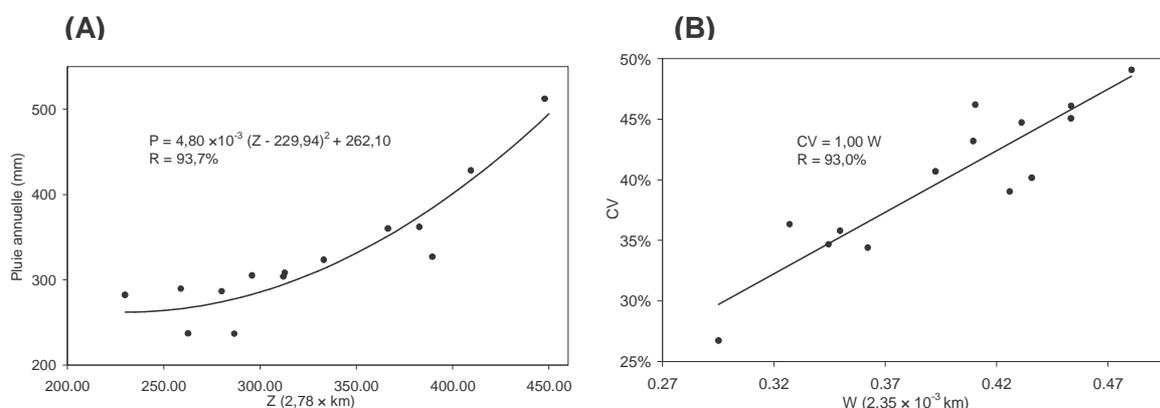


Figure 6. Pluies moyennes annuelles (A) et leur coefficient de variation (B) sur les axes de leur gradient.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Le gradient pluviométrique s'explique par l'action combinée de l'altitude (la pluie annuelle augmente en moyenne de 23 mm par dénivelé de 100 m (figures 4 et 7)) et par l'aridité du climat, croissante vers le Sud (figure 3). L'augmentation de la variabilité interannuelle de la pluviométrie vers le Sud-ouest est une conséquence directe de la réduction de la pluviosité.

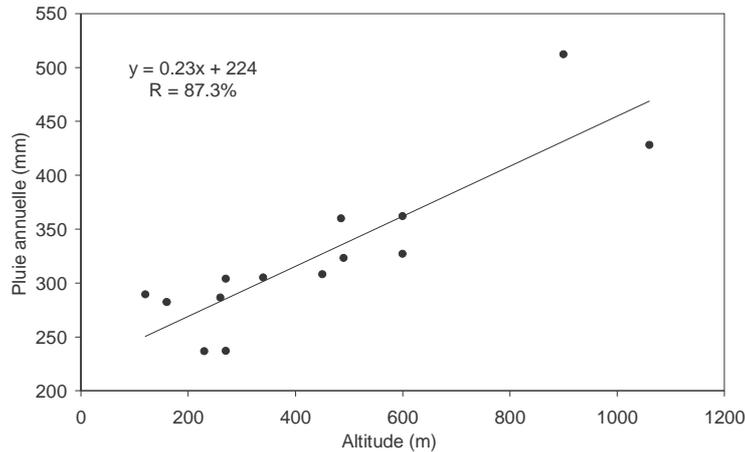


Figure 7. Relation entre pluie moyenne annuelle et altitude dans la région du Merguellil.

La variabilité temporelle de la pluviosité est analysée à partir des stations de Makthar et de Sidi Saad (tableau 1 et figure 5) qui correspondent aux deux situations pluviométriques extrêmes rencontrées sur le site étudié. La station de Makthar, située au nord, est exposée aux vents dominants du nord, humides. La station de Sidi Saad, au sud, est sous influence saharienne. Il pleut en moyenne interannuelle 72 jours par an à Makthar et 35 jours à Sidi Saad. 89% et 75% de la hauteur des lames précipitées à ces deux stations respectivement tombe entre les mois de septembre et de mai. La distribution mensuelle de la pluviométrie est bimodale, avec un pic en automne et un pic au printemps, tandis que l'hiver présente un minimum local (figure 8).

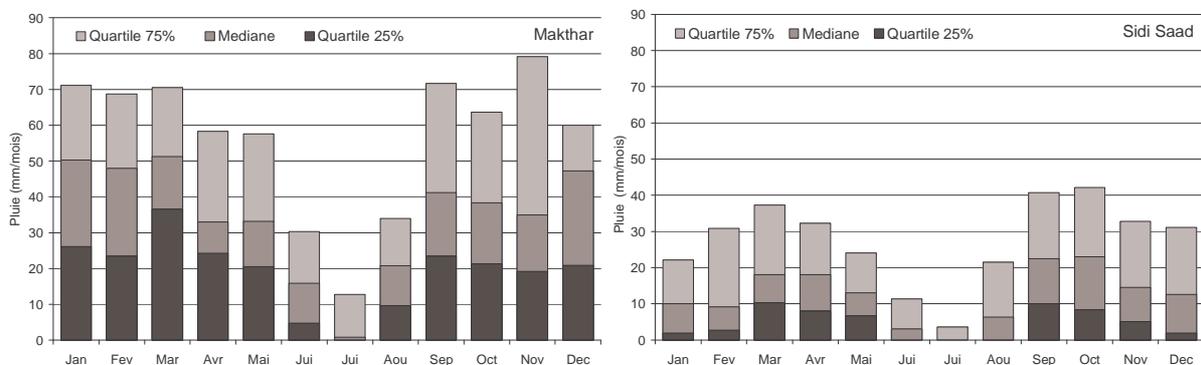


Figure 8. Pluie moyenne mensuelle (1924-2005) aux stations de Makthar et de Sidi Saad.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

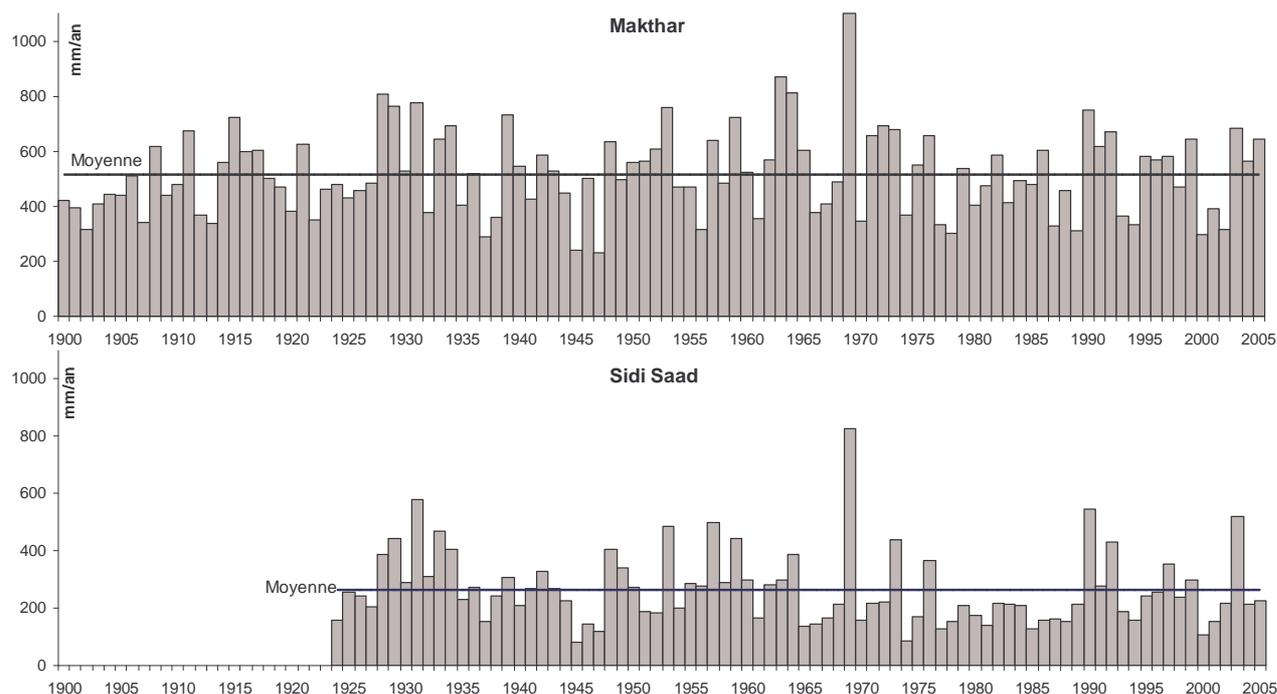


Figure 9. Pluies annuelles à Makthar (1900-2005) et Sidi Saad (1924-2005).

L'application des principaux tests de détection de rupture (Lubès et al., 1994) sur les séries chronologiques de pluies annuelles à Makthar et à Sidi Saad (figure 9) montre, dans la plupart des cas, que les chroniques sont stables. La procédure de segmentation de Hubert et al. (1989; 1998) aboutit à une absence de rupture sur les chroniques observées. Les tests du rapport de vraisemblance (Buishand, 1982, 1984) et de Mann-Whitney (Pettitt, 1979) concluent également à l'absence de rupture sur les périodes testées. Seul le test de Lee et Heghinian (1977) indique des ruptures climatiques en 1907 à Makthar et en 1934 à Sidi Saad. Ces quatre tests, appliqués à d'autres séries pluviométriques de la région (Haffouz : 1945-2005, Kesra : 1967-2005, Ouesletia : 1961-2005, El Alaa : 1959-2005), aboutissent aux mêmes résultats : les trois premiers tests ne détectent aucune rupture alors que le test de Lee et Heghinian identifie systématiquement une rupture : 1947 à Haffouz, 2002 à Kesra et Ouesletia et 1959 à El Alaa. L'absence de détection de rupture dans 75% des cas et la dissimilitude entre les années de rupture identifiées aux différentes stations par le test de Lee et Heghinian montre que ce dernier test est beaucoup plus sensible à la variabilité interannuelle des pluies. La diversité des années de rupture identifiées par ce test et leur proximité systématique avec l'une des extrémités de la chronique de mesure indique qu'il n'y a pas eu de véritable rupture pluviométrique pendant les périodes étudiées. Ces résultats sont en accord avec ceux de Norrant et Douguédroit (2006) qui ont confirmé l'absence de changement significatif dans l'évolution de la pluviosité du bassin méditerranéen entre 1950 et 2000.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Kingumbi et al. (2005) ont étudié la variabilité des pluies dans le bassin versant du Merguellil depuis 1966 en utilisant la procédure de segmentation de Hubert et al. (1989) et la méthode Bayésienne de Lee et Heghinian (1977). Ils montrent que le nombre annuel de pluies journalières supérieures à 30 mm augmente à partir de 1989 alors que la surface couverte par ces pluies est en diminution depuis 1976.

La présence de ruptures pluviométriques aux faibles échelles de temps et d'espace et leur absence sur les cumuls annuels ponctuels montrent que l'interprétation des tests de détections de tendance est délicate. Une rupture ne correspond pas nécessairement à un changement pluviométrique, particulièrement dans les milieux semi-arides où la variabilité pluviométrique est extrême.

Ø Température

Les valeurs de température présentées ci-dessous sont issues de relevés quotidiens effectués à la station météorologique de Chébika (figure 4), située à 17 km à l'Est du barrage d'El Haouareb et à 120 mètres d'altitude. La température moyenne annuelle est de 20°C (période 2002-2004). Les variations interannuelles sont faibles (CV<1%). En revanche, l'amplitude thermique inter mensuelle est élevée : en hiver (décembre à février), la moyenne des minimums journaliers avoisine 5°C. En été (juillet et août), la moyenne des maximum journaliers peut dépasser 35°C. Les températures moyennes journalières sont inférieures à 12°C en janvier et supérieures à 28° en juillet-août (figure 10). Dans le bassin versant du Merguellil, les températures augmentent de l'amont vers l'aval avec un gradient moyen de 0,4°C/100 mètres d'altitude (Bouzaiane et Lafforgue, 1986).

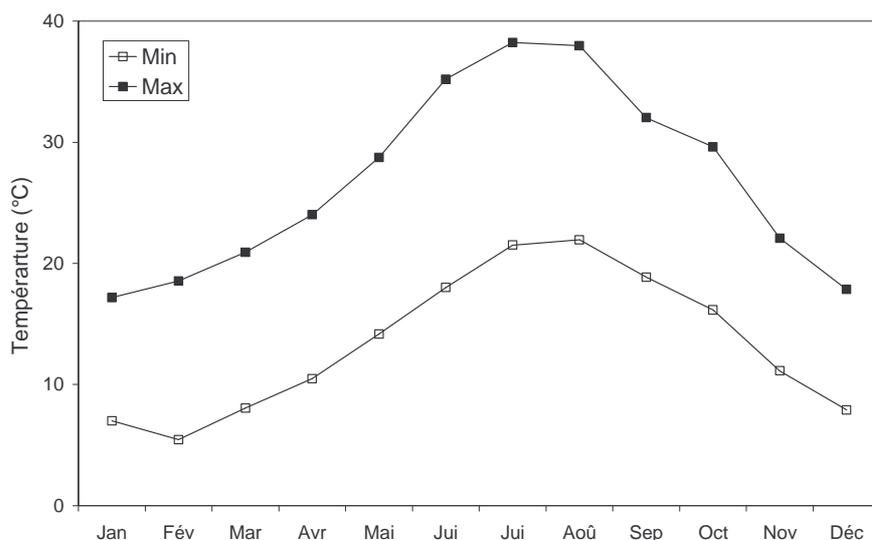


Figure 10. Moyennes mensuelles des températures minimales et maximales journalières à la station de Chébika de 2002 à 2004.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Ø Vent

Le vent dominant souffle du secteur nord et nord-ouest en hiver et du secteur sud et sud-ouest en été. Les vents sont généralement faibles (vitesse inférieure à 50 km/h). Deux vents caractéristiques de la région sont à signaler : le sirocco est un vent chaud et sec d'origine saharienne, souvent accompagné de sable. Il souffle entre les mois d'avril et de septembre (entre 20 et 55 jours par an) et provoque d'importantes hausses de température pouvant atteindre 50°C. Le jebbali est un vent froid d'hiver. Il prend naissance sur les massifs algériens (Bouzaiane et Lafforgue, 1986). A la station météorologique de Chébika, les cumuls journaliers de la vitesse du vent ont été mesurés sur la période 2002-2004. Ils indiquent une moyenne interannuelle de 4,2 km/h. Les moyennes des maximum et minimum mensuels sont respectivement égaux à 9,8 et 1,7 km/h.

Ø Humidité de l'air

L'humidité relative moyenne mensuelle de la région varie entre 55-70% en hiver et 40-55% en été (Bouzaiane et Lafforgue, 1986). La figure 11 présente les moyennes mensuelles des humidités relatives journalières maximales et minimales enregistrées à la station de Chébika de 2002 à 2004.

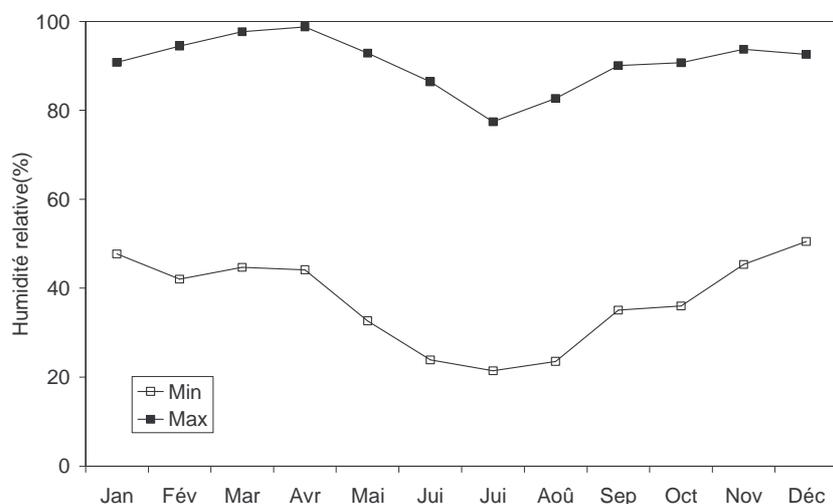


Figure 11. Moyennes mensuelles des humidités relatives minimales et maximales journalières à la station de Chébika de 2002 à 2004.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Ø Evaporation

Deux techniques sont utilisées pour estimer l'évaporation :

- Elle est mesurée directement (évaporation mesurée = E_{PAN}) à l'aide de 12 bacs évaporatoires installés au bord de chaque retenue collinaire du réseau HYDROMED (cf. § 2.3.2). Ils s'apparentent au bac de type Colorado à quelques différences près : ils ont une surface carrée de 1 m^2 ($0,91 \text{ m}^2$ pour le bac Colorado), une profondeur de 60 cm (45,7 cm pour le bac Colorado). Ils sont enterrés sur 50 cm et remplis sur 50 cm. Nous assimilerons par la suite les bacs évaporatoires utilisés dans cette étude au bac de type Colorado.
- Elle est calculée à partir de la formule de Penman-Monteith appliquée aux variables météorologiques enregistrées à la station de Chébika : températures maximales et minimales journalières, humidités relatives maximales et minimales journalières, rayonnement global journalier et cumuls journaliers de la vitesse du vent (évaporation estimée = évapotranspiration de référence journalière (ET_o))⁸.

Les valeurs de E_{PAN} sont utilisées pour décrire le climat de la région car elles permettent d'apprécier la variabilité spatiale de l'évaporation. Un coefficient K_{PAN} est utilisé pour estimer les valeurs d' ET_o à partir des valeurs d' E_{PAN} : $ET_o = K_{PAN} \times E_{PAN}$. Pour la région du Merguellil, K_{PAN} est estimé à 0,65 à partir de la vitesse moyenne du vent (4 m.s^{-1})⁹, du degré d'humidité relative de l'air (55%)⁹, de la position du bac par rapport à la direction du vent dominant et de la présence éventuelle de couvert enherbé à proximité du bac (Doorenbos et Pruitt, 1977). Riou et Chartier (1985) avaient estimé ce coefficient à 0,57 pour un bac Colorado entouré de sol nu et situé en Tunisie semi-aride. Ce coefficient sera fixé à 0,6 dans la suite des calculs.

Dans la région du bassin versant du Merguellil, E_{PAN} varie entre 1492 mm/an ($ET_o \approx 895 \text{ mm/an}$) à la station de Janet (2,2 km au nord-ouest de Makthar, altitude : 810 m) et 2120 mm/an ($ET_o \approx 1272 \text{ mm/an}$) au barrage d'El Haouareb (figure 4). L'évaporation est

⁸ Dans la plupart des références bibliographiques traitant de l'évapotranspiration et citées dans ce mémoire, la demande évaporatoire climatique standard est l'évapotranspiration potentielle (ETP). Cette valeur de référence a été remplacée par l'évapotranspiration de référence (ET_o) avec la généralisation de l'utilisation de l'équation de Penman-Monteith. Nous utilisons l'une ou l'autre des dénominations en fonction du contexte, les deux étant supposées équivalentes.

⁹ Valeurs moyennes calculées à partir des données collectées dans Bouzaiane et Lafforgue (1986).

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

maximale en été dans les zones les plus basses, et minimale en hiver dans les zones de plus forte altitude. Près de 50% de l'évaporation annuelle a lieu pendant les trois mois estivaux (juin, juillet et août). Les variations interannuelles de l'évaporation mensuelle sont faibles avec des coefficients de variation respectivement égaux à 6 et 9% aux stations de Janet et d'El Haouareb (figure 12).

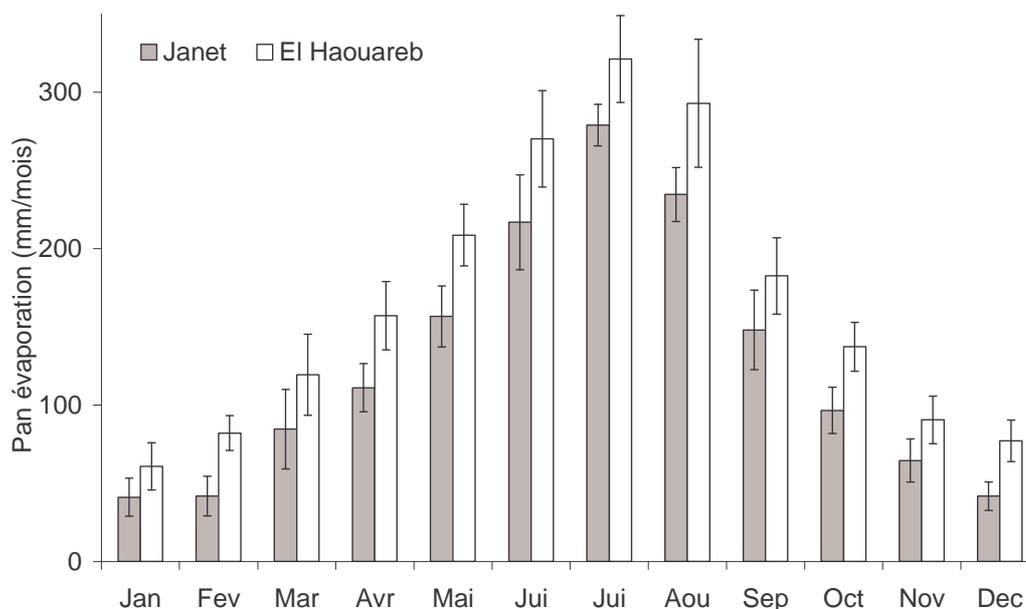


Figure 12. Moyennes mensuelles de l'évaporation mesurée sur bacs évaporatoires aux stations de Janet et d'El Haouareb sur la période (Sep. 1995 à Aoû. 2001). Barres d'erreur : écarts-types interannuels.

Ø Bilan climatique

Le bilan climatique (Pluie – ETo) traduit la satisfaction de la demande évaporatoire des végétaux par les apports directs des précipitations. Lorsque la lame précipitée dépasse l'ETo, la pluie offre une ressource en eau suffisante pour satisfaire l'évapotranspiration, dans le cas contraire, le végétal peut manquer d'eau. Ce bilan ne tient évidemment pas compte de la physiologie du végétal ni des propriétés hydrodynamiques du sol et encore moins de la variabilité temporelle de la pluie déterminant son assimilation par les végétaux. Il traduit simplement l'aridité du climat et permet de déterminer les saisons propices à la croissance des végétaux. Virmani (1975) considère que la demande climatique est comblée par les précipitations lorsque le rapport entre les précipitations et l'ETo est supérieur à 0,8. Franquin (1973) définit trois saisons en comparant la pluie (P) à ETo et ETo/2. Lorsque $P > ETo$, la saison est humide. Elle est jugée pré ou post humide lorsque $ETo > P > ETo/2$ et sèche lorsque $P < ETo/2$. Ces deux méthodes sont, à peu de chose près, équivalentes. Bien que la

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

méthode de Franquin (1973) n'ait pas été conçue pour le climat semi-aride, nous choisissons de l'utiliser car elle permet d'illustrer l'aridité du climat de la région.

Les pluviométries enregistrées aux stations de Makthar et de Sidi Saad sont respectivement comparées aux valeurs d'ETo calculées aux stations de Janet et d'El Haouareb¹⁰. Les valeurs mensuelles d'ETo et d'ETo/2 sont comparées aux quartiles des cumuls pluviométriques mensuels enregistrés sur la période 1924-2005 (figure 13). Des situations très pluvieuses, pluvieuses, sèches et très sèches sont définies par rapport à la médiane.

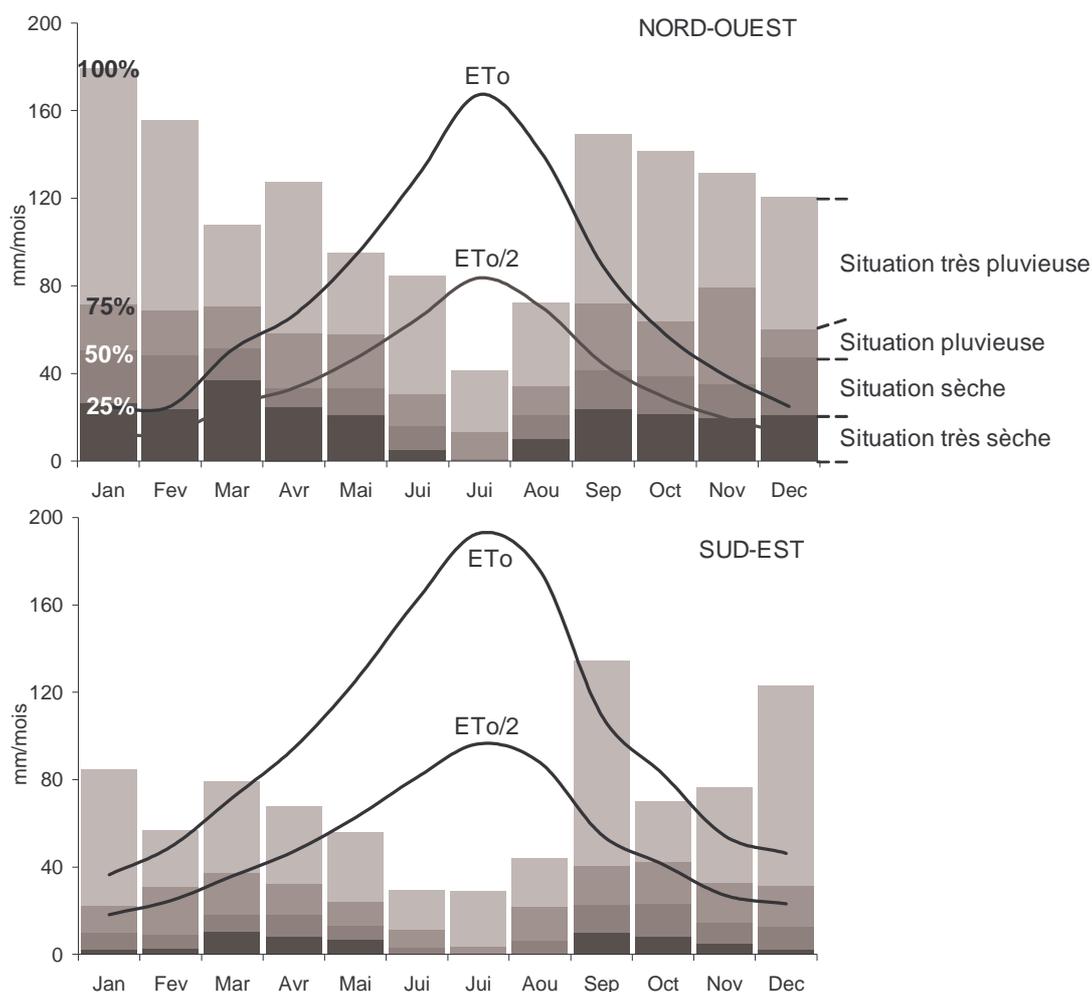


Figure 13. Analyse fréquentielle de la pluie et demande évaporatoire ETo. NORD-OUEST : pluviomètre de Makthar et bac évaporatoire de Janet. SUD-EST : pluviomètre de Sidi Saad et bac évaporatoire d'El Haouareb. Les bornes supérieures de chaque série d'histogrammes de pluie correspondent aux probabilités de non dépassement des cumuls pluviométriques.

¹⁰ La station de Sidi Saad est située à 22 km au sud-ouest de la station d'El Haouareb, à la même altitude (cf. figure 4).

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

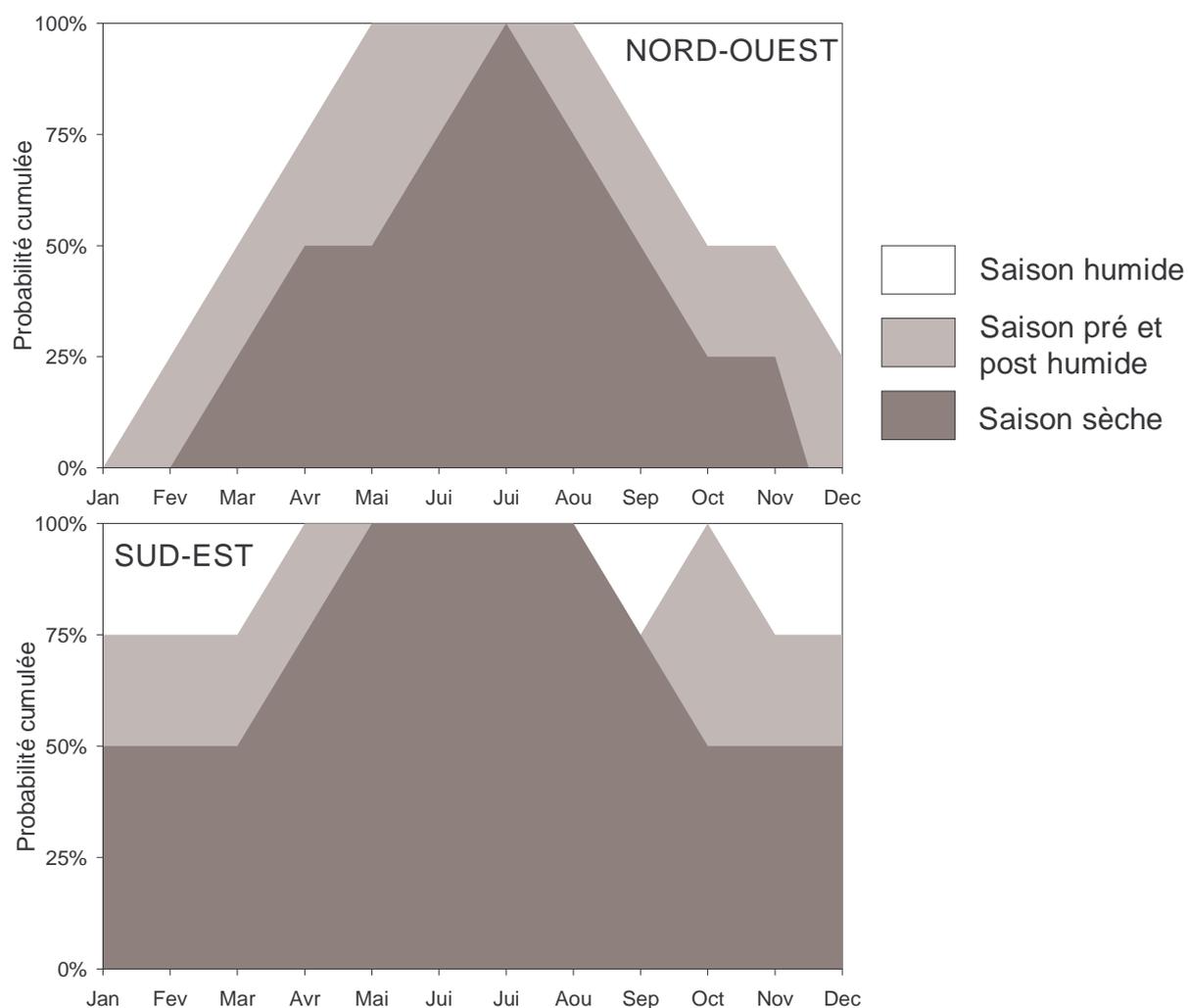


Figure 14. Cycles saisonniers. Saisons définies par la position relative des quartiles de pluie par rapport aux courbes d'ETo et d'ETo/2 sur la figure 13, selon Franquin (1973).

La figure 14 illustre la différence très prononcée entre les situations agroclimatiques rencontrées dans la région. Au Nord-ouest, en année normale (probabilité cumulée = 50%), la saison sèche commence en avril et se termine en septembre. Une année sur 4 ne comporte pas de saison humide. Au Sud-est, trois années sur quatre sont presque totalement sèches.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Réseau hydrographique

Le principal cours d'eau drainant la zone d'étude prend sa source à 992 m d'altitude sur la pointe nord du djebel Boukra correspondant à l'extrémité occidentale du bassin versant du Merguellil. Après avoir parcouru 80 km, il se jette dans le barrage El Haouareb dominant la grande plaine de Kairouan. D'amont en aval, ce cours d'eau se nomme d'abord oued Bahloul. Il prend le nom d'oued Skhira après avoir traversé la forêt de Kesra. A l'aval de sa confluence avec l'oued Mora, il prend le nom d'oued Kard puis devient l'oued Merguellil après avoir récupéré les eaux de l'oued Nmel. Le chevelu hydrographique du bassin versant est extrêmement ramifié du fait de la forte érosion en ravines. Il est cependant possible de distinguer trois principaux affluents, tous situés en rive droite. D'amont en aval, l'oued Mora draine un sous-bassin d'environ 100 km². L'oued Zebbes, avec un bassin versant de 200 km², prend naissance sur le plateau d'El Alaa. Enfin, l'oued Ben Zitoun draine le flanc sud du djebel Trozza (cf. figure 4). Dans la partie amont du bassin versant, les talwegs sont encaissés et rocheux. Au contraire, à l'aval de la ville d'Haffouz, le lit majeur de l'oued Merguellil est sableux et atteint jusqu'à un kilomètre de largeur. Dans cette zone, le lit mineur est instable et sa trajectoire peut être modifiée à chaque crue. Dans les zones de karst, les trajets d'écoulements et les relations entre écoulements de surface et écoulements souterrains sont encore peu connues (zone d'infiltration, résurgences).

ii. L'occupation des sols

La moitié de la surface du bassin versant est occupée par les cultures annuelles (blé, orge) et par l'arboriculture (oliviers, amandiers). Les terres de parcours couvrent 30% des surfaces. La forêt de Kesra située dans la partie amont du bassin versant couvre 220 km². Plantée en 1960, elle est essentiellement constituée de pins d'Alep. Sous l'effet de l'exploitation abusive, du défrichement et du surpâturage, la forêt se dégrade en garrigues et en landes (Hervieu, 2000) ou disparaît totalement lorsque les terrains anciennement boisés sont reconvertis en zones urbaines, autour des villes de Kesra et d'El Garia (Gogien, 1998). Cette forêt a été classée en zone sensible prioritaire (Souissi, 2000). Les zones urbaines ne couvrent que 1% de la surface totale du bassin versant (République Tunisienne, 2001; Kingumbi, 2006).

L'agriculture

Pendant longtemps, la région centrale de la Tunisie est restée en marge du développement économique du pays, plus focalisé sur la mise en valeur de la région nord (vallée de la Medjerda) et des régions côtières (aménagements touristiques). La majorité des pratiques agricoles dans le bassin versant du Merguellil est de type familial, orientée vers l'autoconsommation. Depuis le début des années 60, cette région connaît un essor

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

économique, principalement dû à sa croissance démographique, aux progrès techniques (introduction de l'irrigation) et à son désenclavement.

Comme dans les autres régions montagneuses du pays, les communautés vivent d'une agriculture centrée sur l'élevage ovin (race Barbarine à grosse queue) et les cultures pluviales (céréales d'hiver : blé dur, blé tendre, orge), rustiques, peu productives et adaptées au climat semi-aride (Elloumi et al., 1991). Elles sont associées dans des rotations de type biennal avec des légumineuses à graines (fève, pois chiches, petits pois, lentilles), ou une jachère (Jouve, 1993). L'arboriculture, constituée essentiellement d'oliviers et d'amandiers apporte un complément. Les trois céréales principales ont des fonctions différentes : le blé dur est avant tout cultivé pour autoconsommation, le blé tendre est surtout destiné à la commercialisation. Il n'est autoconsommé que là où la production de blé dur est particulièrement aléatoire. L'orge est polyfonctionnelle et adaptée à l'aléa. Le grain est utilisé tant pour l'alimentation humaine que pour celle des animaux (Bouaziz, 1986). Les possibilités de lutte contre la sécheresse, risques naturels fréquents, sont très limitées. En l'absence d'irrigation, l'agriculture de ces zones semi-arides ne peut se soustraire au risque fréquent d'une perte totale des récoltes (figure 14). Depuis toujours, l'agriculteur cherche à minimiser les variations interannuelles de la production végétale par des pratiques traditionnelles. La diversification des ressources monétaires semble être la règle pour faire face à l'aléa. Elle est obtenue via la pluriactivité du chef d'exploitation ou de l'un des membres de la famille, incluant éventuellement des activités extra-agricoles, et par la diversification des spéculations agricoles (Hammami, 1997). Le décalage des périodes critiques des cultures (sensibilité accrue au stress hydrique) lié aux différents cycles des productions donne au système son maximum de souplesse. En étalant les risques dans le temps, l'agriculteur peut sauver une partie des récoltes en cas de sécheresse sévère (Elloumi et al., 1991). Chaque producteur a un intérêt évident à disperser son patrimoine foncier en un nombre aussi grand de parcelles qu'il y a de situations écologiques réagissant différemment selon les situations climatiques (Benatya et Zagdouni, 1991).

Le cheptel, principalement ovin, permet de minimiser les pertes en années sèches. Lorsque les pluies sont trop faibles, les céréales, normalement destinées à la production de graines, sont reconverties en fourrage. Lorsque la trésorerie est déficitaire à la suite d'une année sèche et de faibles récoltes, la vente d'une partie du troupeau permet de compenser les pertes de revenu. Les capacités d'accumulation de l'exploitation sont surtout déterminées par la possibilité de franchir des périodes de crise sans toucher au troupeau. Dans le cas où le troupeau est réduit chaque fois que la trésorerie est déficitaire, il se reconstitue à la suite des années avec de bonnes récoltes. L'élevage constitue donc une assurance contre le

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

risque climatique (Benatya et Zagdouni, 1991; Elloumi et al., 1991; Elloumi, 1997). Les pratiques culturales relèvent donc davantage d'une stratégie de sécurité, voire de survie, que d'un quelconque souci de maximisation de la productivité. Les rendements en céréales sont faibles, en moyenne 1 T/ha et oscillent entre 0,5 et 2 T/ha. Ces rendements sont très inférieurs aux rendements potentiels (5 T/ha).

Les aménagements de conservation des eaux et des sols

La lutte contre l'érosion et les inondations est le moteur principal ayant entraîné la construction d'aménagements de CES sur l'ensemble de la dorsale tunisienne. Il en existe deux principaux dans le bassin versant du Merguellil : les banquettes et les retenues collinaires. Elles sont apparues dans le sous-bassin de Skhira dans les années 60 avec le projet de l'agence américaine pour le développement international. Lors des crues de septembre et d'octobre 1969, les banquettes construites manuellement disparaissent totalement et les quelques retenues collinaires sont quasiment comblées. La plupart des aménagements aujourd'hui fonctionnels ont été construits dans le cadre de la stratégie décennale tunisienne (1991-2000) et de deux programmes de développement financés par l'Union Européenne (Projet de Développement Rural et Agricole Intégré)(FIDA, 2004) et l'Italie (figure 15).

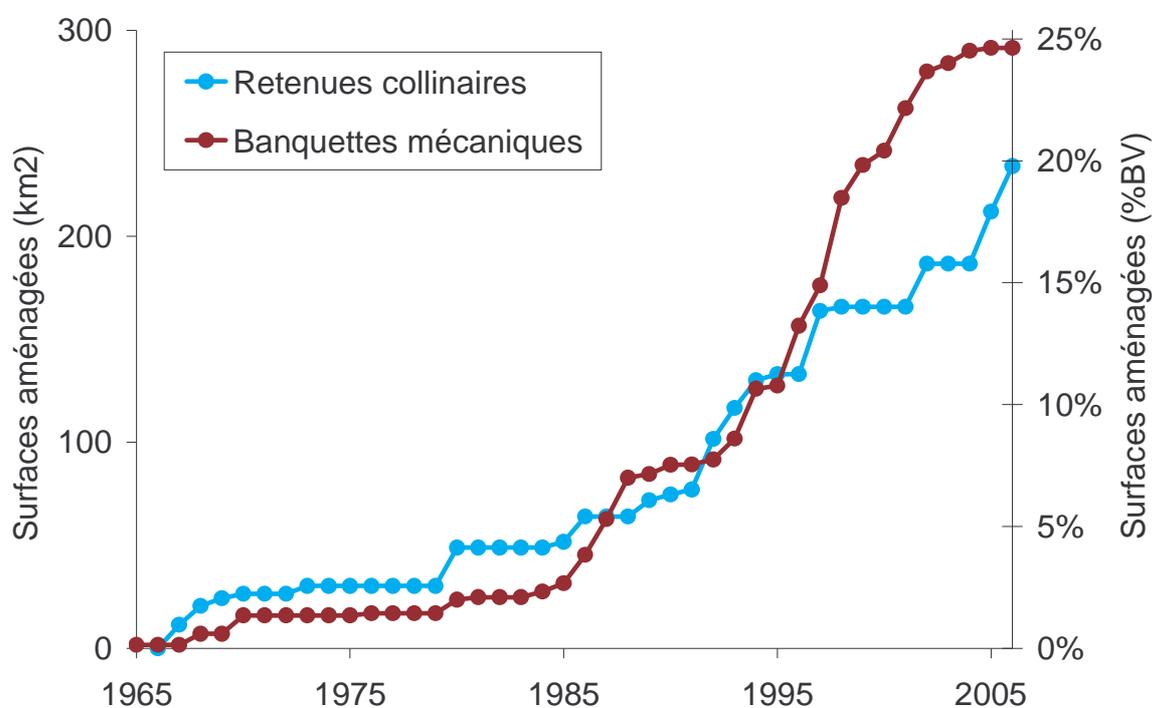


Figure 15 Surfaces drainées par les banquettes et les retenues collinaires dans le bassin versant du Merguellil. %BV : proportion de la superficie du bassin versant du Merguellil. Source : Dridi (2000), com. pers. Thameur et Kefi (2006).

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

La figure 16 localise les retenues collinaires et les banquettes présentes dans le bassin versant du Merguellil. Les informations physiques et techniques sur chaque retenue collinaire sont rassemblées dans le tableau 2.

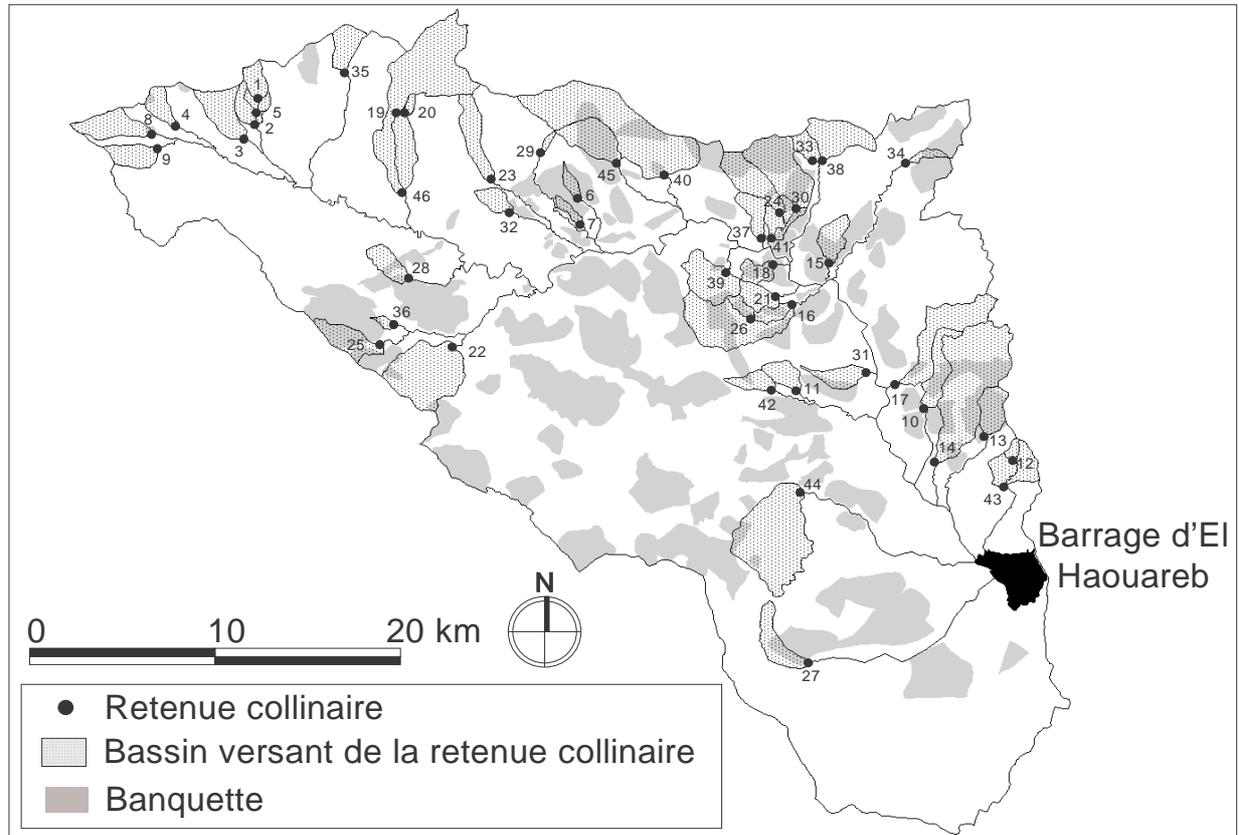


Figure 16. Principaux aménagements de CES dans le bassin versant du Merguellil en 2006. Chaque retenue collinaire est identifiée par un numéro référencé dans le tableau 2.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Tableau 2. Retenues collinaires du bassin versant du Merguellil. Le numéro dans la première colonne permet de localiser les retenues collinaires sur la figure 16. Les retenues collinaires dont le nom est inscrit en gras/italique ont été instrumentées dans le cadre du programme HYDROMED. (Pas de données sur la capacité d'Ain Sadoun).

Retenue collinaire				Bassin versant de la retenue collinaire						
N°	Nom	Construction (année)	Capacité (10 ³ m ³)	Pluie (mm/an)	Altitude		Surface (km ²)	Périmètre (km)	Indice Gravelius (%)	Pente (%)
					Min (m)	Max (m)				
1	Gnaiech	1967	79	457	830	870	1.9	5.8	1.2	1.6
2	Hathaguia	1967	181	453	800	850	4.8	9.3	1.2	1.3
3	Hfaya	1967	60	453	800	880	4.5	10.1	1.3	1.3
4	Mabrouk Bentai	1967	52	472	845	880	2.1	6.4	1.2	0.7
5	Ouled Mbrabet	1967	60	455	800	870	2.9	7.5	1.2	2.3
6	Garia 1	1968	19	375	520	600	0.9	4.8	1.4	3.1
7	Garia 2	1968	25	371	510	560	0.8	4.7	1.4	1.6
8	Fadhia 1	1968	120	477	865	950	4.4	10.1	1.4	1.6
9	Fadhia 2	1968	72	473	865	940	3.0	7.4	1.2	2.2
10	Abda	1969	37	303	320	510	3.8	12.9	1.9	2.9
11	Ben Houria	1970	17	319	355	450	2.2	6.1	1.2	4.6
12	Marrouki	1973	56	290	295	340	0.6	3.3	1.2	2.3
13	Salem Thabet	1973	63	294	305	360	3.2	7.3	1.2	1.5
14	Dabi	1980	60	298	265	636	18.6	22.8	1.5	3.8
15	Bouksab	1985	55	327	357	510	2.8	7.4	1.2	5.1
16	Maiz	1986	44.5	328	350	580	12.3	17.6	1.4	3.0
17	Hoshas	1989	130	308	300	735	7.8	18.6	1.9	5.0
18	<i>Fidh Ben Naceur</i>	1990	81	278	360	460	1.8	6.2	1.3	3.0
19	Bouchaha 1	1990	8	422	830	1050	0.5	3.0	1.2	20.1
20	Bouchaha 2	1990	15	422	820	1050	0.6	3.3	1.2	18.8
21	<i>Fidh Ali</i>	1991	127	331	355	470	2.4	6.9	1.3	3.4
22	<i>Mora</i>	1992	650	378	580	723	11.6	13.9	1.2	2.6
23	Faden Bouras	1992	94	393	690	1100	4.1	11.4	1.6	7.2
24	Gatar	1992	150	340	390	530	5.0	10.8	1.4	2.6
25	Habsa	1992	45	392	660	810	3.9	10.0	1.4	3.0
26	Mbarek	1992	53	333	400	460	1.0	4.6	1.3	2.3
27	Ben Zitoun	1993	50	295	365	946	3.9	10.8	1.5	11.6
28	Fidh Zitoun	1993	40	396	670	835	2.6	6.9	1.2	5.9
29	Hafar	1993	30	388	695	910	0.4	3.0	1.4	16.8
30	Mahbes	1993	180	338	395	540	8.2	12.8	1.3	2.5
31	Ain Faouar	1994	66	312	300	420	2.6	8.4	1.5	2.0
32	Ain Sadoun	1994		386	580	720	1.8	5.6	1.2	6.3
33	Ain Smili 1	1994	35	340	430	540	5.3	10.6	1.3	2.3
34	Sidi Sofiane	1994	40	327	490	850	0.8	5.0	1.6	14.2
35	Daoued	1994	95	442	840	940	3.0	7.3	1.2	2.9
36	Absa	1995	35	392	660	740	0.5	3.3	1.3	4.8
37	Gtatis	1995	106	340	360	500	2.4	7.5	1.4	3.7
38	Ain Smili 2	1996	130	340	430	540	1.7	5.4	1.2	5.3
39	Gassaa	1997	104.8	341	400	530	5.6	10.4	1.2	3.2
40	Kraroub	1997	1590	363	500	1043	20.7	25.5	1.6	4.1
41	Nmel	1997	1055	338	355	540	16.0	18.2	1.3	2.3
42	El Hamrat	1998	160	323	395	500	1.9	6.6	1.3	3.4
43	Ghouil	2002	153	289	265	340	4.8	9.0	1.2	1.9
44	Hamam	2002	850	309	370	990	16.8	18.7	1.3	8.3
45	Oued Thal	2005	350	373	545	910	5.1	9.8	1.2	8.7
46	Midania	2006	1200	410	650	1160	22.6	29.5	1.8	3.4

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

La localisation et la caractérisation (surface, profondeur et nature du sol, pente, hauteur des banquettes, distance inter banquette, année de construction) des sites aménagés en banquette ont été réalisées par Dridi (2000) et complétée par Ben Mansour (2006). Les retenues collinaires ont été géoréférencées sur le terrain avec un GPS et le contour de leur bassin versant tracé sur les cartes topographiques (1 :50 000) de Makthar, Kesra, Al Wisiatiyia, Gabit Kesra, et Haffouz. L'année de construction et la capacité des retenues collinaires ont été renseignées par les CRDA de Kairouan et de Siliana. Les altitudes minimale et maximale des bassins versants ont été déterminées à partir des observations sur les cartes topographiques. La surface et le périmètre des bassins versants des retenues collinaires ont été calculés avec le logiciel ArcView GIS. La pluviométrie moyenne interannuelle au niveau de chaque retenue collinaire non instrumentée est calculée à partir de l'équation 4. En 2006, les bassins versants des retenues collinaires et les sites aménagés en banquettes couvrent respectivement 234 km² et 291 km² soit 20% et 25% de la surface du bassin versant du Merguellil. Les superpositions des deux catégories d'aménagements correspondent aux terres aménagées en banquettes et situées dans les bassins versants des retenues collinaires. Elles représentent 51 km² soit 4% de la superficie du bassin versant du Merguellil. Compte tenu de ces superpositions, l'ensemble des surfaces drainées par les aménagements de CES représente 41% de la superficie du bassin versant du Merguellil. Ces valeurs doivent être considérées avec prudence et devraient probablement être revues à la baisse en raison de la dégradation des aménagements les plus anciens. La crue exceptionnelle de 1969 a comblé les retenues collinaires préexistantes tandis que les pluies survenues en 1990, d'une intensité particulièrement forte, ont dégradé plusieurs sites aménagés en banquette (Hamza et Mamou, 1995).

Ø Les retenues collinaires

Le terme « retenue collinaire » englobe deux types d'aménagement : les lacs collinaires, de capacité de stockage inférieure à 50 000 m³ et les barrages collinaires de plus grande capacité. Les lacs sont construits et gérés par la DG/ACTA¹¹ alors que les barrages sont construits par la DGETH et gérés par la DG/ACTA. Leurs caractéristiques techniques et leurs fonctions sont présentées succinctement dans ce paragraphe. Leur fonctionnement hydraulique et leur mode d'exploitation pour l'irrigation sont détaillés dans les chapitres 3 et 4.

¹¹ Voir explications des sigles en annexe 7.1.1

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Le principe de construction des retenues collinaires en Tunisie est né en Italie du Nord en 1951 (Darves-Bornoz et Clément, 1957). Il s'agit de petits barrages en terre compactée construits dans les régions vallonnées, en travers des talwegs. Ils drainent des bassins versants de quelques centaines d'hectares à plusieurs dizaines de kilomètres carrés. En collectant les eaux de ruissellement, ils forment des lacs dont les superficies peuvent atteindre quelques hectares. La hauteur de leur digue varie entre 5 et 12 m et leur longueur entre 100 à 300 m. Ils sont munis d'évacuateur de crues situés entre un et deux mètres sous la cote de la crête de la digue. Une conduite souterraine de chasse et de prélèvement traverse la digue. Le choix du site d'implantation se fait essentiellement sur la base de critères techniques. Avant la construction du barrage, l'Etat achète les terres privées qui seront inondées. L'agrément des populations riveraines est obtenu, si besoin, par des subventions ou des dons de matériel (plants, matériel d'irrigation) destinés à compenser les pertes en terres agricoles. Les terres avec des situations foncières incertaines (absence de titres fonciers, importance de l'indivision) sont généralement évitées. Les retenues collinaires bénéficient donc le plus souvent aux grandes exploitations qui disposent de terrains immatriculés (Picouet et al., 2006). Les réflexions sur le rôle précis de la retenue en rapport avec son emplacement dans le paysage et sur les perturbations éventuelles (hydrologiques et socio-économiques) sont rares (Selmi, 2000). En 2000, la construction d'une retenue collinaire coûte entre 15 000 et 90 000 € (Dridi, 2000). En retenant les sédiments, les retenues collinaires s'ensavent. Une modélisation de l'ensablement réalisée sur une trentaine d'ouvrages en Tunisie au Maroc et en Syrie montre que la durée de vie moyenne (comblement jusqu'à la cote du déversoir) est de 29 années (Albergel et al., 2001b).

En piégeant les eaux de ruissellement chargées en sédiments, les retenues collinaires sont sensées réduire l'ensablement des ouvrages situés en aval mais également réduire les risques de crue et d'inondation. Le second objectif concerne l'amélioration du niveau de vie des populations grâce aux usages domestiques et agricoles de l'eau stockée dans les retenues collinaires ou extraite de la nappe phréatique alimentée par percolation. Cette fonction souvent présentée comme l'une des justifications essentielles pour la création de nouvelles retenues ne s'est révélée bien souvent qu'après l'apparition de l'aménagement initialement conçu dans une logique conservatoire. Par la suite, l'exploitation, voir la surexploitation, de la retenue s'explique par l'émulation entre agriculteurs (Selmi et Talineau, 1994). La sous-exploitation générale des retenues collinaires est souvent due au mauvais choix du site (retenues encaissées difficiles d'accès, sols de très mauvaise qualité, sous équipement en matériel d'irrigation, zones non habitées. L'ensablement rapide de certaines retenues et l'éloignement des marchés pour écouler les productions agricoles peuvent également décourager les agriculteurs. Une retenue collinaire satisfait difficilement

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

l'ensemble des objectifs qu'on lui assigne habituellement : la ressource en eau créée pour les besoins de l'irrigation est d'autant moins importante que la retenue est un bon piège à sédiment. Et si la retenue est construite pour protéger de l'envasement un barrage situé en aval, elle limite également son remplissage en retenant les eaux de ruissellement. Comme le soulignent Camus et al. (1995), la réussite d'un tel aménagement est proportionnelle à la plus grande satisfaction possible du plus grand nombre de ses objectifs. On entrevoit donc la nécessité de définir des types de retenues collinaires avec des rôles spécifiques préalablement déterminés.

Ø Les banquettes

Cette catégorie d'aménagements de CES ne fait pas l'objet d'étude hydraulique détaillée dans cette thèse qui, dans l'approche locale, privilégie l'analyse du fonctionnement des retenues collinaires. En revanche, leur impact hydrologique à l'échelle du bassin versant du Merguellil est étudié dans le chapitre 5.

Les paragraphes suivants synthétisent les connaissances sur les caractéristiques techniques des banquettes.

Anciennement faites en pierres, manuellement, les banquettes sont construites au bulldozer depuis une trentaine d'années. Il s'agit de talus longilignes suivant les courbes de niveau et aménagés sur les versants à intervalles réguliers. Une banquette est constituée d'un bourrelet (remblai) de terre précédé juste en amont d'un fossé (déblai). Dans le bassin versant du Merguellil, les banquettes sont à « rétention totale ». Aucun exutoire n'est prévu pour permettre l'évacuation des eaux collectées au niveau des fossés. Théoriquement, l'eau stockée ne peut donc être évacuée que par évaporation, infiltration ou déversement lorsque les fossés collecteurs sont saturés. Il existe une autre catégorie de banquettes présentes dans d'autres régions de Tunisie et dénommées « banquettes à rétention partielle ». Le fossé de ces banquettes présente une légère inclinaison par rapport aux courbes de niveau, permettant une évacuation progressive des écoulements collectés. Avec les nouvelles méthodes de construction mécanique, plus rapides qu'auparavant, les banquettes sont constituées d'un matériaux très meuble et donc moins résistant que les anciens cordons de pierres sèches. Le bourrelet est parfois recouvert de végétaux (cactus) qui en assurent la cohésion. L'espace inter banquette, éventuellement cultivé, représente environ 70% de la surface aménagée (Roose, 2002b). Le principe de fonctionnement est simple : lorsqu'il pleut, les eaux de ruissellement s'accumulent au niveau du fossé. Les sédiments s'y déposent. L'eau s'infiltré, s'évapore ou percole à travers le bourrelet.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

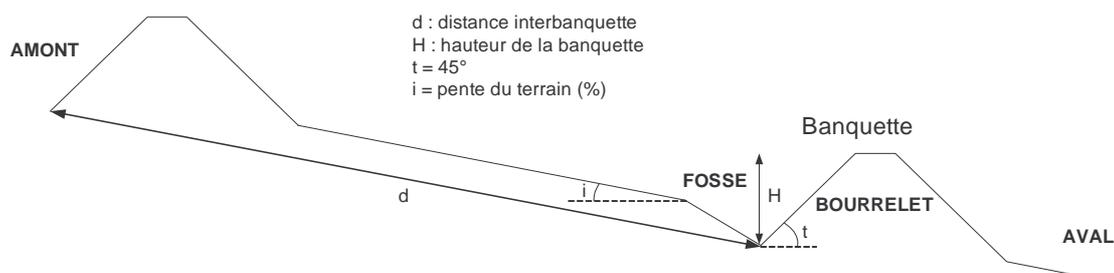


Figure 17 : Profil en travers d'une banquette dans la région de Kairouan, d'après Dridi (2000), Nasri et al. (2004b).

La géométrie des sites aménagés en banquettes se caractérise principalement par quatre paramètres : l'inclinaison du talus t [degré], la hauteur H de la banquette [m], la distance inter banquettes d [m] et la pente du terrain i [degré] (figure 17). Dans le bassin versant du Merguellil, l'inclinaison du talus varie peu et elle est le plus souvent égale à 45° (Dridi, 2000). La distance inter banquette est généralement déterminée en fonction de la pente du terrain. Sur terrain à forte pente, l'accélération du ruissellement, donc l'érosion, est plus forte. Il est donc nécessaire de réduire la distance inter banquette pour limiter la vitesse des écoulements. Deux formules permettent de déterminer d . La formule de Saccardy est utilisée en Algérie et au Maroc, la formule de Bugeat en Tunisie. Les deux formules aboutissent à des résultats similaires pour des valeurs de i comprises entre 5 et 30%. Ces formules ne tiennent compte ni de la diversité des sols ni des systèmes de culture qui devraient être pris en compte pour concevoir les banquettes (Roose, 2002b). En effet, l'efficacité des banquettes dépend surtout de la nature du terrain sur lequel elles sont construites. Le sol doit être suffisamment argileux pour assurer une bonne cohésion des levées de terre. Cependant, un taux d'argile trop élevé risque de provoquer des glissements en plaques déclenchés dans les zones d'accumulation d'eau où le sol saturé peut perdre localement sa cohésion. Dans les projets de construction de banquettes les plus récents (depuis 1990), la hauteur est fixée à deux mètres quelque soit la nature du sol, en prévision d'un tassement qui leur donnerait une hauteur finale de 1,5 mètres. La capacité théorique C [m] des banquettes s'obtient à partir d'un calcul géométrique simple :

$C = H^2 \times (1/\tan i + 1/\tan t) / 2d$. Le volume réel d'eau que peut retenir une banquette est supérieur au volume géométrique de sa retenue puisqu'à moins d'une averse extrêmement brève et intense, l'eau s'infiltre progressivement libérant ainsi un volume supplémentaire pour les apports ultérieurs. De plus, cette capacité théorique ne peut être interprétée comme la hauteur de pluie au-delà de laquelle la banquette déverse puisque seulement une partie de la pluie ruisselle et se retrouve dans le fossé.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Les zones à aménager en banquettes sont déterminées par des bureaux d'étude suivant des méthodes qui varient entre les projets. Les plus récentes reposent sur des calculs d'optimisation prenant en compte différents paramètres tels que la sensibilité à l'érosion, la présence d'aménagements à protéger à l'aval, les types de cultures sur les versants (HAR, 2003). Enfin, le chef de chantier intervient sur le terrain en décidant de l'emplacement exact. En 2004, le coût de construction des banquettes varie entre 200 et 260 €/ha (FIDA, 2004).

En vieillissant, les banquettes se tassent en raison du pâturage ou du passage des engins agricoles. Leur hauteur et leur capacité diminuent et leur imperméabilité augmente. Leur fossé se comble de sédiments apportés par le ruissellement contribuant à la diminution de leur capacité. Dans le bassin versant d'El Gouazine (figure 18), Baccari et Al. (2006) montrent que 10% des banquettes sont détruites 10 ans après leur construction, suite à la formation de brèches. Les causes de cette dégradation sont liées à la nature lithologique du terrain (présence d'argiles gypseuses), à l'emplacement des aménagements sur la toposéquence (talus construit dans un chenal hydrographique), à des distances inter banquettes trop importantes, à l'inclinaison du fossé vers l'une des extrémités de la banquette. Baccari et al. (2004) ont constaté qu'avant 1989, sur les bassins versants des oueds Ettieur et El Hjar, affluents de l'oued Merguellil, la majorité des banquettes et cordons en pierres sèches ne sont pas adaptés aux sols argileux sur marnes, très répandus dans cette région.

Le bénéfice le plus souvent évoqué pour justifier la construction des banquettes est la réduction de l'érosion. Dans le bassin versant de l'oued Maiez, affluent de l'oued Merguellil, Felfoul et Al. (1999) montrent que l'implantation de banquettes en 1985, dans une zone agricole de 64 ha, a permis de réduire de 27% la densité des ravines. Dans le bassin versant du Merguellil, Dridi et Al. (2001) constatent que la présence de banquettes couvrant 17% de la surface du bassin réduit le ruissellement à l'exutoire de 17% et les transports solides de 40%. Les banquettes peuvent stocker sur place des lames de 85 mm de pluie et réduisent dès lors l'agressivité du ravinement en aval. En obligeant les agriculteurs à travailler le sol suivant les courbes de niveaux, les banquettes limitent d'autant mieux les phénomènes d'érosion.

Les banquettes sont surtout efficaces pour réduire le ravinement. En revanche l'érosion en nappe est rarement atténuée. Celle-ci est même accrue dans certains cas par la mise en culture des terres nouvellement aménagées, appauvrissant les couches superficielles du sol à l'aval de chaque banquette (Krüger, 1994). D'autre part, l'accumulation d'eau à l'amont du bourrelet peut provoquer des débordements, surtout à l'automne. Leurs dégâts sont

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

accentués lorsque les terrassements ont détruit la végétation ou les encroûtements calcaires qui stabilisent le versant. En sols argileux ou marneux, la sursaturation en eau des terrains peut entraîner des glissements en plaque (Heusch, 1986, 1995).

Un avantage également cité pour justifier la construction des banquettes est la réduction de l'envasement des retenues collinaires et des grands barrages construits à l'aval et donc l'augmentation de leur durée de vie (Mechergui, 2000; HAR, 2003). Nasri et al. (2004b) ont montré qu'après l'aménagement en banquettes de 43% de la surface du bassin versant d'El Gouazine (18,1 km²) situé en Tunisie centrale, le taux d'envasement du lac situé à l'exutoire du bassin est passé de 1,55 à 1,11 m³/ha/an. Cependant, huit ans après l'aménagement du bassin versant, en 2005, le taux d'envasement est remonté à 1,46 m³/ha/an, conséquence de la destruction partielle du système de banquettes par les brèches (com. pers. Nasri, 2006).

2.3.2. Les retenues collinaires du réseau HYDROMED

Parmi les 46 retenues collinaires présentes dans le bassin versant du Merguellil, seules trois sont équipées d'instruments de mesure permettant le calcul de leur bilan hydrique (tableau 2). Cet échantillon est élargi à douze retenues collinaires instrumentées dans le cadre du programme de recherche HYDROMED (Albergel et al., 2004) : trois sont situées dans le bassin versant du Merguellil et les neuf autres dans un rayon de 30 km autour de ce bassin versant (figure 18).

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

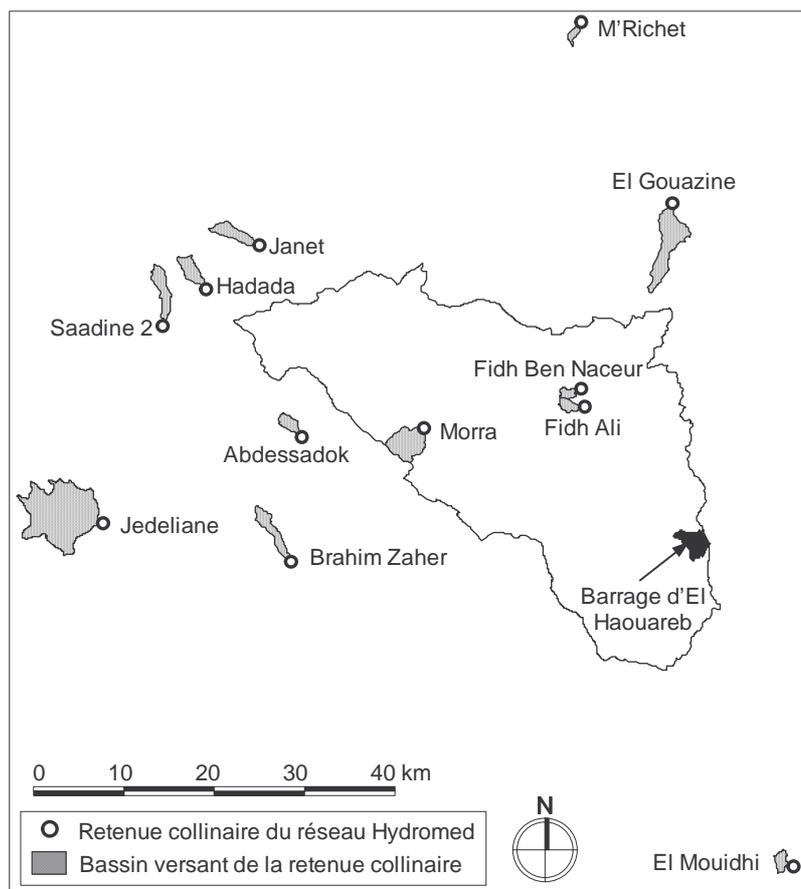


Figure 18. Retenues collinaires du réseau HYDROMED, dont le bilan hydrique est étudié dans le chapitre 3.

Le tableau 3 rassemble les principales caractéristiques techniques issues des annuaires hydrologiques des lacs collinaires du réseau HYDROMED (Boufaroua et al., 1997). Les caractéristiques métriques des bassins versants de ces retenues collinaires ont été obtenues à partir du tracé de leur contour sur les cartes topographiques au 1/50 000 de la région⁶, numérisées puis analysées avec le logiciel ArcView.

Tableau 3. Caractéristiques physico-techniques et périodes de mesures pour les retenues dont le bilan hydrique est étudié.

Retenue collinaire				Bassin versant de la retenue							
Nom	Construction (année)	Capacité (10^3 m^3)	Hauteur digue (m)	Mesures Cote-Pluie-Evapo		Altitude		Surface (ha)	Périmètre (km)	Indice Gravelius	Pente (%)
				Début	Fin	Min (m)	Max (m)				
Fidh Ben Nacer	1990	81.0	10.0	28/09/1994	20/09/2001	360	460	182	6.21	1.30	3.01
El Gouazine	1990	221	10.6	05/05/1995	05/10/2002	390	560	1643	25.0	1.74	1.36
Abdessadok	1990	92.0	9.85	27/05/1995	01/09/2000	800	1190	311	7.42	1.19	11.9
Sadine 2	1990	2.20	10.0	24/03/1994	31/03/2000	860	1278	667	14.8	1.61	6.00
Fidh Ali	1991	127	11.0	18/02/1993	20/09/2001	355	470	237	6.86	1.26	3.44
M'Richet	1991	33.7	10.0	17/09/1995	25/09/2002	590	730	136	5.56	1.34	5.59
El Moudhi	1991	112	10.0	07/06/1995	07/04/2000	235	363	260	7.36	1.29	3.85
Mora	1992	650	12.5	22/03/1996	01/09/2000	580	723	1163	13.9	1.15	2.62
Hadada	1992	70.9	11.0	26/08/1995	30/09/2003	1000	1238	505	10.5	1.31	2.27
Jedeliane	1992	1450	20.5	02/06/1995	01/03/2003	740	1206	4700	33.8	1.39	2.99
Brahim Zaher	1992	86.0	10.0	11/06/1995	22/08/1999	525	1010	639	16.0	1.78	6.58
Jannet	1992	38.4	10.5	11/06/1995	31/08/2003	810	1188	574	12.2	1.44	5.66
Barrage											
El Haouareb	1989	212000	27.0	23/08/1989	28/02/2006	210	1226	118 321	196.5	1.61	0.7

3. BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

3.1 Les mesures.....	65
3.2 Les flux de déstockages naturels.....	88
3.3 Les flux de déstockages volontaires.....	123
3.4 Les apports.....	132
3.5 Simulations de la dynamique de stockage/ déstockage des retenues.....	151
3.6 Conclusion.....	165

A l'exception des pertes en terres cultivables qu'ils induisent, les aménagements de CES sont potentiellement bénéfiques puisqu'ils augmentent localement le volume des ressources en eau disponibles pour l'agriculture, soit directement dans les sols cultivés en favorisant l'infiltration (banquettes), soit en stockant le ruissellement utilisé par la suite pour l'irrigation (retenues collinaires), soit en favorisant la recharge des aquifères par percolation (retenues collinaires). Ce chapitre a pour objectif de caractériser le fonctionnement hydraulique des retenues collinaires et du barrage El Haouareb, quantifier la ressource en eau qu'ils rendent disponible, mesurer leur niveau d'exploitation par rapport à leurs potentialités. Après avoir présenté le réseau de mesures et les données disponibles (§ 3.1), les flux de déstockage des différents réservoirs (§ 3.2 et § 3.3) et les apports qu'ils collectent (§ 3.4) sont quantifiés et modélisés. Les potentialités de ces retenues¹² pour l'irrigation sont évaluées par simulations (§ 3.5). Cette étude est réalisée à partir des données hydrométéorologiques des douze retenues collinaires du réseau HYDROMED présentées en section 2.3.2 et de celles du barrage El Haouareb. La figure 19 présente les termes du bilan hydrique d'une retenue. Les apports sont superficiels (pluie, ruissellement) et/ou souterrains. Les flux de déstockage sont passifs (infiltration, évaporation, déversement et fuites à travers la digue) ou volontaires (lâchers, pompages pour les besoins agricoles ou domestiques).

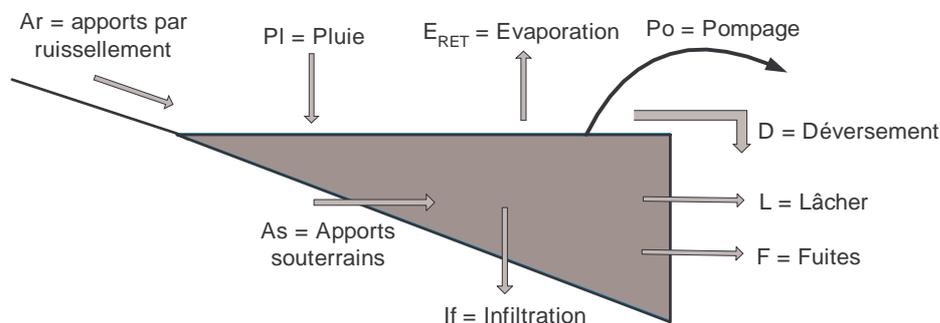


Figure 19 : Bilan hydrique d'une retenue.

Pendant la durée Δt , le bilan hydrique d'une retenue s'écrit :

$$\text{équation 5} \quad \Delta V = Ar + PI + As - (E_{RET} + Po + I_f + D + L + F)$$

ΔV ¹³ : variation du volume d'eau dans la retenue [$m^3 \cdot \Delta t^{-1}$],

Ar, PI, As : flux entrants [$m^3 \cdot \Delta t^{-1}$] (cf. figure 19),

E_{RET} ¹⁴, Po, I_f , D, L et F : flux sortants [$m^3 \cdot \Delta t^{-1}$] (cf. figure 19).

¹² Dans ce chapitre, la dénomination « retenue » désigne indistinctement les retenues collinaires et le barrage El Haouareb.

¹³ Cf. annexe 7.1.2 pour l'explicitation des variables utilisées dans ce mémoire.

¹⁴ La notation E_{RET} permet de distinguer l'évaporation de la retenue de l'évaporation du bac Colorado (E_{PAN}).

3.1. Les mesures

3.1.1. Représentativité

L'étude du bilan hydrique des douze retenues collinaires présélectionnées n'est justifiée que dans la mesure où elles sont représentatives des retenues collinaires non jaugées du bassin versant du Merguellil. A cette condition, leur bilan hydrique global peut être utilisé pour estimer l'impact des retenues collinaires du bassin versant du Merguellil sur la disponibilité de la ressource en eau. Cette représentativité est estimée en comparant certaines caractéristiques physiques connues pour toutes les retenues collinaires. Ces paramètres caractérisent soit le bassin versant des retenues collinaires (surface, pente, indice de Gravélius), soit la retenue collinaire elle-même (altitude, coordonnées géographiques, pluviométrie moyenne annuelle, année de construction, capacité initiale de stockage). Les moyennes des valeurs de chaque paramètre correspondant aux retenues collinaires non instrumentées et instrumentées sont comparées. Cette comparaison se fait par observation graphique (figure 20) et à l'aide de tests statistiques (tableau 4).

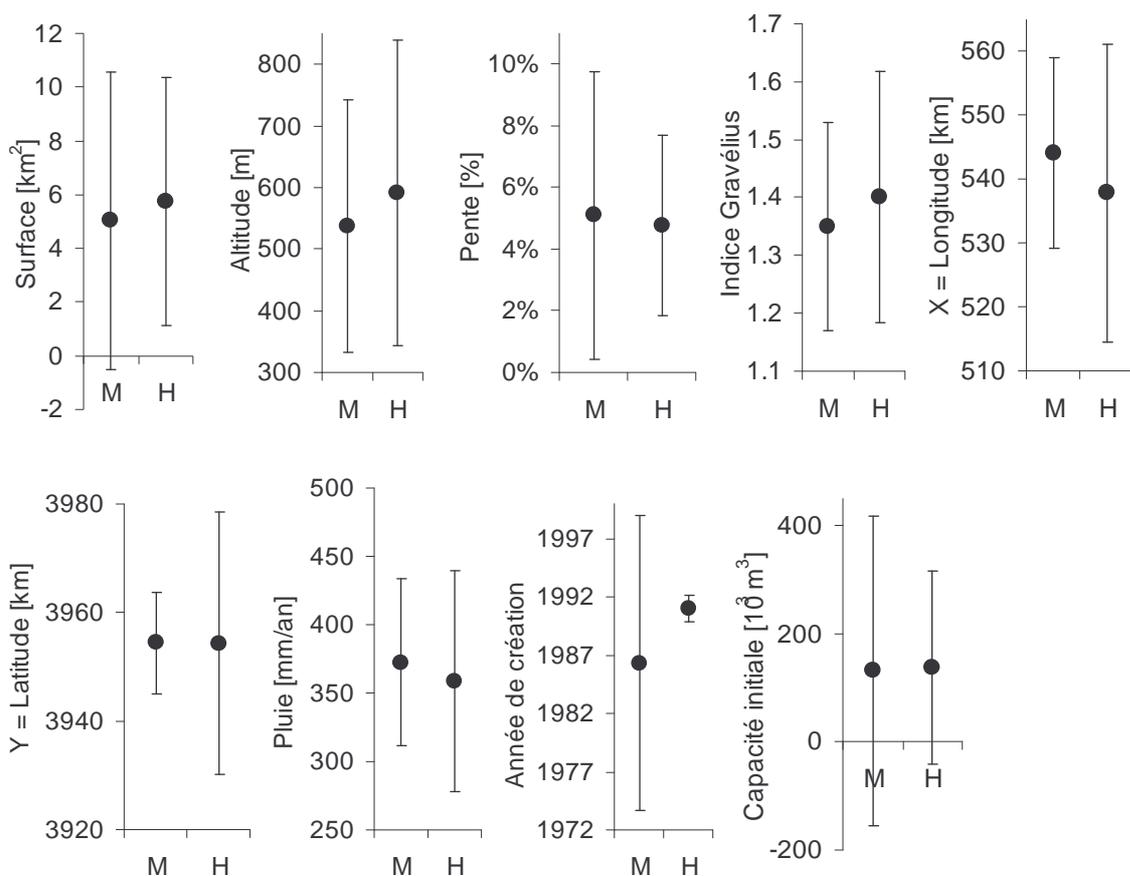


Figure 20. Comparaison des retenues collinaires instrumentées (H) et non instrumentées (M). Barres : écarts-types. Jedeliane (Surface = 47 km²) est exclue de la moyenne des surfaces.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

Pour chaque paramètre, les moyennes correspondant aux retenues collinaires instrumentées et non instrumentées sont comparables. La différence majeure entre les deux échantillons concerne l'année de création, les retenues collinaires du réseau HYDROMED ayant toutes été construites entre 1990 et 1992 alors que les années s'échelonnent entre 1967 et 2006 pour les retenues collinaires du bassin versant du Merguellil (tableau 2). Le tableau 4 rassemble les résultats des tests de normalité et de la moyenne pour l'ensemble des paramètres étudiés. Il indique que lorsque les deux échantillons ont des distributions normales (i.e. ils peuvent être comparés avec le test de Student sur la moyenne), les différences entre leur moyenne ne sont pas significatives avec un niveau de confiance de 95%.

Tableau 4. Tests de normalité (Kolmogorov-Smirnov) et de la moyenne (Student). (non) Gauss signifie que les valeurs du paramètre ont une distribution (non) gaussienne. Résultats acceptés par le test de Kolmogorov-Smirnov avec une p-value de 5%.

p-value = 5%	Kolmogorov-Smirnov		Fisher	Student
	Instrumentés	Non Instrum.	Variances	moyennes
Altitude	Gauss	Gauss	=	=
Surface BV	Gauss	non Gauss		
Pente BV	Gauss	non Gauss		
I Gravelius	Gauss	Gauss	=	=
Longitude	Gauss	Gauss	≠	=
Latitude	Gauss	Gauss	≠	=
Pluie	Gauss	Gauss	≠	=
Année	Gauss	Gauss	≠	=
Capacité	Gauss	non Gauss		

Nous pouvons donc conclure sur la bonne représentativité des douze retenues collinaires du réseau HYDROMED choisies pour estimer le bilan hydrique global des retenues collinaires du bassin versant du Merguellil.

3.1.2. Les instruments de mesure

Les douze retenues collinaires étudiées et le barrage El Haouareb (figure 18) sont équipés d'une station hydrométéorologique constituée soit d'un pluviographe à augets basculeurs tarés à 0,5 mm (pour les douze retenues collinaires), soit d'un pluviomètre totalisateur relevé quotidiennement (pour le barrage El Haouareb), d'un bac évaporatoire de type Colorado situé à proximité de la retenue. Le bac d'un mètre de côté est enterré sur 60 cm. La lame d'eau évaporée est lue quotidiennement par un observateur à l'aide d'une échelle comportant une graduation millimétrique. Le niveau d'eau dans la retenue est mesuré soit à l'aide d'une sonde limnimétrique enregistrant chaque variation de cote de 1 cm (pour les douze retenues collinaires), soit avec une échelle limnimétrique observé une fois par jour (pour le barrage d'El Haouareb). Les retenues collinaires de Fidh Ali et de Fidh Ben Naceur, distantes de 1,7 km, utilisent le même bac évaporatoire situé au bord du lac de Fidh

Ben Naceur. Les courbes d'étalonnage hauteur-surface et hauteur-volume sont établies par nivellement (sur retenue vide) ou par bathymétrie (sur retenue en eau) environ une fois tous les deux ans. Un déversoir jaugé permet de mesurer les déversements. Les volumes lâchés par le gardien de la retenue, le plus souvent au moment des crues pour protéger la digue et le déversoir d'un débordement éventuel, ne sont pas mesurés. Leurs dates d'occurrence sont généralement renseignées par le manœuvre. Les prélèvements par pompage ne sont pas non plus mesurés. En revanche, les enquêtes effectuées en 2004 et 2005 ont permis de les estimer (cf. chapitre 4).

3.1.3. Vérification des données et calcul des incertitudes

i. La pluie

Les mesures de pluie servent à identifier les épisodes sans apport permettant le calcul des flux de déstockage naturel (§ 3.2.2) et sont utilisées dans la modélisation pluie-débit (§ 3.4.3). Les erreurs de mesure sont liées au dysfonctionnement des appareils de mesure (panne, basculements des augets dus à des vibrations) et aux traitements des données (transferts entre supports différents). Les chroniques journalières issues des 12 pluviographes des retenues collinaires et du pluviomètre d'El Haouareb sont comparées entre elles et avec les pluviomètres de la région localisés sur la figure 5. Les erreurs les plus grossières sont facilement identifiées : décalage systématique d'un même nombre de jours entre les épisodes pluvieux mesurés à une station et sur l'ensemble des stations environnantes, hausse du niveau d'eau enregistrée par le limnimètre alors qu'aucune pluie n'est enregistrée par le pluviographe de la retenue.

En présence du premier type d'anomalie, la chronique de données biaisées s'identifie par son unicité par rapport à l'ensemble des chroniques des stations voisines. Elle est facilement réajustée. Ce genre d'erreur n'affecte jamais la chronique entière d'une même station mais seulement quelques périodes sur les chroniques d'El Moudhi (10 jours pluvieux sur une période totale de 63 jours), de Janet (20 jours pluvieux sur une période totale de 54 jours) et de Brahim Zaher (10 jours pluvieux sur une période totale de 30 jours).

Le second type d'anomalies est relativement fréquent pour les hausses de cote correspondant à des faibles volumes d'apport ($<2000 \text{ m}^3$) : 32 hausses de cote sans aucune pluie sur l'ensemble des douze retenues collinaires. Elles restent exceptionnelles pour les hausses de cote correspondant à des volumes d'apport supérieurs à 2000 m^3 : cinq hausses de cote sans aucune pluie sur l'ensemble des douze retenues collinaires. Théoriquement, ce second type d'anomalie n'est pas nécessairement dû à une erreur de mesure car il est

envisageable que le bassin versant d'une retenue collinaire soit partiellement arrosé par une averse qui n'atteigne par le pluviographe disposé sur la digue de la retenue. Le vent peut également provoquer des hausses de cote de quelques centimètres. L'une ou l'autre de ces causes expliquent probablement les cas de figure correspondant à de faibles hausses de cote. En revanche, parmi les cinq hausses de cote correspondant à des volumes d'apport supérieurs à 2000 m³, quatre ont lieu au cours de journées pluvieuses aux stations pluviométriques voisines. Il est donc fort probable que l'absence de pluie soit une erreur. Aussi bien pour la détermination des flux de déstockage que pour la modélisation de la relation pluie-débit sur les bassins versants des retenues collinaires, toutes les périodes correspondant à ces hausses de cote sans pluie seront ignorées.

ii. L'évaporation du bac (E_{PAN})

A l'exception de la retenue collinaire de Fidh Ali, chaque retenue est équipée d'un bac Colorado. Si le pluviographe situé à proximité du bac indique qu'il a plu au cours des dernières 24 heures, la hauteur de la lame précipitée est retranchée à la hauteur d'eau dans le bac pour obtenir la lame évaporée. Après lecture, le niveau d'eau dans le bac est réajusté à son niveau d'origine par adjonction d'eau (ou prélèvement si la hauteur précipitée a dépassé la lame évaporée depuis la dernière mesure). Les erreurs de mesure sur le bac ont plusieurs origines : lecture sur l'échelle limnimétrique, réajustement du niveau d'eau du bac après lecture, retranscription des données. Certaines sources d'erreur sont indépendantes de l'observateur : abreuvement et baignade d'animaux, incidence des pluies (pertes par éclaboussures et différences entre les lames précipitées dans le pluviomètre et dans le bac, principalement dues aux turbulences du vent), fuites d'eau difficiles à détecter dans le cas de bacs partiellement enterrés (cas des bacs utilisés dans cette étude).

Détection et correction des mesures douteuses

Les erreurs probables de mesures sont identifiées de trois manières : i/ à chaque station, les mesures journalières sont comparées à leur moyenne interannuelle respective (M) (figure 21), ii/ les cumuls mensuels des différentes stations sont comparés entre eux (figure 22) et iii/ les cumuls moyens annuels de chaque station sont comparés à l'altitude de la station (figure 23).

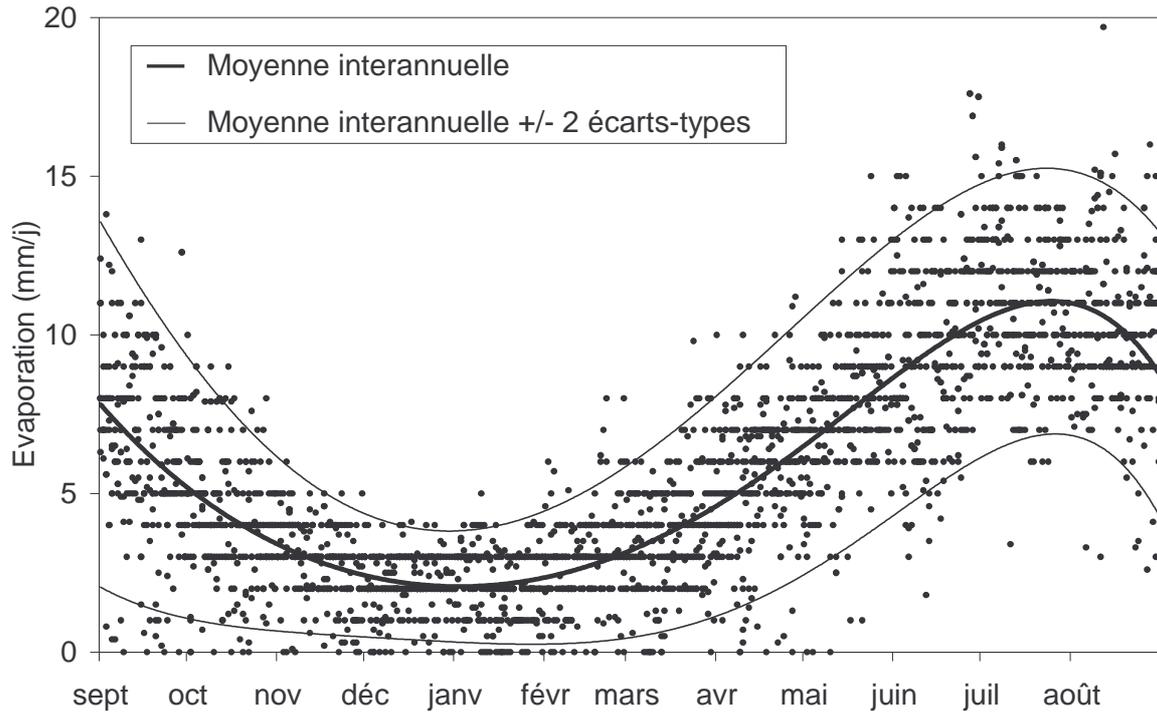


Figure 21 : Identification des valeurs douteuses d'évaporation (E_{PAN}) dans la chronique de mesures journalières (18/02/1993 au 20/09/2001) de la retenue de Fidh Ben Naceur. Valeurs à l'extérieur de la zone délimitée par les deux traits fins supposées fausses.

Les erreurs les plus grossières sont identifiées en comparant chaque valeur mesurée à la moyenne interannuelle journalière correspondante (M) plus ou moins deux écarts-types (σ). La mesure est supposée fautive lorsqu'elle est inférieure (supérieure) à $M - (+) 2\sigma$. Dans ce cas, elle est remplacée par la valeur M . Le nombre de valeurs corrigées pour chaque retenue figure dans le tableau 5.

Tableau 5. Nombre de mesures d'évaporation (E_{PAN}) situées à l'extérieur de l'intervalle $[M-2\sigma ; M+2\sigma]$. (M : moyenne interannuelle des mesures d'évaporation journalières. σ : écart-type interannuel des mesures d'évaporation journalière.

	Nombre mesures	Nb valeurs corrigées	Proportion de valeurs corrigées
Abdessadok	1934	4	0.21%
Brahim Zaher	1556	3	0.19%
El Gouazine	2797	40	1.43%
El Moudhi	1779	0	0.00%
Hadada	2957	59	2.00%
Janet	2291	10	0.44%
Jedeliane	2828	47	1.66%
Mora	1624	4	0.25%
M'Richet	2175	160	7.36%
Fidh Ben Naceur	3136	88	2.81%
Saadine 2	2549	87	3.41%
El Haouareb	5397	232	4.30%

Le tableau 5 montre que la proportion de valeurs douteuses identifiées par ce premier test varie considérablement entre les différentes retenues, avec un maximum de 7,36% pour le bac évaporatoire de la retenue collinaire de M'Richet.

La seconde méthode utilisée pour détecter les anomalies dans les chroniques de données consiste à comparer les mesures d'évaporation des différentes stations. Comparer les mesures journalières serait peu significatif du fait de la forte variabilité inter journalière de l'évaporation et de la possibilité d'avoir des intensités d'évaporation très différentes le même jour à différentes stations, à moins que celles –ci soient très proches l'une de l'autre, ce qui n'est pas le cas à l'exception des retenues collinaires de Hadada, Janet et Saadine 2. Il a donc été jugé préférable de comparer les cumuls mensuels enregistrés aux différentes stations. A titre d'exemple, la figure 22 compare les variations intermensuelles de l'évaporation mesurée sur les bacs évaporatoires des stations d'Abdessadok, de Brahim Zaher, de Hadada et de Janet (cf. figure 18 pour la localisation des stations).

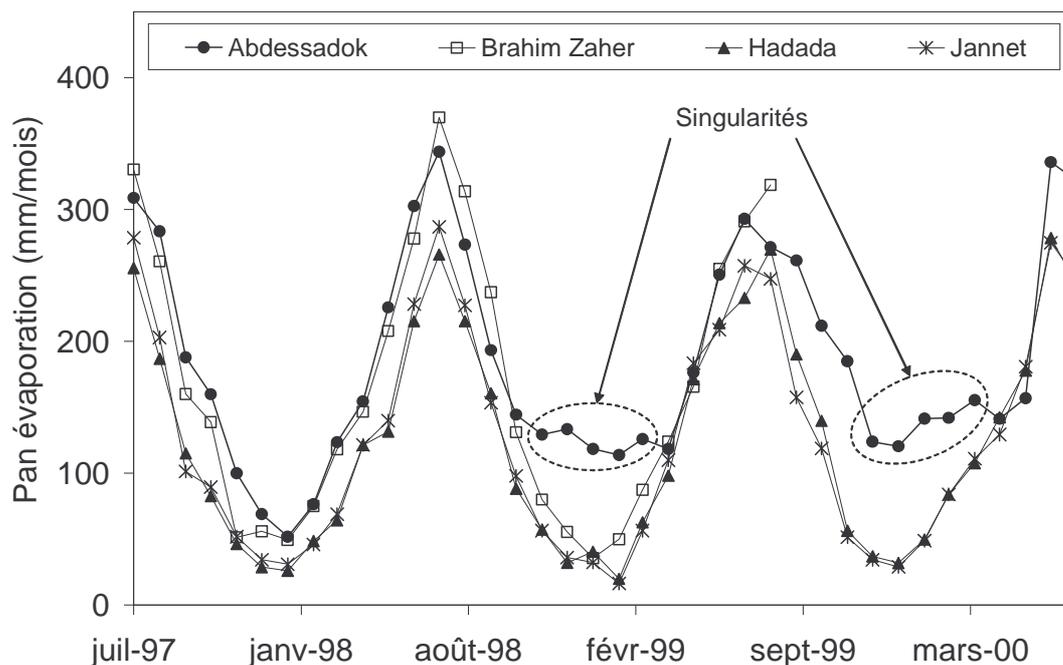


Figure 22. Exemple d'identification d'anomalie par comparaison des cumuls mensuels de E_{PAN} mesurés aux différentes stations.

La comparaison des cumuls mensuels de E_{PAN} enregistrés aux différentes stations révèle des anomalies sur les périodes (nov. 98 à mars 99) et (déc. 99 à avril 00) à la station d'Abdessadok. Des anomalies du même type concernent la station de M'Richet au cours des été 2000 et 2001, avec des valeurs anormalement élevées. La plupart de ces valeurs avaient été détectées par le premier test comparatif (cf. tableau 5). Bien qu'il s'agisse probablement d'erreurs de mesure, les valeurs douteuses non éliminées par le premier test sont provisoirement conservées faute de preuves supplémentaires (mesures à la station d'Abdessadok indiquées sur la figure 22). Elles seront confrontées par la suite aux différents termes du bilan hydrique de la retenue collinaire. Ces opérations de vérifications sont répétées pour chacune des 11 retenues collinaires équipées d'un bac évaporatoire et pour la station du barrage El Haouareb.

Enfin, la dernière méthode de détection d'anomalies consiste à analyser les corrélations entre les cumuls annuels de E_{PAN} et différents paramètres physiques connus pour chaque retenue. Le tableau 6 montre que le paramètre physique connu le mieux corrélé à la moyenne interannuelle des cumuls annuels de E_{PAN} est l'altitude de la retenue. Il est donc utilisé pour détecter d'éventuelles anomalies.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

Tableau 6. Corrélations entre E_{PAN} et les principaux paramètres physiques connus des retenues. Longitude et latitude en projection UTM Carthage. E_{PAN} : moyenne sur la période de mesure sept. 96 – août 99 commune à l'ensemble des stations.

Station	E_{PAN} [mm/an]	Altitude [m]	Longitude [km]	Latitude [km]	Pluie [mm/an]
El Haouareb	1936	210	568	3936	245
El Moudhi	2145	235	577	3900	273
Fidh Ben Naceur	2075	360	553	3953	278
El Gouzine	1915	390	563	3973	327
Brahim Zaher	2047	525	521	3934	285
Mora	2158	580	536	3949	310
M'richet	2108	590	553	3994	461
Jedeliane	1663	740	500	3938	338
Abdessadok	1964	800	523	3948	270
Jannet	1475	810	517	3969	443
Saadine 2	1992	860	507	3961	484
Hadada	1440	1000	512	3965	416
Corrélation avec E_{PAN} :		-61.9%	56.1%	-26.3%	-39.6%

La figure 23 représente les valeurs moyennes annuelles de E_{PAN} en fonction de l'altitude.

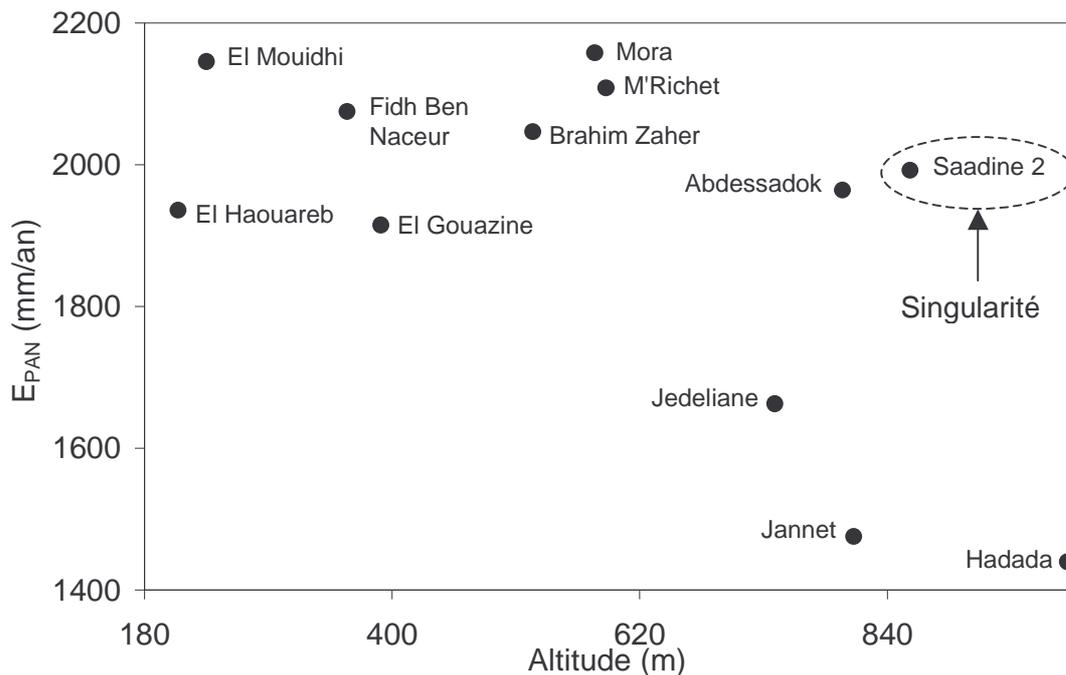


Figure 23. Relation entre E_{PAN} et l'altitude pour les onze retenues collinaires étudiées et le barrage d'El Haouareb.

La figure 23 indique que E_{PAN} décroît avec l'altitude, conséquence directe du gradient thermique. Les mesures de Saadine 2 sont douteuses : bien que cette station soit voisine des stations de Jannet et de Hadada (<15 km, cf. figure 18) et que ces trois stations soient situées à des altitudes comparables, son évaporation moyenne annuelle est 30% supérieure

à celle des deux autres stations. Les stations de M'Richet et de Abdessadok présentent également des cumuls moyens annuels très élevés pour leur altitude, en accord avec les anomalies déjà détectées par le deuxième test. Ces anomalies seront contrôlées ultérieurement par confrontation des différents termes du bilan hydrique des retenues. Enfin, il faut noter que les valeurs de E_{PAN} fournies par l'observateur du barrage El Haouareb sont déjà abattues avec un coefficient (0,76) supposé correspondre au coefficient de transposition entre le bac évaporatoire et la retenue (Virrion, 2006). Ces valeurs sont donc réajustées avant d'être utilisées.

Comparaison de E_{PAN} avec l'évapotranspiration de référence ET_o

La station météorologique de Chébika (localisée sur la figure 4), située à mi-distance entre le barrage d'El Haouareb et la ville de Kairouan (altitude (z) = 110 m et latitude (φ) = 35° N = 0,61 rad N), enregistre depuis janvier 2002, plusieurs variables climatiques utilisées pour calculer l' ET_o à l'aide de l'équation 6 dénommée « équation FAO de Penman-Monteith » (Allen et al., 1998) :

- les températures maximales ($T_{max,°C}$) et minimales ($T_{min,°C}$) journalières [°C] sous abri à 2 m du sol,
- les humidités relatives maximales (HR_{max}) et minimales (HR_{min}) journalières [%] sous abri à 2 m du sol,
- le rayonnement global (R_g) [$MJ\ m^{-2}\ j^{-1}$],
- la vitesse moyenne journalière du vent à 2 m du sol (u_2) [$m\ s^{-1}$].

$$\text{équation 6. } ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

ET_o : évapotranspiration de référence [$mm\ j^{-1}$],

R_n : radiation net à la surface des cultures [$MJ\ m^{-2}\ j^{-1}$],

G : densité de flux de chaleur du sol [$MJ\ m^{-2}\ j^{-1}$]. Au pas de temps journalier, $G \approx 0$,

T : température moyenne journalière à 2 m du sol [°C],

u_2 : vitesse du vent à 2 m du sol ($m\ s^{-1}$),

e_s : pression de vapeur saturante à la température T [kPa],

e_a : pression partielle de la vapeur [kPa],

Δ : pente de la courbe représentative de la fonction $f : e_s = f(T)$ [$kPa\ ^\circ C^{-1}$],

γ : constante psychrométrique [$kPa\ ^\circ C^{-1}$].

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

Les équations utilisées pour calculer R_n , e_s , Δ , e_a , et γ à partir des données mesurées à la station de Chébika sont issues de Allen et al. (1998) et sont détaillées en annexe 7.2.

Les valeurs d'ETo obtenues sont comparées aux mesures d' E_{PAN} de la station d'El Haouareb situées à 17 km à l'Ouest. Nous supposons que les conditions météorologiques et climatiques des stations de Chébika et d'El Haouareb sont identiques : même latitude et environ 100 m de dénivellé. Des régressions linéaires sont réalisées sur les couples (E_{PAN} ; ETo) aux pas de temps journalier et pentadaire pour déterminer les paramètres K_{PAN} correspondants (figure 24). K_{PAN} est le coefficient pan permettant de calculer ETo à partir de E_{PAN} et défini de la manière suivante : $E_{TO} = K_{PAN} \times E_{PAN}$.

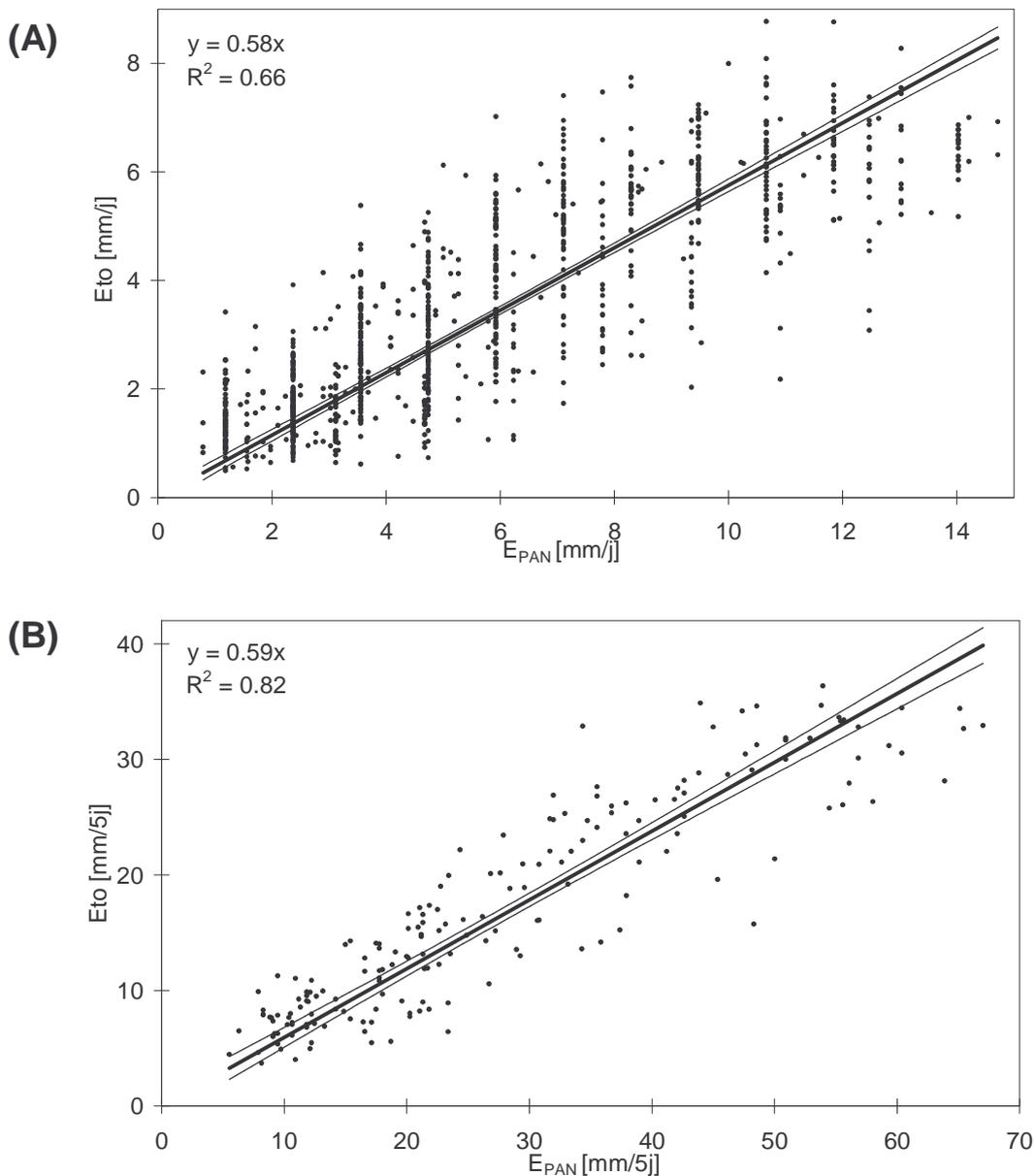


Figure 24. Régressions linéaires sur les couples (E_{PAN} ; ETo). (A) : valeurs journalières. (B) cumuls pentadaires. Trait gras : régression linéaire. Traits fins : intervalle de confiance à 95% sur la régression linéaire, calculé à partir de la statistique de Fisher.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

Les valeurs de K_{PAN} correspondant aux valeurs journalières et aux cumuls pentadaires sont respectivement égales à $0,58 \pm 0,01$ et $0,59 \pm 0,02$. Des paliers, bien visibles sur la figure 24 (A), traduisent la méthode de mesure de E_{PAN} qui consiste à convertir en millimètres évaporés le nombre de litres d'eau rajoutés dans le bac à chaque observation. Les valeurs obtenues sont très proches des résultats de Riou et Chartier (1985) pour la Tunisie semi-aride ($K_{PAN} = 0,57$) et des estimations faites avec la méthode de Doorenbos et Pruitt (1977) ($K_{PAN} = 0,65$).

Estimation de l'incertitude sur E_{PAN}

Après avoir identifié et éventuellement corrigé les valeurs d'évaporation les plus douteuses, une incertitude (I_{EPAN}) demeure sur E_{PAN} . Elle résulte des erreurs de mesures indétectables. Dans un premier temps, cette incertitude est évaluée en comparant les mesures journalières des stations de Janet (E_{JANET}) et de Hadada (E_{HADADA}), distantes de 6,6 km (localisation des stations sur la figure 18). Du fait de leur proximité, nous supposons que les écarts entre les valeurs des mesures effectuées le même jour à ces deux stations sont essentiellement dus aux erreurs de mesure. Il est cependant probable qu'une partie de cet écart soit dû aux différences d'emplacements et de configuration des bacs évaporatoires. Cette différence (D) est assimilée à la moyenne des écarts journaliers calculée sur la période de mesure commune aux deux stations (août 1995 à septembre 2001). $D = E_{HADADA} - E_{JANET} = -0,19$. Sur chaque jour i de la période de mesure commune aux deux stations, un écart quadratique centré (EQC_i) est calculé : $EQC_i = (E_{HADADA_i} - E_{JANET_i} - D)^2$. Les valeurs des racines carrées des moyennes mensuelles des EQC_i , représentées sur la figure 25 (A) sont assimilées aux incertitudes journalières moyennes mensuelles sur les mesures d'évaporation aux deux stations. L'incertitude des mesures d'évaporation sur bac varie en fonction du pas de temps choisi pour le calcul des lames évaporées. Il est prévisible que cette incertitude diminue lorsque la période augmente. Cette relation est illustrée par la figure 25 (B) sur laquelle une valeur de I_{EPAN} est calculée pour des pas de temps compris entre 1 et 30 jours consécutifs. Les valeurs d'incertitude sont obtenues en remplaçant les valeurs journaliers de E_{HADADA_i} et E_{JANET_i} par les cumuls d'évaporation calculés sur plusieurs jours.

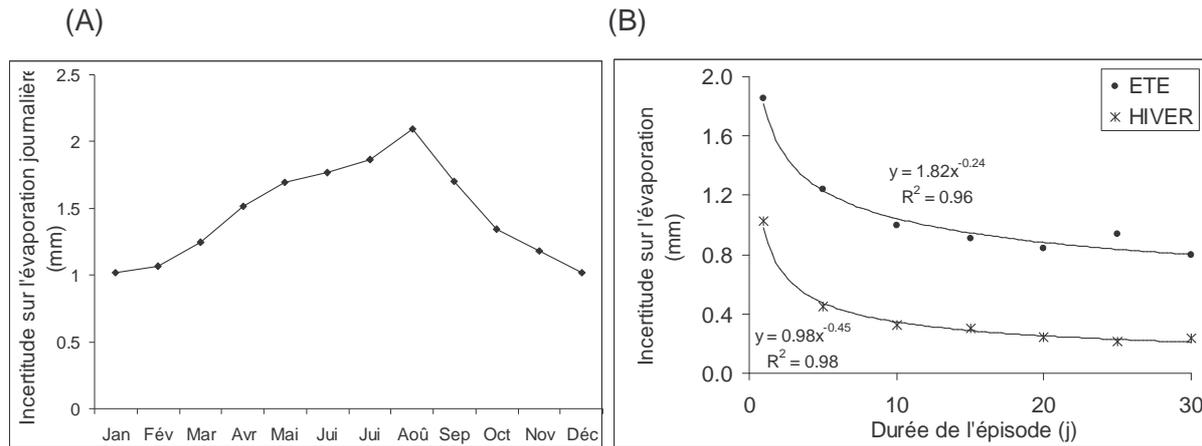


Figure 25. Incertitude sur l'évaporation calculée à partir des mesures aux stations de Hadada et Janet sur la période août 1995 – sept. 2001. A : Relation entre saison et incertitude sur valeurs journalières. B : Relation entre pas de temps pour le calcul des lames évaporées et incertitude. ETE = mois de juillet et août. HIVER : mois de décembre, janvier et février.

La figure 25 (A) montre que l'écart entre les valeurs journalières d'évaporation mesurées aux deux stations est maximal en été (2,1 mm en août) et minimal en hiver (1 mm en décembre et janvier). La figure 25 (B) montre que pour une même saison, l'écart entre les deux stations diminue lorsqu'il est moyenné sur un nombre de jours croissant. Cette méthode ne permet d'apprécier l'incertitude sur les mesures d'évaporation qu'aux stations de Janet et de Hadada, incertitude que nous supposons identique à ces deux stations. Une seconde méthode pour estimer l'incertitude sur E_{PAN} sur l'ensemble des 11 bacs évaporatoires consiste à l'assimiler à l'écart-type interannuel des mesures journalières. Cette méthode conduit probablement à une surestimation de l'incertitude car la variabilité interannuelle de l'évaporation journalière est due en partie à des facteurs naturels liés aux climats (ensoleillement, vent, température, humidité de l'air), susceptibles de varier entre les années et indépendants de la mesure. Cet écart-type est calculé sur les valeurs journalières de E_{PAN} , moyennées sur des périodes variant entre 1 et 30 jours. La figure 26 présente les valeurs d'incertitude sur l'évaporation calculées aux stations de Janet de Hadada par les deux méthodes. Méthode 1 : incertitude = écart quadratique centré entre les valeurs mesurées aux deux stations. Méthode 2 : incertitude = écart-type interannuel des valeurs mesurées à une même station.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

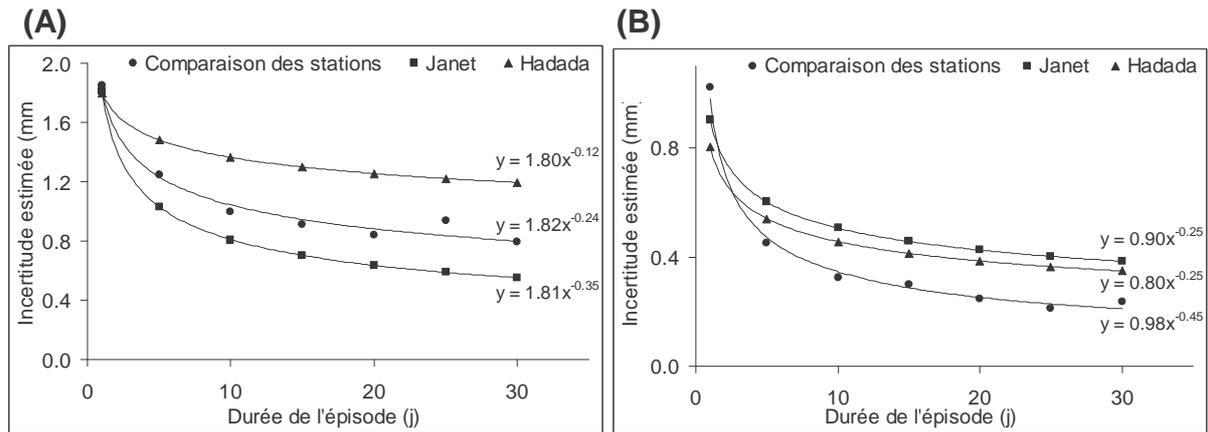


Figure 26. Comparaison des méthodes estimant l'incertitude sur les mesures d'évaporation. « Comparaison des stations » : écart quadratique moyen centré entre les stations Janet et Hadada. « Janet » et « Hadada » : écart-type interannuel des valeurs journalières d'une même station. (A) : été (juillet et août). (B) : hiver (décembre, janvier et février). Pour les 6 courbes de régressions, $0,96 < R^2 < 1,00$.

En été (figure 26(B)), les deux méthodes aboutissent à des résultats cohérents : les valeurs d'incertitudes calculées par la méthode 1 sont égales, à 4% près, à la moyenne des valeurs d'incertitudes des stations de Janet et de Hadada, calculées par la méthode 2. En hiver (figure 26(A)), les écarts entre les estimations des incertitudes par les deux méthodes sont d'environ 25%. Ils traduisent probablement la surestimation de l'incertitude par la deuxième méthode qui ne permet pas de différencier la variabilité interannuelle naturelle de l'évaporation journalière et la variabilité due aux erreurs de mesure. La méthode 2 sera utilisée pour estimer l'incertitude sur les mesures de E_{PAN} pour les 12 stations, sachant qu'elle peut conduire à une surestimation de l'incertitude réelle. Des courbes de régression de la forme $Y = aX^b$ sont utilisées pour déterminer l'incertitude absolue Y [mm/j] sur les valeurs de E_{PAN} [mm/j] en fonction de la durée X [j] sur laquelle E_{PAN} est moyennée. Les valeurs des coefficients a et b des courbes de régression et les coefficients de détermination correspondants sont réunis dans le tableau 7.

Tableau 7. Paramètres des courbes de régression ($Y = aX^b$) utilisées pour calculer l'incertitude (Y) sur les mesures de E_{PAN} . X : durée de la période sur laquelle E_{PAN} est moyenné. R^2 : coefficient de détermination de la régression. Hiver : mois de déc., jan. et fév. Été : juil. et août. Mi-saison : mar, avr, mai, juin, sep, oct et nov.

Retenue	Hiver			Mi-saison			Été		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
Abdessadok	1.59	-0.21	95.3%	1.85	-0.21	99.2%	2.11	-0.21	96.6%
Brahim Zaher	1.02	-0.32	98.0%	1.59	-0.30	97.0%	2.16	-0.28	93.8%
El Gouazine	1.01	-0.23	91.3%	1.53	-0.14	93.6%	2.05	-0.11	88.6%
El Moudhi	1.16	-0.33	99.5%	1.51	-0.25	98.3%	1.88	-0.20	96.3%
Fidh Ali	1.04	-0.17	91.0%	1.61	-0.18	98.0%	2.18	-0.18	98.5%
Hadada	0.80	-0.25	96.1%	1.30	-0.15	95.1%	1.80	-0.12	92.5%
Janet	0.90	-0.25	99.1%	1.35	-0.31	97.8%	1.81	-0.35	94.7%
Jedeliane	0.78	-0.17	94.9%	1.15	-0.16	98.9%	1.52	-0.16	98.8%
Mora	1.16	-0.19	92.7%	1.21	-0.13	94.1%	1.26	-0.09	91.8%
M'Richet	1.51	-0.23	93.1%	1.78	-0.20	98.4%	2.04	-0.17	98.4%
Saadine 2	1.07	-0.20	87.0%	1.91	-0.20	99.1%	2.76	-0.19	98.0%
El Haouareb	0.59	-0.16	99.9%	1.23	-0.10	98.3%	1.88	-0.09	96.3%
Moyenne	1.05	-0.23		1.50	-0.19		1.95	-0.18	
Coef. Var.	27%	-25%		17%	-33%		19%	-44%	

Le tableau 7 montre que l'incertitude Y sur les valeurs journalières de E_{PAN} ($Y=a$ lorsque $X=1$) est d'environ 2 mm en été et 1 mm en hiver. L'obtention d'écart-types plus élevés en été est probablement due aux plus fortes valeurs d' E_{PAN} pendant cette saison. Moyenner les valeurs de E_{PAN} sur 5 jours (resp. 30 jours) permet de réduire l'incertitude de 30% (resp. 50%) en été et 25% (resp. 50%) en hiver. Ces résultats montrent qu'il est préférable d'estimer les termes du bilan hydrique des retenues sur des périodes suffisamment longues pour minimiser l'incertitude sur les mesures d'évaporation.

iii. La cote du plan d'eau

Chaque variation de 1 cm du niveau d'eau dans la retenue est enregistrée par une sonde piézométrique immergée de type SPI 3, connectée par un câble à une centrale d'acquisition de données « Chloé ». Le niveau de référence de la sonde est ajusté avec une échelle limnimétrique de précision centimétrique positionnée près de la sonde. Les mesures journalières par observation directe sur l'échelle limnimétrique permettent de rectifier les dérives éventuelles de la sonde.

Pour la plupart des retenues collinaires, le zéro de l'échelle limnimétrique ne correspond pas au fond de la retenue. Des décalages pouvant dépasser plusieurs mètres sont fréquents. Ils évoluent généralement avec le temps car les retenues collinaires s'ensavent (tableau 8). Pour le barrage d'El Haouareb, la cote du plan d'eau correspond à l'altitude. Ces décalages quasi-systématiques entre la cote du plan d'eau et la hauteur réelle du niveau d'eau ne facilitent pas la comparaison des bilan hydriques des différentes retenues mais

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

nous choisissons de conserver les valeurs de cote d'origine pour que nos résultats numériques soient plus facilement comparables aux travaux antérieurs déjà réalisés sur ces retenues.

Tableau 8. Evolution des niveaux d'envasement des retenues entre les premiers et derniers nivellements.

Retenue	Cote fond retenue (mm) et date			
	1 ^{ère} mesure		Dernière mesure	
Abdessadok	1500	10/93	4500	09/98
Fidh Ben Naceur	500	01/93	3000	07/98
Hadada	0	09/93	3000	05/96
Jannet	500	09/93	6000	05/98
Jedeliane	-4500	01/95	Pas de mesure	
Mora	-5000	03/96		
Mrichet	1500	03/93	3500	03/98
Sadine 2	0	11/92	7500	09/98
El Haouareb	198000	08/89	204000	06/05
El Moudhi	-1500	11/93	1000	09/98
Brahim Zaher	2500	03/94	5500	09/98
El Gouazine	1500	10/93	3000	05/98
Fidh Ali	0	01/93	4500	09/98

Bien que nous disposions d'un enregistrement continu des variations de la cote pour chaque retenue collinaire étudiée, le bilan hydrique en période de déstockage est calculé au pas de temps journalier car l'évaporation du bac n'est mesurée qu'une fois par jour. Une chronique de cotes journalières est constituée à partir des enregistrements continus en sélectionnant, pour chaque journée, la cote mesurée au moment le plus proche de 8h00, heure à laquelle l'évaporation est théoriquement mesurée par l'observateur.

Les erreurs de mesure de la cote ont plusieurs origines possibles : batillage, dérèglement de la sonde, variations de la pression atmosphérique (1 cm d'eau \approx 10 mbar), erreurs de retranscription dans le logiciel d'exploitation des données. En période de déstockage, les valeurs journalières du jour j ne vérifiant pas une décroissance continue de la cote sont corrigées et remplacées par la moyenne des valeurs des jours $j-1$ et $j+1$.

L'incertitude sur les valeurs de cote est supposée égale à la moitié du seuil de discrétisation de la mesure soit 5 mm. L'incertitude sur les variations journalières de la cote (ΔC_j) est donc de 10 mm. Contrairement à l'incertitude sur l'évaporation, l'incertitude sur ΔC_j est constante et identique pour toutes les retenues. A titre d'exemple, l'observation des périodes de vidange naturelle de la retenue collinaire de Hadada sur la période 1993-2000 indique que ΔC_j varie en moyenne entre 8 mm en hiver et 13 mm en été. L'incertitude moyenne sur ΔC_j est donc comprise entre 77% et 125%. L'incertitude ($I_{\Delta C_{nj}}$) sur la variation moyenne de la cote ΔC_{nj} , calculée sur un épisode de N_J jours, décroît quand N_J augmente, suivant la relation : $I_{\Delta C_{nj}} = 10 / N_J$ (figure 27).

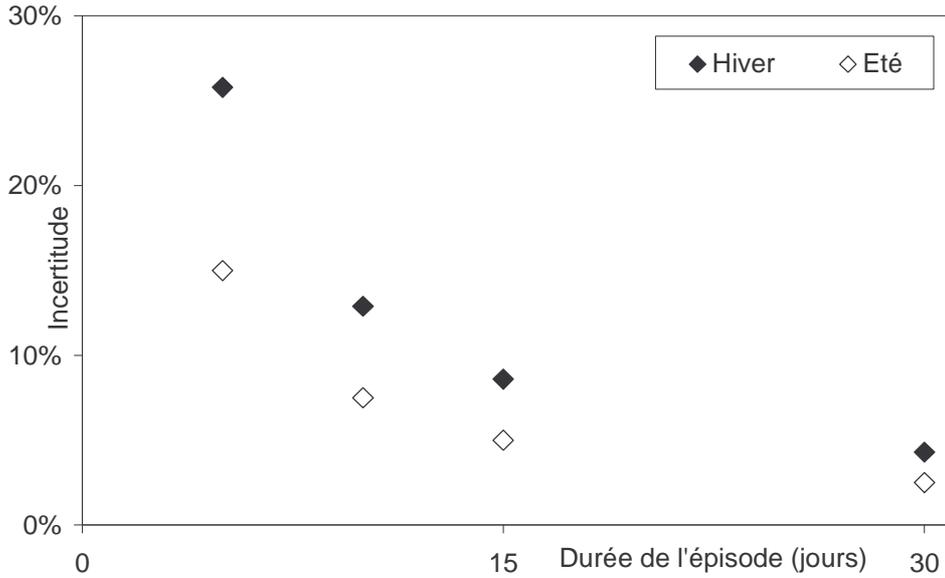


Figure 27. Incertitude sur ΔC_j calculée sur différentes durées (retenue collinaire de Hadada). Valeurs correspondant à une durée d'un jour non représentées (elles sont égales à 77% en hiver (déc., jan. et fév.) et 125% en été (juil. et août.).

iv. Les courbes hauteur-surface-volume

Les courbes d'étalonnage hauteur-surface et hauteur-volume sont utilisées pour déterminer la surface du miroir de la retenue et le volume stocké à partir de la cote du niveau d'eau. Le plus souvent, ces courbes sont tracées lorsque la retenue est vide, par nivellement, à partir de mesures planimétriques réalisées sur des courbes de niveau déterminées pour chaque variation de 50 cm de hauteur. Lorsque les retenues collinaires ne s'assèchent jamais (retenues collinaires de Hadada et de Mora), les courbes d'étalonnage sont réalisées à partir de mesures bathymétriques. La fonction f_s : surface = $f_s(\text{cote})$ est obtenue par interpolations polynomiales des valeurs mesurées tous les 50 cm de hauteur. La fonction f_v : volume = $f_v(\text{cote})$ est obtenue par cubature à partir de la fonction f_s . Ces courbes ont généralement été réactualisées une fois tous les deux ans pour les 12 retenues collinaires étudiées et 4 fois, entre 1989 et 2002, pour le barrage d'El Haouareb.

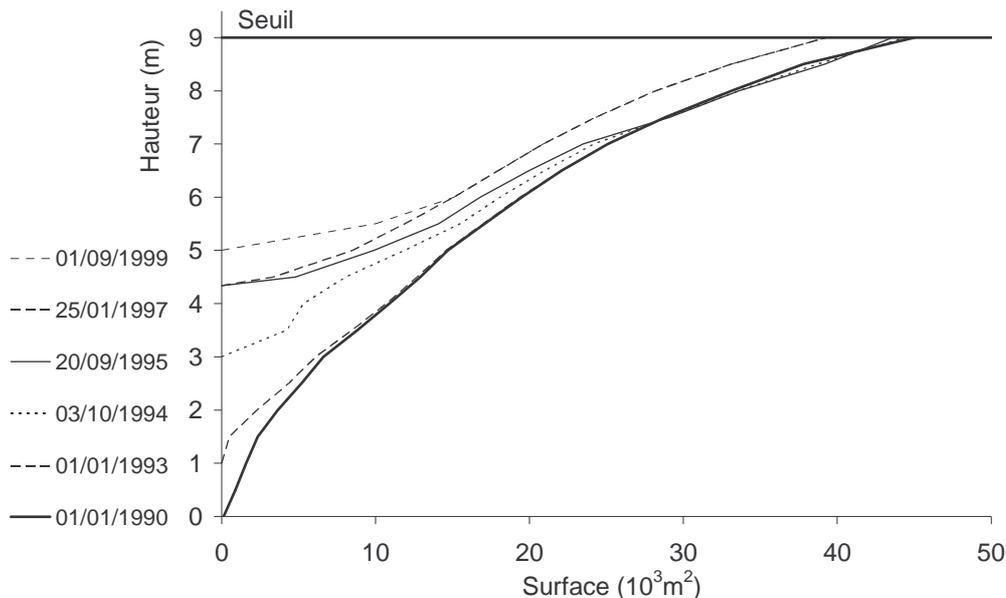


Figure 28. Courbes d'étalonnage Hauteur-Surface, mesurées à Fidh Ali entre la date de construction (01/01/1990) et le 01/09/1999.

La figure 28 présente les différentes courbes d'étalonnage hauteur-surface réalisées pour la retenue collinaire de Fidh Ali. La représentation des surfaces sur l'axe des abscisses permet de mieux percevoir l'évolution du profil de la retenue collinaire au cours des années. Le fond de la retenue reçoit préférentiellement les sédiments drainés par l'oued. En s'accumulant, ils colmatent plus rapidement les niveaux les plus bas. Ainsi, en 10 ans, le fond de la retenue collinaire de Fidh Ali est remonté de cinq mètres alors que l'épaisseur des dépôts de sédiments ne dépasse pas un mètre sur 75% de la superficie de la retenue.

Evolution de la géométrie des retenues collinaires

En retenant les sédiments, les retenues collinaires s'ensavent et ne peuvent donc garantir un approvisionnement en eau durable. Une modélisation de l'ensablement réalisée sur une trentaine d'ouvrages en Tunisie au Maroc et en Syrie montre que la durée de vie moyenne (comblement jusqu'à la cote du déversoir) est de 29 années : 25% des lacs auraient une durée de vie inférieure à 20 ans et environ 36% une durée de vie supérieure à 50 ans (Albergel et al., 2001b). Ces résultats reposent sur l'hypothèse que la moyenne de l'ensablement sur la période d'étude (1993-2000) est représentative du régime hydrologique moyen interannuel (une année excédentaire pour deux années sèches).

La figure 29 représente la capacité de stockage des retenues (A) et leur profondeur maximale (B) en fonction du temps. Le premier étalonnage ayant été effectué lors de la mise en service, il correspond à l'instant zéro et les dates des étalonnages suivants sont

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

référéncées par rapport à celui-ci. Chaque point correspond à une courbe d'étalonnage mesurée. La retenue collinaire de Mora n'est par représentée car elle n'a été étalonnée qu'une seule fois.

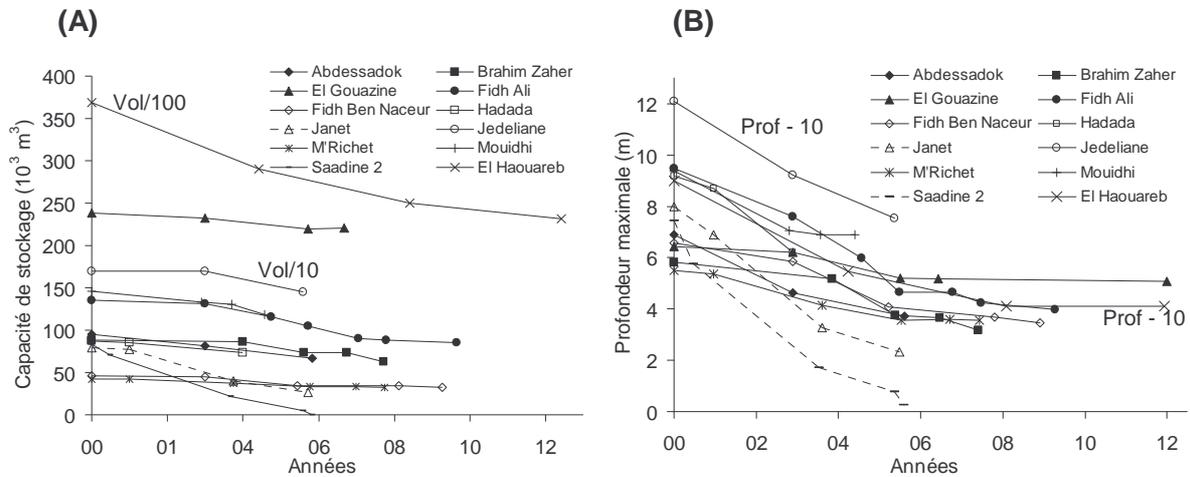


Figure 29. Evolution de la capacité de stockage (A) et de la profondeur maximale (B) des retenues collinaires et du barrage El Haouareb depuis leur construction. Volumes des retenues de Jedeliane et d'El Haouareb divisés par 10 et 100 respectivement. Valeur 10 soustraite aux profondeurs maximales des retenues de Jedeliane et d'El Haouareb.

Des taux d'envasement moyens annuels sont calculés pour chaque retenue, à partir des régressions linéaires appliquées aux points de la figure 29 (A). Ils permettent d'estimer la durée de vie (entre la date de création et le comblement jusqu'au niveau du déversoir) de chaque retenue en supposant que la période de mesure est représentative du régime hydrologique de la région. Le tableau 9 rassemble ces valeurs.

Tableau 9. Taux d'envasement des retenues déterminés par régression linéaire sur les points de la figure 29 (A). R^2 : coefficient de détermination de la régression. Durée de vie estimée à partir de la capacité initiale et du taux d'envasement.

	Taux d'envasement		Durée de vie (année)
	m^3/an	R^2	
Abdessadok	4 828	100%	20
Brahim Zaher	3 035	79%	29
El Gouazine	2 829	95%	84
Fidh Ali	6 147	92%	22
Fidh Ben Naceur	1 653	87%	28
Hadada	3 632	99%	24
Janet	10 023	97%	8
Jedeliane	43 502	71%	39
M'Richet	1 339	97%	32
El Moudihi	5 520	94%	27
Saadine 2	13 776	99%	6
El Haouareb	1 105 848	93%	192

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

La durée de vie moyenne des 12 retenues collinaires obtenue par régression linéaire est de 29 ans, durée équivalente aux résultats obtenus par Albergel et al. (2001b) à partir de 30 ouvrages localisés en Tunisie, au Maroc et en Syrie.

La profondeur maximale de chaque retenue (figure 29 (B)) décroît en fonction du temps avec un taux de décroissance qui s'atténue au cours des années. L'ajustement de différents modèles de régression aux couples (x, P) (où P est la profondeur maximale après une durée de x années) par optimisation du critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970), montre que le modèle $P = a \exp(-bx) + c$ (a, b et c étant les paramètres du modèle) est celui qui présente les meilleures efficacités¹⁵.

Du fait de l'envasement, la forme des retenues collinaires évolue au cours du temps, modifiant les relations entre la hauteur d'eau H [m], la surface du miroir S [m²] et le volume stocké V [m³]. Ces relations sont caractérisées ponctuellement par les courbes d'étalonnage mais leur évolution progressive n'est pas connue. Elle est convenablement représentée par une fonction « puissance » de la forme $V = AxH^\alpha$ et sa dérivée par rapport à H : $S = \alpha AxH^{\alpha-1}$ où A et α sont les paramètres du modèle. Cette formule est ajustée à chaque courbe d'étalonnage par la méthode de Cadier et al. (1990) : le couple (A, α) est déterminé en ajustant une régression linéaire sur les couples (Ln(H_i), Ln(V_i)), chaque point étant pondéré par V_i. Les points correspondant à des volumes inférieurs à 15% du volume maximal ne sont pas pris en compte dans la régression à cause des irrégularités du profil topographique pour les niveaux les plus bas. A est le coefficient d'ouverture, fonction du caractère plus ou moins encaissé de la vallée où se situe la retenue. α est le coefficient de forme, lié à la concavité des berges de la retenue. Le tableau 10 réunit les valeurs α et A obtenues pour chaque courbe d'étalonnage avec un excellent coefficient de détermination : $R^2 = 1,00$ pour toutes les régressions.

¹⁵ Critères de Nash-Sutcliffe > 96%. Les autres modèles testés sont : $P = a - b \operatorname{Arctan}(cx)$ et $P = a + 1/(bx + c)$.

Tableau 10. Couples de paramètres (A, α) permettant d'ajuster la formule $V = A \times H^\alpha$ aux 55 courbes d'étalonnage hauteur-volume des retenues étudiées. Les courbes d'étalonnage sont identifiées par leur date de mesure.

Abdessadok	α	A	Fidh Ben Naceur	α	A	M'Richet	α	A
01/01/1990	2.21	1 320	01/01/1990	2.05	1 000	01/01/1992	2.55	550
01/01/1993	1.71	5 944	01/01/1993	1.84	1 771	01/01/1993	2.51	620
01/11/1995	1.70	7 201	11/06/1995	1.74	3 058	01/10/1995	2.08	2 003
Brahim Zaher	α	A	15/02/1998	1.53	4 742	05/10/1997	1.89	3 023
01/01/1990	2.19	1 838	10/04/1999	1.54	4 879	01/01/1999	1.90	2 904
01/01/1994	1.98	3 296	Hadada	α	A	26/09/1999	1.88	2 999
11/08/1995	1.71	7 546	01/01/1992	2.71	209	Mouidhi	α	A
27/09/1996	1.73	7 839	01/01/1993	2.64	186	01/01/1993	2.29	846
20/09/1997	1.79	7 886	01/01/1996	2.08	1 596	30/11/1995	2.03	2 529
El Gouazine	α	A	Janet	α	A	18/09/1996	2.19	1 632
01/01/1990	2.43	2 588	01/01/1992	2.74	292	01/08/1997	2.11	1 705
01/01/1993	2.37	3 072	01/01/1993	2.35	926	Saadine 2	α	A
24/09/1995	2.12	6 681	01/10/1995	2.08	4 164	01/01/1992	1.80	2 129
09/09/1996	2.09	7 078	21/09/1997	1.89	6 315	01/07/1992	1.79	2 937
01/07/2002	1.92	10 305	Jedeliane	α	A	05/09/1995	1.66	6 965
Fidh Ali	α	A	01/01/1992	2.64	455	01/08/1997	2.39	4 024
01/01/1990	2.82	235	01/01/1995	2.24	2 147	29/10/1997	2.97	3 032
01/01/1993	2.24	1 406	05/08/1997	2.26	2 113	El Haouareb	α	A
03/10/1994	2.15	2 444	Mora	α	A	01/08/1989	1.94	296 466
20/09/1995	1.81	6 449	01/01/1992	2.40	984	01/01/1994	1.83	577 566
25/01/1997	1.80	5 656			01/01/1998	1.78	761 203	
13/10/1997	1.67	7 927			01/01/2002	1.92	531 772	
01/09/1999	1.65	8 619						

Le tableau 10 indique que la valeur initiale de α est égale en moyenne à 2,37 et varie peu entre les retenues collinaires (CV=14%). La variabilité « inter-retenues » de la valeur initiale de A est plus marquée (pour les retenues collinaires, moyenne=1037 et CV=76%). Cadier et al. (1990) avaient obtenu des valeurs moyennes de 2,7 et 1000, pour α et A respectivement pour les açudes de la région nord-est du Brésil. La figure 30 représente l'évolution des coefficients α et A au cours des années. Pour chaque retenue (à l'exception de Saadine 2 et El Haouareb), α décroît avec un taux de décroissance qui s'atténue au cours des années. Le modèle de régression de forme exponentielle, utilisé précédemment avec les couples (P, x), offre également les meilleurs ajustements sur les couples (x, α) (Nash-Sutcliffe > 90%).

La décroissance de α s'explique par le changement progressif du profil des berges, évoluant d'une forme convexe vers une forme concave (figure 28). L'exception de Saadine 2 s'explique sans doute par le comblement quasi-total de la retenue à partir d'août 1997. La particularité d'El Haouareb ($\alpha=1,92$ le 01/01/2002) est probablement due à la géométrie plus irrégulière du réservoir (cf. Kingumbi (1999) et Virrion (2006)). Pour chaque retenue, A croît régulièrement au cours du temps avec un taux moyen de 348 an^{-1} . Ce taux de croissance est

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

extrêmement stable entre les différentes retenues collinaires (CV=7%) et un peu plus élevé pour le barrage d'El Haouareb : 684 an^{-1} . Cette croissance traduit l'adoucissement progressif de la pente des berges des retenues lorsqu'elles s'ensavent (figure 28).

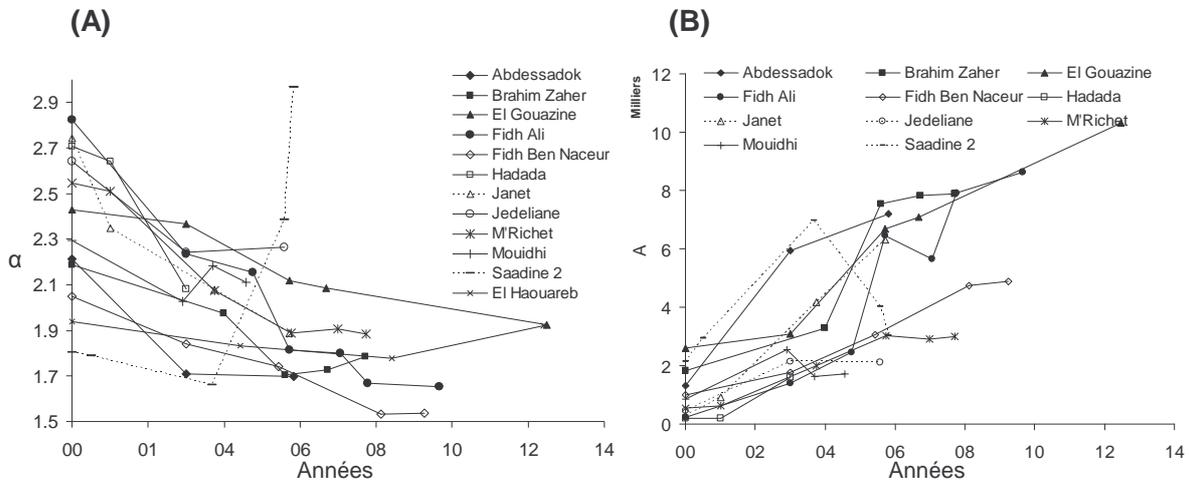


Figure 30. Evolution des coefficients de forme (A) et d'ouverture (B) en fonction du temps écoulé depuis la date de construction (correspondant au 1^{er} étalonnage).

Les valeurs α et A de chaque courbe d'étalonnage hauteur-volume permettent de déterminer la hauteur moyenne du niveau d'eau dans chaque retenue (H_m) à partir de la hauteur d'eau H suivant la relation : $H_m = V/S = H/\alpha$. Cette relation sera utilisée par la suite pour calculer la drainance des retenues (§ 3.2.2.ii).

Estimation des incertitudes sur les courbes d'étalonnage

L'incertitude sur le volume stocké dans les retenues collinaires et calculé à partir des mesures de cote et des courbes d'étalonnage a deux origines principales :

- La première est due à l'imprécision sur les mesures et correspond à deux types d'erreurs E_1 et E_2 . L'erreur E_1 est liée à l'incertitude sur la cote et peut être assimilée à la différence de volume correspondant à une variation de cote de 5 mm (incertitude sur la cote). L'erreur E_2 provient de l'interpolation nécessaire au calcul de la surface ou du volume pour une cote située entre deux mesures successives. En effet, la relation cote-volume n'est établie que pour des hauteurs successives distantes de 50 cm. Soit P_1 et P_2 , deux points mesurés de la courbe d'étalonnage (hauteur [cm] ; volume [m^3]), de coordonnées respectivement égales à $(c ; V_1)$ et $(c+50 ; V_2)$. Pour tous les points de la courbe situés entre P_1 et P_2 , $E_1 = (V_2 - V_1) / [50 \times (V_2 + V_1)]$ et $E_2 = (V_2 - V_1)/(V_2 + V_1)$. On en déduit l'incertitude totale $I_V = |E_1| + |E_2| \approx |E_2| \approx (V_2 - V_1) / (V_2 + V_1)$. Le calcul de l'incertitude sur la surface (I_S) est équivalent. La figure 31 présente les valeurs de I_V et I_S en fonction de la cote du plan d'eau et montre que l'incertitude décroît hyperboliquement en fonction de la cote.

- La seconde est liée à l'obsolescence des courbes d'étalonnage. Le tableau 10 montre qu'elles ne sont pas systématiquement mises à jour chaque année. Très peu d'étalonnages ont été réalisés pour certains lacs (ex. : Mora). L'estimation du volume d'un apport conduit généralement à une surestimation de son volume réel lorsque la courbe d'étalonnage utilisée est trop ancienne. La figure 32 illustre la surestimation du volume d'un apport calculé de 1000 ou 10 000 m³, induite par l'obsolescence de la courbe d'étalonnage utilisée¹⁶. Les valeurs des surestimations sont obtenues à partir des valeurs moyennes de α et A, auxquelles sont appliqués des taux annuels de décroissance et de croissance respectivement égaux à $8,55 \times 10^{-2}$ et 348 (cf. ci-dessus). Ceci permet d'obtenir une série de courbes d'étalonnages moyennes pour l'ensemble des retenues collinaires pour six années successives. La variation de cote induite par un apport V_1 de 1000 m³ ou 10 000 m³ est calculée à partir de la courbe d'étalonnage de la première année. Les volumes V_2 à V_6 correspondant à cette variation de cote sont successivement calculés à partir des courbes d'étalonnages établies pour les années 2 à 6. Utiliser une courbe d'étalonnage datant de 1, 2, 3, 4 et 5 ans conduit donc à estimer des volumes réels respectivement égaux à V_2 , V_3 , V_4 , V_5 et V_6 avec la valeur V_1 . Une courbe d'étalonnage ancienne de n années conduit donc à une surestimation du volume réel égale à $(V_{n+1} - V_1)/V_1$. Ce calcul dépend évidemment du niveau d'eau dans la retenue juste avant l'apport. Les différentes courbes de la figure 32 sont calculées pour des gammes de niveau d'eau initial dont les valeurs minimales correspondent à la cote du fond de la retenue (retenue vide). La figure 32 montre que la surestimation du volume de l'apport est d'autant plus élevée que le volume de l'apport est faible, le niveau d'eau dans la retenue est bas et que la courbe d'étalonnage est obsolète.

¹⁶ Ces volumes de crues correspondent respectivement à des temps de retour moyen de 0,1 et 0,5 année calculés sur l'ensemble des retenues collinaires étudiées.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

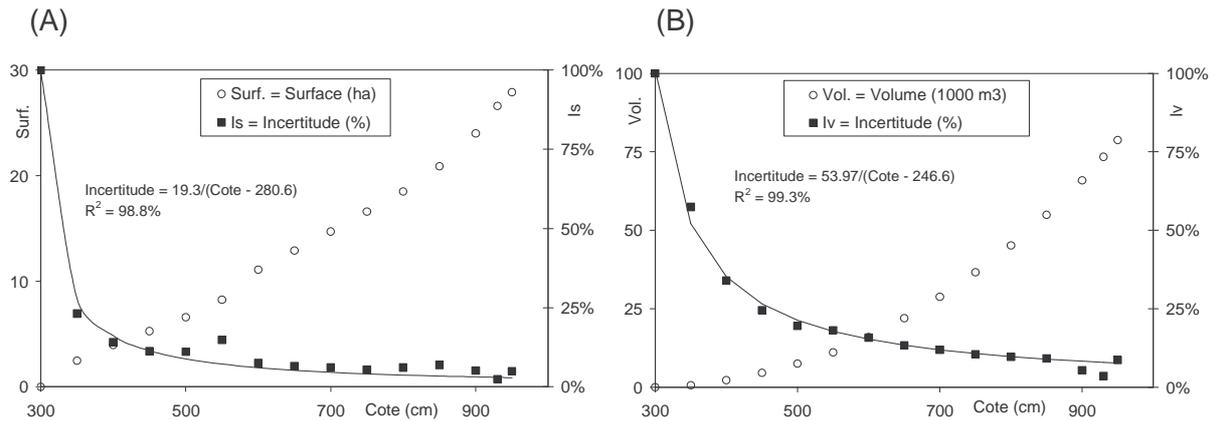


Figure 31. Incertitude sur les courbes d'étalonnage hauteur-surface (A) et hauteur-volume (B) de la retenue collinaire de Hadada, réalisée en mai 1996. La cote du fond de la retenue est alors de 300 cm.

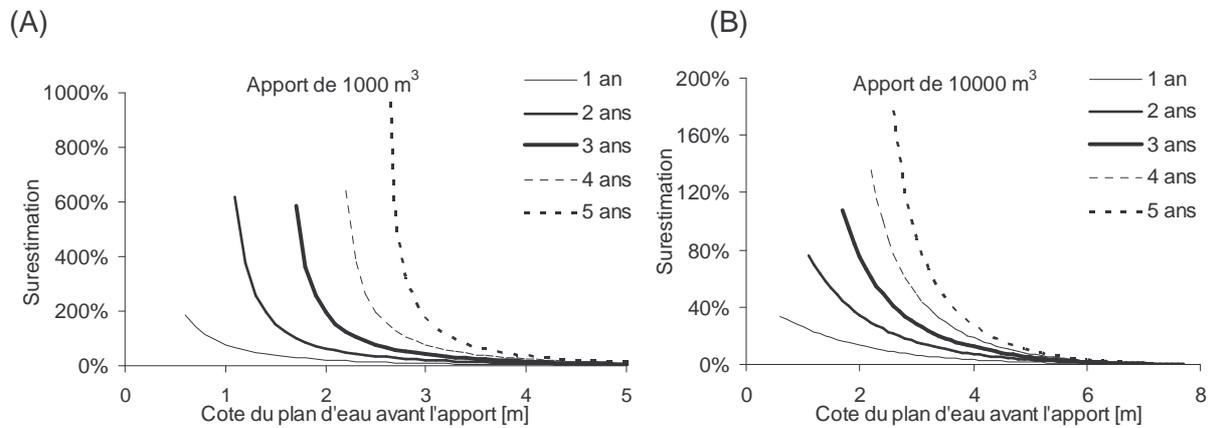


Figure 32. Surestimation du volume d'un apport due à l'obsolescence des courbes d'étalonnage, (A) : apport calculé de 1000 m³, (B) : apport calculé de 10 000 m³. L'apport a lieu entre 1 et 5 ans après le dernier étalonnage.

3.2. Les flux de déstockages naturels

3.2.1. Etat de l'art

La littérature offre de nombreux exemples de travaux sur la détermination des pertes par évaporation et des volumes infiltrés à partir des plans d'eau naturels ou artificiels. Les objectifs de ces études sont multiples. Ils visent à comprendre le fonctionnement hydrologique des sites de recharge des aquifères (voir Desconnets (1994) et Martin-Rosales et Leduc (2003) pour la région du Sahel, Grünberger et al. (2004) et Montoroi et al. (2004) pour la Tunisie centrale), prévoir les volumes disponibles pour l'irrigation pendant les périodes de sécheresse (voir Mugabe et al. (2003) au Zimbabwe, Ngigi et al. (2005) au Kenya et Gromiec (1983)), élargir les connaissances sur le fonctionnement hydrologique des retenues et déterminer leurs potentialités pour l'agriculture (voir Molle (1991) pour la région du Nordeste au Brésil, Estrada Avalos (1999) et Estrada Avalos et al. (2004) pour la région nord du Mexique). En Tunisie, Albergel et al. (1998) modélisent la vidange de la retenue collinaire d'El Gouazine localisée au nord du bassin versant du Merguellil (figure 18). Ils proposent un modèle empirique fonctionnant au pas de temps journalier, uniquement sur les périodes sans apport. Ce modèle prévoit le volume restant dans la retenue depuis le début de la saison sèche (avril) jusqu'au tarissement de la retenue en été, en fonction des volumes prélevés. La vidange naturelle de la retenue est reconstituée à partir de l'observation des courbes de tarissement du niveau d'eau observées. Les flux de déstockages ne sont donc pas modélisés. En l'absence de prélèvement, le volume stocké dans la retenue est donc calculé à partir d'une simple fonction décroissante du temps, indépendante des paramètres de la retenue (hauteur, volume et surface du stock d'eau) qui déterminent réellement les flux de déstockage.

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer l'évaporation et l'infiltration tandis que les fuites sont négligées la plupart du temps.

i. Détermination de l'évaporation

Bien que l'eau évaporée finisse par regagner la surface du sol sous la forme de précipitations, ce cycle intervient à des échelles spatiales qui dépassent largement la Tunisie. L'évaporation à partir des retenues représente donc une perte définitive de ressource hydrique. Leur estimation est fondamentale pour juger de l'efficacité d'une retenue à fournir une ressource en eau pérenne. Il existe de nombreuses méthodes pour estimer les volumes évaporés depuis les réservoirs de surface.

Mesures sur bac évaporatoire

La méthode la plus simple pour estimer l'évaporation d'une retenue consiste à mesurer les lames évaporées à partir d'un bac situé à proximité (voir les travaux de Ikebuchi et al. (1988) sur le lac Biwa au Japon, Abtew (2001) sur le lac Okeechobee en Floride du sud, Jensen et al. (2005) sur le lac Berryessa en Californie).

Il existe principalement deux types de bacs évaporatoires. Le bac de classe A est la référence standard de l'organisation mondiale de la météorologie. Le bac de type Colorado est le plus couramment utilisé aux Etats-Unis. Les travaux de Roche (1958), Riou et Dubois (1966) et Pouyaud (1986), pour l'Afrique occidentale, et les travaux anglophones de Webb (1966), Stewart et Rouse (1976) et Morton (1986) montrent que la principale difficulté de cette méthode consiste à extrapoler les mesures sur bac à l'évaporation réelle du lac. Les causes sont multiples : le lac, plus profond que le bac, stocke davantage de chaleur. Il tamponne d'autant mieux les variations journalières et saisonnières de température qu'il est profond (Yu et Vernon Knapp, 1985; Sacks et al., 1994; Tasumi, 2005; Panin et al., 2006). Dans les petits lacs et/ou les lacs peu profonds, l'évaporation est surtout contrôlée par le bilan radiatif et la température de l'air. Dans les grands lacs et/ou les lacs profonds, une partie de l'énergie radiative reçue en été est stockée dans la masse d'eau et libérée en hiver. Par conséquent, pour une même quantité d'énergie radiative reçue, la quantité relative d'eau évaporée par un grand lac et/ou un lac profond sera plus faible en été et plus élevée en automne que dans le cas d'un plus petit lac (Hounam, 1973). Les températures plus extrêmes du bac, particulièrement sous climat chaud, induisent des transferts de chaleur latéraux vers le substratum (Oroud, 1998). L'humidité de l'air qui surplombe le plan d'eau varie avec la taille de la retenue, la forme de l'encaissant (Morton, 1983b; Condie et Webster, 1997). L'orientation du bac et de la retenue par rapport aux vents dominants modifie également le ratio des lames évaporées en accroissant ou diminuant les écarts entre les humidités relatives de l'air au dessus des deux surfaces évaporantes (Allen et al., 1998). La présence du bac peut induire des turbulences locales, éventuellement amplifiées par des objets du voisinage. La distance entre le bac et la retenue joue également un rôle important (Hounam, 1973). Les différences de salinité et de turbidité entre les eaux du bac et du lac peuvent également introduire des différences entre les lames évaporées (Parker et al., 1999).

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

Des formules permettant de calculer l'évaporation de lacs (E_{RET}) à partir de l'évaporation du bac (E_{PAN}) ont été établies par plusieurs auteurs. Pouyaud (1986) calcule des coefficients de transposition ($C_T = E_{RET}/E_{PAN}$) entre le bac Colorado et plusieurs lacs d'Afrique subsaharienne. En moyenne annuelle, C_T varie entre 0,7 et 0,9. Pour le bac Classe A, C_T est habituellement fixé à 0,7 (Hounam, 1973; Burman et Pochop, 1994). La valeur annuelle de C_T (bac Colorado) pour le lac de Hefner a été fixée à 0,83. Le bac Colorado étant peu utilisé en dehors des Etats-Unis, les valeurs de C_T lui correspondant ont souvent été calculées en multipliant par 0,86 les valeurs de C_T obtenues pour le bac Classe A (Hounam, 1973). On peut citer également le travail de synthèse de Brunel et Bouron (1992) dans lequel figurent les valeurs des coefficients annuels C_T (bac Colorado) calculés pour 33 lacs d'Afrique de l'Ouest et centrale : les valeurs de C_T varient entre 0,63 et 1,00, avec une moyenne de 0,84 et un écart-type de 0,1.

Dans l'étude des açudes du Nordeste brésilien semi-aride, Molle (1991) montre que C_T (bac Classe A) varie surtout en fonction de la surface du miroir de l'açude. La relation expérimentale établie entre C_T et la superficie du plan d'eau (S) indique une variation de 0,7 (S > 30 ha) à 1,0 (1 ha < S < 5 ha). Hounam (1973) avait déjà envisagé l'importance du rôle joué par la surface de la retenue : plus cette surface est grande et plus l'air qui se déplace au dessus du miroir s'humidifie et ralentit l'évaporation de la retenue. L'impact de ce processus sur la modification du ratio des lames évaporées est d'autant plus marqué que l'air en contact avec le miroir du plan d'eau est sec.

Les variations saisonnières de C_T ont également été étudiées. Pouyaud (1986) montre que C_T (bac Colorado entouré de sol nu) est variable d'un mois à l'autre sur le lac de Bam (Burkina-Faso). Il dépasse 0,80 en saison des pluies et descend à moins de 0,65 en saison sèche. Les valeurs obtenues au lac Tchad présentent des variations relatives inter mensuelles comparables. Pour le lac de Hefner dans l'état d'Oklahoma, Sellers (1965) obtient les mêmes variations inter saisonnières avec des valeurs maximales pour C_T (bac classe A) en hiver (0,90) et minimales en été (0,65). En revanche les variations inter mensuelles de C_T (bac Classe A) obtenues pour le lac de Okeechobee en Floride (Kohler, 1954) sont beaucoup moins nettes. Fu et al. (2004) comparent les lames journalières évaporées entre des bacs évaporatoires (E_1) de surfaces comprises entre 314 cm² et 5 m² et un réservoir de référence de 20 m² (E_2). Pour l'ensemble des bacs évaporatoires, les coefficients de transposition moyens mensuels (E_2/E_1) suivent les mêmes variations inter saisonnières avec une valeur minimale en mars ou avril et maximale en août ou septembre. Ces observations ont été réalisées dans la province de Nansihu, en Chine orientale, sous un climat de mousson principalement contrôlé par les fluctuations des vents dominants, de

secteur est et sud au printemps, ouest-sud-ouest en automne et nord nord-ouest en hiver. Outre le contexte physique pris en compte dans la transposition, l'imprécision de la mesure des niveaux relevés sur le bac s'ajoute à la difficulté d'estimer l'évaporation réelle de la retenue.

Cet état de l'art révèle la rareté des études sur le coefficient C_T en milieu semi-aride. Il souligne son extrême sensibilité aux variations atmosphériques particulièrement instables en milieu semi-aride (forte amplitude thermique journalière et saisonnière), accrue par les différences géométriques entre bac et retenue. Les valeurs moyennes de C_T varient en fonction des sites étudiés mais sont toujours comprises entre 0,6 et 1,0.

Les modèles météorologiques

Ils utilisent des données, telles que la température de l'air, de l'eau, le rayonnement solaire, la durée d'ensoleillement, la vitesse du vent, l'humidité de l'air et sa pression de vapeur saturante. La plupart des équations ou modèles utilisés se basent sur des bilans énergétiques : méthodes de Bowen, Priestley-Taylor, Penman-Monteith (voir les travaux de Simon et Mero (1985), Vardavas et Fountoulakis (1996), Finch (2001), Croley (2005)). Des relations empiriques ont permis dans certains cas de mesurer les pertes évaporatoires de lacs. Makkink (1956) corrèle l'évaporation au rayonnement global, Riou (1972) établit une relation entre les températures moyennes maximales sous abri et l'évaporation. Mosalam et al. (1997) utilisent des observations satellitaires infrarouge du couvert nuageux qu'ils comparent à des mesures météorologiques au sol. D'autres études se sont basées sur la relation de complémentarité entre les évaporations réelles et potentielles (Morton, 1975, 1983a). Le modèle CRLE¹⁷ de Morton (1983b; 1986) est fréquemment utilisé (voir les travaux de dos Reis et Dias (1998) au Brésil, Vallet-Coulomb (2001) en Ethiopie).

Le bilan hydrologique

Il permet d'estimer les pertes par évaporation lorsque les autres flux de déstockage sont connus. Cette méthode a été appliquée sur plusieurs lacs de la région sahélienne : le lac de Guiers au Sénégal (Cogels et al., 1991), le lac Tchad (Vuillaume, 1981), le lac de Bam au Burkina Faso (Pouyaud, 1986). Cette méthode peut poser des problèmes dans le cas de retenues artificielles pour lesquelles la sous-estimation des fuites au niveau de la digue peut conduire à une surestimation de l'évaporation. L'imprécision cumulée sur l'ensemble des termes du bilan hydrique est l'inconvénient principal de cette méthode.

¹⁷ Complementary Relationship Lake Evaporation

Les méthodes chimiques

Elles consistent à calculer l'évaporation par comparaison des concentrations initiales et finales d'un élément chimique conservatif (chlorure, sulfate ou sodium selon le contexte chimique environnant) considérant qu'au cours d'une période sans apport, la masse de cet élément ne peut être perdue que par infiltration. Voir les travaux de Fuhrman et Merritt (1981) dans l'état de l'Utah, Cogels et Gac (1986) au Sénégal, Effler et Driscoll (1986) sur le lac Onondaga dans l'état de New York et Laraque (1991) dans le Nordeste brésilien.

Les méthodes isotopiques

Elles sont basées sur un suivi de la composition de l'eau en isotopes stables : oxygène 18 et deutérium. Le principe repose sur le fractionnement isotopique des atomes d'oxygène et d'hydrogène au cours des changements d'état liés à l'évaporation.

Les méthodes chimiques et isotopiques aboutissent à la mesure des variations volumiques du réservoir par évaporation. Elles nécessitent de ce fait la connaissance précise des relations hauteur-volume du réservoir pour calculer une lame évaporée. Les bilans de masse sont généralement calculés sur des intervalles de temps de plusieurs jours, le pas de temps journalier étant trop fin pour que ces méthodes soient significatives. Voir les travaux de Aly et al. (1993) sur la retenue du barrage d'Assouan en Egypte, ceux de Gibson, Edwards et Prowse (1996) et de Gibson, Reid et Spence (1998) dans le Canada Arctique.

La confrontation de résultats obtenus sur un même site par différentes méthodes permet de consolider les résultats, comme le démontrent Stewart et Rouse (1976), Omar et El Bakry (1981), Andersen et Jobson (1982), Desconnets (1994), Keskin et Terzi (2006).

ii. Détermination de l'infiltration

Avec l'évaporation, l'infiltration (I_f) constitue le seul flux contribuant au déstockage de la retenue lorsqu'il n'y a ni prélèvements ni lâchers de barrage. Bien qu'il s'agisse d'une perte en ressource de surface, l'eau infiltrée ne peut être considérée comme une ressource définitivement perdue si elle regagne un aquifère exploité par pompage.

Plusieurs méthodes permettent d'estimer les volumes infiltrés.

Les méthodes directes

Ces méthodes sont peu répandues et onéreuses. Elles nécessitent un infiltromètre placé sur le fond de la retenue. Il mesure les volumes infiltrés sur une section de quelques mètres carrés. Il est difficile à installer et les résultats sont généralement peu fiables

(Cherkauer et McBride, 1988). Ne permettant qu'une mesure très localisée, l'infiltromètre est surtout utilisé sur les retenues de petites tailles lorsqu'il s'agit d'estimer l'infiltration totale. L'avantage principal de cette méthode est la possibilité d'apprécier la variabilité spatiale de l'infiltration (voir les travaux de Shaw et Prepas (1990) aux Etats-Unis, Rosenberry et Morin (2004) en Nouvelle Angleterre). Associé à des piézomètres, l'infiltromètre permet d'analyser les interactions entre retenue et nappe (voir les travaux de Woessner et Sullivan (1984) dans le Nevada).

Les méthodes indirectes

Il existe principalement deux méthodes indirectes pour mesurer les volumes infiltrés.

Le bilan hydrologique consiste à déterminer le volume des flux infiltrés à partir des autres flux de déstockage en utilisant une équation semblable à l'équation 5. Sur les périodes sans apports superficiels (pluie, ruissellement) ou souterrains ni déstockages volontaires (prélèvements, lâchers), l'équation 5 se simplifie et l'on obtient : $\Delta V = - (E_{RET} + I_f)$. En remplaçant la variation de volume de la retenue par la variation de cote ΔC , suffisamment faible pour que la variation de surface de la retenue soit négligeable, nous obtenons : $\Delta C = - (E_{RET} + I_f)$ où E_{RET} et I_f sont exprimés cette fois-ci en $\text{mm} \Delta t^{-1}$. Nous en déduisons l'infiltration :

$$\text{équation 7} \quad I_f = - (\Delta C + E_{RET})$$

I_f : infiltration [$\text{mm} \cdot \Delta t^{-1}$]

ΔC : variation de la cote [$\text{mm} \cdot \Delta t^{-1}$]

E_{RET} : évaporation [$\text{mm} \cdot \Delta t^{-1}$]

Cette méthode est largement utilisée. En Australie, Craig (2006) utilise une sonde enregistrant les variations millimétriques du niveau d'eau de plusieurs réservoirs expérimentaux et d'un barrage construit sur un socle imperméable. Une station météorologique permet d'estimer l'évaporation à partir de l'équation de Penman Monteith. L'infiltration, supposée indépendante de la cote du plan d'eau, est déduite par optimisation du modèle de vidange. La comparaison des résultats avec d'autres méthodes d'estimation de l'évaporation (bac évaporatoire Classe A, Penman 1948) montre que l'équation de Penman-Monteith conduit aux meilleurs ajustements du modèle, donc aux valeurs d'infiltration les plus précises (erreur égale à +/- 1 mm/jour).

Les bilans de masses sont effectués à partir d'analyses chimiques (Gurrieri et Furniss, 2004) ou isotopiques (Turner et al., 1984). Ils consistent à comparer les concentrations en

ions dissous (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- ...) ou en isotopes (^2H , ^3H , ^{14}C , ^{18}O) entre des échantillons prélevés dans la retenue ou dans l'aquifère environnant. En Tunisie centrale, l'analyse chimique d'échantillons d'eau (CaHCO_3 , NaCl et CaSO_4) prélevés dans le bassin versant de la retenue collinaire d'El Gouazine, dans la retenue, et à l'aval immédiat du barrage, révèle l'existence de flux souterrains entre la retenue et la nappe alluviale (Montoroi et al., 2002; 2004). Grünberger et al. (2004) quantifient ces échanges par modélisation hydrologique et isotopique (^{18}O et ^2H). Leur méthode consiste à optimiser les équations de bilans hydrologique et isotopique en ajustant la valeur des flux entre la retenue et la nappe. Les autres termes de l'équation sont supposés connus (apports, évaporation, déversements, lâchers, prélèvements). Les deux modélisations (chimique et physique) convergent vers les mêmes résultats : les apports souterrains à la retenues ($50 \text{ m}^3/\text{j}$) sont compensés par un flux sortant de $300 \text{ m}^3/\text{j}$ ($170 \text{ m}^3/\text{j}$) lorsque le niveau de la retenue est supérieur (inférieur) à 4,5 m.

3.2.2. Traitement des données

Les flux de déstockage sont calculés par bilan hydrique. Les lames évaporées depuis les retenues (E_{RET}) sont obtenues à partir des mesures sur bac (E_{PAN}), multipliées par un coefficient de transposition C_T . Les flux infiltrés sont obtenus à partir de l'équation 7 du bilan hydrique de la retenue, sur des périodes jugées sans apport ni déstockages volontaires (prélèvements et lâchers de barrage). Les variations de l'intensité de l'infiltration en fonction du niveau d'eau et de l'envasement du réservoir sont analysées. Cette première analyse aboutit à la définition d'une équation linéaire de déstockage à trois paramètres. Sa résolution par régression linéaire multiple permet de déterminer des valeurs de drainance et du coefficient de transposition C_T . Leur variabilité est analysée. Les fuites (troisième terme du déstockage naturel) généralement minimales, sont négligées. Les méthodes de calcul sont illustrées avec les données de la retenue collinaire de Hadada qui présente l'une des chroniques de données hydrométéorologiques les plus longues. Les étapes sont rigoureusement identiques pour les 11 autres retenues collinaires et pour le barrage El Haouareb.

i. L'évaporation

Les valeurs des lames évaporées depuis les retenues s'obtiennent à partir de l'équation : $E_{\text{RET}} = C_T \times E_{\text{PAN}}$. Aucune indication ne permet de connaître a priori la valeur de C_T pour les retenues collinaires tunisiennes. L'état de l'art sur la détermination des lames évaporées (§ 3.2.1) a cependant montré que les valeurs moyennes annuelles de C_T sont généralement comprises entre 0,6 et 1,0.

A l'incertitude I_{EPAN} sur les mesures de E_{PAN} , déterminée en partie 3.1.3.ii, s'ajoute une seconde incertitude sur le coefficient C_T . En supposant que C_T est compris entre 0,6 et 1,0, nous déduisons l'incertitude sur l'évaporation de la retenue collinaire (I_{ERET}) : $I_{ERET} = 0,8 \times I_{EPAN} + 0,2 \times E_{PAN}$. D'après la figure 26, E_{PAN} variant en moyenne de 1,4 mm/j en hiver à 8,3 mm/j en été à la station de Janet et de 2,5 mm/j en hiver à 9,9 mm/j en été à la station de El Haouareb, I_{ERET} varie en moyenne entre 1,4 mm en hiver et 3,8 mm en été. La méconnaissance de C_T représente donc 29% et 48% de I_{ERET} en hiver et en été respectivement, lorsque I_{ERET} est calculée sur une période d'un jour.

ii. L'infiltration

L'infiltration se calcule à partir de l'équation 7, sur des périodes jugées sans apports. L'équation 8 utilisée pour calculer l'incertitude sur l'infiltration (I_{if}) découle de l'équation 7 :

équation 8. $I_{if} = I_{\Delta C_{nj}} + I_{ERET}$

I_{if} : incertitude sur l'infiltration [$mm \Delta t^{-1}$],

$I_{\Delta C_{nj}}$: incertitude sur la variation de la cote [$mm \Delta t^{-1}$],

I_{ERET} : incertitude sur l'évaporation [$mm \Delta t^{-1}$].

Les figures 26 et 27 ont montré que l'incertitude sur la variation de la cote et sur l'évaporation du bac diminue lorsque ces deux variables sont calculées sur des périodes croissantes. La figure 33 montre que cette relation est également valable pour l'infiltration.

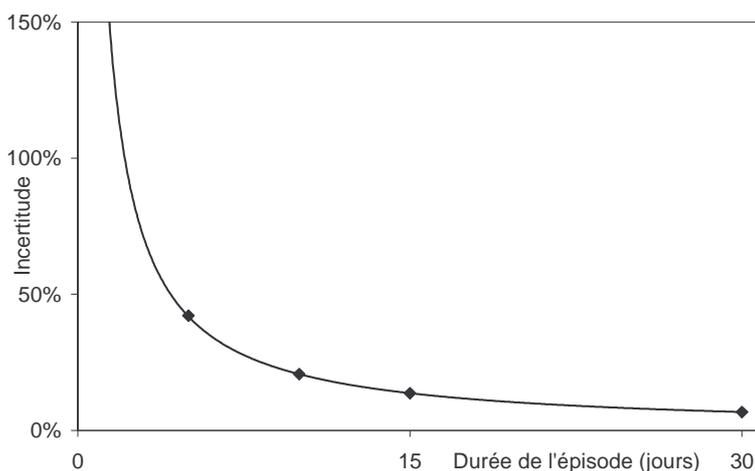


Figure 33. Incertitude moyenne sur l'infiltration en fonction de la durée de l'épisode utilisé pour le calcul. L'incertitude correspondant à une durée d'un jour est égale à 214%.

Le plus petit pas de temps pour le calcul de l'infiltration est la journée, correspondant à la fréquence des mesures d'évaporation. La durée maximale de la période sur laquelle une

valeur moyenne d'infiltration peut être calculée correspond à l'intervalle de temps séparant deux épisodes au cours desquels l'équation 7 n'est pas valide, soit du fait de la présence d'apports ou de déstockages volontaires. L'infiltration peut donc être calculée sur des périodes de durée variable. Minimiser cette durée permet de réduire les écarts de cote au cours de la période et donc d'accroître la précision de la relation entre l'intensité de l'infiltration et la hauteur d'eau. Maximiser cette durée permet de réduire l'incertitude sur le calcul de l'infiltration (figure 33). Il faut donc trouver un juste milieu. Les périodes finalement choisies correspondent à des épisodes au cours desquels la cote présente un taux de décroissance constant dans le temps, suggérant une stabilité de l'intensité de l'infiltration malgré la réduction de la hauteur d'eau. La durée de ces périodes varie entre les différents épisodes identifiés. Ces périodes sont repérées visuellement sur les graphiques représentant la cote des retenues en fonction du temps (exemples de sélection de périodes sur les figures 34(A) et 35 (A)).

Sélection des épisodes de déstockage naturel strict

L'infiltration est calculée à partir de l'équation 7 sur des périodes sans apport ni déstockages volontaires. Les apports dans la retenue n'étant pas mesurés directement, seules les mesures de pluies et de cote sont utilisées pour identifier a priori les périodes sans apports. Dans une première approximation, il est supposé ne pas y avoir d'apport 10 jours après la dernière hausse de la cote, à condition qu'il n'y ait pas eu de pluie supérieure à 1,5 mm/j pendant cette période transitoire et aucune pluie pendant la période de calcul de l'infiltration. Cet intervalle de 10 jours apparaît raisonnable, compte de la brièveté des crues dans la région (voir § 3.4.2.iii). Les pluies inférieures ou égales à 1,5 mm/j sont très fréquentes dans la chronique de mesures et choisir des épisodes précédés d'aucune pluie au cours des 10 derniers jours réduirait considérablement le nombre de périodes sélectionnées pour le calcul de l'infiltration. Le seuil de 1,5 mm/j semble raisonnable au regard des travaux de Dridi (2000) ayant abouti à la détermination d'une pluie d'imbibition au moins égale à 9,4 mm/j sur différentes parcelles expérimentales situées dans le bassin versant du Merguellil.

L'identification des périodes avec lâcher de barrage ou prélèvement est également délicate. Bien que des calendriers de lâchers soient tenus par les gardiens de la plupart des retenues collinaires, ils sont jugés peu fiables car plusieurs épisodes de décroissance extrême du niveau de la retenue ($\Delta C < -600$ mm/j), observés dans la chronique des cotes, n'y sont pas reportés. Or seul un lâcher de barrage peut expliquer une décroissance si brutale de la cote : avec un plan d'eau d'une surface moyenne de 15 000 m², une décroissance de 600 mm/j équivaldrait, si elle était due à un prélèvement, à un débit de pompage de 312 L/s

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

pendant huit heures. Or le nombre de pompes sur les rives d'une retenue collinaire dépasse rarement trois (voir § 4.3.1) et chaque pompe débiterait, si elle était en parfait état, et à plein régime, pas plus de 6 L/s (cf. annexe 7.4).

Les critères présentés ci-dessus pour identifier les épisodes sans apport ni déstockage volontaire permettent d'identifier les épisodes avec apport ou déstockage les plus extrêmes (crues et lâchers de barrage). Cependant, ils ne permettent pas toujours de repérer les épisodes avec des apports ou des déstockages plus faibles (écoulements retardés, prélèvements). Les valeurs d'infiltrations calculées sur ces périodes sont alors fausses, surestimées quand il y a déstockage, sous-estimées quand il y a des apports. Les figures 34 et 35 illustrent la méthode utilisée pour identifier ces épisodes.

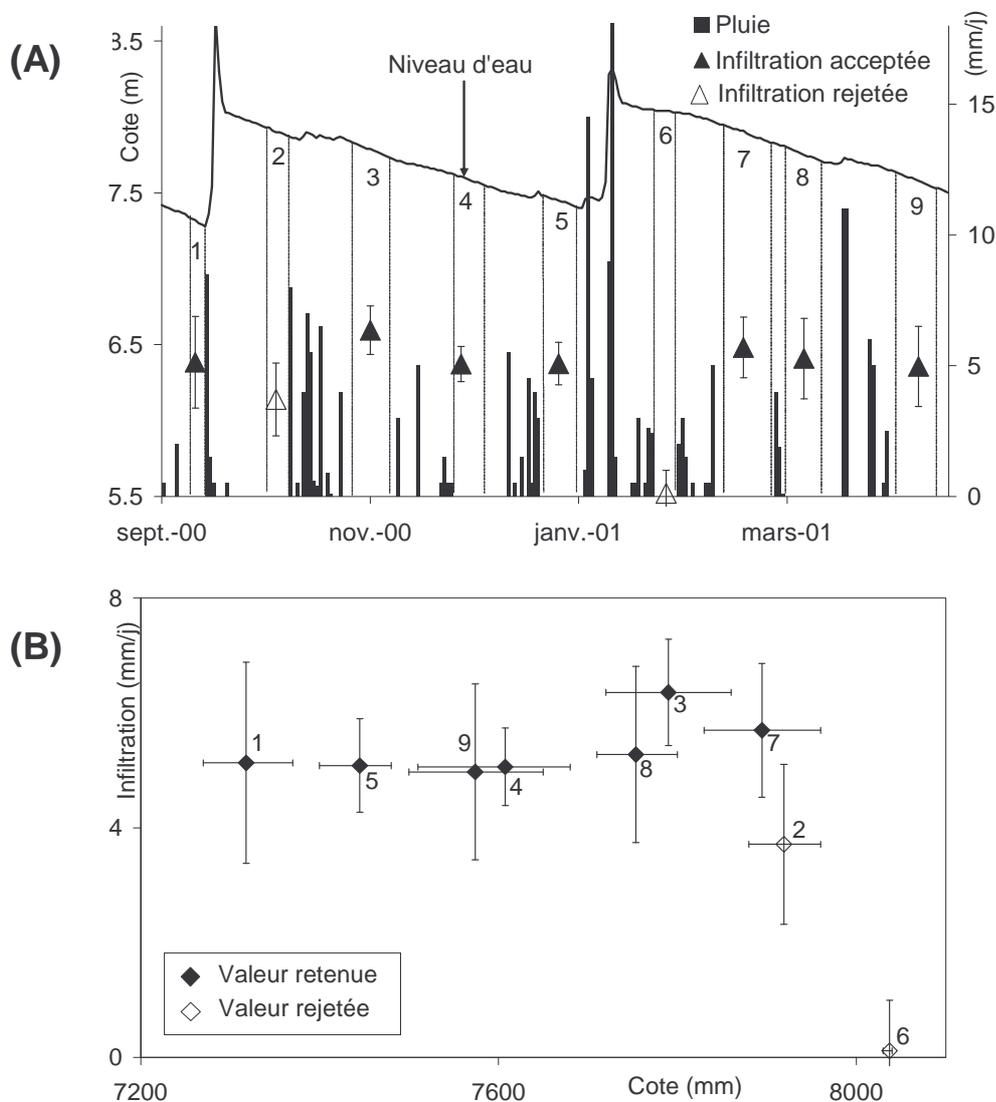


Figure 34. Calcul (A) et sélection (B) des valeurs d'infiltration en période hivernale sur la retenue collinaire de Hadada. Barres verticales : incertitude sur les calculs d'infiltration. Barres horizontales : amplitude de variation de la cote sur chaque épisode. Intervalles numérotés sur la figure A : périodes utilisées pour le calcul de l'infiltration.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

Les valeurs d'infiltrations biaisées par un déstockage volontaire ou un apport sont identifiées en comparant les valeurs obtenues sur des épisodes successifs. En hiver (figure 34 (A)), les apports sont fréquents car la pluviosité est forte. Ils se traduisent par des hausses fréquentes de la cote. Les plus fortes sont généralement suivies par une baisse brutale du niveau, résultant d'un lâcher de barrage destiné à éviter un débordement éventuel de la retenue, susceptible de détruire le déversoir ou la digue. Neuf périodes, numérotées et délimitées par des pointillés, sont sélectionnées pour le calcul de l'infiltration. Sur chaque période, l'infiltration est calculée à partir de l'équation 7, en prenant en compte les incertitudes sur l'évaporation (I_{ERET}) et sur la décroissance de la cote ($I_{\Delta C_{ij}}$). D'après la loi de Darcy (1856), l'intensité de l'infiltration [$\text{mm}/\Delta t$] croît avec la hauteur d'eau. D'éventuelles brèches dans la digue peuvent amplifier ce phénomène car les fuites ne sont pas distinguables de l'infiltration. Une modification de la perméabilité du substratum due au remaniement des sédiments au moment des apports les plus violents et/ou à leur accumulation pourrait perturber cette relation. Du fait de l'absence de crue exceptionnelle pendant la durée de l'intervalle considéré (8 mois), la perméabilité de la retenue collinaire est supposée constante. L'intensité de l'infiltration devrait donc croître linéairement avec la hauteur d'eau. La figure 34 (B) représente les 9 valeurs d'infiltration de la figure 34 (A) en fonction de la cote. Deux valeurs (épisodes 2 et 6) sont anormalement faibles. Elles ne satisfont pas la fonction croissante entre hauteur d'eau et intensité de l'infiltration, explicitée par la loi de Darcy. La figure 34 (A) peut expliquer a posteriori ces anomalies : les épisodes 2 et 6 succèdent chacun des épisodes d'apports qui ont eu lieu respectivement 11 et 15 jours avant le début de l'épisode. Des écoulements retardés ont probablement ralenti la vidange naturelle de la retenue, aboutissant à une sous-estimation de l'infiltration.

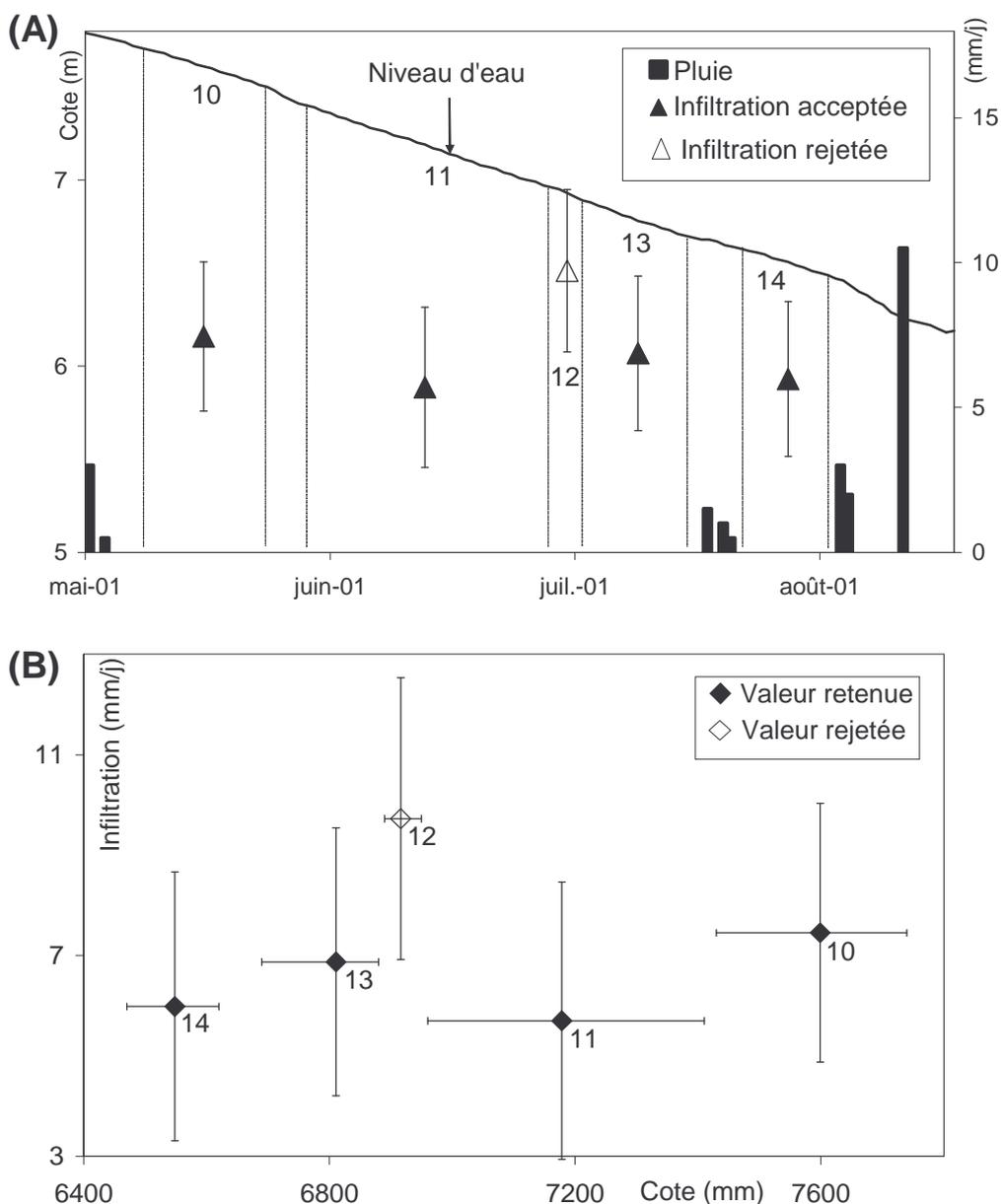


Figure 35. Calcul (A) et sélection (B) des valeurs d'infiltration en période estivale sur la retenue collinaire de Hadada. Explications des chiffres et des barres : cf. légende de la figure 34.

La figure 35 offre un second exemple de calcul et de sélection des valeurs d'infiltration pendant une période estivale. L'infiltration calculée sur l'épisode 12 (10,3 mm/j) est largement supérieure aux autres valeurs égales en moyenne à 7,3 mm/j. Compte tenu de l'évaporation moyenne (7,5 mm/j) mesurée sur bac à cette période de l'année, l'anomalie de l'épisode 12 ne peut s'expliquer par une variation brutale et temporaire de plus de 50% de C_T . L'explication la plus probable est celle d'un prélèvement par pompage pour irriguer les quelques hectares de pommiers plantés à proximité de la retenue collinaire (Boufaroua et al., 1999). La période estivale (juillet) et l'absence de pluies sur les deux derniers mois (figure 35

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

(A) accrédite cette hypothèse qui aurait correspondu à un volume pompé de 45 000 L/j (soit un débit de pompage moyen de 4,1 L/s, 8 h par jour) sur une période de 4 jours, de quoi irriguer 36 arbres à raison de 5000 L/arbre¹⁸. La valeur d'infiltration correspondant à l'épisode 12 est donc éliminée.

L'analyse de toute la chronique (sept. 93 à sept. 03) montre qu'il n'est pas possible d'utiliser un critère invariant pour la sélection des épisodes sans apport, basé sur le nombre de jours depuis la dernière crue et sur la pluviométrie : un seuil de sélection défini à partir des valeurs d'infiltrations d'une période de quelques mois devient beaucoup trop sévère sur une autre période ou inversement. Cette variabilité s'explique par la multitude des facteurs contrôlant le temps de tarissement des crues. Le bassin versant de la retenue collinaire de Hadada étant cultivé sur plus de 70% de sa surface (Boufaroua et al., 1999), le temps de ressuyage varie au cours de l'année, en fonction des états de surface : terres fraîchement labourées ou présentant une croûte de battance juste avant la récolte. Les variations de la demande évaporatoire (ET_0) au cours de l'année peut également influencer le temps de ressuyage du bassin versant. Plutôt que d'intégrer les résultats d'une modélisation pluie-débit aux critères de sélection des épisodes sans apports, ce qui introduirait une incertitude supplémentaire, les épisodes retenues pour le calcul de l'infiltration sont sélectionnés en les comparant entre eux sur des périodes de quelques mois.

Tableau 11. Périodes présélectionnées et sélectionnées pour le calcul de l'infiltration. Critères de présélection basés sur les variations de la cote et sur la pluviométrie. Critères de sélection illustrés par les figures 34 et 35.

Retenue	Périodes présélectionnées		Nb périodes sélectionnées
	Nombre	Durée (j)	
Abdessadok	38	15.0	23
Brahim Zaher	32	8.1	27
El Gouazine	60	20.7	22
El Moudhi	80	14.8	59
Fidh Ali	43	18.3	25
Fidh Ben Naceur	54	18.8	29
Hadada	117	16.1	88
Mora	53	11.1	36
M'Richet	45	17.7	23
Janet	50	14.5	17
Jedeliane	30	20.9	19
Sadine 2	14	15.4	14
El Haouareb	96	16.6	64

¹⁸ La surface du lac est d'environ 15 000 m² à cette période.

Relation entre l'intensité de l'infiltration et la hauteur d'eau

Les figures 36 et 37 présentent les valeurs d'infiltration calculées pour chaque période sélectionnée (cf. tableau 11) pour les 12 retenues collinaires et le barrage d'El Haouareb, en fonction de la hauteur d'eau. Ces figures montrent, malgré la très forte incertitude sur les valeurs d'infiltration, que pour 10 retenues sur 13 (excepté les retenues de Brahim Zaher, El Gouazine et Fidh Ali), l'intensité de l'infiltration croît linéairement avec la hauteur d'eau. L'infiltration [mm/j] peut donc être modélisée par une fonction linéaire de la hauteur d'eau suivant l'équation : $I_f = a \times (C - C_{ZERO})$. a est un paramètre qui a la dimension d'une drainance [t^{-1}] mais qui ne peut lui être assimilé car il devrait être multiplié par une hauteur moyenne d'eau pour qu'il en soit ainsi. Or C_{ZERO} correspondant à la cote de la retenue pour laquelle l'infiltration est nulle, $(C - C_{ZERO})$ est assimilable à la profondeur maximale de la retenue et non à sa profondeur moyenne.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

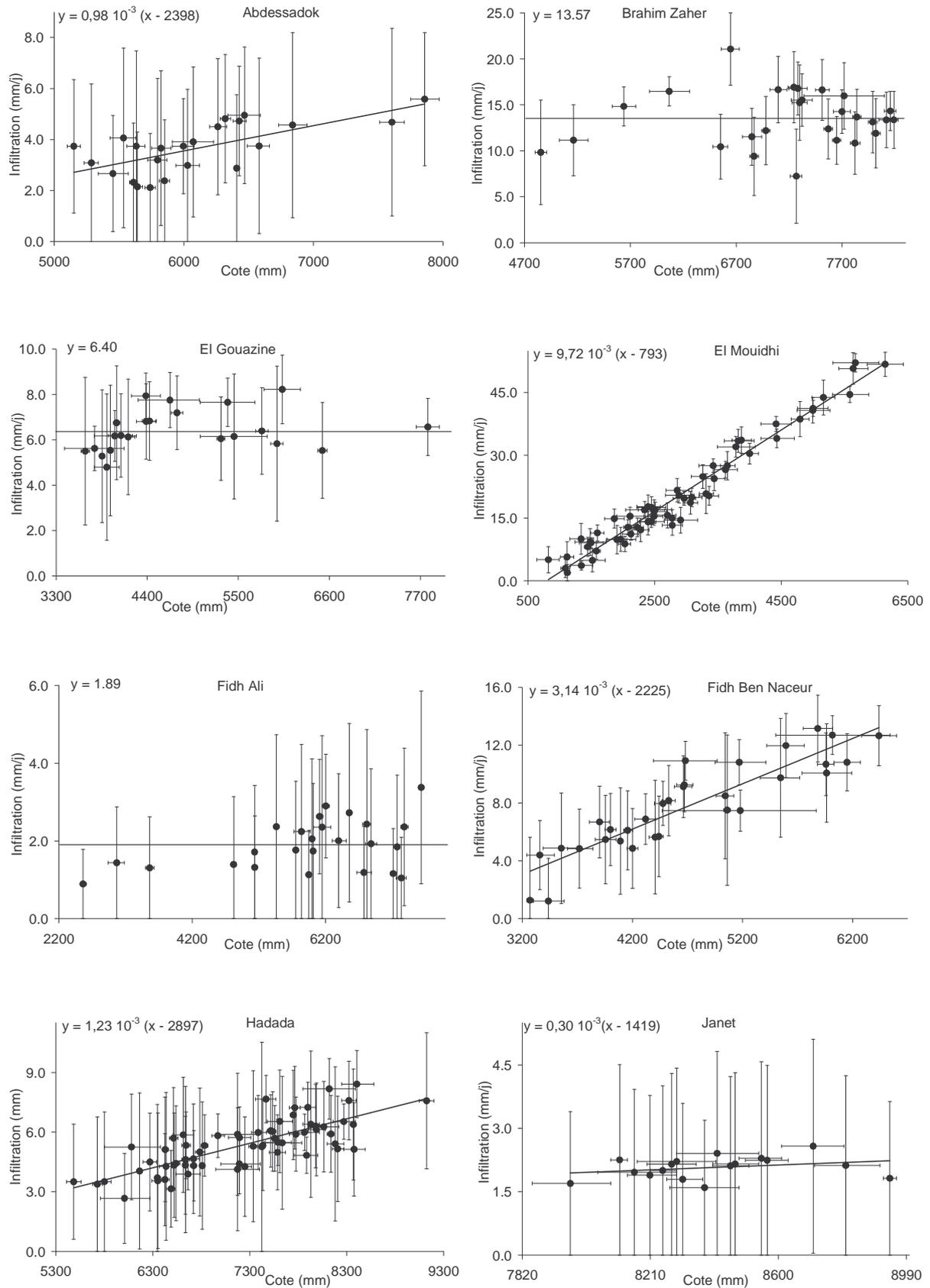


Figure 36. Relation entre intensité de l'infiltration [mm/j] et cote [mm] du niveau d'eau pour les retenues collinaires : Abdessadok, Brahim Zaher, El Gouazine, El Moudhi, Fidh Ali, Fidh Ben Naceur, Hadada et Janet.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

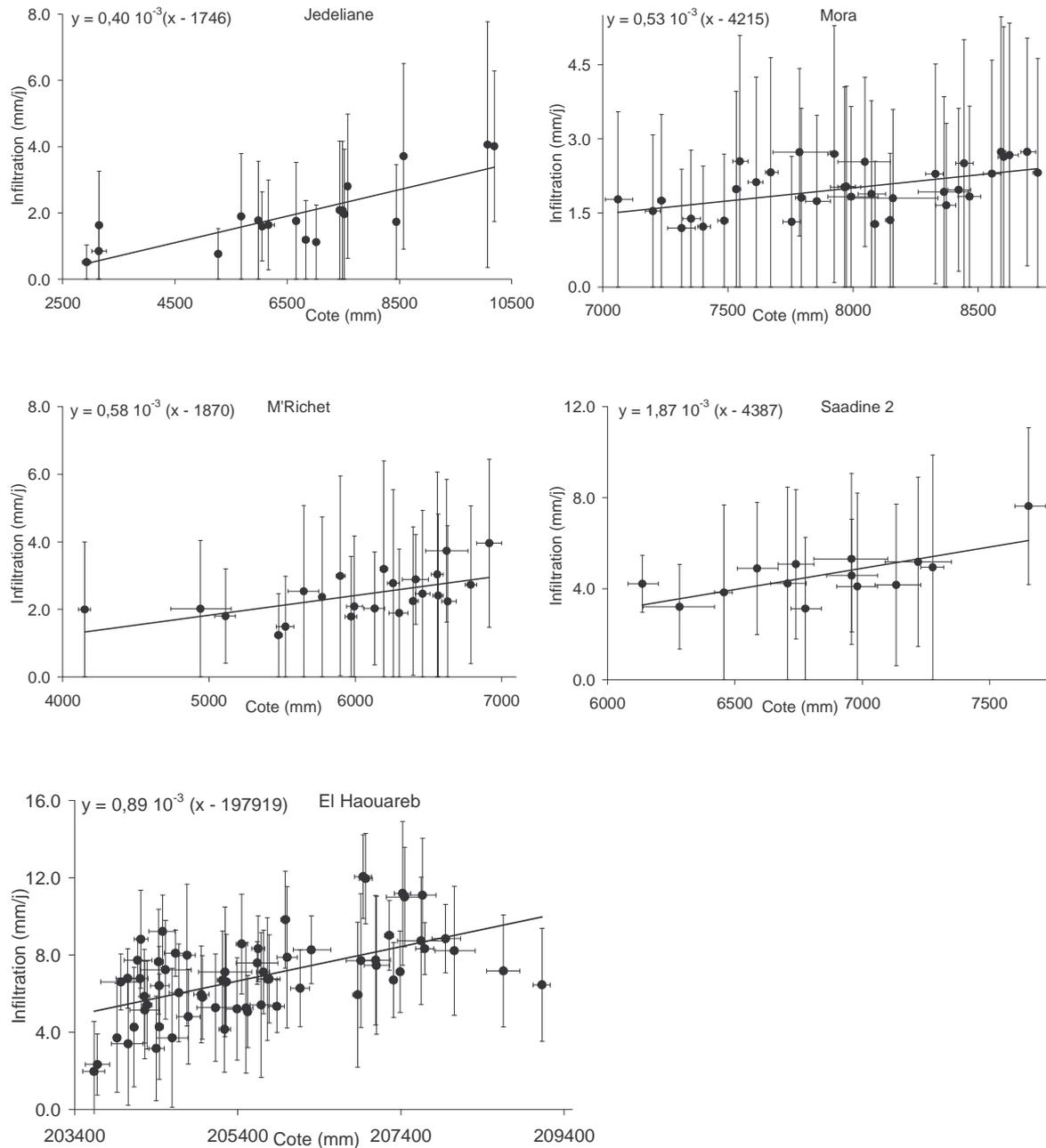


Figure 37. Relation entre intensité de l'infiltration [mm/j] et cote [mm] du niveau d'eau pour les retenues collinaires : Jedeliane, Mora, M'Richet, Saadine 2 et le barrage d'El Haouareb.

A l'exception des retenues collinaires Brahim Zaher, El Gouazine et Fidh Ali¹⁹, les valeurs de C_{ZERO} obtenues par régressions linéaires sont comprises entre les cotes du fond de la retenue mesurées lors des premiers et derniers nivellements²⁰ (cf. tableau 8). Cette

¹⁹ Pour ces retenues collinaires, l'intensité de l'infiltration ne dépend apparemment pas du niveau d'eau dans la retenue.

²⁰ La comparaison n'est que partiellement possible pour les retenues collinaires de Mora et de Jedeliane pour lesquelles nous ne disposons que d'un seul étalonnage.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

concordance confirme que le paramètre a bien la dimension d'une drainance puisqu'il est multiplié dans l'équation de régression par une hauteur d'eau ($C - C_{ZERO}$). L'équation $I_f = a \times (C - C_{ZERO})$ est transformée en $I_f = K \times (C - C_{ZERO}) / \alpha$, avec α , le paramètre de forme de la retenue (cf. tableau 10) et $K = \alpha \times a$; $(C - C_{ZERO})/\alpha$ étant égal à la profondeur moyenne de la retenue pour une cote C donnée, K peut être assimilé à la drainance de la retenue.

Pour chaque retenue, une valeur moyenne de α doit être calculée sur la période utilisée pour déterminer K et C_{ZERO} . Le problème majeur est l'absence fréquente de courbes d'étalonnages valables sur ces périodes. Notamment pour les retenues collinaires d'Abdessadok, de Hadada, de Janet, de Jedeliane, de Mora et d'El Moudhi, la date du dernier étalonnage est antérieure de plusieurs années à la fin des périodes utilisées pour déterminer K et C_{ZERO} . Pour résoudre ce problème de non simultanéité des données disponibles, des valeurs de α , correspondant aux dates de début et fin des périodes étudiées, sont calculées à partir des régressions proposées dans la partie 3.1.3.iv. Des valeurs moyennes de α sont ensuite calculées sur chaque période. Cette technique n'est pas valide pour les retenues presque totalement envasées au cours des dernières années de leur suivi, comme la retenue collinaire de Saadine 2. Ceci ne semble pas être le cas des 6 retenues collinaires citées ci-dessus et pour lesquelles une extrapolation de α a été nécessaire sur plusieurs années. Des valeurs moyennes de α sont calculées pour chaque retenue, sur la période totale utilisée pour déterminer K et C_{ZERO} et sur des sous périodes, utilisées par la suite pour observer l'évolution de l'intensité de l'infiltration avec l'envasement des retenues (tableau 12).

Tableau 12. Coefficient de forme α , calculé sur chaque période utilisée pour ajuster les paramètres K_1 , K_2 , C_{ZERO1} et C_{ZERO2} de la régression linéaire multiple (cf. § 3.2.2.iii).

	Sous période1		Sous période 2		Sous période 3		Période totale	
	Dates	α	Dates	α	Dates	α	Dates	α
Abdessadok	06/95 - 09/97	1.63	09/97 - 08/00	1.40			06/95 - 08/00	1.50
Fidh Ben Naceur	11/94 - 11/97	1.70	11/97 - 03/99	1.58			11/94 - 03/99	1.66
Hadada	11/95 - 01/99	1.85	01/99 - 04/02	1.35			11/95 - 04/02	1.60
Janet	05/96 - 10/98	1.91	10/98 - 07/02	1.45			05/96 - 07/02	1.62
Jedeliane	05/96 - 10/98	2.26	10/98 - 07/02	2.06			05/96 - 07/02	2.14
Mora	03/96 - 09/98	1.96	09/98 - 08/00	1.78			03/96 - 08/00	1.88
M'Richet	05/96 - 07/98	2.08	07/98 - 10/01	1.85			05/96 - 10/01	1.94
Moudhi	07/95 - 09/96	2.08	09/96 - 07/99	2.09			07/95 - 07/99	2.12
Saadine 2	05/94 - 08/95	1.69						
El Haouareb	10/93 - 10/97	1.78	10/97 - 10/01	1.78	10/01 - 09/05	1.77	10/93 - 09/05	1.78

Le tableau 13 rassemble les valeurs moyennes d'incertitude sur les calculs d'infiltration pour les 13 retenues et détaille leur origine. L'incertitude absolue sur les valeurs d'infiltration varie peu entre les différentes retenues. Egale en moyenne à 2,4 mm, son coefficient de

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

variation est de 23%. L'incertitude relative est donc, globalement, d'autant plus forte que l'infiltration est faible (moyenne de 39% pour les 13 retenues). Cette incertitude provient majoritairement des mesures d'évaporation (70% de l'incertitude sur l'infiltration est due à l'incertitude sur l'évaporation). La méconnaissance du coefficient de transposition C_T entre bac et retenue explique 55% en moyenne de l'incertitude sur l'évaporation (tableau 13).

Tableau 13. Incertitude sur les valeurs d'infiltration calculées et origine de l'incertitude.
 I_{EPAN} : incertitude sur la mesure d'évaporation sur bac. I_{CT} : incertitude sur le coefficient de transposition bac-retenu. $I_{\Delta C}$: incertitude sur la variation de la cote de la retenue.

Retenues collinaires	Infiltration moyenne			Origine de l'incertitude (%)			
	Valeur (mm)	Incertitude (mm)	(%)	I_{EPAN}	I_{CT}	Total	$I_{\Delta C}$
Abdessadok	3.7	2.80	77	36	39	75	25
Brahim Zaher	13.6	3.38	25	24	32	56	44
El Gouazine	6.4	2.02	31	26	42	68	32
El Moudhi	20.5	2.52	12	30	41	70	30
Fidh Ali	3.6	1.72	48	33	40	73	27
Fidh Ben Naceur	7.8	2.69	35	35	36	71	29
Hadada	5.3	2.42	45	33	33	67	33
Janet	2.1	2.07	100	23	53	76	24
Jedeliane	2.0	1.72	88	32	31	62	38
Mora	2.0	1.92	96	27	39	66	34
M'Richet	2.4	2.17	89	35	37	72	28
Saadine 2	4.6	3.32	72	36	40	77	23
El Haouareb	6.9	2.49	36	36	35	70	30
Moyenne		2.40	39	31	38	69	31

iii. Modélisation linéaire des flux de déstockage

Une relation linéaire entre la hauteur d'eau et l'intensité de l'infiltration a été établie dans la partie 3.2.2.ii pour chacune des 13 retenues. Elle a été déterminée à partir de l'équation 7 en supposant que le coefficient de transposition est compris entre 0,6 et 1,0. Les résultats ont montré que l'incertitude sur l'estimation de l'infiltration est élevée et principalement due à la méconnaissance de C_T (tableau 13).

En remplaçant I_f par son expression fonction de K et C_{ZERO} , et E_{RET} par son expression fonction de C_T , la forme simplifiée du bilan hydrique de la retenue en période sans apport ni déstockage volontaire (équation 7) aboutit à l'équation 9 qui permet de calculer le taux de décroissance de la cote du plan d'eau à partir de l'évaporation mesurée sur bac (E_{PAN}) et de la cote du plan d'eau (C).

équation 9 $-\Delta C = C_T \times E_{PAN} + K \times (C - C_{ZERO})/\alpha$

ΔC : variation de cote de la retenue [mm . Δt^{-1}],

C_T : coefficient de transposition bac – retenue [adimensionné],

E_{PAN} : évaporation du bac [mm . Δt^{-1}],

K : drainance [Δt^{-1}],

C : cote du plan d'eau [mm],

C_{ZERO} : cote du plan d'eau correspondant à une infiltration nulle [mm],

α : coefficient de forme de la retenue [adimensionné] dont la valeur a été déterminée dans la partie 3.1.3.iv.

ΔC , E_{PAN} et C sont les variables. C_T , K , C_{ZERO} et α sont les paramètres. Résoudre cette équation équivaut à déterminer les valeurs des paramètres C_T , K et C_{ZERO} , constants pour une retenue collinaire et à prévoir les volumes évaporés et infiltrés à partir des variables ΔC , E_{PAN} et C . S'agissant d'un modèle linéaire, C_T , K et C_{ZERO} sont déterminés par régression linéaire multiple. Il est hasardeux d'attribuer un sens physique aux estimations de ces paramètres car les variables E_{PAN} et C sont en partie anticorrélées : la cote est généralement la plus haute en hiver, période correspondant aux valeurs de E_{PAN} les plus faibles. La variabilité de E_{PAN} peut donc être « absorbée » en partie par le paramètre K et celle de C par le paramètre C_T . Cependant, cette méthode est la seule qui permette d'estimer les valeurs des paramètres K et C_T sans fixer arbitrairement la valeur de l'un des paramètres avant de déterminer celle du second (comme cela était fait habituellement en fixant la valeur de C_T à 0,8 ou 1 pour déterminer ensuite les paramètres de l'infiltration). Le biais introduit dans l'estimation de K et C_T et lié à la corrélation entre les variables E_{PAN} et C se traduit par une incertitude accrue sur leur valeur. L'intervalle de confiance calculé pour chacun de ces paramètres à partir de la statistique de Fisher doit permettre d'encadrer la valeur qu'aurait le paramètre en l'absence de corrélation entre les variables du modèle. Cet intervalle encadre donc la valeur « physique » du paramètre. La cohérence de ces résultats sera vérifiée en les confrontant à des références connues (cf. § 3.2.2.iv).

Calage du modèle

Pour chaque retenue étudiée, la première étape consiste à extraire de la chronique des mesures les périodes au cours desquelles les variables $-\Delta C$, C et E_{PAN} satisfont théoriquement l'équation 9, i.e. les épisodes de déstockage naturel strict des retenues. Choisir les épisodes déjà utilisés pour observer les variations de l'intensité de l'infiltration avec la cote (cf. § 3.2.2.ii) présente un inconvénient : seuls les épisodes avec un taux ΔC constant avaient été utilisés. Il est donc possible que certains épisodes de déstockage

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

naturel strict n'aient pas été pris en compte. Nous proposons de les déterminer de la manière suivante :

Posons :

$$(E_{RET} + I_f)_{MAX} = E_{RET} + I_{ERET} + I_f + I_{I_f}$$

$$(E_{RET} + I_f)_{MIN} = E_{RET} - I_{ERET} + I_f - I_{I_f}$$

$$-\Delta C_{MIN} = -\Delta C - I_{\Delta C}$$

$$-\Delta C_{MAX} = -\Delta C + I_{\Delta C}$$

ΔC : variation de la cote de la retenue [$\text{mm } \Delta t^{-1}$],

E_{RET} : évaporation de la retenue [$\text{mm } \Delta t^{-1}$],

I_f : infiltration depuis la retenue [$\text{mm } \Delta t^{-1}$],

I_{ERET} : incertitude sur E_{RET} [$\text{mm } \Delta t^{-1}$],

I_{I_f} : incertitude sur I_f [$\text{mm } \Delta t^{-1}$],

$I_{\Delta C}$: incertitude sur ΔC [$\text{mm } \Delta t^{-1}$].

Lorsque $-\Delta C_{MIN} > (E_{RET} + I_f)_{MAX}$, le déstockage ne peut s'expliquer uniquement par les effets cumulés de l'infiltration et de l'évaporation. Il existe un flux sortant supplémentaire, le plus souvent un lâcher de barrage ou un prélèvement par pompage. Lorsque $-\Delta C_{MAX} < (E_{RET} + I_f)_{MIN}$, deux possibilités se présentent. Si $-\Delta C_{MAX}$ est négatif, il y a un apport manifeste dans la retenue collinaire. Si $-\Delta C_{MAX}$ est positif, le déstockage par évaporation et infiltration est partiellement compensé par un apport, insuffisant pour que $-\Delta C_{MAX}$ soit négatif. La figure 38 positionne les valeurs de $-\Delta C$ et de $E_{RET} + I_f$ pour montrer comment repérer les épisodes de déstockage strict, d'apport et de déstockage volontaire.

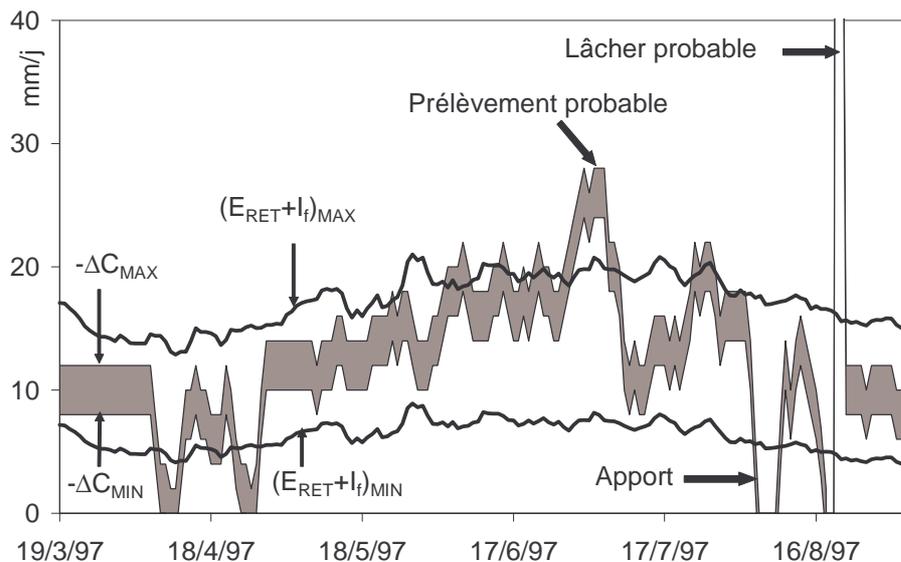


Figure 38. Evolutions comparées de $-\Delta C$ et $E_{RET} + I_f$ sur une période avec des exemples d'épisodes de déstockage naturel strict, d'apport et probablement de lâchers et prélèvements (retenue collinaire de Hadada).

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

Sur la figure 38, il est supposé y avoir déstockage naturel strict lorsque les conditions suivantes sont simultanément satisfaites : $(E_{RET} + I_f)_{MAX} > -\Delta C_{MIN}$ et $(E_{RET} + I_f)_{MIN} < -\Delta C_{MAX}$. La détermination des valeurs des paramètres C_T , K et C_{ZERO} par résolution de l'équation 9 est réalisée sur les périodes satisfaisant les deux conditions précédentes. (On suppose ici que la probabilité qu'un déstockage volontaire compense exactement un apport est négligeable). Pour toutes les retenues, plus de 90% et plus de 99% des jours sélectionnés par cette méthode présentent des cumuls pluviométriques respectivement inférieurs à 1 mm et 5 mm et ces jours pluvieux sont uniformément répartis entre la saison sèche (mars – septembre) et la saison humide (octobre – février).

Les mesures journalières de cote ont une précision centimétrique alors que l'évaporation est mesurée au millimètre près. L'ajustement de l'équation 9 avec des variables journalières (ΔC , E_{PAN} et C) serait rendu difficile par leur écart de précision. Pour le réduire, les variables utilisées sont moyennées sur des périodes de 7 jours. Les paramètres K , C_{ZERO} et C_T sont ajustés sur l'intégralité des périodes avec déstockage naturel strict. La figure 39 illustre le résultat de l'ajustement du modèle de décroissance de la cote pour la retenue collinaire de Hadada sur une période de 1035 jours.

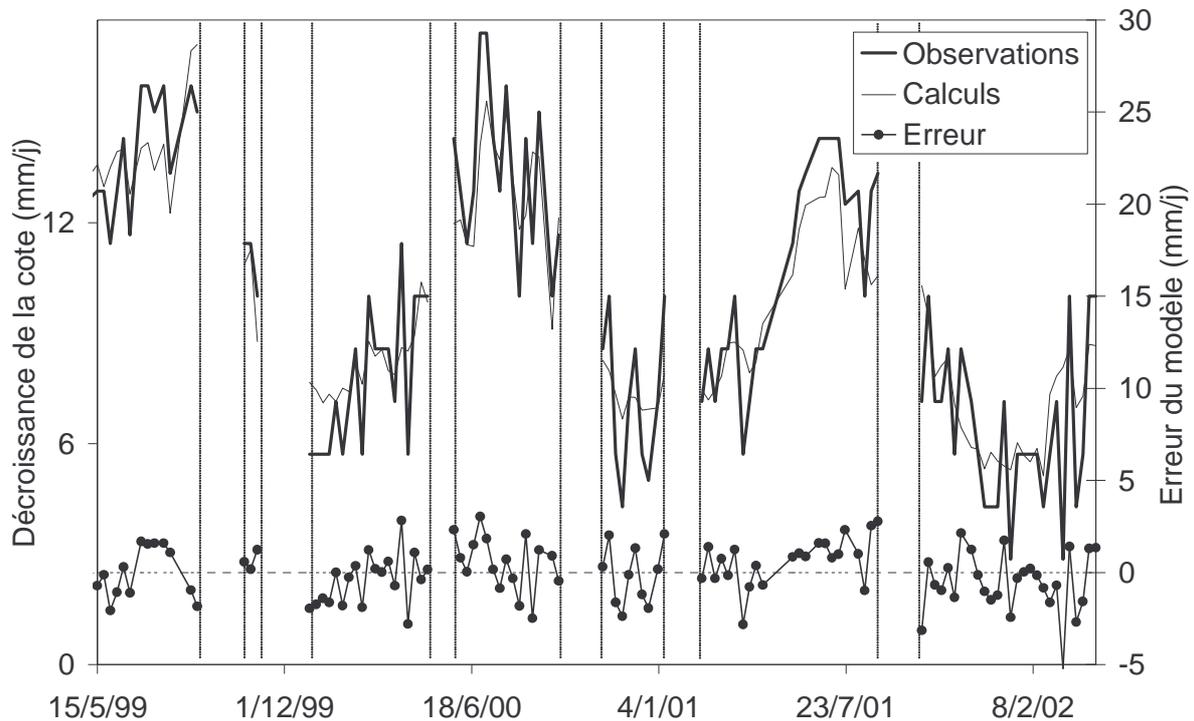


Figure 39. Comparaison des valeurs de $-\Delta C$ observées et calculées par régression linéaire (retenue collinaire de Hadada). Périodes sans valeurs : épisodes avec apports et/ou déstockages volontaires. Erreur = $\varepsilon = -\Delta C_{observé} - (-\Delta C_{calculé})$.

Prise en compte de l'envasement des retenues

Les courbes d'étalonnage mesurées successivement sur une même retenue collinaire montrent que l'épaisseur des sédiments accumulés dans le fond de la retenue augmente au cours des années (cf. figures 28 et 29(B)). L'impact de cet envasement sur l'intensité de l'infiltration est mal connu.

Afin d'identifier une éventuelle modification de la drainance des retenues au cours des années, la chronique des variables utilisées pour résoudre l'équation 9 est subdivisée en deux périodes sur lesquelles les paramètres K et C_{ZERO} sont successivement ajustés. La date de transition entre les deux périodes est choisie de façon à approcher au mieux la date de l'apport le plus important (donc le plus chargé en sédiments) et de manière à diviser la chronique des variables en deux séries de durées équivalentes. L'équation 9 se transforme en une équation à 5 paramètres (équation 10) (K_1 et C_{ZERO1} pour la période 1, K_2 et C_{ZERO2} pour la période 2, une seule valeur du paramètre C_T est déterminée pour les deux périodes), une variable endogène ($-\Delta C$) et 5 variables exogènes (E_{PAN} , C_1 , C_2 , u_1 et u_2).

équation 10. $-\Delta C = C_T \times E_{PAN} + K_1 \times C_1 + K_2 \times C_2 + C_{ZERO}'_1 \times u_1 + C_{ZERO}'_2 \times u_2.$

ΔC : variation de la cote du plan d'eau [$mm.\Delta t^{-1}$],

C_T : coefficient de transposition bac-retenu [adimensionné],

E_{PAN} : évaporation du bac [$mm.\Delta t^{-1}$],

K_1 : drainance sur la période 1 [Δt^{-1}],

K_2 : drainance sur la période 2 [Δt^{-1}],

C_1 : cote du plan d'eau sur la période 1. $C_1 = 0$ sur la période 2 [mm],

C_2 : cote du plan d'eau sur la période 2. $C_2 = 0$ sur la période 1 [mm],

$C_{ZERO}'_1$: constante du modèle sur la période 1 [mm],

$C_{ZERO}'_2$: constante du modèle sur la période 2 [mm],

u_1 : variable égale à 1 sur la période 1 et égale à 0 sur la période 2 [adimensionné],

u_2 : variable égale à 1 sur la période 2 et égale à 0 sur la période 1 [adimensionné].

Formulée ainsi, l'équation 10 n'a pas de constante. En réalité, le modèle possède deux constantes, $C_{ZERO}'_1$ et $C_{ZERO}'_2$, successivement ajustées sur les périodes 1 et 2 grâce à l'utilisation des variables u_1 et u_2 . Après détermination de la valeur des 5 paramètres du modèle (qui n'en comporte en réalité que 3 à un instant donné), les paramètres C_{ZERO1} et C_{ZERO2} sont obtenus en divisant $C_{ZERO}'_1$ et $C_{ZERO}'_2$ par K_1 et K_2 respectivement. Contrairement aux chroniques des variables des retenues collinaires qui sont subdivisées en deux

périodes, la chronique du barrage d'El Haouareb, beaucoup plus longue que les autres (tableau 3), est subdivisée en trois périodes de durées similaires.

Détermination du coefficient de transposition C_T

Le coefficient de transposition C_T , permettant d'estimer l'évaporation d'une retenue à partir des mesures d'évaporation sur bac, n'a jamais été calculé pour les retenues collinaires de Tunisie centrale, ni pour le barrage d'El Haouareb. La plupart des auteurs qui ont modélisé les bilans hydriques de ces retenues ont utilisé un coefficient de transposition égal à 0,8 (Kingumbi et al., 2004; Zammouri et Feki, 2005; Mekki et al., 2006), généralement issu des travaux de Pouyaud (1986) qui a estimé ce coefficient pour des plans d'eau en climat tropical sec. D'autres auteurs ont préféré n'appliquer aucun coefficient et assimiler l'évaporation de la retenue collinaire étudiée à celle du bac évaporatoire voisin (Albergel et al., 2002; Grünberger et al., 2004).

Dans notre cas, une valeur de C_T moyenne pluriannuelle est déterminée pour chaque retenue à partir de l'équation 9. La variabilité de ce paramètre est analysée suivant deux méthodes. La première méthode consiste à identifier d'éventuelles corrélations entre les valeurs moyennes interannuelles de C_T calculées pour chaque retenue munie d'un bac évaporatoire²¹ et les principaux paramètres physiques connus de ces retenues (surface moyenne du plan d'eau, pan évaporation moyenne, altitude, longitude et latitude de la retenue, pluie moyenne interannuelle). La seconde méthode consiste à estimer E_{RET} à partir de l'équation 7, en calculant les valeurs de l'infiltration à partir des paramètres K et C_{ZERO} du tableau 15 et des valeurs de α du tableau 12 : $E_{RET} = -\Delta C - K \times (C - C_{ZERO})/\alpha$. L'équation linéaire $E_{RET} = C_T \times E_{PAN}$ est résolue par régression simple sans distinction des retenues collinaires entre elles à partir des couples (E_{RET}, E_{PAN}) correspondant à différentes saisons. Cette méthode permet d'analyser les variations de C_T avec la saison.

iv. Résultats

Variabilité de la drainance (K)

Ø Variations de K entre les retenues

Le tableau 14 rassemble les valeurs de K , C_{ZERO} et C_T obtenues par régression linéaire multiple pour chaque retenue. Les erreurs indiquées correspondent à leur écart-type.

²¹ La retenue collinaire de Fidh Ali est la seule des retenues étudiées à ne pas posséder de bac évaporatoire.

Tableau 14. Paramètres du modèle linéaire de déstockage. « Durée » : durée de la chronique de données (incluant les périodes avec apport et/ou déstockage volontaire) et la proportion de « jours utilisés » pour ajuster les paramètres de la régression.

	K		C _{ZERO} [mm]		C _T		R ²	Durée [j]	Jours utilisés
	Valeur [j ⁻¹]	Erreur [%]	Valeur	Erreur	Valeur	Erreur [%]			
Abdessadok	2.66E-03	15.7	3 645	929	0.90	8.72	73.3%	1918	36.7%
Fidh Ben Naceur	4.27E-03	8.73	1 180	495	0.95	7.30	69.2%	1580	55.1%
Hadada	1.64E-03	16.4	1 590	1 244	0.99	4.67	73.7%	2344	49.5%
Janet	1.54E-03	34.8	7 091	2 925	1.06	4.63	78.3%	2247	39.0%
Jedeliane	5.58E-04	25.7	516	1 874	0.83	15.23	72.1%	2437	29.1%
Mora	6.05E-04	77.5	-1 458	6 213	0.69	5.06	70.9%	1616	67.1%
Mrichet	2.47E-03	14.9	3 551	936	0.86	4.63	80.8%	1971	66.4%
Sadine 2	2.07E-02	73.9	1 540	5 349	0.96	12.4	70.3%	465	41.8%
El Moudhi	2.20E-02	3.63	1 043	167	1.50	12.3	89.6%	1468	53.8%
El Haouareb	9.30E-04	23.8	187 943	48 715	0.48	11.0	40.6%	2897	35.6%
	Infiltration constante								
	Valeur [mm/j]		Erreur [%]						
Brahim Zaher	15.16		7.70		0.98	15.62	65.8%	1478	8.1%
El Gouzaine	7.48		3.82		0.99	5.60	65.6%	2396	44.3%
Fidh Ali	2.62		10.48		0.65	7.18	56.4%	3004	36.8%

Les coefficients de détermination (R²) des régressions linéaires multiples obtenus pour les 12 retenues collinaires sont acceptables. Pour le barrage d'El Haouareb, les valeurs des paramètres K, C_{ZERO} et C_T n'ont aucun sens du fait de la très faible valeur de R² : 40,6%. Les valeurs des paramètres contrôlant le déstockage naturel ne peuvent donc être déterminées par régression linéaire multiple. La difficulté à modéliser le déstockage naturel de la retenue d'El Haouareb avec l'équation 9 s'explique probablement par l'existence d'autres processus contrôlant sa vidange. Le barrage est construit sur un karst. Des connexions hydrauliques entre la retenue et les aquifères sous jacents ont été mises en évidence en observant des corrélations entre les variations du débit d'une résurgence située à l'aval du seuil de la retenue et le niveau d'eau dans la retenue (Kingumbi, 1999). Il est donc probable que l'intensité de l'infiltration ne dépende pas uniquement de la hauteur d'eau dans la retenue mais également du niveau piézométrique des aquifères sous jacents.

Dans la suite des calculs, les flux évaporés et infiltrés à partir de la retenue du barrage El Haouareb seront estimés en supposant que C_T est égal à 0,9, moyenne des valeurs de C_T obtenues pour les 12 retenues collinaires et présentées dans le tableau 14. L'intensité de l'infiltration est supposée varier linéairement en fonction de la cote du plan d'eau, comme cela est illustré sur la figure 37.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

Pour chacune des 12 régressions linéaires correspondant aux retenues collinaires, le modèle est bien spécifié en moyenne : $E(\varepsilon_i) = 0$ ²². La comparaison de la statistique de Fisher à sa valeur critique correspondant à une p-value de 5% permet de juger de la signification des paramètres dans la régression. Soit H_0 , l'hypothèse correspondant à un paramètre significatif (le paramètre ajusté dans l'équation 9 apporte plus d'information sur la variabilité de $-\Delta C$ que sa moyenne). Dans la majorité des cas, la probabilité d'accepter cette hypothèse alors qu'elle est fautive est inférieure à 0,01%. Trois exceptions existent. Il s'agit du paramètre K des retenues de Brahim Zaher, d'El Gouazine et de Fidh Ali, avec des probabilités dépassant respectivement 35%, 60% et 92%. Pour ces trois cas, le modèle a été ajusté avec une valeur d'infiltration constante. L'indépendance apparente entre l'intensité de l'infiltration et le niveau d'eau pour ces trois retenues collinaires avait déjà été identifiée sur les figures 36 et 37.

Les valeurs de C_{ZERO} sont toujours comprises, aux incertitudes près, entre la première et la dernière mesure de la cote du fond de la retenue (tableau 8). Cette concordance indique que le paramètre C_{ZERO} pourrait correspondre à la cote moyenne du fond de la retenue sur les périodes utilisées pour sa détermination. Dans ce cas, le paramètre K, tel qu'il a été défini dans l'équation 9, correspond effectivement à la drainance moyenne de la retenue et l'intensité de l'infiltration [mm/j] est proportionnelle à la charge hydrostatique.

La retenue collinaire d'El Moudhi se distingue des autres par sa drainance particulièrement élevée ($2,20 \times 10^{-2} \text{ j}^{-1}$), 10 fois supérieure à la moyenne des 9 autres ($1,86 \times 10^{-3} \text{ j}^{-1}$). Albergel et al. (2001a) avaient déjà remarqué le caractère exceptionnellement filtrant de cette retenue collinaire et l'expliquent par la grande porosité du substratum. Les valeurs des paramètres K et C_{ZERO} de la retenue collinaire d'El Gouazine aboutissent à des valeurs d'infiltration cohérentes avec les résultats des travaux antérieurs : Grünberger et al. (2004) avaient obtenu, par des méthodes hydrologique et isotopique et en fixant la valeur de C_T à 1, une infiltration apparente (infiltration réelle – apports souterrains) égale à $250 \text{ m}^3/\text{j}$ lorsque la cote dépasse 4,5 m et $120 \text{ m}^3/\text{j}$ dans le cas contraire. L'écart entre les deux valeurs d'infiltration était expliqué par la présence d'une couche sableuse filtrante située au voisinage de la cote 4,5 m. Nous obtenons des valeurs voisines sur la même période de simulation (1/12/96 au 24/07/98) avec $C_T=0,99$: $226 \text{ m}^3/\text{j}$ lorsque la cote dépasse 4,5 m et

²² Pour la retenue collinaire d'Abdessadok, le modèle surestime systématiquement $-\Delta C$ sur les périodes présentant des anomalies dans les mesures d'évaporation (cf. figure 22), i.e. le résidu du modèle ε_i est constamment négatif sur ces périodes. Ces anomalies sont donc très probablement dues à des erreurs de mesure de l'évaporation. Les épisodes correspondants ne sont donc pas pris en compte dans l'ajustement du modèle.

130 m³/j dans le cas contraire. Dans notre cas, la différence d'intensité de l'infiltration pour les cotes supérieures et inférieures à 4,5 m est simplement due à l'accroissement de la surface mouillée du lac avec la hauteur d'eau. Gay (2004), qui a également décrit le fonctionnement et le bilan de la retenue collinaire d'El Gouazine par des approches hydrochimique et isotopique, explique également la variation de l'intensité de l'infiltration en fonction du niveau d'eau par le simple accroissement de la surface mouillée.

Ø Variations temporelles de K

La variabilité temporelle de la drainance n'a pu être étudiée pour les retenues collinaires de Brahim Zaher, d'El Gouazine et de Fidh Ali du fait de l'indépendance apparente entre hauteur d'eau et intensité de l'infiltration. Pour ces trois retenues, seule la variabilité temporelle de l'infiltration moyennée sur chaque période a été étudiée. Quant à la retenue collinaire de Saadine 2, sa chronique de donnée est trop courte pour être subdivisée en deux périodes suffisamment longues pour effectuer une régression linéaire. La variabilité temporelle de ses paramètres n'a donc pas été étudiée. Pour les huit autres retenues, les valeurs des paramètres de l'équation 10 sont présentées dans le tableau 15. La statistique F de Fisher indique que ces paramètres expliquent significativement la variabilité de $-\Delta C$. Cependant, le gain en puissance du modèle ($R^2_{\text{équation 10}} - R^2_{\text{équation 9}}$) est assez faible, avec un maximum de 8,10% pour la retenue collinaire de Fidh Ben Naceur et 1,30% en moyenne pour les autres retenues. Ceci indique que la drainance n'a pas significativement changé entre les deux périodes étudiées. La figure 40 illustre, à partir des valeurs du tableau 15, l'évolution temporelle, peu significative pour la plupart des retenues, de l'infiltration et de la drainance : l'écart entre les valeurs calculées pour les 2 ou 3 périodes est rarement supérieur à leur incertitude. Abdessadok est la seule retenue qui présente une baisse significative de sa drainance. La stabilité générale des valeurs de drainance malgré l'envasement des retenues peut s'expliquer par l'intervention de deux processus qui agissent probablement de façon opposée sur la drainance. En s'ensasant, le fond de la retenue s'imperméabilise et sa drainance diminue. Cet envasement touchant préférentiellement les niveaux les plus bas de la retenue, le niveau d'immersion des berges s'élève au cours des années. Or les parties des berges les plus hautes sont également les plus perméables puisqu'il s'agit des zones les mieux préservées de l'envasement (cf. Martin-Rosales et Leduc (2003) et Desconnets (1994) qui ont étudié la dynamique de vidange des marres temporaires au Sahel). Il est donc probable que les surfaces mouillées présentent toujours des zones colmatées et non colmatées, quelque soit le niveau d'envasement de la retenue.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

Tableau 15. Ajustements successifs du modèle linéaire de destockage naturel sur 2 ou 3 périodes. Légende : cf. tableau 14.

	Période 1				Durée (j)	Jours utilisés	Date de Transition	Période 2				Périodes 1+2 (+3 pour El Haouareb)				R ²		
	K ₁		C _{ZERO1} (mm)					K ₂		C _{ZERO2} (mm)		C _T		Surface				
	Valeur (j ⁻¹)	Erreur (%)	Valeur	Erreur			Valeur (j ⁻¹)	Erreur (%)	Valeur	Erreur	(j)	utilisés	Valeur	Erreur (%)	Valeur (ha)	Erreur (%)		
Abdessadok	3.67E-03	15.92	4 144	939	845	47%	sept.-97	1.58E-03	36.46	2 012	2 288	1 073	29%	0.88	8.79	1.61	34.4	0.75
Fidh Ben Naceur	4.37E-03	8.63	1 718	481	1093	52%	nov.-97	4.68E-03	11.71	1 469	619	487	63%	1.07	5.97	0.88	34.3	0.77
Hadada	1.65E-03	22.37	-120	1 714	1172	38%	janv.-99	1.68E-03	20.76	3 041	1 539	1 172	61%	0.99	4.43	1.66	18.2	0.77
Jannet	2.04E-03	47.97	7 311	3 932	867	35%	oct.-98	1.15E-03	58.75	6 836	4 945	1 380	41%	1.07	5.07	2.12	15.9	0.78
Jedeliane	6.93E-04	60.94	1 204	4 498	1219	29%	août-99	2.15E-04	126.31	-4 117	6 233	1 218	29%	0.82	15.6	7.50	70.5	0.74
Mora	4.83E-04	115.67	-3 885	9 385	887	67%	sept.-98	1.15E-03	86.06	2 779	6 718	729	67%	0.68	5.33	7.95	5.82	0.71
Mrichet	2.39E-03	19.70	3 405	1 161	802	67%	juil.-98	2.91E-03	19.38	4 153	1 218	1 169	66%	0.88	4.95	1.03	36.3	0.81
El Moudhi	2.14E-02	5.04	1 089	273	429	58%	sept.-96	2.37E-02	6.93	1 149	206	1 039	52%	1.56	14.0	0.98	64.4	0.90
El Haouareb	1.33E-03	35.00	195 164	71 276	1448	42%	oct.-97	1.58E-03	27.00	197 889	55 621	1 449	29%	0.90		294	36.0	0.10
	Infiltration constante				Infiltration constante													
	Valeur (mm/j)		Erreur (%)				Valeur (mm/j)		Erreur (%)									
Brahim Zaher	16.5		10.5		558 12%		janv.-97		15.1		7.70 920 6%		0.96 17.6		2.18 30.2		0.66	
El Gouazine	7.97		4.12		1046 55%		mai-98		7.10		4.36 1 350 36%		0.97 5.56		3.17 54.4		0.68	
Fidh Ali	2.02		17.2		1403 48%		févr.-97		2.81		9.90 1 601 27%		0.69 7.10		1.69 44.3		0.58	

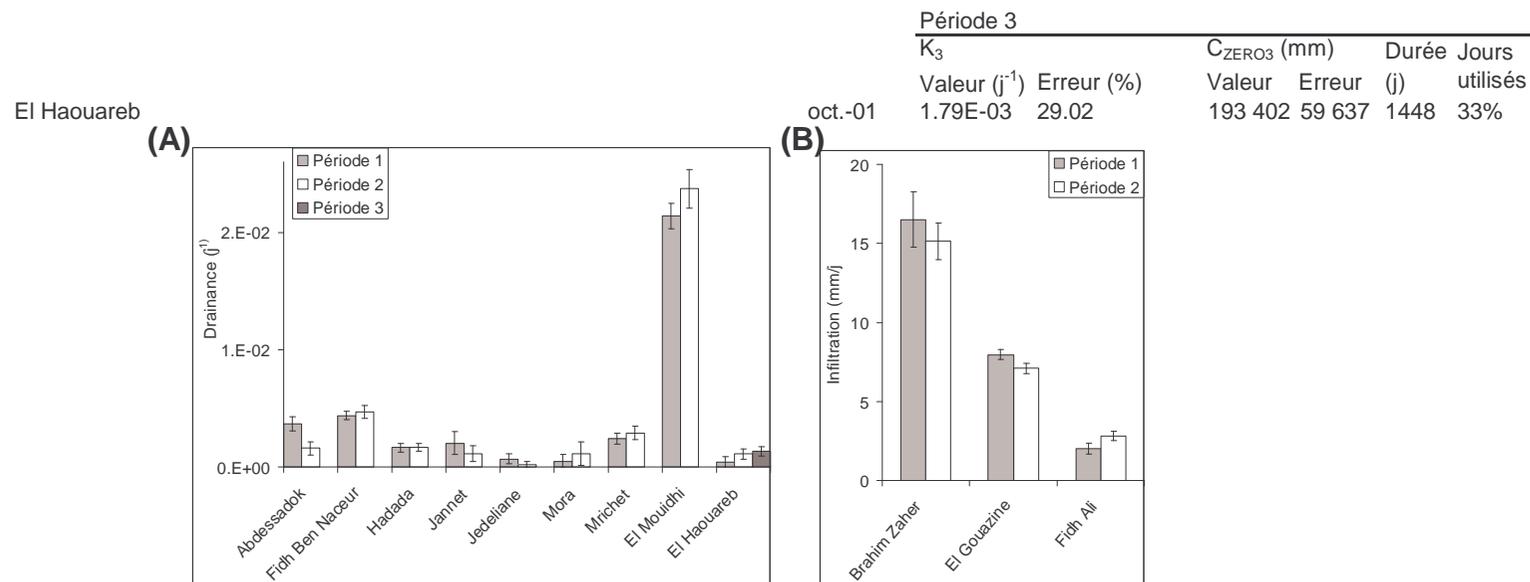


Figure 40. Evolution temporelle de la drainance (A) et de l'infiltration (B).

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

La figure 41 illustre l'évolution des valeurs de C_{ZERO} entre les différentes périodes de calcul.

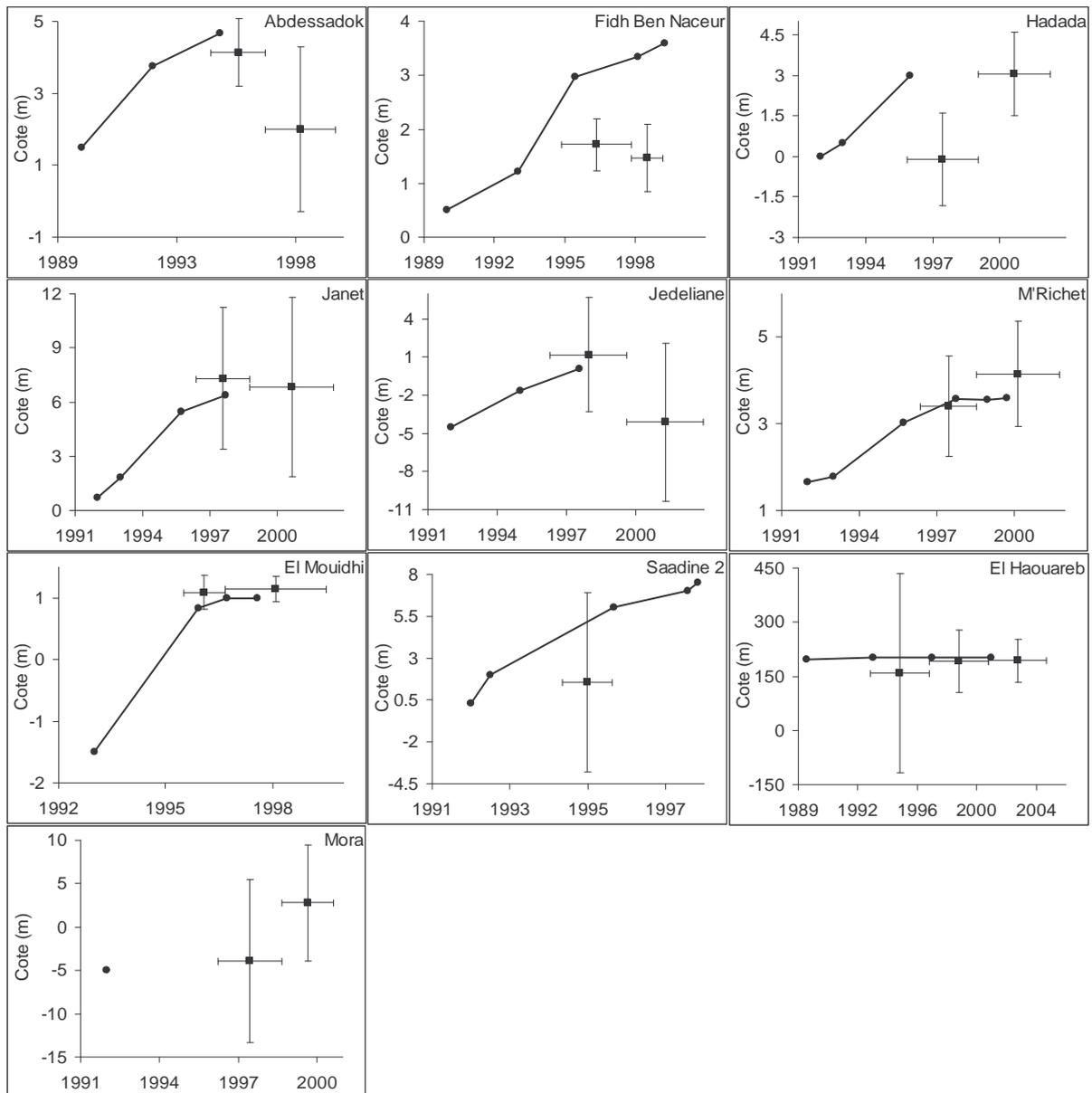


Figure 41. Valeurs de C_{ZERO} (points carrés avec barres d'incertitude) et de la cote du fond de la retenue (traits continus) pour les 10 retenues dont l'intensité de l'infiltration est dépendante du niveau d'eau. Incertitude sur la cote calculée par régression linéaire. Incertitude sur le temps : demie durée des périodes.

Comme pour la drainance, le sens de variation de C_{ZERO} avec le temps varie entre les différentes retenues mais reste très peu significatif compte tenu de l'incertitude sur les valeurs. Dans l'ensemble, les valeurs de C_{ZERO} sont proches du niveau du fond de la retenue. Dans le cas contraire, elles se situent plutôt en dessous (Abdessadok, Fidh Ben Naceur, Hadada). Pour ces trois retenues collinaires, ce décalage pourrait s'expliquer par une perméabilité et une porosité des sédiments supérieure à celle du substratum. Ainsi,

lorsque le niveau d'eau baisse et atteint celui des sédiments, le volume d'eau contenu dans ces derniers crée une charge hydrostatique maintenant l'infiltration positive avec une intensité proportionnelle à une hauteur inférieure ou égale à l'épaisseur des sédiments. Ces interprétations restent fortement hypothétiques car elles reposent sur des calculs empruntés d'une incertitude élevée. Des mesures directes d'infiltrations devraient être réalisées pour vérifier ces résultats.

Variabilité du coefficient de transposition (C_T)

Les valeurs de C_T obtenues par régression linéaire diffèrent légèrement (différence de 1,3% en moyenne) suivant qu'elles sont obtenues à partir de l'équation 9 qui ne considère qu'une seule période sur laquelle les paramètres K , C_{ZERO} et C_T sont ajustés ou à partir de l'équation 10 qui prend en compte l'évolution temporelle de K et C_{ZERO} en les ajustant successivement sur deux ou trois périodes distinctes. Ces dernières valeurs, sensées mieux refléter la variabilité de l'évaporation du fait du plus grand nombre de paramètres utilisés pour expliquer la variabilité de l'infiltration, sont utilisées dans la suite des calculs.

Pour toutes les retenues, la statistique de Fisher indique que ces paramètres sont significatifs dans le modèle avec un intervalle de confiance de 95%. A l'exception des retenues d'El Moudhi et d'El Haouareb, les valeurs de C_T , avec une moyenne de 0,93, présentent un faible coefficient de variation entre les différentes retenues : 12,7%. Ces valeurs sont en adéquation avec les estimations de Riou et Dubois (1966) et Fu et al. (2004) qui ont estimé des valeurs comprises entre 0,8 et 1,0 pour des retenues de surface inférieure à 5 ha. La valeur de C_T obtenue pour la retenue collinaire d'El Moudhi (1,56), la plus élevée, est difficile à expliquer. Il s'agit de la retenue la plus méridionale qui possède la surface moyenne la plus petite, les mesures de pan évaporation les plus élevées et la drainance la plus forte. Elle est donc assez atypique par rapport au reste de l'échantillon. Il est également possible que la particularité de la valeur de C_T soit due au bac évaporatoire. Avec l'une des demandes évaporatoires les plus élevées de la région (cf. figure 23), il est possible que l'eau du bac soit plus salée que celle des autres bacs évaporatoires, du fait de l'accumulation plus rapide des sels issus des adjonctions quotidiennes d'eau dans le bac. Or une eau salée s'évapore moins rapidement qu'une eau douce (Parker et al., 1999). Une autre cause possible pourrait être la différence de température entre l'eau de la retenue collinaire et celle ajoutée dans le bac évaporatoire : la retenue collinaire étant souvent asséchée, il est possible que l'observateur est pris l'habitude de refaire la remise à niveau du bac à partir d'une eau pompée dans la nappe, donc plus froide que l'eau de la retenue collinaire. En revanche, la distribution inter-saisonnière des périodes utilisées pour déterminer les valeurs de C_T n'explique pas la forte valeur de C_T pour la retenue collinaire d'El Moudhi car la

période froide et humide, correspondant à des valeurs de C_T généralement plus élevées (Riou, 1972; Pouyaud, 1986) n'est pas plus représentée pour cette retenue que pour les autres. Les causes possibles expliquant cette particularité d'El Moudhi sont nombreuses et sont très probablement liées à des erreurs de mesures, car il est peu probable que la retenue évapore 1,5 fois plus d'eau que le bac évaporatoire utilisé dans des conditions normales.

La principale nouveauté de notre méthode d'estimation de C_T par bilan hydrique consiste à ne pas négliger l'infiltration en la supposant nulle. C'est sans doute la raison pour laquelle les valeurs de C_T obtenues ici sont légèrement inférieures aux valeurs calculées par Pouyaud (1986) et Molle (1991).

Ø Relation entre C_T et la surface du plan d'eau

Des calculs de corrélations entre C_T et les paramètres physiques connues des retenues collinaires sont réalisés pour expliquer la variabilité inter-retenue de C_T . Le barrage El Haouareb n'est pas pris en compte puisqu'il n'a pas été possible de déterminer de valeur de C_T fiable pour cette retenue. Les valeurs de ces variables et leur corrélation avec C_T sont présentées dans le tableau 16.

Tableau 16. Corrélations entre C_T et les principaux paramètres physiques connus des retenues étudiées. Surface [ha] : surface moyenne du miroir de la retenue. E_{PAN} [mm/j] : pan évaporation moyenne²³. Altitude [m] : altitude de la retenue. Longitude et Latitude [m] de la retenue : projection UTM Carthage.

Retenue	C_T	Surface	E_{PAN}	Altitude	Longitude	Latitude	Pluie
Mora	0.68	7.95	6.29	580	535 908	3 948 522	310
Mrichet	0.88	1.03	5.88	590	553 400	3 993 924	461
Jedeliane	0.82	7.50	2.29	740	500 269	3 937 781	338
Sadine 2	0.96	1.79	7.41	860	507 204	3 961 156	484
El Gouazine	0.97	3.17	4.32	390	563 230	3 973 352	327
Abdessadok	0.88	1.61	6.23	800	522 548	3 948 039	270
Hadada	0.99	1.66	4.04	1000	511 916	3 965 491	416
Brahim Zaher	0.96	2.18	6.92	525	521 106	3 933 949	285
Janet	1.07	2.12	5.73	810	517 314	3 969 360	443
Fidh Ben Naceur	1.07	0.88	4.16	360	553 319	3 953 000	278
El Moudhi	1.56	0.98	5.25	235	576 740	3 899 584	273
Corrélation avec C_T		-59%	-4%	-48%	53%	-54%	-18%

²³ La valeur moyenne de E_{PAN} est calculée uniquement sur les périodes correspondant à des niveaux d'eau non nuls dans la retenue collinaire afin que l'analyse de corrélation avec C_T (calculée sur les mêmes périodes) ait un sens.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

Le tableau 16 montre que la variable la mieux corrélée à C_T est la surface moyenne du miroir de la retenue. En excluant la retenue El Moudhi de l'échantillon, le coefficient de corrélation R atteint la valeur de -77% . Après la surface du miroir, les variables les mieux corrélées à C_T sont la latitude et la longitude. Cette corrélation est principalement due à la retenue collinaire d'El Moudhi située la plus au sud et la plus à l'Est et qui présente la valeur de C_T la plus élevée (1,56). Sans cette retenue collinaire, C_T et les coordonnées géographiques ne sont pas corrélées : $R = 24\%$ et $R = 8\%$ respectivement. Les corrélations avec les autres variables sont également peu significatives.

La corrélation entre C_T et la surface du plan d'eau est illustrée par la figure 42 qui représente les valeurs de C_T obtenues pour chaque retenue collinaire en fonction de la surface moyenne du miroir du plan d'eau. La décroissance de C_T avec la surface du plan d'eau avait déjà été identifiée par Molle (1991) qui avait modélisé la relation entre C_T et S à l'aide d'une équation à trois paramètres A , B et C : $C_T = A - B \times \text{Arctan}(C \times \text{Surface})$ pour les açudes du nord-est brésilien.

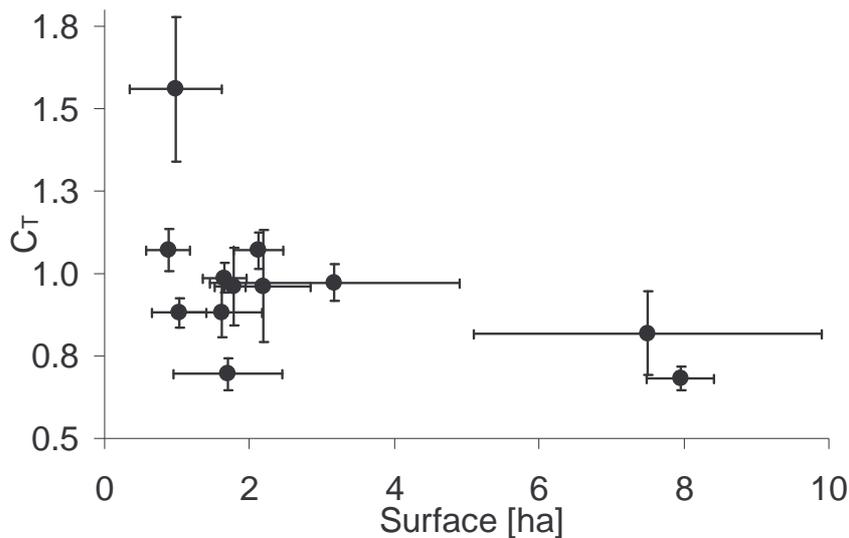


Figure 42. Relation entre C_T et la surface moyenne du miroir des retenues collinaires.

La décroissance de C_T lorsque la surface moyenne des retenues augmente peut s'expliquer simplement par l'amplification de l'effet « oasis » contribuant à accroître l'humidité relative de l'air au dessus du miroir des retenues lorsque leur surface augmente et ayant pour conséquence la réduction de l'évaporation. Cette tendance avait déjà été signalée par Hounam (1973) qui explique ce phénomène par l'accroissement de l'écart entre l'humidité relative de l'air situé au dessus du miroir de la retenue et au dessus du bac évaporatoire lorsque la surface de la première augmente, cet écart étant d'autant plus marqué que le climat est aride. Une autre cause probable, indépendante des facteurs

atmosphériques, pourrait être la sous-estimation de l'évaporation due aux apports d'étiages dont le débit moyen augmente probablement avec la taille du bassin versant de la retenue.

Remplacer C_T par son expression en fonction de S dans le modèle de vidange des retenues n'améliore pas l'efficacité du modèle car les plages de variations de S sont faibles pour chaque retenue : sur chaque chronique utilisée pour la calibration du modèle de vidange, l'écart-type de la surface du miroir est égale à 35% de sa moyenne.

Ø Relation entre C_T et la saison

Les variations inter saisonnières de C_T sont analysées à partir de régressions linéaires sur les couples (E_{RET} , E_{PAN}). E_{RET} est calculé à partir de l'équation 7 et des valeurs d'infiltration déterminées avec les valeurs des paramètres K , C_{ZERO} et α disponibles dans les tableaux 12 et 15. Aucune distinction n'est faite entre les différentes retenues. Seules deux régressions linéaires sont réalisées à partir de deux classes d'observations. La première rassemble 616 couples de valeurs (E_{RET} ; E_{PAN}) correspondant aux mois estivaux (avril à septembre). La seconde rassemble 734 couples de valeurs (E_{RET} ; E_{PAN}) et correspond aux mois hivernaux (octobre à mars)²⁴. Les observations du barrage El Haouareb ne sont pas prises en compte puisqu'il n'a pas été possible de déterminer les valeurs des paramètres contrôlant son déstockage naturel par régression linéaire multiple. Des valeurs de C_T respectivement égales à 0,89 +/- 0,01 et 0,93 +/- 0,02 sont obtenues pour les périodes estivales et hivernales (figure 43). Les faibles valeurs de R^2 traduisent la forte incertitude sur les mesures d'évaporation, déjà soulignée en partie 3.1.3.ii.

²⁴ Un découpage plus fin, au pas de temps mensuel par exemple, aboutit à un nombre d'observations trop faible pour que les régressions linéaires sur chaque classe soient pertinentes.

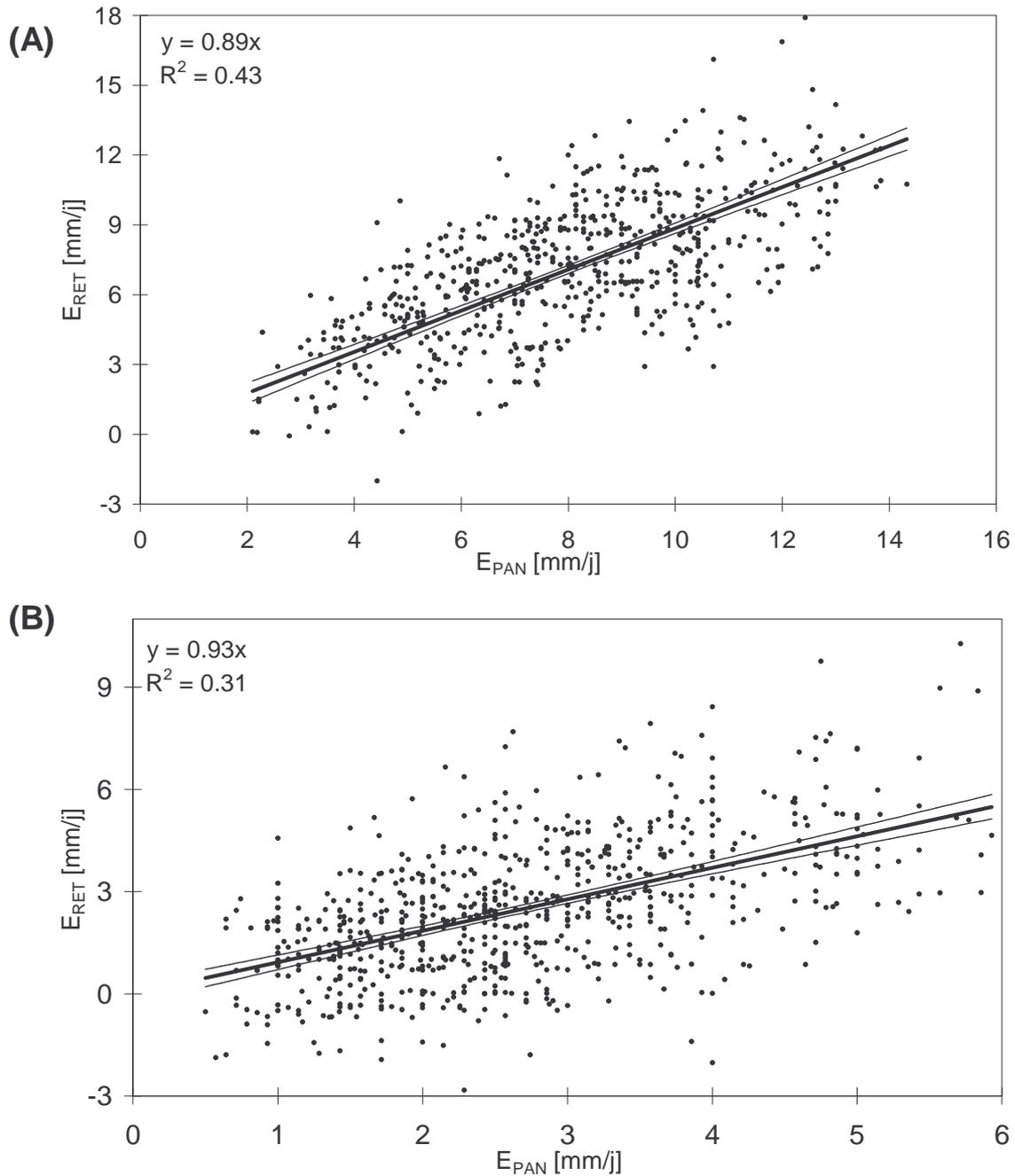


Figure 43. Régressions linéaires sur les couples (E_{PAN} ; E_{RET}) en période estivale (avril à septembre) (A) et en période hivernale (octobre à mars) (B).

Du fait de la petite taille des retenues collinaires, il est peu probable que cette différence inter saisonnière soit due à l'accumulation par leur masse d'eau d'énergie radiative en été qui serait libérée en hiver (Hounam, 1973). Dans le contexte semi-aride tunisien, il est plus probable que ces fluctuations de C_T soient dues à l'effet « oasis » créé par la présence de l'étendue d'eau dans une atmosphère chaude et sèche et contribuant à maintenir une humidité de l'air plus élevée au dessus du miroir de la retenue, particulièrement en été, lorsque le bilan climatique est le plus déficitaire.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

L'obtention d'un coefficient de transposition C_T plus élevé en période froide et humide et qui diminue pendant la saison chaude et sèche avait déjà été signalée par Pouyaud (1986) pour le lac de Bam au Burkina-Faso et le lac Tchad ($C_T > 0,80$ en saison des pluies et $C_T < 0,65$ en saison sèche) et par Sellers (1965) pour le lac de Hefner dans l'état d'Oklahoma aux Etats-Unis ($C_T = 0,90$ en hiver et $C_T = 0,65$ en été). L'écart entre nos valeurs estivale et hivernale sont faibles et presque négligeables compte tenu de leur incertitude. Cette moindre amplitude par rapport aux précédentes études s'explique probablement par le découpage de l'année en deux périodes de six mois atténuant les extremums mensuels alors que les valeurs de références bibliographiques citées ci-dessus correspondent aux valeurs mensuelles maximales et minimales. D'autres facteurs peuvent également expliquer les plus forts écarts rencontrés dans les études antérieures. Ils sont d'ordre méthodologique ou liés aux échelles considérées :

- En Afrique sub-saharienne, l'évaporation des lacs a été obtenue par bilan hydrique en négligeant l'infiltration. Nos résultats montrent que pour 75% des retenues étudiées, l'intensité de l'infiltration croît avec la hauteur d'eau. Or la limnimétrie des lacs est généralement beaucoup plus faible en saison sèche durant laquelle les apports sont également nettement inférieurs à ceux de la saison humide. Négliger l'infiltration dans le bilan hydrique des lacs devrait donc conduire respectivement à une surestimation et une sous-estimation de l'évaporation en saison humide et en saison sèche. Dans ce cas, il est normal que l'écart entre l'évaporation du lac et celle du bac soit plus marquée en saison sèche, aboutissant à des valeurs de C_T plus faibles. Ce raisonnement n'est valable que dans la mesure où les valeurs de C_T sont inférieures à 1, ce qui est le cas pour la majorité des nappes d'eau étudiées en Tunisie et en Afrique sub-saharienne.

- Le lac de Bam et le lac Tchad ont des superficies respectivement égales à 15-20 km² et 10 000-23 000 km² soit près de 1000 fois supérieures à celles des retenues collinaires tunisiennes. Or l'effet « oasis » augmente avec la surface des nappes d'eau, accentuant les écarts entre les valeurs estivale et hivernale de C_T . L'impact de la taille des bassins versant des nappes d'eau étudiées (lac de Bam : 2 600 km² ; lac Tchad : 500 000 km² ; retenues collinaires tunisiennes : 10 km²) sur C_T est moins prévisible du fait de la multitude de facteurs contrôlant la réponse hydrologique des bassins versants et des différences biophysiques entre les sites sub-saharien et tunisiens.

Redéfinition d'une incertitude sur l'infiltration

Les premiers calculs d'incertitude sur l'infiltration, détaillés dans la partie 3.2.2.ii, supposaient que la valeur du coefficient de transposition C_T utilisée pour calculer l'évaporation de la retenue était comprise 0,6 et 1,0. Il était alors conclu que la source majeure d'incertitude sur l'infiltration était due à la méconnaissance de C_T . Pour chaque retenue étudiée, des calculs de régression linéaire multiple ont permis de déterminer des valeurs de C_T et de leur intervalle de confiance [C_{Tmin} ; C_{Tmax}] correspondant à une p-value de 5% (cf. tableau 15). L'incertitude sur l'infiltration est calculée à partir de ce nouvel intervalle de confiance sur C_T , plus étroit que l'intervalle [0,6 ; 1] utilisé jusqu'à présent. La figure 44 représente l'incertitude sur l'infiltration en fonction de la cote du plan d'eau.

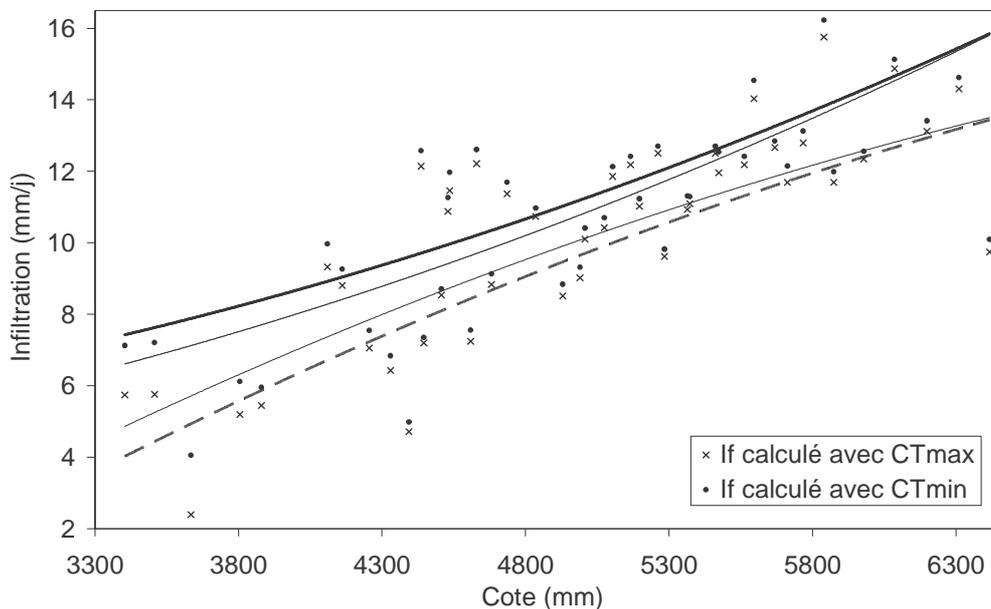


Figure 44. Intervalle de confiance sur l'infiltration (\hat{I}_f) (retenue collinaire de Fidh Ben Naceur). Traits continus (resp. discontinus) : intervalle de confiance à 95% sur les valeurs de \hat{I}_f calculées avec C_{Tmin} (resp. C_{Tmax}). Traits gras (continus et discontinus) : intervalle de confiance choisi pour définir l'incertitude sur \hat{I}_f .

Il est ainsi possible de déterminer des valeurs minimale et maximale de l'infiltration pour un niveau d'eau donné. Ces résultats seront utilisés dans les parties 3.3 et 3.4 pour déterminer l'incertitude sur les déstockages volontaires et les apports aux retenues. Pour les retenues collinaires de Brahim Zaher, Fidh Ali, et El Gouazine dont l'infiltration est apparemment indépendante de la hauteur d'eau, l'incertitude sur l'infiltration est assimilée à l'écart-type sur le paramètre A de la régression linéaire : $-\Delta C = C_T \times E_{PAN} + A$ (cf. tableau 15).

3.3. Les flux de déstockages volontaires

Connaissant les flux de déstockage par infiltration et évaporation, il est possible d'en déduire les autres flux de déstockage (pompage et lâcher de barrage) à partir de l'équation du bilan hydrique de la retenue (équation 5) sur des périodes sans apport ni déversement. Il est considéré y avoir un déstockage volontaire lorsque l'amplitude de la décroissance de la cote de la retenue [mm] sur un intervalle de temps donné [Δt] est supérieure à la somme des hauteurs des lames d'eau infiltrées et évaporées. Graphiquement, cette situation se rencontre lorsque la courbe représentative de la fonction $f : -\Delta C = f(\text{temps})$ se situe au dessus de la courbe représentative de la fonction $g : E_{\text{RET}} + I_f = g(\text{temps})$ (figure 45), situation équivalente à l'inégalité $-\Delta C > (E_{\text{RET}} + I_f)$. Dans ce cas, le volume d'eau déstocké volontairement se calcule à partir de l'équation 11 :

$$\text{équation 11} \quad P_o + L = -\Delta C - (E_{\text{RET}} + I_f)$$

P_o : pompage [$\text{m}^3 \cdot \Delta t^{-1}$],

L : lâcher de barrage [$\text{m}^3 \cdot \Delta t^{-1}$],

ΔC : variation du niveau d'eau [$\text{m}^3 \cdot \Delta t^{-1}$],

E_{RET} : évaporation à partir de la retenue [$\text{m}^3 \cdot \Delta t^{-1}$],

I_f : infiltration à partir de la retenue [$\text{m}^3 \cdot \Delta t^{-1}$].

3.3.1. Méthode de calcul

Les volumes volontairement déstockés ne peuvent être précisément déterminés du fait de l'imprécision sur les valeurs de $-\Delta C$, E_{RET} , I_f . Pour en tenir compte, deux estimateurs $(P_o + L)_{\text{MAX}}$ et $(P_o + L)_{\text{MIN}}$ sont choisis pour encadrer la valeur réelle du volume volontairement déstocké. $(P_o + L)_{\text{MAX}} = -\Delta C_{\text{MAX}} - (E_{\text{RET}} + I_f)_{\text{MIN}}$. $(P_o + L)_{\text{MIN}} = 0$ lorsque $-\Delta C_{\text{MIN}} < (E_{\text{RET}} + I_f)_{\text{MAX}}$, sinon $(P_o + L)_{\text{MIN}} = -\Delta C_{\text{MIN}} - (E_{\text{RET}} + I_f)_{\text{MAX}}$. Pour que l'équation 11 soit valide, l'expression entre parenthèses doit être positive. Cette condition est nécessaire mais insuffisante. En effet, il est possible que de faibles apports compensent partiellement les flux de déstockage volontaire. Ces apports, indétectables par la seule observation des variations du niveau d'eau de la retenue, conduisent à une sous-estimation des volumes pompés ou lâchés.

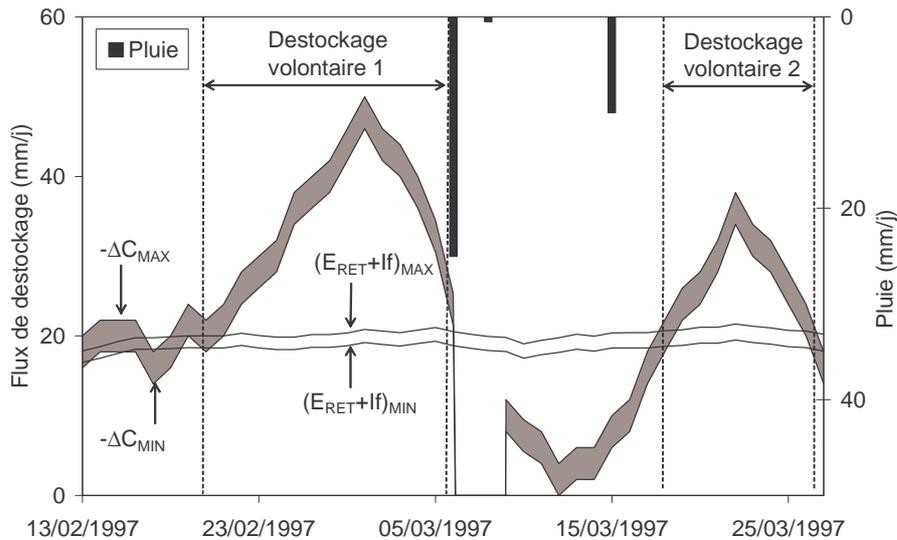


Figure 45. Exemples d'épisodes de déstockage volontaire (retenue collinaire de Brahim Zaher).

Afin d'identifier les épisodes de déstockage volontaire au cours desquels des apports pourraient survenir, il convient de comparer les valeurs de $-\Delta C$ et $(E_{RET} + I_f)$ juste avant le début du déstockage volontaire. Deux cas se présentent :

- si $-\Delta C = (E_{RET} + I_f)$ aux incertitudes près, il n'y a aucun apport et en l'absence de pluie jusqu'à la fin de l'épisode de déstockage volontaire, il est fort probable que l'absence d'apport persiste (déstockage volontaire 1 de la figure 45),
- si $-\Delta C < (E_{RET} + I_f)$, il y a des apports qui persistent probablement pendant le déstockage volontaire. Dans ce cas, les volumes pompés ou lâchés sont sous-estimés (déstockage volontaire 2 de la figure 45).

L'observation des enregistrements continus de la cote permet dans certains cas de distinguer des déstockages volontaires très rapprochés des apports. Les variations de cote correspondant à chaque épisode d'apport ou de déstockage volontaire sont donc observées avec les enregistrements continus du limnimètre. Lorsque plusieurs phases de remplissage et de vidange se succèdent pendant la même journée (situations particulièrement fréquentes pour la retenue collinaire de Hadada), l'équation 11 n'est plus utilisable au pas de temps journalier. Elle est appliquée sur chaque période correspondant à une fluctuation brutale du niveau d'eau.

3.3.2. Distinction des prélèvements et des lâchers

L'équation 11 ne permet pas de calculer séparément les volumes lâchés et les volumes prélevés. Il est donc nécessaire que ces déstockages aient lieu à des instants différents pour qu'ils puissent être quantifiés individuellement. Cette condition est rencontrée la plupart du temps. En effet, les lâchers sont le plus souvent effectués lorsqu'il y a risque de débordement donc en période humide (fin août à début avril) alors que les prélèvements sont réalisés en périodes sèches pour irriguer les cultures (fin avril à début août). Le résultat de l'équation 11 correspond donc le plus souvent à un volume lâché ou bien pompé. Il est donc nécessaire de définir un critère de décision pour déterminer la nature de chaque déstockage volontaire.

Les volumes lâchés sont généralement largement supérieurs aux volumes pompés. En effet, le but d'un lâcher est de rabattre le niveau d'eau de la retenue de quelques dizaines de centimètres lorsque celle-ci risque de déborder. La surface moyenne du miroir des retenues collinaires à la cote du déversoir est de 30 000 m². Il faut donc lâcher 3 000 m³ pour rabattre le niveau d'eau de 10 cm. Une pompe débite en moyenne 4 L/s. A l'exception de la retenue collinaire de Brahim Zaher équipée de 11 pompes, leur nombre par retenue collinaire ne dépasse généralement pas trois (cf. § 4.3.1). Le volume maximal pompé en 24 heures est donc environ de 1 000 m³. La distinction entre volumes prélevés et lâchés peut donc se faire en définissant une valeur seuil de volumes déstockés quotidiennement au dessus de laquelle les volumes déstockés sont des lâchers de barrage et en dessous de laquelle il s'agit de prélèvement.

Les volumes pompés quotidiennement peuvent varier de façon continue entre zéro et une valeur maximale atteinte lorsque toutes les pompes utilisées dans la retenue fonctionnent à plein régime, 24h/24. Au-delà, les déstockages volontaires sont considérés comme des lâchers. La méthode utilisée pour déterminer le seuil de différenciation entre lâchers et prélèvements consiste à faire croître ce seuil arbitrairement, de façon continue, à partir de la valeur nulle et à observer les valeurs prises par le rapport $Po / (Po + L)$ où Po [m³] et L [m³] correspondent aux cumuls des volumes pompés (identifiés comme tels car inférieurs au seuil arbitraire) et lâchés (identifiés comme tels car supérieurs au seuil arbitraire) sur toute la chronique de données disponibles pour chaque retenue. A partir d'une certaine valeur de ce seuil, le rapport $Po / (Po + L)$ présente un palier alors que le seuil continue de croître, traduisant l'absence de déstockage dans la gamme des volumes considérés. Puis le rapport $Po / (Po + L)$ augmente à nouveau, par à-coup, à chaque fois que

le seuil prend la valeur d'un volume lâché. Le seuil de différenciation finalement choisi correspond à la valeur minimale du seuil au niveau du premier palier (figure 46).

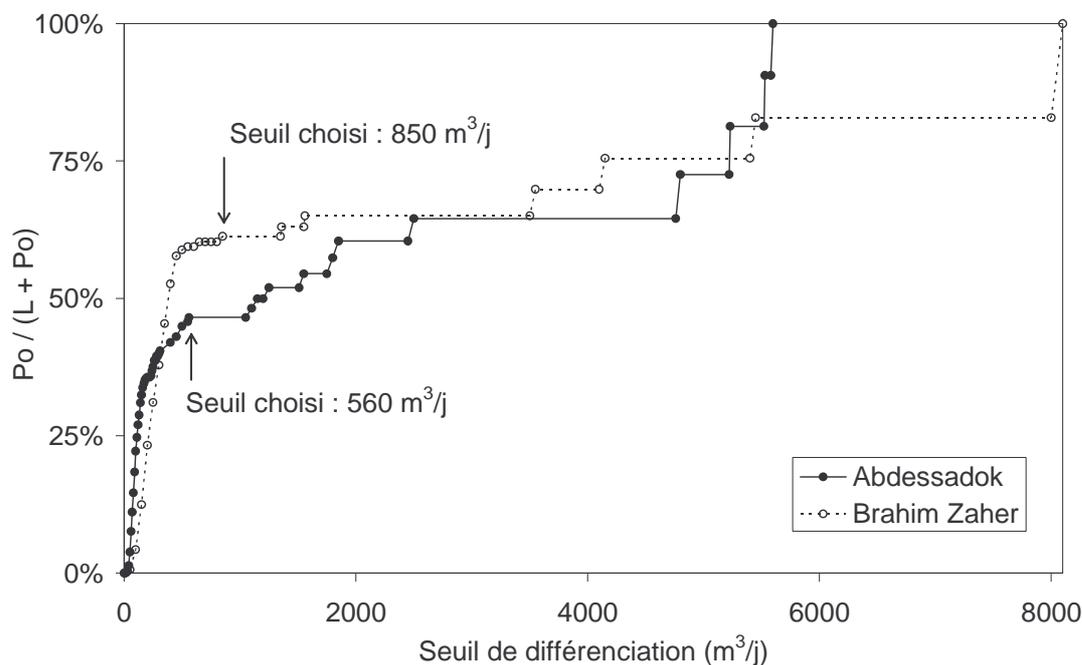


Figure 46. Détermination du seuil de différenciation des déstockages volontaires. (Retenues collinaires d'Abdessadok et de Brahim Zaher).

Tableau 17. Seuils de différenciation [m^3/j] des volumes volontairement déstockés.

Retenues inscrites en gras : aucun lâcher identifié ; la valeur indiquée correspond alors au déstockage volontaire maximal enregistré.

Abdessadok	560	Fidh Ben Naceur	1 000
Brahim Zaher	850	M'Richet	350
El Gouazine	1 000	Saadine 2	1 800
El Moudhi	600		
Fidh Ali	1 700		
Hadada	1 100		
Janet	2 200		
Mora	700		
Jedeliane	12 000		
El Haouareb	110 000		

Les volumes déstockés volontairement et inférieurs aux valeurs indiquées dans le tableau 17 sont considérés comme des pompages. Les volumes supérieurs sont considérés comme des lâchers. A l'exception de la retenue collinaire de Jedeliane et du barrage d'El Haouareb, la moyenne des valeurs seuils est de $1078 m^3/j$ (écart-type : $583 m^3/j$), proche des estimations faites en début de partie 3.3.2. Les plus fortes valeurs obtenues pour les retenues de Jedeliane et d'El Haouareb s'expliquent par la capacité des retenues (respectivement 1,5 et $95 Mm^3$ contre $0,14 Mm^3$ en moyenne pour les 11 autres retenues) et le mode de prélèvement : en décembre 1993, 5 pompes débitant chacune 250 L/s (soit

108 000 m³/j) ont été installées dans le barrage d'El Haouareb pour alimenter un périmètre irrigué situé à l'aval du barrage. L'irrigation depuis la retenue collinaire de Jedeliane se fait par des lâchers alimentant un périmètre irrigué situé en contre bas du barrage. Les prélèvements dans les 11 autres retenues collinaires se font par des pompes (3 en moyenne par retenue) dont le débit n'excède probablement pas 4,2 L/s (cf. annexe 7.4).

3.3.3. Validation de la méthode avec les mesures du barrage El Haouareb

La validité de l'équation 11 et de la méthode utilisée pour déterminer le seuil de différenciation des déstockages volontaires est vérifiée avec les données du barrage El Haouareb qui est la seule retenue dont les prélèvements et les lâchers sont mesurés. Les mesures de pompage proviennent d'un compteur volumétrique installé à la sortie d'un réservoir de régulation dans lequel déversent les pompes du barrage (Kingumbi, 1999). Les volumes lâchés pour curer le barrage ou alimenter la nappe alluviale sont obtenus via les courbes d'étalonnage des vannes.

Les jours qui comportent des lâchers et des prélèvements représentent 0,32% de la chronique de mesures (déc. 1993 à fév. 2006). Le résultat de l'équation 11 correspond donc, conformément aux hypothèses émises en début de partie 3.3.2, à l'un ou l'autre des flux de déstockage et rarement à la somme des deux. Les 5 pompes fonctionnant en permanence et à plein régime débitent 108 000 m³/j, valeur très proche du seuil de différenciation obtenu par la méthode illustrée par la figure 46.

Les chroniques des volumes journaliers déstockés volontairement calculés à partir de l'équation 11, inférieurs et supérieurs à 110 000 m³/j, sont respectivement comparées aux chroniques des mesures journalières de pompages et de lâchers. La figure 47 représente les cumuls annuels des mesures et des estimateurs maximaux $(Po+L)_{MAX}$ et minimaux $(Po+L)_{MIN}$ des volumes pompés.

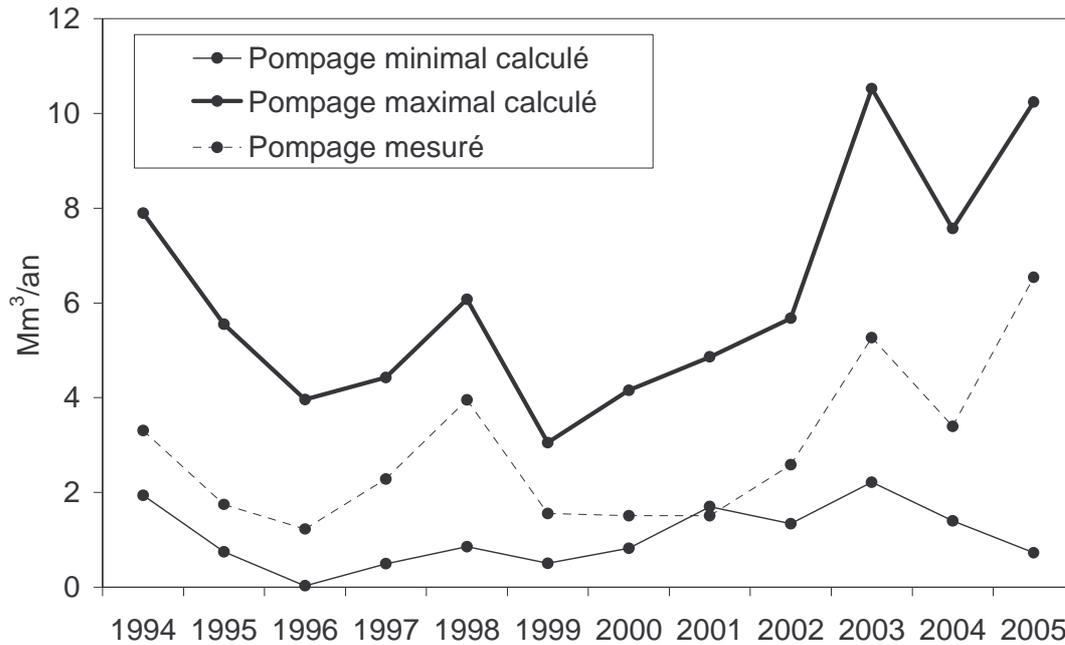


Figure 47. Comparaison des chroniques de pompages mesurées au barrage El Haouareb et calculées à partir de l'équation 11.

Au pas de temps annuel, les calculs des volumes pompés sont, aux incertitudes près et 11 années sur 12, égaux aux volumes mesurés. La comparaison des valeurs mesurées et calculées à un pas de temps plus fin aboutit à des résultats moins probants avec de nombreuses périodes durant lesquelles la valeur de pompage mesurée sort de l'intervalle défini par les pompages minimaux et maximaux calculés. Ceci est dû en partie aux incertitudes sur les termes du bilan hydrique utilisés dans le calcul des volumes prélevés. De plus, l'eau prélevée dans la retenue est successivement stockée dans le réservoir de la station de pompage puis un réservoir intermédiaire de régulation. Le compteur volumétrique utilisé pour mesurer les volumes pompés se situe à l'aval de ces deux réservoirs. Il est donc possible qu'il y ait un décalage de plusieurs jours entre les dates de déstockage de la retenue et celles correspondant aux prélèvements mesurés. La fuite de la chambre du flotteur de régulation des pompes, débitant environ $0,005 \text{ Mm}^3/\text{mois}$ dans le canal de l'évacuateur de crue (Kingumbi, 1999), donc non comptabilisée par le compteur volumétrique, ne peut expliquer l'imprécision sur les estimations de prélèvement car elles ne représentent que 1% des volumes prélevés.

La surestimation des volumes pompés en 2001 s'explique probablement par le niveau d'eau exceptionnellement bas dans le barrage, 40 cm en moyenne sur l'année, alors qu'il atteint en moyenne trois mètres les 11 autres années. Il est possible que l'incertitude sur S ait été sous-estimée pour les faibles cotes. La méthode d'estimation des prélèvements annuels à partir du bilan hydrique de la retenue donne cependant des résultats corrects dans

plus de 90% des cas. Il est finalement conclu que le pas de temps annuel est suffisamment précis pour quantifier le degré d'exploitation des retenues collinaires et comparer les chiffres obtenus avec ceux fournis par les enquêtes (cf. chapitre 4).

Les résultats sont moins probants pour les lâchers de barrage. Seules les mesures effectuées entre le 20 avril et le 9 mai 1993 au cours des essais expérimentaux de recharge de nappe (Bouzaiane et al., 1993) sont correctement estimées à partir de l'équation 11 : la mesure de 5,3 Mm³ d'eau lâchés est encadrée par l'intervalle [4,5 ; 5,9] obtenu à partir de l'équation 11. Les 44 autres lâchers mesurés entre le 1^{er} janvier 1992 et le 28 février 2006, soit un volume total mesuré de 8,5 Mm³, sont sous-estimés par l'équation 11 qui propose l'intervalle [3,0 ; 5,4]. L'explication est probablement très simple : ces lâchers ont tous été effectués pour curer le barrage au moment d'importantes crues. Pendant l'ouverture des vannes de vidange, des apports dans le barrage ont certainement dû atténuer le rabattement du niveau d'eau. Cette sous-estimation systématique des volumes lâchés est probablement moins prononcée pour les retenues collinaires car les lâchers, survenant le même jour que les apports, ont pu être quantifiés par l'observation des enregistrements continus de la cote.

La présence d'apports pendant les périodes de pompage est beaucoup plus rare : pour 89% des épisodes de pompage identifiés, les apports de la veille du début de la période de pompage sont nuls. Le cumul journalier maximal de pluie enregistrée pendant les 2686 jours de pompage est de 11 mm et 94% de ces jours présentent une pluviométrie inférieure à 1 mm/j. Les apports sont donc très faibles pendant les épisodes de prélèvement. Ce résultat est logique : l'irrigation a surtout lieu pendant les périodes sèches lorsque les cultures sont en déficit hydrique.

3.3.4. Résultats

Les tableaux 18 et 19 présentent les cumuls annuels des volumes prélevés et lâchés respectivement, avec les incertitudes correspondantes. A l'exception des retenues de Jedeliane et d'El Haouareb, les volumes prélevés sont très faibles (0,01 Mm³/an en moyenne) et varient peu d'une retenue à l'autre (CV = 69%). L'incertitude relative sur les volumes prélevés est très élevée, le plus souvent supérieure à 50% et égale en moyenne à 70%. Elle résulte du cumul des incertitudes sur l'évaporation, l'infiltration, la variation de la cote et la surface du plan d'eau. Elle est d'autant plus forte que les prélèvements sont faibles et la surface de la retenue est grande. Pour chaque retenue, la corrélation entre les volumes pompés annuellement et le cumul pluviométrique annuel est faible ($R^2 < 0.2$). Le pas de temps annuel et l'incertitude sur les estimations ne permettent pas d'appréhender les fluctuations saisonnières de la pluviométrie qui sont certainement déterminantes dans

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

l'ajustement des calendriers d'irrigation aux besoins des cultures. Les valeurs des volumes prélevés calculés dans cette partie seront confrontés aux résultats des simulations (§ 3.5) pour évaluer le taux d'exploitation des retenues collinaires et voir si ces dernières pourraient être davantage exploitées pour l'irrigation des cultures sans que les retenues présentent de risque de défaillance (demande en eau non assurée). Les volumes lâchés annuellement sont du même ordre de grandeur que les volumes prélevés (moyenne de 13 225 m³/an pour l'ensemble des retenues collinaires). En revanche, la variabilité interannuelle des volumes lâchés est largement supérieure à celle des volumes prélevés (CV = 175% en moyenne pour les retenues collinaires). Pour comprendre la différence très marquée entre l'incertitude sur les valeurs des volumes lâchés (3,7% en moyenne) et des volumes prélevés, il faut observer les volumes journaliers des déstockages volontaires. L'incertitude sur leur calcul provenant essentiellement des flux de déstockage naturel (évaporation et infiltration), elle est d'autant plus faible que les volumes déstockés volontairement leur sont supérieurs. Les valeurs des volumes lâchés calculés dans cette partie seront utilisées en partie 5.2 pour évaluer l'impact des aménagements de CES sur le volume de la ressource en eau disponible dans le bassin versant du Merguellil.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

Tableau 18. Volumes (Vol) prélevés dans les retenues collinaires et le barrage El Houareb [Mm³/an]. Inc : incertitude sur les calculs [%].

Mes : valeurs fournies par les gestionnaires du barrage El Houareb.

	Abdessadok		Brahim Zaher		El Gouazine		El Moudihi		Fidh Ali		F. B. Naceur		Janet		Jedeliane		Hadada		Mora		M'Richet		Saadine 2		El Houareb		
	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Mes
1989-90																										4.719	71
1990-91																										1.512	96
1991-92																										0.848	100
1992-93																										0.795	92
1993-94									0.003	79																4.447	58
1994-95									0.018	57	0.008	69											0.011	93	3.130	78	2.142
1995-96	0.004	98	0.015	53	0.020	85	0.017	94	0.024	64	0.010	57	0.062	25	0.107	63	0.006	76			0.006	97	0.004	45	2.413	90	0.700
1996-97	0.004	95	0.006	47	0.014	97	0.004	82	0.004	77	0.001	74	0.025	25	0.175	46	0.010	96	0.027	100	0.010	90	0.005	24	2.349	84	2.588
1997-98	0.006	72	0.014	71	0.011	67	0.008	84	0.008	75	0.007	71	0.020	64	0.180	33	0.006	67	0.029	99	0.004	92	0.000	84	3.744	79	3.231
1998-99	0.009	64	0.010	61	0.015	98	0.007	84	0.007	88	0.005	59	0.022	41	0.116	39	0.012	69	0.024	100	0.006	84	0.000	53	1.759	68	2.361
1999-00	0.007	82			0.006	80			0.004	78	0.001	66	0.009	96	0.198	22	0.012	77	0.034	100	0.001	85			1.983	72	0.920
2000-01					0.011	87			0.005	68	0.002	40	0.014	69	0.135	17	0.009	87			0.010	83			1.815	64	1.065
2001-02					0.013	49							0.006	100	0.200	10	0.012	44			0.005	70			4.076	57	2.200
2002-03												0.004	67					0.007	34						6.675	64	5.401
2003-04																									4.909	66	4.600
2004-05																									5.123	82	5.242
Moyenne	0.006	79	0.011	60	0.013	81	0.009	88	0.009	68	0.005	62	0.020	44	0.159	30	0.009	69	0.029	100	0.006	86	0.004	67	3.144	72	2.768
Ecart type	0.002		0.004		0.004		0.006		0.008		0.004		0.018		0.039		0.003		0.004		0.003		0.004		1.723		1.677
CV	34%		37%		35%		64%		83%		78%		90%		24%		27%		14%		55%		108%		55%		61%

Tableau 19. Volumes (Vol) lâchés depuis les retenues collinaires et le barrage El Houareb [Mm³/an]. Inc. : incertitude sur les calculs [%].

Mesures : valeurs fournies par les gestionnaires du barrage El Houareb.

	Abdessadok		Brahim Zaher		El Gouazine		El Moudihi		Fidh Ali		F.B. Naceur		Janet		Jedeliane		Hadada		Mora		M'Richet		Saadine 2		El Houareb			
	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Vol	Inc	Mesures	
1989-90																										0.000	0	0.000
1990-91																										1.330	9	0.000
1991-92																										0.000	0	0.004
1992-93																										7.118	18	8.151
1993-94									0.000	0															0.064	86	0.086	
1994-95									0.000	0	0.013	1											0.000	0	0.000	0	1.145	
1995-96	0.041	2	0.014	2	0.083	3	0.048	4	0.053	1	0.000	0	0.052	2	0.000	0	0.082	1			0.000	0	0.000	0	0.619	31	2.783	
1996-97	0.000	0	0.000	0	0.001	22	0.001	8	0.013	0	0.000	0	0.044	1	0.000	0	0.012	2	0.006	32	0.000	17	0.002	4	0.000	0	0.011	
1997-98	0.001	11	0.016	2	0.018	0	0.002	8	0.000	0	0.001	3	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.021	10	0.001	5	0.000	0	0.000	0	0.057	
1998-99	0.001	3	0.008	3	0.015	5	0.003	7	0.000	0	0.000	0	0.003	2	0.000	0	0.001	4	0.051	24	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.023	
1999-00	0.016	3			0.000	0			0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.022	1	0.002	44	0.000	0			0.000	0	0.004	
2000-01					0.005	8			0.000	0	0.001	2	0.000	0	0.000	0	0.027	1			0.002	14			0.165	35	0.000	
2001-02					0.003	5							0.000	0	0.044	1	0.025	1			0.000	0			0.000	0	0.021	
2002-03													0.000	0			0.277	0							0.084	41	0.043	
2003-04																									0.385	34	0.022	
2004-05																									0.344	41	0.156	
Moyenne	0.012	3	0.010	2	0.018	4	0.013	5	0.008	1	0.002	1	0.012	1	0.006	1	0.056	1	0.020	21	0.001	12	0.000	4	0.632	20	0.782	
Ecart type	0.018		0.007		0.030		0.023		0.019		0.005		0.022		0.017		0.093		0.022		0.001		0.001		1.765		2.094	
CV	148%		75%		165%		171%		227%		221%		178%		265%		166%		111%		155%		224%		279%		268%	

3.4. Les apports

Dans cette partie, les apports aux retenues collinaires et au barrage d'El Haouareb sont estimés avec deux objectifs principaux : déterminer à l'aide d'un modèle pluie-débit la fiabilité des retenues collinaires à pourvoir une ressource en eau pour l'irrigation (§ 3.5) ; caractériser l'impact des aménagements de CES sur la redistribution de la ressource en eau dans le bassin versant du Merguellil (§ 5.2).

La période de suivi hydrologique des retenues collinaires comporte au maximum huit années d'observation. La variabilité interannuelle de leur remplissage sur cette période ne peut donc être représentative sur le long terme du fait de l'extrême variabilité interannuelle de la pluviométrie (cf. figure 9). Pour cette raison, une modélisation de la relation pluie-débit au pas de temps journalier est proposée. Elle doit permettre d'estimer les apports journaliers sur des périodes de plusieurs décennies à partir des longues chroniques de pluies journalières disponibles pour la région. La modélisation de la relation pluie-débit au pas de temps journalier n'est envisageable que dans la mesure où la relation entre les lames précipitées et ruisselées est correctement restituée à ce pas de temps.

Cette partie se subdivise en trois sections. Les sections 3.4.1 et 3.4.2 analysent respectivement la variabilité temporelle des événements pluvieux et des crues et observent dans quelles mesures elle est restituée par des cumuls journaliers. La section 3.4.3 teste deux modèles pluie-débit journaliers globaux conceptuels sur les bassins versants des retenues collinaires et identifie le plus performant, utilisé par la suite pour simuler la dynamique de stockage/déstockage des retenues (partie 3.5).

Sur les douze retenues collinaires instrumentées dans la région (tableau 3), seules neuf sont étudiées. Les retenues de Saadine 2 et de Janet sont presque totalement comblées dès septembre 95 et octobre 97 respectivement (figure 29 et tableau 9) et déversent quasi systématiquement à chaque crue dès la troisième année après leur mise en service. Leur seuil, endommagé par les crues successives, ne permet pas de mesurer précisément les volumes déversés (Boufaroua et al., 2000). Il n'est donc pas possible d'estimer les apports à ces deux retenues. Le bassin versant de la retenue collinaire de Jedeliane s'étend sur 47 km², superficie plus de 10 fois supérieure à la moyenne des autres retenues collinaires (4,3 km²). Il est donc probable que cette retenue ait un comportement hydrologique différent des autres lui conférant un caractère peu représentatif des retenues collinaires du bassin

versant du Merguellil. Par conséquent, cette retenue collinaire n'est pas étudiée dans cette partie.

3.4.1. Caractéristiques de la pluie

Les dates, durées et cumuls pluviométriques de chaque averse sont extraits des enregistrements continus issus des pluviographes à augets basculeurs disposés sur la digue de chaque retenue collinaire. Une averse est définie comme un épisode totalisant au moins 3 mm de pluie avec une intensité minimale de 5 mm/heure. Ces critères sont choisis de manière à inclure l'ensemble des lames précipitées dans les averses, tout en excluant les plus faibles événements dont la majorité est due au dysfonctionnement de l'appareil de mesure. Deux averses successives sont séparées par une période d'au moins une heure au cours de laquelle les deux conditions précédentes ne sont pas satisfaites. Cet intervalle de temps est choisi en fonction des temps de concentration des bassins versants des retenues collinaires de la région, le plus souvent infra-horaires. Il doit donc permettre de distinguer les averses produisant des crues distinctes (écoulement de base atteint entre les deux crues). Le tableau 20 présente des paramètres climatiques caractérisant la distribution fréquentielle de la durée des averses. Celles-ci durent 32 minutes en moyenne et n'excèdent jamais 4 heures 47 (averse enregistrée le 16 janvier 1999 à Hadada). Leurs durées varient peu entre les différentes stations : les coefficients de variations inter - retenues collinaires des valeurs correspondant aux médiane, troisième quartile et maximum sont respectivement égaux à 13,0%, 12,5% et 15,1%.

Tableau 20. Nombre et durée des averses enregistrées par les pluviographes des retenues collinaires sur la totalité des chroniques de mesure.

Retenue collinaire	Nb averses	Période de mesure [an]	Durée des averses [min]		
			Médiane	Quartile 75%	Max
Abdessadok	128	7.0	37	71	174
Brahim Zaher	69	5.2	37	63	221
El Gouazine	164	9.2	27	54	243
El Moudhi	106	6.9	25	55	208
Fidh Ali	128	8.5	32	53	235
Fidh Ben Naceur	118	7.4	33	57	184
Hadada	155	10.0	34	60	287
Mora	75	4.4	26	56	219
M'Richet	140	7.6	31	55	177

Le tableau 21 présente des indicateurs sur la durée séparant deux averses successives totalisant au minimum 5 ou 10 mm. 93% des averses générant du ruissellement (i.e. cumul pluviométrique ≥ 10 mm, cf. figure 52) sont séparées par une période d'au moins 24 h.

Tableau 21. Averses cumulant au moins 5 ou 10 mm : nombre d'averses enregistrées et durée des périodes séparant deux averses successives.

	Nb averses		Durée entre deux évènements successifs			
	>5 mm	>10 mm	Mediane (jours)		Durée < 1 jour	
Retenue collinaire	>5 mm	>10 mm	>5 mm	>10 mm	>5 mm	>10 mm
Abdessadok	83	36	8	37	19.3%	8.3%
Brahim Zaher	40	20	13	43	17.5%	15.0%
El Gouazine	89	46	12	33	20.2%	15.2%
El Moudhi	68	27	11	36	14.7%	0.0%
Fidh Ali	71	29	14	51	15.5%	3.4%
Fidh Ben Naceur	67	26	9	61	9.3%	7.7%
Hadada	103	39	16	71	12.6%	0.0%
Mora	49	17	14	24	14.3%	5.9%
M'Richet	75	28	10	64	9.3%	3.6%

Cette analyse montre que les cumuls journaliers²⁵ des pluies générant du ruissellement correspondent dans 93% des cas au cumul pluviométrique d'une seule averse. Sachant que seul 0,3% des averses recensées se produisent à 8h00 du matin²⁵ (début avant 8h00 et fin après 8h00) et que toutes les averses durent moins de 5 heures (tableau 20), les chroniques de pluies journalières qui seront utilisées dans la modélisation pluie-débit (§ 3.4.3) correspondent dans 93% des cas à des chroniques de cumuls évènementiels et restituent par conséquent la variabilité temporelle des évènements.

3.4.2. Estimation des apports

L'absence de seuil jaugé à l'embouchure de l'oued dans les retenues contraint à estimer les apports à partir du bilan hydrique des retenues.

i. Méthode

Les apports sont calculés à l'aide de l'équation 12. Ne disposant pas de mesures ioniques ou isotopiques de l'eau stockée dans les retenues, les termes A_r et A_s de l'équation 12 ne sont pas discernables.

²⁵ Les cumuls journaliers des pluies issues des pluviographes sont réinitialisés à 8h00 du matin pour s'accorder aux mesures des pluviomètres relevées quotidiennement et théoriquement à cette même heure.

$$\text{équation 12. } Ar + As = \Delta V + (E_{RET} + I_f - PI) \times S + Po + D + L$$

Ar : ruissellement entrant [$m^3 \cdot \Delta t^{-1}$],

As : apports souterrains [$m^3 \cdot \Delta t^{-1}$],

ΔV : variation du volume de la retenue [$m^3 \cdot \Delta t^{-1}$],

E_{RET} : évaporation de la retenue [$m \cdot \Delta t^{-1}$],

I_f : infiltration de la retenue [$m \cdot \Delta t^{-1}$],

PI : pluie du jour [$m \cdot \Delta t^{-1}$],

S : surface moyenne de la retenue pendant la période Δt [m^2],

Po : pompage [$m^3 \cdot \Delta t^{-1}$],

D : déversements [$m^3 \cdot \Delta t^{-1}$],

L : lâchers [$m^3 \cdot \Delta t^{-1}$].

Deux méthodes sont utilisées pour déterminer le volume des apports :

- sur les périodes présentant une hausse sensible de la cote, l'équation 12 est appliquée sur un intervalle de temps déterminé à partir de l'observation des enregistrements continus des variations de la cote : cet intervalle débute lorsque la première valeur supérieure à la précédente est enregistrée et s'achève lorsque la cote se stabilise. Ces intervalles étant la plupart du temps bien inférieurs à la journée, les volumes des flux de déstockage non volontaires (infiltration et évaporation) sont négligés. Les lâchers qui ont généralement lieu en période de crue pour protéger le déversoir de la retenue d'un débordement éventuel sont le plus souvent repérables par les baisses brutales du niveau d'eau qui surviennent dans 95% des cas après la fin de la crue. Pour les 5% de lâchers restants, celui-ci a lieu pendant la crue. Dans ce cas, le volume de la crue (moins de 1% des crues) et le volume du lâcher ne peuvent pas être calculés. Ces crues ne seront pas prises en compte dans la modélisation pluie-débit. Les prélèvements survenant en période de crue sont absolument indétectables : les variations de cote qu'ils induisent sont négligeables devant les hausses provoquées par les crues. Heureusement, ils sont très probablement inexistantes pour deux raisons principales : i/ en période de crue, les pompes sont éloignées des berges pour éviter leur submersion éventuelle. Elles ne peuvent donc fonctionner. ii/ Les agriculteurs n'irriguent généralement pas quand il pleut. D est mesuré à l'aide d'une courbe de tarage établie pour chaque retenue collinaire en fonction de la géométrie du seuil du déversoir. Le zéro de la courbe de tarage correspond à la cote de ce seuil²⁶. Les apports

²⁶ Aucun déversement n'a été relevé sur les retenues de Fidh Ali, Mora et El Haouareb, depuis leur mise en eau.

journaliers sont reconstitués en sommant les apports obtenus pour chaque épisode de hausse de cote survenu le même jour.

- sur les périodes enregistrant une baisse de la cote, l'équation 12 est appliquée au pas de temps journalier. Lorsque le terme de droite de l'équation 12 est négatif, il n'y a pas d'apport. Dans le cas contraire, il s'agit de faibles écoulements insuffisants pour compenser les pertes.

ii. Estimation des incertitudes sur les apports

Les apports ne peuvent être précisément déterminés du fait de l'imprécision sur les valeurs de ΔV , E_{RET} , I_f , PI , S , D^{27} et L . Pour tenir compte de cette imprécision, deux estimateurs sont choisis pour encadrer la valeur réelle des apports : $(Ar + As)_{MAX}$ et $(Ar + As)_{MIN}$. Leurs valeurs se calculent à partir de l'équation 12 :

$$(Ar + As)_{MAX} = [\Delta V_{MAX} + (E_{RET MAX} + I_{f MAX} - PI) \times S_{MAX} + D_{MAX} + L_{MAX}]$$

$$(Ar + As)_{MIN} = [\Delta V_{MIN} + (E_{RET MIN} + I_{f MIN} - PI) \times S_{MIN} + D_{MIN} + L_{MIN}]$$

La différence entre ΔV_{MIN} et ΔV_{MAX} est due à l'imprécision sur la courbe d'étalonnage (cf. figure 31). Elle ne tient pas compte de l'erreur induite par l'obsolescence des courbes d'étalonnage, non calculable pour les retenues collinaires qui ne disposent tout au plus que de trois étalonnements, ne permettant pas d'estimer précisément l'évolution temporelle de la géométrie de la retenue sous l'effet de l'envasement. L'impact de cette erreur sur la qualité de l'ajustement des modèles pluie-débit sera discuté par la suite. Les termes $E_{RET MAX}$ et $E_{RET MIN}$ sont calculés à partir de l'estimation de l'incertitude sur E_{RET} , déterminée dans la partie 3.1.3.ii. Les termes $I_{f MAX}$ et $I_{f MIN}$ sont calculés à partir de l'estimation de l'incertitude sur I_f , déterminées dans la partie 3.2.2.iv.

Les apports moyens journaliers sont assimilés à $[(Ar+As)_{MIN}+(Ar+As)_{MAX}]/2$ et l'incertitude relative sur les apports (I_{AP}) est calculée de la manière suivante :

$$I_{AP} = [(Ar + As)_{MAX} - (Ar + As)_{MIN}] / [(Ar + As)_{MAX} + (Ar + As)_{MIN}].$$

La valeur de I_{AP} dépend principalement de deux facteurs : le volume de l'apport et la hauteur d'eau dans la retenue juste avant l'apport. L'action du premier facteur est simple :

²⁷ L'incertitude sur D est estimée de la même manière que l'incertitude sur les courbes d'étalonnages hauteur-surface et hauteur-volume (cf. partie 3.1.3.iv).

plus le volume de l'apport est important et plus la variation de la cote induite par cet apport est élevée, les flux de déstockage devenant alors négligeables et sans influence sur la précision des calculs. L'action du second facteur est moins évidente : nous venons de voir que I_{AP} décroît lorsque la variation du niveau d'eau induite par l'apport croît. Pour un même apport, I_{AP} devrait donc être d'autant plus faible que la surface initiale du miroir de la retenue est petite donc que la retenue est peu remplie. Cependant, les incertitudes sur les courbes d'étalonnage hauteur-volume et hauteur-surface, nécessaires au calcul de $Ar + As$ sont extrêmement élevées sur les 50 premiers centimètres et décroissent hyperboliquement lorsque la cote augmente (figure 31). La saison peut également avoir une influence sur la valeur de I_{AP} , lorsque la variation de cote induite par l'apport est faible, via l'incertitude sur l'évaporation qui est plus élevée en saison chaude. Il serait très fastidieux de quantifier l'importance relative de chacun de ces facteurs sur I_{AP} car celle-ci est corrélée à chacun des trois facteurs or le but n'est pas de déterminer les facteurs à l'origine de la variabilité de I_{AP} mais simplement de la quantifier.

La figure 48 montre que l'incertitude sur les calculs de $(Ar+As)$ est plus importante pour les faibles apports ($<1000 \text{ m}^3/\text{j}$). L'allure générale du graphique indique que I_{AP} a tendance à diminuer lorsque le volume des apports augmente, conformément aux remarques énoncées ci-dessus. Des comportements similaires ont été observés sur les huit autres retenues collinaires et sur le barrage El Haouareb (non représentées ici).

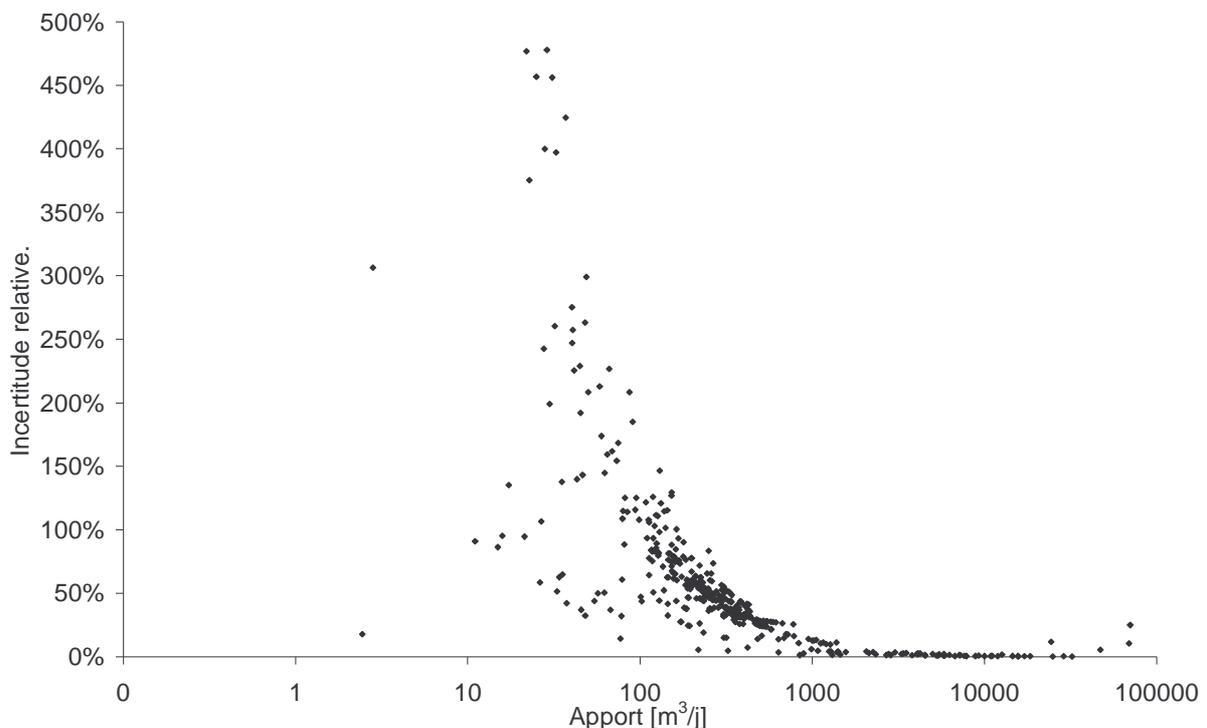


Figure 48. Incertitude sur les apports journaliers (retenue collinaire de Brahim Zaher).

L'incertitude élevée sur les faibles apports s'explique par l'accumulation des incertitudes sur les mesures de cote, d'évaporation et sur les calculs d'infiltration ayant pour conséquence possible l'obtention de valeurs positives pour $(Ar+As)_{MAX}$ les jours sans apport. Les mesures pluviométriques sont utilisées pour identifier ces « faux » apports. Les valeurs non nulles d'apports après une période sans écoulement ni pluie sont considérées comme fausses et sont égalées à zéro. Environ 10% des apports journaliers calculés initialement sont éliminés avec cette méthode. Cette règle ne peut s'appliquer au barrage d'El Haouareb car son bassin versant est beaucoup plus grand que celui des retenues collinaires et il existe des sources dans le lit de l'oued Merguellil au niveau de Haffouz, maintenant un débit de base pendant la saison humide (Kingumbi, 2006).

Sur la période de mesures sept. 95 – août 99 commune à l'ensemble des retenues collinaires étudiées, le calcul des apports journaliers indique que l'oued qui draine le bassin versant des retenues collinaires est sec plus de 75% des jours de l'année. 81% du volume des écoulements annuels sont concentrés sur dix jours. L'incertitude sur ces volumes de crue est de 1% en moyenne alors qu'elle atteint 40% pour les volumes restants correspondants aux écoulements retardés. Ces proportions sont identiques pour le barrage d'El Haouareb.

Il demeure une incertitude non quantifiable et probablement importante sur les apports. Elle peut avoir deux origines : i/ la présence de lâchers de barrages non détectables qui, lorsqu'ils ont lieu en même temps que l'apport, conduisent à leur sous-estimation ; ii/ l'utilisation de courbes d'étalonnage obsolètes conduisant à la surestimation des apports (cf. § 3.1.3.iv).

iii. Variabilité temporelle des apports

Écoulements et déversements annuels

Le tableau 22 présente les cumuls annuels des écoulements collectés par les retenues et la proportion de ces volumes à avoir déversé. La proportion des volumes déversés varie considérablement entre les différentes retenues (de 0% à Fidh Ali, Mora, El Haouareb à 22% à Hadada, en moyenne interannuelle) et d'une année sur l'autre.

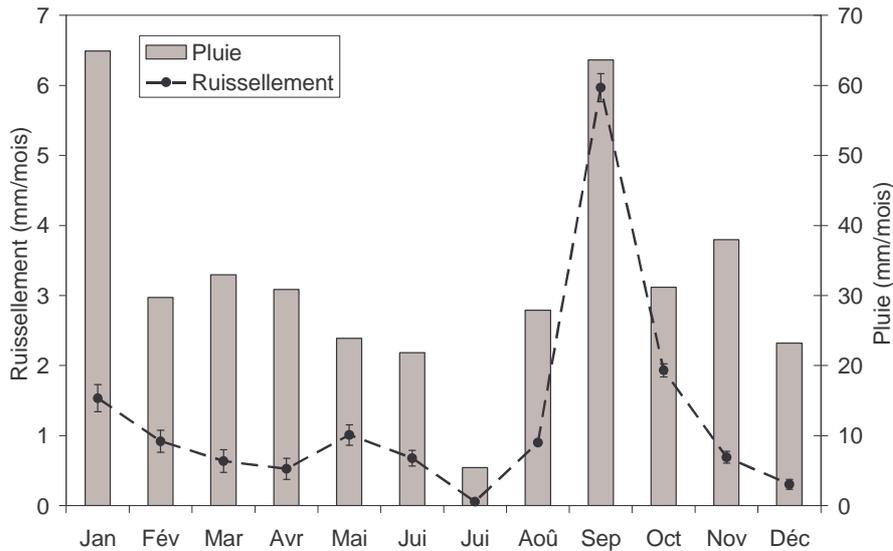


Figure 49. Hydrogrammes et hyétogrammes moyens pour les bassins versants des 9 retenues collinaires calculés sur la période sept. 95 – août 99.

La figure 49 montre deux pics de ruissellement en septembre et janvier, suivis chacun d'une réduction progressive des écoulements, avec une légère reprise au mois de mai, due à des évènements pluvieux particulièrement exceptionnels pour ce mois (pluie > 30 mm/j) survenus, suivant les retenues, entre le 10 et le 12 mai 1996 et le 25 mai 1999. La figure 50 présente les coefficients de ruissellement moyens mensuels des bassins versants des retenues collinaires sur la période sept. 95 – août 99.

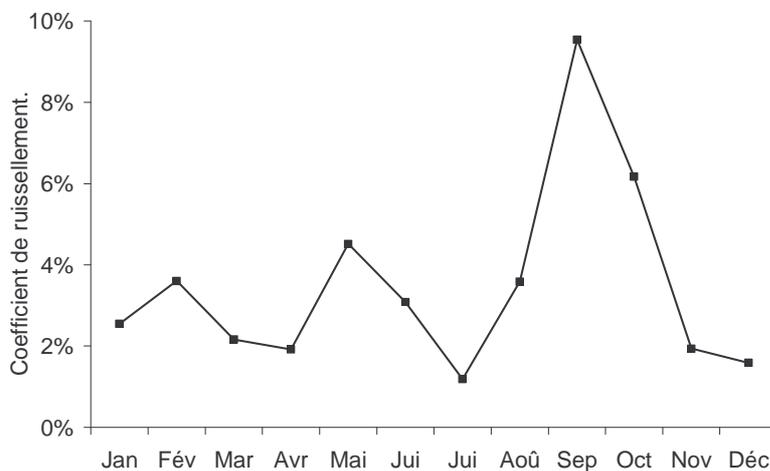


Figure 50. Coefficients de ruissellement moyens mensuels sur les bassins versants des 9 retenues collinaires sur la période sept. 95 – août 99.

Le mois de septembre se distingue des autres mois de l'année par son coefficient de ruissellement particulièrement élevé (9,5%) alors qu'il avoisine 3,0% le reste de l'année. La comparaison des mois de janvier et de septembre illustre cette particularité : le mois de janvier, avec une pluviométrie quasiment égale à celle du mois de septembre (différence de

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

3,8%, cf. figure 49), présente un écoulement équivalent à 25,7% des écoulements du mois de septembre. Cette comparaison indique que les processus contrôlant la relation pluie-débit doivent s'appréhender à un pas de temps plus fin que le mois.

Durée et fréquence des crues

La durée de chaque apport aux retenues collinaires est déterminée à partir des enregistrements continus des variations de la cote du plan d'eau. Un apport débute avec la première valeur de cote supérieure à la précédente dans la chronique des données et s'achève lorsque la cote se stabilise. La figure 51 présente la distribution fréquentielle de la durée des apports pour chaque retenue collinaire étudiée.

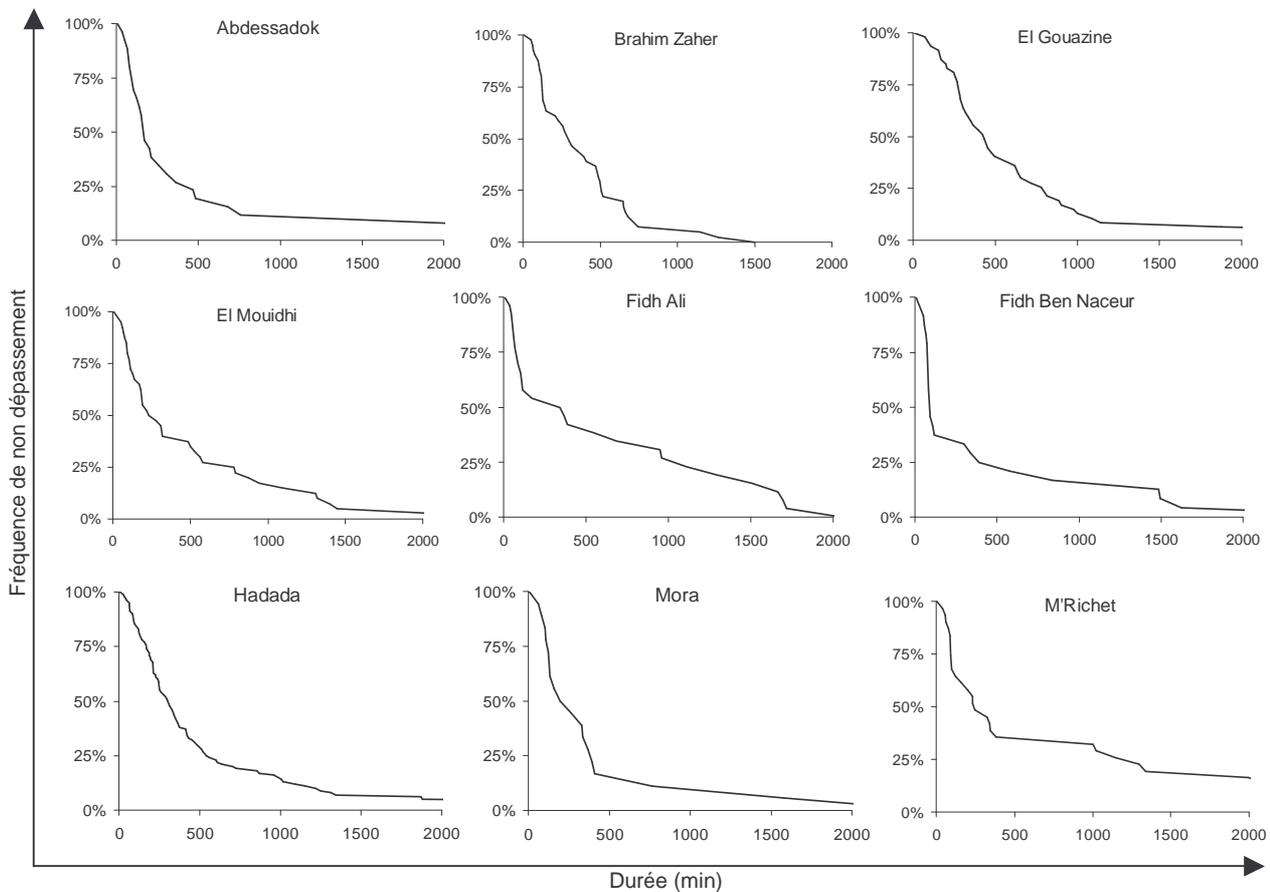


Figure 51. Distribution fréquentielle de la durée des apports aux retenues collinaires.

Les valeurs médianes de la durée des apports varient entre 1 h 30 (Fidh Ben Naceur) et 5 h 49 (Fidh Ali). 90% des crues ont une durée inférieure à 24 h. L'absence de corrélation entre ces valeurs et la taille des bassins versants ($R^2 = 29\%$) révèle la forte hétérogénéité de leur comportement hydrologique et justifie notre démarche consistant à travailler sur un échantillon de plusieurs retenues collinaires jugées représentatives des aménagements du bassin versant du Merguellil (cf. § 3.1.1). Le tableau 23 présente le nombre de crues

mesurées à chaque retenue collinaire et l'intervalle de temps médian séparant deux crues successives.

Tableau 23. Fréquence des crues. « Nb crues » : nombre total de crues observées. « Durée < 1J (Nb et %) » : nombre et proportion des périodes entre deux crues successives inférieures à un jour. « Médiane » : durée médiane entre deux crues successives.

Retenues collinaires	Nb crues	Durée < 1 J		Médiane (Jours)	Période de mesure [an]
		Nb	%		
Abdessadok	25	1	4	21	5
Brahim Zaher	40	4	10	10	4
El Gouazine	47	6	13	11	7
El Moudhi	39	4	10	15	5
Fidh Ali	25	2	8	23	9
F.B. Naceur	23	2	9	12	5
Hadada	99	13	13	12	8
Mora	17	3	18	8	4
M'Richet	30	2	7	19	7

Le tableau 23 indique que dans plus de 90% des cas, deux crues successives sont séparées par une période supérieure à 24 heures. Compte tenu de la durée des évènements (cf. figure 51), les cumuls journaliers²⁸ des apports correspondent dans au moins 80% des cas au module d'une et d'une seule crue. A l'exception des cas pour lesquels la crue débute avant 8h00 du matin et se termine après (situation discutée dans la partie 3.4.3.i), les chroniques journalières d'apports correspondent aux chroniques des cumuls des crues. Le pas de temps journalier choisi pour la modélisation de la relation pluie-débit sur les bassins versants des retenues collinaires permet donc, pour plus de 90% des évènements, de restituer le cumul ruisselé de chaque crue.

3.4.3. Relation pluie-débit sur les bassins versants des retenues collinaires

L'analyse de la variabilité temporelle des pluies et des apports aux retenues collinaires (§ 3.4.1 et § 3.4.2) a montré que les cumuls journaliers des pluies et des débits correspondent dans plus de 90% des cas aux cumuls des évènements pluie-débit. Une modélisation de la relation pluie-débit au pas de temps journalier est donc envisageable.

i. Calcul des lames précipitées et ruisselées

La modélisation de la relation pluie-débit étant effectuée au pas de temps journalier, il est nécessaire de reconstituer les chroniques journalières de pluies et de ruissellements à partir des enregistrements continus. Les cumuls journaliers sont initialisés à 8h00 du matin

²⁸ Les cumuls journaliers des apports sont réinitialisés à 8h00 pour s'accorder à ceux des pluies (cf. note 25).

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

(cf. note 25). L'analyse de la variabilité temporelle des évènements pluvieux et des épisodes de crue a montré que les cumuls hydro-pluviométriques journaliers correspondant dans plus de 90% des cas aux cumuls évènementiels. La représentation de la relation pluie-débit au pas de temps journalier restitue donc la variabilité inter-évènementielle et la correspondance entre les lames précipitées et ruisselées de chaque évènement. Les temps de concentration des bassins versants des retenues collinaires étant infra-horaires, les évènements pluvieux et les crues qu'ils génèrent ont généralement lieu le même jour. Lorsqu'une averse générant du ruissellement a lieu peu de temps avant 8h00, il se peut que la lame précipitée soit attribuée au jour J et la lame ruisselée correspondante au jour J+1. Il est également possible que les cumuls de pluies et/ou de débit soient répartis chacun sur deux jours successifs. Dans ce cas, si la durée totale de l'évènement (intervalle de temps entre le début de l'averse et la fin de la crue) est inférieure à 24 h, celui-ci est translaté jusqu'à +/- 12 h de manière à ce qu'il s'inscrive intégralement dans une même journée, ceci afin de préserver au mieux l'égalité entre cumuls évènementiels et cumuls journaliers. La figure 52 représente les cumuls journaliers des lames ruisselées sur les bassins versants des 9 retenues collinaires étudiées en fonction des cumuls journaliers des lames précipitées.

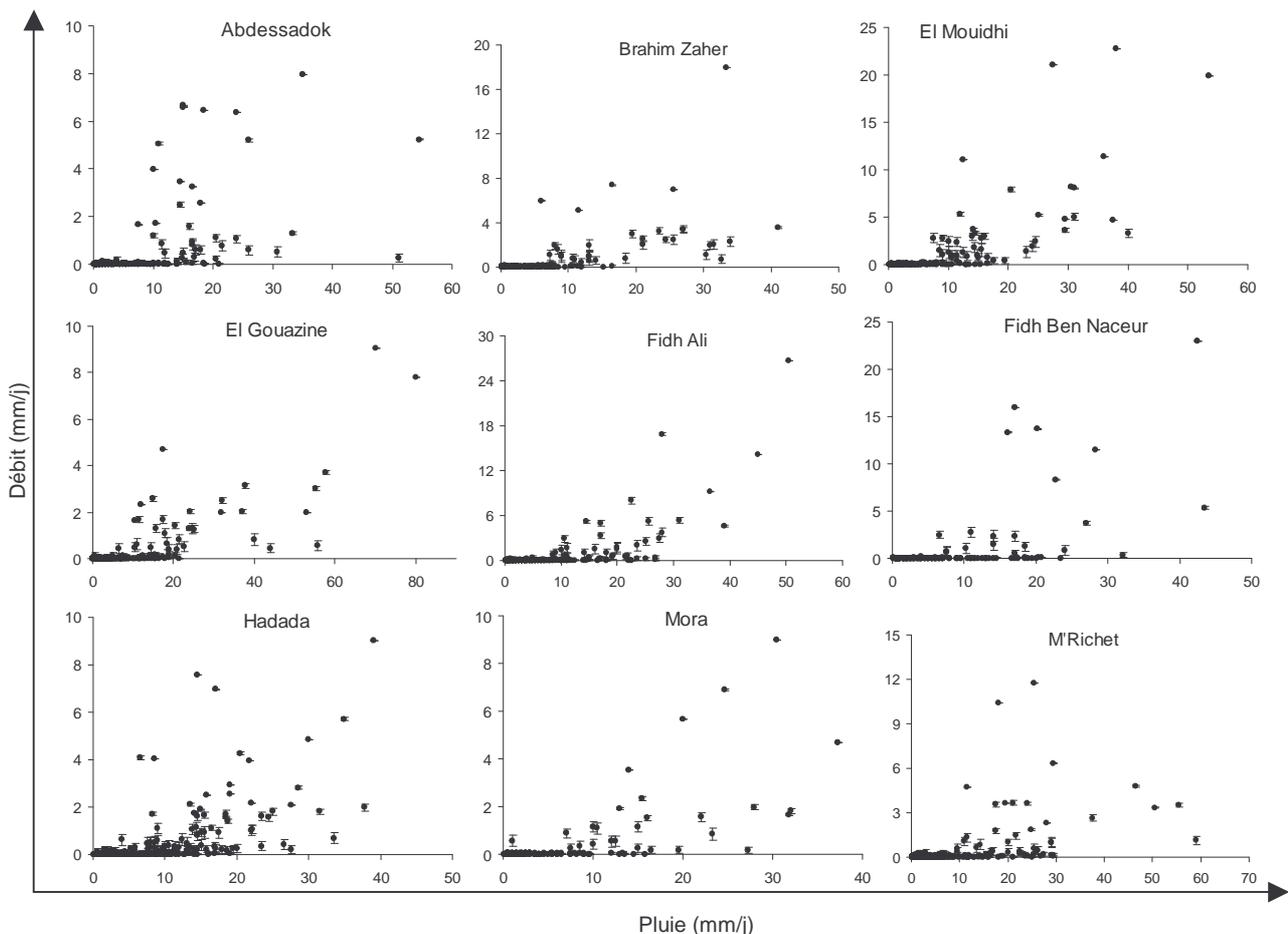


Figure 52. Relation entre lames journalières précipitées et ruisselées sur les bassins versants des retenues collinaires étudiées.

Les ruissellements sont quasi-inexistants en deçà d'un seuil variant entre 5 et 10 mm/j de pluie en fonction des retenues collinaires. Ce seuil correspond à la pluie d'imbibition. Dridi (2000) avait obtenu des valeurs de pluie d'imbibition comprises entre 1 et 38 mm et une moyenne de 9 mm avec un simulateur de pluie à arrosage manuel sur un réseau de 27 parcelles de 1 m² réparties dans le bassin versant du Merguellil. La plus grande hétérogénéité des valeurs obtenues par Dridi s'explique certainement par les différences d'échelle entre son étude et la nôtre. Il est probable que la variabilité spatiale des états de surface soit beaucoup plus marquée à l'échelle du mètre carré et tende à s'estomper à l'échelle du petit bassin versant. Au-delà du seuil de la pluie d'imbibition, la gamme des lames ruisselées pour une même lame précipitée est très large et il est le plus souvent difficile d'identifier une relation croissante entre précipitation et ruissellement. Cette relation est tout de même visible pour les retenues collinaires d'El Moudhi, de Fidh Ali et de Mora.

Deux modélisations de la relation pluie-débit sont proposées : une modélisation linéaire à deux paramètres et un modèle global conceptuel à réservoir avec 4 paramètres permettant de prendre en compte l'humidité initiale du sol dans la production du ruissellement. Pour les deux modèles, les périodes de calage et de vérification sont définies de manière à diviser la chronique de données en deux périodes comportant le même nombre d'évènements. Les modèles sont ajustés par optimisation du critère de Nash-Sutcliffe (1970) appliqué aux débits observés et calculés sur la période de calage. Le débit moyen utilisé comme modèle de référence au dénominateur du critère est calculé sur l'ensemble de la période (calage+vérification) du fait du faible nombre d'évènements. Si le critère de Nash-Sutcliffe dépasse 50% en phases de calage et en phase de vérification, une contrainte sur le rendement du modèle est ajoutée : le rapport de la somme des débits calculés sur la somme des débits observés doit s'inscrire dans l'intervalle $100 \pm 5\%$. Cette contrainte est imposée dans une perspective de gestion de la ressource en eau : les simulations effectuées à l'aide du modèle doivent privilégier une restitution correcte des écoulements annuels dans la retenue, au détriment éventuel de la précision de l'estimation des apports de chaque évènement pluvieux.

ii. Modélisation linéaire

Le modèle linéaire à deux paramètres (A et B) s'écrit : Ruissellement [mm/j] = A × (Pluie [mm/j] – B) lorsque Pluie > B et Ruissellement = 0 lorsque Pluie ≤ B. Si le modèle s'ajuste parfaitement aux observations, le paramètre B [mm/j] est assimilable à la pluie d'imbibition et le paramètre A [adimensionné] est assimilable au coefficient de ruissellement moyen des pluies provoquant un ruissellement. Le tableau 24 présente les résultats d'ajustement du modèle linéaire aux bassins versants des 9 retenues collinaires.

Tableau 24. Ajustement du modèle linéaire sur les 9 bassins versants étudiés. Nb éven. : nombre d'évènements pluie-débit. Nash : critère de Nash-Sutcliffe. Rdt = (somme des débits simulés)/(somme des débits observés).

Retenue collinaire	Calage				Vérification				Toute la période	
	Période	Nb éven.	Nash	Rdt	Période	Nb éven.	Nash	Rdt	Nash	Rdt
Abdessadok	13/12/95 - 23/04/98	171	36%	84%	24/04/98 - 01/09/00	171	16%	144%	31%	98%
Brahim Zaher	28/12/95 - 25/10/97	136	42%	97%	24/10/97 - 22/08/99	137	31%	92%	39%	95%
El Gouazine	24/12/95 - 14/02/98	162	48%	110%	15/02/98 - 07/04/00	170	36%	85%	42%	97%
El Moudhi	03/01/96 - 19/02/98	130	62%	82%	20/02/98 - 07/04/00	122	51%	139%	61%	96%
Fidh Ali	06/09/93 - 13/09/97	220	58%	85%	14/09/97 - 20/09/01	205	51%	139%	57%	102%
Fidh Ben Naceur	16/04/95 - 10/04/97	120	54%	59%	11/04/97 - 06/04/99	126	-23%	162%	38%	95%
Hadada	13/03/96 - 07/05/99	346	41%	82%	08/05/99 - 01/07/02	346	48%	92%	43%	85%
Mora	30/06/96 - 30/01/98	150	43%	95%	31/01/98 - 02/09/99	146	43%	70%	44%	79%
M'Richtet	04/04/96 - 11/06/99	257	29%	89%	12/06/99 - 18/08/02	256	64%	110%	36%	95%

iii. Modélisation globale conceptuelle GR4J

Le modèle global conceptuel GR4J (Perrin, 2000; Perrin et al., 2003) est choisi pour estimer les lames ruisselées journalières. Plusieurs raisons orientent ce choix : simple d'utilisation, il fonctionne au pas de temps journalier et nécessite en entrée les chroniques de pluie et d'ETP, supposées uniformes sur le bassin versant. L'ETP est obtenue à partir des moyennes interannuelles des mesures journalières de l'évaporation sur bac (E_{PAN}), abattues par un coefficient multiplicateur de 0,6 (cf. § 2.3.1.i). Le modèle GR4J comporte 4 paramètres : X_1 , la capacité du réservoir de production ; X_2 , le coefficient d'échange entre le bassin versant et l'extérieur ; X_3 , la capacité du réservoir de routage, et X_4 , le temps de base de l'hydrogramme unitaire. La robustesse de ce modèle a été démontrée sur 429 bassins versants avec des superficies variant entre 0,1 et 50 600 km², des pluviométries et des ETP moyennes annuelles comprises respectivement entre 300 et 2300 mm/an et entre 630 et 2040 mm/an (Perrin et al., 2001). Il a été testé sur plusieurs bassins versants semi-arides en Australie, dans le Sud des Etats-Unis et au Mexique (Perrin, 2000). Pour chacun des 9 bassins versants étudiés, les niveaux des réservoirs de production et de routage sont initialisés sur une période de 200 jours précédant la phase de calage. Le tableau 25 présente les résultats d'ajustement du modèle GR4J aux bassins versants des 9 retenues collinaires.

Tableau 25. Ajustement du modèle GR4J sur les 9 bassins versants étudiés. Légende : cf. tableau 24.

Retenue collinaire	Calage				Vérification				Toute la période	
	Période	Nb éven.	Nash	Rdt	Période	Nb éven.	Nash	Rdt	Nash	Rdt
Abdessadok	13/12/95 - 23/04/98	171	13%	56%	24/04/98 - 01/09/00	171	-452%	175%	-333%	122%
Brahim Zaher	28/12/95 - 25/10/97	136	58%	139%	24/10/97 - 22/08/99	137	36%	83%	42%	106%
El Gouazine	24/12/95 - 14/02/98	162	55%	105%	15/02/98 - 07/04/00	170	39%	90%	46%	101%
El Moudhi	03/01/96 - 19/02/98	130	63%	103%	20/02/98 - 07/04/00	122	61%	95%	62%	99%
Fidh Ali	06/09/93 - 13/09/97	220	79%	82%	14/09/97 - 20/09/01	205	65%	126%	76%	96%
Fidh Ben Naceur	16/04/95 - 10/04/97	120	26%	53%	11/04/97 - 06/04/99	126	18%	109%	23%	78%
Hadada	13/03/96 - 07/05/99	346	53%	140%	08/05/99 - 01/07/02	346	41%	112%	50%	121%
Mora	30/06/96 - 30/01/98	150	38%	130%	31/01/98 - 02/09/99	146	52%	134%	45%	132%
M'Richtet	04/04/96 - 11/06/99	257	63%	99%	12/06/99 - 18/08/02	256	70%	113%	61%	97%

iv. Interprétation des résultats

Les ajustements des deux modèles sont mauvais dans l'ensemble : l'obtention de valeurs du critère de Nash-Sutcliffe supérieures à 50% en phases de calage et de vérification ne concerne que deux bassins versants avec le modèle linéaire (Fidh Ali et El Moudhi) et trois bassins versants avec le modèle GR4J (Fidh Ali, El Moudhi et M'Richet). Les valeurs du critère de Nash sont 2%, 33% et 69% meilleures avec le modèle GR4J pour les bassins versants des retenues collinaires d'El Moudhi, Fidh Ali et M'Richet respectivement. Ce gain s'explique par l'augmentation du nombre de paramètres entre les deux modèles (4 pour le modèle GR4J et 3 pour le modèle linéaire) offrant une plus grande capacité d'ajustement aux variables d'entrée. La présence d'un réservoir sol dans le modèle GR4J permet notamment de prendre en compte l'humidité initiale du sol dans la production du ruissellement.

Quatre causes principales expliquent la médiocrité des ajustements obtenus avec les deux modèles :

- La qualité et la quantité des données disponibles : l'incertitude sur les volumes des crues observées due à la méconnaissance des autres termes du bilan hydrique (80% des écoulements annuels) est de l'ordre de 1%. Cette incertitude ne tient pas compte des éventuels lâchers de barrage survenant au cours d'une crue, non détectés par la lecture des variations de la cote du plan d'eau (cf. § 3.4.2.ii), et conduisant à une sous-estimation du volume de la crue. L'obsolescence des courbes d'étalonnages utilisées pour calculer les apports à partir des variations de cote est une autre source d'erreur dans l'estimation des apports (figure 32). Les retenues collinaires de Mora, d'Abdessadok et de Hadada par exemple ont été étalonnées pour la dernière fois en 1992, 1995 et 1996 respectivement, alors que les autres retenues collinaires ont été ré-étalonnées chaque année ou une fois tous les deux ans jusqu'à la fin de la période de simulation. Or l'utilisation d'une courbe d'étalonnage vieille de 5 ans peut conduire à une surestimation de la valeur réelle de l'apport largement supérieure à 100% lorsque que la retenue est initialement vide et proche de 50% le plus fréquemment (cf. § 3.1.3.iv). La pluie utilisée dans les modèles est issue d'un seul pluviomètre situé sur la digue de la retenue collinaire. Sa représentativité de la lame précipitée sur le bassin versant est d'autant moins bonne que le bassin versant est grand.
- La formalisation du modèle : le pas de temps et la structure des modèles proposés ne permettent pas de prendre en compte la variabilité de l'intensité sub-journalière

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

des pluies, déterminant essentiel du ruissellement en milieu semi-aride (Bradford et al., 1987; Martinez-Mena et al., 1998; Canton et al., 2001).

- L'aménagement des bassins versants pendant la période étudiée (construction de banquettes, reboisement, mise en culture des sols) peut conduire à une instabilité de leur comportement hydrologique. Lamachère et al. (2006) ont montré à partir d'analyses cartographiques que 10% de la surface du bassin versant d'Abdessadok a été aménagée avec des banquettes et 45% de la superficie du bassin versant de Brahim Zaher a été reboisée au cours des années 1990. Environ 43% de la surface du bassin versant d'El Gouazine sont aménagés avec des banquettes en 1997 (Nasri et al., 2004b).
- Le critère de Nash-Sutcliffe, critère en moindres carrés, se base sur la comparaison du modèle à ajuster avec un modèle de référence égal à la moyenne des débits observés. Martinec et Rango (1989) montrent qu'avec des chroniques de débits observés présentant des comportements extrêmes (périodes généralement beaucoup plus sèches ou plus humides qu'en moyenne), le critère de Nash-Sutcliffe n'est pas forcément bien adapté pour évaluer la qualité d'un ajustement. En milieu semi-aride, avec des écoulements rares, intenses et de courte durée, la moyenne des débits observés est beaucoup plus proche de zéro que du module interannuel des crues. Par conséquent, le critère de Nash est plus exigeant sur ce type de bassin et prend facilement des valeurs négatives. L'obtention d'une valeur supérieure à 50% peut donc être considérée comme satisfaisante pour un bassin versant semi-aride.

Les meilleurs ajustements obtenus pour les bassins versants d'El Moudhi, de Fidh Ali et de M'Richet sont difficilement explicables. Le fait qu'il s'agisse des retenues présentant les taux de volume lâchés²⁹ les plus faibles (12%, 3% et 4% respectivement et 13% pour le reste des retenues) suggère qu'il y a eu moins de lâchers pendant les épisodes de crue enregistrés sur ces retenues, conduisant à une meilleure estimation de leur volume. D'autre part, leur bassin versant n'a pas été aménagé au cours de la période étudiée, suggérant une stabilité de leur comportement hydrologique. Enfin, Fidh Ali et M'Richet sont les deux retenues collinaires étalonnées le plus grand nombre de fois dans l'échantillon étudié. Il est donc vraisemblable que l'incertitude sur les apports liée à l'obsolescence des courbes d'étalonnage soit faible par rapport au reste de l'échantillon.

²⁹ Taux de volume lâché : rapport de la somme des volumes lâchés sur la somme des volumes des apports, calculé sur la période utilisée pour caler et vérifier le modèle.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

Les simulations du remplissage des retenues collinaires dans la partie 3.5 seront donc effectuées en utilisant le modèle pluie-débit GR4J, plus performant que le modèle linéaire. Seules El Moudhi, Fidh Ali et M'Richet seront étudiées du fait des meilleurs ajustements du modèle GR4J pour ces trois retenues collinaires, représentatives des conditions agro-climatiques de la région étudiée : El Moudhi est la retenue collinaire la plus méridionale avec un bilan climatique équivalent à celui de la région de Sidi Saad. M'Richet est la retenue collinaire la plus septentrionale avec un bilan climatique équivalent à celui de la région de Makthar (cf. figures 5, 13 et 14). Fidh Ali correspond à une situation intermédiaire entre ces deux cas extrêmes. La figure 53 montre les variations journalières des volumes stockés dans ces trois retenues collinaires sous l'effet des apports et des pertes naturelles (évaporation et infiltration).

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

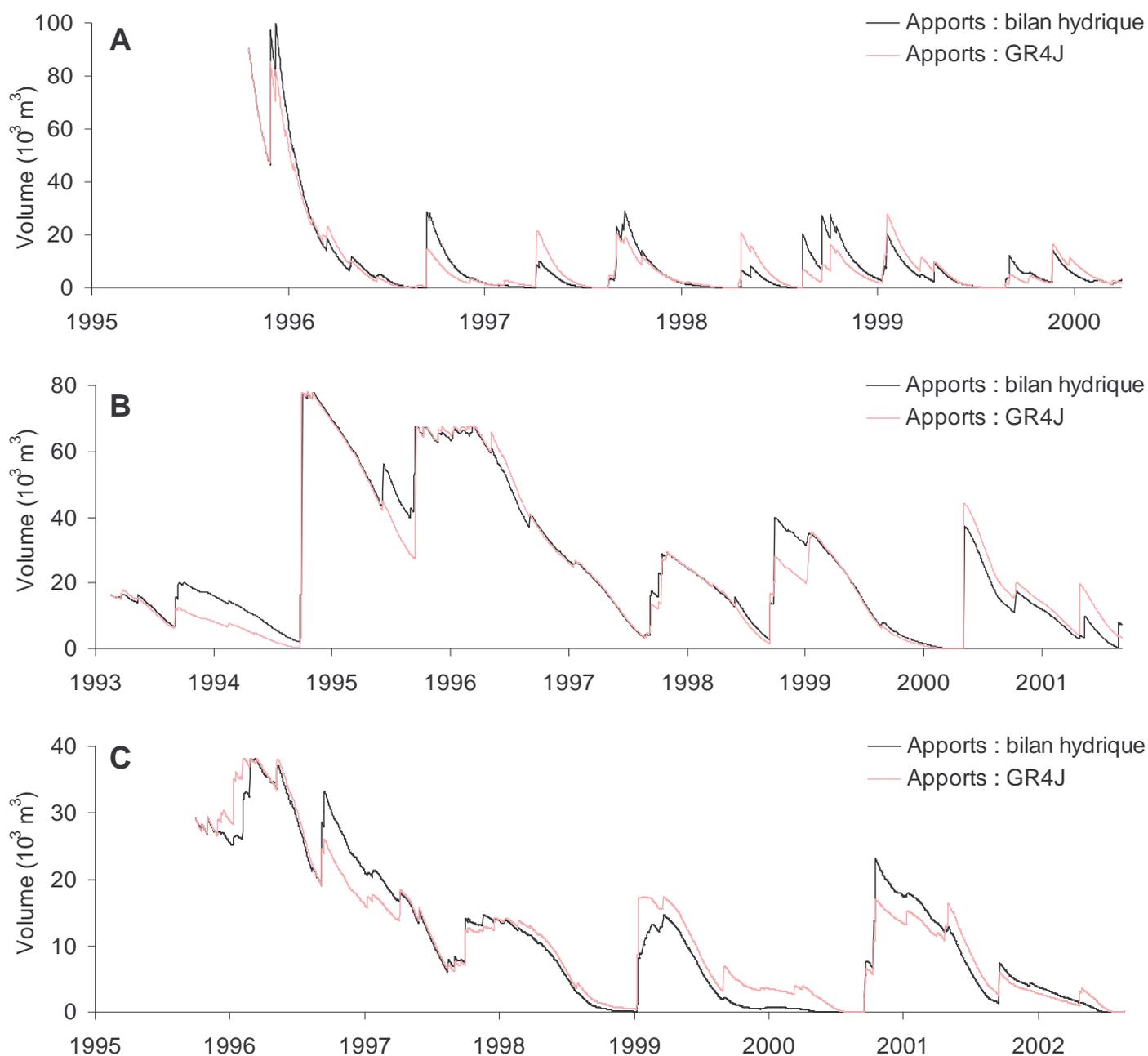


Figure 53. Variations journalières des volumes stockés dans les retenues collinaires d'El Moudhi (A), de Fidh Ali (B) et de M'Richet (C).

Les flux entrants sont calculés soit par bilan hydrique à l'aide de l'équation 12, soit estimés avec le modèle pluie-débit GR4J. Les pertes par évaporation et infiltration sont calculées à l'aide du modèle linéaire de déstockage naturel formalisé par l'équation 9. Les volumes des apports simulés avec le modèle GR4J ne sont pas rigoureusement équivalents à ceux estimés par bilan hydrique. Cependant, sur l'ensemble des chroniques, les sommes des volumes stockés obtenus à partir des apports calculés par bilan hydrique et avec le modèle GR4J ne diffèrent que de 3,9%, 3,4% et 3,5% pour les retenues collinaires El

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

Mouidhi, Fidh Ali et M'Richet, respectivement. Les volumes stockés dans les trois retenues collinaires aux 1^{er} mars, 1^{er} avril et 1^{er} mai, et estimés à partir des apports calculés par bilan hydrique ou par le modèle GR4J, sont réunis dans le tableau 26. Ces jours ont été choisis car ils correspondent au début de la saison d'irrigation, lorsque le bilan climatique mensuel devient déficitaire (cf. § 2.3.1.i). Pour environ 80% des années simulées, la différence entre les volumes estimés par les deux méthodes n'excède pas 20% à M'Richet et 10% à Fidh Ali. Ces observations annuelles aboutissent à des résultats de moins bonne qualité pour la retenue collinaire d'El Mouidhi, en raison notamment des plus faibles volumes stockés dans cette retenue, accroissant les écarts relatifs.

Tableau 26. Estimations par bilan hydrique (BH) et avec le modèle GR4J, des volumes stockés dans les retenues collinaires aux 1^{er} mars, 1^{er} avril et 1^{er} mai.

	Année	1 ^{er} mars			1 ^{er} avril			1 ^{er} mai		
		BH	GR4J	Δ%	BH	GR4J	Δ%	BH	GR4J	Δ%
M'RICHET	1996	37 998	38 052	0.1	36 173	36 760	1.6	34 577	34 358	-0.6
	1997	37 998	38 052	0.1	36 173	36 760	1.6	34 577	34 358	-0.6
	1998	19 201	15 753	-18.0	16 831	13 847	-17.7	16 869	17 233	2.2
	1999	12 576	13 702	9.0	11 629	12 905	11.0	10 164	11 465	12.8
	2000	13 159	16 730	27.1	14 599	17 243	18.1	12 802	15 540	21.4
	2001	611	2 955	383.9	512	3 710	624.6	225	3 164	1303.7
	2002	16 307	13 747	-15.7	13 963	11 906	-14.7	12 195	10 908	-10.6
FIDH ALI	1993	15 770	15 706	-0.4	16 385	17 539	7.0	14 405	15 350	6.6
	1994	13 959	7 289	-47.8	12 371	6 141	-50.4	10 529	4 818	-54.2
	1995	61 593	61 072	-0.8	56 569	56 046	-0.9	51 267	50 436	-1.6
	1996	65 445	67 492	3.1	65 538	66 257	1.1	60 864	61 378	0.8
	1997	23 744	24 146	1.7	20 564	20 944	1.8	17 394	17 747	2.0
	1998	21 257	21 129	-0.6	19 136	19 626	2.6	16 540	17 191	3.9
	1999	31 810	32 468	2.1	28 602	28 888	1.0	24 690	24 959	1.1
2000	312	41	-87.0	0	0		0	0		
2001	8 677	10 495	21.0	5 892	7 469	26.8	3 434	4 732	37.8	
EIMOUIDHI	1996	18 505	19 887	7.5	12 613	16 715	32.5	11 570	9 865	-14.7
	1997	441	1 871	324.5	85	648	664.6	6 777	13 727	102.5
	1998	350	668	91.1	51	143	182.6	6 172	19 603	217.6
	1999	8 609	12 877	49.6	4 814	11 208	132.8	7 557	8 507	12.6
	2000	2 586	2 639	2.1	2 484	2 057	-17.2	0	0	

La comparaison des chroniques de mesures « réelles » avec les volumes calculés par le modèle de stockage/déstockage présente un intérêt limité du fait de la présence de déstockages volontaires (lâchers et prélèvements) dans les chroniques mesurées. En effet, ces termes, non pris en compte dans le modèle, conduisent à des divergences systématiques entre les deux séries de valeurs. Les graphiques correspondants sont néanmoins présentés en annexe 7.3.

3.5. Simulations de la dynamique de stockage/déstockage des retenues

L'analyse de la pluviosité dans la région du Merguellil (§ 2.3.1.i) a mis en évidence l'extrême variabilité de la pluviométrie annuelle. La capacité des retenues collinaires à fournir une ressource en eau ne peut donc être estimée uniquement à partir des mesures de bilan hydrique réalisées sur des périodes n'excédant pas 9 ans. Les variations du volume d'eau stocké dans les retenues collinaires sont simulées à l'aide d'un modèle couplé pluie/débit – bilan hydrique utilisant en entrée des chroniques journalières de pluies de plusieurs décennies issues de pluviomètres de la région. La capacité des retenues collinaires à satisfaire les besoins en eau d'irrigation est estimée à partir d'une courbe de défaillance établie pour différents volumes de demandes en eau et plusieurs niveaux d'envasement.

3.5.1. Structure du modèle

Le modèle utilisé pour simuler la dynamique de stockage/déstockage des retenues collinaires est composé de deux modules : le premier module est le modèle GR4J qui simule les écoulements journaliers dans la retenue à partir des chroniques journalières de pluie et d'ETP. Le deuxième module correspond au modèle de déstockage naturel des retenues collinaires, formalisé par l'équation 9, à trois paramètres (K , C_{ZERO} et C_T). Il utilise en outre les paramètres A et α des courbes d'étalonnage hauteur-surface et hauteur-volume, déterminés dans la partie 3.1.3.iv et la hauteur maximale de la retenue (égale à la différence des cotes du seuil du déversoir et du fond de la retenue).

Les simulations sont réalisées sur les retenues collinaires El Moudhi, Fidh Ali et M'Richet pour les bassins versants desquels le modèle GR4J s'ajuste le mieux (tableau 25). Ces trois retenues collinaires sont représentatives de la région du Merguellil en termes climatiques. M'Richet et El Moudhi présentent les pluviométries moyennes annuelles extrêmes rencontrées dans la région (maximum à M'Richet avec 461 mm/an et minimum à El Moudhi avec 273 mm/an)³⁰ et Fidh Ali correspond à une situation intermédiaire. En revanche, la capacité de stockage moyenne de ces trois retenues collinaires et la surface moyenne de leur bassin versant ($91 \times 10^3 \text{ m}^3$ et 212 ha respectivement) sont environ deux fois inférieure à la moyenne régionale ($198 \times 10^3 \text{ m}^3$ et 562 ha respectivement). L'interprétation des résultats de simulation et leur généralisation devront donc être effectués avec prudence. Les valeurs des quatre paramètres du modèle GR4J et des trois paramètres

³⁰ Cumuls annuels obtenus à partir de l'équation 4.

de l'équation 9 sont maintenues constantes au cours des simulations et pour toutes les simulations : le comportement hydrologique des bassins versants est supposé stable dans le temps. La figure 40 et le tableau 15 ont montré que les variations temporelles de K et C_{ZERO} sont négligeables par rapport à leur incertitude. En revanche, l'impact de la réduction de la capacité de stockage des retenues collinaires (cf. § 3.1.3.iv) sur la disponibilité en eau sera exploré par simulations.

3.5.2. Les variables du modèle

Le modèle de représentation de la dynamique de remplissage et de déstockage des retenues collinaires fonctionne avec deux variables d'entrée, la pluie journalière et l'évaporation mesurée sur bac évaporatoire. La pluie est utilisée en entrée du modèle GR4J pour alimenter le réservoir de production et les deux hydrogrammes unitaires (pour plus de détail sur la structure du modèle, voir Perrin et al. (2003)). Elle alimente également la retenue collinaire sous forme de précipitations directes. Les mesures d'évaporation sur bac sont utilisées pour calculer les pertes évaporatoires du réservoir de production du modèle GR4J et de la retenue collinaire.

i. La pluie

Les chroniques de pluies journalières utilisées dans les simulations sont choisies parmi les séries pluviométriques disponibles de la région. Les chroniques sélectionnées doivent contenir un nombre maximal d'années de manière à obtenir des résultats de simulation statistiquement représentatifs et doivent présenter des cumuls journaliers similaires aux enregistrements des pluviographes installés sur les retenues collinaires. La figure 54 illustre la méthode de sélection des séries pluviométriques utilisées dans les simulations.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

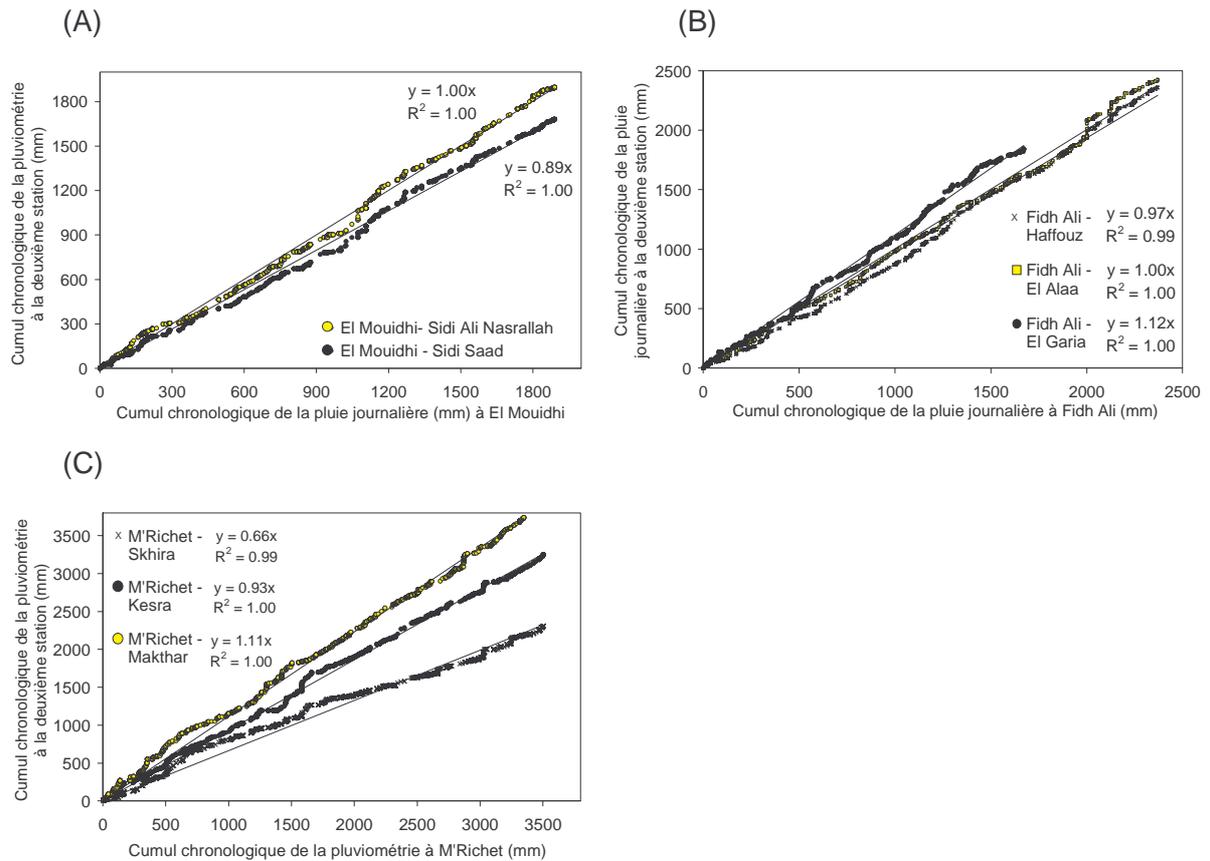


Figure 54. Comparaison des mesures pluviométriques journalières des pluviographes des retenues collinaires avec les pluviomètres voisins, par la méthode de la double masse. L'axe des ordonnées correspond aux cumuls des pluviomètres.

Les données du pluviographe de la retenue collinaire de M'Richet sont comparées aux chroniques des pluviomètres de Kesra (47)³¹, Skhira (31) et Makthar (100). Les données du pluviographe de la retenue collinaire d'El Moudhi sont comparées aux chroniques des pluviomètres de Sidi Saad (82) et Sidi Ali Nasrallah (41). Les données du pluviographe de la retenue collinaire de Fidh Ali sont comparées aux chroniques des pluviomètres de Haffouz (57), El Garia (28) et El Alaa (49). Ces stations sont localisées sur la figure 5. La méthode de la double masse est appliquée à chaque couple de stations constitué du pluviographe de la retenue collinaire et de l'un des pluviomètres voisins (figures 54 et 5). Bien que la station de Sidi Ali Nasrallah ait une pluviométrie similaire aux valeurs mesurées à El Moudhi (figure 54 (A)), la station de Sidi Saad est préférée pour son plus grand nombre d'années. Les valeurs de pluie mesurées à cette stations sont divisées par le coefficient directeur (0,89) de la droite représentative du double cumul afin d'estimer au mieux la pluviométrie d'El Moudhi. La

³¹ Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'années complètes (aucune lacune journalière) de mesures pour chaque pluviomètre.

station de Haffouz est utilisée pour les simulations de la retenue collinaire de Fidh Ali, sans modification de ses valeurs (figure 54 (B)). Les valeurs pluviométriques de Makthar, divisées par le coefficient directeur 1,11, sont utilisées pour les simulations de la retenue collinaire de M'Richet (figure 54 (C)).

ii. Evapotranspiration et pan évaporation

Les mesures d'évaporation (E_{PAN}) utilisées dans le modèle de remplissage/déstockage des retenues collinaires sont issues des bacs évaporatoires disposés aux abords de chaque retenue collinaire. Les chroniques de mesures de E_{PAN} ne comportant, tout au plus, que neuf années d'observation, celles-ci ne peuvent être utilisées directement comme variable d'entrée du modèle puisque les chroniques de pluie excède largement cette durée. Une année de valeurs journalières moyennes est constituée pour chacune des trois retenues collinaires à partir d'une régression polynomiale réalisée sur les moyennes interannuelles des mesures journalières (figure 55). Cette année moyenne est utilisée « en boucle » dans les simulations. Avant d'être injectées dans le modèle GR4J, les valeurs de E_{PAN} sont converties en ETP avec le coefficient de transposition 0,6 déterminé dans la partie 2.3.1.i. L'écart entre ces années moyennes et les valeurs réelles de l'évaporation est négligeable compte tenu de la faible variabilité interannuelle de l'évaporation (cf. figure 12).

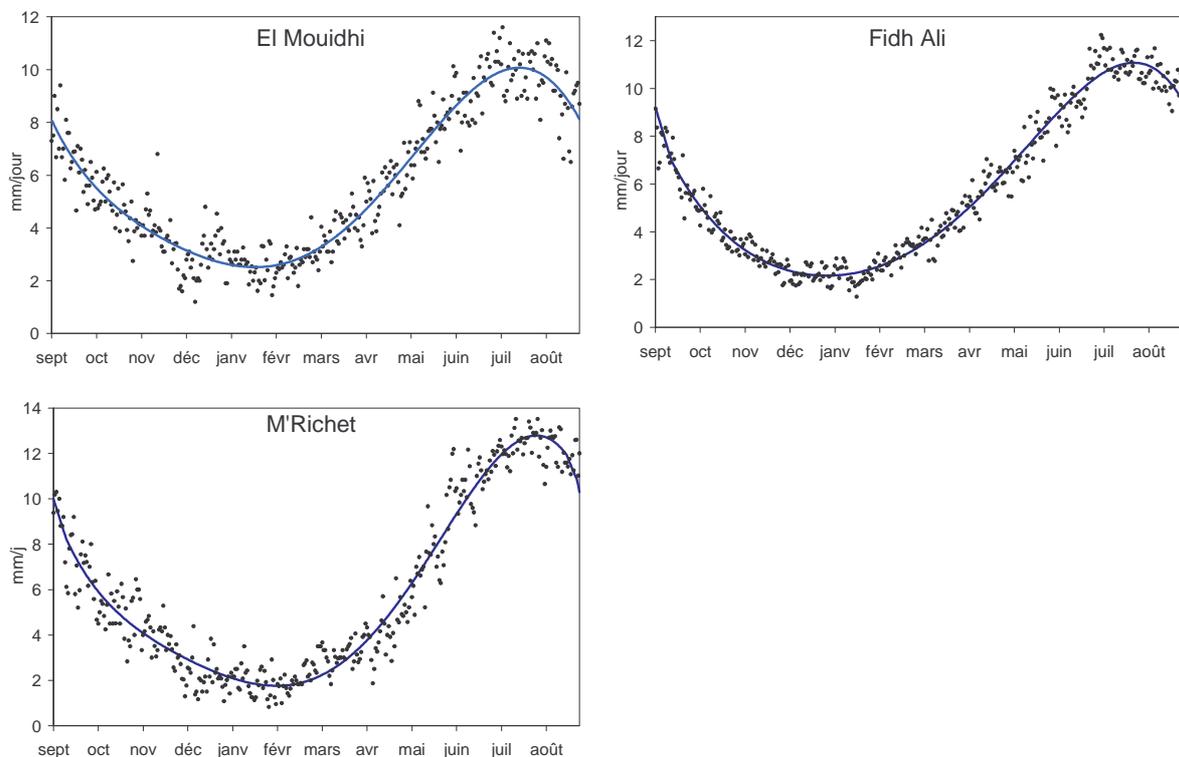


Figure 55. Valeurs journalières de E_{PAN} . Points : moyennes interannuelles des mesures. Courbe : régression polynomiale utilisée comme variable d'entrée du modèle.

3.5.3. Estimation de la fiabilité des retenues collinaires par simulations

La fiabilité d'une retenue collinaire équivaut ici à la probabilité p qu'elle contienne un volume d'eau suffisant pour satisfaire une demande annuelle en eau pour les besoins de l'irrigation. La probabilité de défaillance est égale à $1-p$. La figure 56 schématise la structure du modèle utilisé pour calculer p .

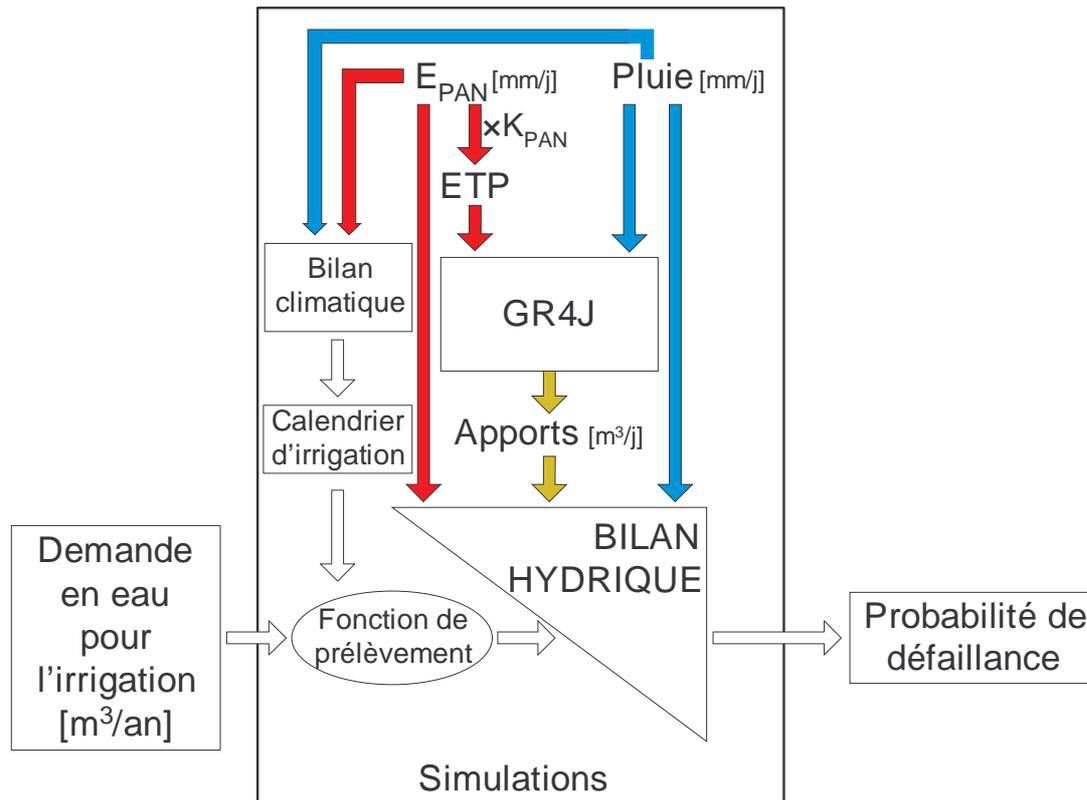


Figure 56. Modèle de remplissage/déstocage de la retenue collinaire. Couplage avec la fonction de prélèvement pour le calcul d'une probabilité de défaillance.

La probabilité p est calculée par simulations en utilisant le modèle de remplissage/déstocage des retenues collinaires couplé à une fonction de prélèvement. Cette fonction ponctionne quotidiennement des volumes d'eau dans la retenue, calculés suivant un calendrier d'irrigation établi à partir des données climatiques de la région et d'une demande en eau annuelle. La probabilité de défaillance associée à chaque volume de demande annuelle en eau est égale au rapport du nombre d'années défectives sur le nombre total d'années simulées. Une année est jugée défective lorsqu'au moins une demande journalière en eau n'a pu être satisfaite au cours de l'année en raison d'un volume insuffisant dans la retenue collinaire. L'adéquation de la définition de cette probabilité de défaillance sera discutée dans la partie 3.5.3.iii à partir des résultats obtenus avec d'autres critères de défaillances.

i. Définition d'une fonction « prélèvement »

Un calendrier théorique des besoins en eau pour l'irrigation des cultures est défini à partir du bilan climatique de la région de la retenue collinaire (cf. figure 13). Les spécificités culturelles en matière de besoin en eau, généralement traduites par des coefficients culturaux (K_c), ne sont pas prises en compte du fait de la forte incertitude sur les mesures d'évaporation. La figure 25 a montré que l'incertitude sur les moyennes mensuelles de l'évaporation mesurée sur bac est de 10% environ. Or les écarts intermensuels des valeurs de K_c généralement utilisées pour l'olivier, principale culture irriguée par les retenues collinaires, ne dépassent pas 5% (Allen et al., 1998). Chaque mois, le volume de la demande en eau est donc supposé proportionnel au déficit hydrique mensuel ET_0 -Pluie. Le tableau 27 rassemble les valeurs relatives mensuelles médianes du déficit hydrique pour les retenues collinaires d'El Moudhi, de Fidh Ali et de M'Richet, calculées respectivement à partir des couples de stations (Pluie ; E_{PAN}) suivants : (Sidi Saad ; El Moudhi), (Haffouz ; Fidh Ali) et (Makthar ; M'Richet).

Tableau 27. Répartition intermensuelle des besoins en eau d'irrigation pour des cultures situées à proximité des retenues collinaires d'El Moudhi, de Fidh Ali et de M'Richet.

	El Moudhi	Fidh Ali	M'Richet
Jan	3%	2%	0%
Fév	4%	2%	0%
Mar	5%	3%	0%
Avr	7%	7%	6%
Mai	11%	11%	11%
Jui	15%	17%	20%
Jui	18%	22%	29%
Aoû	16%	18%	21%
Sep	8%	8%	8%
Oct	6%	5%	3%
Nov	4%	3%	1%
Déc	3%	2%	0%
TOTAL	100%	100%	100%

Le volume annuel de demande en eau est divisé en 12 volumes mensuels à partir des ratios présentés dans le tableau 27. Ces volumes mensuels sont équitablement subdivisés en volumes journaliers.

ii. Prise en compte de l'envasement des retenues collinaires

Le tableau 9 montre que les temps nécessaires au comblement des retenues collinaires d'El Moudhi, de Fidh Ali et de M'Richet jusqu'à la cote de leur déversoir sont respectivement égaux à 27, 22 et 32 ans. Cette réduction de la capacité de stockage des retenues collinaires doit avoir un impact sur la disponibilité de la ressource en eau qu'elles assurent. Il est estimé en utilisant dans les simulations des courbes d'étalonnages correspondant à des

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

niveaux d'envasements nuls puis atteints 5, 10, 15 et 20 (et 25, 30 pour M'Richet) ans après leur mise en service. Les relations hauteur-surface et hauteur-volume utilisées dans les simulations sont formalisées par la fonction puissance ($V = A \times H^\alpha$) proposée dans la partie 3.1.3.iv et qui présente l'avantage d'avoir une forme réciproque simple ($H = (V/A)^{1/\alpha}$) utilisée dans l'algorithme de calcul du bilan hydrique. La simulation correspondant à la date de construction est réalisée avec la 1^{ère} courbe d'étalonnage mesurée. Les suivantes utilisent des courbes d'étalonnage conçues de deux manières différentes suivant les cas :

- si l'année simulée est antérieure à la date de mesure de la dernière courbe d'étalonnage, les valeurs de α et de la profondeur maximale P de la retenue sont estimées avec le modèle exponentiel (α ou $P = a \times \exp^{-bx} + c$) ajusté respectivement aux couples (x, α) et (x, P) ³² et la valeur de A est déterminée par interpolation linéaire (figure 57). Cette méthode est utilisée pour déterminer les paramètres de la courbe d'étalonnage de l'année 5. Les valeurs de α , A et P correspondantes sont respectivement égales à 2,07, 1829 et 6,9 m pour El Moudihi, 1,97, 4261 et 5,7 m pour Fidh Ali et 2,01, 2298 et 3,9 m pour M'Richet.
- lorsque l'année simulée est postérieure à la date du dernier étalonnage, celui-ci est utilisé, modifié de telle sorte que les sédiments collectés depuis la dernière mesure s'accumulent en couches horizontales. Ainsi, le volume d'eau est nul pour toute cote inférieure au niveau des sédiments puis il augmente avec le taux $\Delta V/\Delta H$ de la courbe d'étalonnage utilisée. Il n'est pas possible de définir une simple courbe d'étalonnage en extrapolant les modèles de régression pour définir des valeurs de α , A et P car les fonctions $\alpha=f(x)$ et $A=f(x)$ sont indéterminables pour des niveaux d'envasement élevés (cf. retenue de Saadine 2 sur la figure 30).

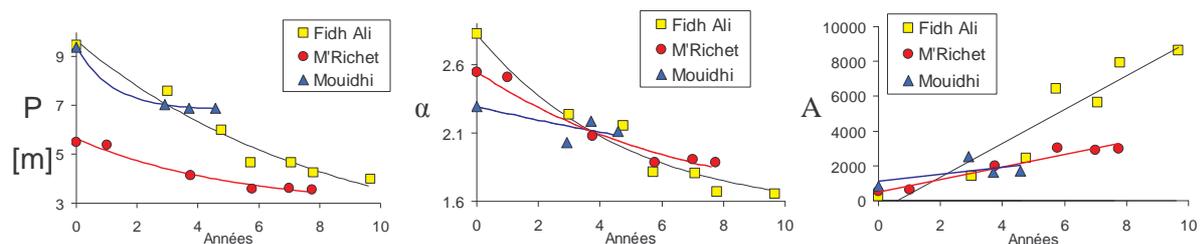


Figure 57. Régressions sur les valeurs de P, α et A calculées pour les retenues collinaires d'El Moudihi, de Fidh Ali et de M'Richet.

³² a, b et c sont les paramètres du modèle de régressions déterminés avec le critère de Nash-Sutcliffe. x est la durée [an] écoulée depuis le 1^{er} étalonnage.

La figure 58 illustre l'envasement progressif des retenues collinaires étudiées en représentant les couches de sédiments accumulés sur des périodes de cinq ans par la différence entre deux courbes d'étalonnage surface-hauteur successives.

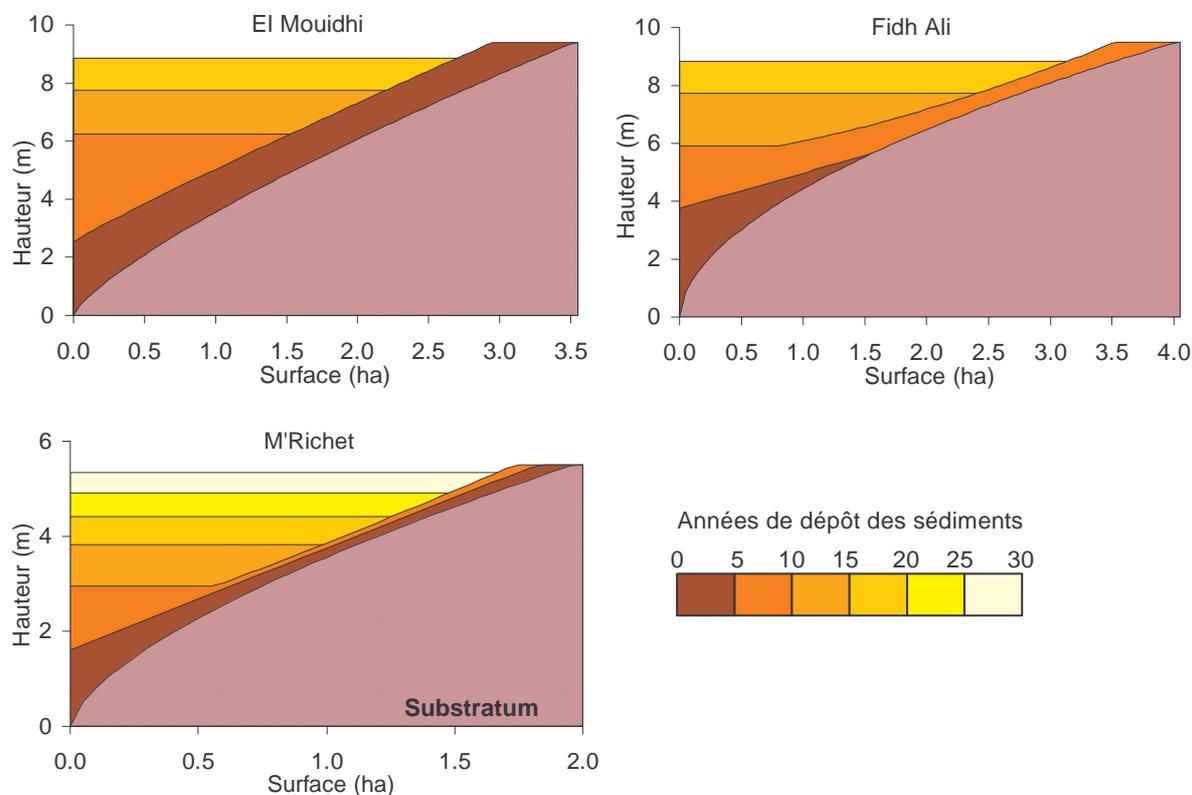


Figure 58. Courbes d'étalonnage « hauteur-surface » successives mesurées (années 0 et 5) et calculées (années 10, 15, 20, 25 et 30) utilisées dans les simulations.

iii. Résultats des simulations

Dans un premier temps, nous nous intéressons au volume des ressources en eau disponibles dans les retenues collinaires pendant la saison sèche, en l'absence de prélèvement. La probabilité de défaillance de chaque retenue collinaire est ensuite calculée pour différents volumes annuels de demande en eau et différents niveaux d'envasement.

Ressource disponible pendant la saison sèche

La figure 59 montre les volumes stockés dans les retenues collinaires pendant la saison sèche (i.e. $ET_{o/2_{mensuel}} > Pluie_{mensuelle}$, cf. figure 13) et obtenus à partir des résultats de simulations sans prélèvement pour l'année 0 (envasement nul). Le mois d'avril correspond aux cotes de remplissage les plus élevées de l'année puis la retenue collinaire se vide progressivement sous l'effet des pertes par infiltration et évaporation jusqu'au retour des premières crues d'automne au mois de septembre.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

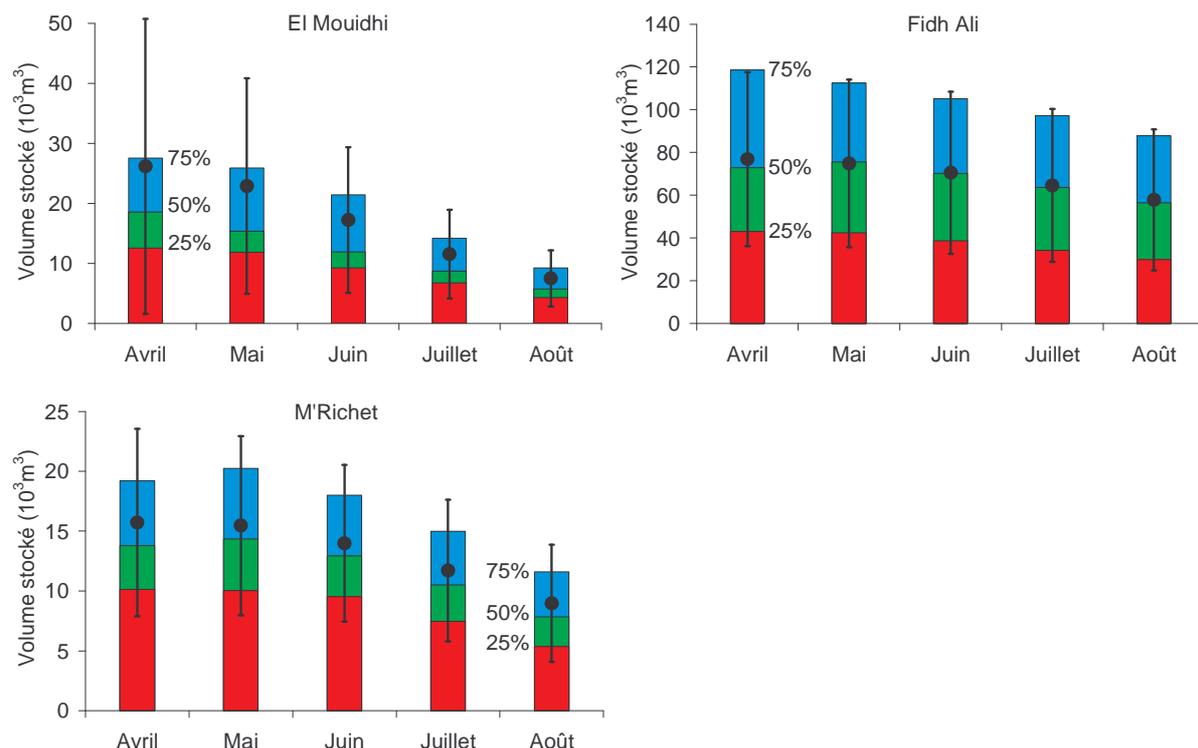


Figure 59. Distribution fréquentielle des volumes stockés dans les retenues collinaires pendant la saison sèche. Histogrammes : quartiles 25%, 50% et 75%. Points : moyennes. Barres : écarts-types.

Le niveau d'eau maximal atteint au début de la saison sèche dépend de quatre facteurs : la pluviosité, le rendement hydrologique du bassin versant, la capacité de stockage de la retenue et l'intensité des flux de vidange naturelle (les simulations sont réalisées sans prélèvement ni lâcher de barrage). Ainsi, malgré la plus forte pluviosité à M'Richet (460 mm/an sur la période simulée contre 286 mm/an à El Moudihi et 310 mm/an à Fidh Ali), cette retenue collinaire contient moins d'eau en avril ($15\,700 \text{ m}^3$ en moyenne) que la retenue d'El Moudihi ($26\,200 \text{ m}^3$ en moyenne) nettement moins arrosée (286 mm/an sur la période simulée). Cette différence s'explique par le coefficient de ruissellement moyen interannuel observé du bassin versant de M'Richet (3,5%), nettement plus faible qu'à El Moudihi (13,8%). Le stock d'eau plus important dans la retenue de Fidh Ali ($76\,900 \text{ m}^3$ en moyenne), qui présente une pluviosité (310 mm/an) et un coefficient de ruissellement (7%) intermédiaires entre les deux autres retenues, s'explique vraisemblablement par ses flux de déstockage très faibles (Infiltration = 2,62 mm/j et $C_T = 0,65$, cf. tableau 14). L'augmentation des valeurs des coefficients de variations interannuelles des volumes stockés sur la période étudiée, du nord au sud ($CV_{M'Richet} = 50\%$, $CV_{Fidh\ Ali} = 54\%$ et $CV_{El\ Moudihi} = 78\%$) est une conséquence de l'augmentation de la variabilité pluviométrique (cf. figure 5). Le taux moyen de déstockage varie peu entre les retenues collinaires : $-4700 \text{ m}^3/\text{mois}$ à El Moudihi, $-4800 \text{ m}^3/\text{mois}$ à Fidh Ali et $-2200 \text{ m}^3/\text{mois}$ à M'Richet. Bien qu'El Moudihi présente des flux

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

de stockage beaucoup plus intenses que ceux de Fidh Ali ($CT_{El\ Moudihi} \approx 2,3 \times CT_{Fidh\ Ali}$ et $If_{El\ Moudihi} \approx 10 \times If_{Fidh\ Ali}$, cf. tableau 14), la similitude de leur taux mensuels de déstockage s'explique par la surface moyenne du miroir de Fidh Ali ($22\ 000\ m^2$), plus de deux fois supérieure à celle d'El Moudihi ($9500\ m^2$), qui accroît d'autant les pertes par infiltration et évaporation. Avec des flux de déstockage surfaciques plus faibles que ceux d'El Moudihi et une surface moyenne du miroir de $8400\ m^2$, il n'est pas surprenant que la retenue collinaire de M'Richet présente le taux de déstockage mensuel le plus faible parmi les trois retenues collinaires étudiées.

La figure 60 montre l'effet de l'envasement des retenues collinaires sur le volume d'eau disponible en début (avril) et fin (août) de saison sèche.

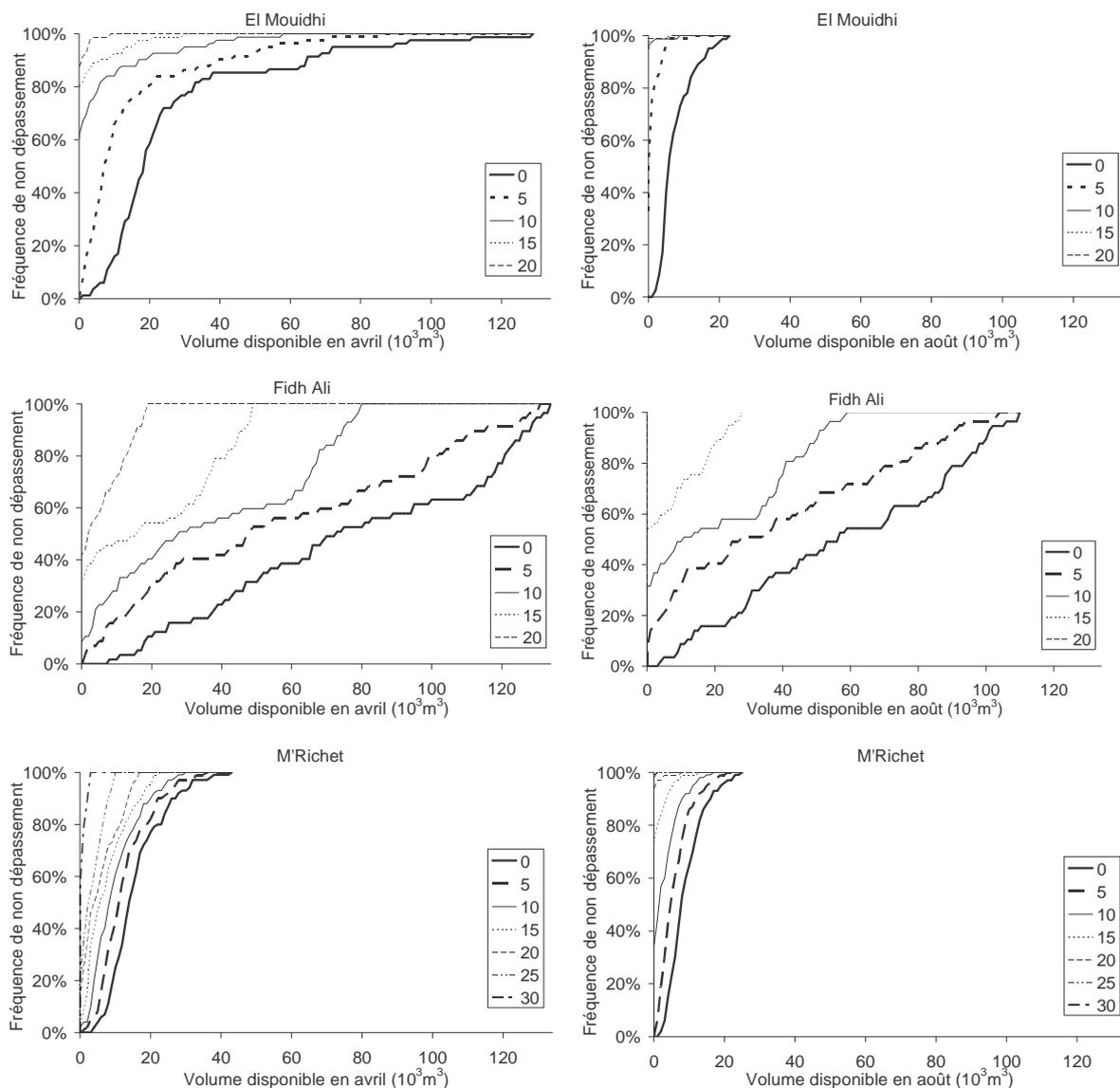


Figure 60. Fréquence de non dépassement des volumes stockés dans les retenues collinaires d'El Moudihi, de Fidh Ali et de M'Richet en début (avril) et fin (août) de saison sèche, en fonction du nombre d'années écoulées depuis leur mise en service.

3 BILANS HYDRIQUES DES RETENUES COLLINAIRES ET DU BARRAGE HAOUAREB

L'année 0 (année de mise en service), les trois retenues collinaires ne s'assèchent jamais totalement, même en fin de saison sèche. El Moudhi est la retenue collinaire qui présente les périodes d'assèchement les plus fréquentes dès l'année 5 : en août, elle est totalement asséchée une année sur trois et contient moins de 100 m³ d'eau une année sur 2. Cette situation s'explique par son positionnement géographique le plus méridional (bilan climatique le plus déficitaire (cf. figure 13), ses flux de déstockage les plus intenses (cf. tableau 14) et son taux d'envasement le plus élevé (cf. tableau 9)). Les retenues collinaires de Fidh Ali et de M'Richet ne sont jamais sèches l'année 5. Dix années après sa mise en service, El Moudhi est asséchée dès le début de la saison sèche 6 années sur 10 alors que Fidh Ali et M'Richet contiennent encore au moins 4000 et 500 m³ respectivement en fin de saison sèche avec la même fréquence. Après 20 ans, la probabilité qu'El Moudhi ne contienne plus d'eau dès le début de la saison sèche est de 90%. Les deux autres retenues collinaires contiennent alors au plus 15 000 m³ en début de saison sèche.

Cette première analyse montre que le volume de la ressource en eau disponible pendant la saison sèche diminue rapidement au cours des années. Au cours des cinq premières années, le volume d'eau disponible en début de saison sèche est réduit de 62%, 34% et 21% à El Moudhi, Fidh Ali et M'Richet respectivement. Ces taux de réductions sont liés en partie aux taux d'envasements, respectivement égaux à 5520 m³/an, 6147 m³/an et 1339 m³/an mais également à la géométrie et aux dimensions des réservoirs. Avec un taux d'envasement supérieur à celui d'El Moudhi, Fidh Ali est moins sensible à l'envasement les 5 premières années car elle est mieux dimensionnée qu'El Moudhi. Les rapports (apports annuels moyens/capacité initiale) d'El Moudhi et de Fidh Ali sont respectivement égaux à 83% et 35%.

Variabilité de la probabilité de défaillance

La figure 61 illustre les variations de la fréquence de défaillance³³ pour chacune des trois retenues collinaires étudiées, en fonction du volume annuel de la demande en eau et du niveau d'envasement.

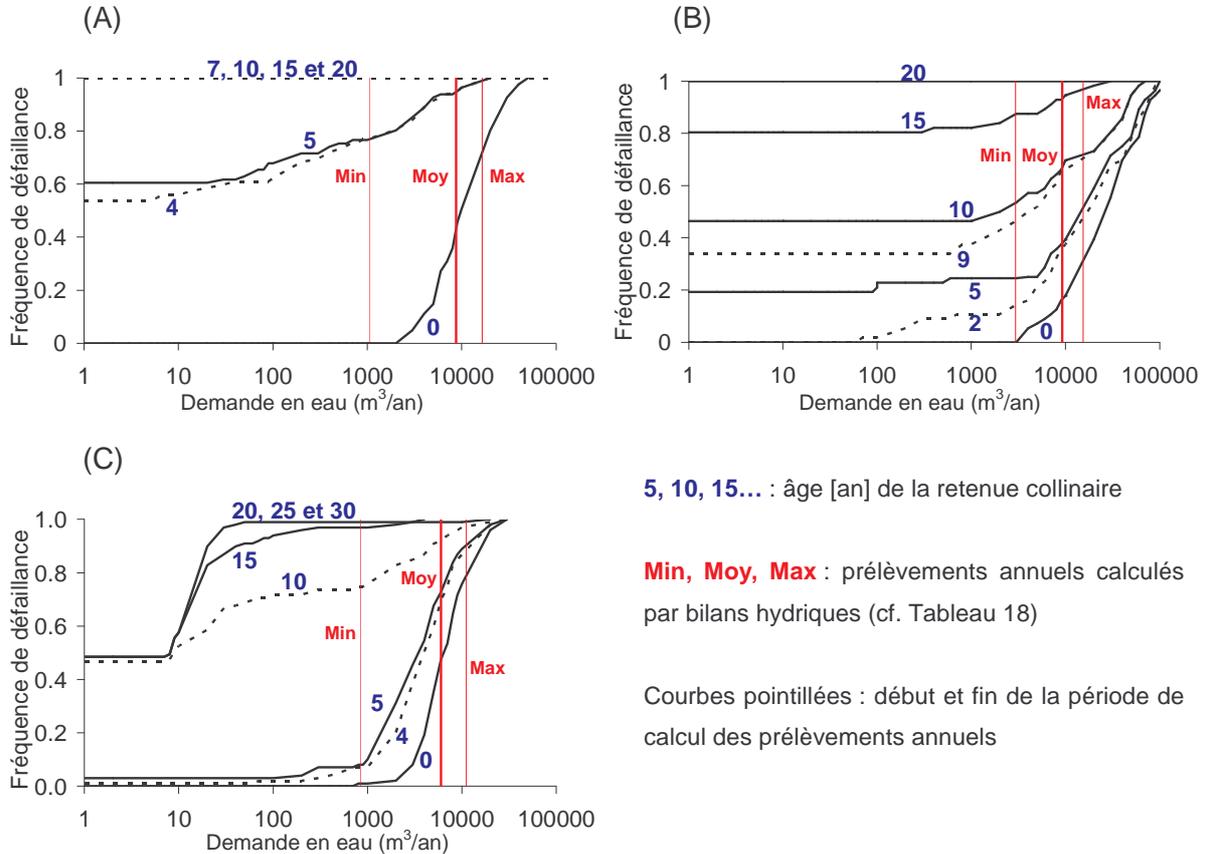


Figure 61. Fiabilité des retenues collinaires. (A) : El Moudhi, (B) : Fidh Ali, (C) : M'Richet.

L'année de mise en service des retenues collinaires, les demandes en eau correspondant à une probabilité de défaillance inférieure à 10% sont respectivement égales à 4000, 7000 et 3000 m³/an à El Moudhi, Fidh Ali et M'Richet. El Moudhi est la retenue dont la fiabilité est la plus rapidement affectée par l'envasement, en accord avec les observations sur la figure 60. Quinze ans après leur mise en service et pour des demandes annuelles en eau supérieures à 100 m³, les trois retenues collinaires ne satisfont pas la demande en eau plus de 8 années sur 10.

Les volumes annuels minimums, moyens et maximums, prélevés dans les trois retenues collinaires et calculés par bilan hydrique (§ 3.3.4) sont présentés sur la figure 61. Ils ont été calculés en utilisant l'ensemble des chroniques de mesures hydro-pluviométriques

³³ Fréquence de défaillance = nombre d'années simulées avec au moins une demande journalière en eau non totalement satisfaite sur le nombre total d'années simulées

disponibles pour chaque retenue. Ils correspondent donc à des périodes qui diffèrent selon les retenues (tableau 3). Des probabilités de défaillance sont calculées spécifiquement pour ces années de début et de fin de période de mesure (figure 61) pour les comparer aux volumes prélevés. Du fait de l'imprécision importante sur les prélèvements annuels (tableau 18), il n'est pas possible de calculer une probabilité de défaillance pour chaque prélèvement annuel. Par conséquent, seules les valeurs des prélèvements calculés sur l'ensemble de la période de mesure (représentés sur la figure 61) sont comparées aux probabilités de défaillance. A El Moudhi, figure 61(A), les volumes prélevés minimums ($1,0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$), moyens ($8,7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$) et maximums ($16,4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$) correspondent respectivement à des probabilités de défaillance de 77%, 95% et 98% l'année 4 et sont tous égaux à 100% l'année 7. A Fidh Ali, figure 61(B), les volumes prélevés minimum ($3,0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$), moyen ($9,2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$) et maximum ($15,5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$) correspondent respectivement à des probabilités de défaillance de 14%, 36% et 45% l'année 2 et 46%, 66% et 70% l'année 9. A M'Richet, figure 61 (C), les volumes minimum ($0,8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$), moyen ($6,0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$) et maximum ($11,1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$) correspondent respectivement à des probabilités de défaillance de 7%, 70% et 87% l'année 4 et 75%, 92% et 97% l'année 10. Les volumes généralement prélevés correspondent donc à des probabilités de défaillance dépassant le plus souvent 50%, équivalant à une incapacité à satisfaire les besoins en eau plus d'une année sur deux. Pour une année donnée, les variations de la fréquence de défaillance sont maximales dans la gamme des demandes en eau correspondant aux prélèvements calculés par bilan hydrique. Les trois retenues collinaires sont donc exploitées à des niveaux proches de leur capacité maximale.

Sensibilité des résultats aux critères de défaillances choisis

Dans cette analyse, une année a été jugée défaillante lorsqu'elle contenait au moins un jour défaillant. Il est fort probable qu'une seule journée de stress hydrique soit inoffensive pour un plant d'olivier. Le critère de défaillance choisi est donc peut-être trop sévère, aboutissant alors à une sous-estimation de la fiabilité des retenues collinaires. La figure 62 représente la fréquence de défaillance de la retenue collinaire de Fidh Ali, cinq années³⁴ après sa construction pour différents critères de défaillance plus ou moins sévères : une année est jugée défaillante lorsqu'elle contient au moins une série de n jours consécutifs défaillants, n variant de 1 à 20.

³⁴ Cette ancienneté correspond à l'envasement moyen pendant la période de mesure, cf. figure 61(B).

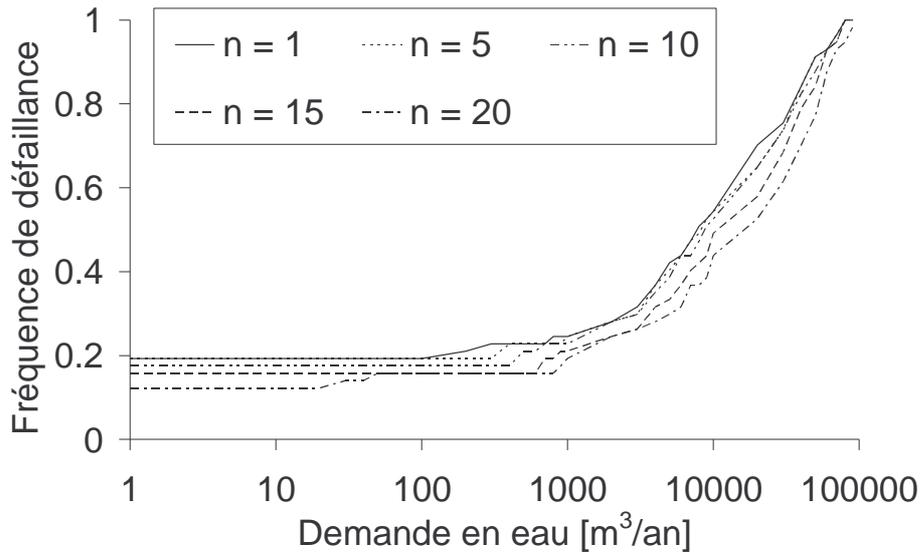


Figure 62. Sensibilité de la fréquence de défaillance au critère de défaillance. Retenue collinaire de Fidh Ali 5 ans après sa construction. n : nombre minimum de jours consécutifs défailants présents dans une année pour que celle-ci soit jugée défailante.

Les fréquences de défaillance correspondant à $n=5$, $n=10$, $n=15$ et $n=20$ sont respectivement 1,4%, 6,0%, 14,2% et 22,4% inférieures à la fréquence de défaillance correspondant à $n=1$. La fréquence de défaillance est donc peu sensible aux variations de n lorsque n reste inférieure à 10. Les fréquences de défaillance présentées sur la figure 61, correspondant à $n=1$, restent donc valables à 6% près pour toutes valeurs de n comprises entre 1 et 10. Cette stabilité s'explique par la rareté des évènements pluvieux en saison sèche : il est très probable qu'un jour défailant soit suivi d'une période sèche de plusieurs jours, donc sans apport et a fortiori défailants. Cette analyse montre donc que la fiabilité d'une retenue collinaire est peu sensible à la sévérité du critère de défaillance, tant que celui-ci reste basé sur des définitions de sensibilité des plantes au stress hydrique classiques (entre 1 et 10 jours au moins de manque d'eau).

Une généralisation de ces résultats à l'ensemble des retenues collinaires exploitées dans la région du Merguellil doit être envisagée avec prudence car les trois retenues collinaires étudiées ici ont des capacités de stockage et des superficies de bassins versants deux fois inférieures aux moyennes régionales. Elles représentent donc mal les caractéristiques régionales des retenues collinaires. Des analyses similaires devraient être réalisées sur de plus grands réservoirs, pour voir notamment si leur taux d'utilisation est corrélé à leur taille.

3.6. Conclusion

La détermination des bilans hydriques des retenues collinaires et du barrage El Haouareb a permis de caractériser les dynamiques de remplissage et de déstockage des retenues. L'analyse des mesures disponibles pour cette étude a révélé la forte incertitude sur l'évaporation, se répercutant sur les autres termes du bilan hydrique.

Cette étude souligne la difficulté à reconstituer correctement les chroniques d'apports aux retenues collinaires par bilan hydrique du fait, principalement, de l'existence de lâchers de barrage pouvant survenir au moment même des crues et de l'obsolescence des courbes d'étalonnage des réservoirs.

Les simulations de la dynamique de remplissage/déstockage des retenues collinaires ont montré que leur taux d'exploitation, pourtant faible (les prélèvements annuels représentent en moyenne 10% des apports), correspond à une probabilité de défaillance supérieure à 50%.

4. USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

4.1 Connaissances sur la gestion des retenues collinaires en Tunisie.....	169
4.2 Démarche.....	170
4.3 Résultats.....	171
4.4 Conclusion.....	188

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

Ce chapitre a pour objectif principal d'estimer les volumes d'eau prélevés pour l'irrigation dans les retenues collinaires du bassin versant du Merguellil. Il complète ainsi l'étude des bilans hydriques des retenues collinaires initiée dans le chapitre 3. La confrontation des résultats de cette approche locale (chapitres 3 et 4) à ceux de l'analyse hydrologique régionale (partie 5.1) permettront finalement d'évaluer l'impact des aménagements de CES sur la redistribution de la ressource en eau et de ses usages dans le bassin versant du Merguellil (partie 5.3).

La présentation du site d'étude (§ 2.3) a montré que seules trois retenues collinaires ont été instrumentées dans le bassin versant du Merguellil, équipement insuffisant pour caractériser le fonctionnement hydrique des retenues collinaires de la région. Ceci avait justifié l'extension de notre terrain d'étude en y ajoutant neuf retenues collinaires instrumentées appartenant au réseau HYDROMED et voisines du bassin versant du Merguellil. Faute de mesures hydrométéorologiques sur la majorité (>90%) des retenues collinaires du bassin versant du Merguellil, il est apparu judicieux d'estimer les prélèvements sur ces retenues à partir d'enquêtes en milieu paysan.

Ce chapitre s'organise en trois parties. La première dresse un aperçu des connaissances sur la gestion des retenues collinaires en Tunisie. La seconde détaille les choix méthodologiques. La dernière présente les résultats et propose une estimation des volumes prélevés dans chaque retenue collinaire.

4.1. Connaissances sur la gestion des retenues collinaires en Tunisie

Contrairement à l'aménagement en banquette qui augmente localement l'humidité du sol suivant un processus physique peu maîtrisé, la retenue collinaire offre des possibilités de gestion de la ressource en eau qu'elle collecte, via les prélèvements.

Les prélèvements d'eau sur une retenue collinaire sont destinés majoritairement à l'irrigation. Les usages domestiques sont généralement très faibles. Les volumes abreuvant le cheptel, principalement ovin, sont difficilement quantifiables mais très probablement négligeables par rapport aux volumes destinés à l'irrigation. Une analyse des systèmes de production agricole réalisée en 1996 autour de 26 retenues collinaires de la dorsale tunisienne (Albergel et Rejeb, 1997) montre qu'à cette époque, la moitié des agriculteurs riverains n'exploitait pas l'eau stockée dans les retenues collinaires et conservait un système de production traditionnel. Environ 28% des agriculteurs irriguaient épisodiquement et 22% pratiquaient une agriculture irriguée à petite échelle. Cette situation pouvait s'expliquer par le côté novateur de l'aménagement, souvent réalisé dans des milieux aux conditions pédoclimatiques défavorables à l'agriculture, où les populations n'imaginaient pas pouvoir maîtriser la ressource en eau dans la production agricole.

Afin d'organiser l'exploitation des retenues collinaires et de mieux la contrôler, l'Etat a créé des associations d'intérêts collectifs (AIC) (voir Faysse (1999) et Selmi (1996) pour une description détaillée de leur structure institutionnelle et de leur mode de fonctionnement) transformées en 2004 en groupements de développement agricole (GDA), destinés à associer les irrigants exploitant une même retenue. L'Etat et, à partir de 2000, des programmes de développement internationaux (EuropeAid, 2003) encouragent l'exploitation des retenues collinaires en fournissant aux GDA du matériel d'irrigation (pompe, tuyaux) et des jeunes plants d'arbres fruitiers à irriguer. Le président du GDA, élu par les membres de l'association, est chargé de répartir les fournitures entre chaque membre du groupement. La cotisation des membres est sensée couvrir les charges liées au fonctionnement (carburant des pompes) et à l'entretien du matériel. Légalement, seuls les agriculteurs possédant des terres sur le bassin versant du lac collinaire ont le droit d'exploiter l'eau de la retenue. Cette loi est rarement respectée car les riverains à l'aval immédiat de la digue sont beaucoup plus proches du lac que les agriculteurs situés en tête de bassin versant. Ils s'estiment donc en droit d'utiliser une ressource qui jouxte leurs parcelles.

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

Dans la première moitié des années 90, Talineau et al. (1994) montrent que la plupart des AIC créées autour des lacs collinaires n'est pas fonctionnelle. Les causes sont diverses : l'introduction de l'irrigation dans les petites exploitations montagnardes équivaut à un bouleversement technique auquel les agriculteurs ne sont pas préparés. Ces innovations, encore non maîtrisées sont perçues comme une prise de risque supplémentaire. La variabilité de la disponibilité de la nouvelle ressource est encore méconnue. Les doses optimales d'irrigations et les techniques de cultures intensives ne sont pas maîtrisées (Selmi et Talineau, 1996). La multiplicité des intervenants, le manque de confiance, même entre des proches voisins, l'absence de coordination et le manque d'expérience dans l'exploitation d'une ressource collective sont autant de facteurs qui ne prédisposent pas les irrigants à s'organiser pour gérer la ressource en eau stockée dans la retenue collinaire. Les conditions locales contraignantes (manque de moyens, faible niveau d'instruction, éloignement des centres de communication, systèmes de culture extensifs) ne facilitent pas la restructuration des modes de fonctionnement locaux indispensables à la valorisation de la nouvelle ressource. Dans certains cas, la concurrence pour l'exploitation de la retenue se transforme en conflits qui aboutissent à l'abandon des équipements hydro-agricoles et à l'arrêt des activités d'irrigation. Reij et al. (1988) et Reij (1991) montrent que d'une façon générale, sur l'ensemble du continent africain, l'adoption par les paysans de nouvelles méthodes proposées par les acteurs extérieurs au monde agricole, est exceptionnelle.

Les quelques études ayant porté sur les usages de l'eau autour des retenues collinaires tunisiennes, voir notamment Selmi (1996), se sont intéressées avant tout aux aspects sociaux de la gestion de l'eau. Les approches quantitatives concernant les prélèvements pour l'agriculture semblent inexistantes, à l'exception de quelques études ponctuelles, voir Pabiot (1999). Il est donc apparu nécessaire de réaliser de nouvelles enquêtes pour accroître les connaissances sur l'exploitation des retenues collinaires.

4.2. Démarche

Les 46 retenues collinaires situées dans le bassin versant du Merguellil (figure 16) et les 9 retenues collinaires du réseau HYDROMED extérieures au bassin versant (figure 18) ont été visitées en avril-mai 2004 et juin-juillet 2005. Les enquêtes effectuées sur les douze retenues collinaires du réseau HYDROMED doivent permettre de valider cette méthode d'estimation des prélèvements en comparant les résultats obtenus aux volumes prélevés calculés par bilan hydrique (§ 3.3).

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

Un questionnaire sous forme de grille (cf. annexe 7.5) a été soumis à chaque agriculteur irrigant ou à l'un des membres de sa famille par l'intermédiaire d'un traducteur bilingue arabe-français. Ce questionnaire a été établi après une première série d'enquêtes préliminaires ayant permis de déterminer les questions les mieux adaptées pour collecter les informations techniques souhaitées³⁵. Il vise à caractériser les usages de l'eau stockée dans les retenues collinaires à partir d'indicateurs numériques ou qualitatifs : nombres d'irrigants, modes d'irrigation, surfaces et cultures irriguées, calendriers d'irrigation et volumes prélevés.

4.3. Résultats

4.3.1. Caractérisation des usages de l'eau

i. L'exploitation des retenues collinaires en quelques chiffres

Les résultats présentés dans cette partie ne concernent que les retenues collinaires du bassin versant du Merguellil. Les données collectées sur les neuf autres retenues collinaires seront utilisées dans les parties suivantes, pour valider notamment la méthode d'estimation des prélèvements par comparaison des résultats avec les calculs de bilan hydrique.

Dans le bassin versant du Merguellil, 22 retenues collinaires sur 46 sont exploitées par 270 agriculteurs irrigant 670 ha de cultures (maraîchage (2%), olivier (69%), amandier (14%) et autres arbres (15%)³⁶) (figure 64). Environ 40% des surfaces maraîchères sont destinées à la culture du piment et de la tomate, 20% sont réservées à la fève et au petit pois, 10% correspondent au melon et à la pastèque. 30% des surfaces maraîchères reçoivent successivement deux cultures annuelles (piment/tomate en été et fève/petit pois en hiver). Le reste se répartit entre concombre, persil, oignon, poix chiche, navet, carotte et courge.

Généralement, l'eau est prélevée dans les retenues collinaires à l'aide de pompes fonctionnant au gasoil (figure 63). Une seule pompe électrique a été observée, dans la retenue collinaire de Hoshas en juillet 2005. 45 pompes ont été dénombrées. Leur nombre par retenue collinaire varie entre 0 et 6 (retenue collinaire de Gatar).

³⁵ Ces enquêtes préliminaires ont permis, par exemple, de comprendre que les doses d'irrigation allouées aux parcelles arboricoles sont généralement déterminées par l'agriculteur en fonction du nombre d'arbres à irriguer et non pas de la surface des vergers, paramètre moins bien connu.

³⁶ La dénomination « autres arbres » comprend les espèces suivantes : pommiers, figuiers, cerisiers, pruniers, noisetier, poirier, grenadier, abricoter et pistachier.

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES



Photo : Guillaume Lacombe

Figure 63. Pompe donnée par le gouvernement au GDA de la retenue collinaire Mahbes.
Date du cliché : 19 mars 2004.

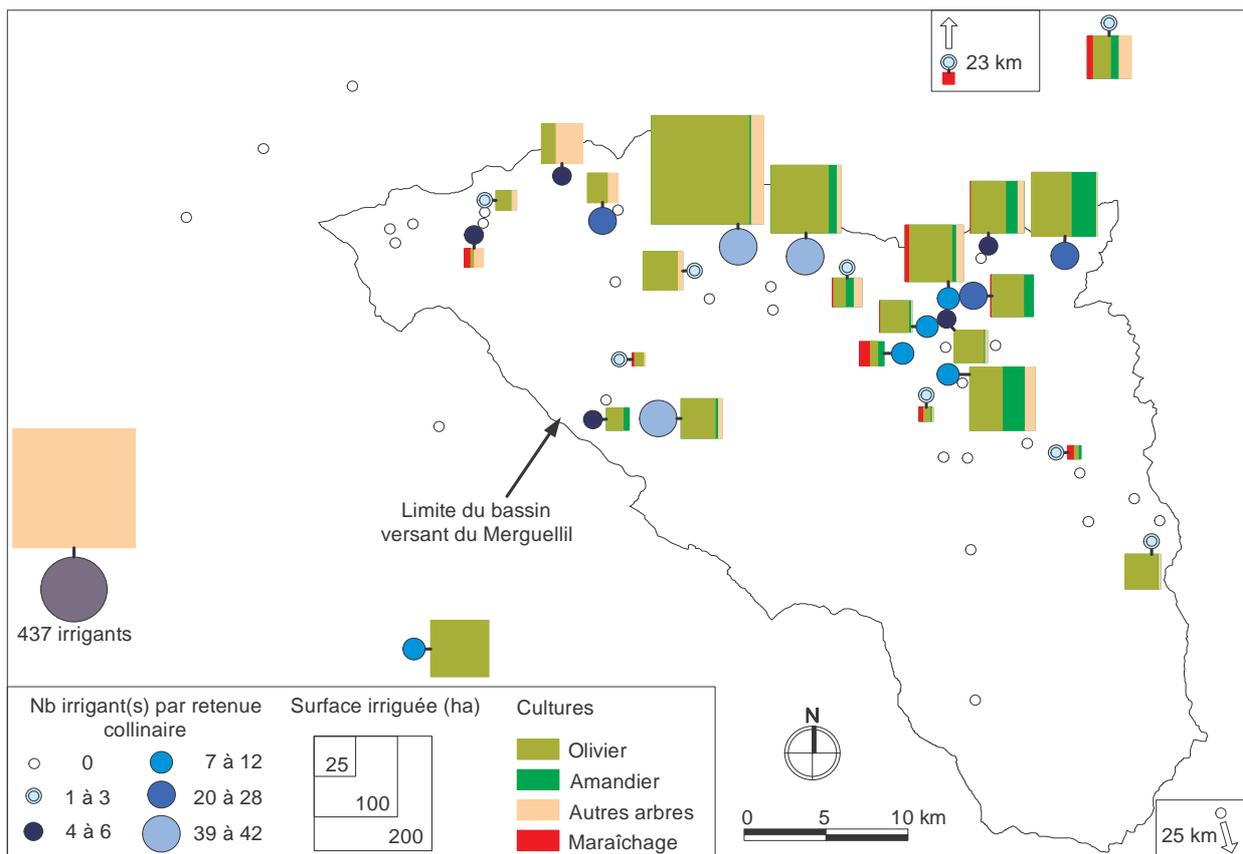


Figure 64. Nombre d'irrigants et surfaces irriguées à partir des retenues collinaires dans la région du Merguellil en 2004 et 2005. Echelle des surfaces irriguées 5 fois supérieure à l'échelle de la carte.

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

Environ 63% des irrigants utilisent une pompe. Sans pompe, l'irrigation se fait par écoulement gravitaire direct depuis la retenue (6 ha d'oliviers et d'amandier irrigués par la retenue collinaire de Gnaech), ou par bidons remplis manuellement (retenues collinaires de Ghouil et d'Oued Thal). L'eau est acheminée jusqu'à la parcelle, soit par des tuyaux en PVC, soit par des citernes (6% des exploitations enquêtées). La contenance des citernes varie entre 500 et 5000 L. Une campagne de mesure de débit effectuée sur 40 pompes pendant l'été 2004 a montré que le débit en régime de fonctionnement normal varie entre 2,1 et 6,5 L/s, avec une moyenne de 4,2 L/s (cf. annexe 7.4).

ii. Critères expliquant l'exploitation éventuelle des retenues collinaires

Afin d'identifier les critères déterminants l'exploitation éventuelle des retenues collinaires pour l'irrigation, les valeurs moyennes de paramètres susceptibles d'influencer cette exploitation sont calculés pour les groupes des retenues collinaires exploitées et non exploitées en 2004 et 2005 (années des enquêtes). Ces paramètres ont été choisis car ils sont facilement mesurables et sont a priori dépendant du degré d'exploitation des retenues collinaires. Ils sont exclusivement de nature physique et caractérisent plus ou moins directement le volume de la ressource en eau disponible pour l'irrigation, les besoins en eau d'irrigation et la facilité d'accès aux terres irrigables et aux principales voies de communications :

- la capacité initiale de la retenue collinaire (cf. tableau 2) donne une indication sur la capacité de stockage de la retenue collinaire,
- l'âge de la retenue collinaire en 2005 : la retenue collinaire est d'autant plus comblée, et présente donc une capacité de stockage réduite, qu'elle est ancienne (cf. tableaux 2 et 8),
- la pluviométrie moyenne annuelle, calculée à l'aide de l'équation 4, détermine en partie les besoins en eau d'irrigation des cultures. Les cultures des zones les plus pluvieuses sont moins dépendantes des apports complémentaires par irrigation.
- la pente moyenne du bassin versant : elle constitue un indicateur sur le relief de la région, donc sur la facilité d'accès aux terres irrigables (cf. tableau 2),
- la longueur des pistes d'accès aux retenues collinaires (le plus souvent non goudronnées) à partir des axes routiers principaux (figure 65). Elle caractérise l'enclavement de la retenue collinaire qui peut influencer son exploitation. Les enquêtes ont montré que le coût du transport des productions agricoles ou des fournitures entre l'exploitation agricole et les centres économiques locaux (marchés, fournisseur de matériel) est un paramètre déterminant dans la pratique d'une agriculture de marché. Les retenues collinaires les plus éloignées des principaux axes de communication sont donc a priori les moins facilement valorisables par l'agriculture irriguée (sauf si celle-ci est destinée à l'autoconsommation).

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

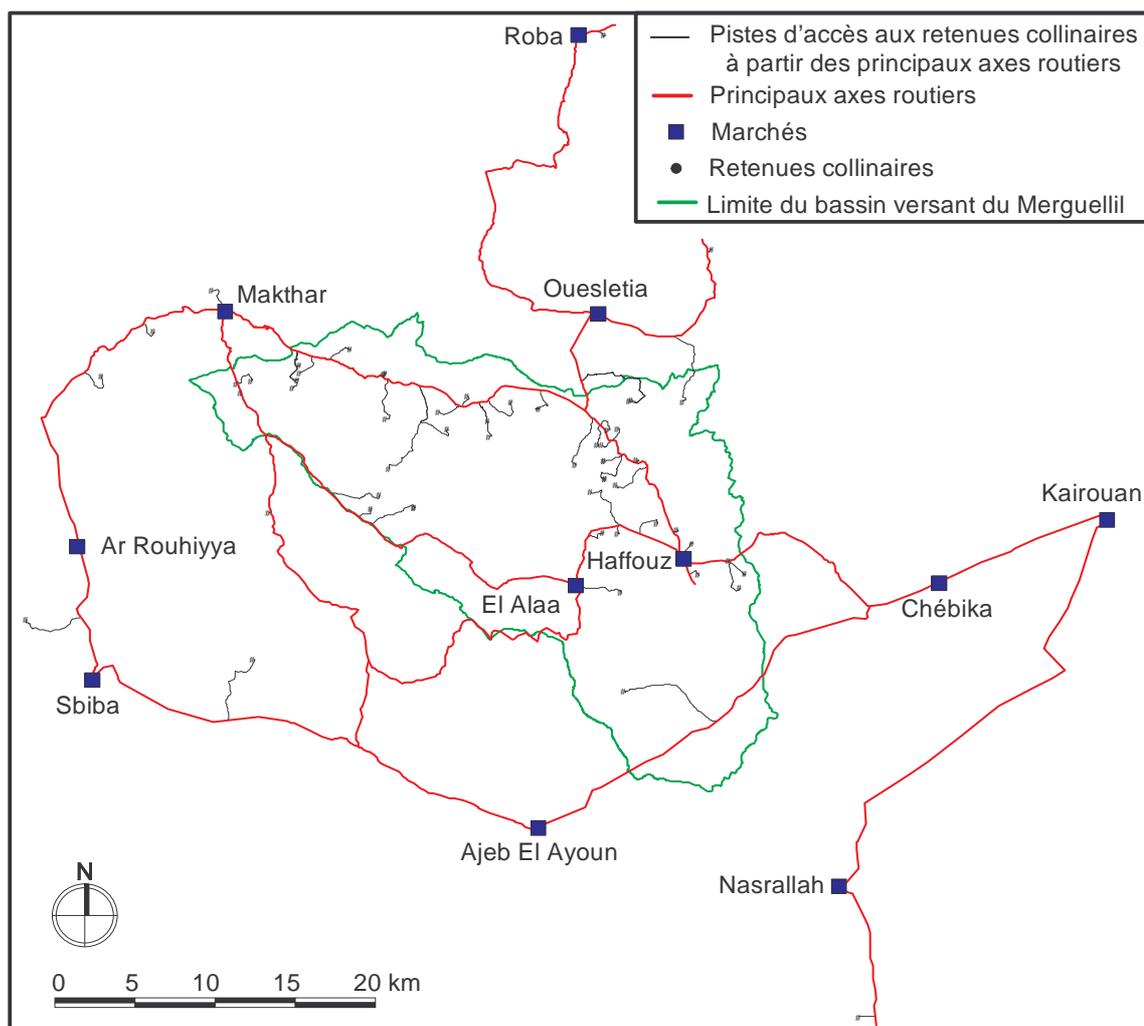


Figure 65. Voies d'accès aux retenues collinaires et localisation des principaux marchés. Réseau routier digitalisé à partir des cartes topographiques au 1 :50 000 de la région⁶.

Les valeurs moyennes et les écarts-types des 5 paramètres choisis sont calculés pour le groupe des retenues collinaires exploitées et le groupe des retenues collinaires non exploitées. Les résultats sont regroupés dans le tableau 28.

Tableau 28. Moyennes et écarts-types des paramètres des retenues collinaires, susceptibles d'influencer leur exploitation.

	Retenues exploitées		Retenues non exploitées	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Capacité initiale [10^3 m^3]	306	457	91	157
Âge [an]	13	8	22	12
Longueur piste d'accès [m]	3851	2842	2896	2715
Pluviométrie [mm/an]	366	50	365	76
Pente bassin versant [%]	5.2	4.6	4.6	4.1

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

Les valeurs moyennes de la pluviométrie annuelle et de la pente moyenne des bassins versants pour les retenues collinaires exploitées et non exploitées sont relativement proches. Il est donc vraisemblable que ce paramètre n'affecte pas l'exploitation des retenues collinaires. La longueur moyenne des pistes d'accès aux retenues collinaires exploitées est significativement supérieure à celles des retenues collinaires non exploitées, résultat en contradiction avec les effets présumés de ce critère qui ne semble donc par déterminant.

La capacité de stockage initiale des retenues collinaires exploitées est en moyenne plus de trois fois supérieure à celle des retenues collinaires non exploitées. La figure 66 confirme cette distribution : la proportion des retenues collinaires exploitées en 2004 et 2005 augmente en fonction de la capacité initiale de stockage.

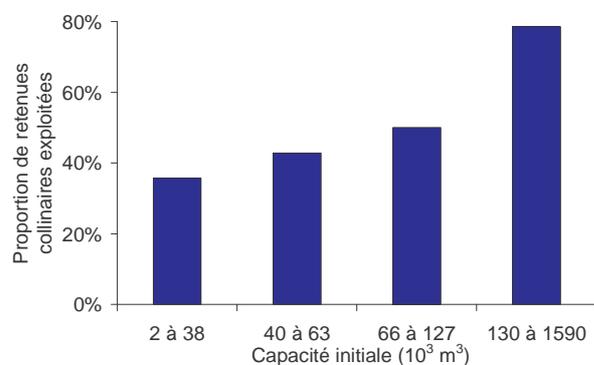


Figure 66. Influence de la capacité initiale de stockage sur l'exploitation des retenues collinaires.

L'âge des retenues collinaires est également l'un des paramètres dont les valeurs sont les plus contrastées entre les deux échantillons. Les retenues collinaires exploitées sont plus récentes de neuf ans en moyenne par rapport aux retenues non exploitées. La figure 67 présente la distribution du nombre de retenues collinaires exploitées et non exploitées en 2004 et 2005 en fonction de leur année de construction.

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

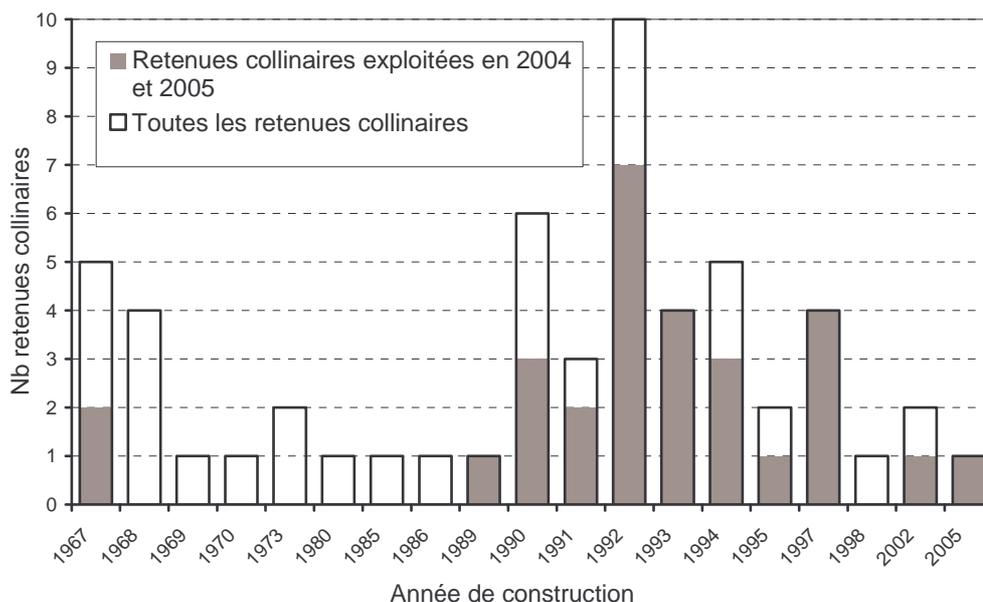


Figure 67. Influence de l'âge des retenues collinaires sur leur exploitation.

Environ 70% des retenues collinaires construites depuis 1989 sont exploitées contre seulement 12% pour les retenues collinaires plus anciennes. 64% des retenues collinaires non exploitées ont été construites avant 1990 (tableaux 2 et 3), année particulièrement pluvieuse au cours de laquelle de nombreux aménagements de CES ont été détruits dans la région du Merguellil (Hamza et Mamou, 1995). De ce fait, nombre de ces aménagements apparaissent presque totalement comblés aujourd'hui.

Cette analyse montre que les paramètres physiques qui expliquent le mieux la présence d'irrigants autour d'une retenue collinaire sont directement liés au volume de la ressource en eau disponible (âge de la retenue collinaire, capacité initiale de stockage). Les paramètres choisis pour caractériser la facilité d'accès et d'utilisation de la ressource (pente du bassin versant) et de valorisation économique de la ressource en eau (accès aux marchés agricoles et aux fournisseurs) ont peu d'effet sur l'exploitation de la retenue collinaire. Il en est de même pour la pluviométrie annuelle qui détermine en partie la demande en eau d'irrigation. Cette analyse ne prétend pas expliquer la distribution des usages de l'eau entre les retenues collinaires puisqu'elle ne se base que sur quelques paramètres facilement mesurables et uniquement physiques. Il est fort probable que d'autres facteurs, plus difficilement mesurables, influencent l'exploitation des retenues collinaires. Les discussions avec les agriculteurs riverains des retenues collinaires et les observations sur le terrain ont montré que les causes déterminant la pratique de l'agriculture irriguée autour des retenues collinaires ne sont pas toujours directement liées au volume de la ressource en eau disponible. A titre d'exemple, la retenue collinaire de Hammam (figure 68), construite en

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

2002, avec une capacité initiale de $850 \times 10^3 \text{ m}^3$ (3^{ème} rang parmi les retenues collinaires du bassin versant du Merguellil selon un classement décroissant) n'est pas exploitée.



Photo : Guillaume Lacombe

Figure 68. Retenue collinaire de Hammam, bassin versant du Merguellil, le 21 avril 2005.

Le gardien du barrage explique que le seul facteur limitant est le manque d'argent nécessaire à l'achat d'une pompe et de tuyaux. Les berges particulièrement abruptes et l'éloignement des terres cultivables (quelques centaines de mètres) nécessiteraient un équipement particulièrement coûteux.

La retenue collinaire de Hafar (figure 69), avec une capacité initiale de stockage de $30 \times 10^3 \text{ m}^3$ (6^{ème} rang sur le classement croissant des capacités initiales de stockage des retenues collinaires du bassin versant du Merguellil) présente une situation totalement opposée : 39 irrigants exploitent cette retenue d'octobre à mars car elle est généralement asséchée le reste de l'année. Ils utilisent des bidons de 20 L qu'ils remplissent et transportent manuellement pour irriguer 175 ha de vergers dont une majorité d'oliviers. Ces deux exemples montrent que l'intensité de l'exploitation d'une retenue peut n'être absolument pas liée au volume de la ressource en eau disponible et peut dépendre de facteurs difficilement quantifiables, tels la facilité d'accès à la ressource en eau.



Photo : Guillaume Lacombe

Figure 69. Retenue collinaire de Hafar (asséchée), le 3 avril 2004

iii. Gains en rendement liés à l'irrigation

La valorisation économique des retenues collinaires ne peut être réellement estimée qu'en connaissant les gains en rendement agronomique des cultures qu'elles irriguent. Les résultats d'enquête ont montré que la principale culture irriguée à partir des retenues collinaires est l'olivier (§ 4.3.1.i). Le gain en rendement de l'olivier lié à l'irrigation s'estime en comparant sa production en régime pluvial strict et en situation irriguée. Le tableau 29 présente les chiffres de la récolte 2004 pour la production des oliviers irrigués à partir des retenues collinaires. Ces valeurs sont issues des enquêtes réalisées durant l'été 2005. La moyenne d'âge de ces oliviers est de 15 ans et 90% des oliviers ont plus de 5 ans.

Tableau 29. Rendements en kilogrammes d'olives par arbre pour la récolte 2004, calculés à partir des résultats d'enquêtes effectuées durant l'été 2005.

Retenue collinaire	Numéro irrigant	Nb arbres	Production 2004 Kg	Rendement Kg/arbre
Nmel	1	200	960	4.8
	2	100	120	1.2
	3	130	800	6.2
	4	175	480	2.7
Gtatis	1	40	290	7.3
Bouchaha	1	50	1040	20.8
Brahim Zaher	1	400	4200	10.5
	2	150	560	3.7
	3	400	840	2.1
	4	400	980	2.5
El Gouazine	1	1008	7600	7.5
	2	600	700	1.2
Fidh M'Bareck	1	50	208	4.2
	2	25	130	5.2
Habsa	1	50	130	2.6
Hafar	1	1152	780	0.7
Hoshas	1	100	624	6.2
M'Richet	1	50	550	11.0
Ghouil	1	800	910	1.1
	2	200	7800	39.0
	3	300	780	2.6
Oued Thal	1	800	5250	6.6
Ain Smili 2	1	700	800	1.1
	2	300	1120	3.7
	3	400	1176	2.9
TOTAL		8580	38828	4.5

Le rendement annuel moyen est de 4,5 kg d'olives par arbre, largement inférieur aux rendements moyens des principaux pays producteurs du bassin méditerranéen, généralement compris entre 15 et 50 kg par arbre (FAO, 2004). Il avoisine les résultats obtenus par Selmi (1996) qui l'a évalué à 4-7 kg/arbre pour les oliveraies irriguées à partir des retenues collinaires dans les gouvernorats de Kasserine, Kairouan, Rouhia et Siliana. En revanche, dans les périmètres irrigués de la plaine de Kairouan, les rendements sont de 25 kg par arbre et 10 kg/arbre en situation non irriguée (Feuillette, 2001). Un olivier irrigué par une retenue collinaire produit donc moins qu'un olivier non irrigué dans la plaine de

Kairouan. Cette différence s'explique probablement par le plus jeune âge des oliviers plantés aux abords des retenues collinaires (15 ans en moyenne). Un olivier atteint sa pleine production à l'âge de 50 ans environ. Les conditions pédoclimatiques particulièrement défavorables dans le bassin versant du barrage El Haouareb, en comparaison avec la plaine de Kairouan, contribuent probablement à ces faibles rendements. Les sols ont des profondeurs faibles, généralement inférieures à un mètre (Dridi, 2000) alors qu'elles peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres dans la plaine de Kairouan. Le climat est également plus rude en altitude avec des gelées possibles, néfastes pour les pousses fructifères. L'irrigation des oliviers à partir des retenues collinaires est donc surtout utile en période de sécheresse pour sauver les jeunes plants d'une mort certaine s'ils n'étaient arrosés. Cet exemple illustre la difficulté à mesurer la valorisation économique des retenues collinaires qui ne peut s'apprécier qu'en termes de volumes prélevés et destinés à l'irrigation.

4.3.2. Estimation des volumes prélevés

Les volumes d'eau apportés aux cultures sont difficilement quantifiables lorsqu'ils sont pompés et directement acheminés vers les parcelles par des tuyaux car les débits de pompages ne sont généralement pas connus. Ils sont calculés à partir des estimations des temps d'irrigation par les personnes enquêtées en supposant que le débit de pompage est de 4,2 L/s (annexe 7.4). Les calculs sont plus précis lorsque l'irrigation se fait par des citernes (uniquement pour les oliviers et les amandiers) dont le nombre de remplissage et la capacité sont généralement bien connus des agriculteurs.

Seuls 37 irrigants parmi les 246 dans le bassin versant du Merguellil ont pu fournir des indications précises sur les calendriers d'irrigation de leurs cultures. Pour chacun d'entre eux, il a été possible de calculer le nombre d'heures de fonctionnement de leur pompe ou le nombre de citernes utilisées pour chaque espèce cultivée. En revanche, pour le maraîchage, les volumes d'irrigation sont toujours rapportés aux surfaces cultivées, déterminant les volumes alloués. Pour les agriculteurs n'ayant pu fournir d'informations précises sur les heures de pompage ou le nombre de citernes utilisées, la détermination des volumes alloués aux parcelles est obtenue à partir d'un volume d'irrigation moyen par arbre ou par surface maraîchère calculé pour les 37 irrigants ayant fourni un calendrier d'irrigation. Les plantations sont subdivisées en trois groupes : olivier, amandier et autres arbres³⁶. Pour le maraîchage, les cultures d'été (piment, tomate, pastèques, melon) et d'hiver (fève, petit poix, concombre, persil, oignon, poix chiche, navet, carotte et courge) sont différenciées car elles ont des besoins en eau très différents (Feuillette, 2001).

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

Les résultats sont présentés dans les tableaux 30, 31 et 32 pour l'arboriculture et dans le tableau 33 pour le maraîchage. Pour chacun des cinq groupes de cultures prédéfinis (olivier, amandier, autres arbres, maraîchage été et maraîchage hiver), un volume moyen d'irrigation et son écart-type sont calculés en pondérant les valeurs obtenues pour chaque irrigant par le nombre d'arbres ou la surface de maraîchage irriguée. L'écart-type est assimilé à l'incertitude sur le calcul des volumes alloués à chaque groupe cultural. Dans le cas des oliviers et des amandiers, les doses d'irrigation appliquées par pompage direct et par citernes sont différenciées.

Tableau 30. Estimation des volumes d'irrigation annuels apportés aux oliviers. Les moyennes sont pondérées par le nombre d'arbres de chaque irrigant (idem pour les tableaux 31 à 33)

Retenue collinaire	Numéro irrigant	Nb arbres	Temps irrigation heure/an	Citernes Nb/an	Volume citerne L	Volume irrigation m ³ .arbre ⁻¹ .an ⁻¹
Brahim Zaher	1	1500	120			1.15
	2	150	81			7.78
	3	400	72			2.59
	4 à 11	400	63			2.27
Daoued	1 et 2	500	80			2.30
	3	100	14			2.02
Ain Smili 2	1	500	262			7.55
	2	300	134			6.43
	3	50		48	500	0.48
El Gouazine	1	1380	672			7.01
Faden Bouras	1	650	60			1.33
Fidh Ali	1 à 4	250	18			1.04
Hfaya	1	20	3.5			2.52
Fidh Zitoun	1	200	96			6.91
Habsa	1	50		47	1000	0.94
Ghouil	1	1200		220	3000	0.55
	2	200		45	3000	0.68
Oued Thal	1	200		8640	40	1.73
Moyenne globale						2.78
Moyenne pompes						3.12
Ecart types pompes						2.31
Moyenne citernes						0.71
Ecart types citernes						0.38

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

Tableau 31. Estimation des volumes d'irrigation annuels apportés aux amandiers.

Retenue collinaire	Numéro irrigant	Nb arbres	Temps irrigation heure/an	Citernes Nb/an	Volume citerne L	Volume irrigation m ³ .arbre ⁻¹ .an ⁻¹
Daoued	1	10	4			5.76
	2	10	3			4.32
Mora	1	100	24			3.46
Ghouil	1	50		142	500	1.42
Smili	1	100		10	4000	0.40
	2	300		20	4000	0.27
	3	200	105			7.55
	4	50	22			6.43
Fidh Ali	1	250	42			2.42
El Gouazine	1	800	78			1.40
	2	300	28			1.34
Moyenne globale						2.12
Moyenne pompe						2.56
Ecart type pompe						2.08
Moyenne citerne						0.42
Ecart type citerne						0.36

Tableau 32. Estimation des volumes d'irrigation annuels apportés aux arbres fruitiers (à l'exception des oliviers et des amandiers).

Retenue collinaire	Numéro irrigant	Nb arbres	Temps irrigation heure/an	Volume irrigation m ³ .arbre ⁻¹ .an ⁻¹	
Grenadier	Mora	1	50	80	23.04
	Ghouil	1	30	54	25.92
	Smili	1	100	90	12.96
	El Gouazine	1	40	10	3.60
	Moyenne				15.32
	Ecart type			7.51	
Pommier	Smili	1	100	52	7.54
		2	10	4	6.44
	El Gouazine	1	30	36	17.28
		2	150	120	11.52
	Moyenne			10.57	
	Ecart type			2.98	
Abricotier	Mora	1	150	210	20.16
	Smili	1	80	42	7.54
	El Gouazine	1	35	20	8.23
	Moyenne				14.78
	Ecart type			6.15	
Figuier	Daoued	1	200	129	9.27
		2	100	13	1.90
		3	100	13	1.90
		4	350	448	18.43
Figuier	Mora	1	15	20	19.20
	Ghouil	1	50	40	11.52
	Smili	1	10	10	14.40
	Moyenne			11.75	
	Ecart type			6.71	
Cerisier	Daoued	1	600	386	9.26
		2	650	784	17.37
	Moyenne				13.48
	Ecart type			4.05	
Moyenne globale				12.94	
Ecart type global				5.33	

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

Tableau 33. Estimation des volumes d'irrigation annuels apportés aux productions maraîchères.

Retenue collinaire	Irrigant	Surface irriguée (ha)	Saison	Durée irrigation heure/an	Volume irrigation m ³ .ha ⁻¹ .an ⁻¹
Gassaa	1	1	été	421	6 062
		1	hiver	200	2 880
	2	0.375	été	115	4 416
		0.375	hiver	20	768
Ain Smili 2	1	0.5	été	130	3 744
		0.5	hiver	45	1 296
Fidh M'bareck	1	1	été	740	10 656
		1	hiver	120	1 728
Hoshas	1	1.25	été	250	2 880
M'Richet	1	2	été	620	4 464
Fidh Zitoun	1	0.5	été	150	4 320
		0.5	hiver	40	1 152
Gatar	1	1	été	450	6 480
		1	hiver	140	2 016
	2	0.5	été	130	3 744
		0.25	hiver	40	2 304
	3	0.5	été	220	6 336
		0.5	hiver	35	1 008
Hfaya	1	0.66	été	150	3 273
		0.33	hiver	20	873
Kraroub	1	0.25	été	90	5 184
Mahbes	1 à 3	1	hiver	200	2 880
		0.25	été	140	8 064
		0.25	hiver	10	576
Moyenne été					5 307
Ecart type été					2 209
Moyenne hiver					1 868
Ecart type hiver					784

Les tableaux 30 et 31 montrent que les volumes d'eau moyens annuels apportés aux oliviers et aux amandiers sont faibles : respectivement 2,8 et 2,1 m³.arbre⁻¹.an⁻¹. Avec une densité moyenne de plantation de 100 arbres par hectare, ces volumes correspondent aux plus faibles doses généralement appliquées sous climat semi-aride, variant généralement entre 180 et 2 600 m³/ha, en fonction des conditions pédoclimatiques (Nuberg et Yunusa, 2003). Les doses appliquées à partir d'une citerne (respectivement 0,7 et 0,4 m³.an⁻¹.arbre⁻¹ en moyenne) sont nettement inférieures aux volumes directement pompés (respectivement 3,1 et 2,6 m³.an⁻¹.arbre⁻¹ en moyenne). Les difficultés liées au transport et le coût plus élevé de l'eau apportée dans les citernes explique probablement cette différence³⁷. Les volumes d'irrigation apportés aux autres variétés arbustives (tableau 32) sont plus élevés que ceux

³⁷ D'après le tableau 41 (annexe 7.4), un litre de gasoil (prix : 0,8 DN/L) permet de pomper environ 8 400 litres d'eau. D'après les résultats d'enquêtes réalisés chez six agriculteurs irrigants avec des citernes qu'ils payent à la livraison, une citerne de 5000 litres coûte en moyenne 25 DN. L'irrigation avec citerne est donc environ 50 fois plus chère qu'avec une pompe.

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

appliqués à l'olivier et à l'amandier, ces deux espèces étant mieux adaptées aux climats secs.

Les valeurs moyennes obtenues pour le maraîchage (tableau 33) ($5,3 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ en été et $1,9 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ en hiver) s'inscrivent parfaitement dans les gammes de valeurs obtenues par Feuillette (2001) qui avait enquêté en 1997 auprès de 40 agriculteurs situés dans la plaine de Kairouan et irrigant à partir de l'aquifère. Elle avait obtenu des valeurs comprises entre $4,0 \times 10^3$ et $5,0 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour le maraîchage d'été et entre $1,0 \times 10^3$ et $1,5 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour le maraîchage d'hiver. En revanche, les volumes d'irrigations apportés aux arbres à partir des retenues collinaires sont nettement inférieurs aux valeurs obtenues par Feuillette (2001) qui avait obtenu les valeurs de $1,5 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour l'olivier et $6,0 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour l'arboriculture fruitière non oléicole. Avec une densité de plantation comprise entre 100 et 150 arbres par hectare, nos estimations varient entre $0,3 \times 10^3$ et $0,4 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour les oliviers, entre $0,2 \times 10^3$ et $0,3 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour les amandiers et entre $1,3 \times 10^3$ et $1,9 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour les autres arbres fruitiers. Ce résultat s'explique probablement par la tolérance plus élevée de l'arboriculture au déficit hydrique alors que les spéculations maraîchères tolèrent mal les épisodes de sécheresse mêmes courts. La stratégie de production consistant à augmenter les surfaces plantées et réduire les apports surfaciques en eau est envisageable pour l'arboriculture alors qu'elle est irréalisable pour le maraîchage. Ceci explique sans doute pourquoi parmi les surfaces irriguées à partir des retenues collinaires, les surfaces maraîchères (10 ha) sont beaucoup plus faibles que celles des vergers (657 ha).

4.3.3. Comparaison des résultats obtenus par enquêtes et par bilan hydrique

Les volumes prélevés estimés à partir des enquêtes sont comparés aux résultats obtenus par bilan hydrique (§ 3.3). Cette comparaison ne peut être effectuée que sur les douze retenues collinaires du réseau HYDROMED. La difficulté majeure dans cette comparaison est le décalage temporel entre les années de mesures utilisées pour les calculs de bilan hydrique (1993-2002) et la situation sur les usages de l'eau observée en 2004-2005. La possibilité d'éventuels changements entre ces deux périodes est analysée au cas par cas.

D'après les calculs de bilan hydrique, les douze retenues collinaires du réseau HYDROMED sont exploitées. Les volumes d'eau moyens prélevés annuellement varient entre $4,1 \times 10^3 \text{ m}^3 \pm 67\%$ (Saadine 2) et $158,7 \times 10^3 \text{ m}^3 \pm 30\%$ (Jedeliane) (tableau 18). En revanche, les résultats des enquêtes indiquent que seules six retenues collinaires sur les douze sont exploitées (El Gouazine, Fidh Ali, Mora, Jedeliane, M'Richet et Brahim Zaher). Les retenues collinaires de Hadada, Janet, Abdessadok, El Moudhi, Fidh Ben Naceur et Saadine 2 ne sont exploitées ni en 2004 ni en 2005, alors que d'autres observations indiquent qu'elles sont exploitées jusqu'en 1999 (Boufaroua et al., 1997; Albergel et al., 2001a). L'envasement quasi-total des retenues collinaires de Saadine 2, Janet et Fidh Ben Naceur explique leur abandon (figure 70, photographie de Saadine 2 non disponible).

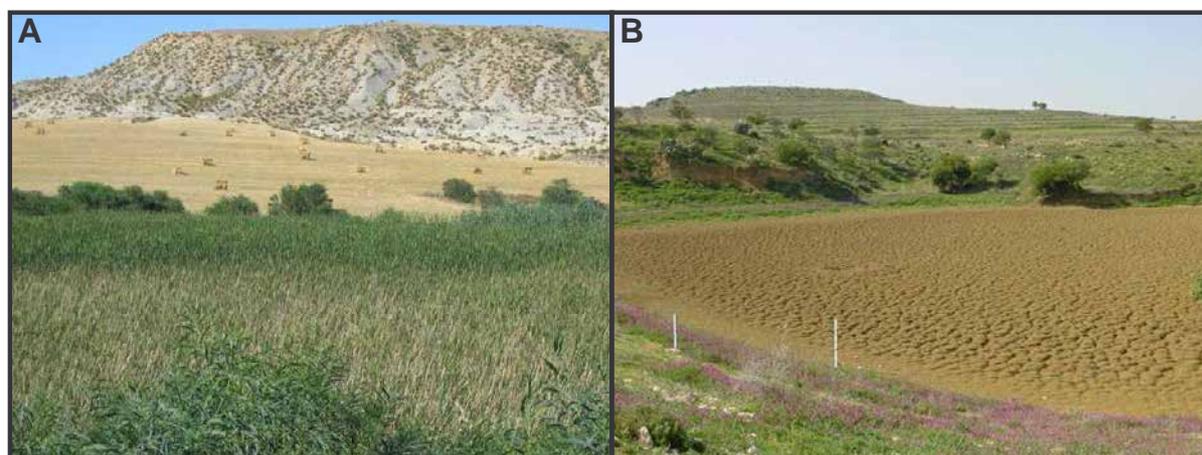


Photo : Guillaume Lacombe

Figure 70. Retenue collinaire de Janet, le 4 juillet 2005 (A) et de Fidh Ben Naceur, le 19 mars 2004 (B), totalement comblées. L'humidité rémanente a favorisé le développement d'une roselière dans la retenue de Janet.

Un verger de 50 ha de pommiers a été planté aux abords de la retenue collinaire de Hadada peu de temps après sa construction. Les retenues de Hadada, El Moudhi et Abdessadok ont été équipées d'une pompe dans le milieu des années 90. Après quelques

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

années d'essai, l'irrigation des vergers nouvellement plantés a cessée, car jugée non rentable.

Pour 3 des 6 retenues collinaires exploitées en 2004 et 2005, les informations collectées par les enquêtes ne permettent aucune quantification des volumes prélevés : les heures de pompage ne sont pas connues à Fidh Ali, les volumes lâchés depuis Jedeliane pour alimenter le périmètre irrigué ne sont pas connus et aucun prélèvement direct n'est réalisé dans la retenue d'El Gouazine. Seuls les volumes prélevés dans Brahim Zaher, Mora et M'Richet ont pu être quantifiés à partir des résultats d'enquêtes.

En 2004 et 2005, onze irrigants exploitent la retenue collinaire de Brahim Zaher chacun possédant sa propre pompe. Ils irriguent tous exclusivement des oliviers. Les irrigations ont lieu trois fois par an, la première au printemps, entre mars et mai, la seconde en été, en juin ou juillet et la dernière au début de l'automne, en septembre ou octobre. A chaque irrigation, les pompes fonctionnent trois jours de suite, à raison de sept à neuf heures par jours. En 2004, le cumul annuel des heures de pompage des onze pompes était de 780 heures, équivalant à $11,7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}^{38}$.

La retenue collinaire de M'Richet est exploitée par un seul agriculteur qui irrigue deux hectares de maraîchage, uniquement en été (16 jours en juin, 16 jours en juillet et 31 jours en août), à l'aide d'une pompe qu'il loue au propriétaire de ses terres. Sa pompe fonctionne entre 5 et 12 heures par jour, en fonction des cultivars, soit 620 heures/an équivalant à $9,4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}^{38}$. Les estimations des volumes prélevés dans les retenues de Brahim Zaher et de M'Richet sont cohérentes avec celles obtenues par bilan hydrique : $11,1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an} \pm 60\%$ pour Brahim Zaher et $6,0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an} \pm 86\%$ pour M'Richet. Nous admettons qu'il n'y a pas eu de changement majeur dans les conduites culturales autour des retenues collinaires de Brahim Zaher et de M'Richet entre la période de mesure utilisée (respectivement 1995-1999 et 1995-2002) pour calculer les bilans hydriques et la campagne d'enquêtes réalisée en 2004 et 2005.

La retenue collinaire de Mora est exploitée par 42 irrigants dont un seul, le gardien du barrage, possède une pompe. Il irrigue 715 arbres. Sa pompe fonctionne quatre heures par jours, 3,75 jours par mois en mars et en octobre, 6 jours par mois en avril et en septembre, 14 jours par mois en mai et en août, 18 jours par mois en juin et juillet, soit 334 heures par an équivalant à $5,1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}^{38}$. Les 41 autres exploitants irriguent au total 1 620 oliviers et

³⁸ Estimation basée sur un débit de 4,2 L/s pour chaque pompe (cf. annexes 7.4).

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

83 amandiers avec des citernes qu'ils remplissent dans la retenue. Aucune donnée n'est disponible pour quantifier le volume qu'ils prélèvent. Celui-ci est estimé à $1,2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an} \pm 54\%$ à partir des moyennes calculées et présentées dans les tableaux 31 et le 32. Le volume total annuel prélevé dans la retenue collinaire Mora est donc estimé à $6,0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an} \pm 11\%$. En 1999, une dizaine d'agriculteurs irriguait 0,5 ha de maraîchage. Le volume moyen annuel prélevé à cette époque et estimé à partir des enquêtes effectuées par Pabiot (1999) s'élève à $1\,450 \text{ m}^3/\text{an}$. Cette valeur, bien que très faible, s'inscrit dans l'intervalle de valeurs obtenu par bilan hydrique ($24,3 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an} \pm 100\%$) pour cette même année et l'estimation pour l'année 2004 ($6,0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an} \pm 11\%$) s'inscrit dans l'intervalle de valeurs obtenu pour l'ensemble de la période de mesures (sept. 96 – août 00) : $28,5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an} \pm 100\%$. L'incertitude extrême sur les valeurs obtenues par bilan hydrique est due à la très grande surface du miroir du plan d'eau (8 ha en moyenne), minimisant les variations du niveau d'eau dues aux prélèvements : un pompage de 8 heures à raison de 4,2 L/s rabat le niveau du plan d'eau de 1,5 mm. Cette lame est difficilement calculable par bilan hydrique, compte tenu de l'incertitude sur l'infiltration et l'évaporation, de l'ordre de 6,5 mm/j au pas de temps journalier.

La comparaison des estimations de pompage obtenues à partir des enquêtes et à partir des calculs de bilan hydrique, pour les retenues collinaires de Brahim Zaher, M'Richet et Mora est satisfaisante : dans les trois cas, les résultats sont cohérents, compte tenu des incertitudes sur les valeurs obtenues par bilan hydrique. Cette analyse comparative atteste de la fiabilité des calendriers d'irrigation obtenus par enquêtes et accredit la valeur de 4,2 L/s (cf. annexe 7.4) utilisée pour convertir les heures de pompage en volumes pompés.

4.3.4. Synthèse

Le tableau 34 détaille les volumes apportés à chaque culture à partir des 22 retenues collinaires exploitées dans le bassin versant du Merguellil, selon qu'ils ont été directement calculés à partir des calendriers d'irrigation (37 agriculteurs, section A du tableau 34) ou estimés à partir des doses moyennes calculées dans les tableaux 30 à 33 (208 agriculteurs, section B du tableau 34). Le tableau 35 présente les volumes totaux prélevés dans les retenues collinaires du bassin versant du Merguellil et calculés à partir des valeurs du tableau 34. Il indique qu'au total, entre 0,2 et 0,4 Mm³ ont été prélevés en 2004. Ce volume se répartit entre l'arboriculture (68% dont 25% pour l'olivier, 7% pour l'amandier et 36% pour les autres arbres) et le maraîchage (32%) couvrant 2% des surfaces irriguées.

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

Tableau 34. Estimation des volumes d'irrigation apportés aux cultures à partir des retenues collinaires du bassin versant du Merguellil. Nb : nombre d'arbres. **Vol :** volume d'irrigation [$10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$]. **V_{\min} (V_{\max}) :** volume d'irrigation minimal (maximal) [$10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$]. **Surf :** surface cultivée en maraîchage [ha]. **Section A :** parcelles pour lesquelles Nb, Surf et Vol sont connus. **Section B :** parcelles pour lesquelles seuls Nb et Surf sont connus. Les volumes d'irrigations sont estimés à partir des moyennes et écarts-types calculés dans les tableaux 30 à 33. **V_{\min} = moyenne – écart-type. V_{\max} = moyenne + écart-type.**

Retenue collinaire	Section A										Section B														
	Arboriculture						Maraîchage				Arboriculture						Maraîchage								
	Olivier		Amandier		Autres		Été		Hiver		Olivier		Amandier		Autres		Été		Hiver						
Nb	Vol	Nb	Vol	Nb	Vol	Surf	Vol	Surf	Vol	Nb	V_{\min}	V_{\max}	Nb	V_{\min}	V_{\max}	Nb	V_{\min}	V_{\max}	Surf	V_{\min}	V_{\max}	Surf	V_{\min}	V_{\max}	
Ain Smili 2	850	5.73	650	1.93	300	2.86	0.5	1.87	0.5	0.65	1050	0.35	1.15			22	0.17	0.40							
Bouchaha 1											862	0.70	4.67			450	3.42	8.23							
Daoued	600	2.51	20	0.29	2000	25.53					1000	0.81	5.42			1125	8.56	20.56							
Faden Bouras	650	0.86									500	0.40	2.71			130	0.99	2.38							
Fidh Ali	1000	1.04	250	0.26							2050	1.66	11.12	1950	0.94	9.06	900	6.85	16.45						
Fidh Zitoun	200	1.38					0.5	2.16	0.5	0.58						31	0.24	0.57							
Gassaa							1.4	7.72	1.4	3.17	250	0.20	1.36	250	0.12	1.16				2.6	8.13	19.73	2.6	2.85	6.96
Gatar							2.0	11.5	1.8	3.10	3300	2.67	17.89	400	0.19	1.86	495	3.77	9.05	1.5	4.68	11.35	1.8	1.91	4.67
Ghouil	1400	0.80	50	0.07	80	0.60					200	0.07	0.22												
Gnaech											410	0.14	0.45	45	0.00	0.04	137	1.04	2.50						
Gtatis											920	0.75	4.99	115	0.06	0.53	20	0.15	0.37	0.2	0.62	1.50	0.2	0.22	0.53
Habsa	50	0.05									490	0.16	0.53	200	0.01	0.16									
Hafar											10165	3.40	11.09	192	0.01	0.15	1257	9.56	22.98						
Hfaya	20	0.05					0.9	3.46	0.3	0.29	75	0.06	0.41			449	3.42	8.21	0.8	2.60	6.30	1.4	1.54	3.76	
Hoshas							1.3	3.60			100	0.08	0.54	113	0.05	0.52									
Kraroub								1.0	2.88		500	0.40	2.71	400	0.19	1.86	348	2.65	6.36						
Mahbes							0.3	2.02	0.3	0.14	1750	1.42	9.49	600	0.29	2.79				0.5	1.55	3.76	0.5	0.54	1.33
MBarek							1.0	10.7	1.0	1.73	125	0.10	0.68	50	0.02	0.23	20	0.15	0.37						
Mora			100	3.74	215	4.46					2020	0.68	2.20	83	0.01	0.06									
Nmel											1320	1.07	7.16	50	0.02	0.23	110	0.84	2.01						
Oued Thal	200	0.35									5525	1.85	6.03	920	0.06	0.72	349	2.66	6.38						
Sidi Sofiane											2770	2.24	15.02	1790	0.86	8.31	66	0.50	1.21						
TOTAL	4970	12.75	1070	6.29	2595	33.46	7.8	43.0	6.7	12.53	35382	19.21	105.84	7158	2.85	27.68	5909	44.96	108.01	5.7	17.58	42.64	6.5	7.05	17.25

4 USAGES DE L'EAU STOCKEE DANS LES RETENUES COLLINAIRES

Tableau 35. Estimation des prélèvements totaux dans les retenues collinaires du bassin versant du Merguellil par addition des valeurs des sections A et B du tableau 34. Légende : cf. tableau 34.

Retenue collinaire	Reconstitution des prélèvements totaux pour l'irrigation des cultures															TOTAL	
	Arboriculture									Maraîchage							
	Olivier			Amandier			Autres			Eté			Hiver			V _{min}	V _{max}
Nb	V _{min}	V _{max}	Nb	V _{min}	V _{max}	Nb	V _{min}	V _{max}	Surf	V _{min}	V _{max}	Surf	V _{min}	V _{max}	V _{min}	V _{max}	
Ain Smili 2	1900	6.08	6.87	650	1.93	1.93	322	3.03	3.26	0.50	1.87	1.87	0.50	0.65	0.65	13.56	14.59
Bouchaha 1	862	0.70	4.67				450	3.42	8.23						4.12	12.90	
Daoued	1600	3.32	7.93	20	0.29	0.29	3125	34.09	46.10						37.70	54.31	
Faden Bouras	1150	1.27	3.58				130	0.99	2.38						2.26	5.95	
Fidh Ali	3050	2.70	12.15	2200	1.20	9.32	900	6.85	16.45						10.74	37.92	
Fidh Zitoun	200	1.38	1.38				31	0.24	0.57	0.50	2.16	2.16	0.50	0.58	0.58	4.35	4.69
Gassaa	250	0.20	1.36	250	0.12	1.16				4.00	15.85	27.45	4.00	6.01	10.13	22.19	40.09
Gatar	3300	2.67	17.89	400	0.19	1.86	495	3.77	9.05	3.51	16.20	22.87	3.51	5.00	7.76	27.83	59.43
Ghouil	1600	0.86	1.01	50	0.07	0.07	80	0.60	0.60						1.53	1.69	
Gnaech	410	0.14	0.45	45	0.00	0.04	137	1.04	2.50						1.18	2.99	
Gtatis	920	0.75	4.99	115	0.06	0.53	20	0.15	0.37	0.20	0.62	1.50	0.20	0.22	0.53	1.79	7.92
Habsa	540	0.21	0.58	200	0.01	0.16									0.22	0.74	
Hafar	10165	3.40	11.09	192	0.01	0.15	1257	9.56	22.98						12.98	34.22	
Hfaya	95	0.11	0.46				449	3.42	8.21	1.75	6.05	9.75	1.75	1.83	4.05	11.41	22.47
Hoshas	100	0.08	0.54	113	0.05	0.52				1.25	3.60	3.60			3.74	4.67	
Kraroub	500	0.40	2.71	400	0.19	1.86	348	2.65	6.36				1.00	2.88	2.88	6.13	13.81
Mahbes	1750	1.42	9.49	600	0.29	2.79				0.75	3.57	5.77	0.75	0.69	1.47	5.96	19.52
MBarek	125	0.10	0.68	50	0.02	0.23	20	0.15	0.37	1.00	10.66	10.66	1.00	1.73	1.73	12.66	13.66
Mora	2020	0.68	2.20	183	3.74	3.80	215	4.46	4.46						8.88	10.47	
Nmel	1320	1.07	7.16	50	0.02	0.23	110	0.84	2.01						1.93	9.40	
Oued Thal	5725	2.19	6.37	920	0.06	0.72	349	2.66	6.38						4.91	13.47	
Sidi Sofiane	2770	2.24	15.02	1790	0.86	8.31	66	0.50	1.21						3.61	24.54	
TOTAL	40352	31.96	118.59	8228	9.14	33.97	8504	78.42	141.47	13.46	60.57	85.63	13.21	19.58	29.78	199.68	409.44
Moyenne	1834	1.45	5.39	457	0.51	1.89	472	4.36	7.86	1.50	6.73	9.51	1.47	2.18	3.31	9.08	18.61
Médiane	1235	0.97	4.12	196	0.10	0.63	269	2.65	3.86	1.00	3.60	5.77	1.00	1.73	1.73	5.43	13.57
Minimum	95	0.08	0.45	20	0.00	0.04	20	0.15	0.37	0.20	0.62	1.50	0.20	0.22	0.53	0.22	0.74
Maximum	10165	6.08	17.89	2200	3.74	9.32	3125	34.09	46.10	4.00	16.20	27.45	4.00	6.01	10.13	37.70	59.43

4.4. Conclusion

Cette étude avait pour objectif de caractériser les usages de l'eau dans les retenues collinaires du bassin versant du Merguellil. Des enquêtes réalisées auprès des agriculteurs irrigants ont permis d'estimer les volumes moyens annuels prélevés dans chacune des retenues collinaires. L'incertitude sur les résultats est grande et peut dépasser dans certains cas 100%. Elle est principalement due à la méthode utilisée, reposant sur une estimation subjective des variables étudiées, sans réelles mesures. Compte tenu de cette incertitude, les valeurs obtenues sont similaires aux résultats calculés par bilan hydrique (§ 3.3) suggérant que cette méthode basée sur des enquêtes est relativement fiable.

5. IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

5.1 Modification de la relation pluie-débit.....	192
5.2 Redistribution de la ressource en eau.....	217
5.3 Résultats et discussion.....	224

L'impact des retenues collinaires sur la redistribution des flux hydriques a été caractérisé au niveau local par bilan hydrique (chapitre 3) et à partir d'enquêtes en milieu paysan (chapitre 4). L'impact des aménagements de CES sur la redistribution de la ressource en eau à l'échelle du bassin versant du Merguellil est évalué en trois étapes. La première (§ 5.1) analyse l'évolution de la relation pluie-débit dans le bassin versant du Merguellil et quantifie la réduction des écoulements induites par les aménagements de CES. La deuxième (§ 5.2) détermine les impacts respectifs des deux catégories d'aménagements sur les écoulements et dresse leur bilan hydrique global. La troisième (§ 5.3) intègre les résultats obtenus en comparant les bilans hydriques globaux des volumes stockés dans le bassin versant du Merguellil en situation non aménagée (tous les écoulements produits sont collectés par le barrage El Haouareb) et en situation aménagée.

5.1. Modification de la relation pluie-débit

Cette partie a fait l'objet d'un article soumis le 25 avril 2007 à « Journal of Hydrology » : « Hydrological impact of water and soil conservation works in the Merguellil catchment of central Tunisia » (Lacombe G., Cappelaere B. and C. Leduc) figurant en annexe 7.6.

5.1.1. Etat de l'art sur les études d'impact hydrologique

Dans les milieux semi-arides, la plupart des études d'impact hydrologique ont été conduites dans des contextes de changement d'occupation des sols comme la déforestation ou la reforestation (par exemple Leduc et al. (2001) au Niger, Siriwardena et al. (2006) en Australie), l'intensification des pratiques agricoles (par exemple Lorup et al. (1998) au Zimbabwe) ou en période de changement climatique (par exemple Séguis et al. (2004) dans le Sahel). Les études sur l'effet des aménagements de CES sur l'hydrologie des bassins versants ont surtout concernés les changements induits par la construction de grands barrages (cf. Batalla et al. (2004) en Espagne, Güntner et al. (2004) dans le Nordeste Brésil, Thoms et Sheldon (2000) en Australie). Les études d'impact hydrologique des techniques de versant (i.e. banquettes, haies) sont extrêmement rares dans les grands bassins versants (plus de 100 km²). A ces échelles, les obstacles majeurs sont l'hétérogénéité des facteurs affectant la relation pluie-débit et la rareté des données hydrométéorologiques. Il existe cependant quelques cas d'études. Xiubin et al. (2003) par exemple, ont examiné la corrélation entre la superficie des surfaces aménagées par des techniques de CES et la réduction des écoulements à l'exutoire de trois bassins versants (362 000 km², 1121 km² et 70 km²) dans la vallée du Fleuve Jaune en Chine. Ils ont montré que des surfaces aménagées correspondant à 26,0%, 28,3% et 56,3% de la surface totale du bassin versant

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

ont respectivement induit des réductions d'écoulement de 49,4%, 52,6% et 49,7%. Ces chiffres montrent que la réponse hydrologique des bassins versants aux aménagements de conservation ne varie pas linéairement en fonction des surfaces aménagées et dépend très probablement de la taille du bassin versant.

La plupart des travaux de recherche sur l'impact hydrologique des aménagements de CES de versant ont été conduits à l'échelle de la parcelle ou sur de petits bassins versants n'excédant pas quelques dizaines de kilomètres carrés. En Tunisie centrale, Nasri et al. (2004b) ont étudié l'impact hydrologique de banquettes dans le bassin versant de la retenue collinaire d'El Gouazine (figure 18) d'une superficie de 18,1 km², puis sur une parcelle cultivée de 0,11 km² (com. pers. Nasri, 2006). Dans les deux cas, l'introduction des banquettes s'est traduite par une réduction du ruissellement comprise entre 50% et 90% pour des pluies inférieures à 60-70 mm/j. Dans le Sud tunisien, Nasri et al. (2004a) ont montré qu'un système traditionnel de tabias³⁹ installé dans un bassin versant de 0,26 km² a fait totalement disparaître le ruissellement à l'exutoire du bassin. Dans les îles du Cap Vert, Smolikowski et al. (2001) ont montré que seules les pluies dont l'intensité dépasse 40 mm/h provoquent du ruissellement sur des parcelles de 4 et 100 m² aménagées de deux manières : paillage avec des chaumes de maïs et bandes enherbées avec des buissons. Dans la partie semi-aride du Kenya, Wakindiki et Ben-Hur (2002) ont mesuré l'effet de techniques indigènes de conservation des eaux et des sols (cordons de pierres sèches) sur le ruissellement produit par douze parcelles de 12 m² chacune. Ils ont montré que ces techniques ont réduit de moitié les écoulements de surface. Toutes ces études hydrologiques locales n'ont jamais été étendues à de plus grandes échelles ni fait l'objet d'agrégations pour estimer leur impact régional.

5.1.2. Problèmes liés à la détection des changements hydrologiques

i. Particularités des grands bassins versants

Dans les grands bassins versants (plus de 100 km²), l'identification des changements hydrologiques induits par une modification environnementale particulière est difficile car les facteurs susceptibles d'altérer la relation pluie-débit sont nombreux et présentent souvent une très forte variabilité spatio-temporelle. De plus, lorsqu'un changement affecte seulement

³⁹ Tabias : bourrelets de terre de forme trapézoïdale, armés à l'aval d'un mur de pierres et sur les côtés, d'un exutoire empierré, haut de deux à cinq mètres barrant une vallée de quelques dizaines de mètres de large (Roose, 1994).

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

une partie d'un bassin versant, l'amplitude de son impact devient souvent peu significative à l'échelle de tout le bassin versant. A titre d'exemple, Nandakumar et Mein (1997) ont montré qu'il serait nécessaire de déforester plus de 65% de la surface d'un bassin versant de 520 ha recouvert de forêt d'eucalyptus pour que l'augmentation consécutive des écoulements à l'exutoire deviennent perceptible avec un indice de confiance d'au moins 90%.

ii. Facteurs contrôlant la relation pluie-débit

Les facteurs altérant la production des écoulements peuvent être regroupés en deux catégories en fonction de leur variabilité temporelle.

- La première catégorie réunit les facteurs qui agissent à l'échelle événementielle et qui présentent la fréquence de variation la plus élevée. Ces facteurs sont directement liés aux conditions météorologiques. Dans les milieux semi-arides, la plupart des auteurs s'entendent pour désigner l'intensité de la pluie comme le facteur principal contrôlant le ruissellement (Bradford et al., 1987; Martinez-Mena et al., 1998; Canton et al., 2001), alors que l'humidité initiale du sol joue un rôle secondaire (Karnieli et Ben Asher, 1993; Fitzjohn et al., 1998; Castillo et al., 2003; Peugeot et al., 2003). Ces facteurs induisent une grande variabilité dans la relation pluie-débit : deux averses de même cumul pluviométrique peuvent générer des lames ruisselées de hauteurs très différentes.

- La seconde catégorie rassemble les facteurs qui agissent progressivement et modifient la relation pluie-débit de façon unidirectionnelle : diminution ou augmentation du ruissellement. Il s'agit essentiellement des changements climatiques (Servat et al., 1997), des changements d'occupation des sols (Calder et al., 1993; Fahey et Jackson, 1997), des variations du niveau des nappes modifiant l'intensité des transferts hydriques entre la surface et le milieu souterrain (Matteo et Dragoni, 2005) et des aménagements de CES.

Pour identifier l'impact hydrologique d'un facteur de la seconde catégorie (faible variabilité temporelle et modification unidirectionnelle de la relation pluie-débit), la principale difficulté consiste à distinguer son effet hydrologique de ceux induits par les facteurs de la première catégorie (agissant à l'échelle événementielle). Les données hydrométéorologiques à haute résolution spatio-temporelle permettent généralement de modéliser la relation entre la variabilité des facteurs de la première catégorie et du ruissellement. Les changements inexpliqués par le modèle et intervenant progressivement sont alors attribués aux facteurs de la seconde catégorie. Lorsque la résolution des données est insuffisante pour identifier l'impact des facteurs de la première catégorie, ceux-ci provoquent un bruit de fond dans la relation pluie-débit. De longues chroniques de données

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

sont alors nécessaires à l'identification des changements hydrologiques induits par les facteurs de la seconde catégorie.

5.1.3. Mesures disponibles et période d'étude

La figure 71 localise les stations de mesures hydrométéorologiques utilisées dans cette étude et les aménagements de CES construits depuis 1989, année initiant la période d'étude.

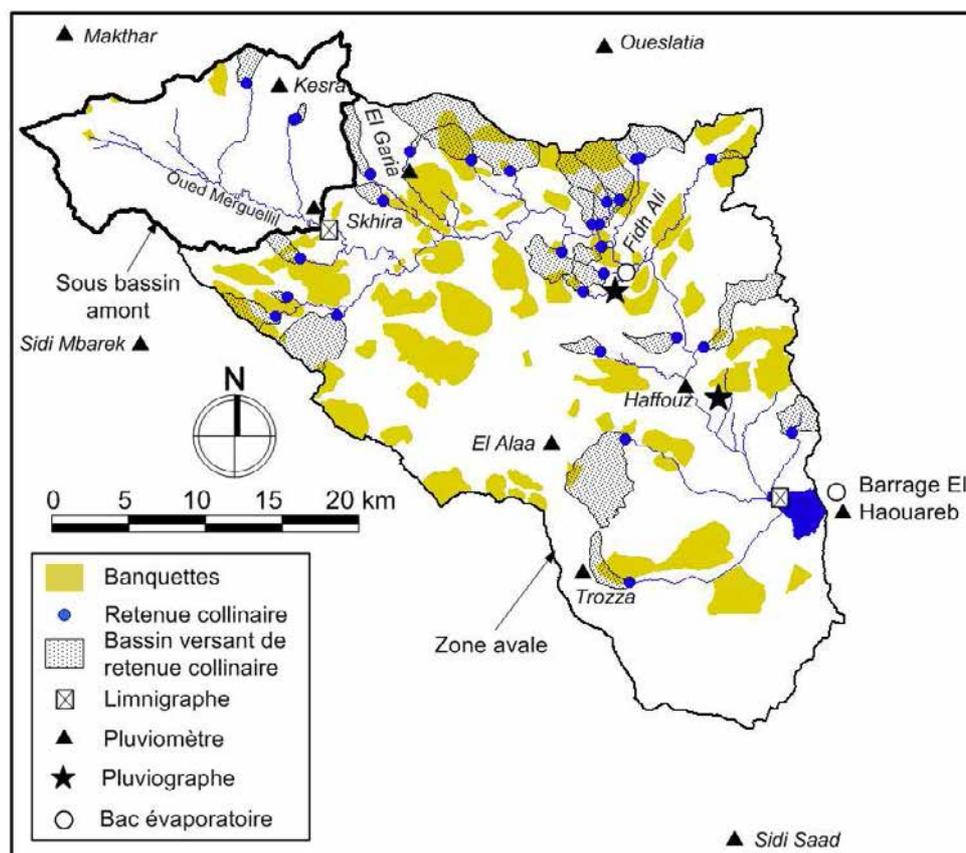


Figure 71. Dispositif de mesure et localisation des aménagements de CES construits entre 1989 et 2005.

i. Mesures hydrométéorologiques

Débits

Deux stations de mesure sont utilisées dans le cadre de cette étude. La station de Skhira (figure 71) est localisée sur l'oued Merguellil, 54 km à l'amont du barrage El Haouareb. Depuis 1974, le niveau de l'oued est enregistré en continu par un limnigraphe et converti en débit grâce à une courbe de tarage exceptionnellement fiable et temporellement stable du fait de la section entièrement rocheuse où a été implantée la sonde de mesure. La deuxième station est le barrage El Haouareb mis en service en août 1989. Les apports journaliers sont estimés à partir du bilan hydrique du barrage (§ 3.4.2). Deux autres points de

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

jaugeage existent dans le bassin versant du Merguellil : les stations de Haffouz et de Zebbes. Leurs données ne sont pas utilisées dans cette étude car jugées peu fiables ou trop récentes. La station de Haffouz, mise en service en 1965, a été construite sur un lit sableux dont la section, particulièrement instable et modifiée à chaque crue, rend inexploitable les mesures de niveaux des basses eaux. Jusqu'en 1968, le limnigraphe est défectueux. Les chroniques de mesure présentent de nombreuses lacunes entre 1968 et 1975. Le téléphérique utilisé pour mesurer les crues ne permet qu'une mesure par demie heure, intervalle trop long pour quantifier précisément chaque crue. La station de Zebbes, mise en service en 1996, est trop récente pour une étude d'impact car les aménagements de son bassin versant lui sont antérieurs.

Météorologie

Le réseau pluviométrique choisi est assez proche de celui utilisé pour décrire la pluviométrie du bassin versant du Merguellil (§ 2.3.1.i) avec quelques différences cependant : les stations de Chérichira, Chébika, Sidi Ali Nasrallah et Hajeb El Ayoun (figure 5) ne sont pas utilisées ici car elles sont situées à l'extérieur du bassin versant et leur aire d'influence calculée avec la méthode de Thiessen (1911) ne recouvre pas le bassin versant du Merguellil. Onze stations pluviométriques sont utilisées (figure 71). Elles fournissent des mesures journalières depuis 1981. Les jours sans mesure représentent 2,1% des jours.stations. Une valeur de pluie leur est attribuée à partir d'estimations obtenues par régression linéaire multiple utilisant les stations les mieux corrélées ($R^2 > 0,6$). 80% de ces valeurs estimées sont nulles et correspondent donc à des jours sans pluie. Deux pluviographes enregistreurs (Fidh Ali et Haffouz, distants de 10 km) fournissent des enregistrements continus à partir d'augets basculeurs tarés à 0,5 mm entre 1989 et 2002 (figure 71). Des mesures journalières d'évaporation sont fournies par les bacs évaporatoires de Fidh Ali (période 1993-2000) et du barrage El Haouareb (période 1989-2005) (figure 71).

ii. Les aménagements de conservation des eaux et des sols

La période d'étude de la relation pluie-débit (août 1989 – décembre 2005) commence lorsque toutes les mesures hydro-météorologiques sont simultanément disponibles. Seuls les aménagements de CES construits au cours de cette période sont donc considérés. Il s'agit donc d'un sous ensemble des aménagements présentés en partie 2.3.1 (figures 15 et 16). Ce sous ensemble comporte 29 retenues collinaires drainant 128 km² et 234 km² de zones aménagées en banquettes dont 12% sont situées dans les bassins versants des retenues collinaires. La totalité de ces aménagements contrôle 28% de la superficie du bassin versant du Merguellil. 97% de ces surfaces contrôlées sont localisées à l'extérieur du bassin versant jaugé par la station de Skhira (dénommé par la suite « sous-bassin amont »),

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

dans la partie aval du bassin versant du Merguellil (dénommée par la suite « zone aval ») dont ils drainent 32% de la superficie. La forêt de Skhira dans le sous-bassin amont explique probablement la quasi absence d'aménagements de CES dans cette zone (figures 71 et 72).

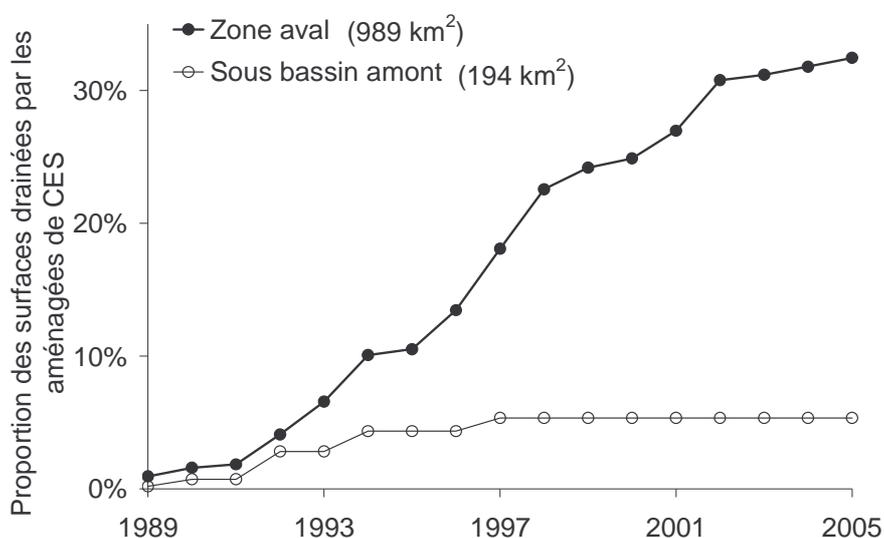


Figure 72. Surfaces drainées par les banquettes et les retenues collinaires dans les deux parties du bassin versant du Merguellil entre 1989 et 2005. (Sources : cf. figure 15). Surfaces aménagées en banquette et incluses dans les bassins versants des retenues collinaires non comptabilisées.

5.1.4. Analyse des données

La période d'étude pour l'analyse de la relation pluie-débit commence en août 1989 et s'achève en décembre 2005. Les chroniques de pluie journalière, disponibles depuis 1981, sont utilisées dans l'analyse des pluies journalières.

i. Variabilité hydro-pluviométrique

La méthode des polygones de Thiessen (1911) est utilisée pour calculer les lames précipitées sur le sous-bassin amont et sur la zone aval.

Cumuls hydro-pluviométriques annuels

La pluie et le ruissellement annuels correspondant au sous-bassin amont et à la totalité du bassin versant du Merguellil sont comparés sur la figure 73. En 1990 et 1991, la pluie du bassin versant du Merguellil est 17% supérieure à la pluie du sous-bassin amont. De 1992 à 2005, la situation pluviométrique est opposée aux deux premières années. De 1990 à 1996, les débits mesurés à l'exutoire du bassin versant du Merguellil (barrage d'El Haouareb) sont nettement supérieurs à ceux mesurés à la station de Skhira, en accord avec la configuration spatiale des deux bassins versants. De 1997 à 2004, les différences entre les écoulements

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

annuels mesurés à ces deux stations sont considérablement plus faibles. En 2005, les écoulements diffèrent à nouveaux.

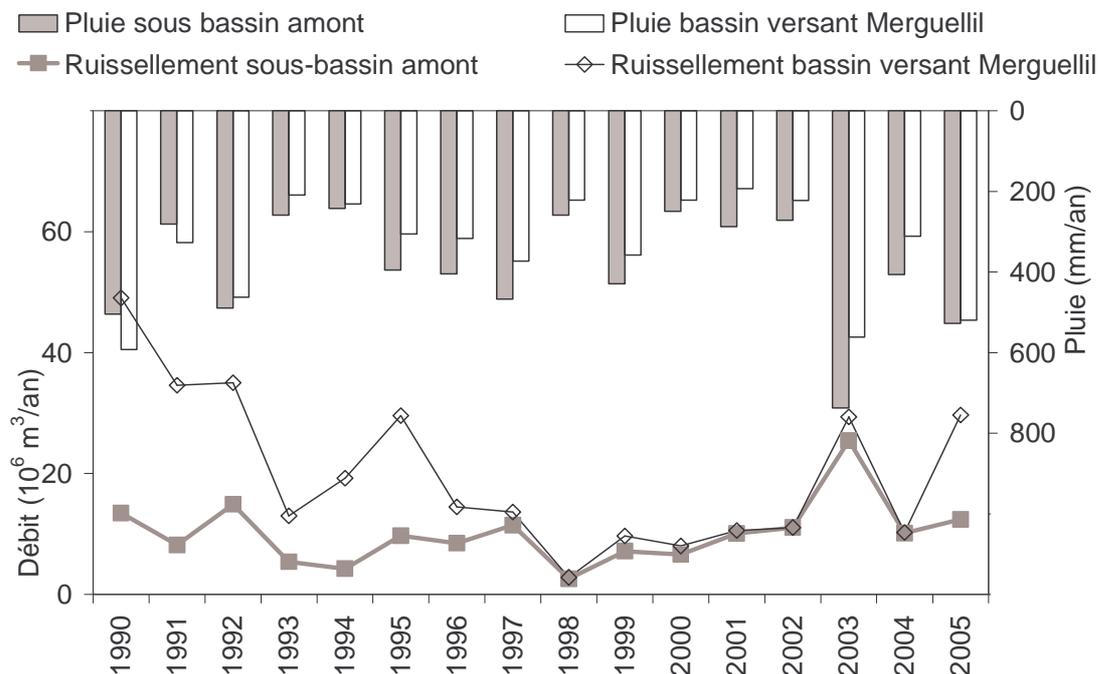


Figure 73. Cumuls annuels des lames précipitées et ruisselées dans le bassin versant du Merguellil.

Pluie journalière

La méthode de la double masse est appliquée aux pluies journalières précipitées sur la zone aval et sur le sous-bassin amont entre 1981 et 2005. Ces lames moyennes sont calculées par la méthode de Thiessen (1911) à partir des mesures journalières des onze pluviomètres (figure 74). Avant octobre 1989 et après avril 1992, la pluie est plus forte dans le sous-bassin amont, plus exposé aux vents dominants du nord (cf. figure 5). D'octobre 1989 à avril 1992, les cumuls pluviométriques journaliers sont similaires dans les deux parties du bassin versant du Merguellil.

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

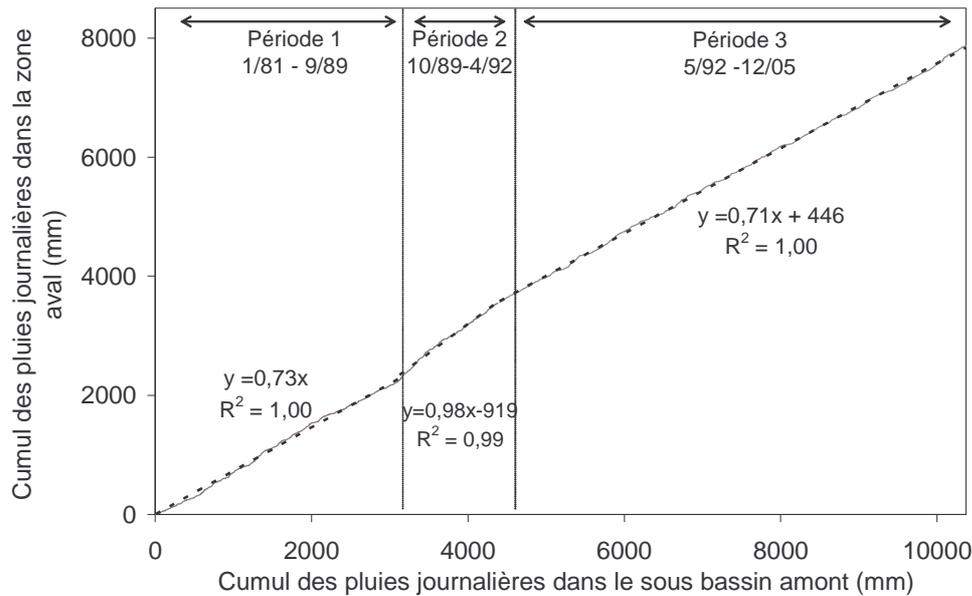


Figure 74. Ligne continue : courbe obtenue par la méthode de la double masse appliquée aux pluies journalières dans le sous-bassin amont et dans la zone aval de 1981 à 2005. Lignes pointillées : régressions linéaires.

Les cumuls annuels de pluie produits par différentes intensités de pluies journalières sont calculés sur six périodes successives de plusieurs années et regroupés dans le tableau 36. Les pluies sont plus faibles dans la zone aval pour toutes les gammes d'intensité de pluies et sur toutes les périodes, à l'exception des pluies supérieures à 20 mm/jour sur la période 1989-1992. Au cours de cette période, les pluies sont plus fortes dans les deux parties du bassin versant du Merguellil.

Tableau 36. Lames moyennes précipitées par classes d'intensités de pluies dans le sous-bassin amont et dans la zone aval, sur six périodes successives.

Intensité des pluies (mm/jour)	Lame moyenne précipitée (mm/an)												Ratio (aval/amont) (%)										
	Sous bassin amont						Zone aval						81-84		85-88		89-92		93-96		97-00		01-05
< 10	166	148	170	152	172	135	109	98	129	119	116	113	66	66	76	78	67	84					
10 to 20	107	100	123	118	117	115	81	74	97	82	77	92	76	75	79	69	66	80					
20 to 30	59	50	72	51	64	53	52	43	85	36	58	35	87	87	118	70	91	66					
> 30	40	42	131	64	63	166	34	26	142	44	47	95	85	64	109	69	75	57					
Total	372	339	495	385	416	468	276	242	453	280	298	334	74	71	91	73	72	71					

Définition des évènements pluie-débit

Bien que le réseau des onze pluviomètres et le barrage d'El Haouareb fournissent des données pluie-débit brutes au pas de temps journalier, ils permettent néanmoins de quantifier le cumul pluie-débit de chaque averse. La plupart des pluies se produisent sous la forme d'orages intenses et courts. L'analyse des enregistrements continus de pluie aux niveaux des pluviographes de 9 retenues collinaires (cf. § 3.4.1) a montré que les averses durent 32 minutes en moyenne et n'excèdent jamais 5 heures. 90% des évènements

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

pluvieux durent moins de 70 minutes. 93% des cumuls évènementiels correspondent exactement aux cumuls journaliers.

La hauteur des évènements pluvieux dans le sous-bassin amont et dans la zone aval est définie comme la somme des pluies journalières dépassant 3 mm/j sur des jours consécutifs. 276 évènements sont identifiés dans la zone aval et 344 dans le sous-bassin amont. 96% de ces évènements sont constitués d'un ou de deux jours de pluie. Les évènements durant plus de trois jours ne sont pas pris en compte car ils ne génèrent que 4% des écoulements pendant la période étudiée. Les évènements pluvieux de la zone aval ou du sous-bassin amont ayant lieu le même jour ou avec un jour de décalage sont appariés. Ceci aboutit à 372 évènements pluvieux dont 208 concernent tout le bassin versant du Merguellil. 48 sont localisés dans la zone aval uniquement et 112 dans le sous-bassin amont.

En raison de la végétation éparse, des sols à faible capacité de rétention et du relief prononcé dans le bassin versant du Merguellil, les temps de réaction des écoulements aux pluies sont courts. Les enregistrements à la station de Skhira entre août 1989 et décembre 2005 indiquent que 83% des crues (commençant lorsque le niveau d'eau augmente et s'achevant lorsqu'il retrouve son état d'origine) durent moins de 24 heures. Les jours comportant plus d'une crue sont rares et ces crues représentent moins de 5% du nombre total de crues. Le temps de concentration dans le bassin versant du Merguellil, calculé avec la formule de Kirpich (1940), est de dix heures. Dans le sous-bassin amont, il est directement estimé à partir des hydrogrammes de crue. Il est égal à une heure et demie (Gogien, 1998). Le ruissellement produit par chaque évènement pluvieux est estimé à chaque station en sommant les enregistrements journaliers dépassant l'écoulement de base. Seules 6% des crues commencent avant que les écoulements de la précédente crue n'aient retrouvé le débit de base. Par conséquent, le module de chaque crue est facilement déterminable à partir des données journalières et apparié avec l'évènement pluvieux correspondant⁴⁰.

Intensités sub-journalières des pluies

L'intensité des pluies aux échelles spatio-temporelles les plus fines est l'un des principaux paramètres climatiques déterminant l'intensité du ruissellement dans les milieux semi-arides (Cudennec et al., 2005; Vischel et Lebel, 2007). Sa variabilité temporelle est analysée à partir des enregistrements continus des stations de Haffouz et de Fidh Ali,

⁴⁰ Une conclusion analogue avait été obtenue pour les bassins versants des retenues collinaires (cf. § 3.4.2.iii).

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

couvrant respectivement les périodes 1989-1996 et 1993-2002. Pour chaque évènement pluvieux défini précédemment dans la zone aval, les hauteurs maximales précipitées sont calculées sur des durées comprises entre cinq minutes et neuf heures. Les quartiles, moyennes et écarts-types correspondant à chaque durée et pour deux périodes successives sont présentés sur la figure 75. Les données de la première période (1989-1996) sont issues soit de la station de Haffouz exclusivement (P1), soit des deux stations (P1') : la station de Haffouz pour la période 1989-1992 et la station de Fidh Ali pour la période 1993-1996. P2 (1997-2002) provient uniquement de la station de Fidh Ali.

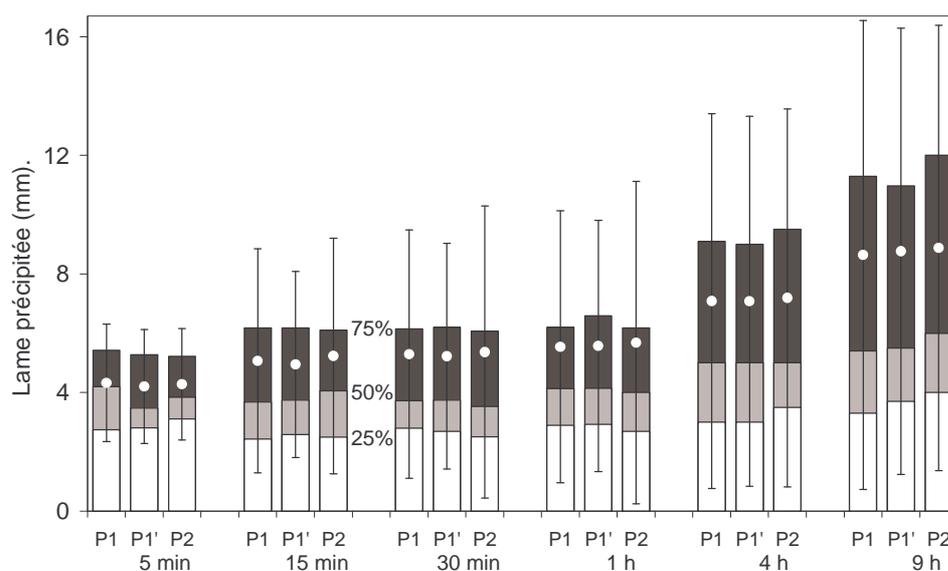


Figure 75. Hauteurs maximales précipitées pendant des durées comprises entre 5 minutes et 9 heures. Histogrammes : quartiles 25%, 50% et 75%. Points blancs : moyennes. Barres : écarts-types. Voir § « Intensités sub-journalières des pluies » pour définition de P1, P1' et P2.

Pour chaque durée comprise entre 5 minutes et 9 heures, les valeurs des moyennes et des quartiles correspondant à P1 et P1' sont équivalentes. Ce résultat suggère une équivalence entre les enregistrements des deux stations. La comparaison de P1 et P2 ou de P1' et P2 montre une stabilité temporelle dans les intensités sub-journalières des pluies entre les deux périodes.

Pluies antérieures

Après l'intensité des pluies, les pluies antérieures représentent l'un des principaux paramètres climatiques contrôlant la production du ruissellement. Les pluies antérieures sont définies ici comme le cumul des lames précipitées au cours des cinq derniers jours précédant chaque évènement pluvieux. La figure 76 montre la distribution des pluies antérieures dans le sous-bassin amont (A) et dans la zone aval (B) au cours des périodes 1989-1996 et 1997-2005.

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

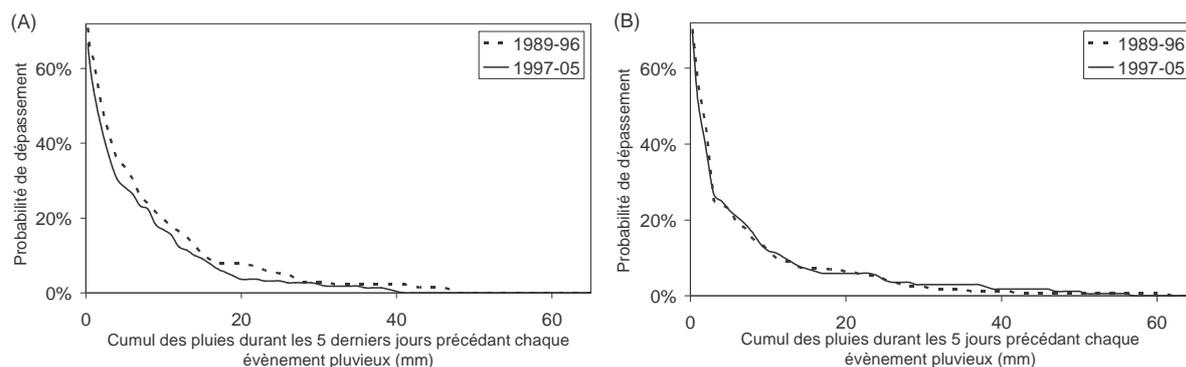


Figure 76. Distribution des pluies antérieures sur les périodes 1989-1996 et 1997-2005, dans le sous-bassin amont (A) et la zone aval (B).

Les tests statistiques de Kolmogorov-Smirnov et du Khi2 indiquent que les valeurs logarithmiques des pluies antérieures ont une distribution Gaussienne avec une p-value de 5%. Le test bilatéral de Student appliqué à la moyenne de ces valeurs indique l'absence de changement significatif entre les deux périodes et sur les deux parties du bassin versant du Merguellil avec un niveau de confiance de 95%.

ii. Comparaison du ruissellement dans les deux bassins versants emboîtés

Ruissellement produit par les pluies spatialement homogènes

La méthode de la double masse est appliquée aux événements pluvieux spatialement homogènes, i.e. lorsque la différence entre les lames précipitées dans le sous-bassin amont et dans la zone aval est inférieure à 20% ; 15% des 372 événements pluvieux satisfont ce critère (figure 77). Ils représentent 31% de la lame totale précipitée pendant la période 1989-1996 (30% pour le sous-bassin amont et 31% pour la zone aval) et 16% sur la période 1997-2005 (14% pour le sous-bassin amont et 21% pour la zone aval).

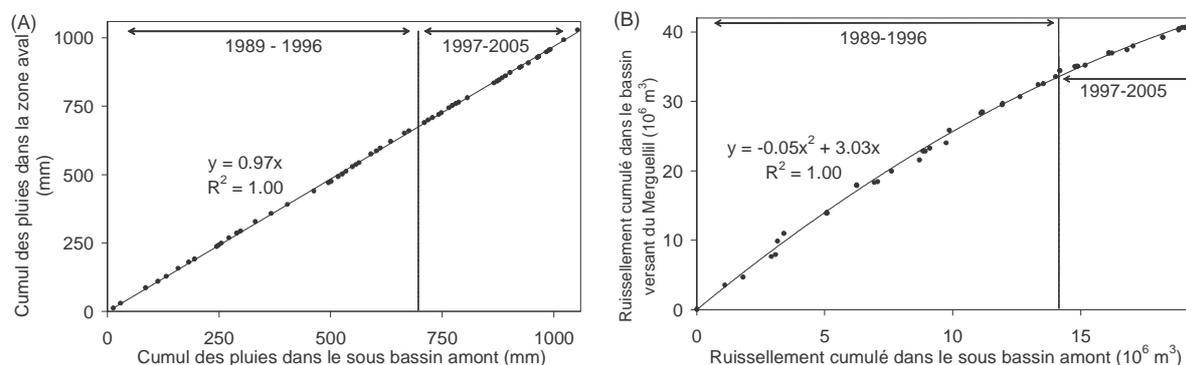


Figure 77. Méthode de la double masse appliquée aux pluies spatialement homogènes (A) et à leur ruissellement (B).

Malgré la proportionnalité très claire entre les pluies du sous-bassin amont et de la zone aval sur toute la période d'analyse (figure 77A), le ratio des lames ruisselées

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

correspondantes (bassin versant du Merguellil/sous-bassin amont) présente une réduction de 41% entre la première et la seconde période, résultat d'une baisse du ruissellement de 72% dans le bassin versant du Merguellil et d'une baisse du ruissellement de 52% dans le sous-bassin amont (figure 77B). Les coefficients de ruissellement moyens dans le sous-bassin amont et dans le bassin versant du Merguellil sont respectivement passés de 10,2% à 10,6% et de 4,1% à 2,5%, démontrant que la modification temporelle de la production relative du ruissellement de chaque bassin versant est due à une réduction drastique du ruissellement dans la zone aval (tableau 37).

Tableau 37. Caractéristiques des évènements pluie-débit correspondant aux pluies spatialement homogènes.

Périodes	Pluie (mm/évènement)		Débit ($10^3\text{m}^3/\text{évènement}$)		(2)/(1)	Coefficient d'écoulement (%)	
	Sous bassin amont	Zone aval	Sous bassin amont (1)	Bassin versant du Merguellil (2)		Sous bassin amont	Bassin versant du Merguellil
1989 to 1996	21.5	20.9	425	1017	2.4	10.2	4.1
1997 to 2005	13.7	13.5	282	398	1.4	10.6	2.5

Ruissellement produit par toutes les pluies

Contrairement au paragraphe précédant, il est question ici d'analyser le ruissellement produit par tous les évènements pluvieux dans les deux bassins versants. Pour chaque bassin versant, les rendements hydrologiques sont comparés entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005.

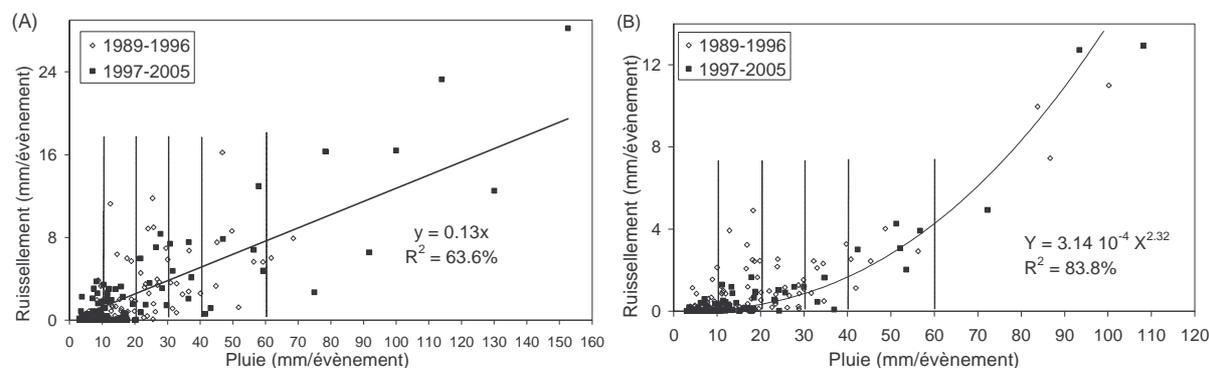


Figure 78. Relations entre lames précipitées et ruisselées. Lignes continues : régressions sur l'ensemble des évènements pluie-débit (sur les deux périodes confondues). (A) : sous-bassin amont. (B) : bassin versant du Merguellil.

La figure 78 représente les cumuls évènementiels pluie-débit dans le sous-bassin amont (320 évènements) et dans le bassin versant du Merguellil (372 évènements). Des régressions, linéaire et puissance, sont ajustées à l'ensemble des couples (pluie, débit) sur la période 1989-2005 dans le sous-bassin amont et dans la zone aval, respectivement. Les variations du coefficient d'écoulement sont estimées pour différentes classes de hauteurs de pluies : 0-10 mm, 10-20 mm, 20-30 mm, 30-40 mm, 40-60 mm et >60 mm. Afin

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

d'homogénéiser les hauteurs de pluies à l'intérieur de chaque classe, la relation globale de croissance entre les lames précipitées et ruisselées est supprimée en utilisant les courbes de régression. Pour chaque bassin versant et chaque gamme d'intensités pluviométriques, la variation du coefficient d'écoulement entre les deux périodes est estimée à partir du ruissellement moyen observé (r_i pour la période i) et du ruissellement moyen estimé à partir des courbes de régression (G_i pour la période i). Deux estimations de cette variation, dénotées C_1 et C_2 , sont calculées de la manière suivante : $C_1=(dr_2-dr_1)/r_1$; $C_2=(dr_2-dr_1)/r_1(p_2)$, avec $dr_1=r_1-G_1$ et $r_1(p_2)=G_2+dr_1$. $r_1(p_2)$ est une estimation du ruissellement qui aurait été produit par les pluies de la deuxième période si elles avaient eu lieu pendant la première période. C_1 et C_2 estiment les variations relatives du ruissellement entre la première et la seconde période, et sont calculés respectivement à partir des pluies de la première et de la seconde période. Une valeur négative (resp. positive) de C_1 ou C_2 correspond à une baisse (resp. une hausse) du coefficient d'écoulement du bassin versant. Les valeurs obtenues sont rassemblées dans le tableau 38.

Tableau 38. Variations du coefficient d'écoulement (C_1 et C_2) dans le sous-bassin amont et dans le bassin versant du Merguellil entre la période 1 (1989-1996) et la période 2 (1997-2005) pour différentes classes de hauteur de pluie. p_i : hauteur moyenne de pluie correspondant à la période i . Voir § ci-dessus pour la définition des autres variables.

Sous bassin amont											Variation du coefficient d'écoulement	
Classes de hauteurs de pluies (mm/événement)	Lame moyenne (mm/événement)										C_1	C_2
	Période 1: 1989 - 1996					Période 2: 1997-2005						
	p_1	r_1	G_1	dr_1	$r_1(p_2)$	p_2	r_2	G_2	dr_2	$r_2(p_1)$		
< 10	5.8	0.2	1.6	-1.4	0.2	5.8	0.3	1.6	-1.3	0.3	57%	58%
10 to 20	14.1	1.0	2.8	-1.8	0.9	13.4	0.8	2.7	-1.9	1.0	-7%	-8%
20 to 30	24.8	3.9	4.4	-0.5	3.8	24.4	3.2	4.3	-1.2	3.2	-17%	-17%
30 to 40	33.2	3.4	5.6	-2.3	3.6	34.5	5.2	5.8	-0.7	5.0	48%	46%
40 to 60	49.2	6.3	8.0	-1.7	6.6	50.9	5.7	8.3	-2.6	5.4	-14%	-14%
>60	65.1	7.0	10.4	-3.4	13.0	105.9	15.1	16.4	-1.3	9.1	31%	17%
0 to 40	11.7	1.0	2.5	-1.5	0.8	10.2	0.8	2.2	-1.4	1.0	4%	5%
> 40	52.4	6.5	8.5	-2.0	10.6	80.5	10.8	12.6	-1.9	6.6	2%	1%
Total	14.1	1.3	2.8	-1.5	1.6	16.0	1.6	3.1	-1.5	1.4	3%	3%

Bassin versant du Merguellil											Variation du coefficient d'écoulement	
Classes de hauteurs de pluies (mm/événement)	Lame moyenne (mm/événement)										C_1	C_2
	Période 1: 1989 - 1996					Période 2: 1997-2005						
	p_1	r_1	G_1	dr_1	$r_1(p_2)$	p_2	r_2	G_2	dr_2	$r_2(p_1)$		
< 10	6.1	0.2	0.0	0.1	0.2	5.7	0.1	0.0	0.0	0.1	-65%	-66%
10 to 20	14.3	0.8	0.2	0.7	0.8	14.6	0.4	0.2	0.2	0.4	-56%	-55%
20 to 30	25.9	1.0	0.6	0.3	0.9	24.8	0.7	0.5	0.1	0.8	-20%	-21%
30 to 40	33.7	1.8	1.1	0.7	1.9	34.9	0.7	1.2	-0.5	0.6	-65%	-62%
40 to 60	46.6	2.6	2.4	0.2	3.2	51.2	3.3	3.0	0.3	2.7	3%	3%
> 60	90.2	9.5	11.1	-1.6	10.1	91.3	10.2	11.8	-1.6	9.5	1%	1%
0 to 40	12.6	0.5	0.2	0.3	0.5	9.7	0.2	0.1	0.1	0.3	-50%	-59%
> 40	63.0	5.2	5.7	-0.5	5.8	66.2	5.9	6.3	-0.4	5.3	1%	1%
Total	15.4	0.8	0.5	0.3	0.8	13.3	0.5	0.5	0.0	0.5	-32%	-28%

Dans le sous-bassin amont, les variations du coefficient d'écoulement (C_1 et C_2) sont alternativement positives et négatives, en fonction des classes de hauteurs de pluies.

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

Aucune relation évidente n'apparaît entre les valeurs de C_1 , C_2 et les classes de hauteurs de pluies. Les valeurs de C_1 et C_2 correspondant aux classes 0-40 mm et >40 mm sont proches l'une de l'autre et positives, indiquant une légère augmentation du coefficient d'écoulement entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005 : le coefficient d'écoulement moyen (r/p), toutes classes de pluies confondues, évolue de 9,4% à 10,2% entre les deux périodes. Dans le bassin versant du Merguellil, les valeurs de C_1 et C_2 sont fortement négatives pour toutes les classes de hauteurs de pluies inférieures à 40 mm, et légèrement positives pour les classes de hauteurs de pluies supérieures à 40 mm. Le coefficient d'écoulement moyen passe de 4,3% à 1,9% pour les événements pluvieux inférieurs à 40 mm, alors qu'aucun changement significatif n'est visible pour les plus fortes pluies (8,2% et 8,8% respectivement). Ces observations suggèrent l'existence d'une réduction drastique du ruissellement produit par les pluies inférieures à 40 mm dans la zone aval.

iii. Modélisation hydrologique et tests non paramétriques

Le modèle pluie-débit global conceptuel GR4J (Perrin, 2000; Perrin et al., 2003) est utilisé pour explorer les modifications du comportement hydrologique de la zone aval, qui a été soumise à de nombreux travaux d'aménagements de CES depuis 1989. Le modèle GR4J a quatre paramètres (cf. § 3.4.3.iii) et estime les débits à partir des pluies et des ETP journalières. Perrin et al. (2001) ont appliqué ce modèle à 429 bassins versants dans des conditions environnementales variées, incluant des régions semi-arides avec des écoulements intermittents en Australie, dans le Sud des Etats-Unis et au Mexique. Comparé à 19 modèles globaux conceptuels pluie-débit, GR4J fait partie des modèles qui présentent les meilleurs performances. Il est utilisé conjointement avec le test non paramétrique proposé par Andréassian et al. (2003) particulièrement bien adapté à la détection de l'impact des aménagements de CES car il est conçu pour identifier des changements progressifs de la relation pluie-débit plutôt que des ruptures brutales.

Les données journalières d'ETP sont obtenues en moyennant les valeurs journalières de E_{PAN} issues des bacs évaporatoires des stations de Fidh Ali et d'El Haouareb (figure 71), abattues par un coefficient PAN de 0,6 estimé par Doorenbos et Pruitt (1977) pour les milieux semi-arides. Cette valeur est proche du coefficient 0,57 proposé par Riou et Chartier (1985) pour la Tunisie semi-aride et des valeurs 0,58 - 0,59 déterminées à partir du couple de stations (El Haouareb, Chébika) (figure 24).

Le modèle GR4J est calibré de manière à estimer le ruissellement produit dans la zone aval du bassin versant du Merguellil. Afin de simuler le ruissellement produit par la totalité du bassin versant du Merguellil à son exutoire, les écoulements observés R_u [m^3] à la station de

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

Skhira sont ajoutés aux écoulements simulés par le modèle GR4J. Le modèle résultant et estimant les écoulements produits dans le bassin versant du Merguellil est dénommé GR4J+ (figure 79).

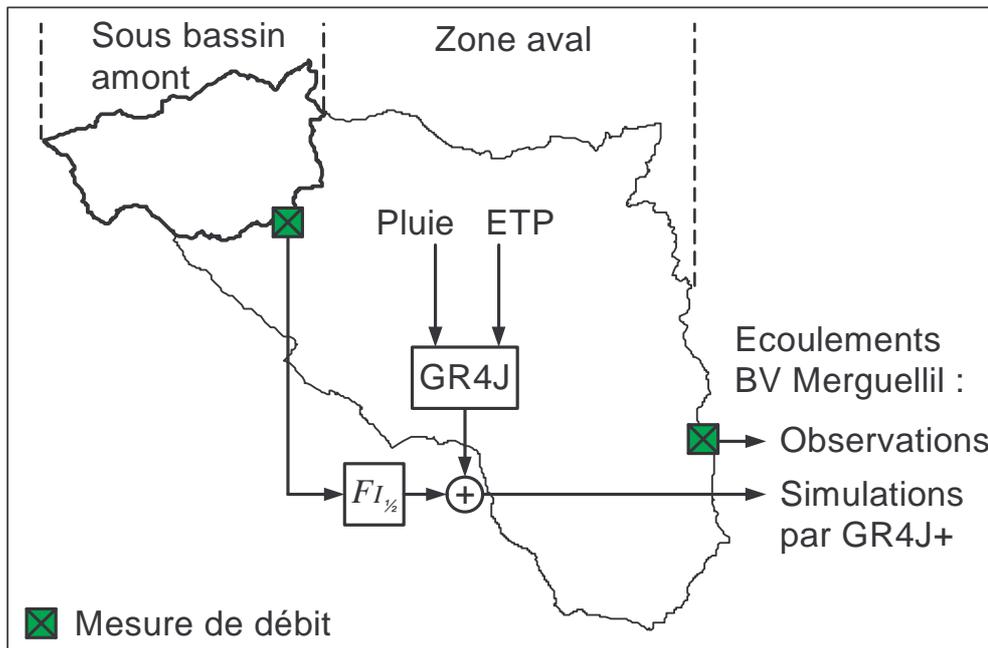


Figure 79. Structure du modèle GR4J+ adapté au bassin versant du Merguellil

Afin de prendre en compte le temps de transfert entre la station de Skhira et le barrage El Haouareb, les cumuls journaliers des lames ruisselées à la station de Skhira sont définies de manière à débiter huit heures avant celles qui sont définies à la station du barrage El Haouareb. Une fonction « perte » à un paramètre est utilisée pour prendre en compte les pertes qui surviennent principalement dans le lit de l'oued au cours du transfert entre les deux stations. Elle s'écrit de la manière suivante : $F_{I_{1/2}}(R_u) = R_u \times (1 - [\log(1+r)]/r)$ avec $r = R_u / (I_{1/2} \times 0,398)$ où $F_{I_{1/2}}(R_u)$ est le volume [m^3] produit dans le sous-bassin amont et parvenant au barrage El Haouareb et $I_{1/2}$ est le paramètre du modèle [m^3]. Cette équation définit une fonction convexe inscrite dans le premier demi quadrant (assurant la conservation de masse), conçue de telle sorte que la proportion de R_u qui atteint le barrage est nulle pour les faibles écoulements et augmente progressivement lorsque R_u augmente, comme cela est physiquement prévisible. L'association de cette équation au modèle GR4J à quatre paramètres aboutit au modèle GR4J+ à cinq paramètres, estimant les écoulements produits par le bassin versant du Merguellil, à comparer aux apports observés dans le barrage El Haouareb.

Le modèle est exécuté à plusieurs reprises en mode continu sur la période août 1989 – décembre 2005 ; pour chaque simulation, le modèle est calibré sur une sous période différente définie comme suit. Les données en entrée du modèle sont d'abord divisées en

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

deux séries correspondant aux évènements pluvieux inférieurs à 40 mm (données A) et supérieurs à 40 mm (données B). Ce seuil de pluie est choisi à partir des observations sur la figure 78 et le tableau 38 : il délimite les classes de hauteurs de pluies pour lesquelles le rendement hydrologique du bassin versant du Merguellil évolue différemment entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005 : une baisse pour les pluies inférieures à 40 mm et une absence de changement significatif pour les pluies supérieures à 40 mm. La première année des chroniques de données est utilisée pour initialiser les réservoirs puis la période correspondant au jeu de données A est subdivisée en six périodes comportant des nombres d'évènements similaires. Les chroniques de données correspondant au jeu de données B sont subdivisées en quatre périodes, chacune incluant trois ou quatre évènements pluvieux au dessus de 40 mm de pluie. Le nombre de périodes dans chaque jeu de données (A et B) résulte d'un équilibre entre la fiabilité du test de détection de tendance (augmentant avec le nombre de périodes) et la qualité des calages du modèle (augmentant avec le nombre d'évènements dans chaque période). Le modèle GR4J+ est exécuté sur l'ensemble de la chronique continue de données mais successivement calibré sur les dix sous périodes en utilisant le critère de Nash-Sutcliffe appliqué à la racine carré des débits. Ce critère accorde une importance équivalente aux petites et aux grandes crues (Perrin, 2000). Une contrainte sur les débits simulés est imposée au modèle de manière à ce que son rendement (cumul des débits simulés/cumul des débits observés) soit compris entre 95% et 105%. Une valeur constante est attribuée au paramètre $I_{\frac{1}{2}}$ car aucune information ne permet de savoir si celui-ci varie au cours du temps. Elle est fixée à $97,0 \times 10^3 \text{ m}^3$. Cette valeur maximise le critère de Nash global du modèle (63,3%). Les modèles calibrés (M_1 à M_6 pour le jeu de données A et M_1 à M_4 pour le jeu de données B) sont exécutés successivement sur toutes les périodes. Les cumuls des débits simulés par le modèle GR4J dans la zone aval sont reportés dans le tableau 39 sous la forme de deux matrices A et B correspondant respectivement aux évènements pluvieux inférieurs et supérieurs à 40 mm.

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

Tableau 39. Matrices de simulations croisées des écoulements produits dans la zone aval par les évènements pluvieux inférieurs à 40 mm (MATRICE A) et supérieurs à 40 mm (MATRICE B). Le modèle M_i est calibré sur la i ème période. Les valeurs en gras sur la diagonale représentent les exécutions du modèle en mode de calage.

		Cumuls (mm) du ruissellement estimé par le modèle GR4J pour chaque simulation					
		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
Périodes	MATRICE A						
	24/8/90 - 20/3/93	24	30	12	7	8	6
	21/3/93 - 12/10/95	15	30	12	7	9	5
	13/10/95 - 13/5/98	35	37	17	8	12	6
	14/5/98 - 8/12/00	18	30	29	7	25	8
	9/12/00 - 6/7/03	21	16	5	3	4	2
	7/7/03 - 31/12/05	23	40	28	10	23	7
Périodes	MATRICE B	M_1	M_2	M_3	M_4		
	24/08/90 - 11/11/92	12	21	14	15		
	12/11/92 - 2/12/99	2	3	6	8		
	3/12/99 - 26/11/04	6	10	7	8		
	27/11/04 - 31/12/05	46	65	45	33		

Pour chaque matrice issue des matrices A et B par permutation des colonnes (720 matrices à partir de la matrice A et 24 à partir de la matrice B), la statistique S est calculée de la manière suivante :

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^{i-1} (q_{ii} - q_{ij}) + \sum_{j=i+1}^n (q_{ij} - q_{ii}) \right] \text{ où } q_{ij} \text{ est la valeur de débit figurant dans la } i\text{ème ligne et la } j\text{ème colonne de la matrice permutée.}$$

Une valeur négative (resp. positive) de S correspond à une tendance à la décroissance (resp. croissance) de la production du ruissellement. Les fréquences de non dépassement de la statistique S sont représentées sur la figure 80.

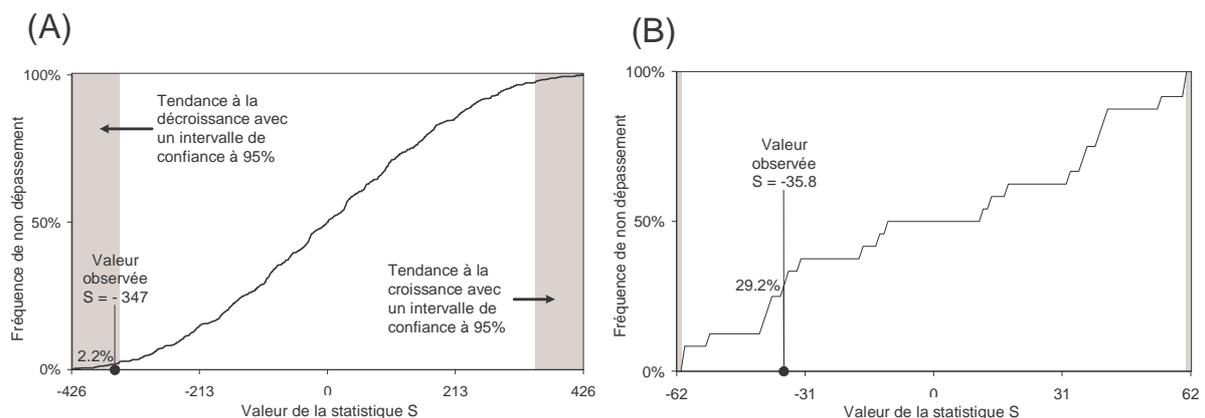


Figure 80. Fréquence de non dépassement de la statistique S obtenue par permutation des matrices de simulations croisées. (A) : évènements pluvieux inférieurs à 40 mm. (B) : évènements pluvieux supérieurs à 40 mm. La « valeur observée » de la statistique S correspond aux matrices A et B non permutées présentées dans le tableau 39.

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

Le positionnement de la statistique S observée sur le graphique des fréquences de non dépassement permet de conclure sur l'existence éventuelle d'une tendance au changement dans le comportement hydrologique du bassin versant (Andréassian et al., 2003). La production du ruissellement en réponse aux pluies inférieures à 40 mm indique une tendance à la décroissance avec un indice de confiance de 95% (figure 80A). Aucune tendance n'est visible pour les pluies supérieures à 40 mm (figure 80B).

iv. Quantification de la baisse de production du ruissellement dans la zone aval

L'analyse du comportement hydrologique du bassin versant du Merguellil et du sous-bassin amont (§ 5.1.4.ii) et les tests non paramétriques basés sur la technique de ré-échantillonnage (§ 5.1.4.iii) ont révélé une sévère baisse de la production du ruissellement dans la zone aval pour les événements pluvieux inférieurs à 40 mm. Une estimation de cette réduction est proposée ici. La distribution des événements pluie-débit dans la zone aval est comparée entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005. La lame ruisselée produite dans la zone aval (\bar{R}_L) [mm] est estimée à partir de l'équation suivante :

$\bar{R}_L = 10^{-3} \times [R_M - F_{1/2}(R_u)] / S_L$, où R_M est le ruissellement produit dans le bassin versant du Merguellil [m^3], R_u est le ruissellement produit dans le sous-bassin amont [m^3], S_L est la superficie de la zone aval [km^2] et $F_{1/2} = 97,0 \cdot 10^3 m^3$ (§ 5.1.4.iii).

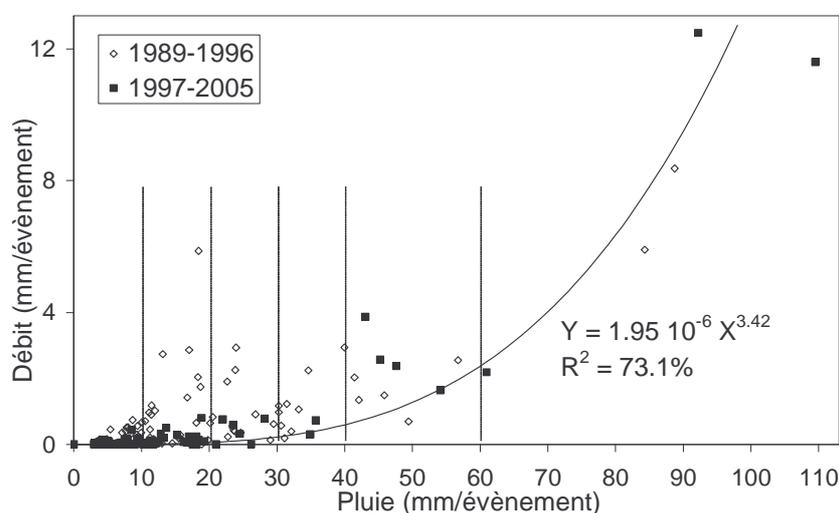


Figure 81. Cumuls pluie-débit de chaque événement identifié dans la zone aval. Courbe continue : régression puissance estimée à partir des couples (pluie, débit) sur la période 1989-2005.

La figure 81 représente les cumuls pluie-débit des événements intervenus sur les périodes 1989-1996 et 1997-2005 dans la zone aval. Le seuil de 40 mm, déjà observé dans le bassin versant du Merguellil (figure 78 et tableau 38) est également visible sur la figure

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

81 : en dessous de 40 mm de pluie, la plupart des évènements pluvieux de la première période produisent plus de ruissellement que l'évènement ayant produit le ruissellement maximal au cours de la période 1997-2005, contrairement à la classe des pluies supérieures à 40 mm. Les variations C_1 et C_2 du coefficient d'écoulement sont calculées pour la zone aval de la même manière que pour les deux bassins versants emboîtés (cf. tableau 38). Les résultats sont réunis dans le tableau 40.

Tableau 40. Variations des coefficients d'écoulement dans la zone aval entre la période 1 (1989-1996) et la période 2 (1997-2005) pour différentes classes de hauteurs de pluies (voir tableau 38 pour la définition des variables).

Classes de hauteurs de pluies (mm/évènement)	Lame moyenne (mm/évènement)										Variation du coefficient d'écoulement	
	Période 1: 1989 - 1996					Période 2: 1997-2005					C_1	C_2
	p_1	r_1	G_1	dr_1	$r_1(p_2)$	p_2	r_2	G_2	dr_2	$r_2(p_1)$		
< 10	6.1	0.1	0.0	0.1	0.1	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	-69%	-69%
10 to 20	14.1	0.7	0.0	0.7	0.7	14.5	0.2	0.0	0.1	0.2	-77%	-76%
20 to 30	24.2	0.9	0.1	0.8	0.9	23.7	0.5	0.1	0.4	0.5	-42%	-43%
30 to 40	32.6	1.2	0.3	0.9	1.3	35.3	0.5	0.4	0.1	0.4	-64%	-60%
40 to 60	45.9	1.8	1.0	0.8	1.9	47.5	2.6	1.1	1.5	2.5	37%	36%
>60	86.5	7.1	8.3	-1.2	9.3	87.6	8.8	10.5	-1.7	6.6	-7%	-6%
0 to 40	12.0	0.4	0.0	0.4	0.4	9.6	0.1	0.0	0.1	0.1	-71%	-75%
> 40	58.4	3.2	3.2	0.0	5.2	64.7	5.2	5.1	0.1	3.3	3%	2%
Total	14.4	0.6	0.2	0.4	0.7	12.9	0.4	0.3	0.1	0.3	-50%	-41%

Les valeurs de C_1 et C_2 confirment l'existence d'un seuil de 40 mm de pluie. Pour toutes les classes de hauteur de pluies en dessous de ce seuil, les valeurs de C_1 et C_2 sont systématiquement inférieures à -42%. Pour les classes de hauteur de pluies supérieures à ce seuil, les valeurs de C_1 et C_2 sont toujours supérieures à -7%. Le taux global de réduction des écoulements pour toutes les pluies inférieures à 40 mm est estimé à 71-75%, réduit à 41-50% lorsque toutes les classes de hauteur de pluies sont considérées. L'augmentation apparente du coefficient d'écoulement dans la classe de hauteur de pluies 40-60 mm s'explique simplement par les plus fortes pluies au cours de la période 1997-2005. Le T-test unilatéral appliqué aux valeurs logarithmiques du ruissellement dr_i produit par des pluies inférieures à 40 mm indique que la baisse de 71-75% du ruissellement est significative avec un intervalle de confiance de 95% (distribution gaussienne acceptée par les tests de Kolmogorov-Smirnov et du Khi2 avec la même p-value). Il est utile de préciser que le même test est négatif (absence de changement significatif) lorsqu'il est appliqué aux évènements pluie-débit sur tout le bassin versant du Merguellil, malgré la réduction de 28-32% du rendement hydrologique (tableau 38).

La singularité de l'année 2005 observée sur la figure 73 montrant un ruissellement produit par le bassin versant du Merguellil largement supérieur à celui du sous-bassin amont

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

est due à une concentration inhabituelle de gros événements pluvieux cette année : 60% des précipitations enregistrées en 2005 ont été produites par des événements pluvieux supérieurs à 40 mm alors que cette proportion est égale à 13% en moyenne sur la période 1997-2004 avec un maximum de 31% en 2004.

5.1.5. Causes probables de la réduction du ruissellement

Dans la partie 5.1.4, le test sur la moyenne de Student appliqué aux débits observés et les tests non paramétriques basés sur des matrices de simulations croisées obtenues à partir du modèle GR4J+ (figure 79), indiquent que le ruissellement produit par les pluies inférieures à 40 mm dans la zone aval du bassin versant du Merguellil (figure 71) a baissé de manière significative entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005 avec un intervalle de confiance de 95%. Aucun changement n'a été observé pour les pluies supérieures à 40 mm dans la zone aval et pour toutes les pluies dans le sous-bassin amont. Entre les deux périodes, la baisse du ruissellement dans la zone aval a été estimée à 71-75%, réduite à 41-50% lorsque l'on considère toutes les hauteurs de pluie et à 28-32% lorsque l'on inclut le sous-bassin amont dans l'analyse. Les causes probables de cette réduction sont discutées ci-après.

i. Le climat

Bien que la période octobre 1989 – avril 1992 soit plus humide dans le bassin versant du Merguellil, principalement pour les classes de pluies supérieures à 20 mm (figure 74 et tableau 36), ce signal climatique ne peut être considéré comme le facteur principal expliquant la réduction du ruissellement entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005. Pour preuve, l'analyse de la relation pluie-débit (voir § 5.1.4.ii et § 5.1.4.iv) réalisée par classes de hauteurs de pluies après avoir supprimé la tendance de premier ordre entre pluie et débit, a permis d'éliminer l'effet climatique dans l'analyse du changement de production du ruissellement.

Les paramètres climatiques qui contrôlent habituellement le ruissellement dans les milieux semi-arides (intensité des pluies et pluies antérieures) n'ont pas évolué dans un sens qui aurait pu causer une réduction du ruissellement. La distribution des pluies antérieures dans les deux parties du bassin versant du Merguellil (figure 76) n'a pas changé de manière significative entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005. La figure 75 montre que les intensités sub-journalières des pluies n'ont pas diminué au cours des années. Ces observations indiquent que la réduction drastique du ruissellement observée dans la zone aval entre les années 1989 et 2005 n'est pas la conséquence d'un changement pluviométrique.

ii. L'occupation des sols

La majorité des changements d'occupation des sols dans le bassin versant du Merguellil ont eu lieu avant 1960 : intensification des pratiques agricoles, extension des terres cultivées, sédentarisation des agriculteurs (cf. § 2.3.1). Seuls des changements mineurs et très localisés comme le surpâturage et la déforestation ont eu lieu récemment. De telles perturbations ont toujours induit des accroissements du ruissellement partout ailleurs en Afrique du nord (Coelho et al., 2004) et ne peuvent pas expliquer la baisse des écoulements observée dans la zone aval du bassin versant du Merguellil.

iii. Le niveau des nappes souterraines

Les écoulements de base moyens mesurés au barrage d'El Haouareb (obtenus en soustrayant le volume des évènements définis dans la partie 5.1.4.i à la totalité des écoulements) sont passés de 9000 à 4000 m³/jour entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005. Une cause possible de cette modification pourrait être liée à un changement de différence de charge entre l'oued et les aquifères. Kingumbi (2006) a modélisé les échanges hydriques entre l'oued Merguellil et les aquifères sur la période 1970-1998, en utilisant le modèle distribué à base physique MODCOU. Les simulations ont révélé une diminution de la vidange des aquifères dans l'oued Merguellil après 1989, conséquence de l'accroissement des prélèvements par pompage, particulièrement dans la région de Bouhafna (figure 82). Kingumbi conclut que la réduction du ruissellement dans le bassin versant était principalement due à une réduction des écoulements de base. Cette explication n'est pas totalement satisfaisante. La figure 82 compare quatre couples de niveaux d'eau dans l'oued Merguellil et dans l'aquifère de Bouhafna sur trois décennies. En 1989, début de notre période d'étude, le niveau de la nappe se situe environ dix mètres sous l'oued au niveau des points E₁, E₂ et E₃ (cf. piézomètres Pz₁, Pz₂ et Pz₃). Par conséquent, le rabattement de la nappe ne peut pas avoir modifié la différence de charge entre l'oued et l'aquifère dans cette zone. Du fait de la disconnexion hydraulique entre la surface et le milieu souterrain au niveau de ces trois points, les échanges verticaux ne peuvent être que descendants et les volumes infiltrés depuis l'oued vers les aquifères ne dépendent que des conditions de surface (niveau d'eau dans l'oued et durée des écoulements). Seul le quatrième couple (E₄, Pz₄) révèle l'existence probable d'un drainage de la nappe dans l'oued pouvant contribuer aux écoulements de base mais ce quatrième couple ne montre aucune variation significative des niveaux d'eau sur le long terme. Il n'y a donc aucune raison de conclure sur un changement significatif des échanges entre la surface et le milieu souterrain. De plus, la baisse du ruissellement détectée par la présente étude ne concerne que les crues, trop courtes pour inclure une éventuelle contribution des apports souterrains. En outre, une réduction des

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

écoulements de base se serait traduite pas des valeurs de variations des coefficients d'écoulement de la zone aval (tableau 40) d'autant plus négatives que les classes de pluie sont faibles, ce qui n'est pas le cas. Comme la baisse du ruissellement observée dans le bassin versant du Merguellil ne peut pas être attribuée à des perturbations hydrogéologiques, un changement des conditions de surface semble être l'explication la plus appropriée.

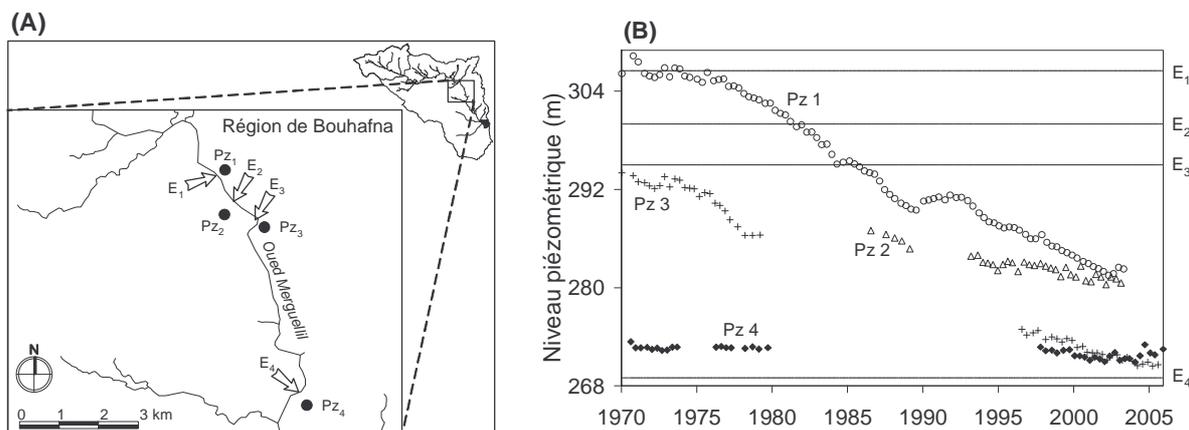


Figure 82. (A) : localisation des piézomètres (Pz 1 à Pz 4) dans la région de Bouhafna et des points les plus proches sur l'oued Merguellil (E₁ à E₄ respectivement). (B) : variations des niveaux piézométriques dans la région de Bouhafna, à proximité du lit de l'oued Merguellil.

iv. Les aménagements de conservation des eaux et des sols

L'impact hydrologique le plus prévisible des aménagements de CES est la réduction de la contribution des versants aménagés à la production du ruissellement. Dans le bassin versant du Merguellil, les proportions des surfaces contrôlées par les aménagements de CES moyennées sur les périodes 1989-1996 et 1997-2005 sont respectivement égales à 5% et 26% dans la zone aval, 2% et 5% dans le sous-bassin amont. Cette distribution spatiale très contrastée est cohérente avec les comportements hydrologiques des deux zones (baisse du ruissellement dans la zone aval et absence de changement significatif dans le sous-bassin amont). Le seuil de 40 mm de pluie précédemment identifié pourrait correspondre à la capacité moyenne de stockage des surfaces contrôlées par les aménagements de CES, moyennée sur l'ensemble de la zone aval. Lorsque cette capacité est saturée, les pluies supplémentaires produisent des écoulements avec un coefficient de ruissellement plus élevé, comme si les aménagements de CES n'existaient pas (figure 81).

Dans le bassin versant du Merguellil, Dridi (2000) a estimé, à partir de calculs géométriques, à 38 mm et 85 mm les capacités moyennes de stockage des surfaces respectivement contrôlées par les retenues collinaires et les banquettes. Elle conclut que plus de 90% du ruissellement est retenu sur les sites aménagés avec des banquettes. Dans

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

la région d'Ouesletia (figure 71), l'introduction de banquettes sur 80% de la superficie d'un versant de 11,2 ha a réduit le ruissellement de 50 à 90% et de 20 à 40% pour les pluies respectivement inférieures et supérieures à 60 mm/jour (com. pers. Nasri, 2006). Dans le bassin versant d'El Gouazine (18,1 km²), à quelques kilomètres au nord du bassin versant du Merguellil (figure 18), Nasri et al. (2004b) ont montré que l'introduction de banquettes sur 43% de sa surface totale a réduit de 90-95% le ruissellement produit par des pluies inférieures à 70 mm et de 75% le ruissellement produit par une pluie de 80 mm.

La capacité de stockage des banquettes évaluée à 85 mm par Dridi (2000) excède le seuil de pluie déterminé par Nasri et al. (2004b) (60-70 mm) et par la présente étude (40 mm). L'inclusion de surfaces non aménagées dans notre zone d'étude, la dégradation des banquettes (comblement des fossés, destruction des talus par des brèches) et l'inclinaison non maîtrisée des bourrelets responsable d'écoulements latéraux réduisent probablement la capacité théorique de stockage. Dans le bassin versant d'El Gouazine, Baccari et al. (2006) ont relevé la présence de 109 brèches parmi 439 banquettes construites en 1997. Entre 1997 et 2006, l'envasement des fossés a induit une baisse de 30% de la capacité de stockage des banquettes. Le seuil de pluie plus faible que nous avons obtenu (40 mm), en comparaison avec le seuil déterminé par Nasri et al. (60-70 mm), est probablement dû à la proportion plus faible des surfaces équipées en banquettes dans la zone aval du bassin versant du Merguellil et à la présence des retenues collinaires possédant une plus faible capacité de stockage (38 mm contre 85 mm pour les banquettes d'après Dridi (2000)), cette capacité diminuant au cours des années (cf. § 3.1.3.iv et Albergel et al. (2001b)).

La réduction de 41-50% des écoulements dans la zone aval est une approximation de l'impact réel des aménagements puisque les calculs ont consisté à comparer deux périodes de sept ou huit ans chacune et non un état initial (année 1989) et un état final (année 2005) entre lesquels 32% de la superficie de la zone aval a été aménagée. En supposant que la capacité de stockage des aménagements est temporellement stable, le biais induit par la méthode utilisée est rectifiable par une simple transformation linéaire : $[41-50\%] \times \beta / \gamma$ où β et γ sont les proportions de la surface du bassin versant du Merguellil aménagée entre 1989 et 2005 et entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005 respectivement. En l'occurrence, $\beta/\gamma = 32\% / 21\% \approx 1/70\%$. La présente étude (cf. § 3.1.3.iv) et des travaux réalisés sur une parcelle de 11,2 ha dans le bassin versant d'El Gouazine ont montré que la capacité de stockage des banquettes et des retenues collinaires diminue en moyenne de 30% sur une période de neuf ans. La formule explicitée ci-dessus devrait donc être multipliée par un coefficient de 70% pour tenir compte de l'envasement des aménagements, aboutissant alors

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

à la valeur initialement obtenue. Cette démonstration suggère que la totalité des surfaces aménagées entre 1989 et 2005 a effectivement induit une réduction des écoulements de l'ordre de grandeur de 41-50% dans la zone aval du bassin versant du Merguellil.

La réduction globale du ruissellement dans la zone aval (41-50%) est supérieure à l'augmentation des surfaces aménagées (32%). Nasri et al. (2004b) ont observé des niveaux de sensibilité similaires dans le bassin versant d'El Gouazine où l'introduction de banquettes sur 43% de la surface a entraîné une baisse de 50 à 80% de la production de ruissellement. Ces résultats suggèrent que les sites aménagés correspondent aux zones du bassin versant possédant les coefficients de ruissellement les plus élevés donc probablement les plus sensibles à l'érosion. De plus, ils montrent que la répartition de la ressource en eau entre les zones amont équipées avec des aménagements de CES et les zones aval réceptrices des écoulements ne peut être simplement déterminée par la proportion des surfaces du bassin versant à équiper avec des aménagements de CES.

5.1.6. Conclusions

Les études réalisées dans les différentes parties du monde pour estimer l'impact hydrologique des aménagements de CES ont démontré la difficulté à obtenir des résultats significatifs, particulièrement à de petites échelles (>100 km²) en raison de la multiplicité des facteurs modifiant la relation pluie-débit. Dans notre cas, il a été possible de démontrer que les aménagements de CES construits dans le bassin versant du Merguellil ont notablement réduit son rendement hydrologique pour trois raisons principales :

- Les aménagements ont été construits sur une période pour laquelle des mesures hydro-météorologiques sont disponibles, avec un taux d'équipements en aménagements de CES élevé tout au long de la période ;
- Au cours de cette période, les autres paramètres susceptibles de modifier le comportement hydrologique du bassin versant, comme le climat, l'occupation des sols, la différence de charge entre l'oued et les aquifères, sont restés stables ;
- La distribution spatiale des aménagements de CES et des stations de mesure ont permis de comparer la réponse hydrologique de deux zones très contrastées, soit très aménagées ou bien restées presque intactes.

Le test de Student et un test non paramétrique basé sur des matrices de simulations croisées ont révélé une baisse significative (indice de confiance à 95%) du ruissellement pour les évènements pluvieux inférieurs à 40 mm dans la zone aval du bassin versant du

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

Merguellil où la plupart des aménagements de CES ont été construits depuis 1989. Aucune modification du ruissellement n'a été observée pour les plus fortes pluies dans cette zone et pour toutes les hauteurs de pluie dans le sous-bassin amont où les aménagements de CES sont pratiquement absents. Dans la zone aval, l'expansion des aménagements de CES sur 21% de la superficie entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005 a induit une baisse de 41-50% des écoulements. Ce résultat confirme l'efficacité de ces aménagements à réduire les écoulements de surface, ce que les études antérieures avaient déjà signalé à l'échelle de la parcelle ou de petits bassins versants. Les conséquences sur la ressource en eau dans la plaine de Kairouan située à l'aval (figure 83) pourraient être désastreuses si le développement des banquettes et des retenues collinaires continue avec le même rythme dans le bassin versant du Merguellil⁴¹ : le barrage d'El Haouareb est le point de recharge principale de la nappe de Kairouan qui est surexploitée pour irriguer plus de 50 000 ha de cultures et pour fournir de l'eau potable aux villes côtières. Dans cette région, le rabattement de la nappe varie entre 0,25 et un mètre par an depuis 1985 (Feuillette, 2001; Leduc et al., 2004).

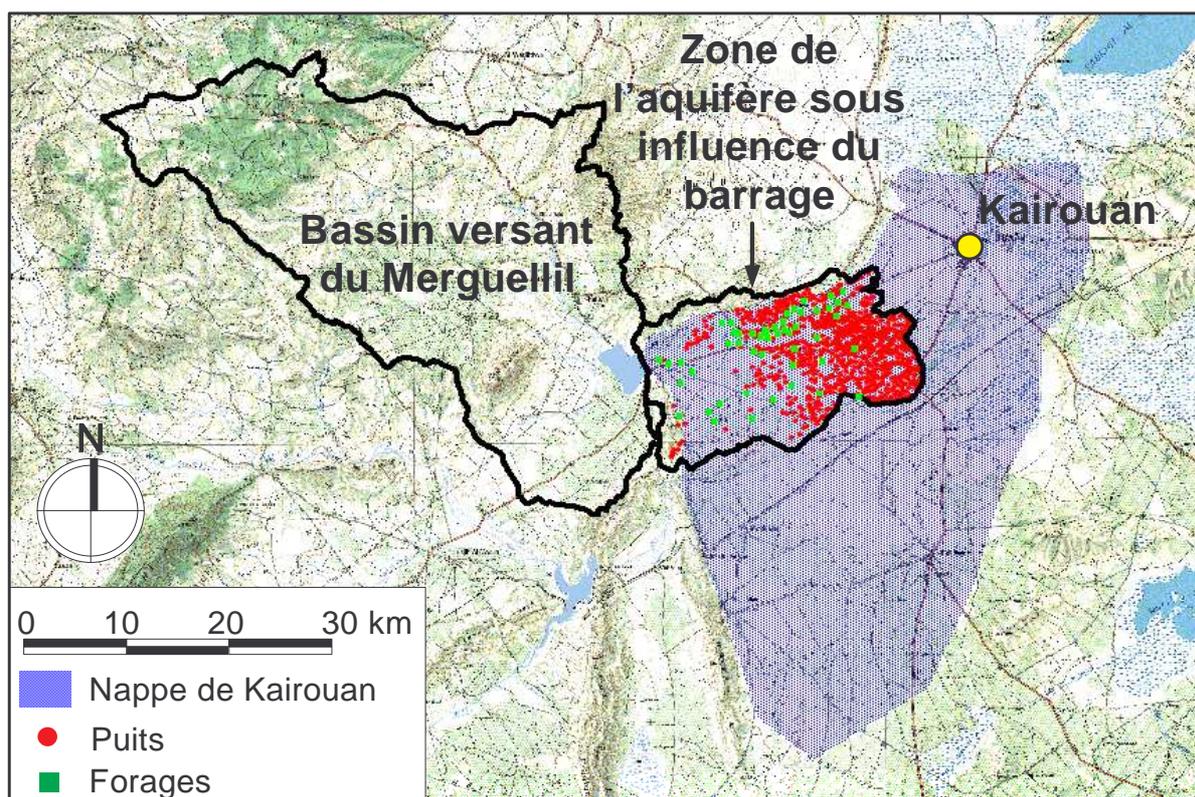


Figure 83. Positionnement de la nappe aquifère de Kairouan par rapport au bassin versant du Merguellil.

⁴¹ En 2003, le sous-bassin amont a été classé en zone de priorité secondaire (début des travaux prévus en 2013) par le bureau d'étude HAR (2003) pour la construction de banquettes, de cordons de pierres sèches et pour l'aménagement de parcours.

5.2. Redistribution de la ressource en eau

La méthode présentée dans la partie 5.1 a permis d'estimer la réduction des écoulements due aux aménagements de CES dans le bassin versant du Merguellil. La partie 5.2.1 estime les rôles respectifs des retenues collinaires et des banquettes dans cette réduction. La partie 5.2.2 dresse le bilan hydrique global de chaque catégorie d'aménagement dans le bassin versant du Merguellil.

5.2.1. Impacts respectifs des retenues collinaires et des banquettes sur les écoulements

La méthode proposée consiste à estimer le volume moyen annuel des écoulements collectés dans les retenues collinaires construites dans la zone aval du bassin versant du Merguellil entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005. Le volume du ruissellement collecté par les banquettes est ensuite calculé par différence avec le volume total retenu au niveau des aménagements.

Les apports moyens annuels aux retenues collinaires instrumentées rapportés à la surface de leur bassin versant sont supposés égaux à ceux des retenues collinaires appartenant à la zone aval du bassin versant du Merguellil et construites entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005. Cette hypothèse est justifiée par les nombreuses similitudes physiques et techniques entre les retenues collinaires appartenant à ces deux groupes (cf. figure 20). Le tableau 22 a montré que la valeur moyenne des apports annuels aux retenues collinaires varie suivant la période choisie pour le calcul. Les résultats obtenus pour les deux retenues collinaires possédant les plus longues chroniques de données illustrent ces différences. Sur la période (sept. 95 – août 99) commune à l'ensemble des 12 retenues collinaires instrumentées, les apports annuels à Fidh Ali et à Hadada sont respectivement égaux à $0,05 \text{ Mm}^3/\text{an}$ et $0,12 \text{ Mm}^3/\text{an}$. En utilisant toute la période de mesure pour les calculs (sept. 93 à août 01 pour Fidh Ali et sept. 95 à août 03 pour Hadada), les apports moyens annuels deviennent respectivement égaux à $0,05 \text{ Mm}^3/\text{an}$ et $0,13 \text{ Mm}^3/\text{an}$. Les écarts entre ces valeurs et celles obtenues précédemment sont faibles (6%) et sont assimilés aux erreurs sur l'apport moyen annuel aux retenues collinaires calculés sur la période (sept. 95 – août 99). En unité surfacique, ces apports sont égaux à $0,02 \text{ Mm}^3.\text{km}^{-2}.\text{an}^{-1} \pm 6\%$.

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

Entre les périodes choisies pour calculer les variations des coefficients d'écoulement (1989-1996 et 1997-2005, cf. § 5.1), les surfaces contrôlées par les retenues collinaires augmentent en moyenne de 67 km² dans la zone aval du bassin versant du Merguellil. Ces surfaces devraient donc retenir un volume d'écoulements annuels V_R de 1,4 Mm³.an⁻¹ ± 6%. La proportion de ce volume, lâchée par ouverture des vannes et/ou déversée, est égale à 18%, valeur moyenne obtenue par bilan hydrique pour les retenues collinaires instrumentées (cf. tableaux 19 et 22).

Les apports moyens annuels au barrage El Haouareb sur la période 1997-2005 (notés V_E et correspondant à la période avec présence d'aménagements, par opposition à la période 1989-1996, considérée sans aménagement, cf. § 5.1.4) sont estimés à 13,9 Mm³/an ± 12% à partir du tableau 22. Les écoulements moyens annuels produits dans le bassin versant de Skhira sur cette même période (notés V_S) sont estimés à 8,3 Mm³/an (figure 73). Les volumes moyens annuels infiltrés dans le lit de l'oued Merguellil entre la station de Skhira et le barrage El Haouareb sur la période 1997-2005 (notés V_I) sont estimés à 2,5 Mm³/an (cf. § 5.1.4.iii). Soit V_B le volume moyen annuel collecté par les banquettes sur la période 1997-2005. Il doit vérifier l'égalité suivante :

$$[V_R \times (1-18\%) + V_B] / [V_R \times (1-18\%) + V_B + V_E - (V_S - V_I)] = 41-50\%$$

La résolution de cette équation aboutit à : $V_B = 5,6 \text{ Mm}^3/\text{an} \pm 21\%$. Compte tenu des volumes déversés et lâchés depuis les retenues collinaires, ces aménagements et les banquettes construits entre les périodes (1989-1996) et (1997-2005) retiennent respectivement 5% et 25% du ruissellement produit dans le bassin versant du Merguellil. Deux principales raisons expliquent la plus grande proportion d'écoulements collectés par les banquettes en comparaison avec les retenues collinaires. i/ La surface drainée par les banquettes construites entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005 est de 140 km² et seulement de 70 km² pour les retenues collinaires. ii/ La capacité initiale moyenne de stockage des retenues collinaires rapportée à la surface de leur bassin versant est de 37 mm. Cette valeur est probablement surestimée du fait de la non prise en compte de l'envasement et des lâchers de barrage. La capacité de stockage des retenues collinaires est donc largement inférieure à celle des banquettes qui avait été évaluée à 85 mm par Dridi (2000).

5.2.2. Bilan hydrique global des aménagements

i. Les retenues collinaires

La figure 84 illustre l'importance relative des différents flux de déstockage des volumes collectés et conservés⁴² dans les retenues collinaires, calculés sur la période sept. 95 – août 99 (cf. § 3.2 et § 3.3).

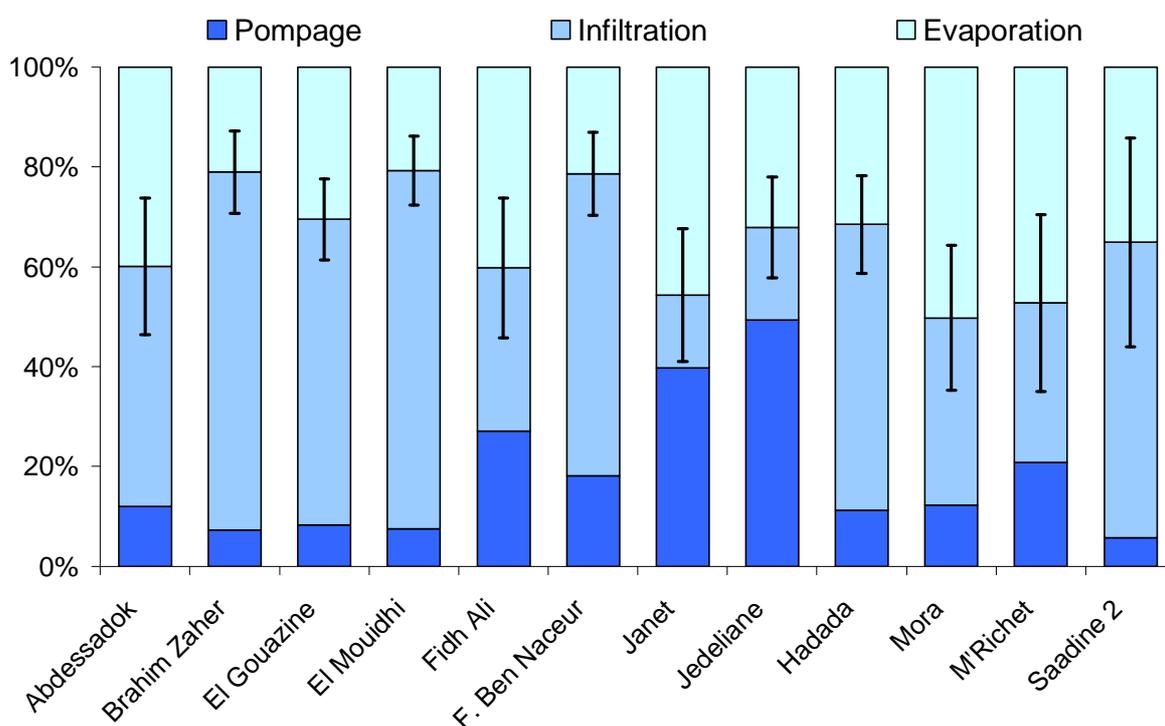


Figure 84. Contribution des volumes pompés, évaporés et infiltrés au déstockage total des retenues. Les barres d'erreur représentent l'incertitude sur l'évaporation (i.e. la somme des incertitudes sur l'infiltration et les pompages).

La retenue collinaire de Jedeliane se distingue des autres par son taux d'exploitation le plus élevé : la moitié du volume stocké dans la retenue est utilisé pour l'irrigation. Il s'agit de la seule retenue connectée à un périmètre irrigué situé en contrebas de la digue et alimenté par des écoulements gravitaires. La figure 85 présente le bilan hydrique global des retenues collinaires (retenue collinaire de Jedeliane exclue) et du barrage El Haouareb.

⁴² Les volumes déversés et lâchés ne sont pas pris en compte dans le bilan. Les lâchers sont généralement réalisés pour éviter les déversements en période de crue. Ces flux sont donc considérés comme du ruissellement non stocké dans les retenues.

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

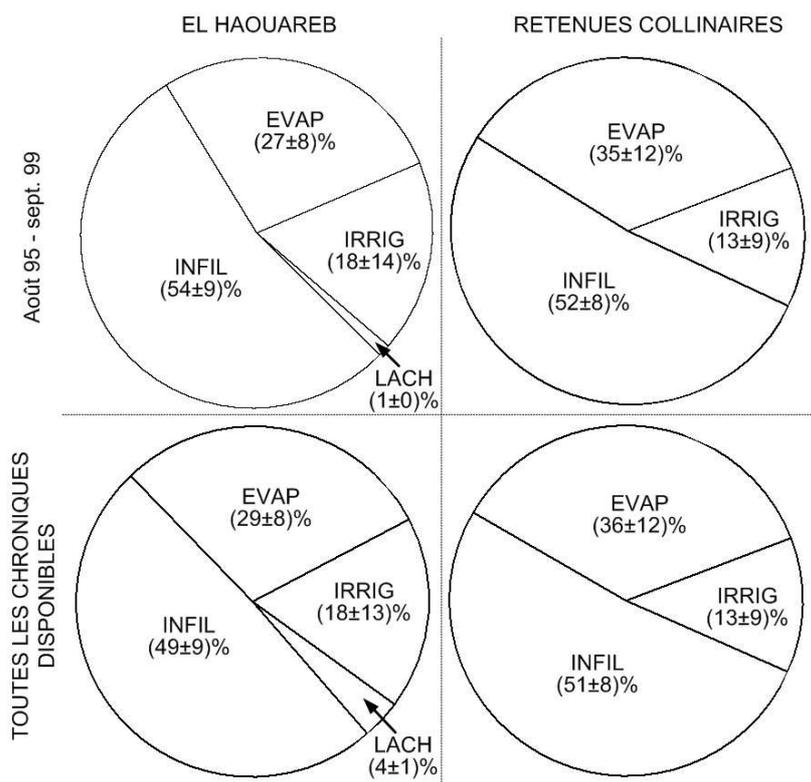


Figure 85. Bilan hydrique des 11 retenues collinaires (Jedeliane exclue) et du barrage El Haouareb sur la période commune aux chroniques de mesure ou sur l'ensemble des chroniques de mesure disponibles. EVAP : évaporation. INFIL : infiltration. IRRIG : prélèvements par pompage. LACH : lâchers de barrage.

Les bilans hydriques calculés sur la période sept. 95 – août 99 et à partir de toutes les chroniques de mesure disponibles (tableau 3) sont similaires. La différence la plus notable concerne les volumes lâchés depuis le barrage El Haouareb. Elle s'explique par les lâchers exceptionnels du printemps 1993 dont les volumes représentent 70% de la totalité des volumes lâchés sur la période 1989-2005.

ii. Les banquettes

Les données disponibles pour établir un bilan hydrique des banquettes dans le bassin versant du Merguellil sont très limitées. Il n'existe actuellement aucune mesure disponible permettant de quantifier la part des volumes infiltrés, évaporés, et transpirés par les cultures à partir de la zone bénéficiant du surplus hydrique collecté par les banquettes. Cependant, des observations sur le terrain et plusieurs références bibliographiques suggèrent que la totalité de l'eau collectée par les banquettes est finalement perdue par évapotranspiration sans augmenter les rendements agricoles.

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

Estimation des transferts d'eau vers la nappe

En effectuant des sondages sur les sites aménagés en banquettes dans le bassin versant du Merguellil, Dridi (2000) a montré que la profondeur du sol excède rarement un mètre. Au-delà, les encroûtements calcaires ou la présence du substrat rocheux empêchent la percolation. Dans les milieux semi-arides, la recharge des aquifères à partir des eaux de surface n'a généralement lieu qu'au niveau des plans d'eau maintenant une charge hydrostatique suffisante, à moins d'être en présence d'une nappe sub-affleurante, ce qui n'est pas le cas dans les régions montagneuses où sont construites les banquettes. Dans la zone insaturée, l'eau est généralement entièrement reprise par évapotranspiration (Favreau et al., 2001). La recharge de la nappe à partir des eaux infiltrées depuis les banquettes est donc très probablement nulle.

Estimation des volumes d'eau valorisés par l'agriculture

En collectant les eaux de ruissellement chargées de sédiments, les banquettes créent des zones humides et fertiles au niveau des fossés (Ben Mimoun, 1999; Jaziri, 1999). Lorsque les sols sont perméables en surface et moins filtrants en profondeur (sols bruns à croûte calcaire), le drainage hypodermique accroît la teneur en eau du sol à l'aval immédiat de la banquette. L'accroissement de la teneur en eau du sol est donc limité à ces deux zones et concerne presque uniquement les bourrelets de moins de cinq ans, encore fonctionnels (Roose, 2002a). Les cultures les plus aptes à valoriser ce surplus hydrique doivent avoir une profondeur d'enracinement suffisamment importante pour absorber l'humidité rémanente des couches de sol les plus profondes, surtout au printemps, lors de la reprise de la croissance (Oweis et al., 1999; Oweis et Hachum, 2006). En outre, ces cultures doivent tolérer les périodes d'immersion en automne et les longues périodes de sécheresse en été (Esser, 1999). Roose (2002b) montre que l'olivier (supportant des périodes d'immersion de 15 jours) est la culture la plus appropriée pour valoriser les banquettes de Tunisie centrale, avec une rangée d'arbres à l'aval du bourrelet et deux à l'amont. Cette zone intensivement plantée représente ainsi 30% de la surface du versant aménagé avec des banquettes (figure 86).

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

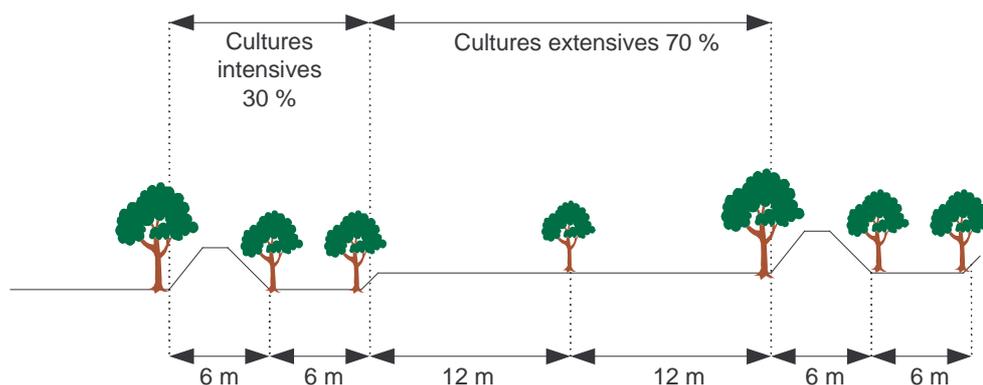


Figure 86 : Schéma de valorisation agronomique des banquettes par la plantation d'oliviers, d'après Roose (2002b).

La plupart des études expérimentales pour quantifier les gains agronomiques liés à la présence des aménagements débutent après 1950. Elles concernent surtout les aménagements construits au Moyen-Orient, en Australie, aux Etats-Unis et en Inde (Evenari et al., 1971; Prinz, 1994). En Afrique, la sécheresse des années 70 contribue à étendre les recherches dans les pays du Maghreb (Crichley et al., 1991). Peu d'études concernent la Tunisie : Habib Snane et al. (1991) développent un modèle de bilan hydrique appliqué à un système de meskats⁴³. Son objectif est de déterminer le rapport K optimal des surfaces de l'impluvium sur celles des cuvettes pour obtenir les meilleurs rendements. Les résultats indiquent qu'avec une pluviométrie annuelle moyenne de 320 mm, un rapport K = 1,5 est nécessaire pour produire 60 kg d'olives par an et par arbre. Seules deux études ont été conduites sur les banquettes : en 1959, au Maroc, la SOGETIM compare les rendements de l'orge cultivé en inter-banquette et en situation normale. Dans le premier cas, la culture produit 7 quintaux par hectare et seulement 2,75 en situation normale. A part cette étude, Heusch (1986) affirme qu'il n'existe aucun résultat d'expérimentation en Afrique du Nord permettant de justifier la construction de banquettes. En Syrie, Somme et al. (2005) déterminent le taux de mortalité de l'arbrisseau *Atriplex* planté dans des zones aménagées et non aménagées avec des banquettes. Sur les terrains aménagés, le taux de survie est de 90% en année sèche alors qu'il avoisine 10% sur les terres non aménagées.

Dans le bassin versant du Merguellil, les surfaces aménagées avec des banquettes sont des terres céréalières ou de parcours pour le bétail (Dridi, 2000; HAR, 2003). Les surfaces déjà plantées ne sont généralement pas aménagées car elles ne permettent pas le passage des bulldozers. Seules les cultures céréalières permettent donc de valoriser le surplus

⁴³ Meskat : cuvettes permettant de collecter les eaux de ruissellement issues d'impluviums pour la culture d'oliviers sur les versants semi-arides du Sahel tunisien. Ces aménagements sont peu différents des banquettes.

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

hydrique collecté par les banquettes les premières années qui suivent leur construction. La valorisation agronomique des banquettes par l'arboriculture nécessite une attente de plusieurs années pour que les arbres plantés après la construction des banquettes deviennent productifs. Dans le bassin versant du Merguellil, la plupart des programmes de plantation d'arbres dans les zones aménagées en banquette ont débuté à partir de 2000. Plusieurs années sont encore nécessaires avant de pouvoir espérer obtenir des gains significatifs.

Les seules cultures aujourd'hui en place dans le bassin versant du Merguellil, et susceptibles de valoriser immédiatement les banquettes, sont donc les céréales. Mechergui (2000) montre qu'en accroissant leur réserve utile de plus de 20%, les banquettes pourraient augmenter leur rendement en les faisant passer de 10 à 15 quintaux/ha. Mais cette hausse des rendements serait limitée aux terrains jouxtant les banquettes : environ 15% de la surface du versant aménagé. Ces gains sont compensés par les pertes en surfaces cultivables (fossés régulièrement inondés, bourrelets, horizons décapés à l'aval immédiat des banquettes (Krüger, 1994)) évaluées à 5-15% en fonction de la pente (Roose et De Noni, 1998; Roose, 2004). Il convient d'y ajouter les pertes en rendement favorisées par la dissémination des mauvaises herbes et des rongeurs via les cordons aménagés (Herweg, 1995) et/ou induites par la difficulté accrue à traiter et récolter les cultures lorsque les plateformes de circulation sont trop étroites pour permettre le passage des engins agricoles (Heusch, 1986). A l'échelle du versant, le gain agronomique lié à la présence des banquettes est donc probablement négatif avec des pertes en rendement pouvant atteindre 15%.

Conclusion

A l'échelle du versant aménagé en banquette, l'absence probable de recharge des aquifères à partir des eaux collectées et l'absence de gain agronomique lié au surplus hydrique suggèrent que tout le volume d'eau retenu est finalement perdu par évaporation. Si les oliviers plantés sur les nouvelles banquettes s'acclimatent correctement aux conditions pédoclimatiques du haut Merguellil, plus défavorables que dans la plaine de Kairouan, il conviendra alors de reconsidérer le niveau de valorisation agronomique des banquettes qui pourrait alors devenir largement positif. La valorisation agronomique des écoulements en tête de bassin présenterait alors le double avantage de réduire l'érosion et l'évaporation en réduisant le ruissellement vers l'aval.

5.3. Résultats et discussion

La figure 87 illustre la méthode utilisée pour estimer l'impact des aménagements de CES construits entre les périodes 89-96 et 97-05 sur la redistribution de la ressource en eau et de ses usages dans le bassin versant du Merguellil.

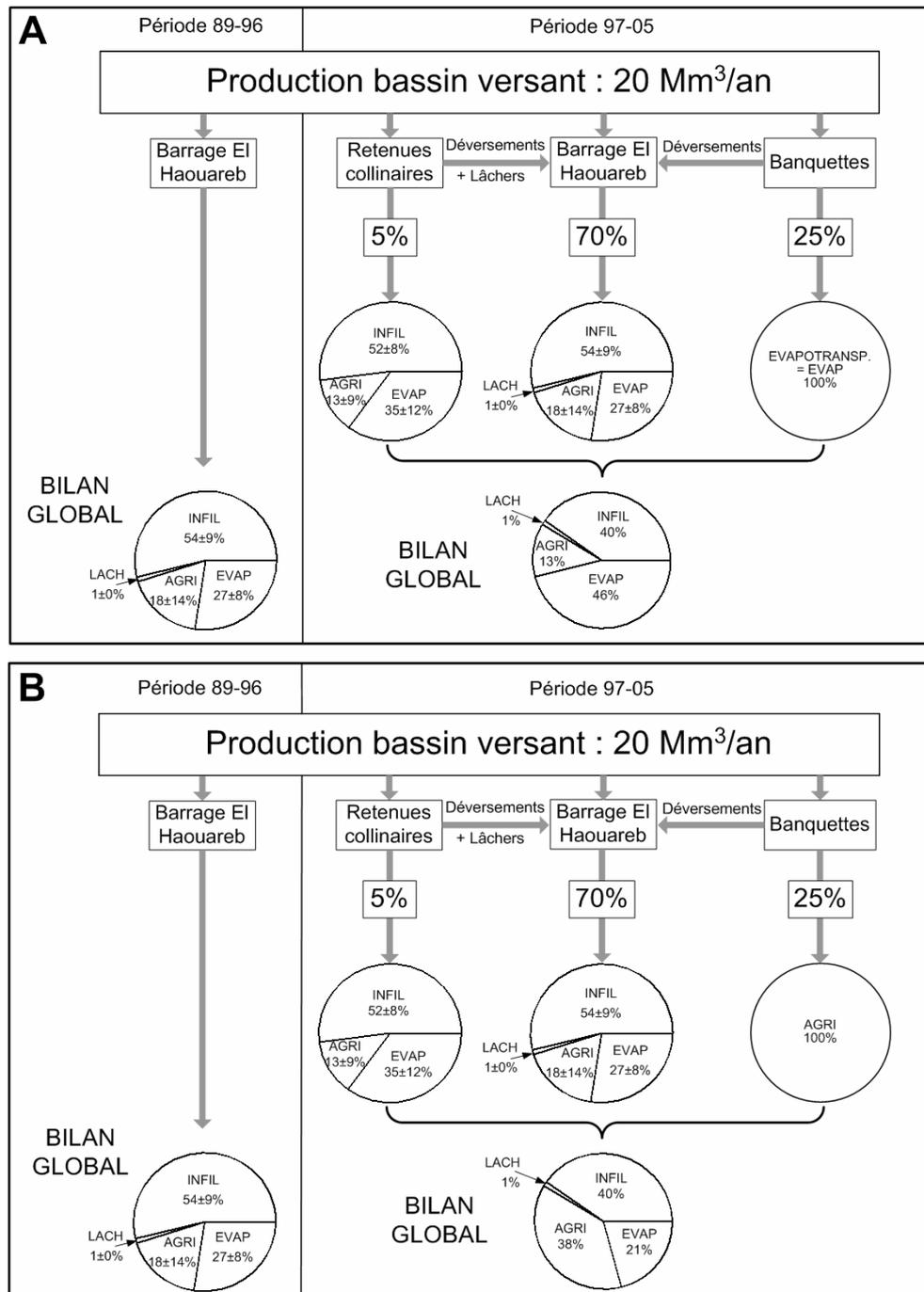


Figure 87. Effet des aménagements de CES construits entre les périodes 89-96 et 97-05 sur le bilan hydrique du bassin versant du Merguellil. A : banquettes non plantées. B : banquettes intégralement plantées avec des oliviers. EVAP. : évaporation. EVAPOTRANSP. : évapotranspiration. INFIL. : infiltration. AGRI : eau destinée aux cultures.

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

La production moyenne annuelle en écoulements du bassin versant du Merguellil est estimée à partir du tableau 22. Sur la période 1989-1996, elle est égale à 20 Mm³/an au niveau du barrage El Haouareb (partie gauche de la figure 87). Sur la période 1997-2005, seuls 70%⁴⁴ de ces écoulements parviennent au barrage El Haouareb, le reste étant collecté par les banquettes et les retenues collinaires (partie droite de la figure 87) construites entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005. L'estimation du volume collecté par les retenues collinaires (cf. § 5.2.1) a montré qu'il représente le sixième du volume retenu par l'ensemble des aménagements de CES, le reste étant collecté par les banquettes. Ces résultats se traduisent sur la partie droite de la figure 87 par la répartition des écoulements collectés sur la période 1997-2005 entre le barrage El Haouareb (70%), les banquettes (25%) et les retenues collinaires (5%).

Le bilan hydrique de chaque catégorie d'aménagements (barrage El Haouareb, retenues collinaires et banquettes), représenté par des secteurs sur la figure 87 est issu des calculs détaillés en partie 5.2.2. Le bilan hydrique global des retenues collinaires du bassin versant du Merguellil est assimilé à celui des retenues collinaires du réseau HYDROMED. Cette assimilation est justifiée par les nombreuses similarités physico-techniques entre les deux groupes de retenues collinaires (figure 20). Deux bilans hydriques sont proposés pour les banquettes et correspondent aux figures 87 A et 87 B. Sur la figure 87 A, les banquettes sont majoritairement non plantées, conformément à la situation rencontrée en 2005 sur le terrain. Dans cette situation et à l'échelle du versant aménagé, nous avons montré que l'intégralité du surplus hydrique collecté au niveau des fossés est reprise par évapotranspiration sans gain agronomique significatif (cf. partie 5.2.2.ii). Le bilan hydrique des banquettes peut alors être assimilé à une perte totale des flux collectés par évaporation. La figure 87 B correspond à une situation dans laquelle toutes les banquettes sont plantées avec des oliviers. Compte tenu de la surface moyenne aménagée entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005 (140 km²) et de la distance inter-banquette moyenne de 32 mètres mesurée sur les sites aménagés (Dridi, 2000), la plantation de trois rangées d'oliviers de part et d'autre des talus (selon les préconisations de Roose (2002b)) avec un espacement de 10 mètres entre chaque arbre correspondrait à 1 312 500 oliviers au total. En supposant que les 5 Mm³ d'écoulements annuels collectés par les banquettes soient équitablement répartis entre les oliviers, ils équivalent à un apport de 3,8 m³.an⁻¹.arbre⁻¹. Ce volume est du même ordre de grandeur que les doses généralement apportées par irrigation à partir des retenues collinaires (3 m³.an⁻¹.arbre⁻¹, cf. tableau 30). La différence majeure entre cette irrigation

⁴⁴ L'étude de l'impact hydrologique des aménagements de CES (cf. partie 5.1) a montré qu'ils ont réduit de 30% les apports au barrage El Haouareb entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005.

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

passive par collecte des écoulements et une irrigation contrôlée par pompage dans les retenues collinaires réside dans leur distribution temporelle. Dans le premier cas, les apports ont lieu principalement en période pluvieuse lorsque les besoins en eau d'irrigation sont les plus faibles. Dans le second cas, les apports par irrigation sont réalisés en période de stress hydrique. Ils sont donc bien mieux assimilés par les plantations. Les différences d'efficience entre ces deux modes d'irrigation seront d'autant plus atténuées que le sol et l'enracinement des plantations seront profonds, tamponnant les variations temporelles de la disponibilité de l'eau collectée par les banquettes. Le bilan hydrique des banquettes présenté sur la figure 87 B correspond à la situation optimale selon laquelle les écoulements collectés au niveau des banquettes seraient aussi bien valorisés que les apports par irrigation depuis les retenues collinaires. Le degré de valorisation agronomique des banquettes que l'on peut espérer doit donc se situer entre les deux cas extrêmes présentés sur les figures 87 A et 87 B.

L'impact global des aménagements de CES construits entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005 sur la redistribution des flux évaporés, infiltrés et utilisés peut donc s'apprécier en comparant le bilan hydrique des écoulements stockés avant la construction de ces aménagements (partie gauche de la figure 87 correspondant à la période 1989-1996) et après leur construction (partie droite de la figure 87 correspondant à la période 1997-2005). Sur la première période, le bilan hydrique global des écoulements produits dans le bassin versant correspond au bilan hydrique du barrage El Haouareb. Sur la seconde période, le bilan hydrique global est égal à la somme des bilans hydriques de chaque catégorie d'aménagements pondérés par la proportion des écoulements leur parvenant.

Un processus pourrait invalider en partie le schéma de la figure 87 : tout le ruissellement produit sur les surfaces aménagées (bassins versants des retenues collinaires et versants aménagés en banquettes) ne s'écoulerait pas jusqu'au barrage El Haouareb dans la situation non aménagée. En effet, une partie serait reprise par évaporation ou rejoindrait les aquifères par infiltration dans le lit des oueds avant d'atteindre le barrage El Haouareb. Les 30% du volume produit dans le bassin versant du Merguellil et collectés par les aménagements de CES (partie droite de la figure 87) ne peuvent donc être simplement translatés vers le barrage El Haouareb pour appréhender la situation sans aménagement (partie gauche de la figure 87). Plusieurs éléments suggèrent que ce processus est d'importance mineure et peut être probablement négligé. Les temps de concentration des bassins versants du Merguellil et de Skhira sont respectivement égaux à 10 h et 1 h30 (cf. § 5.1.4.i). La majorité des aménagements étant situés à l'aval de la station de Skhira (figure 71), la durée théorique des écoulements entre leur emplacement et le barrage El Haouareb est inférieure à 8 h30. Sur cet intervalle de temps, les lames évaporées sont faibles, surtout

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

en période pluvieuse. Dans le bassin versant du Merguellil et dans les milieux semi-arides en général, les écoulements sont de courte durée et presque synchronisés avec les évènements pluvieux. Les écoulements produits sur les sites aménagés, s'ils n'étaient pas retenus, ruisselleraient sur une surface déjà saturée en eau (le ruissellement produit sur les sites aménagés est largement inférieur au ruissellement produit ailleurs) et dans une atmosphère humidifiée par les pluies. Il est donc probable que la part de ces écoulements infiltrée et évaporée au cours du transfert entre le site aménagé et le barrage El Haouareb soit faible.

Ben Ammar et al. (2006) ont mis en évidence la recharge de la nappe de Kairouan par infiltration depuis le barrage d'El Haouareb par analyse isotopique. Grünberger et al. (2004) ont conduit une étude similaire sur la retenue collinaire d'El Gouazine et concluent également sur l'évidence d'une connexion hydraulique entre retenue et nappe. Ce sont les deux seules études à avoir mis en évidence les transferts hydriques entre une retenue d'eau et l'aquifère sous-jacent dans la région du Merguellil, la première se positionnant à l'échelle d'un aquifère régional et à la seconde au niveau d'une petite nappe alluviale de fond de vallée. Dans les deux cas, l'aquifère rechargé par la retenue est exploité par des puits ou des forages. Bien qu'aucune information ne soit disponible pour les retenues collinaires du bassin versant du Merguellil, nous supposons que tout le volume infiltré à partir des retenues collinaires regagne une nappe et constitue donc une ressource en eau exploitable par pompage. Dans le bilan hydrique global du bassin versant du Merguellil, les flux pompés et infiltrés constituent donc une ressource en eau disponible pour l'irrigation alors que les flux évaporés sont définitivement perdus. En effet, le cycle hydrologique évaporation–précipitation–évaporation a lieu à l'échelle du bassin méditerranéen. Avec des vents dominants soufflants du secteur nord–ouest vers le secteur sud–est, il est extrêmement peu probable que les volumes évaporés dans le bassin versant du Merguellil précipitent dans ce même bassin. Les flux évaporés constituent donc une perte définitive en ressource en eau à l'échelle du bassin versant du Merguellil.

La comparaison des bilans hydriques globaux des écoulements stockés dans le bassin versant du Merguellil entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005 montre que dans la situation A (banquettes non plantées, figure 87 A), les flux infiltrés et pompés passent de 54% à 40% et de 18% à 13% respectivement. Les flux évaporés passent de 27% à 46%. Sur la base d'une production annuelle en écoulements de 20 Mm³ dans le bassin versant du Merguellil, les aménagements de CES induisent une perte en ressource en eau par évaporation de 26% soit 3,8 Mm³/an. D'après les résultats d'enquête détaillés dans le

5 IMPACTS HYDROLOGIQUES DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS DANS LE BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL

tableau 33, ce volume permettrait d'irriguer entre 374 et 910 hectares de cultures maraîchères avec une récolte estivale et une récolte hivernale.

Sur la période 1997-2005, la comparaison des situations A et B (parties droites des figures 87 A et 87 B) montre que la plantation des banquettes augmente de 34% la valorisation agricole de la ressource en eau produite dans le bassin versant du Merguellil. Dans la situation B, la construction d'aménagements de CES suivie d'une plantation totale des banquettes augmente au mieux de 8% la valorisation agricole de l'eau par rapport à une situation sans aménagement. Ces résultats montrent que lorsque les banquettes existent, leur plantation est bénéfique puisqu'elle accroît significativement la valorisation agricole de la ressource en eau. En revanche, en partant d'une situation sans aménagement, l'intérêt hydro-agricole de la construction de banquettes est moindre voire négligeable, même si celles-ci sont totalement plantées.

6. CONCLUSION GENERALE

6.1 Synthèse des résultats.....232

6.2 Limites de l'étude et perspectives.....236

6 CONCLUSION GENERALE

Développée dans le cadre du programme de recherche MERGUSIE, cette étude a analysé les impacts d'aménagements de conservation des eaux et des sols (aménagements de CES) sur la redistribution de la ressource en eau et de ses usages dans le bassin versant semi-aride du Merguellil (1183 km²) en Tunisie centrale.

Dans le bassin versant de l'oued Merguellil, deux types d'aménagements sont majoritairement présents. Les retenues collinaires, petits barrages en terre d'une capacité moyenne de 0,2 Mm³, construits dans le lit des oueds en tête du bassin, drainent des superficies de quelques kilomètres carrés. Les banquettes, constituées d'un talus en terre (remblai) et d'un fossé (déblai), sont construites sur les versants suivant les courbes de niveau pour collecter le ruissellement en cas de fortes pluies. En 2007, 46 retenues collinaires et 226 km² de surfaces aménagées en banquettes drainent respectivement 20% et 19% de la surface du bassin versant du Merguellil. Les aménagements créés après 1989, année de construction du barrage El Haouareb situé à l'exutoire du bassin versant, représentent 73% des surfaces contrôlées. Ils ont été construits pour limiter l'envasement de cet ouvrage aval qui constitue le point de recharge principal de l'aquifère de Kairouan. En retenant l'eau de ruissellement à l'amont, les aménagements de CES modifient la distribution spatiale et sociale des coûts et bénéfices à l'échelle du bassin versant.

6.1. Synthèse des résultats

Deux approches ont été développées pour caractériser l'impact des aménagements de CES sur la ressource en eau.

6.1.1. Au niveau de l'aménagement : échelle locale

Des bilans hydriques journaliers ont été réalisés pour quantifier les différents flux de déstockage de douze retenues collinaires implantées dans la région du Merguellil. Le découpage des chroniques de mesures limnimétriques en épisodes de déstockage strict a permis de déterminer par régression linéaire multiple une drainance moyenne pour chaque retenue ainsi qu'un coefficient de transposition (coefficient pan) utilisé pour calculer les pertes évaporatoires à partir des mesures d'évaporation sur bac. L'analyse de la variabilité de ces deux paramètres a montré que la drainance varie peu entre les différentes retenues (coefficient de variation < 70%) et n'évolue pas significativement au cours de la période d'étude (entre six et neuf ans en fonction des retenues collinaires) malgré l'envasement rapide des retenues. Le coefficient pan prend des valeurs généralement proches de 0,9. Cette valeur n'avait encore jamais été calculée pour le Tunisie. Sa décroissance lorsque la

6 CONCLUSION GENERALE

surface du miroir de la retenue augmente est mise en évidence à partir des bilans hydriques des douze retenues collinaires.

Le bilan hydrique global des retenues collinaires étudiées sur la période sept. 95 – août 99 (commune à l'ensemble des stations de mesure) indique que 18% des écoulements parvenant aux retenues collinaires déversent ou sont lâchés au moment des crues pour éviter un débordement. $52\pm 8\%$ du volume conservé s'infiltré, $35\pm 12\%$ s'évapore et $13\pm 9\%$ est utilisé pour l'irrigation. Pour le barrage El Haouareb, ces ratios sont respectivement égaux à $54\pm 9\%$, $27\pm 8\%$ et $18\pm 14\%$ auxquels il faut ajouter $1\pm 0\%$ de lâchers. L'incertitude sur ces valeurs provient essentiellement de l'incertitude sur l'évaporation. Des enquêtes effectuées auprès des agriculteurs utilisant l'eau des retenues collinaires du bassin versant du Merguellil et du réseau HYDROMED ont montré qu'un peu moins de la moitié sont exploitées pour l'irrigation, avec en moyenne dix irrigants par retenue collinaire exploitée. Les surfaces irriguées sont destinées à l'arboriculture (98% des surfaces irriguées dont 70% pour l'olivier) et le maraîchage (2% des surfaces irriguées) qui consomme 17% des volumes alloués à l'irrigation. Les volumes prélevés calculés par bilan hydrique et estimés à partir des enquêtes sont toujours cohérents, aux incertitudes près, ces incertitudes avoisinant pour certaines retenues la valeur de 100%.

Une modélisation de la relation pluie-débit au pas de temps journalier a été réalisée sur les bassins versants de trois retenues collinaires représentatives des conditions climatiques de la région d'étude. Des simulations de la dynamique de leur remplissage-déstockage ont permis d'estimer leur fiabilité pour permettre l'irrigation des cultures en saison sèche, en fonction du niveau d'envasement des retenues collinaires. Ces simulations ont montré que le taux d'exploitation des retenues collinaires étudiées est élevé et correspond à un risque de pénurie en eau le plus souvent supérieur à 50%. Il n'est donc pas concevable d'accroître l'exploitation de ces retenues collinaires en intensifiant les prélèvements.

Le bilan hydrique des banquettes, habituellement construites sur les terres céréalières ou de parcours, a été estimé à l'échelle du versant aménagé et repose sur les descriptions biophysiques d'études antérieures. Compte tenu de la demande évaporatoire très forte sous climat semi-aride et de la brièveté des temps de séjour de l'eau stockée en surface au niveau des fossés des banquettes, il a été conclu que la totalité des flux infiltrés est finalement reprise par évapotranspiration. D'autre part, il s'avère que les gains en rendements agronomiques éventuellement réalisés de part et d'autre des talus et résultant du surplus hydrique collecté par les banquettes sont compensés par les pertes en surfaces cultivables. Ces deux observations permettent de conclure qu'à l'échelle du versant

6 CONCLUSION GENERALE

aménagé, l'eau de ruissellement retenue au niveau des banquettes est entièrement reprise par évapotranspiration sans gain agronomique significatif. Les plantations d'oliviers entreprises actuellement de part et d'autre des banquettes devraient permettre de mieux valoriser le surplus hydrique collecté au niveau des fossés. Ces plantations ont une plus grande profondeur d'enracinement et une meilleure résistance aux périodes d'immersion en comparaison avec les graminées.

6.1.2. Au niveau du bassin versant : échelle régionale

Dans le bassin versant du Merguellil, l'impact des aménagements de CES sur les écoulements a pu être caractérisé grâce au concours de trois circonstances. i/ La majorité des aménagements de CES ont été construits sur une période d'une dizaine d'années donc relativement courte, pour laquelle de nombreuses mesures hydrométéorologiques sont disponibles. ii/ Pendant cette période, les autres paramètres susceptibles d'altérer la relation pluie-débit (climat, occupation des sols, différence de charge entre rivière et nappe) sont restés stables. iii/ La configuration spatiale du réseau de stations de mesure a permis de comparer la réponse hydrologique de deux parties du bassin très contrastées : une zone aval couvrant 84% de la superficie du bassin versant et rassemblant 97% des surfaces aménagées depuis 1989 et un sous-bassin amont quasiment non aménagé. La variabilité temporelle de la relation pluie-débit dans le sous-bassin amont et dans le bassin versant du Merguellil a été analysée en comparant leur réponse hydrologique à des pluies spatialement homogènes puis à l'ensemble des pluies triées par intensité. Un test non paramétrique, basé sur une technique de ré-échantillonnage, a été appliqué au ruissellement simulé dans la zone aval par le modèle pluie-débit GR4J, successivement calibré sur des sous-périodes correspondant à différentes classes de hauteurs de pluie. Les résultats indiquent qu'entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005, le ruissellement produit dans la zone aval par les événements pluvieux inférieurs à 40 mm est réduit de 71-75%, changement jugé significatif par le test de Student avec un indice de confiance de 95%. La baisse des écoulements produits par toutes les pluies, sans distinction des intensités, est estimée à 41-50% dans cette zone aval et à 28-32% en incluant le sous-bassin amont dans l'analyse. Aucune modification n'est observée sur le ruissellement produit par les pluies supérieures à 40 mm dans la zone aval et par toutes les pluies dans le sous-bassin amont. L'analyse des causes possibles de cette réduction du ruissellement comme le climat, l'utilisation et l'occupation des sols, les échanges hydriques entre les eaux de surface et les aquifères, souligne le rôle prépondérant des aménagements de CES introduits sur 32% de la surface de la zone aval depuis 1989. La baisse globale du ruissellement dans cette zone (41-50%) est supérieure à la progression moyenne de 21% des surfaces aménagées entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005. Ceci suggère que les aménagements de CES ont été positionnés efficacement

6 CONCLUSION GENERALE

sur les zones du bassin versant produisant le plus de ruissellement. La répartition spatiale de la ressource en eau entre les régions amont équipées en aménagements de CES et les zones aval bénéficiaires des écoulements ne peut donc être simplement déterminée par la proportion des surfaces à aménager.

6.1.3. Intégration des résultats obtenus aux échelles locale et régionale

L'impact des aménagements de CES sur la redistribution de la ressource en eau et de ses usages dans le bassin versant du Merguellil est évalué à partir des bilans hydriques de chaque catégorie d'aménagements (retenues collinaires, banquettes et barrage El Haouareb) et de l'estimation de la réduction des écoulements que les banquettes et les retenues collinaires induisent à l'échelle du bassin versant du Merguellil. Deux situations sont envisagées. Dans la première, les banquettes ne sont pas plantées et l'intégralité des écoulements qu'elles collectent est perdue par évapotranspiration sans gain agronomique significatif. Cette situation est probablement le cas de figure le plus répandu actuellement. L'impact des aménagements de CES construits entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005 sur la disponibilité de la ressource en eau est exprimé en termes de variations des proportions des différents termes du bilan hydrique global des écoulements stockés dans le bassin versant. Les flux infiltrés et pompés passent de 54% à 40% et de 18% à 13% respectivement. Les flux évaporés passent de 27% à 46%. Ces changements équivalent à une réduction de $26\pm 18\%$ du volume de la ressource en eau dans le bassin versant du Merguellil.

Dans la deuxième situation, nous supposons que les banquettes construites entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005 sont totalement plantées avec des oliviers et que toute l'eau qu'elles collectent est valorisée de la même manière que l'eau pompée dans les retenues collinaires pour l'irrigation des oliviers. L'estimation des bilans hydriques globaux des écoulements stockés dans le bassin versant montre que le passage de la première à la deuxième situation accroît de plus de 30% la valorisation agricole de la ressource en eau. En revanche, en partant d'une situation sans aménagement, l'intérêt hydro-agricole de la construction de banquettes est moindre voire négligeable, même si celles-ci sont totalement plantées.

6.2. Limites de l'étude et perspectives

6.2.1. A l'échelle des aménagements de conservation des eaux et des sols

i. Retenues collinaires

La détermination des différents termes du bilan hydrique des retenues collinaires repose uniquement sur des mesures limnimétriques, pluviographiques et de lames évaporées sur bac. L'incertitude sur les calculs des flux infiltrés, évaporés et volontairement déstockés est donc très élevée puisqu'elle résulte de l'accumulation des erreurs et/ou des imprécisions sur les différents termes du bilan hydrique. Il serait nécessaire d'approfondir les connaissances sur la dynamique de vidange de ces retenues par des analyses isotopiques ou chimiques afin de caractériser les transferts hydriques entre les retenues et les nappes sous-jacentes ainsi que les volumes évaporés. Il serait également judicieux d'effectuer des analyses qualitatives de l'eau dans la nappe sous-jacente à l'aval immédiat des retenues collinaires afin de déterminer les proportions des flux infiltrés regagnant la nappe et reprises par évaporation. Des mesures météorologiques (température de l'air, de l'eau, humidité de l'air) devraient également permettre une meilleure estimation des lames évaporées.

La détermination des prélèvements dans les retenues collinaires, à partir des enquêtes, est basée sur l'estimation d'un nombre annuel d'heures de fonctionnement des pompes, calculé à partir du calendrier d'irrigation des cultures, établi au cours des enquêtes. Ce nombre d'heure est multiplié par un débit de pompage moyen estimé à partir de mesures réalisées sur plusieurs pompes au cours d'essais de pompage. L'estimation des volumes prélevés reste donc très approximative. Il serait souhaitable, pour les études à venir, de concentrer l'analyse des usages sur un échantillon plus restreint de retenues collinaires, choisi à partir des résultats de la présente étude de manière à ce qu'il soit représentatif des situations rencontrées dans le bassin du Merguellil. Une mesure précise des volumes prélevés, combinée à une cartographie des parcelles irriguées, devrait permettre d'accroître la précision sur la connaissance des doses d'irrigation appliquées aux cultures.

ii. Banquettes

L'absence de mesure sur le fonctionnement hydrique des banquettes a dû être compensé par plusieurs hypothèses simplificatrices pour quantifier l'impact de cette catégorie d'aménagement sur la redistribution des flux hydriques entre infiltration, évaporation et transpiration des cultures. Pour valider les résultats obtenus, il serait

6 CONCLUSION GENERALE

nécessaire de connaître la part des flux infiltrés depuis les fossés collecteurs et d'estimer la proportion de ces flux qui atteint les aquifères. Enfin, compte tenu de la progression fulgurante des surfaces aménagées en banquettes, il serait extrêmement utile de développer une expérimentation à l'échelle de la parcelle agricole pour estimer l'impact réel de ces aménagements sur les gains en rendements agronomiques. Il serait par exemple envisageable de suivre les rendements de deux parcelles agricoles soumises aux mêmes conditions environnementales, la première étant aménagée avec des banquettes et la seconde dépourvue d'aménagements.

6.2.2. A l'échelle du bassin versant du Merguellil

i. Impact des aménagements de conservation des eaux et des sols sur les écoulements

Plusieurs recherches ont été conduites pour tenter d'évaluer l'impact des aménagements de CES sur les écoulements dans le bassin versant du Merguellil. Il est intéressant d'observer la diversité des résultats obtenus, souvent contradictoires entre eux, et probablement très influencés par la méthode d'analyse choisie. En basant son approche sur la géométrie des aménagements de CES et leur organisation spatiale, Dridi (2000) montre qu'ils induisent une réduction des écoulements égale à la proportion des surfaces aménagées dans le bassin versant. A l'aide d'un modèle pluie-débit maillé à base physique couplant les écoulements de surface et souterrain, Kingumbi (2006) conclut que les aménagements de CES n'ont réduit que de 1% les écoulements dans le bassin versant du Merguellil, l'essentiel de la réduction du ruissellement étant due à la diminution de l'écoulement de base, consécutive au rabattement des nappes. Dans notre étude, nous expliquons, au contraire, que le facteur prépondérant dans la réduction des écoulements est la présence des aménagements de CES. Bien que l'argumentaire développé dans la partie 5.1.5 justifie pleinement nos interprétations et nos conclusions, la diversité des résultats obtenus par ces trois études témoigne de la difficulté à établir des liens sûrs entre causes et effets. Cette difficulté est d'autant plus élevée que notre zone d'étude semi-aride est vaste, hétérogène, et hydrologiquement instable. Afin de mieux préciser les processus à l'origine de la réduction des écoulements, il serait utile de mieux caractériser leur variabilité temporelle et notamment la durée des crues susceptible d'influencer les transferts hydriques entre les oueds et les nappes d'accompagnement. Densifier le réseau piézométrique le long de l'oued Merguellil devrait également permettre de mieux caractériser les échanges hydriques entre la surface et le milieu souterrain.

ii. Extrapolation spatiale des bilans hydriques locaux

L'évaluation de l'impact des aménagements de CES sur la redistribution de la ressource en eau à l'échelle du bassin versant du Merguellil n'a pu être réalisée qu'au prix de certaines hypothèses simplificatrices préalablement justifiées : équivalence entre le bilan hydrique global des retenues collinaires du réseau HYDROMED et celui des retenues collinaires du bassin versant du Merguellil ; absence de reprise évaporatoire et de perte par infiltration sur les écoulements de surface entre les aménagements de CES et le barrage El Haouareb. Cette étude a permis en outre de déterminer les principaux paramètres contrôlant la dynamique de vidange des retenues collinaires : l'évolution de la géométrie des réservoirs (§ 3.1.3.iv), la drainance et le coefficient de transposition entre bac évaporatoire et retenue (§ 3.2.2.iv). Les valeurs de ces paramètres constituent une base de données intéressante qui pourrait être utilisée pour déterminer par modélisation les bilans hydriques des retenues collinaires non instrumentées sur la base de leur caractéristique physico-techniques connues. Une étape supplémentaire pourrait alors consister à inclure les aménagements de CES dans une version plus élaborée du modèle GR4J+ (figure 79).

iii. Bilan global du bassin versant

Cette étude d'impact s'est focalisée sur la ressource en eau sans tenir compte des bilans de l'érosion que les aménagements sont sensé réduire pour limiter l'envasement du barrage El Haouareb et protéger les terres cultivables. L'analyse hydrologique en partie 5.1 a montré que l'augmentation de 21% des surfaces aménagées entre les périodes 1989-1996 et 1997-2005 dans la partie aval du bassin versant a induit une réduction d'environ 45% des écoulements. Ces aménagements ont donc été construits dans les zones les plus productives en écoulements et vraisemblablement les plus sensibles à l'érosion. Une analyse des bilans de transports solides dans le bassin versant du Merguellil devrait être réalisée pour estimer plus précisément l'impact des aménagements de CES sur l'érosion. Il serait alors utile de voir si le coût lié à la réduction de la ressource en eau à l'aval n'est pas atténué ou compensé par le prolongement de la durée de vie du barrage El Haouareb.

6.2.3. Enseignements sur la gestion des ressources en eau pour le développement

Par deux analyses disciplinaires menées conjointement, hydro-agricole à l'échelle locale et hydrologique à l'échelle régionale, cette thèse démontre comment les efforts pour la préservation des ressources hydriques aboutissent finalement à un bilan très mitigé.

6 CONCLUSION GENERALE

La construction des aménagements de CES est citée maintes fois par les médias locaux pour démontrer les efforts investis dans la préservation et la gestion des ressources en eau (Kefi, 2000; Gharbi, 2006; Z., 2006; M'Barek, 2007). En revanche, l'organisation spatiale de ces aménagements et plus particulièrement leur superposition topologique est un problème rarement évoqué par les bureaux d'études en charge de leur construction. Or ces aspects sont fondamentaux, comme le démontre cette thèse : des réservoirs construits à l'amont d'un barrage ne sont globalement bénéfiques que dans la mesure où leur stock d'eau est mieux valorisé que dans la retenue aval. Cette analyse devrait être un préalable systématique avant la construction de nouveaux ouvrages de collectes de l'eau dans des régions déjà aménagées.

7. ANNEXES

7.1 Sigles.....	242
7.2 Calcul de ETo.....	244
7.3 Résultats annexes de simulation.....	246
7.4 Caractéristiques des pompes.....	247
7.5 Formulaires d'enquêtes.....	248
7.6 Article soumis à Journal of Hydrology.....	252
7.7 Table des illustrations.....	276

7.1. Sigles

7.1.1. Acronymes

AIC : association d'intérêts collectifs

CES : conservation des eaux et des sols

CESBIO : Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CRDA : Commissariat Régional de Développement Agricole

DG/ACTA : Direction Générale de l'Aménagement et de la Conservation des Terres Agricoles

DGETH : Direction Générale des Etudes des Travaux Hydrauliques

DGGR : Direction Générale du Génie Rural

DGRE : Direction Générale des Ressources en Eau

ENIT : Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis

ENPC : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

GDA : Groupement de Développement Agricole

INAT : Institut National Agronomique de Tunis

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

MERGUSIE : MERguellil : Ressources, Gestion et USages Intégrés de l'Eau

7.1.2. Variables

i. Variables du chapitre 3

A : coefficient d'ouverture des retenues

Ar : apports par ruissellement dans une retenue

As : apports souterrains dans une retenue

C : cote du plan d'eau d'une retenue

C_T : coefficient de transposition bac-retenu.

CV : coefficient de variation

C_{ZERO} : cote d'une retenue pour laquelle l'infiltration est nulle

D : déversement depuis une retenue

E_{PAN} : évaporation mesurée sur bac évaporatoire

E_{RET} : évaporation d'une retenue

ET_o : évapotranspiration de référence

ETP : évapotranspiration potentielle

7 ANNEXES

I_{AP} : incertitude relative sur les apports aux retenues

I_{EPAN} : incertitude sur E_{PAN}

I_{ERET} : incertitude sur E_{RET}

I_f : infiltration dans une retenue

I_{If} : incertitude sur I_f

I_{ΔC} : incertitude sur ΔC

K : drainance d'une retenue

K_{PAN} : coefficient pan

L : lâcher d'une retenue

Mm³ : million de mètres cubes

Mt : million de tonnes

Po : pompages dans une retenue

R : coefficient de corrélation

R² : coefficient de détermination

S : surface du miroir d'une retenue

ΔC : variation temporelle de C (comptée positivement lorsque C augmente)

α : coefficient de forme des retenues

ii. Variables du chapitre 5

C_i : coefficient de variation du rendement hydrologique d'un bassin versant sur la période i

dr_i = $r_i - G_i$

G_i : ruissellement moyen calculé par régression sur la période i

q : cumul des débits simulés par le modèle GR4J

r_i : ruissellement moyen observé sur la période i

\bar{R}_L : lame ruisselée produite dans la zone aval du bassin versant du Merguellil

R_M : ruissellement produit dans le bassin versant du Merguellil

R_u : écoulements observés à la station de Skhira.

S : statistique du test de détection de tendance hydrologique

S_L : superficie de la zone aval du bassin versant du Merguellil

7.2. Calcul de ETo

Calcul des paramètres de l'équation 6 (page 73) à partir des équations issues de Allen et al. (1998).

7.2.1. Calcul de R_n

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

R_{ns} : radiations nettes solaires ou de courtes longueurs d'onde [$\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$],

R_{nl} : radiations nettes correspondant aux grandes longueurs d'onde ($[\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}]$).

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max, K}^4 + T_{\min, K}^4}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_g}{R_{SO}} - 0,35\right)$$

σ : constante de Stefan-Boltzman [$4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$],

$T_{\max, K}$: température absolue maximale journalière [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,15$],

$T_{\min, K}$: température absolue minimale journalière [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,15$],

R_{SO} : radiations de référence (clear-sky radiation) [$\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$].

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_g$$

α : albédo. $\alpha=0,23$ pour le gazon de référence. [adimensionné].

$$R_{SO} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a$$

R_a : radiation extra-terrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$].

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{SC} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

G_{SC} : constante solaire = $0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$,

d_r : distance inverse relative Terre – Soleil,

ω_s : angle horaire du Soleil [rad],

δ : déclinaison solaire [rad].

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$$

J : numéro du jour de l'année en cours, variant entre 1 (1^{er} janvier) et 365 ou 366 (31 décembre).

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right)$$

7.2.2. Calcul de e_s

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{\max}) + e^\circ(T_{\min})}{2}$$

$$e^\circ(T) = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right)$$

$e^\circ(T)$: pression de vapeur saturante [kPa] à la température T [°C].

7.2.3. Calcul de Δ

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(T + 237,3)^2}$$

T : température moyenne de l'air [°C].

$$T = \frac{(T_{\min,^\circ C} + T_{\max,^\circ C})}{2}$$

7.2.4. Calcul de e_a

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{\min}) \frac{HR_{\max}}{100} + e^\circ(T_{\max}) \frac{HR_{\min}}{100}}{2}$$

7.2.5. Calcul de γ

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} P$$

P : pression atmosphérique [kPa].

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26}$$

7.3. Résultats annexes de simulations

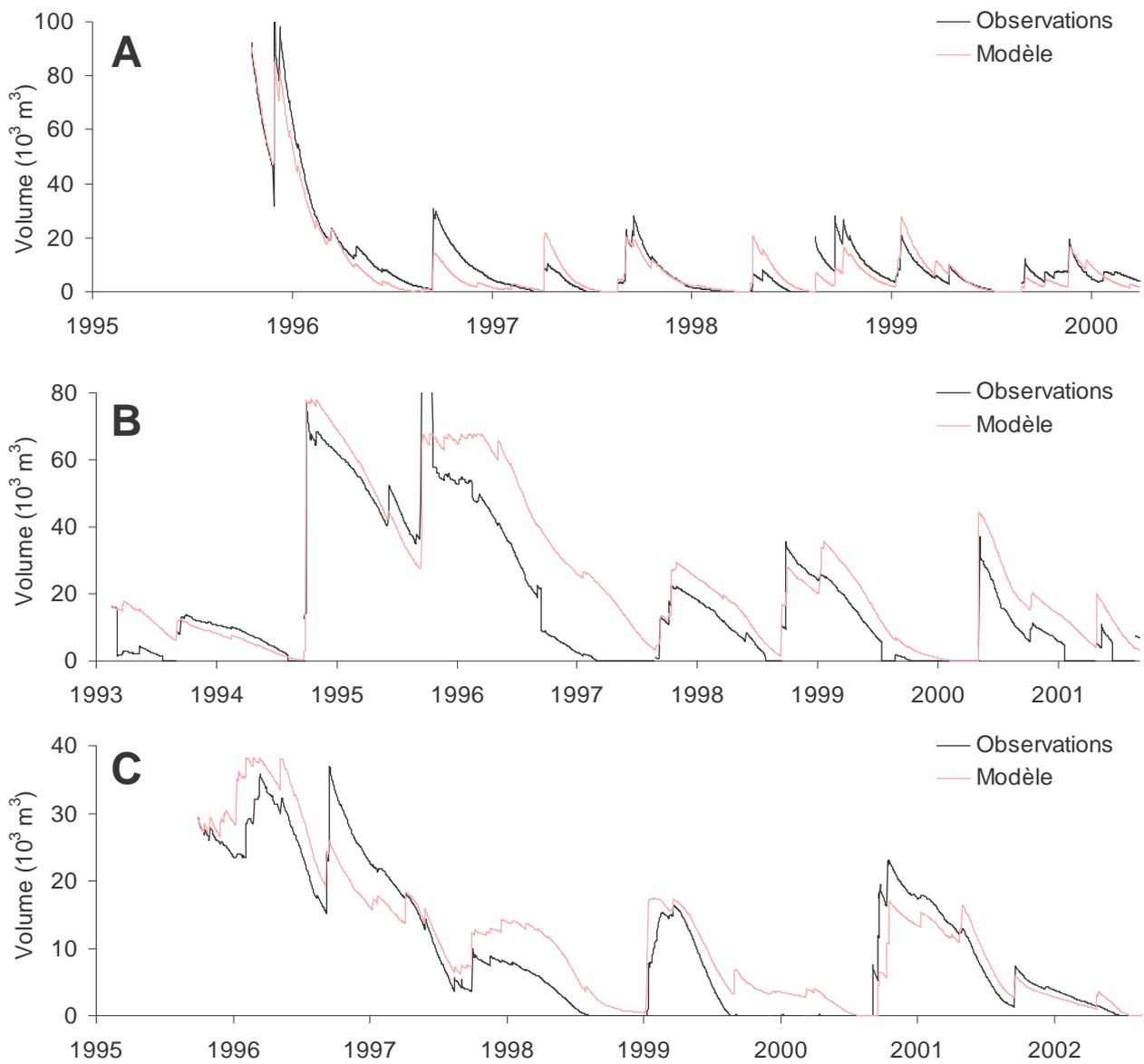


Figure 88. Variations journalières des volumes stockés dans les retenues collinaires d'El Moudhi (A), de Fidh Ali (B) et de M'Richet (C).

7.4. Caractéristiques des pompes

Tableau 41. Caractéristiques des pompes mesurées en juillet 2004 dans la plaine de Kairouan. Pression : hauteur manométrique entre prise d'eau et embouchure du tuyau. Consommation : gasoil. Débit : eau pompée. Mesures réalisées par Roger Calvez.

Moteur			Pression	Consommation	Débit	
Marque	Puissance (CV)	Rotation (Tr/min)	(Bar)	(mL/s)	(L/s)	
Atlas		1400	2.9	0.37	5.3	
		1555	3.0	0.35	4.4	
		1580	3.0	0.41	5.2	
		1600	4.6	0.49	3.4	
		1800	4.0	0.46	4.4	
		11	1800	4.1		2.1
			2500	3.4		3.3
			2500	3.0		3.5
			2950	3.0	0.30	4.4
			3100	3.0	0.39	4.4
			3200	3.0		4.4
			3300	3.0	0.48	4.4
		16	1500	3.3	0.50	5.5
			1550	5.3		3.1
			1600	4.4	0.45	3.2
			1600	3.4	0.55	5.5
			1600	5.3		4.0
			1650	4.4	0.45	3.3
			1730	3.4	0.60	6.1
			1800	4.4		6.5
1810	3.4		0.65	6.1		
2000	4.0			4.1		
32		4.5		3.6		
	1600	4.5		5.0		
Hatz		1500	2.9	0.50	3.2	
		1600	3.0	0.49	4.3	
		1600	2.9	0.36	3.3	
		1750	2.9	0.47	3.2	
16	1350	3.8	0.50	3.5		
	1500	3.8	0.63	3.6		
	1430	3.2	0.57	4.0		
Lambardini		24	1800	4.6	0.77	3.6
				5.0		3.7
	Moyenne	1879	3.7	0.49	4.2	
	Ecart type	557	0.8	0.11	1.0	

7.5. Formulaire d'enquêtes

Tableau 42. Questionnaire sur les modes d'irrigation.

	GDA 1		GDA 2	
	initial	actuel	initial	actuel
Appartenance au GDA				
Date d'adhésion				
Utilisation de la pompe 1				
Utilisation de la pompe 2				
N'utilise pas de pompe publique				

	AQ	PP	FA
Pompe privée			
Tuyaux acheté			

	Vol	PP
Citerne		

	Par Heure	Par an
CGP		

GDA : Groupement de Développement Agricole

AQ : Année aquisition

PP : Prix payé (DN)

FA : Fonctionne actuellement 1=oui 0=non

Vol : Volume de la citerne (Litre)

CGP : Consommation en gasoil de la pompe

Tableau 43. Questionnaire sur l'arboriculture

Plantations données par l'état						Plantations achetées						Tran	Taille				Tracteur Labour			Sarclage-Binage					
Nb	An	Surf	D	Sub	Parc	Nb	An	Surf	D	Prix	Parc		N/a	J/f	N o	Sa/j	N/a	H/p	P/H	N/a	J/f	NbH	NbF	SH/j	SF/j

Récolte 2004													Calendrier d'irrigation											
Traitement			Travaux					Production			Transport		Ja	Fe	Ma	Av	Ma	Ju	Ju	Au	Se	Oc	No	De
Pdt	N/a	P/t	NbH	NbF	NbJ	SH/j	SF/j	Kg p	Qv	P/k	Dest	NBV	P/V	Nf/m										
														Nhc/i										

Kg d'olives transformés en huile : Prix de la presse par kilo d'olive : Prix du litre d'huile vendu :
 Nb litres d'huile obtenus : Nb litres d'huile vendus : Prix transport pour presse :

- Nb : Nombre de pieds plantés
- An : Année de plantation
- Surf : Surface plantée (ha)
- D : Densité de planta. (espace inter-rang en m)
- Sub : Subvention reçue/arbre (DN)
- Prix : Prix du plant acheté (DN)
- Parc : Numéro de la parcelle
- Tran : Prix du voyage pour amener les plants achetés (DN)
- N/a : Nombre de taille/passage/traitement par an
- J/f : Nombre de jours de travail par passage/taille
- N o : Nombre d'ouvriers
- Sa/j : Salaire par jour de taille (DN)
- H/p : Nombre d'heures par passage
- P/H : Tarif pour une heure de location (DN)
- NbH : Nombre d'ouvriers homme
- NbF : Nombre d'ouvriers femme
- SH/j : Salaire homme par jour (DN)
- SF/j : Salaire femme par jour (DN)
- Pdt : Coût annuel des produits achetés
- P/t : Coût machine/traitement
- NbJ : Nb de jour de travail pour la récolte
- Kg p : Production (Kg)
- Q v : Quantité vendue (Kg)
- P/k : Prix du kilo vendu (DN)
- Dest : Lieu de vente
- NBV : Nombre de voyages par an
- P/V : Prix du voyage (DN)
- NF/m : Nb d'irrigation/mois
- Nhc/i : Nb d'heures/citernes par irrigation

7 ANNEXES

Tableau 44. Questionnaire sur la céréaliculture

	Semis 2004								Récolte 2005						Production 2005													
	Manuel				Tracteur				Manuel			Moiss-bat		BaT	Grain				Ballots				Labours					
	Par	Surf	Qg/h	Nb J	NbH	NbF	SH/j	SF/j	NbH	P/H	Nb J	NbH	NbF	P/H	NbH	NbH	Psa	Spd	Svd	Prs	PTB	Nbp	Nbv	Pbal	NbL	NHL	P/H	
Bl																												
Or																												
Fo																												
BIL																												
OrL																												
FoL																												
BII																												
OrI																												
FoI																												

	Semis 2003								Récolte 2004						Production 2004													
	Manuel				Tracteur				Manuel			Moiss-bat		BaT	Grain				Ballots				Labours					
	Par	Surf	Qg/h	Nb J	NbH	NbF	SH/j	SF/j	NbH	P/H	Nb J	NbH	NbF	P/H	NH	NbH	Psa	Spd	Svd	Prs	PTB	Nbp	Nbv	Pbal	NbL	NH	P/H	
Bl																												
Or																												
Fo																												
BIL																												
OrL																												
FoL																												
BII																												
OrI																												
FoI																												

Bl(L) : Blé cultivé en plein champ (sur parcelle louée)
 Or(L) : Orge cultivé en plein champ (sur parcelle louée)
 Fo (L) : Fourrage cultivé en plein champ (sur parcelle louée)
 Surf : Surface cultivée (ha)
 Par : Numéro de parcelle
 Qg/h : Densité de semis (kg/ha)
 NbH : Nombre d'heure
 BaT : Battage par tracteur
 Nb J : Nb jours

TrB : Ballots conçus avec presse sur tracteur
 Psa : Poids d'un sac de grain (kg)
 Spd : Nombre de sacs produits
 Svd : Nombre de sacs vendus
 Prs : Prix d'un sac vendu (DN)
 PTB : Coût total pour faire un ballot (main d'œuvre ou location machine)
 Nbp : Nombre de ballots produits
 P/H : Prix de l'heure de labour (location tracteur ou moissonneuse-batteuse)
 Cultivar : renseigne sur l'espèce à fourrage cultivée

BII : Blé cultivé en interculture
 OrI : Orge cultivé en interculture
 FoI : Fourrage cultivé en interculture
 Nbv : Nombre de ballots vendus
 Pbal : Prix d'un ballot vendu (DN)
 NbL : Nombre de labours/an
 NHL : Nombre d'heures par labour

7.6. Article soumis à Journal of Hydrology

Hydrological impact of water and soil conservation works in
the Merguellil catchment of central Tunisia.

Article soumis en avril 2007

Guillaume Lacombe^{a,b,*} lacombe.g@online.fr

Bernard Cappelaere^a bernard.cappelaere@ird.fr

Christian Leduc^b christian.leduc@ird.fr

^a UMR HSM (CNRS, IRD, UMI, UMII). Université Montpellier II. Case Courrier MSE.
Place Eugène Bataillon. 34095 Montpellier Cedex 5 – France. Tel/Fax. : +33 4 67 14 90
17/10.

^b UMR G-EAU (Cemagref, CIHEAM-IAMM, CIRAD, ENGREF, IRD, SupAgro). MSE, BP
64501, 34394 Montpellier Cedex 5 - France. Tel/Fax : + 33 4 67 14 90 91/72.

* Corresponding author

Keywords

Hydrological change

Water/soil conservation works

Conceptual model

Semi-arid area

Abstract

The Merguellil catchment (1183 km²), whose runoff is a major water resource for the Kairouan area in semi-arid Tunisia, was equipped with water and soil conservation works (WSCW) during the 1990s, mainly to reduce soil erosion and silting of the downstream El Haouareb reservoir. The spatial configuration of the hydro-meteorological station network makes it possible to characterize the catchment-scale hydrological impact of the WSCW. The catchment is subdivided into two parts, the upper subcatchment and the lower subarea. The latter covers 84% of the catchment surface area and gathers 97% of the surfaces controlled by WSCW. The space-time variability of the rainfall-runoff relationship is first analysed, comparing the runoff responses from the two nested catchments for different rain event depth ranges. A non-parametric test, based on a resampling approach, is applied to the lower subarea runoff simulated with the GR4J daily lumped rainfall-runoff model, which is calibrated for several subsets of data. Results indicate that from 1989 to 2005, the runoff produced by rainfall below 40 mm in the lower subarea was reduced by some 71-75%, a significant change at the 95% confidence level. This drop in runoff is estimated at 41-50% when considering all rain depths and at 28-32% when including the upper subcatchment in the analysis. No runoff change is found for above-40 mm rains in the lower subarea, nor for any rain depth range in the upper subcatchment. An analysis of various possible sources for the runoff reduction such as climate, land use/land cover, or water exchanges with the aquifer, led to the conclusion that WSCW, which were developed over 32% of the lower subarea since 1989, are the most likely cause for that reduction. Their sharp hydrological effects should be taken into account in order to manage the water resources at the river basin scale, especially in populated semi-arid areas where conflicts between water uses increase dramatically.

1. Introduction

In semi-arid regions, competition for water resource between upland and lowland areas is a recurrent problem as population and water needs increase. Generally, water and soil conservation works (WSCW) are built in uplands to face erosion and water scarcity problems. They consist of hillslope works reducing surface runoff and increasing local infiltration, and of small dams collecting headwater flow and providing supplemental water for irrigation. Intensive water uses are most often concentrated in alluvial plains that offer large and easily irrigable lands, better soils and abundant water resource through aquifer tapping. By retaining upstream runoff, WSCW modify the spatial and social distribution of costs and benefits at the catchment scale. With the fast growth of WSCW-equipped areas, it becomes necessary to investigate hydrological impacts and manage resources at larger scales, especially where conflicts between upstream and downstream water uses increase. Although precise knowledge on the WSCW hydrological impacts is a prerequisite, it remains rare especially in large catchments (above 100 km²).

In semi-arid catchments, most hydrologic impact studies have been conducted with respect to land use/land-cover modifications such as forestation, forest clearing (e.g., Leduc et al., 2001, in Niger; Siriwardena et al., 2006, in Australia), intensification of agricultural practices (e.g., Lorup et al., 1998, in Zimbabwe) or to climate change (e.g., Séguis et al., 2004, in the Sahel). The few investigations on WSCW effects on catchment hydrology mainly concern changes induced by large reservoirs (e.g., Batalla et al., 2004, in Spain; Güntner et al., 2004, in northeast Brazil; Thoms and Sheldon, 2000, in Australia). Studies on impacts of hillslope works (soil bunds, contour ridges, hedges, tillage) are extremely rare in large catchments as heterogeneity and data scarcity increase with catchment size. Xiubin et al. (2003) examined the correlation between the surface area controlled by WSCW and streamflow reduction in three catchments (362 000 km², 1121 km² and 70 km²) of the Yellow river basin in China. They found that controlled surfaces fractions of 26.0%, 28.3% and 56.3% induced runoff decreases of 49.4%, 52.6% and 49.7% respectively. Several research works were conducted either for small catchments or at the plot level. In central Tunisia, Nasri et al. (2004b) studied the hydrological impact of contour ridges in a 18.1 km² catchment and on a 0.11 km² hillslope. In both cases, introduction of contour ridges resulted in a runoff decrease varying between 50% and 90% for rainfall below 60-70 mm/day. In southern Tunisia, Nasri et al. (2004a) found that a traditional system of soil banks installed in a 0.26 km² catchment reduced the runoff to essentially zero. In Cabo Verde islands, Smolikowski et al. (2001) found that runoff occurred only for rainfall events higher than 40 mm, with an intensity above 40 mm/h, in 4 m² and 100 m² plots with two kinds of

conservation techniques (light mulching with maize haulms and hedging with bushes and grass). In semi-arid Kenya, Wakindiki and Ben-Hur (2002) evaluated the effects of indigenous WSCW on runoff from 12 plots of 12 m², and found that these techniques reduced the runoff by half. In all these local studies, questions of upscaling were not considered and hydrological consequences at the regional scale were not explored. At a larger scale, identifying specifically the effects on streamflow of given environmental changes is difficult because of the diversity and variability of factors controlling the runoff response to rainfall. Opposite effects may mask each other. When changes affect only a limited area of the catchment, the moderate magnitude of their impacts makes the results statistically non significant. For instance, in Australia Nandakumar and Mein (1997) found that for the level of uncertainty of their data, 65% of a 520 ha eucalyptus forest catchment would need to be cleared before flow increase could be asserted at the 90% prediction level.

Factors controlling the runoff response may be grouped into two categories relating to their time variability. The first category gathers the high-frequency factors that act at the event scale. They are essentially linked to meteorological conditions. In semi-arid areas, most authors agree that rainfall intensity is the dominant control on the runoff response (Bradford et al., 1987; Canton et al., 2001; Martinez-Mena et al., 1998), whereas initial soil moisture content generally plays a secondary role (Castillo et al., 2003; Fitzjohn et al., 1998; Karnieli and Ben Asher, 1993; Peugeot et al., 2003). These factors induce a large variability in the event rainfall-runoff relationship, making similar rainfall depths produce a large range of runoff depths. In the second category, the low-frequency factors that progressively modify the runoff response are essentially: climate change (Servat et al., 1997), land use changes (Calder et al., 1993; Fahey and Jackson, 1997), changes in the water table level, altering the flow intensity between the surface and underground (Matteo and Dragoni, 2005) and WSCW construction. When trying to identify the hydrological impact of low-frequency factors, a difficulty consists in being able to differentiate their effects from those of high-frequency factors. Hydro-meteorological data with high time/space resolution are generally used to model the relationship between high-frequency factors and runoff response. “Unexplained”, progressive changes in the catchment behaviour may afterwards be attributed to low-frequency factors. When data resolution is insufficient to identify the impact of high-frequency factors, the latter act as background noise in the rainfall/runoff relationship. Due to this noise, long data series are needed to identify rainfall/runoff changes due to one or more low-frequency factors.

The objective of this paper is to characterize the changes in hydrological behaviour of the Merguellil catchment, typical of semi-arid Tunisia, where WSCW were introduced. The rainfall-runoff variability over the catchment area is first analysed (section 3.1). The location and time of main runoff changes are identified, comparing the hydrological behaviour of the headwater catchment covering 16% of the Merguellil catchment and of the whole Merguellil catchment (section 3.2). A conceptual rainfall-runoff model is used in combination with a distribution-free test to detect the existence of a trend in runoff, for specific rainfall intensities, in the catchment part where WSCW were installed (section 3.3). An analysis of rainfall-runoff depths in this area is finally produced to quantify the runoff change (section 3.4).

2. Research area

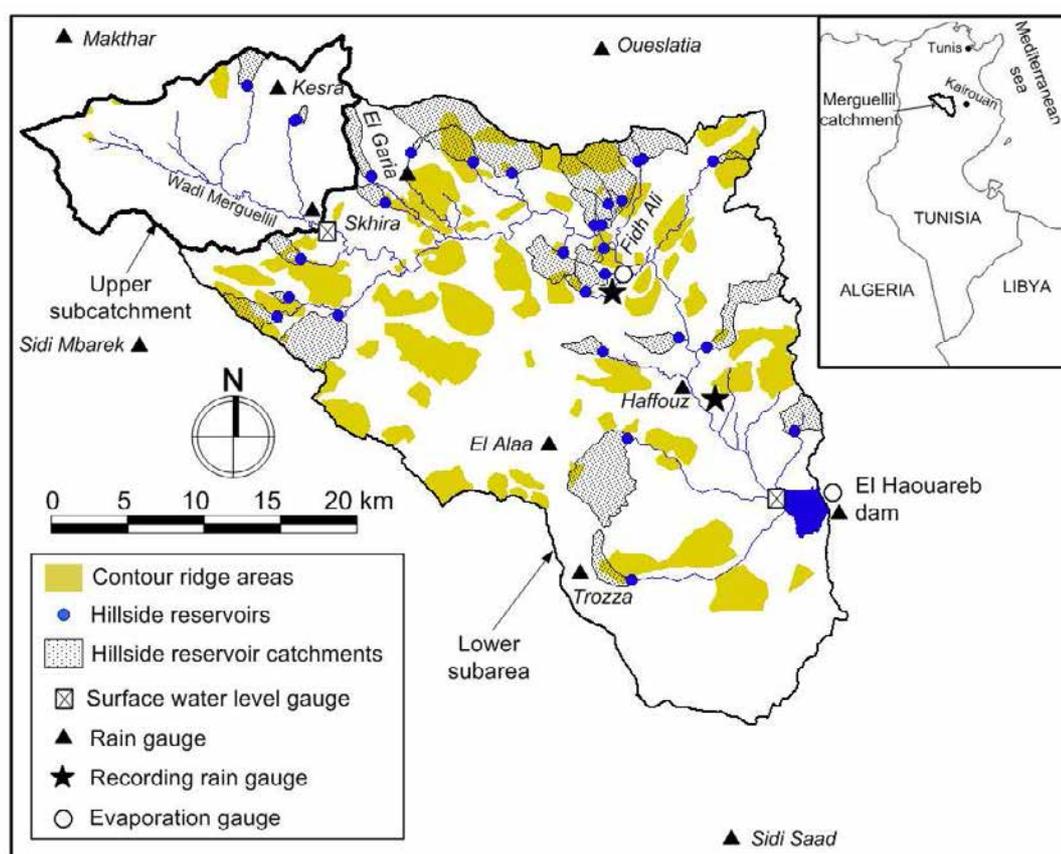


Figure 1. Hydro-meteorological stations and WSCW built in the Merguellil catchment between 1989 and 2005.

The Merguellil catchment is located in semi-arid central Tunisia, about 60 km west of the city of Kairouan (figure 1). Its surface area is 1183 km² at the El Haouareb dam, built in 1989 in order to protect Kairouan against floods. Downstream the El Haouareb dam, the Merguellil catchment is part of the Kairouan plain. Over 60% of the inflow collected by the El Haouareb

7 ANNEXES

dam infiltrates (Kingumbi et al., 2004). This dam is one of the main recharge points for the Kairouan plain aquifer which is the major water resource for this populated area.

About 70% of the catchment surface area has slopes below 7%. Slopes above 15% cover 10% of the catchment surface area. The mean annual rainfall (1929-2005) varies between 515 mm (for an average of 61 rainy days) at the top of the catchment (elevation = 1200 m) in the north-west and 265 mm (37 rainy days) at the catchment outlet (elevation = 200 m). About 83% of the mean annual rain falls between September and May with two peaks in October and March. Rain is extremely rare in July. Kingumbi et al. (2005) investigated the rainfall variability in the Merguellil catchment since 1966. They showed that while rainfall greater than 30 mm/day became more frequent after 1989, the areas covered by such heavy rains have been decreasing since 1976. Monthly temperature varies between 10 °C in February and 30 °C in July. The mean annual pan evaporation (1989-2005) is 2075 mm. Aquifers are located in the downstream area of the catchment (east of the El Alaa - Fidh Ali line, see figure 1). They consist of four interconnected aquifers covering 600 km². Half of the catchment area is cultivated with annual crops (wheat, barley) and trees (olive and almond). Grazing lands cover 30%, forest 19%, and urban areas 1%.

In the 1990's, the Tunisian government and international donors have subsidized the construction of WSCW (contour ridges and small dams) to reduce gully formation and allow supplemental irrigation in the Merguellil catchment (figure 2). Existing contour ridges were located using 2.5 and 10 m resolution SPOT images. Small dams were geo-referenced in the field with a GPS. The contours of their catchments were drawn from 1:50 000 topographic maps (figure 1). Between 1989 and 2005, 29 small dams were built, collecting runoff from 128 km². Contour ridges were constructed over 234 km² of lands, 12% of which located within the catchments of the small dams. As of 2005, WSCW collects runoff from 28% of the Merguellil catchment surface area. 97% of WSCW-controlled areas are located outside the Merguellil headwater catchment (referred to as the upper subcatchment defined by the Skhira gauging station), in the downstream part of the Merguellil catchment (henceforth called the lower subarea) where they control 32% of the surface area. The forest in the upper subcatchment probably explains why WSCW are almost absent from this area.

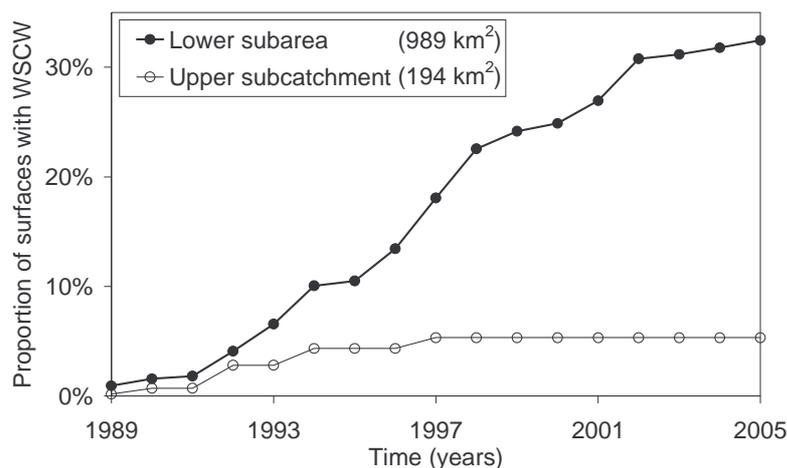


Figure 2. Progression of surfaces controlled by WSCW in the two parts of the Merguellil catchment.

2.1. Streamflow data

Two recording stage gauges are used in this study. Skhira station is located in the Merguellil wadi, at the upper subcatchment outlet, 54 km upstream from the El Haouareb dam. Instant stages have been recorded since 1974. Discharge data are of good quality, thanks to the rocky section producing a stable rating relationship. The second gauge records the water level in the El Haouareb reservoir since 1989. Water balance calculations allow estimation of daily inflows from the whole Merguellil catchment. The calculation precision depends on the water level in the reservoir and on the flow magnitude. For low flows, evaporation, infiltration and pumping become significant. When the water level is low, uncertainty on the stage-volume relationship is the highest. Releases from the dam are rare (3 days/year in average) and are performed to reduce dam silting. Mean uncertainty on runoff is estimated at 14%. There are two other gauging stations in the Merguellil catchment, but their data are either not reliable enough or too recent to be used in this study.

2.2. Meteorological data

Among the 30 daily rain gauges of the Merguellil region, 11 were selected as providing adequate data from 1981 to 2005, based on an analysis with the regional vector method (Brunet-Moret, 1979) (figure 1). There are only 2.1% missing data in the selected rainfall time series. They were filled in through multiple linear regressions using best correlated stations ($R^2 > 0.6$). There was rain on 20% of these missing days. Daily areal rainfall in the upper subcatchment and in the lower subarea is obtained by applying the Thiessen polygon method to the 11 daily rain gauges. Two additional rainfall recorders (Fidh Ali and Haffouz stations, 10 km apart) provide high resolution data, with a 0.5 mm step, from 1989 to 2002.

They are used to analyse the temporal structure of rainfall intensity. Daily measurements of evaporation are provided by Colorado tanks set up at Fidh Ali station from 1993 to 2000 and at El Haouareb dam from 1989 to 2005 (figure 1).

3. Data analysis

The period for the rainfall-runoff analyses is August 1989-December 2005, when all hydro-meteorological data are available. The larger record for daily rainfall, available since 1981, is used in the analysis of daily areal rainfall (§ 3.1.2).

3.1. Rainfall and runoff variability

3.1.1. Annual rainfall-runoff depths

Annual areal rainfall and runoff volumes for the upper subcatchment and for the whole Merguellil catchment are compared in figure 3. In 1990 and 1991, rainfall is about 17% higher in the Merguellil catchment than in the upper subcatchment. From 1992 to 2005, the situation is opposite to the first two years. Volumes collected until 1996 at the Merguellil outlet (El Haouareb dam) are greater than those measured at the Skhira station, in accordance with the spatial configuration of the two catchments. From 1997 to 2004, the differences between annual flows at these stations are considerably smaller. In 2005, flows differ significantly.

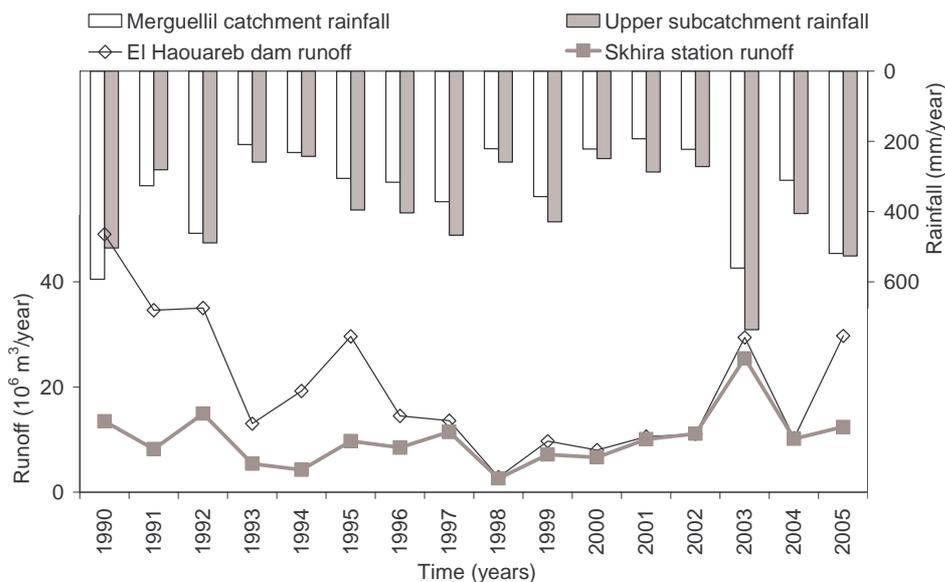


Figure 3. Annual rainfall and runoff for Merguellil catchment and upper subcatchment from 1990 to 2005.

3.1.2. Daily areal rainfall

The double mass comparison method is applied to daily areal rainfall in the lower subarea and in the upper subcatchment from 1981 to 2005 (figure 4), calculated by the Thiessen method from the 11 daily rain gauge data. Three different periods can be identified. Before October 1989 and after April 1992, rainfall was invariably higher in the upper subcatchment, more exposed to the wet winds coming from the north. From October 89 to April 92, mean daily rainfall was closer in the two Merguellil catchment parts.

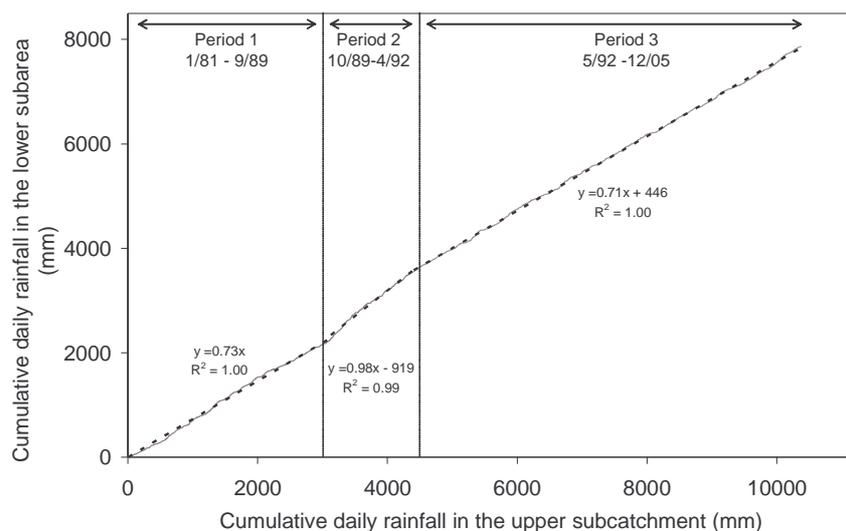


Figure 4. Continuous line: chronological double mass curve for daily areal rainfall in lower subarea and in upper subcatchment, from 1981 to 2005. Dotted line: linear regressions.

In table 1, yearly cumulative rain depths produced by different daily rainfall intensities are calculated over six successive multi-year periods. Rain depths are smaller in the lower subarea for all intensities and periods, except for above 20 mm/day rains in the 1989-1992 period, where rain depths actually increase in both subareas, making that period noticeably more humid.

Table 1. Mean cumulative rain depth per range of daily rainfall in upper subcatchment and in lower subarea, over six successive periods.

Rainfall intensity (mm/day)	Mean cumulative rain depth (mm/year)												Ratio (downstream / upstream) (%)										
	Upper subcatchment						Lower subarea						81-84		85-88		89-92		93-96		97-00		01-05
< 10	166	148	170	152	172	135	109	98	129	119	116	113	66	66	76	78	67	84					
10 to 20	107	100	123	118	117	115	81	74	97	82	77	92	76	75	79	69	66	80					
20 to 30	59	50	72	51	64	53	52	43	85	36	58	35	87	87	118	70	91	66					
> 30	40	42	131	64	63	166	34	26	142	44	47	95	85	64	109	69	75	57					
Total	372	339	495	385	416	468	276	242	453	280	298	334	74	71	91	73	72	71					

3.1.3. Defining areal rainfall-runoff events

Although the catchment-wide rain gauge network and the El Haouareb reservoir level gauge provide raw rainfall-runoff data at the daily time step only, this generally does give access to the more hydrologically appropriate event time-scale. Most rainfall comes as short, intense storms. Analysis of high resolution rainfall records at the Fidh Ali and Haffouz stations shows that, during the study period, 90% of the point rains (rainfall depth > 1 mm and minimum of 90 min without rain between two consecutive events) last less than 70 min and maximal rainfall duration does not exceed 5 hours; 93% of point rain depths can be computed exactly from daily rainfall. Areal rain event depths in the upper subcatchment and in the lower subarea are defined as the sum of consecutive daily areal rainfall above 3 mm/day. 276 events are identified in the lower subarea and 344 in the upper subcatchment. 96% of these events are made of one or two rainy days. Rain events exceeding 3 days are not considered as they produce only 4% of the total runoff during the study period. Events recorded in the lower subarea and in the upper subcatchment on the same day or with a one day lag are paired. This produces 372 rain events, 208 of them affect the whole Merguellil catchment, 48 are localised in the lower subarea only and 112 in the upper subcatchment only.

Because of sparse vegetation, low water holding soils and pronounced topography, river flows react rapidly to rainfall inputs. Flood hydrographs are sharp and short. Discharges recorded at Skhira station from August 1989 to December 2005 show that 83% of the runoff events (time between the beginning of the water level rise and the return to the former base flow level) last less than 24 hours. Occurrence of more than one event per day is rare and concerns less than 5% of the total number of runoff events. Time of concentration in the Merguellil catchment, calculated using the Kirpich formula (Kirpich, 1940), is 10 hours. In the upper subcatchment, it can be directly assessed from flood hydrographs, yielding a median value of 1.5 hour. Runoff produced by each rain event is approximated at the two gauging stations by summing up daily records exceeding the initial base flow. Only 6% of the rainfall-runoff events occurred during the flow recession of the previous event. Consequently, the runoff depths for each rain event are readily determined from the daily data and paired with the corresponding rain events.

3.1.4. Sub-daily rainfall intensity

Fine-scale rainfall intensity is one of the main climate parameters that determine runoff in semi-arid areas (Cudennec et al., 2005; Vischel and Lebel, 2007). Its temporal variability is analysed using the Haffouz and Fidh Ali time series, covering the periods 1989-1996 and 1993-2002 respectively. These two stations are the only ones providing high resolution rain

records in the Merguellil catchment during the study period. For each rain event recorded in the lower subarea, maximum rainfall depths are calculated over time lengths ranging from 5 minutes to 9 hours. Quartiles, means and standard deviations for each time length and for two successive periods are shown in figure 5. The first period (1989-1996) is taken either from Haffouz station exclusively (P1) or from both stations (P1'): Haffouz station for the years 1989 to 1992 and Fidh Ali station for the years 1993 to 1996. P2 (1997-2002) is taken from Fidh Ali station only.

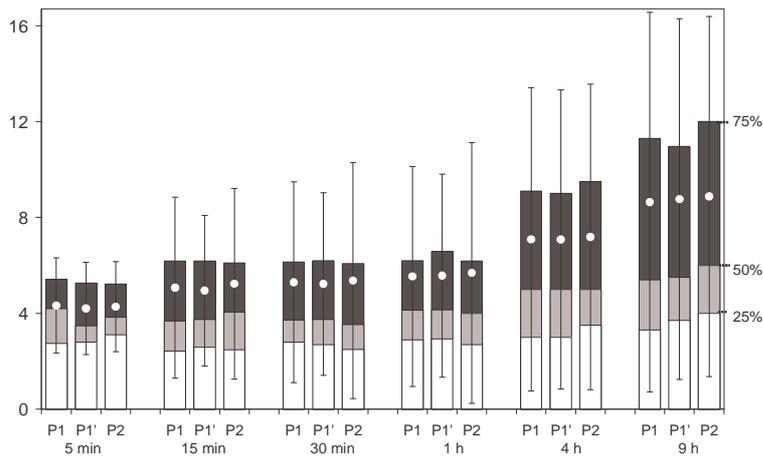


Figure 5. 25%, 50% and 75% quartiles (histograms), means (white dots) and standard deviations (bars) of maximum rain depth over given time lengths (from 5 min to 9 h). See § 3.1.4 for P1, P1' and P2 definitions.

For each time length, P1 and P1' means and quartile values are equivalent, suggesting that Haffouz and Fidh Ali stations provide equivalent rainfall records. The comparison of P1 and P2 or P1' and P2 suggests a stability in the sub-daily rainfall intensities, from the first to the second period.

3.1.5. Antecedent rainfall

In addition to rainfall intensity, the amount of rainfall antecedent to a rain event is important for the runoff response of the catchment. The antecedent rainfall is defined here as the cumulative areal rainfall depth over the 5 days preceding each rain event. figure 6 displays the distributions of antecedent rainfall in the upper subcatchment (A) and in the lower subarea (B) for the periods 1989-1996 and 1997-2005.

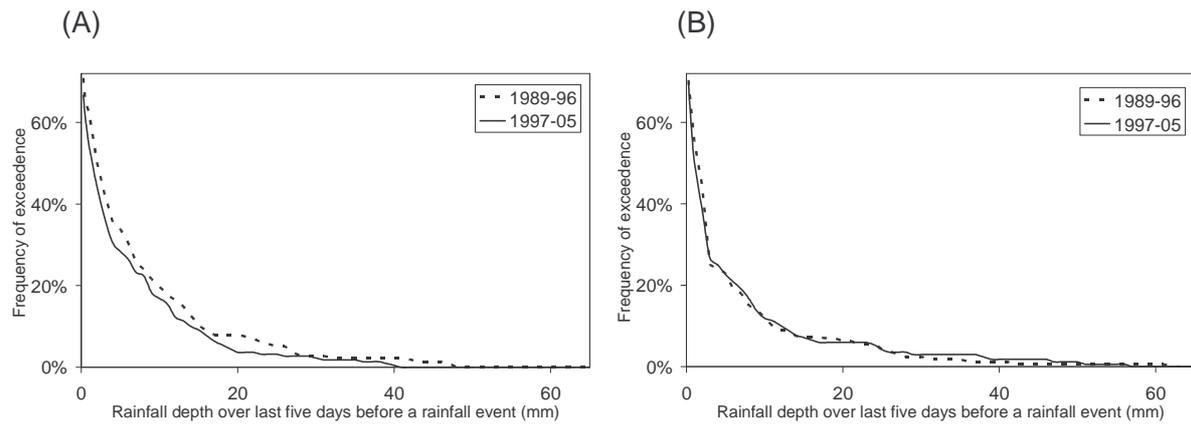


Figure 6. Distribution of antecedent rainfall during periods 1989-1996 and 1997-2005, in upper subcatchment (A) and in lower subarea (B).

Antecedent rainfall values satisfy the log-normal distribution test (Kolmogorov-Smirnov and Khi2 tests) with a 5% p-value. The two-tailed Student t-test applied to log-transformed values concludes to the absence of significant change between periods in the two Merguellil catchment parts with a 2.5% p-value.

3.2. Comparison of the runoff response in the two nested catchments

3.2.1. Runoff produced by spatially homogeneous rain events

Chronological double mass analysis is applied to spatially homogeneous rain events, i.e. when the difference between rain event depths in the upper subcatchment and in the lower subarea is below 20%; 15% of the 372 rain events satisfy this criterion (figure 7). They represent 31% of the total rain depth before 1997 (30% for the upper subcatchment and 31% for the lower subarea) and 16% from 1997 to 2005 (14% for the upper subcatchment and 21% for the lower subarea).

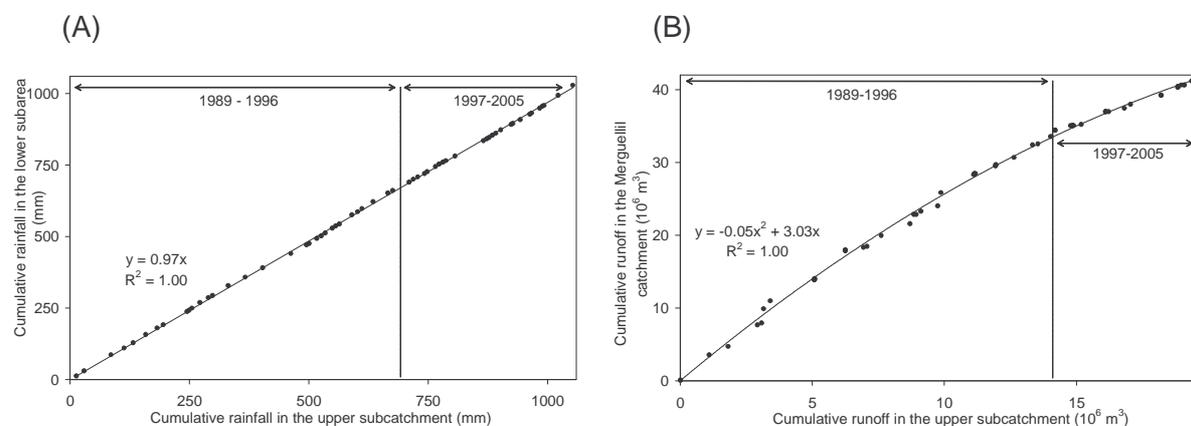


Figure 7. (A): chronological double mass curve for spatially homogeneous rain events. (B): double mass curve of corresponding runoff.

Although the rainfall depths in the upper subcatchment and in the lower subarea are strictly proportionate through the whole period (figure 7A), the ratio of corresponding runoff volumes (whole Merguellil catchment over upper subcatchment) shows a 41% reduction between the two sub-periods, resulting from a 61% runoff decrease in the whole Merguellil catchment and a 34% runoff decrease in the upper subcatchment (figure 7B). Mean runoff coefficients in the upper subcatchment and in the Merguellil catchment have respectively changed from 10.2 to 10.6% and from 4.1 to 2.5%, showing that the temporal shift in relative runoff production from the two nested catchments comes from a drastic reduction of the runoff response to rainfall in the lower subarea (table 2).

Table 2 Mean rainfall and runoff characteristics for homogeneous rains.

Periods	Rainfall (mm/event)		Runoff ($10^3 \text{ m}^3/\text{event}$)		(2)/(1)	Runoff coefficient (%)	
	Upper subcatchment	Lower subarea	Upper subcatchment (1)	Merguellil catchment (2)		Upper subcatchment	Merguellil catchment
1989 to 1996	21.5	20.9	425	1 017	2.39	10.2	4.09
1997 to 2005	13.7	13.5	282	398	1.41	10.6	2.48

3.2.2. Runoff produced by all rain events

In this section, the runoff responses are analysed separately for the two nested catchments, based on the full set of rain events. The water yields of the two catchments are compared between the periods 1989-1996 and 1997-2005.

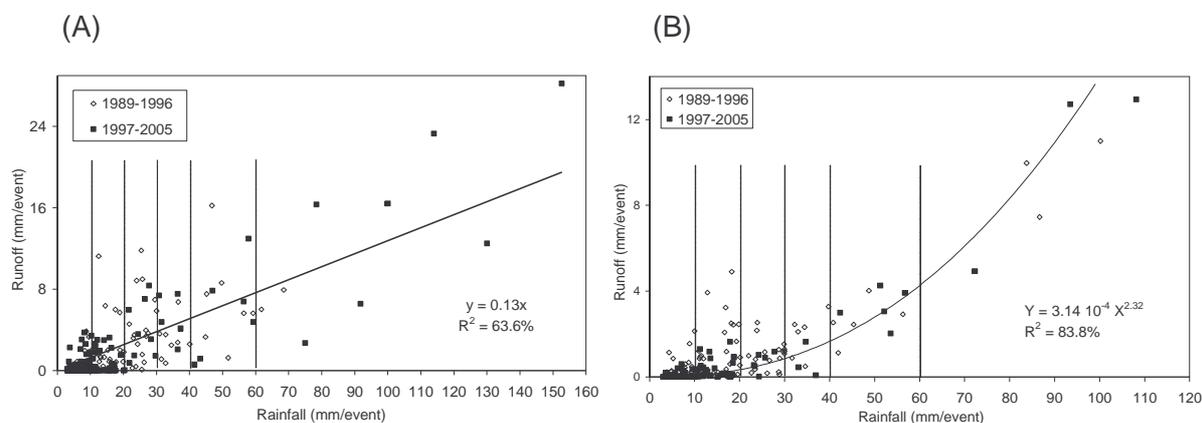


Figure 8. Rainfall versus runoff event depths. Continuous curves: regressions estimated from all events. (A): Upper subcatchment. (B): Merguellil catchment.

Figure 8, (A) and (B), shows rainfall and runoff depths for the upper subcatchment (320 rainfall-runoff events) and for the Merguellil catchment (372 rainfall-runoff events) respectively. A linear regression and a power regression are adjusted to all rainfall-runoff events over the full 1989-2005 period in the upper subcatchment and in the Merguellil catchment, respectively. Changes in the catchments water yields are analysed for different

7 ANNEXES

rain event depth classes: 0-10 mm, 10-20 mm, 20-30 mm, 30-40 mm, 40-60 mm and above 60 mm. In order to homogenize rain event depths within each rainfall class, the general growth trend linking rainfall to runoff is removed using the regression curves. For each rain depth class, the catchment water yield change between periods is characterized using mean observed runoff depths (r_i for period i) and mean estimated runoff depths from the regression curves (G_i for period i). Specifically, water yield change coefficients denoted by C_1 and C_2 are estimated as follows: $C_1=(dr_2-dr_1)/r_1$; $C_2=(dr_2-dr_1)/r_1(p_2)$, where $dr_i=r_i-G_i$ and $r_1(p_2)=G_2+dr_1$. The latter, $r_1(p_2)$, represents an estimate of the runoff that would have been produced by the precipitation events from the second period, had they occurred during the first period. The coefficients C_1 and C_2 amount to relative runoff changes from the first to the second period, estimated for the sets of rain events from the first period and from the second period, respectively. A negative (resp., positive) value for C_1 or C_2 means a runoff decrease (resp., increase). Corresponding values are displayed in table 3.

Table 3. Calculation of water yield change coefficients (C_1 and C_2) in the upper subcatchment and in the whole Merguellil catchment between Period 1 (1989-1996) and Period 2 (1997-2005) for different rain event depth classes. p_i is mean event precipitation for period i . See § 3.2.2 for definition of other variables.

Upper subcatchment												
Rain depth classes (mm/event)	Mean depths (mm/event)										Water yield change coefficients	
	Period 1: 1989 - 1996					Period 2: 1997-2005						
	p_1	r_1	G_1	dr_1	$r_1(p_2)$	p_2	r_2	G_2	dr_2	$r_2(p_1)$	C_1	C_2
< 10	5.8	0.2	1.6	-1.4	0.2	5.8	0.3	1.6	-1.3	0.3	57%	58%
10 to 20	14.1	1.0	2.8	-1.8	0.9	13.4	0.8	2.7	-1.9	1.0	-7%	-8%
20 to 30	24.8	3.9	4.4	-0.5	3.8	24.4	3.2	4.3	-1.2	3.2	-17%	-17%
30 to 40	33.2	3.4	5.6	-2.3	3.6	34.5	5.2	5.8	-0.7	5.0	48%	46%
40 to 60	49.2	6.3	8.0	-1.7	6.6	50.9	5.7	8.3	-2.6	5.4	-14%	-14%
>60	65.1	7.0	10.4	-3.4	13.0	105.9	15.1	16.4	-1.3	9.1	31%	17%
0 to 40	11.7	1.0	2.5	-1.5	0.8	10.2	0.8	2.2	-1.4	1.0	4%	5%
> 40	52.4	6.5	8.5	-2.0	10.6	80.5	10.8	12.6	-1.9	6.6	2%	1%
Total	14.1	1.3	2.8	-1.5	1.6	16.0	1.6	3.1	-1.5	1.4	3%	3%
Merguellil catchment												
Rain depth classes (mm/event)	Mean depths (mm/event)										Water yield change coefficients	
	Period 1: 1989 - 1996					Period 2: 1997-2005						
	p_1	r_1	G_1	dr_1	$r_1(p_2)$	p_2	r_2	G_2	dr_2	$r_2(p_1)$	C_1	C_2
< 10	6.1	0.2	0.0	0.1	0.2	5.7	0.1	0.0	0.0	0.1	-65%	-66%
10 to 20	14.3	0.8	0.2	0.7	0.8	14.6	0.4	0.2	0.2	0.4	-56%	-55%
20 to 30	25.9	1.0	0.6	0.3	0.9	24.8	0.7	0.5	0.1	0.8	-20%	-21%
30 to 40	33.7	1.8	1.1	0.7	1.9	34.9	0.7	1.2	-0.5	0.6	-65%	-62%
40 to 60	46.6	2.6	2.4	0.2	3.2	51.2	3.3	3.0	0.3	2.7	3%	3%
> 60	90.2	9.5	11.1	-1.6	10.1	91.3	10.2	11.8	-1.6	9.5	1%	1%
0 to 40	12.6	0.5	0.2	0.3	0.5	9.7	0.2	0.1	0.1	0.3	-50%	-59%
> 40	63.0	5.2	5.7	-0.5	5.8	66.2	5.9	6.3	-0.4	5.3	1%	1%
Total	15.4	0.8	0.5	0.3	0.8	13.3	0.5	0.5	0.0	0.5	-32%	-28%

In the upper subcatchment, the water yield change coefficients (C_1 and C_2) are alternately positive or negative, depending on the rain depth classes. No relationship between the water yield change coefficients and the rain depth classes is observable. C_1 and C_2 coefficients for 0-40 mm and >40 mm rain depth classes are close to each other and positive, meaning a slight increase in the catchment water yield between periods 1989-1996 and 1997-2005: the mean runoff coefficient (r_i/p_i) corresponding to the full rain depth range changed from 9.4% to 10.2% between periods. In the Merguellil catchment, C_1 and C_2 are strongly negative for all rain depth classes below 40 mm, and slightly positive for rain depth classes above 40 mm. The mean runoff coefficient falls from 4.3% to 1.9% for rain events below 40 mm, whereas no significant change is observed for higher rainfall (8.2% and 8.8% respectively). These observations suggest the existence of a drastic reduction of the runoff response to below-40 mm rainfall events in the lower subarea.

3.3. Hydrological modelling and non-parametric tests

The daily lumped conceptual rainfall-runoff model GR4J (Perrin, 2000; Perrin et al., 2003) is used to investigate changes in the hydrological behaviour of the lower subarea, subjected to intensive WSCW building since 1989. The model has four parameters and estimates streamflow from daily areal rainfall and potential evapotranspiration (PET). Perrin et al. (2001) applied this model to 429 catchments in various environment conditions, including semi-arid regions with intermittent streamflow in Australia, southern United States and Mexico. Compared to 19 other daily lumped rainfall-runoff models, the GR4J model performances were found to be among the best. It is used here in combination with the distribution-free test proposed by Andréassian et al. (2003). This non-parametric technique is well-suited to detect the hydrological impact of WSCW as it is aimed at identifying gradual rather than sudden hydrological changes. PET inputs were obtained by averaging pan evaporation data from the two available evaporation gauges in the study area (figure 1) and by applying a 0.6 pan coefficient estimated by Doorenbos and Pruitt (1977) for semi-arid environments. This value is close to the 0.57 pan coefficient proposed by Riou and Chartier (1985) for semi-arid Tunisia.

The GR4J model is set up for the catchment's lower subarea. In order to simulate the runoff produced by the whole Merguellil catchment at its outlet, the observed streamflow R_u [m^3] from the upper subcatchment (Skhira station) is routed down to the El Haouareb dam for accumulation with the lower subarea runoff model output (figure 9). This full catchment model is hereafter referred to as the GR4J+ model.

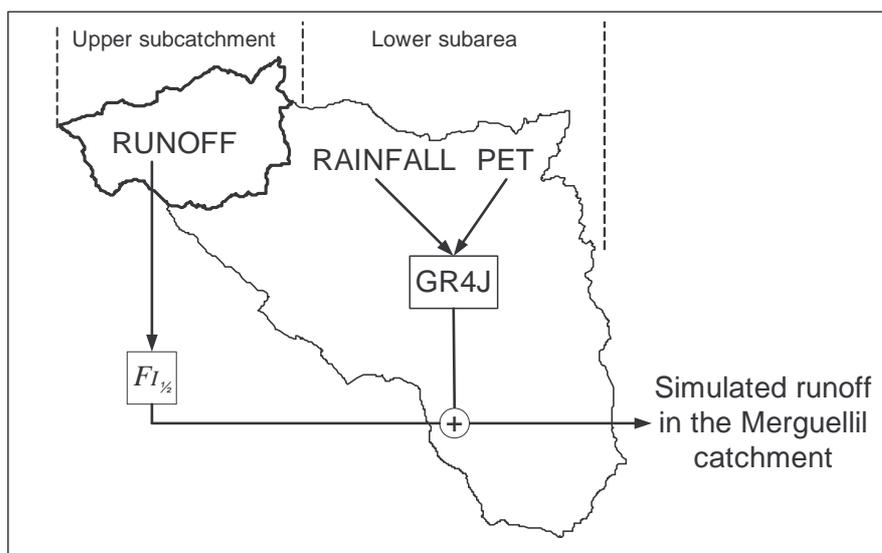


Figure 9. The Merguellil catchment GR4J+ model structure

To account for the transfer time from Skhira station to El Haouareb dam, hydrological days at Skhira station are set in time so as to start 8 hours before those at El Haouareb dam. A single-parameter transfer function is used to account for water losses that occur, essentially through infiltration in the river bed, between the two stations. It is written as $FI_{1/2}(R_u) = R_u \times (1 - [\log(1+r)]/r)$ with $r = R_u / (I_{1/2} \times 0.398)$ where $FI_{1/2}(R_u)$ is the downstream output [m^3], and $I_{1/2}$ is a model parameter [m^3]. This equation defines a convex function within the first half-quadrant (thereby ensuring mass conservation), which expresses that the proportion of R_u reaching the dam is nil for tiny inputs and progressively increases with increasing input, as can physically be expected. The $I_{1/2}$ parameter allows to scale the rate of this increase, by expressing the input for which one half is transferred to the outlet. Coupled with the 4-parameter GR4J submodel, this makes GR4J+ a 5-parameter model, producing estimated daily outflow from the Merguellil catchment that can be compared with observed inflow into the El Haouareb dam.

The model is run repeatedly in continuous mode through the whole period August 1989 – December 2005; each run corresponds to model calibration on a distinct subset of data, these subsets being defined as follows. Input data are first divided into two subseries, corresponding to rain event depths smaller than 40 mm (data set A) and higher than 40 mm (data set B). This rainfall threshold was found (see § 3.2.2) to delimit rain depth ranges for which the Merguellil catchment runoff response evolved differently between periods 1989-1996 and 1997-2005: a decrease for rain event depths below 40 mm and no significant change for above-40 mm rain events (see figure 8B and table 3). After removal of the first year of data, dedicated to model warming, the time series corresponding to data set A is

7 ANNEXES

divided into six equal-length periods. The time series corresponding to data set B is divided into 4 periods, each of them including 3 or 4 above-40 mm rain events. The number of periods in each data set compromises between reliability of the trend detection analysis (increasing with the number of periods) and quality of model calibrations (increasing with the number of events in each period). The GR4J+ model is run with the full, continuous input data time series, but is calibrated successively on the 10 sub-periods using the Nash-Sutcliffe efficiency for the square root transformed streamflow. This criterion was found to balance high and low flows fairly (Perrin, 2000). The constraint of a less than 5% bias on cumulated runoff is applied to the calibrations. Because there is no objective reason to let the $l^{1/2}$ parameter vary over time, it was taken constant at the value of $97.0 \times 10^3 \text{ m}^3$ that maximises the overall efficiency (63.3%). For both input data sets A and B, the calibrated models (M_1 to M_6 for data set A and M_1 to M_4 for data set B, in chronological order) are run on all periods successively. Results for the lower subarea cumulated runoff, simulated by the GR4J model, are laid out in table 4 as two cross simulation matrices, named A and B for below and above 40 mm rain events, respectively.

Table 4 Cross-simulation matrices of GR4J runoff from lower subarea, for rain events below 40 mm (Matrix A) and above 40 mm (Matrix B). Model M_i is calibrated on i^{th} period; bold diagonal values represent calibration runs.

		Cumulative runoff (mm) obtained for each GR4J simulation					
MATRIX A		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
Periods	24/8/90 - 20/3/93	24	30	12	7	8	6
	21/3/93 - 12/10/95	15	30	12	7	9	5
	13/10/95 - 13/5/98	35	37	17	8	12	6
	14/5/98 - 8/12/00	18	30	29	7	25	8
	9/12/00 - 6/7/03	21	16	5	3	4	2
	7/7/03 - 31/12/05	23	40	28	10	23	7
MATRIX B		M_1	M_2	M_3	M_4		
Periods	24/08/90 - 11/11/92	12	21	14	15		
	12/11/92 - 2/12/99	2	3	6	8		
	3/12/99 - 26/11/04	6	10	7	8		
	27/11/04 - 31/12/05	46	65	45	33		

For each matrix derived from matrices A and B by permuting columns (720 matrices from matrix A and 24 from matrix B), the statistic S is calculated as follows:

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^{i-1} (q_{ii} - q_{ij}) + \sum_{j=i+1}^n (q_{ij} - q_{ii}) \right] \text{ where } q_{ij} \text{ is the runoff value found in the } i^{\text{th}} \text{ row}$$

and j^{th} column of the permuted matrix. Negative (resp., positive) S values correspond to a decrease (resp., increase) streamflow trend. The non-exceedence frequencies of the statistic S are shown in figure 10, for below- and above-40 mm events (A and B, respectively).

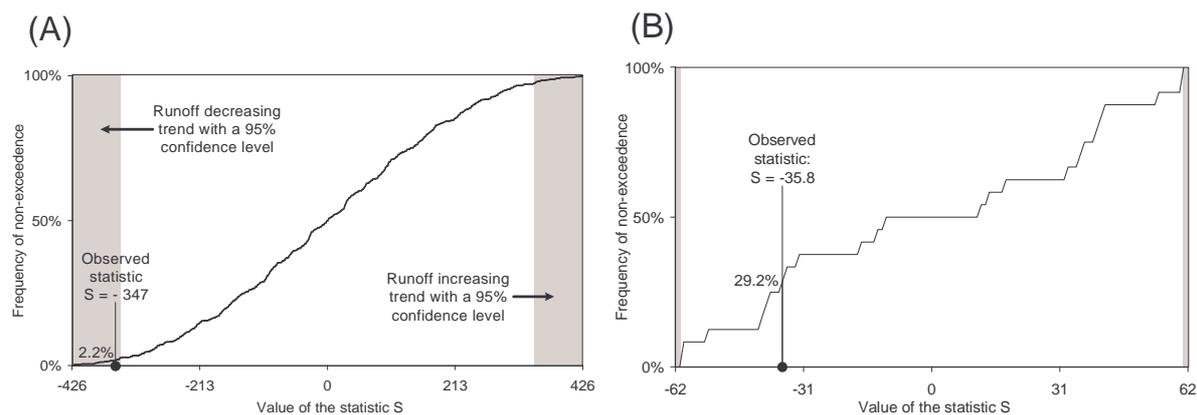


Figure 10. Non-exceedence frequency for statistic S obtained by shuffling columns of original cross-simulation matrices. (A): rain events below 40 mm/event. (B): rain events above 40 mm/event. (“Observed statistic” values are produced by non-permuted matrices).

Location on the frequency graphs of the S statistic values for the original, non-permuted matrices (denoted by “observed statistic”) allows concluding as to the existence of a possible trend in catchment behaviour (Andréassian et al., 2003). The runoff response to rain events below 40 mm shows a significant decrease trend with a 95% confidence level (figure 10A). No significant trend is observed for rain events above 40 mm (figure 10B).

3.4. Quantification of runoff reduction in the lower subarea

The analysis of the hydrological behaviour of the Merguellil catchment and of the upper subcatchment (§ 3.2) and the non-parametric test based on the resampling approach (§ 3.3) both conclude to a sharp runoff decrease in the lower subarea for below-40 mm rainfall events. An estimation of this reduction is proposed here. The distribution of rainfall-runoff events in the lower subarea is compared over the periods 1989-1996 and 1997-2005. Runoff depths produced in the lower subarea (\bar{R}_L) [mm] are estimated as follows: $\bar{R}_L = 10^{-3} \times [R_M - Fl_{1/2}(Ru)] / S_L$, where R_M is the runoff from the Merguellil catchment [m^3], Ru is the runoff from the upper subcatchment [m^3], S_L is the lower subarea surface [km^2] and $l_{1/2}=97.0 \cdot 10^3 m^3$ (see § 3.3).

7 ANNEXES

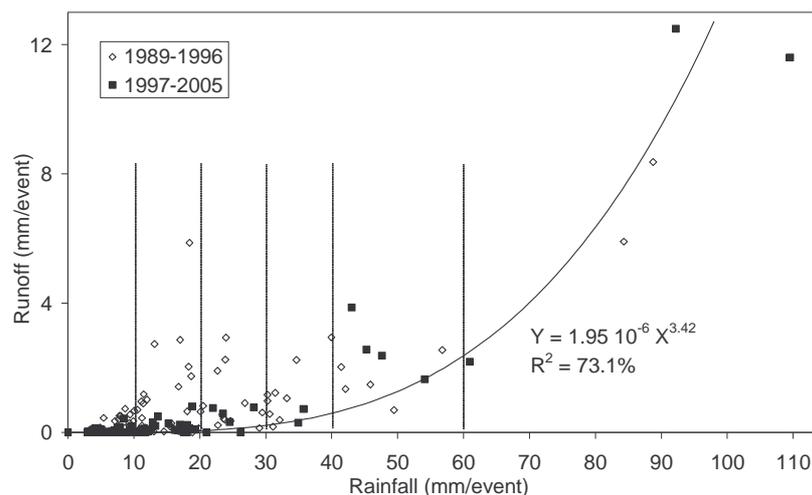


Figure 11. Rainfall versus runoff event depths in the lower subarea. Continuous curve: power regression estimated from all events.

Figure 11 shows rainfall-runoff event depths in the lower subarea for the periods 1989-1996 and 1997-2005. The 40 mm rainfall threshold already observed in the Merguellil catchment (figure 8 and table 3) is also remarkable: below 40 mm, many first-period events stand out as producing more runoff than the 1997-2005 maximum, unlike the above-40 mm rainfall range. Water yield change coefficients are computed for the lower subarea in the same way as we did in § 3.2.2 for the two nested catchments. Results are written out in table 5.

Table 5. Calculation of water yield change coefficients in the lower subarea between Period 1 (1989-1996) and Period 2 (1997-2005) for different rain event depth classes (see table 3 and § 3.2.2 for definition of variables).

Rain depth classes (mm/event)	Mean depths (mm/event)										Water yield change coefficients	
	Period 1: 1989 - 1996					Period 2: 1997-2005					C_1	C_2
	p_1	r_1	G_1	dr_1	$r_1(p_2)$	p_2	r_2	G_2	dr_2	$r_2(p_1)$		
< 10	6.1	0.1	0.0	0.1	0.1	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	-69%	-69%
10 to 20	14.1	0.7	0.0	0.7	0.7	14.5	0.2	0.0	0.1	0.2	-77%	-76%
20 to 30	24.2	0.9	0.1	0.8	0.9	23.7	0.5	0.1	0.4	0.5	-42%	-43%
30 to 40	32.6	1.2	0.3	0.9	1.3	35.3	0.5	0.4	0.1	0.4	-64%	-60%
40 to 60	45.9	1.8	1.0	0.8	1.9	47.5	2.6	1.1	1.5	2.5	37%	36%
>60	86.5	7.1	8.3	-1.2	9.3	87.6	8.8	10.5	-1.7	6.6	-7%	-6%
0 to 40	12.0	0.4	0.0	0.4	0.4	9.6	0.1	0.0	0.1	0.1	-71%	-75%
> 40	58.4	3.2	3.2	0.0	5.2	64.7	5.2	5.1	0.1	3.3	3%	2%
Total	14.4	0.6	0.2	0.4	0.7	12.9	0.4	0.3	0.1	0.3	-50%	-41%

Existence of a 40 mm rainfall threshold is supported by the water yield change coefficients: for all rain depth classes below 40 mm, C_1 and C_2 values are systematically below -42%. The overall rate of runoff decrease for the 0-40 mm rain depth class is estimated at 71-75%, falling down to 41-50% when considering all rain depths. No significant

runoff decrease is observed for above-40 mm rain events. The apparent increase in the 40-60 mm rainfall range is simply explained by the comparatively higher rainfall depths for the 1997-2005 period in that range.

Applying the one-tailed t-test to the log-transformed, detrended runoff for below-40 mm rain depths concludes to the significance of this 71-75% decrease with a 5% p-value (Gaussian distribution is accepted by the Kolmogorov-Smirnov and Khi2 tests with same p-value). It should be pointed that this same trend detection test failed when applied to the full event set over the whole Merguellil catchment, despite a 28-32% yield decrease (table 3). The peculiarity observed in figure 3 for the 2005 year showing a large Merguellil runoff compared to the upper subcatchment is due to the unusual accumulation of high rain events during this year: 60% of the Merguellil catchment annual rain depth came from rain events above-40 mm whereas this proportion averaged only 13% during the period 1997-2004 with a maximum of 31% in 2004.

4. Discussion

In section 3, T-tests applied to observed runoff and non-parametric tests based on cross-simulation matrices obtained from the GR4J+ model, indicate that runoff from the lower subarea for below-40 mm rainfall events significantly decreased between the periods 1989-1996 and 1997-2005 with a 95% confidence level. No runoff change trend was observed for rain events above 40 mm and for all rain depths in the upper subcatchment. Between periods, the runoff decrease in the lower subarea has been estimated at 71-75%, falling down to 41-50% when considering all rain depths and to 28-32% when including the upper subcatchment in the analysis. Possible causes of this runoff decrease are discussed hereafter.

4.1. Climate

Although the October-1989 to April 1992 period stands out as more humid in the Merguellil catchment, mostly in the above-20 mm-per-day range (figure 4 and table 1), this climatic signal cannot be held as the main factor for the observed decrease in runoff between 1989-1996 and 1997-2005. Indeed, the rainfall-runoff anomaly analysis (see § 3.2.2 and § 3.4) performed by rainfall range and with removal of the first order rainfall-runoff trend (“detrending”) allows to eliminate the climate signal effect. Climate parameters that potentially control the runoff response in semi-arid areas, namely fine-scale rainfall intensities and antecedent rainfall depths, did not change in a way that would have favoured a runoff production decrease. The distribution of antecedent rainfall in the two parts of the Merguellil

catchment (figure 6) did not significantly change between periods 1989-1996 and 1997-2005. Figure 5 shows that sub-daily rainfall intensities did not decrease over years. These observations suggest that the drastic runoff decrease observed in the lower subarea between 1989 and 2005 is not due to the climate variability.

4.2. Land use

Most vegetation cover changes occurred before 1960 (intensification of agriculture, extension of cropped lands, settling of farm households). Only minor changes have happened recently, consisting in local overgrazing, forest clearing or intensification of agricultural practices. Such changes have always produced runoff increases everywhere else in North Africa (Coelho et al., 2004) and cannot explain the runoff decrease observed in the lower subarea.

4.3. Water table level

Mean base flow measured at the El Haouareb dam (obtained by subtracting runoff event depths from the full inflow time series) has changed from 9000 to 4000 m³.day⁻¹ between periods 1989-1996 and 1997-2005. A possible cause of this base flow decrease could be related to a change in the pressure head difference between the wadi and aquifers. Kingumbi (2006) modelled water exchanges between the wadi and aquifers for the period 1970-1998, using the distributed physically-based MODCOU model. Simulations showed a lower groundwater discharge to the Merguellil wadi as of 1989, as a consequence of the ever greater groundwater exploitation, especially in the Bouhafna area shown in figure 12 (A). Kingumbi concluded that the runoff decrease from the catchment essentially comes from a reduction in base flow. But this assumption is not fully satisfactory. Figure 12 compares 4 couples of water levels in the wadi and in the aquifer nearby over three decades. In 1989, the beginning of our study period, the water-table level was at least 10 m below the wadi bed in E₁, E₂ and E₃ (see piezometers Pz₁, Pz₂ and Pz₃). Therefore, the water-table drawdown did not affect the seepage head between the wadi and the aquifer in this area. Because of the hydraulic disconnection between surface and groundwater in these three upstream points, vertical exchanges can only be downward and flow infiltrated from the wadi to the aquifers depends only on surface conditions (level and duration of river flow). Only the fourth couple (E₄, Pz₄) reveals a possible groundwater discharge to the wadi which could contribute to the river base flow but this fourth couple does not show any long-term change in the water levels. There is then no reason to assume a significant change in the exchanges between surface and groundwater, and especially a post-1989 decrease in the groundwater flow to the river. Moreover the runoff decrease detected by the present study concerns storm flows

only, which are too short to include any significant groundwater contributions. As the decreasing Merguellil runoff cannot be explained by a change in groundwater conditions, a change in surface hydrology is then the appropriate assumption.

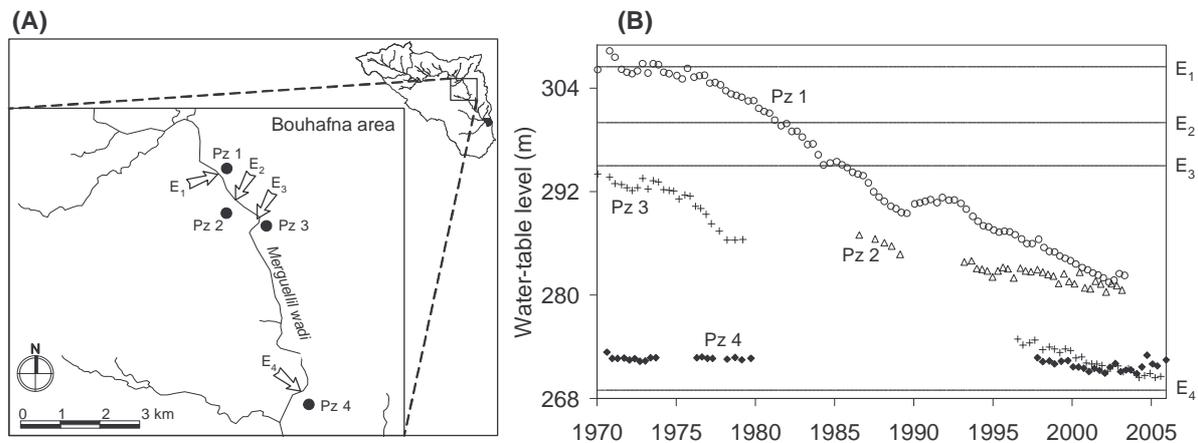


Figure 12. (A): location of piezometers (Pz₁ to Pz₄) in the Bouhafna area and corresponding closest points in Merguellil wadi bed (E₁ to E₄, respectively). (B): variations in water table levels in the Bouhafna area, around central Merguellil wadi bed.

4.4. Water and soil conservation works (WSCW)

A general consequence of WSCW is to reduce the contribution of hill-slopes to runoff. When considering WSCW built in the Merguellil catchment since 1989 (figure 2), the time-averaged proportion of controlled areas in the lower subarea changed from 5% to 26% between the periods 1989-1996 and 1997-2005, and from 2% to 5% in the upper subcatchment. This contrasted spatial distribution of WSCW is consistent with the contrast in runoff trend between the two areas (decrease for the lower subarea, against no significant change in the upper subcatchment). The 40 mm/event rainfall threshold we identified may correspond to some mean effective storage capacity of the WSCW-equipped areas, averaged over the whole lower subarea. When this capacity becomes saturated, further rainfall produces wadi flow with a high runoff coefficient (see figure 11) as if WSCW did not exist.

In the Merguellil catchment, Dridi et al. (2001) estimated at 38 mm and 85 mm the mean storage capacities of areas with small dams and contour ridges, respectively, based on geometric calculations. They concluded that more than 90% of the runoff is retained in contour ridges-controlled areas. In the Ouesletia region, north of the Merguellil catchment (figure 1), the contour ridging of over 80% of a 11.2 ha hillslope reduced by 50-90% the runoff produced by rainfall below 60 mm/day and by 20-40% for rainfall above 60 mm/day. In the El Gouazine catchment (18.1 km²), a few kilometres from the Merguellil catchment, Nasri

et al. (2004b) found that the contour ridging of over 43% of the area reduced by 90-95% the runoff produced by rainfall below 70 mm and by 75% for a 80 mm rainfall.

The contour ridge storage capacity of 85 mm calculated by Dridi et al. (2001) exceeds the rainfall thresholds obtained by Nasri et al. (2004b) (60-70 mm) and by the present study (40 mm). The inclusion of untreated surfaces in the studied area, the contour ridge weathering (ditch clogging, embankment damaging by breaches) and the fortuitous incline of ridges causing lateral flows probably reduce the theoretical contour ridge capacity. In the El Gouazine catchment, Baccari et al. (2006) noticed the presence of 109 breaches among 439 contour ridges built in 1997. Between 1997 and 2005, the silting of ditches induced a 30% decrease in the storage capacity. Also, the smaller rainfall threshold obtained here, in comparison with that found by Nasri et al. (60-70 mm), is probably due to the smaller proportion of WSCW equipped surfaces in our study area and to the presence of hillside dams, with a smaller theoretical storage capacity (38 mm versus 85 mm for the contour ridges according to Dridi et al., 2001), which also decreases over years. Albergel et al. (2001) estimated the mean storage volume loss of 30 Tunisian hillside dams at 4.6%/year. They found that these reservoirs are, on average, totally silted up after 40 years.

The overall runoff loss we estimated in the lower subarea (41%-50%) is higher than the increase in WSCW-covered surfaces (21%). Nasri et al. (2004b) observed a similar level of runoff sensitivity in the El Gouazine catchment where the introduction of contour ridges over 43% of the catchment area caused a 50 to 80% runoff reduction. These results suggest that WSCW sites were efficiently located in the catchment areas with the highest runoff coefficients. Moreover, they show that the spatial distribution of water resources between WSCW-equipped uplands and river flow-dependent lowlands cannot be simply determined based on the proportion of catchment surfaces to be equipped with WSCW.

5. Conclusion

During the 1990's, WSCW development has been performed extensively in the mountainous areas of North Africa, to face acute erosion and water scarcity problems. The hydrological impact of these distributed local-scale techniques, which are likely to depend non-linearly on their relative spatial extent, remains largely unknown in medium to large size catchments, e.g. above 100 km². This is mainly due to the general difficulty of making such investigations definitely conclusive. In this study, three main reasons made it possible to demonstrate that WSCW development in the 1183-km² Merguellil catchment noticeably affected its runoff response to rainfall:

7 ANNEXES

- (i) this development occurred over a period of time for which a continuous record of hydrological and meteorological data is available, with a significant rate of WSCW equipment along the period;
- (ii) during that period, other parameters likely to impact the catchment hydrological behaviour, such as climate, land use/land cover, seepage head and water-table drainage in the wadi bed, remained sufficiently stable;
- (iii) the spatial distribution of WSCW and of data recording stations allowed to compare two largely contrasted catchment subareas, either highly or non-developed, respectively.

The Student-t test and a distribution-free test based on cross simulation matrices revealed a significant runoff decrease for rain events below 40 mm in the lower subarea of the catchment where most WSCW have been built since 1990, with a 95% confidence level. No runoff change was observed for higher rain events in this area and for all rain depths in the headwater part of the catchment where WSCW are almost absent. In the lower subarea, the 21% expansion in areas equipped with WSCW induced a 41-50% overall runoff decrease. This result confirms the potential efficiency of such techniques in reducing runoff, which previous studies had quantified on smaller scales. Consequences for the downstream water resource could become deleterious should WSCW development continue in the Merguellil catchment: the El Haouareb dam collecting runoff from the catchment is the main recharge point for the Kairouan aquifer, which is overexploited (the rate of the water table drawdown varies between 0.25 and 1 m/an since 1985) to irrigate more than 50 000 ha of intensively cultivated land and to supply water to coastal cities. Further studies should investigate how beneficial the water retained upstream by the WSCW is and whether such spatial redistribution of the water resource is economically and socially desirable before any new development of this kind is undertaken.

Acknowledgments

We thank the CRDA (Regional Office of the Ministry of Agriculture) of Kairouan, the Direction Générale de l'Aménagement et de la Conservation des Terres Agricoles and the Direction Générale des Ressources en Eau (Tunisian Ministry of Agriculture) for their significant help and data providing. This research was supported by the French Ministry of Education and Research, IRD (Institut de Recherche pour le Développement) and the EUFP6 integrated project Aquastress.

7.7. Table des illustrations

7.7.1. Liste des figures

Figure 1. Localisation des zones amont et aval du bassin versant du Merguellil.	14
Figure 2. Evolution des principales productions agricoles tunisiennes (FAO, 2004).	21
Figure 3. Répartition des pluies en Tunisie. D'après Sethom et Kassab (1981)	23
Figure 4. Carte physique du bassin versant du Merguellil. La limite de gouvernorat sépare les gouvernorats de Siliana au nord et de Kairouan au sud.	35
Figure 5. Pluviométrie moyenne annuelle dans la région du Merguellil. Axes obliques : gradients pluviométriques (axe Z) et des coefficients de variation (axe W).	39
Figure 6. Pluies moyennes annuelles (A) et leur coefficient de variation (B) sur les axes de leur gradient.	40
Figure 7. Relation entre pluie moyenne annuelle et altitude dans la région du Merguellil.	41
Figure 8. Pluie moyenne mensuelle (1924-2005) aux stations de Makthar et de Sidi Saad..	41
Figure 9. Pluies annuelles à Makthar (1900-2005) et Sidi Saad (1924-2005).	42
Figure 10. Moyennes mensuelles des températures minimales et maximales journalières à la station de Chébika de 2002 à 2004.	43
Figure 11. Moyennes mensuelles des humidités relatives minimales et maximales journalières à la station de Chébika de 2002 à 2004.	44
Figure 12. Moyennes mensuelles de l'évaporation mesurée sur bacs évaporatoires aux stations de Janet et d'El Haouareb sur la période (Sep. 1995 à Aoû. 2001). Barres d'erreur : écarts-types interannuels.	46
Figure 13. Analyse fréquentielle de la pluie et demande évaporatoire ETo. NORD-OUEST : pluviomètre de Makthar et bac évaporatoire de Janet. SUD-EST : pluviomètre de Sidi Saad et bac évaporatoire d'El Haouareb. Les bornes supérieures de chaque série d'histogrammes de pluie correspondent aux probabilités de non dépassement des cumuls pluviométriques.	47
Figure 14. Cycles saisonniers. Saisons définies par la position relative des quartiles de pluie par rapport aux courbes d'ETo et d'ETo/2 sur la figure 13, selon Franquin (1973).	48
Figure 15 Surfaces drainées par les banquettes et les retenues collinaires dans le bassin versant du Merguellil. %BV : proportion de la superficie du bassin versant du Merguellil. Source : Dridi (2000), com. pers. Thameur et Kefi (2006).	51
Figure 16. Principaux aménagements de CES dans le bassin versant du Merguellil en 2006. Chaque retenue collinaire est identifiée par un numéro référencé dans le tableau 2.	52
Figure 17 : Profil en travers d'une banquette dans la région de Kairouan, d'après Dridi (2000), Nasri et al. (2004b).	57

Figure 18. Retenues collinaires du réseau HYDROMED, dont le bilan hydrique est étudié dans le chapitre 3.	60
Figure 19 : Bilan hydrique d'une retenue.....	64
Figure 20. Comparaison des retenues collinaires instrumentées (H) et non instrumentées (M). Barres : écarts-types. Jedeliane (Surface = 47 km ²) est exclue de la moyenne des surfaces.	65
Figure 21 : Identification des valeurs douteuses d'évaporation (E_{PAN}) dans la chronique de mesures journalières (18/02/1993 au 20/09/2001) de la retenue de Fidh Ben Naceur. Valeurs à l'extérieur de la zone délimitée par les deux traits fins supposées fausses. ..	69
Figure 22. Exemple d'identification d'anomalie par comparaison des cumuls mensuels de E_{PAN} mesurés aux différentes stations.....	71
Figure 23. Relation entre E_{PAN} et l'altitude pour les onze retenues collinaires étudiées et le barrage d'El Haouareb.....	72
Figure 24. Régressions linéaires sur les couples (E_{PAN} ; E_{To}). (A) : valeurs journalières. (B) cumuls pentadaires. Trait gras : régression linéaire. Traits fins : intervalle de confiance à 95% sur la régression linéaire, calculé à partir de la statistique de Fisher.....	74
Figure 25. Incertitude sur l'évaporation calculée à partir des mesures aux stations de Hadada et Janet sur la période août 1995 – sept. 2001. A : Relation entre saison et incertitude sur valeurs journalières. B : Relation entre pas de temps pour le calcul des lames évaporées et incertitude. ETE = mois de juillet et août. HIVER : mois de décembre, janvier et février.	76
Figure 26. Comparaison des méthodes estimant l'incertitude sur les mesures d'évaporation. « Comparaison des stations » : écart quadratique moyen centré entre les stations Janet et Hadada. « Janet » et « Hadada » : écart-type interannuel des valeurs journalières d'une même station. (A) : été (juillet et août). (B) : hiver (décembre, janvier et février). Pour les 6 courbes de régressions, $0,96 < R^2 < 1,00$	77
Figure 27. Incertitude sur ΔC_j calculée sur différentes durées (retenue collinaire de Hadada). Valeurs correspondant à une durée d'un jour non représentées (elles sont égales à 77% en hiver (déc., jan. et fév.) et 125% en été (juil. et août.).	80
Figure 28. Courbes d'étalonnage Hauteur-Surface, mesurées à Fidh Ali entre la date de construction (01/01/1990) et le 01/09/1999.....	81
Figure 29. Evolution de la capacité de stockage (A) et de la profondeur maximale (B) des retenues collinaires et du barrage El Haouareb depuis leur construction. Volumes des retenues de Jedeliane et d'El Haouareb divisés par 10 et 100 respectivement. Valeur 10 soustraite aux profondeurs maximales des retenues de Jedeliane et d'El Haouareb. ...	82
Figure 30. Evolution des coefficients de forme (A) et d'ouverture (B) en fonction du temps écoulé depuis la date de construction (correspondant au 1 ^{er} étalonnement).	85

7 ANNEXES

- Figure 31. Incertitude sur les courbes d'étalonnage hauteur-surface (A) et hauteur-volume (B) de la retenue collinaire de Hadada, réalisée en mai 1996. La cote du fond de la retenue est alors de 300 cm..... 87
- Figure 32. Surestimation du volume d'un apport due à l'obsolescence des courbes d'étalonnage, (A) : apport calculé de 1000m³, (B) : apport calculé de 10 000 m³. L'apport a lieu entre 1 et 5 ans après le dernier étalonnage..... 87
- Figure 33. Incertitude moyenne sur l'infiltration en fonction de la durée de l'épisode utilisé pour le calcul. L'incertitude correspondant à une durée d'un jour est égale à 214%..... 95
- Figure 34. Calcul (A) et sélection (B) des valeurs d'infiltration en période hivernale sur la retenue collinaire de Hadada. Barres verticales : incertitude sur les calculs d'infiltration. Barres horizontales : amplitude de variation de la cote sur chaque épisode. Intervalles numérotés sur la figure A : périodes utilisées pour le calcul de l'infiltration. 97
- Figure 35. Calcul (A) et sélection (B) des valeurs d'infiltration en période estivale sur la retenue collinaire de Hadada. Explications des chiffres et des barres : cf. légende de la figure 34..... 99
- Figure 36. Relation entre intensité de l'infiltration [mm/j] et cote [mm] du niveau d'eau pour les retenues collinaires : Abdessadok, Brahim Zaher, El Gouazine, El Moudhi, Fidh Ali, Fidh Ben Naceur, Hadada et Janet. 102
- Figure 37. Relation entre intensité de l'infiltration [mm/j] et cote [mm] du niveau d'eau pour les retenues collinaires : Jedeliane, Mora, M'Richet, Saadine 2 et le barrage d'El Haouareb..... 103
- Figure 38. Evolutions comparées de $-\Delta C$ et $E_{RET} + I_f$ sur une période avec des exemples d'épisodes de déstockage naturel strict, d'apport et probablement de lâchers et prélèvements (retenue collinaire de Hadada)..... 107
- Figure 39. Comparaison des valeurs de $-\Delta C$ observées et calculées par régression linéaire (retenue collinaire de Hadada). Périodes sans valeurs : épisodes avec apports et/ou déstockages volontaires. Erreur = $\varepsilon = -\Delta C_{\text{observé}} - (-\Delta C_{\text{calculé}})$ 108
- Figure 40. Evolution temporelle de la drainance (A) et de l'infiltration (B)..... 114
- Figure 41. Valeurs de C_{ZERO} (points carrés avec barres d'incertitude) et de la cote du fond de la retenue (traits continus) pour les 10 retenues dont l'intensité de l'infiltration est dépendante du niveau d'eau. Incertitude sur la cote calculée par régression linéaire. Incertitude sur le temps : demie durée des périodes. 115
- Figure 42. Relation entre C_T et la surface moyenne du miroir des retenues collinaires. 118
- Figure 43. Régressions linéaires sur les couples (E_{PAN} ; E_{RET}) en période estivale (avril à septembre) (A) et en période hivernale (octobre à mars) (B). 120
- Figure 44. Intervalle de confiance sur l'infiltration (\hat{I}_f) (retenue collinaire de Fidh Ben Naceur). Traits continus (resp. discontinus) : intervalle de confiance à 95% sur les valeurs de \hat{I}_f

7 ANNEXES

calculées avec C_{Tmin} (resp. C_{Tmax}). Traits gras (continus et discontinus) : intervalle de confiance choisi pour définir l'incertitude sur \hat{I}_f	122
Figure 45. Exemples d'épisodes de déstockage volontaire (retenue collinaire de Brahim Zaher).....	124
Figure 46. Détermination du seuil de différenciation des déstockages volontaires. (Retenues collinaires d'Abdessadok et de Brahim Zaher).....	126
Figure 47. Comparaison des chroniques de pompages mesurées au barrage El Haouareb et calculées à partir de l'équation 11.....	128
Figure 48. Incertitude sur les apports journaliers (retenue collinaire de Brahim Zaher).	137
Figure 49. Hydrogrammes et hyétogrammes moyens pour les bassins versants des 9 retenues collinaires calculés sur la période sept. 95 – août 99.....	140
Figure 50. Coefficients de ruissellement moyens mensuels sur les bassins versants des 9 retenues collinaires sur la période sept. 95 – août 99.	140
Figure 51. Distribution fréquentielle de la durée des apports aux retenues collinaires.....	141
Figure 52. Relation entre lames journalières précipitées et ruisselées sur les bassins versants des retenues collinaires étudiées.....	143
Figure 53. Variations journalières des volumes stockés dans les retenues collinaires d'El Moudhi (A), de Fidh Ali (B) et de M'Richet (C).....	149
Figure 54. Comparaison des mesures pluviométriques journalières des pluviographes des retenues collinaires avec les pluviomètres voisins, par la méthode de la double masse. L'axe des ordonnées correspond aux cumuls des pluviomètres.....	153
Figure 55. Valeurs journalières de E_{PAN} . Points : moyennes interannuelles des mesures. Courbe : régression polynomiale utilisée comme variable d'entrée du modèle.....	154
Figure 56. Modèle de remplissage/déstockage de la retenue collinaire. Couplage avec la fonction de prélèvement pour le calcul d'une probabilité de défaillance.	155
Figure 57. Régressions sur les valeurs de P , α et A calculées pour les retenues collinaires d'El Moudhi, de Fidh Ali et de M'Richet.	157
Figure 58. Courbes d'étalonnage « hauteur-surface » successives mesurées (années 0 et 5) et calculées (années 10, 15, 20, 25 et 30) utilisées dans les simulations.	158
Figure 59. Distribution fréquentielle des volumes stockés dans les retenues collinaires pendant la saison sèche. Histogrammes : quartiles 25%, 50% et 75%. Points : moyennes. Barres : écarts-types.....	159
Figure 60. Fréquence de non dépassement des volumes stockés dans les retenues collinaires d'El Moudhi, de Fidh Ali et de M'Richet en début (avril) et fin (août) de saison sèche, en fonction du nombre d'années écoulées depuis leur mise en service.....	160
Figure 61. Fiabilité des retenues collinaires. (A) : El Moudhi, (B) : Fidh Ali, (C) : M'Richet.	162

7 ANNEXES

Figure 62. Sensibilité de la fréquence de défaillance au critère de défaillance. Retenue collinaire de Fidh Ali 5 ans après sa construction. n : nombre minimum de jours consécutifs défaillants présents dans une année pour que celle-ci soit jugée défaillante.	164
Figure 63. Pompe donnée par le gouvernement au GDA de la retenue collinaire Mahbes. Date du cliché : 19 mars 2004.	172
Figure 64. Nombre d'irrigants et surfaces irriguées à partir des retenues collinaires dans la région du Merguellil en 2004 et 2005. Echelle des surfaces irriguées 5 fois supérieure à l'échelle de la carte.	172
Figure 65. Voies d'accès aux retenues collinaires et localisation des principaux marchés. Réseau routier digitalisé à partir des cartes topographiques au 1 :50 000 de la région.	174
Figure 66. Influence de la capacité initiale de stockage sur l'exploitation des retenues collinaires.....	175
Figure 67. Influence de l'âge des retenues collinaires sur leur exploitation.	176
Figure 68. Retenue collinaire de Hammam, bassin versant du Merguellil, le 21 avril 2005.	177
Figure 69. Retenue collinaire de Hafar (asséchée), le 3 avril 2004	177
Figure 70. Retenue collinaire de Janet, le 4 juillet 2005 (A) et de Fidh Ben Naceur, le 19 mars 2004 (B), totalement comblées. L'humidité rémanente a favorisé le développement d'une roselière dans la retenue de Janet.	184
Figure 71. Dispositif de mesure et localisation des aménagements de CES construits entre 1989 et 2005.....	195
Figure 72. Surfaces drainées par les banquettes et les retenues collinaires dans les deux parties du bassin versant du Merguellil entre 1989 et 2005. (Sources : cf. figure 15). Surfaces aménagées en banquette et incluses dans les bassins versants des retenues collinaires non comptabilisées.	197
Figure 73. Cumuls annuels des lames précipitées et ruisselées dans le bassin versant du Merguellil.	198
Figure 74. Ligne continue : courbe obtenue par la méthode de la double masse appliquée aux pluies journalières dans le sous-bassin amont et dans la zone aval de 1981 à 2005. Lignes pointillées : régressions linéaires.....	199
Figure 75. Hauteurs maximales précipitées pendant des durées comprises entre 5 minutes et 9 heures. Histogrammes : quartiles 25%, 50% et 75%. Points blancs : moyennes. Barres : écarts-types. Voir § « Intensités sub-journalières des pluies » pour définition de P1, P1' et P2.....	201
Figure 76. Distribution des pluies antérieures sur les périodes 1989-1996 et 1997-2005, dans le sous-bassin amont (A) et la zone aval (B).....	202

Figure 77. Méthode de la double masse appliquée aux pluies spatialement homogènes (A) et à leur ruissellement (B).....	202
Figure 78. Relations entre lames précipitées et ruisselées. Lignes continues : régressions sur l'ensemble des évènements pluie-débit (sur les deux périodes confondues). (A) : sous-bassin amont. (B) : bassin versant du Merguellil.....	203
Figure 79. Structure du modèle GR4J+ adapté au bassin versant du Merguellil	206
Figure 80. Fréquence de non dépassement de la statistique S obtenue par permutation des matrices de simulations croisées. (A) : évènements pluvieux inférieurs à 40 mm. (B) : évènements pluvieux supérieurs à 40 mm. La « valeur observée » de la statistique S correspond aux matrices A et B non permutées présentées dans le tableau 39.	208
Figure 81. Cumuls pluie-débit de chaque évènement identifié dans la zone aval. Courbe continue : régression puissance estimée à partir des couples (pluie, débit) sur la période 1989-2005.	209
Figure 82. (A) : localisation des piézomètres (Pz 1 à Pz 4) dans la région de Bouhafna et des points les plus proches sur l'oued Merguellil (E ₁ à E ₄ respectivement). (B) : variations des niveaux piézométriques dans la région de Bouhafna, à proximité du lit de l'oued Merguellil.	213
Figure 83. Positionnement de la nappe aquifère de Kairouan par rapport au bassin versant du Merguellil.	216
Figure 84. Contribution des volumes pompés, évaporés et infiltrés au déstockage total des retenues. Les barres d'erreur représentent l'incertitude sur l'évaporation (i.e. la somme des incertitudes sur l'infiltration et les pompages).....	219
Figure 85. Bilan hydrique des 11 retenues collinaires (Jedeliane exclue) et du barrage El Haouareb sur la période commune aux chroniques de mesure ou sur l'ensemble des chroniques de mesure disponibles. EVAP : évaporation. INFIL : infiltration. IRRIG : prélèvements par pompage. LACH : lâchers de barrage.....	220
Figure 86 : Schéma de valorisation agronomique des banquettes par la plantation d'oliviers, d'après Roose (2002b).	222
Figure 87. Effet des aménagements de CES construits entre les périodes 89-96 et 97-05 sur le bilan hydrique du bassin versant du Merguellil. A : banquettes non plantées. B : banquettes intégralement plantées avec des oliviers. EVAP. : évaporation. EVAPOTRANSPIR. : évapotranspiration. INFIL. : infiltration. AGRI : eau destinée aux cultures.....	224
Figure 88. Variations journalières des volumes stockés dans les retenues collinaires d'El Moudhi (A), de Fidh Ali (B) et de M'Richet (C).....	246

7.7.2. Liste des tableaux

Tableau 1. Pluviomètres utilisés pour décrire la pluviosité du bassin versant du Merguellil..	38
Tableau 2. Retenues collinaires du bassin versant du Merguellil. Le numéro dans la première colonne permet de localiser les retenues collinaires sur la figure 16. Les retenues collinaires dont le nom est inscrit en gras/italique ont été instrumentées dans le cadre du programme HYDROMED. (Pas de données sur la capacité d'Ain Sadoun).	53
Tableau 3. Caractéristiques physico-techniques et périodes de mesures pour les retenues dont le bilan hydrique est étudié.....	60
Tableau 4. Tests de normalité (Kolmogorov-Smirnov) et de la moyenne (Student). (non) Gauss signifie que les valeurs du paramètre ont une distribution (non) gaussienne. Résultats acceptés par le test de Kolmogorov-Smirnov avec une p-value de 5%.	66
Tableau 5. Nombre de mesures d'évaporation (E_{PAN}) situées à l'extérieur de l'intervalle $[M - 2\sigma ; M + 2\sigma]$. (M : moyenne interannuelle des mesures d'évaporation journalières. σ : écart-type interannuel des mesures d'évaporation journalière.	70
Tableau 6. Corrélations entre E_{PAN} et les principaux paramètres physiques connus des retenues. Longitude et latitude en projection UTM Carthage. E_{PAN} : moyenne sur la période de mesure sept. 96 – août 99 commune à l'ensemble des stations.....	72
Tableau 7. Paramètres des courbes de régression ($Y = aX^b$) utilisées pour calculer l'incertitude (Y) sur les mesures de E_{PAN} . X : durée de la période sur laquelle E_{PAN} est moyenné. R^2 : coefficient de détermination de la régression. Hiver : mois de déc., jan. et fév. Été : juil. et août. Mi-saison : mar, avr, mai, juin, sep, oct et nov.	78
Tableau 8. Evolution des niveaux d'envasement des retenues entre les premiers et derniers nivellements.....	79
Tableau 9. Taux d'envasement des retenues déterminés par régression linéaire sur les points de la figure 29 (A). R^2 : coefficient de détermination de la régression. Durée de vie estimée à partir de la capacité initiale et du taux d'envasement.....	82
Tableau 10. Couples de paramètres (A, α) permettant d'ajuster la formule $V = A \times H^\alpha$ aux 55 courbes d'étalonnage hauteur-volume des retenues étudiées. Les courbes d'étalonnage sont identifiées par leur date de mesure.	84
Tableau 11. Périodes présélectionnées et sélectionnées pour le calcul de l'infiltration. Critères de présélection basés sur les variations de la cote et sur la pluviométrie. Critères de sélection illustrés par les figures 34 et 35.	100
Tableau 12. Coefficient de forme α , calculé sur chaque période utilisée pour ajuster les paramètres K_1 , K_2 , C_{ZERO1} et C_{ZERO2} de la régression linéaire multiple (cf. § 3.2.2.iii)...	104

7 ANNEXES

Tableau 13. Incertitude sur les valeurs d'infiltration calculées et origine de l'incertitude. I_{EPAN} : incertitude sur la mesure d'évaporation sur bac. I_{CT} : incertitude sur le coefficient de transposition bac-retendue. $I_{\Delta C}$: incertitude sur la variation de la cote de la retenue.....	105
Tableau 14. Paramètres du modèle linéaire de déstockage. « Durée » : durée de la chronique de données (incluant les périodes avec apport et/ou déstockage volontaire) et la proportion de « jours utilisés » pour ajuster les paramètres de la régression.....	111
Tableau 15. Ajustements successifs du modèle linéaire de déstockage naturel sur 2 ou 3 périodes. Légende : cf. tableau 14.....	114
Tableau 16. Corrélations entre C_T et les principaux paramètres physiques connus des retenues étudiées. Surface [ha] : surface moyenne du miroir de la retenue. E_{PAN} [mm/j] : pan évaporation moyenne. Altitude [m] : altitude de la retenue. Longitude et Latitude [m] de la retenue : projection UTM Carthage.	117
Tableau 17. Seuils de différenciation [m^3/j] des volumes volontairement déstockés. Retenues inscrites en gras : aucun lâcher identifié ; la valeur indiquée correspond alors au déstockage volontaire maximal enregistré.	126
Tableau 18. Volumes (Vol) prélevés dans les retenues collinaires et le barrage El Haouareb [Mm^3/an]. Inc : incertitude sur les calculs [%]. Mes : valeurs fournies par les gestionnaires du barrage El Haouareb.....	131
Tableau 19. Volumes (Vol) lâchés depuis les retenues collinaires et le barrage El Haouareb [Mm^3/an]. Inc. : incertitude sur les calculs [%]. Mesures : valeurs fournies par les gestionnaires du barrage El Haouareb.....	131
Tableau 20. Nombre et durée des averses enregistrées par les pluviographes des retenues collinaires sur la totalité des chroniques de mesure.	133
Tableau 21. Averses cumulant au moins 5 ou 10 mm : nombre d'averses enregistrées et durée des périodes séparant deux averses successives.	134
Tableau 22. Volumes (Vol) [Mm^3/an] des apports aux retenues. Inc : incertitude [%] sur les calculs. Dev [%]: proportion des apports qui ont déversé.....	139
Tableau 23. Fréquence des crues. « Nb crues » : nombre total de crues observées. « Durée < 1J (Nb et %) » : nombre et proportion des périodes entre deux crues successives inférieures à un jour. « Médiane » : durée médiane entre deux crues successives.	142
Tableau 24. Ajustement du modèle linéaire sur les 9 bassins versants étudiés. Nb éven. : nombre d'évènements pluie-débit. Nash : critère de Nash-Sutcliffe. $Rdt = (somme des débits simulés)/(somme des débits observés)$	145
Tableau 25. Ajustement du modèle GR4J sur les 9 bassins versants étudiés. Légende : cf. tableau 24.....	145
Tableau 26. Estimations par bilan hydrique (BH) et avec le modèle GR4J, des volumes stockés dans les retenues collinaires aux 1 ^{er} mars, 1 ^{er} avril et 1 ^{er} mai.....	150

7 ANNEXES

Tableau 27. Répartition intermensuelle des besoins en eau d'irrigation pour des cultures situées à proximité des retenues collinaires d'El Moudhi, de Fidh Ali et de M'Richet..	156
Tableau 28. Moyennes et écarts-types des paramètres des retenues collinaires, susceptibles d'influencer leur exploitation.....	174
Tableau 29. Rendements en kilogrammes d'olives par arbre pour la récolte 2004, calculés à partir des résultats d'enquêtes effectuées durant l'été 2005.....	178
Tableau 30. Estimation des volumes d'irrigation annuels apportés aux oliviers. Les moyennes sont pondérées par le nombre d'arbres de chaque irrigant (idem pour les tableaux 31 à 33).....	180
Tableau 31. Estimation des volumes d'irrigation annuels apportés aux amandiers.	181
Tableau 32. Estimation des volumes d'irrigation annuels apportés aux arbres fruitiers (à l'exception des oliviers et des amandiers).....	181
Tableau 33. Estimation des volumes d'irrigation annuels apportés aux productions maraîchères.....	182
Tableau 34. Estimation des volumes d'irrigation apportés aux cultures à partir des retenues collinaires du bassin versant du Merguellil. Nb : nombre d'arbres. Vol : volume d'irrigation [$10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$]. V_{\min} (V_{\max}) : volume d'irrigation minimal (maximal) [$10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$]. Surf : surface cultivée en maraîchage [ha]. Section A : parcelles pour lesquelles Nb, Surf et Vol sont connus. Section B : parcelles pour lesquelles seuls Nb et Surf sont connus. Les volumes d'irrigations sont estimés à partir des moyennes et écarts-types calculés dans les tableaux 30 à 33. $V_{\min} = \text{moyenne} - \text{écart-type}$. $V_{\max} = \text{moyenne} + \text{écart-type}$	187
Tableau 35. Estimation des prélèvements totaux dans les retenues collinaires du bassin versant du Merguellil par addition des valeurs des sections A et B du tableau 34. Légende : cf. tableau 34.	188
Tableau 36. Lames moyennes précipitées par classes d'intensités de pluies dans le sous-bassin amont et dans la zone aval, sur six périodes successives.	199
Tableau 37. Caractéristiques des événements pluie-débit correspondant aux pluies spatialement homogènes.....	203
Tableau 38. Variations du coefficient d'écoulement (C_1 et C_2) dans le sous-bassin amont et dans le bassin versant du Merguellil entre la période 1 (1989-1996) et la période 2 (1997-2005) pour différentes classes de hauteur de pluie. p_i : hauteur moyenne de pluie correspondant à la période i . Voir § ci-dessus pour la définition des autres variables.	204
Tableau 39. Matrices de simulations croisées des écoulements produits dans la zone aval par les événements pluvieux inférieurs à 40 mm (MATRICE A) et supérieurs à 40 mm (MATRICE B). Le modèle M_i est calibré sur la i ème période. Les valeurs en gras sur la diagonale représentent les exécutions du modèle en mode de calage.	208

7 ANNEXES

Tableau 40. Variations des coefficients d'écoulement dans la zone aval entre la période 1 (1989-1996) et la période 2 (1997-2005) pour différentes classes de hauteurs de pluies (voir tableau 38 pour la définition des variables).	210
Tableau 41. Caractéristiques des pompes mesurées en juillet 2004 dans la plaine de Kairouan. Pression : hauteur manométrique entre prise d'eau et embouchure du tuyau. Consommation : gasoil. Débit : eau pompée. Mesures réalisées par Roger Calvez....	247
Tableau 42. Questionnaire sur les modes d'irrigation.....	248
Tableau 43. Questionnaire sur l'arboriculture.....	249
Tableau 44. Questionnaire sur la céréaliculture	250
Tableau 45. Questionnaire sur le maraîchage.....	251

8. BIBLIOGRAPHIE

8 BIBLIOGRAPHIE

Abtew W. 2001. Evaporation estimation for lake Okeechobee in South Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 127(3): 140-147.

Adato M. 1987. Runoff Agriculture for Arid and Semi-Arid Lands. Prospects based on Research at the Desert Runoff Farms in the Negev Desert of Israel. Desert Runoff Farms Unit.

Agarwal A. et Narain S. 1997. Dying wisdom. The decline and revival of traditional water harvesting systems in India. *The ecologist* 27(3): 112-116.

Al Karkouri J., Wafteh A. et Aderghal M. 2002. Techniques de conservation de l'eau et des sols dans une zone semi-aride méditerranéenne du Rif central (vallée de Béni Boufrah). Conférence: Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen, E. Roose, M. Sabir et G. De Noni (Eds). Rabat, Maroc, IRD: 56-80.

Albergel J., Ben Younes M., Pépin Y., Jenhaoui Z., Ghedoui S., Boufaroua M., Debabria A., Ben Youssef M. et Lamachère J. M. 2002. Annuaire hydrologique des lacs collinaires 2000-2001 : réseau pilote de surveillance hydrologique. DG/ACTA, IRD. 175 pages.

Albergel J., Boufaroua M., Pépin Y., Ghedoui S., Ben Younes M., Debabria A., Jenhaoui Z. et Ben Youssef M. 2001a. Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1999-2000 : réseau pilote de surveillance hydrologique. République Tunisienne, Ministère de l'Agriculture, DCES, IRD. 183 pages.

Albergel J., Nasri S. et Boufaroua M. 1998. Small dams' water balance: experimental conditions, data processing, and modeling. Conférence: Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas, R. Berndtsson (Ed). Lund University, Suède: 47-58.

Albergel J., Nasri S., Boufaroua M. et Pépin Y. 2001b. Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires de la dorsale tunisienne. In: Hydrologie des régions méditerranéennes. E. Servat et J. Albergel (Eds). Montpellier, UNESCO; IRD. Vol. 51: 63-70

Albergel J., Nasri S. et Lamachère J. M. 2004. HYDROMED. Programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen. *Revue des sciences de l'eau* 17(2): 133-151.

Albergel J. et Rejeb N. 1997. Les lacs collinaires en Tunisie : enjeux, contraintes et perspectives. *Comptes rendus de l'académie d'agriculture de France* 83(2): 77-104.

Allen R. G., Pereira L. S., Raes D. et Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO. 326 pages.

Aly A. I. M., Froehlich K., Nada A., Awad M., Hamza M. et Salem W. M. 1993. Study of environmental isotope distribution in the Aswan High Dam Lake (Egypt) for estimation of evaporation of lake water and its recharge to adjacent groundwater. *Environmental Geochemistry and Health* 15(1): 37-49.

Andersen M. E. et Jobson H. E. 1982. Comparison of techniques for estimating annual lake evaporation using climatological data. *Water Resources Research* 18(3): 630-636.

Andréassian V., Parent E. et Michel C. 2003. A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behavior. *Water Resources Research* 39(9): 1252.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Baccari N., Boussema M. R. et Snane M. H. 2004. Méthodologie d'inventaire des aménagements de conservation des eaux et du sol des bassins versants se fondant sur des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et des photographies aériennes. Conférence: Les Xèmes journées scientifiques de réseau télédétection de l'AUF, A. Bannari et F. Blasco (Eds). Ottawa, Canada: 88-92.
- Baccari N., Nasri S. et Boussema M. R. 2006. Efficience des banquettes sur l'érosion des terres, le remplissage et l'envasement d'un lac collinaire en zone semi-aride tunisienne. Conférence: 14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments, M. Sabir (Ed). Marrakech, Morocco, 14-19 May 2006, ISCO: 1-4.
- Bachta Salah M. et Ben Mimoun A. 2003. Libéralisation des échanges, agriculture et environnement en Tunisie. In: Libre-échange, agriculture et environnement : L'Euro-Méditerranée et le développement rural durable : état des lieux et perspectives. F. Jacquet et F. Lerin (Eds). Montpellier, CIHEAM-IAMM. Vol. 52: 123-134
- Barbery J. et Mohdi M. 1987. Carte des ressources en sols de la Tunisie (1/200 000). Feuille de Kairouan. Tunis, Ministère de l'Agriculture.
- Batalla R. J., Gomez C. M. et Kondolf G. M. 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology* 290: 117-136.
- Batchelor S. J. 1985. Introducing appropriate technologies step by step. *Waterlines* 3(3): 13-15.
- Ben Ammar S., Zouari K., Leduc C. et M'Barek J. 2006. Caractérisation isotopique de la relation barrage-nappe dans le bassin du Merguellil (plaine de Kairouan, Tunisie centrale). *Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques* 51(2): 272-284.
- Ben Mansour H. 2006. Evolution des aménagements de conservation des eaux et des sols dans le bassin amont du Merguellil, Tunisie centrale. Direction générale des ressources en eau. 83 pages.
- Ben Mimoun A. 1999. Contribution à l'évaluation économique de la dégradation du sol en Tunisie. Cas d'étude : le sous-bassin versant de l'oued M'silah. Gouvernorat de Kairouan. Mémoire de fin d'étude de cycle de spécialisation. Département d'économie rurale et de développement rural. Institut national agronomique de Tunisie. 91 pages.
- Benatya D. et Zagdouni L. 1991. Stratégies de production et aléas climatiques : Quelques remarques méthodologiques. In: Choix technologiques, risques et sécurité dans les agricultures méditerranéennes. S. Bedrani et P. Campagne (Eds). Montpellier, CIHEAM-IAMM. Vol. 21: 45-47
- Bouaziz A. 1986. Perspectives agronomiques de la céréaliculture au Maroc. In: Céréales et produits céréaliers en Méditerranée. F. Lerin (Ed). Montpellier, CIHEAM-IAMM. Vol. 12: 29-40
- Boufaroua M., Ghedoui S., Debabria A., Ben Youssef M., Albergel J., Guiguen N., Pépin Y., Ben Younes M., Selmi S. et Jenhaoui Z. 1999. Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1997-1998 : réseau pilote de surveillance hydrologique. CES, IRD. 280 pages.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Boufaroua M., Ghedoui S., Debabria A., Ben Youssef M., Albergel J., Pépin Y., Ben Younes M. et Jenhaoui Z. 2000. Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1998-1999 : réseau pilote de surveillance hydrologique. CES, IRD. 204 pages.
- Boufaroua M., Smaoui A., Ghedoui S., El Batti F., Debabria A., Albergel J., Guiguen N., Pépin Y., Ben Younes M., Jenhaoui Z., Selmi S. et Rahaingomanana N. 1997. Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1995-1996 : réseau pilote de surveillance hydrologique. CES, IRD. 186 pages.
- Bouzaiane S., Chaieb H. et Maalel F. 1993. Recharge de la nappe de Kairouan par les lâchers du barrage "El Houareb" sur l'oued Merguellil. Campagne du 19 avril au 8 mai 1993. Ministère de l'Agriculture - Direction Générale des Ressources en Eau. Rapport de synthèse. 30 pages.
- Bouzaiane S. et Lafforgue A. 1986. Monographie hydrologique des oueds Zeroud et Merguellil. Tunis, DGRE, ORSTOM. 1058 pages
- Bradford J. M., Ferris J. E. et Remley P. A. 1987. Interrill soil erosion processes: I. Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment. Soil science society of America journal 51(6): 1566-1571.
- Brunel J. P. et Bouron B. 1992. Evaporation des nappes d'eau libre en Afrique sahélienne et tropicale. Comité interafricain d'études hydrauliques, ORSTOM. 413 pages.
- Buishand T. A. 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. Journal of Hydrology 58: 11-27.
- Buishand T. A. 1984. Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. Journal of Hydrology 58: 51-69.
- Burman R. D. et Pochop L. O. 1994. Evaporation, evapotranspiration and climatic data. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier. 278+annexes pages
- Cadier E. 1991. Hydrologie des petits bassins du Nordeste brésilien semi-aride. Thèse de doctorat. Hydrologie, Sciences de l'eau. Mécanique, Génie Mécanique, Génie civil. Université de Montpellier II. 396 pages.
- Cadier E., Molle F., Cavalcanti de Albuquerque C. H., Doherty F. R. et Montgaillard M. 1990. Dimensionnement de petits barrages dans le Nordeste brésilien semi-aride. Conférence: Journées hydrologiques de l'ORSTOM, P. Carré (Ed). Montpellier: 173-200.
- Calder I. R., Hall R. L. et Prasanna K. T. 1993. Hydrological impact of Eucalyptus plantation in India. Journal of Hydrology 150(2-4): 635-648.
- Camus H., Guiguen N., Ben Younes M. et Suavin M. 1995. Note sur l'envasement de lacs collinaires en zone semi-aride tunisienne. DCEs, IRD. 67 pages.
- Canton Y., Domingo F., Solé-Benet A. et Puigdefabregas J. 2001. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. Journal of Hydrology 252: 65-84.
- Carbonnières R. 1969. Importance technique et économique des retenues collinaires. Bilan et perspectives. L'eau 10: 427-437.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Castillo V. M., Gomez-Plaza A. et Martinez-Mena M. 2003. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. *Journal of Hydrology* 284: 114-130.
- CES 1999. Stratégie nationale de conservation des eaux et des sols. Ministère de l'Agriculture Tunisien. 28 pages.
- Chadly B. 1992. Note sur l'évolution de la nappe de Kairouan après la fermeture du barrage d'El Haouareb. 24 pages.
- Chéret Y. 2004. Integrated water resources management and water efficiency plans by 2005: some personal reflections. Paris, Organization for Economic Co-operation and Development.
- Cherkauer D. A. et McBride J. M. 1988. A remotely operated seepage meter for use in large lakes and rivers. *Ground Water* 26(2): 165.
- Codrington H. W. 1938. Ancient Land Tenure and Revenue in Ceylon. Colombo, Ceylon Government Press.
- Coelho C. O. A., Ferreira A. J. D., Laouina A., Boulet A.-K., Chaker M., Nafaa R., Naciri R., Regaya K., Hamza A., Carvalho T. M. M. et Keizer J. J. 2004. Changes in land-use and their impact on erosion rates and overland flow generation in the Maghreb region. *Revue des sciences de l'eau* 17(2): 163-180.
- Coelho C. O. A., Valente S., Boulet A.-K., Ferreira A. J. D., Pinho L., Fenjiro I., Antari M., Carvalho T. M. M. et Keizer J. J. 2002. Techniques traditionnelles de gestion de l'eau et du sol au Portugal. Conférence: Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen, E. Roose, M. Sabir et G. De Noni (Eds). Rabat, Maroc, IRD: 169-181.
- Coffey A. 2002. The role of indigenous knowledge in determining design and the planning of water harvesting systems. University of Wales Bangor UK. 8 pages.
- Cogels F. X., Dacruz E. N. et Gac J. Y. 1991. L'évaporation du lac de Guiers (Sénégal) de 1976 à 1989. Bilan et essai d'interprétation. Rapport multigraphié. 40 pages.
- Cogels F. X. et Gac J. Y. 1986. Etude chimique des eaux du lac de Guiers et leur évolution annuelle (Sénégal). Approche des mécanismes de la régulation hydrogéochimique. *Cahiers ORSTOM, Série Géodynamique* 1(2): 121-134.
- Conac G., Savonnet Guyot C. et Conac F. 1983. Les politiques économiques de l'eau en Afrique. Développement agricole et participation paysanne. Conférence: Colloque de la Sorbonne, *Economica* (Ed). Paris.
- Condie S. A. et Webster I. T. 1997. The influence of wind stress, temperature and humidity gradients on evaporation from reservoirs. *Water Resources Research* 33(12): 2813.
- Craig I. P. 2006. Comparison of precise water depth measurements on agricultural storages with open water evaporation estimates. *Agricultural Water Management* 85(1-2): 193-200.
- Crichley W., Siegert K. et Chapman C. 1991. Water Harvesting. A manual for the design and construction of water harvesting schemes for plant production. Rome, FAO <http://www.fao.org/docrep/U3160E/U3160E00.htm>.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Critchley W., Reij C. et Seznec A. 1992. Water harvesting for plant production. Volume II: Case studies and conclusions for Sub-Saharan Africa. World bank. Technical Paper. Rapport n° 157.
- Croley T. E. 2005. Recent Great Lakes Evaporation Model Estimates. Conférence: World Water and Environmental Resources Congress, R. Walton (Ed). Anchorage, Alaska, USA, May 15-19 2005, ASCE.
- Cudennec C., Slimani M. et Le Goulven P. 2005. Accounting for sparsely observed rainfall space-time variability in a rainfall-runoff model of a semiarid Tunisian basin. *Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques* 50(4): 617-630.
- Darcy H. 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris, Victor Dalmont.
- Darves-Bornoz R. et Clément 1957. Les barrages collinaires en Italie. *L'eau* 10.
- Desconnets J. C. 1994. Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoréiques en milieu sahélien (Niger-degré carré de Niamey). Thèse de doctorat. Mécanique, génie mécanique, génie civil. Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc. 333 pages.
- Doorenbos J. et Pruitt W. O. 1977. Crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper. Rapport n° 24. 144 pages.
- dos Reis R. J. et Dias N. L. 1998. Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations. *Journal of Hydrology* 208: 135-147.
- Dridi B. 2000. Impact des aménagements sur la disponibilité des eaux de surface dans le bassin versant du Merguellil (Tunisie centrale). Thèse de doctorat. UFR de Géographie, Centre d'études et de recherche eco-géographiques - CEREG UMR 7007, CNRS/ULP/ENGESS. Université Louis Pasteur. 194 pages.
- Dridi B., Bourges J., Auzet A., Collinet J., Kallel R. et Garreta P. 2001. Impact des aménagements sur la ressource en eau dans le bassin du Merguellil (Tunisie). In: *Hydrologie des régions méditerranéennes*. E. Servat et J. Albergel (Eds). Montpellier, UNESCO, IRD. Vol. 51: 267-273
- Effler S. W. et Driscoll C. T. 1986. A chloride budget for Onondaga Lake, New York, USA. *Water, Air and Soil Pollution* 27(1-2): 29-44.
- El Samani M. O. et Dabloub S. M. A. 1996. Making the most of local knowledge: water harvesting in the Red Sea Hills of Northern Sudan. In: *Sustaining The Soil - Indigenous Soil and Water Conservation in Africa*. C. Reij, I. Scoones et C. Toulmin (Eds), Earthscan.
- El Shafei S. 1994. Agricultural Development in the North-West Coastal Zone, Egypt. Report on water harvesting. In: *Water harvesting for improved agricultural production*. Expert consultation. FAO (Ed). Cairo, Egypt, FAO.
- Elloumi M. 1997. L'agriculture familiale méditerranéenne : permanence et diversité avec références particulières aux pays du Maghreb. In: *Agricultures familiales et politiques agricoles en Méditerranée : enjeux et perspectives*. A. Abaab, M. Elloumi, A. Fragata et L. Zagdouni (Eds). Montpellier, CIHEAM-IAMM. Vol. 12: 177-185

8 BIBLIOGRAPHIE

- Elloumi M., Gara M. et Soler L. G. 1991. Régulation face aux aléas climatiques - fonctionnement et reproduction des exploitations agricoles dans le semi-aride tunisien : la région de Zaghouan. In: Choix technologiques, risques et sécurité dans les agricultures méditerranéennes. S. Bedrani et P. Campagne (Eds). Montpellier, CIHEAM-IAMM. 27-44
- Esser K. 1999. Water Harvesting in Dryland Farming. Agricultural University of Norway, Centre for Environment and Development studies. Rapport n° 7.
- Estrada Avalos J. 1999. Importance et fonctionnement des petits barrages dans une zone semi-aride du Nord-Mexique. Doctorat. mécanique, génie mécanique, génie civil. Université de Montpellier II. 462 pages.
- Estrada Avalos J., Lamachère J. M. et Thiébaux J.-P. 2004. Modélisation hydrologique globale conceptuelle appliquée aux petits bassins versants en zone semi-aride du Nord Mexique. *Revue des sciences de l'eau* 17(2): 195-212.
- EUROMED Partnership 2001. Tunisie : Document de Stratégie 2002-2006 et Programme Indicatif National 2002-2006. Union Européenne. 60 pages.
- EuropeAid 2003 Développement rural durable, environnement http://europa.eu.int/comm/europeaid/projects/med/sectors/b5_fr.htm
- Evenari M., Shanan L. et Tadmor N. H. 1971. The Negev: the challenge of a desert. Harvard University. 345 pages.
- Fahey B. et Jackson R. 1997. Hydrological impacts of converting native forests and grasslands to pine plantations, South Island, New Zealand. *Agricultural and Forest Meteorology* 84: 69-82.
- Falkenmark M. 1986. Fresh water - time for a modified approach. *Ambio*. Stockholm 15(4): 192-200.
- Falkenmark M., Fox P., Persson G. et Rockstrom J. 2001. Water harvesting for upgrading of rainfed agriculture. Problem analysis and research needs. Stockholm International Water Institute. 94 pages.
- FAO 1980. Conservation des ressources naturelles en zones arides et semi-arides. Cahiers FAO : conservation des sols. 135 pages.
- FAO 2000 AQUASTAT : Système d'information de la FAO sur l'eau et l'agriculture <http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/dbase/indexfra.stm>
- FAO 2004 FAO Statistical Databases <http://faostat.fao.org/>
- Favreau G., Leduc C. et Schroeter P. 2001. Reply to comment on 'Long-term rise in a Sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger' by Leduc, C., Favreau, G., Schroeter, P., 2001. *Journal of Hydrology* 243, 43-54. *Journal of Hydrology* 255(1-4): 263-265.
- Faysse N. 1999. Les institutions de gestion de l'eau et les associations d'intérêt collectif pour l'irrigation dans le gouvernorat de Kairouan. IRD. 85 pages.
- Faysse N. 2001. L'influence des règles collectives d'allocation de l'eau sur les choix stratégiques des agriculteurs. Des petits périmètres irrigués tunisiens aux prélèvements en rivière dans le bassin de l'Adour. Thèse de doctorat. économie. Paris X. 265 pages.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Felfoul M. S., Snane M. H., Mlaouhi A. et Megdiche M. F. 1999. Importance du facteur lithologique sur le développement des ravins du bassin versant d'Oued Maiez en Tunisie Centrale. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 57(3): 285-293.
- Feuillette S. 2001. Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressource usages par les systèmes multi-agents. Application à la nappe de Kairouan, Tunisie centrale. Doctorat. Sciences de la terre et de l'eau. Université de Montpellier II. 350 pages.
- FIDA 2004. Projet de développement agricole et rural intégré de Siliana (PDARI). Agence Française de Développement. Evaluation report. Rapport n° 1569. 100 pages.
- Finch J. W. 2001. A comparison between measured and modelled open water evaporation from a reservoir in south-east England. *Hydrological Processes* 15: 2771-2778.
- Fitzjohn C., Ternan J. L. et Williams A. G. 1998. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: implications for runoff and erosion control. *CATENA* 32: 55-70.
- Franquin P. 1973. La climatologie fréquentielle en agriculture tropicale. *Technique et développement* 5: 6-15.
- Fu G., Liu C., Chen S. et Hong J. 2004. Investigating the conversion coefficients for free water surface evaporation of different evaporation pans. *Hydrological Processes* 18: 2247-2262.
- Fuhriman D. K. et Merritt L. B. 1981. Refinement of lake evaporation measurements, using an ion-balance technique. *Journal of Hydrology* 51(1-4): 255-263.
- Gay D. 2004. Fonctionnement et bilan de retenues artificielles en Tunisie : Approche hydrochimique et isotopique. Thèse de doctorat. UFR Scientifique d'Orsay. Université Paris XI Orsay. 156 pages.
- Gharbi C. 09/08/2006. Tunisie : Conservation de l'eau et du sol, une stratégie de protection qui implique l'exploitant. La Presse. Tunis
- Gibson J. J., Edwards T. W. D. et Prowse T. D. 1996. Development and validation of an isotopic method for estimating lake evaporation. *Hydrological Processes* 10(10): 1369-1382.
- Gibson J. J., Reid R. et Spence C. 1998. A six-year isotopic record of lake evaporation at a mine site in the Canadian subarctic: results and validation. *Hydrological Processes* 12: 1779-1792.
- Gilbertson D. D. 1986. Runoff (floodwater) farming and rural water supply in arid lands. *Applied Geography* 6(1): 5-11.
- Giraldez J. V., Ayuso J. L., Garcia A., Lopez J. G. et Roldan J. 1988. Water Harvesting Strategies in the Semiarid Climate of Southeastern Spain. *Agricultural Water Management* 14(1-4): 253-263.
- Gogien F. 1998. Application d'un modèle pluie-débit à un bassin versant de Tunisie centrale. Essai de prise en compte de la variabilité spatio-temporelle de la pluie. Diplôme d'Agronomie Approfondie. physique des surfaces naturelles et génie rural. Ecole Nationale Supérieure Agronomique. 119 pages.

8 BIBLIOGRAPHIE

Gromiec M. J. 1983. Methods of computation of the water balance of large lakes and reservoirs. *Ecological Modelling* 19(3): 226-227.

Grünberger O., Montoroi J.-P. et Nasri S. 2004. Quantification of water exchange between a hill reservoir and groundwater using hydrological and isotopic modelling (El Gouazine, Tunisia). *Comptes rendus Géoscience* 336: 1453-1462.

Guillaud C. et Trabelsi M. 1991. Management of water resources in Central Tunisia. Sidi Saad and El Haouareb Projects. Conférence: 20th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics. Vienna, Austria, 11 to 24 August 1991: 129-138.

Güntner A., Krol M. S., De Araujo J. C. et Bronstert A. 2004. Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region. *Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques* 49(5): 901 - 918.

Gurrieri J. T. et Furniss G. 2004. Estimation of groundwater exchange in alpine lakes using non-steady mass-balance methods. *Journal of Hydrology* 297: 187-208.

Habib Snane M., Toumi M. et Chaabouni Z. 1991. Un modèle d'optimisation des pluies pour les oliveraies. *Sécheresse* 2: 12-16.

Hammami M. 1997. Stratégies de l'Etat et stratégies paysannes dans le développement agricole : le cas des exploitations agricoles dans le nouveau périmètre irrigué de Sebala-Henchir Tobias (Tunisie). In: *La modernisation des agricultures méditerranéennes (à la mémoire de Pierre Coulomb)*. A. M. Jouve (Ed). Montpellier, CIHEAM-IAMM. Vol. 29: 265-272

Hamza A. et Mamou H. 1995. Rôle des ouvrages de conservation des eaux et du sol dans la lutte contre les inondations. In: *Agriculture, durabilité et environnement*. S. Zekri et A. Laajimi (Eds). Zaragoza, CIHEAM-IAMZ. Vol. 9: 87-96

Hamza M. 1983. Les ressources en eau du Kairouannais, identification et évaluation, mobilisation et allocation. 20 pages.

HAR 2003. Etude de planification des aménagements CES dans le gouvernorat de Siliana. Phase 2. Rapport final définitif. Société d'hydraulique et d'aménagement rural. Direction Générale de l'Aménagement et de la conservation des Terres Agricoles (DG/ACTA). Ministère de l'agriculture, de l'environnement et des ressources hydrauliques. République Tunisienne. 152 pages.

Hervieu F. 2000. Contribution à l'étude hydrochimique des eaux du bassin amont du Merguellil. Maîtrise. Faculté des sciences, Laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique. Université Paris Sud. 40 pages.

Herweg K. 1995. Evaluation of improved technologies for conservation farming. Conférence: International workshop on conservation farming for sloping uplands in Southeast Asia, Challenges, Opportunities, and Prospects, A. Maglinao et A. Sajjapongse (Eds). Bangkok: 183-191.

Heusch B. 1986. Cinquante ans de banquettes de D.R.S.-C.E.S en Afrique du Nord : un bilan. *Cahiers ORSTOM, série pédologie* 22(2): 153-162.

Heusch B. 1995. Pourquoi la banquette CES diminue les rendements et augmente l'érosion. In: *Environnement humain de l'érosion*. G. De Noni, E. Roose, J.-F. Nouvelot et Y. Veyret (Eds), Réseau Erosion - Bulletin. Vol. 15: 317-325

8 BIBLIOGRAPHIE

Hounam C. E. 1973. Comparison between pan and lake evaporation. World Meteorological Organization. Technical note. Rapport n° 126. 52 pages.

Hubert P., Carbonnel J. P. et Chaouche A. 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques - Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology* 110: 349-367.

Hubert P., Servat E., Paturel J.-E., Kouame B., Bendjoudi H., Carbonnel J. P. et Lubès-Niel H. 1998. La procédure de segmentation, dix ans après. Conférence: Water Resources Variability in Africa during the 20th Century : International Conference, E. Servat, D. Hughes, J.-M. Fritsch et M. Hulme (Eds). Abidjan, 16-19 November 1998, AISH: 267-273.

Ikebuchi S., Seki M. et Ohtoh A. 1988. Evaporation from Lake Biwa. *Journal of Hydrology* 102(1-4): 427-449.

Institut National de la Statistique 2005 Statistiques économiques et sociales de la Tunisie <http://www.ins.nat.tn/>

Jaziri N. 1999. Contribution à l'étude du comportement des agriculteurs face aux aménagements C.E.S. Etude de cas des imadats : Louata, Gouiba, Fjernia et Gliaa. Mémoire de fin d'études. Département d'économie et de développement rural. Institut National Agronomique de Tunisie. 99 pages.

Jensen M. E., Dotan A. et Sanford R. 2005. Penman-Monteith estimates of reservoir evaporation. Conférence: World Water and Environmental Resources. Impact of global climate change, R. Walton (Ed). Alaska, USA, 15 et 19 mai 2005, ASCE.

Kanemasu E. T., Stewart J. I., Van -Donk S. J. et Virmani S. M. 1990. Agroclimatic approaches for improving agricultural productivity in semiarid tropics. In: *Advances in soil science*. R. P. Singh, J. F. Parr et B. A. Stewart (Eds). New York, Springer Verlag. Vol. 13: 273-309

Karnieli A. et Ben Asher J. 1993. A daily runoff simulation in semi-arid watersheds based on soil water deficit calculations. *Journal of Hydrology* 149(1-4): 9-25.

Kefi R. 29/01/2000. Le pays aux mille lacs. La Presse. Tunis

Keskin M. E. et Terzi O. 2006. Evaporation estimation models for lake Egirdir, Turkey. *Hydrological Processes* 20: 2381-2391.

Kingumbi A. 1999. Bilan et modélisation de la retenue du barrage d'El Haouareb. Diplôme d'études approfondies. Laboratoire d'hydraulique. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis. 145 pages.

Kingumbi A. 2006. Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie centrale. Thèse de doctorat. Génie hydraulique. Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis. 218 pages.

Kingumbi A., Bargaoui Z. et Hubert P. 2005. Investigation of the rainfall variability in central Tunisia. *Journal des Sciences Hydrologiques* 50(3): 493-508.

Kingumbi A., Besbes M., Bourges J. et Garreta P. 2004. Evaluation des transferts entre barrage et aquifères par la méthode de bilan d'une retenue en zone semi-aride. Cas d'El Haouareb en Tunisie centrale. *Revue des sciences de l'eau* 17(2): 213-225.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Kirpich T. P. 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering* 10(6): 362.
- Klingebiel A. A. et Montgomery P. H. 1966. Land capability and classification. Soil Conservation Service, USDA. Agricultural Handbook. Rapport n° 210.
- Kohler M. A. 1954. Lake and pan evaporation. Water loss investigations: Vol. 1 - Lake Hefner studies. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper. Rapport n° 269.
- Krüger H.-J. 1994. The development of farmer friendly conservation measures. *Ethiopian Soil Conservation News* 15: 14-18.
- Lafforgue A. et Eoche Duval J. M. 1971. Observation des crues de l'automne 1969 sur l'oued Merguellil au niveau de Haffouz. *Division des Ressources en Eau*. 6 pages.
- Lamachère J. M., Boufaroua M., Guerhazi L. et Habaieb H. 2006. Prédétermination des apports liquides et solides dans les lacs collinaires de la Dorsale tunisienne. Conférence: 14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments. Marrakech, Morocco, ISCO: 1-16.
- Lamary M. 1992. Les aspects sociaux de la conservation des eaux et du sol en Tunisie. PNUD/FAO. Rapport de consultation. 71 pages.
- Laraque A. 1991. Comportements hydrochimiques des açudes du Nordeste Brésilien semi-aride, évolutions et prévisions pour un usage en irrigation. Thèse de doctorat. Hydrologie. Université des sciences de Montpellier. 353 pages.
- Lavee H., Poesen J. et Yair A. 1997. Evidence of high efficiency water-harvesting by ancient farmers in the Negev Desert, Israel. *Journal of Arid Environments* 35: 341-348.
- Leduc C., Calvez R., Beji R., Nazoumou Y., Lacombe G. et Aouadi C. 2004. Evolution de la ressource en eau dans la vallée du Merguellil (Tunisie centrale). Conférence: La modernisation de l'agriculture irriguée, M. Hammami, M. Kuper et A. Debbarh (Eds). Rabat, Morocco, 19-21 Avril 2004, INCO-WADEMED: 338-347.
- Leduc C., Favreau G. et Schroeter P. 2001. Long-term rise in a Sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger. *Journal of Hydrology* 243: 43-54.
- Lee A. F. S. et Heghinian S. M. 1977. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variable-A Bayesian approach. *Technometrics* 19(4): 503-506.
- Leprun J.-C., Molinier M., Cadier E., Fotius G., Galindo O., Souza Ramos F. d. et Ramos de Souza H. 1995. Les sécheresses de la région Nordeste du Brésil et leurs conséquences. *Sécheresse* 6(1): 23-33.
- Lorup J. K., Refsgaard J. C. et Mazvimavi D. 1998. Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: Case studies from Zimbabwe. *Journal of Hydrology* 205: 147-163.
- Lubès H., Masson J.-M., Servat E., Paturel J.-E., Kouame B. et Boyer J.-F. 1994. Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques. Etude bibliographique. ORSTOM. Rapport n° 3. 21 pages.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Makkink G. F. 1956. The application of research on evaporation in hydrology. Conférence: Symposia Darcy, AISH (Ed). Dijon, France.
- Martinec J. et Rango A. 1989. Merits of statistical criteria for the performance of hydrological models. *Water Resources Bulletin* 25(2): 421-432.
- Martinez-Mena M., Albaladejo J. et Castillo V. M. 1998. Factors influencing surface runoff generation in a Mediterranean semi-arid environment: Chicamo watershed, SE Spain. *Hydrological Processes* 12: 741-754.
- Martin-Rosales W. et Leduc C. 2003. Dynamiques de vidange d'une mare temporaire au Sahel : l'exemple de Banizoumbou (Sud-Ouest du Niger). *Comptes Rendus Géoscience* 335: 461-468.
- Matteo L. D. et Dragoni W. 2005. Empirical relationships for estimating stream depletion by a well pumping near a gaining stream. *Ground Water* 43(2): 242-249.
- M'Barek M. 09/07/2007. Au coeur de l'actualité, des ouvrages qui font la fierté des tunisiens. La Presse. Tunis
- Mechergui M. 2000. La petite hydraulique et son impact sur la vie du paysan, les eaux de ruissellement, la conservation en eau et en sol et les ressources en eau vers l'aval dans un bassin versant : cas de deux bassins versants de Siliana et du Kef en Tunisie. Conférence: Relations terre-eau dans les bassins versants ruraux, O. D. N. U. P. L. A. E. L'AGRICULTURE (Ed). Conférence électronique, 18 septembre au 27 octobre 2000, FAO: 1-5.
- Mekki I., Albergel J., Ben Mechlia N. et Voltz M. 2006. Assessment of overland flow variation and blue water production in a farmed semi-arid water harvesting catchment. *Physical and Chemistry of the Earth* 31(17): 1048-1061.
- Ministère de l'Agriculture et République Tunisienne 1996. Enquête sur les structures des exploitations agricoles 1994-1995. Direction générale de la planification, du développement et des investissements agricoles.
- Mizouri M., Barbery J. et Willaine P. 1990. Carte des ressources en sols de la Tunisie (1/200000) : nouvelle approche méthodologique, feuille de Makthar. Tunis, Ministère de l'agriculture.
- Molle F. 1991. Caractéristiques et potentialités des "açudes" du nordeste brésilien. Thèse de doctorat. Sciences de l'eau : Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil. Université de Montpellier II. 381 pages.
- Molle F. 1992. Quelques aspects historiques de la problématique de l'eau dans le Nordeste brésilien. Conférence: Journées CIRAD-SAR : systèmes irrigués: 1-7.
- Montoroi J. P., Grünberger O. et Nasri S. 2004. Utilisation de l'hydrochimie d'un bassin versant de lac collinaire tunisien pour l'étude de la recharge de la nappe alluviale. *Revue des sciences de l'eau* 17(2): 245-263.
- Montoroi J.-P., Grünberger O. et Nasri S. 2002. Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia. *Applied Geochemistry* 17: 1047-1060.
- Morton F. I. 1975. Estimating evaporation and transpiration from climatological observations. *Journal of Applied Meteorology* 14: 488-497.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Morton F. I. 1983a. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology* 66(1-4): 1-76.
- Morton F. I. 1983b. Operational estimates of lake evaporation. *Journal of Hydrology* 66: 1-76.
- Morton F. I. 1986. Practical estimates of lake evaporation. *American Meteorological Society*: 371-387.
- Mosalam Shaltout M. A. et El Housry T. 1997. Estimating the evaporation over Nasser lake in the upper Egypt from meteosat observations. *Advance Space Research* 19(3): 515-518.
- Mtimet A. et D rouiche C. 1996. Evaluation des paramètres physico-hydriques de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique. Tunis. 100 pages
- Mtimet A., D rouiche C. et Louati M. H. 1997. Etude de l'érosion en Tunisie. Tunis. 120 pages
- Mugabe F. T., Hodnett M. G. et Senzanje A. 2003. Opportunities for increasing productive water use from dam water: a case study from semi-arid Zimbabwe. *Agricultural Water Management* 62: 149-163.
- Naimi M. et Baghdad B. 2002. Aménagements traditionnels dans une vallée du haut atlas occidental, Maroc. Conférence: Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen, E. Roose, M. Sabir et G. De Noni (Eds). Rabat, Maroc, IRD: 82-93.
- Nandakumar N. et Mein R. G. 1997. Uncertainty in rainfall-runoff model simulations and the implications for predicting the hydrologic effects of land-use change. *Journal of Hydrology* 192: 211-232.
- Nash J. E. et Sutcliffe J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 27(3): 282-290.
- Nasri S., Albergel J., Cudennec C. et Berndtsson R. 2004a. Hydrological processes in macrocatchment water harvesting in the arid region of Tunisia: the traditional system of tabias. *Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques* 49: 261-272.
- Nasri S., Lamachère J. M. et Albergel J. 2004b. The impact of contour ridges on runoff from small catchment. *Revue des sciences de l'eau* 17(2): 265-289.
- Ngigi S. N., Savenije H. H. G., Thome J. N., Rockstr m J. et Penning de Vries F. W. T. 2005. Agro-hydrological evaluation of on-farm rainwater storage systems for supplemental irrigation in Laikipia district, Kenya. *Agricultural Water Management* 73: 21-41.
- Norrant C. et Dougu droit A. 2006. Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950-2000). *Theoretical and Applied Climatology* 83(1-4): 89-106.
- Nuberg I. et Yunusa I. 2003. Olive water use and yield - monitoring the relationship. Rural Industries Research and Development Corporation. 46 pages.
- Omar M. H. et El Bakry M. M. 1981. Estimation of evaporation from the lake of the Aswan high dam (lake Nasser) based on measurements over the lake. *Agricultural Meteorology* 23: 293-308.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Oosterbaan R. J. 1984. Modern interferences in traditional water resources in Baluchistan. *Water International* 9(3): 106-111.
- Oroud I. M. 1998. The influence of heat conduction on evaporation from sunken pans in hot, dry environment. *Journal of Hydrology* 210: 1-10.
- Ouali J. 1985. Structure et évolution géodynamique du chaînon Nara-sidi Khalif (Tunisie centrale). *Bulletin - Centre de Recherches Exploration - Production Elf - Aquitaine* 9(1): 155-182.
- Oweis T. et Hachum A. 2006. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agricultural Water Management* 80: 57-73.
- Oweis T., Hachum A. et Kijne J. 1999. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water use efficiency in dry areas. International Water Management Institute. Rapport n° SWIM paper n° 7. 41 pages.
- Pabiot F. 1999. Optimisation de la gestion d'un barrage collinaire en zone semi-aride. Diplôme d'Agronomie Approfondie. Physique des Surfaces Naturelles et Génie Hydrologique. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes. 115 pages.
- Panin G. N., Nasonov A. E., Foken T. et Lohse H. 2006. On the parameterisation of evaporation and sensible heat exchange for shallow lakes. *Theoretical and Applied Climatology* 85: 123-129.
- Parker D. B., Auvermann B. W. et Williams D. L. 1999. Comparison of evaporation rates from feedyard pond effluent and clear water as applied to seepage predictions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 42(4): 981-986.
- Perrin C. 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Doctorat. Mécanique des milieux géophysiques et environnement. Institut national polytechnique de Grenoble. 291 pages.
- Perrin C., Michel C. et Andréassian V. 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* 242: 275-301.
- Perrin C., Michel C. et Andréassian V. 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279: 275-289.
- Pettitt A. N. 1979. A Non-parametric Approach to the Change-point Problem. *Applied Statistics* 28(2): 126-135.
- Peugeot C., Cappelaere B., Vieux B. E., Séguis L. et Maia A. 2003. Hydrological process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 1. Model-aided data analysis and screening. *Journal of Hydrology* 279: 224-243.
- Picouet M., Abaab A., Auclair L., Elloumi M., Lahmar M., Moussa F., Sandron F. et Sghaier M. 2006. Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers. Le cas de la Tunisie. Paris, CICRED. 298 pages
- Pouyaud B. 1986. Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. Thèse de doctorat. Sciences naturelles. Université de Paris Sud : Orsay. 244 pages.

8 BIBLIOGRAPHIE

Prinz D. 1994. Water Harvesting: Past and Future. Conférence: Sustainability of irrigated agriculture, L. S. Pereira (Ed). Balkema, Rotterdam, 21-26 march 1994, NATO Advanced Research Workshop: 135-144.

Reij C. 1991. Indigenous Soil and Water Conservation in Africa. International Institute for Environment and Development. Gatekeeper series. Rapport n° 27. 34 pages.

Reij C., Mulder P. et Begemann L. 1988. Water harvesting for plant production. World Bank. Technical paper. Rapport n° 91. 138 pages.

République Tunisienne 2001 Enquête sur la structure des exploitations agricoles dans la délégation de Haffouz

Riou C. 1972. Etude de l'évaporation en Afrique centrale (Tchad, République Centrafricaine, Congo) : contribution à la connaissance des climats. Thèse de doctorat d'état. Sciences physiques. Université Paris 6, Jussieu. 228 pages.

Riou C. et Chartier R. 1985. Evapotranspiration en zone semi-aride de deux couverts végétaux (gazon, blé) obtenue par plusieurs méthodes. I. - Evaluation de l'ETP (conditions hydriques non limitantes). *Agronomie* 5(3): 261-266.

Riou C. et Dubois G. 1966. L'utilisation des bacs d'évaporation sous climat sahélien. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie* 3(5): 45-66.

Roche M. 1958. Etat actuel des études d'évaporation en Afrique noire française. ORSTOM. 21 pages.

Roose E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des Sols (GCES). FAO. Bulletin pédologique. Rapport n° 70. 420 pages.

Roose E. 2002a. Analyse du système des banquettes mécaniques. Propositions d'améliorations, de valorisation et d'évolution pour les gouvernorats de Kairouan, Siliana et Zaghouan, Tunisie. République Tunisienne, Ministère de l'Agriculture, Direction DG/ACTA Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. Rapport de consultation pour le projet GCP/TUN/028/ITA. 27 pages.

Roose E. 2002b. Banquettes mécaniques et techniques traditionnelles de GCES pour la zone méditerranéenne semi-aride de Tunisie. In: *Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen*. E. Roose, M. Sabir et G. De Noni (Eds), Bulletin - Réseau Erosion (FRA). Vol. No 21: p. 130-154

Roose E. 2002c. Diversité des aménagements traditionnels de gestion des eaux et des sols en Israël. Recherche bibliographique. Conférence: *Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen*, E. Roose, M. Sabir et G. De Noni (Eds). Rabat, Maroc, IRD: 155-168.

Roose E. 2002d. Programme de conservation des eaux et des sols dans les gouvernorats de Kairouan, Siliana et Zaghouan. Analyse du système des banquettes mécaniques. Food and Agriculture Organization. Consultative report. 27 pages.

Roose E. 2002e. Réflexions sur quelques techniques traditionnelles de gestion de l'eau et des sols en Languedoc et Roussillon (France méridionale). Conférence: *Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen*, E. Roose, M. Sabir et G. De Noni (Eds). Rabat, Maroc, IRD: 197-212.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Roose E. 2004. Evolution historique des stratégies de lutte antiérosive : vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols : (GCES). *Sécheresse* 15(1): 9-18.
- Roose E. et De Noni G. 1998. Apport de la recherche à la lutte antiérosive : bilan mitigé et nouvelle approche. *Etude et Gestion des Sols* 5(3): 181-194.
- Rosenberry D. O. et Morin R. H. 2004. Use of an electromagnetic seepage meter to investigate temporal variability in lake seepage. *Ground Water* 1: 68-77.
- Sacks L. A., Lee T. M. et Radell M. J. 1994. Comparison of energy-budget evaporation losses from two morphometrically different Florida seepage lakes. *Journal of Hydrology* 156(1-4): 311-334.
- Séguis L., Cappelaere B., Milési G., Peugeot C., Massuel S. et Favreau G. 2004. Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment. *Hydrological Processes* 18: 3401-3413.
- Sellers W. O. 1965. *Physical climatology*. University of Chicago.
- Selmi S. 1996. Interventions de l'état en milieu rural et réactions des collectivités locales face à la gestion d'une ressource rare. Les lacs collinaires dans le semi-aride Tunisien. Thèse de doctorat. Economie du Développement Agricole, Agro-alimentaire et Rural. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. 342 pages.
- Selmi S. 2000. La gestion collective des lacs collinaires en Tunisie : vide juridique et pouvoir social important. In: *Approches sociales de l'irrigation et de la gestion collective de l'eau : démarches et expériences en France et dans le monde*. A. Rivière-Honegger et T. Ruf (Eds). Montpellier. Vol. 7: 153-164
- Selmi S. et Nasri S. 1997. Les lacs et retenues collinaires en Tunisie. Orstom. 53 pages.
- Selmi S. et Talineau J.-C. 1994. Des lacs collinaires pour un développement durable en Tunisie semi-aride. *Les Cahiers de la Recherche Développement* 37: 33-46.
- Selmi S. et Talineau J.-C. 1996. Diversité et problématique de la gestion collective des lacs collinaires tunisiens. Conférence: Atelier sur la ruralité dans les pays du sud à la fin du vingtième siècle, Orstom (Ed). Montpellier, France, 1997: 455-470.
- Servat E., Paturel J.-E., Kouame B., Travaglio M., Lubes-Niel H., Marieu B., Fritsch J.-M. et Masson J.-M. 1997. Modification des régimes d'écoulement en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne et conséquence sur les ressources en eau. In: *Regional Hydrology : Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management (Proceedings of the Postojna, Slovenia, Conference, Septembre-Octobre 1997)*. Postojna, AISH. Vol. 246: 241-248
- Sethom H. et Kassab A. 1981. *Les régions géographiques de la Tunisie*. Tunis. 460 pages
- Shaw R. D. et Prepas E. E. 1990. Groundwater-lake interactions: I. Accuracy of seepage meter estimates of lake seepage. *Journal of Hydrology* 119(1-4): 105-120.
- Simon E. et Mero F. 1985. A simplified procedure for the evaluation of the lake Kinneret evaporation. *Journal of Hydrology* 78(3-4): 291-304.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Siriwardena L., Finlayson B. L. et McMahon T. A. 2006. The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia. *Journal of Hydrology* 326: 199-214.
- Smolikowski B., Puig H. et Roose E. 2001. Influence of soil protection techniques on runoff, erosion and plant production on semi-arid hillside of Cabo Verde. *Agriculture Ecosystems and Environment* 87: 67-80.
- Somme G., Oweis T., Abdulal A., Bruggeman A. et Ali A. 2005. Micro-catchment water harvesting for improved vegetative cover in the Syrian Badia. ICARDA.
- Souissi A. 2000. Tunisie : enjeux et politiques d'environnement et de développement durable. Plan bleu. 70 pages.
- Stewart J. I. 1988. Response farming in rainfed agriculture. Davis, California, USA, The Wharf Foundation Press. 103 pages
- Stewart R. B. et Rouse W. R. 1976. A simple method for determining evaporation from shallow lake and ponds. *Water Resources* 12: 623-628.
- Talineau J.-C., Selmi S. et Alaya K. 1994. Lacs collinaires en Tunisie semi-aride. *Sécheresse* 5(4): 251-256.
- Tasumi M. 2005. A review of evaporation research on Japanese lakes. Conférence: World Water Congress. Impacts of Global Climate Change. World Water and Environmental Resources Congress, R. Walton (Ed). Anchorage, Alaska, USA, 15-19 mai 2005.
- Thiessen A. H. 1911. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review* 39: 1082-1084.
- Thoms M. C. et Sheldon F. 2000. Water resource development and hydrological change in a large dryland river: the Barwon-Darling River, Australia. *Journal of Hydrology* 228: 10-21.
- Tribak A. 2002. Stratégies et techniques de lutte antiérosive dans les montagnes du préif oriental (Maroc). Conférence: Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen, E. Roose, M. Sabir et G. De Noni (Eds). Rabat, Maroc, IRD: 45-55.
- Tsering T. 2005. China's water politics: in whose interest? Master of art in political science. Tibet Justice Center. Portland State University. 69 pages.
- Turner J. V., Allison G. B. et Holmes J. W. 1984. The water balance of a small lake using stable isotopes and tritium. *Journal of Hydrology* 70(1-4): 199-220.
- Vallet-Coulomb C., Legesse D., Gasse F., Travi Y. et Chernet T. 2001. Lake evaporation estimates in tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia). *Journal of Hydrology* 245: 1-18.
- Van Wesemael B., Poesen J., Solé-Benet A., Cara Barrionuevo L. et Puigdefabregas J. 1998. Collection and storage or runoff from hillslopes in a semi-arid environment: geomorphic and hydrologic aspects of the aljibe system in Almeria Province, Spain. *Journal of Arid Environments* 40(1): 1-14.
- Vardavas I. M. et Fountoulakis A. 1996. Estimation of lake evaporation from standard meteorological measurements: application to four Australian lakes in different climatic regions. *Ecological Modelling* 84: 139-150.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Virmani S. M. 1975. The Agricultural Climate of the Hyderabad region in relation to crop planning: a simple analysis. Hyderabad, Inde, ICRISAT.
- Virrion R. 2006. Contribution à l'étude hydrogéologique du site d'el Haouareb - Merguellil - Tunisie Centrale. Master 2. Hydrogéologie et Environnement. Université d'Avignon. 104 pages.
- Vischel T. et Lebel T. 2007. Assessing the water balance in the Sahel: Impact of small scale rainfall variability on runoff. Part 2: Idealized modeling of runoff sensitivity. *Journal of Hydrology* 333: 340-355.
- Vuillaume G. 1981. Bilan hydrologique mensuel et modélisation sommaire du régime hydrologique du lac Tchad. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie* 18(1): 23-72.
- Wakindiki I. I. C. et Ben-Hur M. 2002. Indigenous soil and water conservation techniques: effects on runoff, erosion, and crop yields under semi-arid conditions. *Australian Journal of Soil Research* 40(3): 367-379.
- Webb E. K. 1966. A pan-lake evaporation relationship. *Journal of Hydrology* 4: 1-11.
- Woessner W. W. et Sullivan E. 1984. Results of seepage meter and mini-piezometer study, lake Mead, Nevada. *Ground Water* 22(5): 561.
- Xiubin H., Zhanbin L., Mingde H., Keli T. et Fengli Z. 2003. Down-scale analysis for water scarcity in response to soil-water conservation on Loess Plateau of China. *Agricultural Ecosystems and Environment* 94: 355-361.
- Yu Y.-S. et Vernon Knapp H. 1985. Weekly, monthly and annual evaporations for Elk City Lake. *Journal of Hydrology* 80(1-2): 93-110.
- Z. F. 29/08/2006. Kairouan, gouvernorat des barrages et des lacs collinaires. La Presse. Tunis
- Zammouri M. et Feki H. 2005. Managing releases from small upland reservoirs for downstream recharge in semi-arid basins (Northeast of Tunisia). *Journal of Hydrology* 314: 125-138.
- Zirebwa J. et Twomlow S. 1999. Historical profiles of selected small dams in communal areas of Masvingo Province. Silsoe Research Institute. Rapport n° IDG/99/11.

RESUME

En Tunisie centrale semi-aride, le bassin versant du Merguellil (1183 km²), à l'amont du barrage El Haouareb, a été aménagé avec des techniques conservatoires (retenues collinaires et banquettes) depuis plusieurs décennies. Cette thèse détermine comment elles redistribuent spatialement la ressource en eau et ses usages. Deux approches sont développées. La première, locale, montre à l'aide de bilans hydriques que plus du tiers du ruissellement collecté dans les retenues est perdu par évaporation. 12% sont prélevés pour l'irrigation, calcul en accord avec les résultats d'enquêtes en milieu paysan. Un modèle pluie-débit/bilan hydrique indique que le taux d'exploitation des retenues collinaires correspond à un risque de pénurie en eau supérieur à 50%. Sur les versants aménagés en banquettes, la totalité du ruissellement collecté est probablement évapotranspirée sans augmenter la production agricole. La seconde approche estime l'impact des aménagements sur le rendement hydrologique du bassin versant. L'analyse de la variabilité pluie-débit et un test non paramétrique appliqué aux écoulements simulés par le modèle pluie-débit GR4J montrent qu'entre 1989 et 2005 le ruissellement produit par les pluies de moins de 40 mm a été réduit de plus de 70% dans la partie aval du bassin versant couvrant 84% de sa surface. L'analyse des causes possibles de cette réduction (climat, occupation des sols, échanges surface/souterrain) révèle le rôle prépondérant des aménagements introduits sur 32% de cette partie aval. Leur impact sur la ressource en eau produite dans le bassin versant est estimé en confrontant les approches locale et régionale. Il équivaut à une réduction globale de 25% de la ressource en eau principalement par évaporation. La plantation d'oliviers dans les zones aménagées en banquettes s'annonce comme la meilleure solution pour réduire voir annuler ce déficit en ressource hydrique.

Mots clefs : impact hydrologique, conservation des eaux et des sols, modèle conceptuel, semi-aride, Tunisie.

ABSTRACT

Title: Evolution and use of water resources in a semi-arid catchment subject to water and soil conservation works. The case of the Merguellil catchment in Central Tunisia.

In semi-arid central Tunisia, the Merguellil catchment (1183 km²) defined by the El Haouareb dam has been equipped with water and soil conservation works (WSCW) for several decades. They consist of contour ridges and small earth dams collecting hillslope runoff and headwater flow. This thesis determines how WSCW modify the spatial distribution of water resources and of its uses. Two approaches are developed. The first one performs water budgets at the reservoir scale. In average, one third of flow collected by earth dams is lost through evaporation. About 12% are pumped for additional irrigation. This result is in good agreement with field surveys. Simulations with a coupled rainfall-runoff/water balance model indicate that estimated water withdrawal corresponds to a 50 % water shortage risk. In contour ridged hillslopes, the whole runoff is probably evapotranspired without any agricultural yield increase. The second approach characterizes the hydrological changes induced by WSCW in the Merguellil catchment. The space-time variability of the rainfall-runoff relationship is analysed. A non-parametric test applied to the runoff simulated with the GR4J rainfall-runoff model indicates that from 1989 to 2005 the runoff produced by rainfall below 40 mm was reduced by over 70% in the lower area covering 84% of the catchment. An analysis of possible sources for that reduction such as climate, land use/land cover, or water exchanges with the aquifer, led to the conclusion that WSCW, which were developed over 32% of the lower area since 1989, are the most likely cause. Impact on the catchment water resources production is assessed from the local and regional approaches. It is equivalent to a global 25% decrease of water resources, mainly through evaporation. Olive tree planting in contour ridged areas looks like the adequate solution to mitigate this water resources decrease.

UMR Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages – Maison des Sciences de l'Eau – BP 64501 – 34394 Montpellier Cedex 5 - France

UMR Hydrosociétés Montpellier – Université Montpellier 2 – Case MSE – Place Eugène Bataillon – 34095 Montpellier Cedex 5 - France