

Comparative study on river basins

MERGUPELLIL RIVER

Water accounting, blue and green water

Août 2005

Jean-Paul LUC

Reference terms :**Action 4:** *Water accounting, blue and green water*

Objectives: Apply IWMI methodology, considering rainfed and irrigated crops, and surface/underground water interactions. Water accounting will be particularly difficult to establish because of the importance of groundwater use.

Methodology:

- Mapping of soil water reserves
- Typology of agricultural practices and water balances (in dry and irrigated conditions)
- Spatialisation of productions in normal, dry and wet years (use Action 1 and Action 3)
- Blue and green water accounting

Person in charge: Jean-Paul LUC, IRD

PLAN DU RAPPORT

INTRODUCTION.....	3
1 BASES METHODOLOGIQUES.....	4
1.1 COMPTABILISER L'UTILISATION ET LA PRODUCTIVITE DE L'EAU	4
1.2 CLASSIFICATION "EAU BLEUE – EAU VERTE"	8
2 OUTILS RETENUS POUR LE « WATER ACCOUNTING »	9
2.1 CONTEXTE DU MERGUELLIL	9
2.2 OUTILS ADAPTES A L'ECHELLE PARCELLAIRE.....	9
2.2.1 Détermination de la productivité de l'eau.....	10
2.2.1.1 Cultures irriguées	10
2.2.1.2 Cultures en sec	13
2.2.2 Calcul du bilan : Eau bleue – eau verte.....	15
2.2.2.1 Cultures irriguées	15
2.2.2.2 Cultures en sec	16
2.3 METHODOLOGIE DU CHANGEMENT D'ECHELLE : DE LA PARCELLE A LA ZONE.....	16
3 APPLICATION A LA ZONE DE LA PLAINE DE KAIROUAN.....	17
3.1 DONNEES PEDO-CLIMATIQUES	17
3.1.1 Pluies.....	17
3.1.2 Evapotranspiration	19
3.1.3 Réserve en eau des sols de la plaine	19
3.2 COEFFICIENTS CULTURAUX	20
3.3 RENDEMENTS DES CULTURES	21
3.4 BILAN DE PRODUCTIVITE A LA PARCELLE	22
3.4.1 Productivité de l'eau d'irrigation pour différentes cultures	23
3.4.2 Influence du climat sur les besoins en eau d'irrigation et la productivité de l'eau.....	23
3.5 BILAN EAU BLEUE – EAU VERTE A L'ECHELLE DE LA PARCELLE.....	24
3.6 PRODUCTIVITE DE L'EAU A L'ECHELLE DE LA PLAINE	26
3.6.1 Présentation de la zone d'étude.....	26
3.6.1.1 Origine des données	27
3.6.1.2 Représentativité des enquêtes.....	28
3.6.1.2.1 Enquêtes Feuillette –Ben Hamouda	28
3.6.1.2.2 Enquêtes sur les puits	31
3.6.1.2.3 Description des enquêtes CRA.....	34
3.6.1.3 Bilan des surfaces cultivées.....	34
3.6.2 Valeurs de la productivité de l'eau à l'échelle de la zone aval	38
3.6.3 Bilan "eau bleue – eau verte".....	39
4 APPLICATION A LA ZONE AMONT DU BARRAGE EL HAOUAREB	43
4.1 DONNEES.....	43
4.1.1 Pluie	43
4.1.2 ETo.....	43
4.2 BILAN A L'ECHELLE PARCELLAIRE	44
4.2.1 Productivité de l'eau.....	44
4.2.2 Bilan "eau bleue – eau verte".....	45
4.3 BILAN AU NIVEAU DES AMENAGEMENTS DE CES	46
4.4 BILAN AU NIVEAU DES LACS ET BARRAGES COLLINAIRES	46
4.5 BILAN A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT.....	47
4.5.1 Relation limites administratives et limites hydrologiques.....	47
4.5.2 Surfaces aménagées	48
4.5.3 Occupation du sol	49
4.5.4 Analyse détaillée de la délégation d'Haffouz	49
4.5.5 Bilan des surfaces	54
4.5.6 Bilan « eau bleue » - « eau verte » de la zone amont.....	55
5 GLOBAL WATER ACCOUNTING	58
CONCLUSION GENERALE	59

Introduction

Le présent travail est un des éléments du projet « Comprehensive Assessment : comparative study on river basins : Merguellil river »

Son objectif est de quantifier l'ensemble des flux et des usages de l'eau et leur productivité agricole sur l'ensemble du Bassin du Merguellil, oued de Tunisie centrale alimentant la plaine de Kairouan.

On présentera successivement les bases méthodologiques développées par Molden (1997), les outils qui seront mis en œuvre pour réaliser ce bilan, les résultats à l'échelle de la parcelle puis de la zone en travaillant successivement sur la zone de plaine puis sur l'amont du bassin versant.

Ce choix se justifie par le fait que ces deux zones ont des histoires et des activités actuelles encore très différentes.

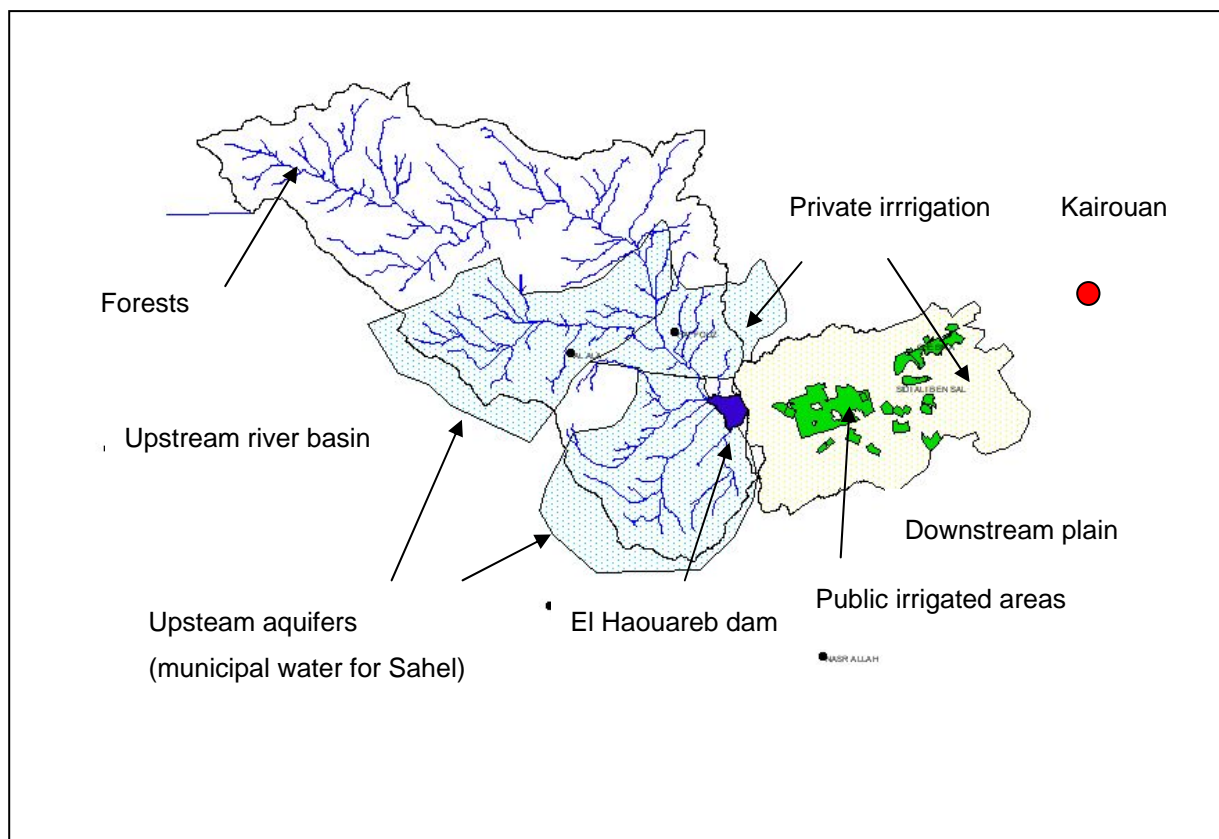


Figure 1 : Schéma général de la zone d'étude

Sur ce schéma, on distingue le bassin amont fermé à l'aval par le grand barrage El Haouareb puis la zone aval de la plaine de Kairouan sous influence de l'oued Merguellil.

Comme particularité, on remarque que les limites réelles des aquifères « amont » (Aïn Baïdha, Bou Hafna, Haffouz) ne correspondent pas exactement aux limites géographiques du bassin versant. Cet aspect ne pourra être pris en compte par la suite.

Le terme « irrigation privée » désigne des zones où elle est principalement développée.

1 Bases méthodologiques

1.1 Comptabiliser l'utilisation et la productivité de l'eau

Cette partie est une traduction d'éléments du rapport SWIM n°1 : Accounting for water use and productivity » de l'IWMI et rédigé par Molden (1997).

La démarche retenue repose sur une modélisation du bilan hydrique appliquée à différentes échelles de temps et d'espace.

Faire un bilan hydrique à l'échelle d'un objet revient toujours à considérer que la loi de conservation de la masse est satisfaite pour la période retenue. Dans ces conditions, tous les flux hydriques peuvent être pris en compte par une méthode du bilan.

Par contre, les activités humaines modifient les termes du bilan et il est intéressant de quantifier leurs impacts non seulement sur les flux d'eau mais sur d'autres aspects comme la valorisation qui en est faite.

La méthodologie développée a pour but de redéfinir les composantes du bilan et surtout de les classer en fonction de leur usage et de la productivité de ces usages.

Elle définit aussi trois niveaux d'approche :

- Le macro niveau : bassin versant avec toutes ses ressources et les usages existants,
- Le niveau moyen : niveau de service : irrigation ou eau urbaine
- Le micro niveau : niveau d'usage : champ, habitat, environnement Les différentes composantes du bilan sont présentées dans la figure suivante :

FIGURE 1.
Water accounting.

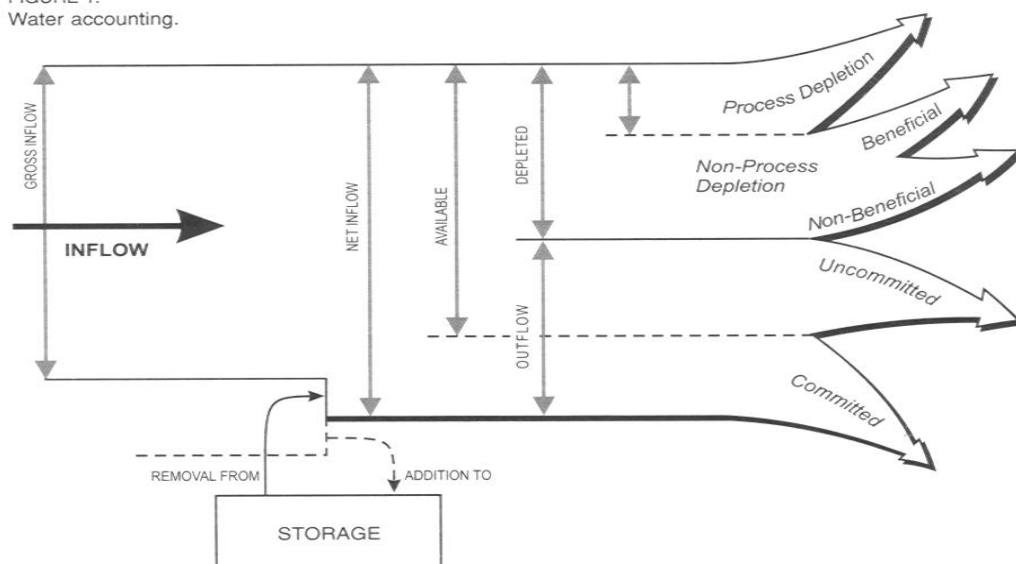


figure 2 : Water accounting Molden D. (1997)

Au niveau des volumes entrants, on définit :

- *Gross inflow ou apport brut* qui est le volume total entrant dans le domaine et provenant des précipitations et des sources de surface ou souterraines,
- *Net inflow ou apport net* qui correspond au volume total augmenté ou diminué des volumes stockés pendant la période. Le volume net sera supérieur au volume brut s'il y a eu déstockage et inférieur s'il y a eu stockage,
- *Water depletion ou Consommation en eau* est l'utilisation de l'eau qui la rend inutilisable pour un autre usage. C'est sur ce volume que se feront ensuite les calculs de productivité. Il est à distinguer de la notion de volume prélevé car, dans ce dernier cas, on constate souvent que l'ensemble du volume prélevé n'est pas consommé. Les quatre grandes causes de consommation sont : l'évaporation (à partir de surface d'eau ou par les plantes), les pertes (mer, nappe salée, ou toute destination pour laquelle la réutilisation est impossible), la pollution, l'incorporation dans un produit (plantes),
- *Process depletion ou consommation productive* est le volume consommé qui est lié au processus de production. En industrie, cette consommation intègre les volumes nécessaires au refroidissement et en agriculture, elle représente les volumes évapotranspirés et ceux stockés dans les plantes,
- *Non-process depletion ou consommation non productive* est le volume non lié directement au processus de production mais imposé au système soit par sa conception soit par sa gestion (évaporation à partir de la surface du barrage, eau perdue par la gestion ou la régulation des ouvrages). Ce type de volume peut être divisé en deux sous-groupes :
 - o *Beneficial non process depletion ou consommation non productive valorisable* lorsque ces volumes peuvent avoir un autre usage ultérieur (alimentation de haies à partir des eaux d'irrigation excédentaires),
 - o *Non beneficial non process depletion ou consommation non productive et non valorisable* si ces volumes alimentent une nappe salée non réutilisable,
- *Committed water ou volume réservé* soit pour des aspects environnementaux ou des usages prioritaires,
- *Uncommitted outflow ou volume non mobilisé* est le volume qui sort du système sans avoir été utilisé mais qui pourrait être affecté à un usage s'il était mobilisé localement grâce à un stockage par exemple.

A ces notions, on peut ajouter celle de *closed basin ou bassin fermé* (Seckler, 1992) qui se dit d'un bassin pour lequel il n'y a pas de volume non mobilisé en saison sèche.

Dans un bassin *fully committed ou à mobilisation totale*, toute l'eau est mobilisée pour un ou des usages et les seules évolutions possibles sont la réallocation ou l'importation de ressources supplémentaires.

Available water ou eau disponible correspond au volume net diminué des volumes réservés. Il est donc la somme des consommations productives, non productives et des volumes non mobilisés.

Enfin on peut définir des *non-depletives uses ou des usages à consommation nulle* comme par exemple la production hydro-électrique si les volumes entrants et sortants de l'usine sont identiques. De même un débit sanitaire dans une rivière peut être considéré à consommation nulle s'il existe un usage à l'aval avant la sortie du système.

Partant de cette classification, on définit des *indicateurs de performances* soit sous forme de rapport soit sous forme de productivité.

La *depleted fraction* ou le *taux de consommation* est la part des apports qui est consommée de façon productive et non productive pour un usage donné. Il peut se calculer par rapport aux apports nets ou bruts ou par rapport au volume disponible.

$$1. \text{ Taux de consommation net : } DF_{net} = \frac{\text{Consommation}}{\text{apport.net}}$$

$$2. \text{ Taux de consommation brut : } DF_{brut} = \frac{\text{Consommation}}{\text{apport.brut}}$$

$$3. \text{ Taux de consommation disponible : } DF_{disponible} = \frac{\text{Consommation}}{\text{volume.disponible}}$$

La *process fraction* ou le *taux de consommation productive* est la part de cette consommation par rapport à la consommation totale ou au volume disponible.

4. Taux de consommation productive / consommation :

$$PF_{consommation} = \frac{\text{Consommation.productive}}{\text{Consommation.totale}}$$

5. Taux de consommation productive / volume disponible :

$$PF_{disponible} = \frac{\text{consommation.productive}}{\text{volume.disponible}}$$

Pour la productivité de l'eau, elle s'exprimera soit par rapport à une masse de production soit par rapport à la valeur économique de cette production.

$$6. \text{ Productivité nette : } PW_{apport} = \frac{\text{Pr oduction}}{\text{apport.net}}$$

$$7. \text{ Productivité / consommation : } PW_{consommation} = \frac{\text{Pr oduction}}{\text{consommation}}$$

$$8. \text{ Productivité / consommation productive } PW_{productive} = \frac{\text{Pr oduction}}{\text{consommation.productive}}$$

On constate qu'il existe des relations entre ces indicateurs :

$$9. \quad PW_{consommation} = \frac{PW_{apport-net}}{DF_{net}}$$

$$10. \quad PW_{productive} = \frac{PW_{consommation}}{PF_{net}}$$

Partant de ces représentations, il est possible de dresser la liste des composantes de cette comptabilité de l'eau à différentes échelles.

<i>Parcelle</i>	<i>Périmètre irrigué</i>	<i>Bassin ou sous-bassin</i>
Apports		
- doses d'irrigation	- volumes dérivés	- pluie
- pluie	- pluie	- transferts inter-bassins
- remontées capillaires	- prélèvements dans les nappes	- apports extérieurs aux nappes
- ruissellement depuis l'amont	- eaux de drainage amont	- apports de rivières
Volumes stockés		
- teneur en eau des sols dans la zone racinaire	- teneur en eau des sols	- teneur en eau des sols
	- marnage des lacs et barrages	- marnage des lacs et barrages
	- variation du niveau des nappes	- variation du niveau des nappes
Consommation productive		
- transpiration des cultures ¹	- transpiration des cultures	- transpiration des cultures
		- usages urbains et industriels
		- piscicultures, forêts, et autres usages
		- zones humides à vocation environnementale
Consommation non productive		
- évaporation à partir du sol y compris des jachères	-évaporation à partir des surfaces d'eau libre ou du sol, des mauvaises herbes ou autres plantes non productives	-évaporation à partir des surfaces d'eau libre ou du sol, des mauvaises herbes ou autres plantes non productives
- évaporation des mauvaises herbes	- flux vers les zones basses	- flux vers les zones basses
- flux verticaux et latéraux vers des zones salées	- eau rendue impropre à un autre usage à cause de la dégradation de sa qualité	- eau rendue impropre à un autre usage à cause de la dégradation de sa qualité
- flux vers les zones basses (colatures)		
- eau rendue impropre à un autre usage à cause de la dégradation de sa qualité		
Sorties		
- percolations profondes	- apports réservés pour la pisciculture ou l'environnement dans le périmètre	- apports réservés pour la pisciculture ou l'environnement dans le périmètre
- ruissellement sortant	- débits réservés pour l'aval du périmètre	- débits réservés pour l'aval du périmètre
	- les usages associés au service de l'irrigation	- sorties réservées pour l'environnement
	- volumes non mobilisés	- volumes non mobilisés

Tableau 1 : inventaire des composantes du water accounting à différentes échelles. Molden (1997)

¹ L'évapotranspiration des plantes peut être considérée comme consommation productive quand il est impossible de séparer le terme transpiration de celui d'évaporation

1.2 Classification "eau bleue – eau verte"

Dans les bilans précédents, les apports sont envisagés dans leur globalité et les calculs de productivité sont faits à travers les usages qui en sont faits.

Une autre approche consiste à s'intéresser à la ressource liée à la pluie et à analyser son usage.

Dans un bilan hydrologique traditionnel, à l'échelle du bassin versant, l'eau qui est stockée dans les sols et alimente l'évapotranspiration est considérée comme une perte. Or d'un point de vue économique et en agriculture pluviale, c'est cette eau qui assure le revenu des agriculteurs grâce à la production agricole induite.

De même, en agriculture irriguée, elle participe à l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation (volume d'eau d'irrigation consommé par rapport à la production agricole) en diminuant les doses nécessaires à l'alimentation des cultures. Les volumes en jeu sont souvent considérables et des calculs simples montrent que les volumes stockables dans les sols d'un bassin versant aménagé peuvent être très largement supérieurs à ceux stockables dans un barrage.

Falkenmark (1995) propose, comme outil d'analyse de répartition de l'eau aux échelles locales, régionales ou globales, de faire la distinction entre "eau bleue" et "eau verte". L'eau "bleue" est produite par l'ensemble des volumes ruisselés et des volumes de recharge de nappe. L'eau "verte" est l'ensemble des volumes qui repartent vers l'atmosphère, après stockage ou non dans le sol, par évapotranspiration avec une part productive de transpiration et une part improductive d'évaporation directe à partir du sol, des lacs ou de l'interception par la canopée (Rocktröm, 1997)

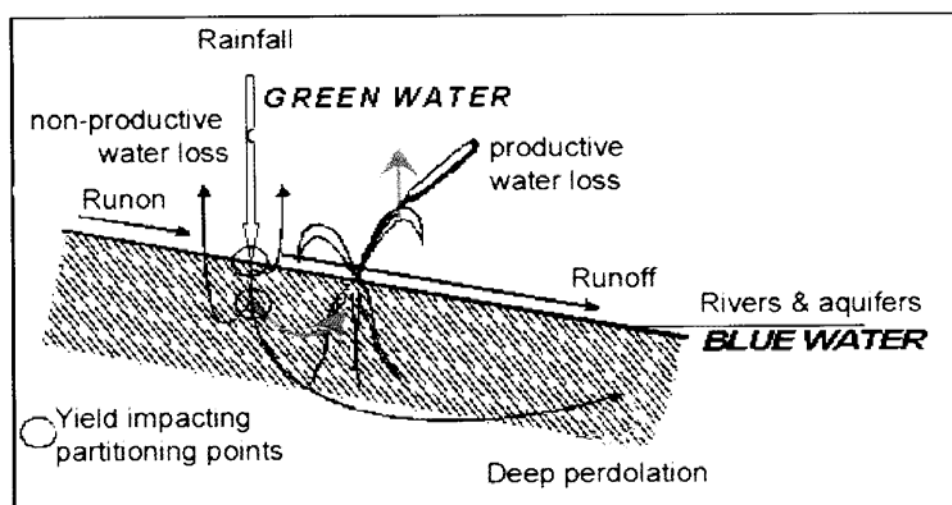


Figure 3 : partition "eau bleue" – "eau verte". Falkenmark (2001)

Pour faire le calcul, on réalise le bilan de flux en deux points:

un point en surface qui permet d'identifier la part d'eau bleue liée au ruissellement et la part d'eau verte ayant pour origine l'évaporation de l'eau libre de surface,

un point en profondeur au niveau duquel on va partager l'infiltration de surface en eau verte (consommation des plantes et évaporation par le sol) et en eau bleue (drainage de réalimentation des nappes).

2 Outils retenus pour le « water accounting »

2.1 Contexte du Merguellil

Les outils retenus devaient être adaptés aux oppositions qui existent sur le bassin du Merguellil entre la zone amont qui couvre une surface de 1173 km² et qui se termine au barrage El Haouareb et la zone de la plaine de Kairouan sous influence de l'oued Merguellil d'une surface de 273 km².

Sur la zone amont, les agriculteurs pratiquent majoritairement une agriculture en sec et l'espace est occupé par les terres cultivées, les parcours et de la forêt. Les cultures irriguées sont présentes sur quelques îlots bien délimités et liés à une ressource en eau mobilisable localement. Trois nappes importantes sont exploitées pour l'eau potable qui est exportée hors du bassin versant.

Sur la zone aval, l'agriculture irriguée est très présente et la ressource en eau est prioritairement la nappe sauf pour le grand périmètre d'El Haouareb alimenté à partir de la retenue ou des pompages dans les émergences (fuites naturelles sous le barrage).

Les outils retenus vont permettre de travailler à deux échelles :

celle de la parcelle au niveau de laquelle on étudiera la productivité de l'eau et le bilan « eau bleue – eau verte » pour les différentes spéculations rencontrées,

celle de la zone pour laquelle on analysera les informations utilisables pour agréger les parcelles et faire le bilan de la zone.

2.2 Outils adaptés à l'échelle parcellaire

Le travail doit conduire à un bilan hydrique le plus pertinent possible en fonction des informations disponibles.

A cette échelle, les données disponibles sont issues d'enquêtes auprès des agriculteurs, de synthèses faites par l'administration, de modélisations sur de petits périmètres irrigués.

Elles conduisent à trois constats :

- Le premier est la diversité des spéculations, particulièrement en plaine, même si cinq d'entre elles dominent : piment, melon, pastèque, céréales et oliviers,
- La seconde est l'importance des cultures en association ; arboriculture - maraîchage, arboriculture - céréaliculture, maraîchage - maraîchage qui permet aux agriculteurs de limiter l'impact des aléas climatiques et aussi d'assurer des revenus les premières années de l'implantation de l'oliveraie.
- Le troisième est la coexistence d'une agriculture en sec et d'une agriculture en irrigué.

C'est pourquoi, seule une approche par modélisation généralisable à l'ensemble de la zone et validée par les données d'enquêtes a semblé opérationnelle.

Le concept de base utilisé est celui du bilan hydrique du sol qui s'écrit classiquement :

$$\Delta S = P + I - ET \pm R \pm D$$

ΔS = variation de stock, P = pluie, I = irrigation, ET = évapotranspiration, R = ruissellement, D = drainage

Dans notre cas, on va proposer deux modes de simulation différentes de ce bilan hydrique pour l'adapter aux cultures en sec et en irrigué.

Pour les cultures irriguées, on constate que les agriculteurs tentent de limiter au maximum le stress hydrique. La modélisation sera basée sur l'hypothèse que la culture est conduite à l'ETM et donc sans introduction de stress hydrique. Les besoins d'irrigation seront calculés pour maintenir le sol à l'intérieur de la réserve facilement utilisable.

Pour les cultures en sec et particulièrement les céréales, les cultures sont soumises aux aléas climatiques et la pluviométrie va déterminer les conditions de satisfaction des besoins en eau. Pour simuler ce phénomène, on utilisera le taux de remplissage du réservoir sol en fin de décade n pour déterminer l'évapotranspiration réelle de la culture pendant la décade n + 1. On considérera aussi que la réserve en eau du sol en début de cycle cultural est celle correspondant au point de flétrissement permanent.

2.2.1 Détermination de la productivité de l'eau

2.2.1.1 Cultures irriguées

La modélisation retenue doit pouvoir fournir les volumes consommés, les volumes stockés en fin de cycle mais aussi ceux qui transitent par le réservoir sol sans pouvoir être stockés. Elle doit aussi être adaptée aux successions culturales et aux cultures en association.

L'option retenue est de travailler sur l'ensemble d'une saison agricole de septembre à septembre

On a choisi la méthode utilisée par la technique du « bilaneaumètre » développée par Peyremorte (1986) et d'actualité puisque mise en œuvre dans le projet « Anticipation et pilotage de l'irrigation » de l'action transversale INRA-CIRAD « Aide à la décision ».

Dans cette méthode, on utilise trois concepts :

- le premier, appelé "**Demande**" (**De**) représente les besoins en eau cumulés en fonction du temps. Il fournit donc, à tout instant, le volume d'eau total prélevé par une plante supposée alimentée à l'ETM, dans le réservoir sol,
- le second, appelé "**offre réelle**" (**Ofr**) fournit le volume total cumulé mis à disposition de la plante par ce réservoir. Il est obtenu par cumul de la réserve en eau du sol en début de cycle, des pluies et des irrigations stockées, des remontées capillaires et des ruissellements externes reçus. Pour une alimentation de la culture à l' ETM, ce volume doit toujours être supérieur à celui de la demande. Par contre, toute valeur d'offre, à un instant donné, inférieure à la demande traduit l'apparition d'un stress hydrique,
- le troisième, appelé "**offre maximale**" (**Ofm**), est la limite supérieure que ne peut dépasser l' "offre réelle". Elle se calcule à chaque pas de temps en considérant que le volume stockable dans le sol ne peut être supérieur à la RFU. L'"offre maximale" est donc représentable par une courbe translatée de la courbe "demande" de la valeur de la RFU.

En gestion optimale, la courbe représentant l' "**offre réelle**" doit toujours être à l'intérieur du domaine limité par les courbes "Demande" et "Offre maximale".

Tout apport de pluie ou d'irrigation qui, à un pas de temps donné, fait passer l'offre réelle au dessus de l'offre maximale générera du **drainage (D)** et seul sera comptabilisé dans l'"offre réelle" le volume effectivement stockable dans le sol.

Si on retient un pas de temps décadaire, on va écrire pour chaque fin de décade :

- $De(d1) = ETM (d1)$
- $De(dn) = De(dn-1) + ETM (dn)$

- $Ofm(dn) = De(dn) + RFU$
- $Ofr(d1)$ = Réserve réellement disponible dans le sol en début de cycle
- $Ofr(d1)_{max} = RFU(d1)$
- $Ofr(dn) = Ofr(dn-1) + P(dn) + I(dn)$
 - o avec $I(dn)$ = dose d'irrigation de la décade n
 - o $P(dn)$ = pluie de la décade n
- si $Ofr(dn) > Ofm(dn)$, on écrit $Ofr(dn) = Ofm(dn)$ et $D = Ofr(dn) - Ofm(dn)$
- si $Ofr(dn) < Ofm(dn)$, on écrit $Ofr(dn) = Ofr(dn)$

La figure 4 ci-dessous donne une représentation de gestion des irrigations sur blé d'hiver en utilisant les données d'ETP et de pluie moyennes à Chébika. Ces valeurs ont été choisies pour illustrer le fonctionnement du modèle.

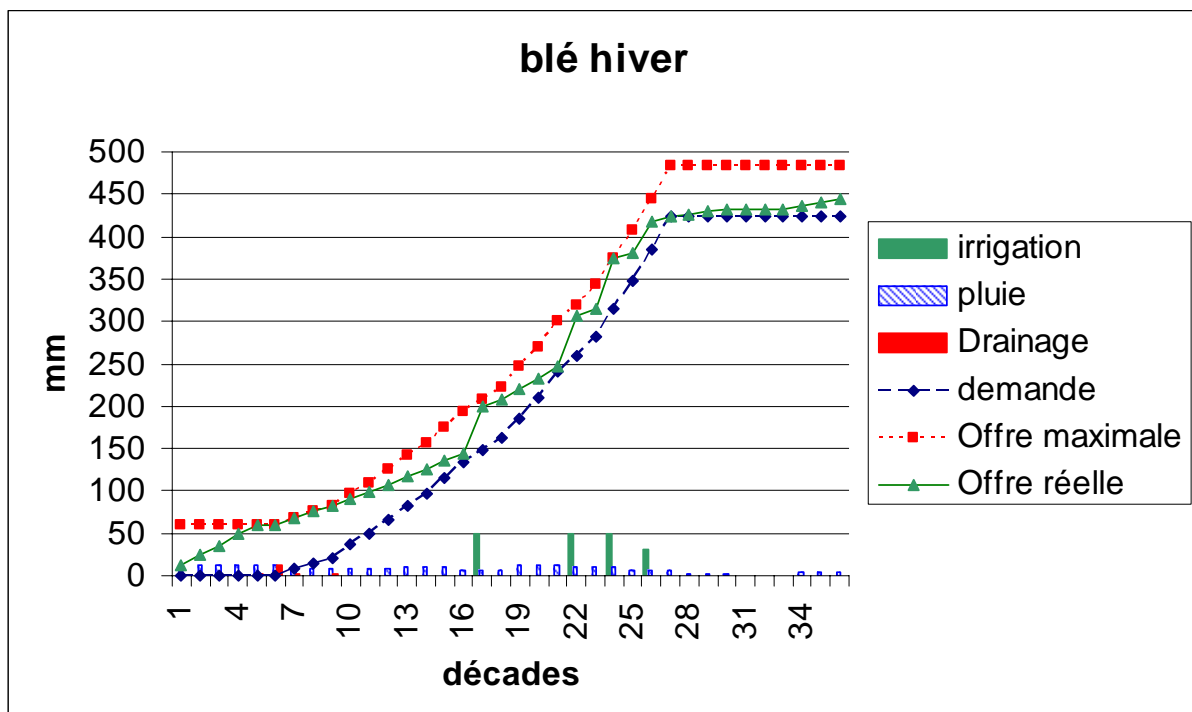


Figure : 4 – Exemple de gestion des irrigations

La décade 1 est la première décade de septembre et la RFU retenue est de 60 mm.

Avec l'année théorique (somme des moyennes mensuelles), on constate que les pluies d'automne rechargent le sol en eau et qu'elles ont même été supérieures à la capacité de stockage puisque un drainage apparaît à la décades 6.

Par contre, à partir de la décade 17, l'offre réelle rejoint la demande et 4 apports d'irrigation sont nécessaires pour couvrir l'intégralité des besoins puisqu'en fin de cycle végétatif (décade 29), la courbe d'offre réelle et la courbe de demande ont la même valeur. Des pluies de juillet et Août rechargent légèrement le sol. Dans cet exemple, les apports sont considérés égaux aux besoins puisque l'efficacité du système d'irrigation n'est pas prise en compte.

Les données de bilan s'établissent telles que dans le tableau 2 ci-après:

Pluie totale en mm	282
Besoins d'irrigation en mm	180
apport net en mm	441
apport brut en mm	462
Consommation productive en mm	423
Return flow	18
taux consommation brut	0,92
taux consommation net	0,96
production de blé*en kg/ha	3500
productivité nette en kg/m ³	0,79
productivité /besoin d'irrigation en kg/m ³	1,94
Irrigation déclarée par les agriculteurs** en mm	150

*production moyenne de la zone (CTV Chébika), **enquêtes Feuillette (2001)

Tableau 2 : exemple de bilan sur blé irrigué en année humide à Chébika

Dans lequel on a :

- La pluie totale en mm est la somme des pluies décadaires,
- Le besoin d'irrigation en mm est la somme des apports (limités à 50 mm). Le modèle fixant la date de l'apport lorsque la courbe « offre réelle » rejoint celle de la demande, à cette date, ces doses sont intégralement stockables et ne génèrent aucun drainage,
- L'apport brut est la somme de la pluie et du besoin en irrigation affecté de l'efficacité de la technique d'irrigation pour les calculs à l'échelle parcellaire et de celle de l'ensemble réseau et parcelle pour les calculs au niveau du périmètre irrigué, (ici on a pris la valeur de 1),
- L'apport net est l'apport brut diminué du stock du sol fin Août donc le volume final apporté,
- La consommation productive est la somme des ETM décadaires,
- Le « return flow » est la différence entre l'apport net et la consommation productive. Elle représente la partie de l'eau qui sort et est perdue par drainage (superficiel ou profond) dont l'origine est la pluie mais aussi l'irrigation (défaut d'efficacité),
- Le taux de consommation brut est le rapport entre la consommation productive et l'apport brut,
- Le taux de consommation net est le rapport entre la consommation productive et l'apport net,
- La production de blé est le rendement moyen de la zone,
- La productivité nette est le rapport entre le rendement moyen et l'apport net,
- La productivité par rapport à l'eau d'irrigation est le rendement moyen divisé par l'apport d'irrigation,
- L'irrigation déclarée est le résultat des enquêtes.

Dans l'utilisation que nous avons fait de modèle, on a fait des simplifications volontaires qui consistent à ne considérer, pour le sol, qu'un seul réservoir de taille constante c'est-à-dire sans prendre en compte la croissance racinaire ainsi qu'un tarissement en fin de cycle.

Dans l'exemple traité, nous avons montré son utilisation uniquement sur la période végétative du blé. Par contre dans la pratique, son utilisation se fera sur l'ensemble d'une année de culture c'est-à-dire de septembre à septembre et au pas de temps journalier.

Ce choix va permettre de simuler le fonctionnement de parcelles occupées par des cultures associées mais aussi de mieux appréhender l'efficacité de la pluie. En effet des épisodes très pluvieux apportent des volumes qui sont soit supérieurs au volume consommable (épisode pluvieux en absence de végétation) soit aux capacités de stockage des sols. Dans ce cas l'excédent est drainé hors de la zone racinaire.

2.2.1.2 Cultures en sec

Les deux spéculations les plus représentées sont l'olivier et les céréales.

Pour l'olivier, SNANE MH. *et All* (1991) propose un modèle, au pas de temps annuel, de relation pluie – production pour la région du sahel tunisien:

$$R_t = 0,296 + 0,144 P$$

où R_t est le rendement en kg par arbre de l'année n et P la pluviométrie de l'année $(n-1)$. L'application de cette formule montre que pour obtenir une production moyenne annuelle de 60 kg/arbre (valeur moyenne du Sahel tunisien), il faut que la pluviométrie de l'année climatique précédente ait été de 412 mm. Ceci est lié au comportement physiologique de l'arbre.

Faisant la distinction entre les cuvettes où sont implantées les arbres et les impluviums (zone de collecte), ils proposent une équation de bilan hydrique journalière pour ces derniers tenant compte de la teneur en eau du sol.

$$ETR_i = (0,838 S_i / S_{cr} - 0,055) ETP_i \quad (\text{en mm/jour})$$

Dans laquelle S_i est le stock d'eau du sol et S_{cr} le stock à la capacité de rétention.

L'intérêt de cette équation est de fournir une donnée d'évaporation locale pour les sols nus puisque dans le système tunisien de la « tabia », la zone de collecte est maintenue en permanence sans végétation.

Si on nomme le rapport S_i / S_{cr} : HR = humidité relative du sol, on obtient pour différentes valeurs de ce rapport, la figure 5 suivante :

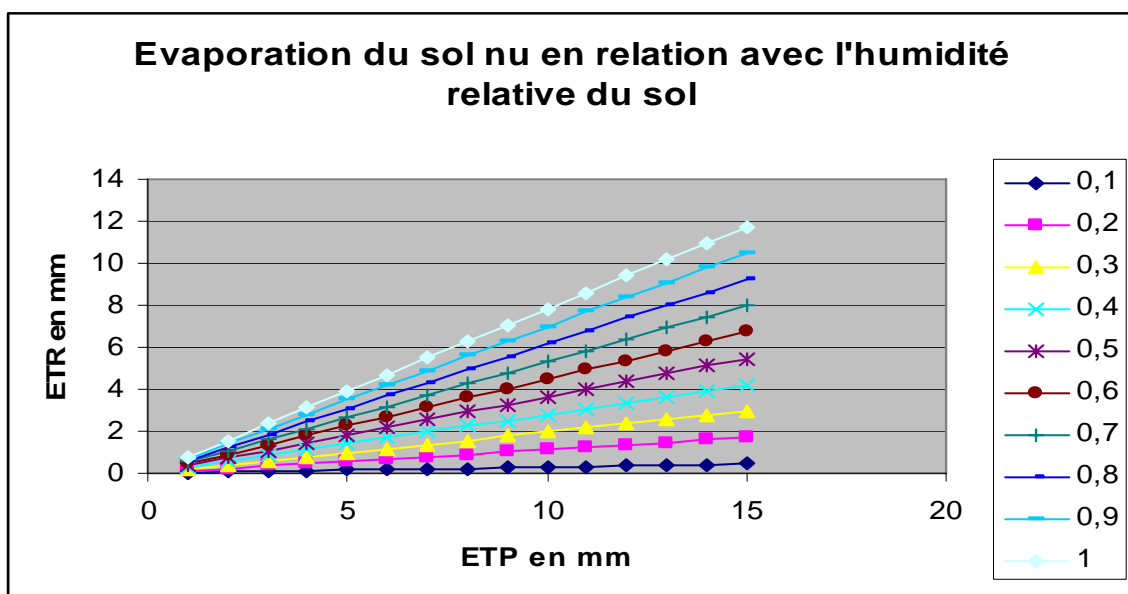


Figure 5 : Evaporation journalière du sol nu en relation avec l'humidité relative du sol

On constate que même avec des ETP fortes, un sol sec n'évapore pratiquement pas avec des valeurs qui peuvent descendre à 0,2 mm/jour

Pour les **céréales**, la modélisation retenue propose d'utiliser des données FAO associées à des travaux du CIRAD.

Doorenbos et al. (bulletin FAO n° 33) montrent que la réponse du rendement à l'apport d'eau peut se chiffrer au moyen d'un coefficient k_r qui lie la baisse de rendement relatif $(1 - R_d_r / R_d_m)$ au déficit d'évapotranspiration relative $(1 - ETR / ETM)$.

$$k_r = (1 - R_d_r / R_d_m) / (1 - ETR / ETM)$$

Il donne des valeurs de k_r pour différentes cultures et nous proposons de ne retenir que celle correspondant à l'ensemble de la période végétative:

Culture	Valeur de k_r
Blé d'hiver	1.0
Blé de printemps	1.15

Pour le rendement à l'ETM, nous proposons de prendre le rendement moyen en système irrigué de la zone soit 35 quintaux par hectare (donnée CTV Chébika)

Pour estimer l'ETR, EAGLEMAN (1971) propose une régression polynomiale prenant en compte la disponibilité en eau du sol via le coefficient d'humidité relative tel que défini plus haut. La fonction s'écrit:

$$ETR_J = 0,732 - 0,050 ETM_J + (4,97 ETM_J - 0,661 ETM_J^2) HR - (8,57 ETM_J - 1,56 ETM_J^2) HR^2 + (4,35 ETM_J - 0,880 ETM_J^2) HR^3$$

ETM_J et ETR_J sont les évapotranspirations maximales et réelles journalières.

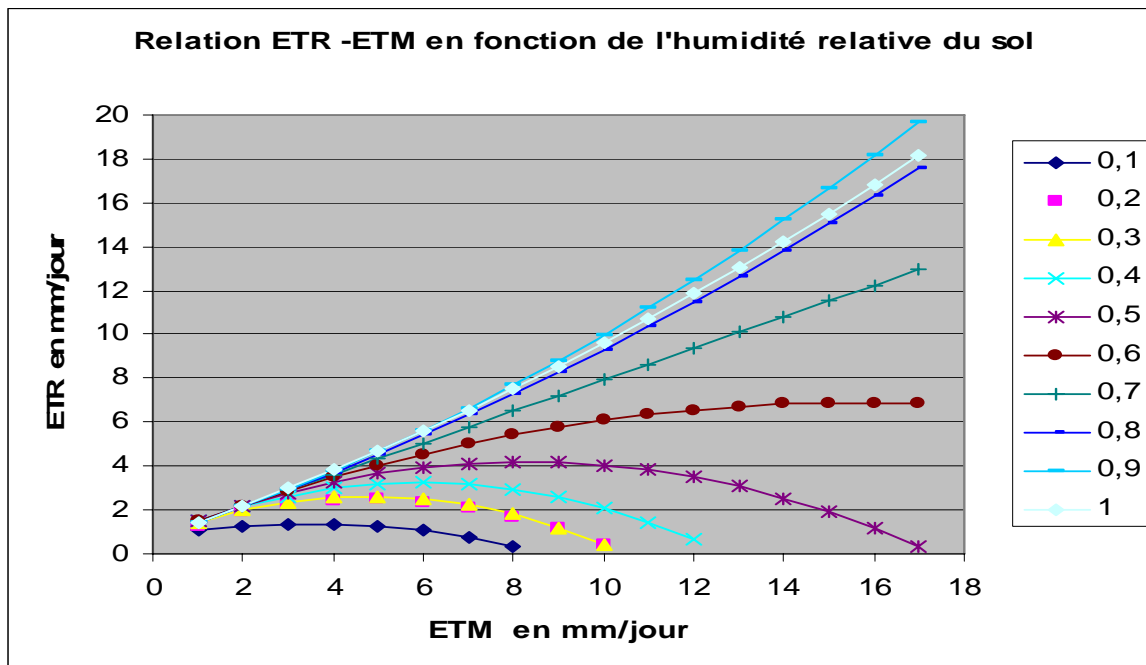


Figure 6 : relation ETR-ETM en fonction de l'humidité relative du sol Eagleman (1971)

Le bilan hydrique sera construit en utilisant l'équation suivante :

$$S_i = S_{(i-1)} + P - ETR_i$$

$$HR_i = S_{i-1} / S_{CR}$$

S est le stock en eau du sol. Dans le processus de calcul on considérera qu'il ne peut être supérieur à S_{CR} (stock à la capacité de rétention).

Si S_i devient supérieur à S_{CR} , on calcule un drainage égal à $S_i - S_{CR}$

Pour faire tourner le modèle, il faut prendre une hypothèse de stock initial. Dans la pratique on considérera que le sol est au point de flétrissement permanent fin Août.

Pour le calcul de l'ETR dans le modèle annuel, on appliquera la formule de sol nu hors période de culture et la formule d'EAGLEMAN en période de culture ceci parce que si on prend $ETM = 0$ dans cette dernière formule, on obtient une ETR minimum de 0,732 mm/jour soit 267 mm/an ce qui ne correspond pas à la réalité puisque supérieure à la pluviométrie d'une année sèche.

2.2.2 Calcul du bilan : Eau bleue – eau verte

Si on veut faire le bilan "eau bleue – eau verte", on est obligé d'introduire les notions d'eau bleue "prélevée", "consommée" et "produite".

Dans tous les cas, la pluie fournit l'intégralité de l'eau verte consommée mais les ruissellements et les drainages en période excédentaire participent à la production d'eau bleue.

$$- \text{ Eau verte consommée} = \text{ pluie} - \text{ partie drainée}$$

Cette eau verte consommée est donc la partie efficace de la pluie.

2.2.2.1 Cultures irriguées

Dans ce système, l'eau d'irrigation est une consommation d'eau bleue (stockée dans les barrages et les nappes) mais aussi une production de ce type d'eau à travers les pertes par colatures et par drainage. On a donc une production d'eau bleue qui a deux origines : la pluie et l'irrigation lorsque les capacités de stockage du sol sont inférieures aux apports.

Avec les options choisies précédemment, dans lequel les besoins d'irrigation ont été calculés avec des doses intégralement stockables, on écrira:

$$- \text{ Eau bleue consommée} = \text{ besoins d'irrigation}$$

$$- \text{ Eau bleue prélevée} = \text{ Apports d'irrigation} = \text{ besoins d'irrigation} / \text{ efficacité de l'irrigation} \times 100$$

Comme dans le cas du calcul de l'apport brut, on retiendra l'efficacité de la technique d'irrigation pour les calculs à l'échelle parcellaire et de celle de l'ensemble réseau et parcelle pour les calculs au niveau du périmètre irrigué.

Pour la production d'eau bleue, elle pourrait être scindée en deux fractions, celle qui ruisselle pour rejoindre les colatures et celle qui draine pour rejoindre la nappe.

Dans notre cas, l'irrigation est gravitaire est pratiquée par bassins dans lesquels toute l'eau apportée est infiltrée. Il en résulte l'absence totale de colatures ou de fossés de drainage.

Pour l'aspersion, les surfaces sont planes et donc les ruissellements inexistantes. De plus, les agriculteurs pratiquent systématiquement, juste après les récoltes, des labours superficiels destinés à bloquer l'évaporation et favoriser l'infiltration des pluies.

Dans ces conditions et en absence de mesure précise, on considérera donc que toute l'eau bleue produite s'écoule verticalement et rejoint la nappe.

$$- \text{ Eau bleue produite} = \text{ consommation non productive} = \text{ Apports d'irrigation} - \text{ Eau bleue consommée} = \text{ Apports d'irrigation} (1 - \text{ efficacité du système d'irrigation}/100)$$

De même avec ces calculs, on considère que toute la pluie est infiltrée ce qui se justifie par la très faible pente de la plaine.

2.2.2.2 Cultures en sec

Le système est plus complexe car les simplifications d'absence de ruissellement faites précédemment sont plus difficilement justifiables.

On rencontre deux situations qui opposent les surfaces aménagées en banquettes et celles qui ne le sont pas.

Sur les surfaces aménagées en banquettes, on a des systèmes qui sont à rétention totale d'eau pour lesquelles le ruissellement est nul (Dridi, 2000).

Dans ce cas on appliquera le même calcul que pour les cultures irriguées et on aura :

- *Eau verte = pluie – drainage vers la nappe*
- *Eau bleue produite = drainage vers la nappe*

Pour les surfaces non aménagées, cette hypothèse d'absence de ruissellement ne peut être utilisée et on écrira donc :

- *Eau verte = pluie – drainage vers la nappe - ruissellement*
- *Eau bleue produite = drainage vers la nappe + ruissellement*

2.3 Méthodologie du changement d'échelle : de la parcelle à la zone

Passer des informations obtenues au niveau de la parcelle à celle de la zone nécessite le développement d'une méthode d'agrégation adaptée.

Elle va être fonction des informations disponibles dont les origines sont :

- un système d'informations géographiques regroupant des données administratives et des données physiques sur l'ensemble de la zone d'étude,
- des données d'enquêtes réalisées à l'occasion de différents travaux de recherche. Leur champ d'application est fonction du travail réalisé et donc de l'échelle d'approche retenue,
- des données officielles publiées par les services de l'Etat organisés comme suit :

Structure du Ministère de l'Intérieur	Structure du Ministère de l'Agriculture
Gouvernorat	CRDA Commissariat régional au Développement Agricole
Délégation	CTV Centre Technique de Vulgarisation
Secteur	CRA Cellule de Rayonnement Agricole

Le CRDA fournit les informations globales au niveau du Gouvernorat, Les CTV sont les représentations locales du CRDA dans chaque délégation. Ils suivent les productions agricoles de la délégation.

Dans notre cas, le bassin du Merguellil est situé sur deux gouvernorats : Kairouan et Siliana. Un grand nombre de secteurs ont une partie dans le bassin et l'autre hors bassin. Enfin deux secteurs sont à cheval sur la partie amont et sur la partie aval du bassin.

Dans cette situation, l'utilisation directe des informations n'est pas possible à cause de l'inéadéquation entre les limites des surfaces renseignées et celles de la zone d'étude. La solution retenue va consister à traiter indépendamment les zones amont et aval du barrage.

Pour chacune des deux zones, on va faire une analyse approfondie des données disponibles et des unités (délégation ou secteur) sur laquelle elles s'appliquent. Ce travail va nous fournir des indicateurs chiffrés et hiérarchisés par unité. On fera ensuite l'hypothèse que ces unités sont homogènes.

En extrayant du SIG la surface totale de l'unité et celle de la partie incluse dans la zone d'étude, on reconstituera les emblavements de la zone d'étude au prorata des surfaces incluses dans la zone d'étude. Le résultat de ce travail va donc être un bilan des surfaces cultivées à l'amont et à l'aval.

L'application des bilans parcellaires à ce bilan de surfaces permettra de proposer un bilan pour la zone.

3 Application à la zone de la plaine de Kairouan

La plaine de Kairouan est une zone d'effondrement limitée à l'ouest par une faille au niveau de laquelle est installé le barrage El Haouareb. Elle a été comblée par les sédiments déposés par l'oued et sa surface penche lentement vers l'est. Elle possède une nappe dont la profondeur diminue avec l'abaissement du niveau du sol.

Cette plaine est une vaste zone agricole sur laquelle les cultures observées peuvent être séparées en trois ensembles: cultures d'hiver, maraîchage et arboriculture.

1. Les cultures d'hiver de la zone sont les céréales (blé dur, blé tendre, sorgho, avoine et orge), la pomme de terre, l'oignon et les légumineuses (petits pois, fève).

Les années sèches, l'orge, l'avoine et le blé tendre qui sont des cultures à faible revenu brut, sont abandonnés et donnés telles quelles en pâture au bétail. Les fèves, les oignons et le blé dur (plus intéressantes financièrement) sont irrigués seulement en fin de saison ou tout au long du cycle de croissance.

2. Les cultures maraîchères présentes dans la zone sont surtout le piment (le gouvernorat de Kairouan est le premier producteur de piment en Tunisie, avec 5000 ha emblavés chaque année), la pastèque (3000 ha pour l'ensemble du gouvernorat), le melon et la tomate. Ces cultures sont conduites en plein champ et irriguées. Les autres (concombre, courge, carotte, navet, ...) sont très secondaires et souvent destinées à l'autoconsommation. Bien qu'aussi irriguées, elles ne pourront être prises en compte dans le bilan faute de données.

3. L'arboriculture est représentée par les oliviers (en culture mono spécifique ou associé au maraîchage) et des espèces "introduites" (pommiers, abricotiers et pêchers). Pour ces cultures, l'irrigation est systématiquement pratiquée.

3.1 Données pédo-climatiques

Les données nécessaires sont celles de pluie et d'ETP, de la réserve utile des sols et des coefficients culturaux.

3.1.1 Pluies

Une des caractéristiques du climat semi-aride est la variabilité inter-annuelle des pluies. Faire un bilan ne peut être réalisé sans prendre en compte cette variabilité. C'est pourquoi par la suite, nous comparerons ceux de trois types d'années : moyenne, sèche et humide.

La première étape est de rechercher trois années représentatives de ces situations.

Pour ce faire, on a utilisé une série d'enregistrement de 1977 à 2004 pour la station située à Chébika (village central de la zone d'étude).

Les données annuelles ont été redistribuées en données de campagne agricole soit septembre année n à août année n +1 afin de prendre en compte la réalité des pratiques des agriculteurs.

Si on considère que l'année sèche correspond au 1^{er} quintile et l'année humide au dernier, on obtient avec comme campagnes les plus proches (tableau 3):

	Probabilité	Pluviométrie en mm	Pluviométrie annuelle les plus proches en mm
Année sèche	0,2	173	180 (77/78) et 172 (81/82)
Année moyenne	0,5	278	300 (82/83) et 305 (92/93)
Année humide	0,8	360	365 (84/85) et 340 (02/03)

Tableau 3 : comparaison des pluviométries

On a ensuite comparé les répartitions au sein des années de même pluviométrie et les graphiques sont présentés en annexe. Il apparaît que pour les années sèches, les répartitions sont pratiquement identiques et on a choisi la campagne 1977/1978 pour faire les calculs.

Par contre, aussi bien pour les années moyennes que humides, on a dans les deux cas une des deux années qui présentent un épisode pluvieux très important et qui fait plus de 50 mm voir 80 pour la campagne 1992/1993. On a donc décidé de ne pas retenir ces années et de faire les calculs avec celles qui avaient une répartition plus uniforme soit 1982/83 pour les années moyennes et 1984/85 pour les années humides. Ce choix conduit à la figure de comparaison ci-dessous :

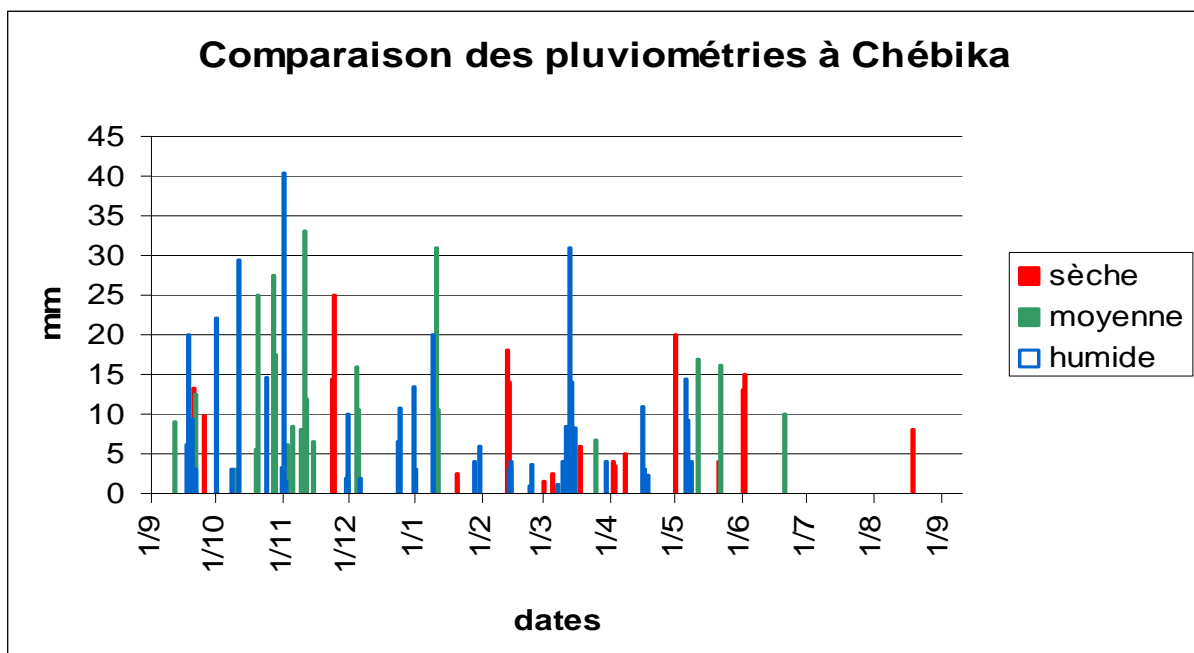


Figure 7 : comparaison des pluviométries à Chébika

On distingue bien sur la figure 7 que l'année moyenne, qui a été retenue, présente des maxima de pluie à trois périodes : octobre, janvier et mai, l'année sèche se caractérise par un automne très sec et pour l'année pluvieuse seul le mois de novembre est sec hormis juillet et août que l'on retrouve secs toutes les années.

3.1.2 Evapotranspiration

Pour les données d'évapotranspiration, tous les auteurs s'accordent pour dire que les variations inter-annuelles sont beaucoup plus faibles que celles de la pluie. Nous prendrons donc les mêmes valeurs pour tous les types d'années. Par contre, nous disposons de trois estimations (Lardilleux, 2000) et d'une mesure (Abid-Karray, 2004) qui donnent des résultats sensiblement différents et présentés figure 8.

Ces différences entre valeurs peuvent s'expliquer par les méthodes de calcul mises en œuvre.

Les calculs Cropwat utilisent la base de données du logiciel. Pour la région de Kairouan, le taux d'humidité retenu ne semble pas correct et pourrait expliquer des valeurs d'ETo aussi importantes.

Les calculs faits par Riou sont basés sur une formule empirique utilisant la température maximale moyenne mensuelle et des coefficients fonction de la latitude en Tunisie.

Pour les données FAO, elles ont été calculées par la formule de Penman-Monteith à partir de mesures faites par une station météo automatique installée à Chébika.

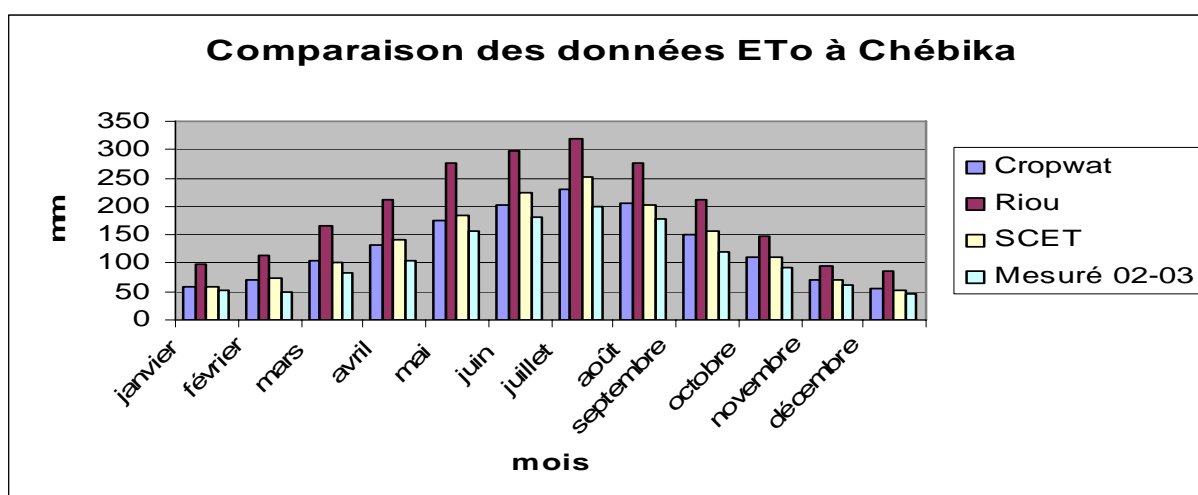


Figure 8 : comparaison des données d'ETo à Chébika selon des méthodes de calcul

Ce sont ces valeurs qui ont été utilisées pour la suite des calculs et qui sont présentées dans le tableau 4 ci-dessous en mm par décade.

septembre			octobre			novembre			décembre			janvier			février		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
42,9	41,5	36,7	31,7	34,1	27,5	20,7	22,8	17,9	15,3	13,6	18,2	16,8	15,4	19,6	19,2	15,7	14,1

mars			avril			mai			juin			juillet			août		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
25,5	25,0	31,9	28,0	32,9	44,5	48,2	52,0	56,7	55,5	60,4	66,4	65,0	63,1	72,4	60,4	55,4	62,5

Tableau 4 : données de ETo retenues pour les simulations de besoins en eau des cultures en plaine

3.1.3 Réserve en eau des sols de la plaine

Les données pédologiques disponibles pour la plaine de Kairouan sont rassemblées dans deux cartes : la carte d'aptitudes à l'irrigation, réalisée en 1957, qui définit 10 classes, depuis celle ne présentant aucune contrainte jusqu'à celle impropre à l'irrigation pour des problèmes

physiques (matériaux) ou chimiques (sols salins) et la carte pédologique (1/100000) de 1983 faite par Barbery (1983) qui identifie 20 unités de sol différentes sur la zone d'étude.

Par contre, aucune information n'est disponible quant à la réserve utile de ces sols alluviaux dont la texture dépend de la vitesse de l'eau au moment de leur dépôt par l'oued en crue.

Ceci a justifié un travail de spatialisation de la réserve utile des sols de la plaine de Kairouan qui a été réalisé par Bourguignon (2003) et dont le résumé est présenté en annexe 1.

Dans ce travail, on a redéfini le réservoir utilisable maximal (RUM), pour une profondeur de sol donnée, qui est fonction de la teneur en eau à la capacité au champ et de la teneur en eau au point de flétrissement permanent. Ces teneurs en eau dépendent notamment de différentes caractéristiques du sol : pourcentage de particules fines, capacité d'échange cationique et densité apparente.

Les teneurs en eau étant difficiles à mesurer, on a utilisé les fonctions de pédotransfert pour les estimer. Ces FPT sont des relations statistiques qui sont calculées par régression linéaire multiple entre le pourcentage de particules fines, la capacité d'échange cationique et la densité apparente d'une part et la teneur en eau au potentiel de pression souhaité (pF 2,5 pour la capacité au champ ; pF 4,2 pour le point de flétrissement permanent) d'autre part.

Le pourcentage de particules fines sur les échantillons de calage des FPT a été mesuré par granulométrie « sédimentation » et par « granulométrie laser ». Après comparaison des FPT issues des résultats des deux méthodes, une amélioration a été constatée avec l'utilisation des mesures du granulomètre laser.

La géostatistique a permis l'analyse de la variabilité spatiale des caractéristiques explicatives (tailles de particules et CEC). L'analyse des variogrammes a été utilisée pour modéliser la variance de chaque variable explicative utilisée pour l'établissement des FPT. Cette modélisation a servi de base à l'interpolation par krigeage.

Vu les temps impartis, seuls l'horizon 0-20 cm a été traité à ce jour.

Les RUM obtenues varient de 60 à 150 mm pour 1 m de sol ce qui est cohérent avec les types de matériaux rencontrés dans la plaine.

3.2 Coefficients culturaux

Le tableau 5 ci-dessous donne les coefficients culturaux des principales cultures.

	cultures d'été			cultures d'hiver			Cultures pérennes	
	melon de saison	tomate	piment d'été	fève	pomme de terre	blé d'hiver	olivier	arboriculture
septembre			0,9	0,35			0,6	0,95
octobre				0,7			0,6	0,9
novembre				1,01		0,35	0	0,75
décembre				0,9		0,65	0	0
janvier					0,45	0,95	0	0
février					0,75	0,95	0	0
mars	0,45	0,45			1,15	0,95	0,5	0,5
avril	0,75	0,75			1,15	0,7	0	0,8
mai	1	1,15			0,85	0,35	0	1
juin	1	1,15	0,35				0,5	1,05
juillet	0,75	0,8	0,65				0,6	1,05
août			1				0,6	1

Tableau 5 : valeurs de coefficients culturaux Feuillette (2001)

Bien que les dates de début de cycle soient ici des dates moyennes, on remarque bien la diversité des périodes de demande en eau au niveau de la zone.

De plus, certains agriculteurs décalent ces cycles en particulier pour le melon qui peut être mis en place à partir de janvier permettant de le faire suivre sur la même parcelle par une culture de piment.

Les coefficients nuls pour les oliviers et l'arboriculture correspondent aux décades pour lesquelles les agriculteurs ne pratiquent pas d'irrigation.

Les calculs réalisés sont basés sur les pratiques les plus courantes de la zone.

3.3 Rendements des cultures

Les données ont été fournies par le CTV de Chébika en tonne par ha. Ce sont des valeurs moyennes sur l'ensemble de la délégation.

Années	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Céréales en irrigué										
Blé dur	3	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,5	3,5
Blé tendre	3	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5
Orge	2,5	2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0	3,0
Céréales en sec										
Blé dur	0,5	0,3	1,2	0,8	0,3	1,2	0,3	0,3	0,2	1,2
Blé tendre	0,4	0,3	1,2	0,7	0,3	1,2	0,3	0,3	0,3	1,2
Orge	0,3	0,1	0,1	0,6	0,1	1,2	0,3	0,2	0,2	1,1
Cultures maraîchères d'hiver										
Fèves	6	6,4	6,5	6,9	6,2	10,0	11,0	12,3	13,3	12,0
Petit pois	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	2,1	2,3	2,2
Carotte	15	15,0	15,0	15,0	15,0	20,0	18,8	20,0	20,0	20,0
Navet	15	18,0	15,0	15,0	2,0	20,0	18,8	20,0	21,4	20,0
Oignon	10	11,3	10,9	10,6	11,8	13,2	15,0	14,3	15,0	15,2
Pomme de terre d'arrière saison	12	13,0	13,0	14,0	14,0	15,0	16,0	16,0	17,0	17,5
Cultures maraîchères d'été										
Piment	6	6,0	6,5	7,0	8,0	8,0	8,1	8,9	8,2	8,3
Pastèque	20	20,7	20,5	20,0	20,0	25,0	27,3	30,0	35,0	40,0
Melon	12	14,8	14,2	15,0	16,0	17,0	19,2	20,0	20,8	25,0
Courge	20	20,0	20,0	21,7	20,0	20,0	21,7	20,0	20,0	20,0
Concombre	10	10,0	10,0	10,0	10,0	12,0	10,7	11,3	12,0	12,9
Pomme de terre de saison	14	14,0	14,0	15,0	15,0	18,2	18,0	18,0	20,0	19,0
Tomate de saison	25	25,0	30,0	30,0	30,0	40,0	45,0	45,0	55,0	60,0
Oignon	15	15,9	16,7	17,3	19,4	20,0	20,0	21,0	20,5	2,0
Tomate (Serres)	35	37,5	37,5	39,0	39,0	45,0	45,0	55,0	55,0	56,8
Fourrage d'hiver	2,8	2,6	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1

Tableau 7 : rendements moyens de la délégation de Chébika (CTV Chébika)

Une autre information disponible était l'évolution des rendements sur la délégation de Chébika. L'analyse de la figure 9 montre que les céréales d'hiver en sec ont des rendements très faibles les années sèches et de rendements très moyens en année humide. On prendra donc pour les bilans parcellaires : année moyenne : 800 kg/ha, année sèche : 300 kg/ha, et année humide 1200 kg/ha.

Pour les céréales irriguées, les rendements restent stables de l'ordre de 3500 kg/ha.

Pour les cultures d'été, à forte valeur ajoutée : pastèque, melon, tomate de saison les rendements ont considérablement augmenté et pratiquement doublé depuis 1999. Il faut voir là certainement l'introduction du goutte à goutte.

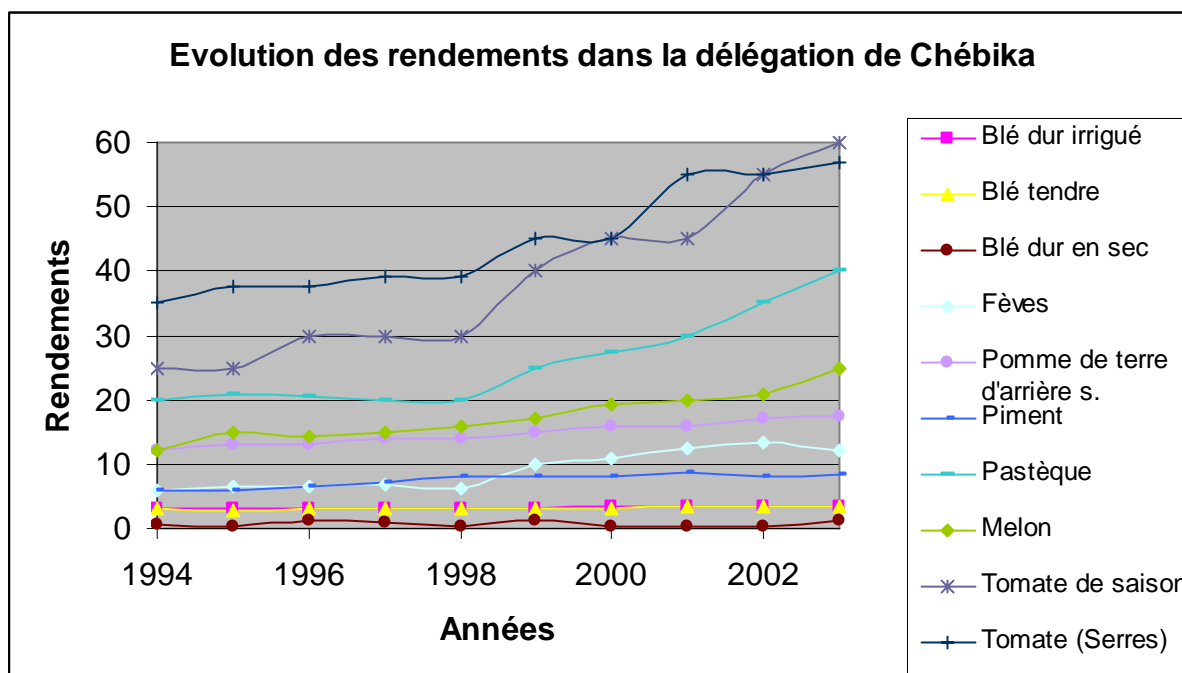


Figure 9 : Evolution des rendements dans la délégation de Chébika (origine CTV Chébika)

Vu ces informations, on prendra pour les calculs les rendements actuels :

Melon	25000 kg/ha
Piment	8300 kg/ha
Tomate	60000 kg/ha
Fève	12000 kg/ha
Pomme de terre	17500 kg/ha
Olivier irrigué	2500 kg/ha
Arboriculture	6000 kg/ha

Tableau 8 : rendements retenus pour les calculs de productivité

Pour les oliviers en irrigué, on considérera que la production maximale de Smane (1991) de 60 kg/arbre est atteinte soit 6000 kg/ha avec une densité de plantation de 100 arbres / ha.

Pour les oliviers en sec et en appliquant sa formule présentée plus haut (2.2.1.2), on arrive avec une densité de plantation de 24 x 24 :

	Campagne	Pluviométrie annuelle en mm	Rendement en kg/ha
Année sèche	1977/78	180	440
Année moyenne	1982/83	301	740
Année humide	1984/85	365	900

Tableau 9 : valeurs des rendements oliviers retenus pour les calculs de productivité

3.4 Bilan de productivité à la parcelle

Ce bilan est fait tel que présenté au 2.2.2.1 en prenant comme données :

- les pluies journalières des campagnes 1977/78, 1982/83, et 1984/85 jugées représentatives respectivement d'une campagne sèche, moyenne et humide,
- les ETo journalières mesurées à la station de Chébika,

- une RFU unique et constante de 60 mm,
- les coefficients culturaux présentés au 3.1.1.4 en augmentant de 20 % le coefficient cultural de la culture la plus exigeante pour les décades où deux cultures sont présentées simultanément,
- une efficacité du système d'irrigation à la parcelle de 65 % (REZIG, 2004),
- les données de rendements sont celles du CTV présentées ci-dessus. Pour l'association « olivier + pastèque de saison », on a considéré que la production de l'olivier était identique à celle de l'olivier seul mais que par contre pour la pastèque on a réduit la production en considérant qu'elle n'occupait que 60 % de la surface de la parcelle. Pour les successions culturales, on a fait la somme des rendements en appliquant une réduction arbitraire de 10 %.

3.4.1 Productivité de l'eau d'irrigation pour différentes cultures

Les simulations obtenues, **pour les cultures irriguées**, figurent dans les tableaux 1, 2, 3, 4 de l'annexe 2.

On constate que la durée du cycle végétatif et sa position dans l'année jouent des rôles prédominants.

La fève qui a un cycle court et se positionne à l'automne a un besoin d'irrigation très faible ce qui va donner une productivité (partielle) de l'eau d'irrigation maximale quelle que soit l'année.

Pour la pomme de terre et le blé, la valeur maximale ne sera atteinte que les années humides.

Le blé qui a un cycle long ne peut être cultivé uniquement en sec pour obtenir des rendements corrects. La productivité ne dépasse pas $1,84 \text{ kg/m}^3$ d'eau d'irrigation.

Pour les cultures d'été, les productivités sont importantes à cause de la masse végétale produite. Elle varie de 5 à 10 kg/m^3 .

Pour les cultures pérennes, les introductions récentes (abricotiers, pêcheurs) ont des productivités faibles par contre l'introduction du maraîchage dans l'olivieraie améliore considérablement les valeurs de l'olivieraie seule.

3.4.2 Influence du climat sur les besoins en eau d'irrigation et la productivité de l'eau

Le climat de la zone est caractérisé par sa variabilité mais aussi par la répartition des pluies qui sont des pluies d'automne et de printemps. En période estivale, la pluviométrie est pratiquement nulle quelle que soit l'année.

On retrouve les conséquences de cette répartition sur les besoins en eau d'irrigation.

L'influence de la pluviométrie sur ces besoins est très faible pour les cultures d'été. En année sèche les besoins n'augmentent que de 5 à 10 % par rapport à une année humide.

Par contre, pour les cultures d'hiver, les choses sont plus complexes et très liées à la période de culture. Pour la fève, qui est une culture d'automne, la différence est faible par contre pour les cultures qui sont présentes au printemps l'écart peut atteindre pratiquement 100 % (blé d'hiver). L'année sèche retenue pour les calculs a eu un printemps très sec nécessitant des apports d'irrigation. Ces volumes restent tout de même relativement faibles.

Pour **les cultures en sec**, l'impact de la pluviométrie sur la productivité apparaît comme ci-après :

Année	Sèche	Moyenne	Humide
Pluie	180	301	365
apport brut	180	301	365
apport net	185	308	343
conso productive	44	96	104
taux consommation brut	0,24	0,32	0,29
taux consommation net	0,24	0,31	0,30
production en kg/ha	300	800	1200
productivité nette kg/m ³	0,16	0,26	0,35

Tableau 10 : bilan pour les céréales en sec

L'apport net est légèrement supérieur à la pluie car dans le calcul on a considéré que la réserve du sol en début de cycle n'était pas nulle.

Pour les oliviers, le besoin pour un rendement maximum est supérieur à la pluviométrie de l'année humide. On fera donc l'hypothèse que toute la pluie est consommée ce qui peut se justifier par le fait que les agriculteurs favorisent au maximum l'infiltration dans les oliveraies. En appliquant la formule de Snane (1999) on obtiendrait :

Année	Sèche	Moyenne	Humide
Pluie	180	301	365
Apport net	185	308	343
Rendement en kg/ha	440	740	900
productivité nette kg/m ³	0.23	0.24	0.26

Tableau 11 : rendements des oliviers en fonction de la pluviométrie

3.5 Bilan eau bleue – eau verte à l'échelle de la parcelle

Sur la base des résultats du paragraphe 3.2.1 et avec les calculs présentés au 2.2.2, on peut faire les calculs dont les résultats sont présentés ci-dessous tableaux 12, 13, 14, 15:

Année	Melon de saison			Tomate			piment d'été		
	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Apports d'irrigation en mm	540	520	480	600	600	540	450	450	450
Eau verte consommée	162	276	306	162	276	306	162	279	306
Eau bleue prélevée: mm	831	800	738	923	923	831	692	692	692
Eau bleue produite : mm	291	287	258	323	330	291	242	247	242
Irrigation déclarée : mm	500	500	500				440	400	280

Tableau 12

Année	Fève			pomme de terre			blé d'hiver		
	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Besoins d'irrigation en mm	160	60	40	350	270	230	330	200	190
Eau verte consommée	162	289	306	162	278	306	162	289	306
Eau bleue prélevée : mm	246	92	62	538	415	354	508	308	292
Eau bleue produite : mm	86	32	22	188	155	124	178	129	102
Irrigation déclarée : mm	280	140	100				170	150	30

Tableau 13

	melon précoce + piment			Maraîchage d'été			blé + piment d'été		
Année	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Besoins d'irrigation en mm	770	700	640	600	600	540	750	660	620
Eau verte consommée	162	289	306	162	289	306	162	278	306
Eau bleue prélevée: mm	1185	1077	985	923	923	831	1154	1015	954
Eau bleue produite : mm	415	377	345	323	323	291	404	355	334
Irrigation déclarée : mm	600	600	350	720	600	600	500	500	400

Tableau 14

	olivier irrigué			Arboriculture			Olivier+pastèque saison		
Année	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Besoins d'irrigation en mm	450	400	300	1000	920	850	800	670	640
Eau verte consommée	162	289	306	162	289	306	162	278	306
Eau bleue prélevée: mm	692	615	462	1538	1415	1308	1231	1031	985
Eau bleue produite : mm	242	215	162	538	496	458	431	366	345
Irrigation déclarée : mm	200	150	135	720	600	600	500	500	400

Tableau 15

Pour coller à la réalité de terrain, les pluies sont celles de la saison culturale c'est-à-dire de septembre à septembre. Ceci permet de comparer le bilan avec une seule culture et celui d'une succession culturale.

Le premier constat est que la consommation d'eau verte change relativement peu car le calcul ne fait pas la distinction entre la consommation de cette eau en présence ou en absence de culture. L'évaporation pendant la période de sol nu est comptabilisée dans le bilan. Cette option de calcul est cohérente avec la méthode retenue pour le changement d'échelle de la parcelle à la zone d'étude.

Le second constat est que pour les cultures d'hiver, l'eau verte participe souvent à hauteur de 60 % dans l'alimentation en eau des cultures et même pour la fève en année humide à hauteur de 88 %.

Cette part descend à 24 % si on ne pratique qu'une culture d'été car une partie de cette eau est perdue par évaporation pendant la période de non culture.

Par contre, l'association des cultures valorise bien cette eau verte puisque que l'on trouve des taux de participation de 30 % et plus pour melon précoce - piment et 28 % en année moyenne pour olivier - pastèque de saison.

On retrouve le même constat pour l'eau bleue produite.

Cette valeur est plus importante en système irrigué qu'en système sec, ce qui est normal car influencée par les pertes par drainage des systèmes irrigués.

Les simulations faites avec une réserve utilisable du sol plus importante font ressortir que les gains obtenus sont moins importants que ceux liés à la présence d'une culture pendant les périodes les plus pluvieuses. La valorisation de l'eau est moins due au type de sol qu'aux pratiques culturales et à l'adéquation entre une demande culturale et la pluie.

Si on regarde les consommations d'eau bleue calculées et les volumes d'irrigation déclarés par les agriculteurs, on trouve des valeurs cohérentes pour la fève mais très inférieures pour le blé et l'olivier. Il faut savoir que l'oliveraie traditionnelle est cultivée en sec. Les irrigations ne sont faites que lorsque les signes de sécheresse prononcée apparaissent. Pour le blé, les rendements stations ne sont jamais atteints et donc inférieurs au potentiel. Ceci explique certainement la faiblesse des doses annoncées par les agriculteurs.

Pour les cultures associées traditionnelles et en particulier : melon – piment et olivier-pastèques les valeurs annoncées et calculées sont relativement cohérentes.

Pour les céréales en sec, on a pu constater que les années sèches, lorsque les rendements s'annoncent très faibles, les agriculteurs les utilisent avant maturité comme fourrage pour les animaux.

3.6 Productivité de l'eau à l'échelle de la plaine

Le calcul de la productivité à l'échelle de la plaine sera réalisé par agrégation des données parcellaires.

3.6.1 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude concernée se situe sur la partie aval du bassin versant du Merguellil, c'est à dire sur la partie à l'aval du barrage El Haouareb.

Du point de vue strictement administratif, la zone d'étude est à cheval deux délégations: Haffouz et Chébika elles-mêmes divisées en plusieurs secteurs qui constituent les unités élémentaires de suivi agronomique à travers le rôle des Cellules de Rayonnement Agricole (CRA) qui sont les organes de représentation des CRDA au niveau des secteurs

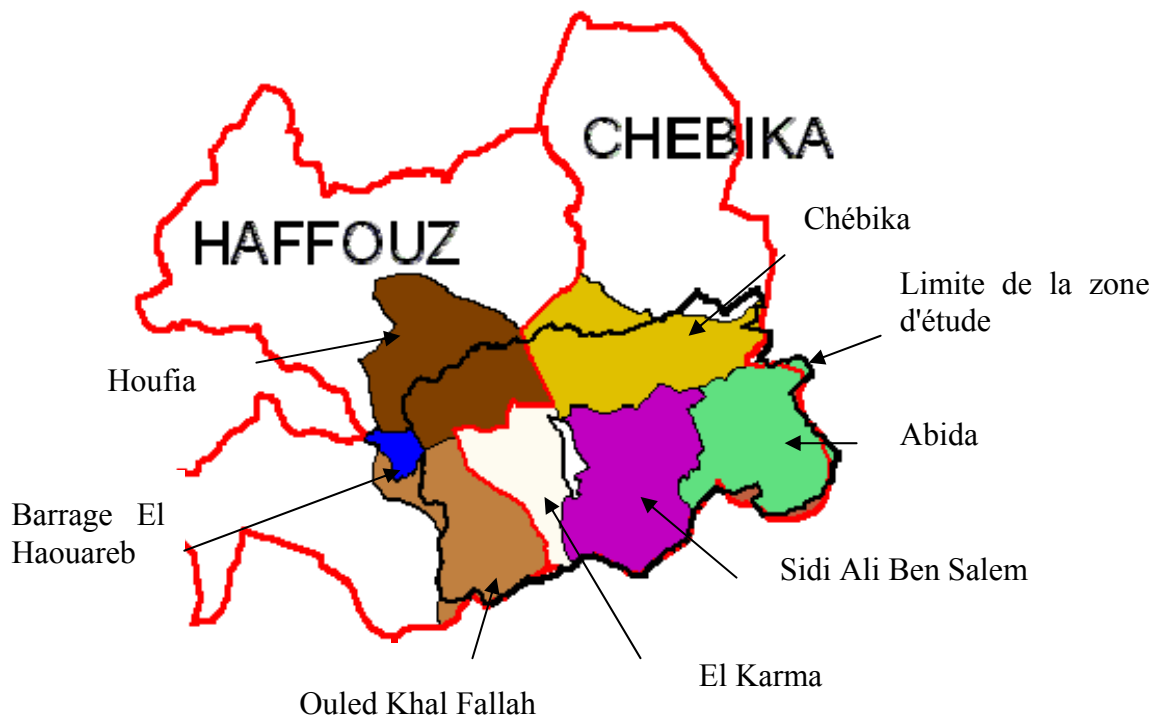


Figure 10 : Répartition des délégations et des secteurs sur la zone aval du projet

La plus grande partie de la zone d'étude se situe sur la délégation de Chébika et en particulier toute la zone où est développée l'irrigation soit à partir du barrage dans la partie nord du secteur El Karma (périmètre irrigué El Haouareb) soit à partir de la nappe par des forages ou des puits dans les 3 autres secteurs avec une intensification des puits lorsque l'on se déplace vers l'est à cause d'une profondeur de nappe qui diminue.

Les secteurs Houfia et Ouled Khal Fallah sont cultivés majoritairement en sec.

Pour synthétiser les informations, les secteurs El Karma, Sidi Ali Ben Salem et Abida ne posent pas de difficultés car il y a concordance entre les limites de secteur et de zones d'étude. Pour Chébika et Ouled Khal Fallah, une petite partie du secteur n'est pas dans la zone d'étude. Il s'agit de zones de piémont pratiquement non cultivées et on considérera qu'elles ne sont pas à prendre en compte dans le calcul de la SAU. Pour ces secteurs, l'échelle d'étude sera celle du secteur dans son ensemble.

Par contre, pour Houfia, où la moitié du secteur est hors zone d'étude aval, on séparera les douars de la zone aval de ceux de la zone amont du barrage. On aura donc par la suite deux secteurs Houfia : un Houfia-aval et un Houfia- amont.

3.6.1.1 Origine des données

Nous disposons de données d'enquêtes réalisées dans le cadre des travaux de recherches, de mémoires de fin d'études et de rapports de stage.

La première série concerne les enquêtes effectuées par Feuillette (2001) et aussi par Ben Hamouda, (1999). Ces travaux se sont appuyés sur les listes exhaustives des agriculteurs fournies par le CRDA. Ces dernières comprennent le recensement de 2106 exploitants répartis sur les deux délégations (Haffouz et Chébika), comprenant 7 Secteurs ou partie de secteur. La liste est représentée par 13 variables ; Nom de l'exploitant, numéros d'exploitant, délégation, code secteur, code douar, SAU ; mode d'accès à l'eau, ainsi que des codes cultures pratiquées (maraîchages, arboriculture, olivier, céréales et l'élevage), code zone (par rapport au niveau de la nappe) et New zone. Ces variables sont toutes qualitatives sauf la surface totale cultivée. Ces enquêtes ont été effectuées auprès des "Omda" (chef) de chaque Douar.

La seconde série de données est issue d'un inventaire exhaustif de l'ensemble des puits de la zone d'étude réalisée entre 1999 et 2001 par Calvez (IRD) et Akrouf (CRDA). Dans cette base de données figurent pour chaque puits : localisation (GPS), nom du propriétaire, caractéristiques physiques, type d'équipement, parcelles irrigables à partir du puits (SIG), spéculations et surfaces au moment de l'enquête, type d'irrigation pratiquée, données d'exploitation si accessibles.

La troisième série de données est issue d'une série d'enquêtes réalisées par les CRA et qui avaient pour objet d'étude non pas le puits mais l'exploitation agricole. En effet, en 1999, le CRDA de Kairouan a pris l'initiative à travers les vulgarisateurs sur chaque secteur du gouvernorat de mener une enquête sur les systèmes de productions. Cette enquête ne concernait que les exploitations pratiquant l'irrigation.

Enfin, une quatrième série de données a été extraite des enquêtes conduites par le CTV de Haffouz dans le cadre d'un projet national de soutien à la petite agriculture familiale. L'ensemble des exploitations du secteur a été renseigné sur des aspects de structure de la famille et de l'exploitation, des principales spéculations réalisées, des activités autres qu'agricoles, du niveau d'endettement. 5800 exploitations ont été visitées en 2001.

3.6.1.2 Représentativité des enquêtes

3.6.1.2.1 Enquêtes Feuillette –Ben Hamouda

Ce travail a été conduit sur des bases géographiques existantes à savoir que le secteur actuel de Sidi Ali Ben Salem était séparé entre Sidi Ali Ben Salem au nord et Hammed au sud. De même, la limite de la zone d'étude du projet n'amenait à prendre en compte que la partie nord du secteur d'Abida. Les zones et secteurs concernés sont représentés sur la figure 11 suivante :

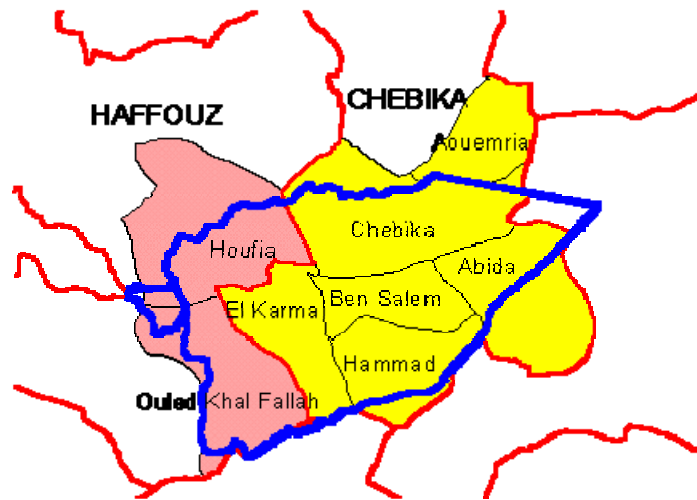


Figure 11 : limites initiales de la zone d'étude aval

En terme d'aménagements, on rencontre sur la zone : un grand périmètre (El Haouareb : surface dominée : 2,368 ha) et 16 petits périmètres irrigués (PPI) dont la superficie dominée varie de 32 à 450 ha. Par la suite, on ne fera plus la distinction entre les périmètres irrigués. On classera toutes les surfaces irriguées sous le vocable Périmètre Irrigué (PI) car toute l'eau est prélevée en aval du barrage El Haouareb . Celle qui alimente les PPI transite par la nappe de Kairouan, celle qui alimente le périmètre El Haouareb est pompée juste avant son infiltration dans la nappe. La seule différence est la côte de prélèvement et donc l'énergie nécessaire à sa mobilisation. Ce paramètre n'est pas pris en compte dans notre bilan.

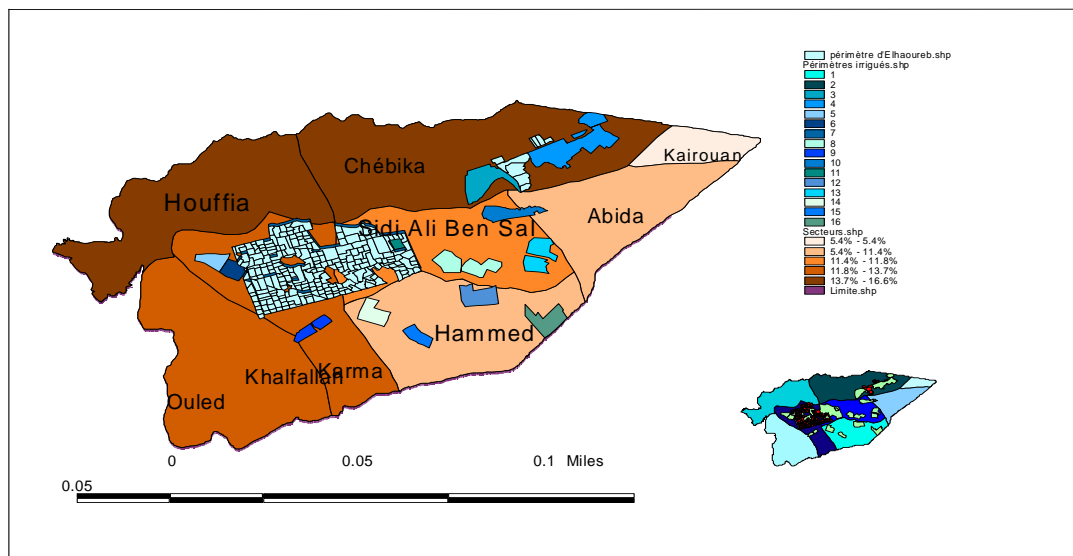


Figure 12 : Les secteurs et les périmètres irrigués de la zone d'étude

L'analyse de l'inventaire des 2106 exploitations donne une surface cultivée déclarée de 14847 ha. Kadi (2002) a réalisé une typologie de ces exploitations.

La première information est la répartition des exploitations et des surfaces par secteur

Secteurs	Nb d'exploitations	Superficie déclarée (ha)
Abida	270	1723
Chebika	394	1932
Hammed	375	2600
Houffia	177	2224
Karma	268	2421
Ouled Khelfellah	325	1200
Sidi Ali B Salem	297	2747
Total	2106	14847

Tableau 13 : répartition des exploitations par secteur Kadi (2002)

La seconde est la répartition des exploitations par classe de SAU

Classe de surface en ha	<5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	>30	Total
Nb d'exploitations	1050	612	226	95	36	23	64	2106

Tableau 14 : répartition des exploitations par classe de SAU Kadi (2002)

Plus de 79 % des exploitations ont une superficie comprise entre 0 et 10 ha alors qu'il n'y a que 64 exploitations qui ont une surface supérieure à 30 ha.

Dans le questionnaire figurent, comme dit précédemment, la surface de l'exploitation, les spéculations réalisées et le mode d'accès à l'eau. Il n'est donc pas possible d'en déduire les surfaces de chaque culture. Par contre, il est possible de déterminer les surfaces conduites en sec et celles pour lesquelles l'irrigation est pratiquée.

Pour les agriculteurs qui irriguent, l'accès à l'eau se fait de différentes façons : forage public et périmètre irrigué, forage privé, puits privé, groupe moto-pompe dans l'oued.

	PI	Puits	GMP	Forage Privé	Sec	Total
Abida		154			116	270
Chebika	83	113		29	169	394
Hammed	104	43		7	221	375
Houffia		2	45	2	128	177
Karma	189		8	14	57	268
Ouled Kelfellah	32	6			287	325
Sidi Ali B Salem	145	45		35	72	297
Total	553	363	53	85	1050	2106
% par rapport au total	26,3	17,2	2,5	4,1	49,9	100
% des exploitations irriguées	52	34	0,02	5	8	

Tableau 15 : répartition des exploitations par mode d'accès à l'eau et par secteur Kadi (2002)

Il apparaît que les PI regroupent plus de 26 % des exploitations et que le secteur de Abida avec 154 puits, est un secteur relativement dominant en nombre de puits. Cela est dû au niveau de la nappe phréatique, qui est relativement proche de la surface.

Les données suivantes montreront que les chiffres pour les puits sont très sous- estimés. Des valeurs actuelles seront proposées avec l'analyse des enquêtes de Roger Calvez.

A partir de la répartition du mode d'accès à l'eau, nous remarquons que presque la moitié des exploitations de la zone d'étude (49,9%) sont en sec, soit 1050 exploitations.

La surface agricole utile conduite en sec serait de 5125 ha soit 35.94 % du total de la zone.

La plupart des exploitations en sec sont situées dans les secteurs de Ouled Khelfellah et de Hammed avec respectivement 297 et 221 exploitations soit 30 % et 22 %.

La surface irrigable de la zone d'étude serait de l'ordre de 9510 ha, soit 65 % de la surface agricole utile totale.

Surface irrigable	Mode d'accès					
	PI	Puits	Forage	GMP	Privé	Total
Secteurs						
Abida		1437				1437
Chebika	217	629,5			266,5	1113
Hammed	729	600			64	1393
Houffia		22	158	685		865
Karma	1892			37	108	2037
Ouled Khelfellah	255,5	35				290,5
Sidi Ali Ben Salem	1136,5	478			760	2374,5
TOTAL	4230	3201,5	158	722	1198,5	9510

Tableau 16 : Répartition des surfaces irrigables par secteur et par mode d'accès à l'eau Kadi (2002)

Mode d'accès à l'eau	Céréales	Maraîchage	Olivier	Arboriculture
PI	521	495	486	149
Puits	338	345	313	170
Forage	2	2	1	2
GMP	32	52	52	36
Privé et PI	78	85	79	35
Total des exploitations irrigables	971	979	931	392
Total des exploitations en sec	813	13	917	205

Tableau 17 : Répartition des exploitations par cultures et par mode d'accès à l'eau Kadi (2002)

Le tableau 17 précédent montre clairement que les céréales et les oliviers sont menés autant en sec qu'en irrigué. Au contraire les cultures maraîchères ne sont présentes que lorsque l'exploitant a accès à l'eau. Les 2/3 de la surface arboricole sont dans ce cas.

A partir de cette typologie, 272 exploitations ont été enquêtées pour lesquelles on a obtenu la répartition suivante en ha :

Surface agricole utile	Surface des cultures irriguées	Surface potentiellement irrigable
1996	1014	1047

La conclusion que l'on peut tirer de ce travail est que **51 % des surfaces sont potentiellement irrigables**. Cette valeur est identique à celle des cultures irriguées. Le taux d'intensification est donc de 1 pour les zones irrigables mais cette valeur est obtenue par la cohabitation de parcelles irrigables non irriguées et de parcelles sur lesquelles on pratique deux cultures par an.

Ceci est cohérent avec les calculs de valorisation de l'eau du chapitre précédent où on montrait que la double culture permettait une meilleure valorisation de l'eau.

Dans la plaine de Kairouan, le développement de la culture irriguée est limité par l'accès à l'eau et non par la surface cultivable. Dès qu'un agriculteur a les moyens financiers et matériels de faire un nouveau puits, il augmente sa surface irriguée.

3.6.1.2 Enquêtes sur les puits

Le prélèvement en eau dans cette zone s'effectue sous deux formes: les forages et les puits.

Ces derniers n'ont jamais été recensés et leur nombre ne cesse d'augmenter d'années en années. Ce type de prélèvement échappe au contrôle de l'Etat qui n'a pas les moyens d'intervenir pour endiguer ce phénomène amorcé dans les années 1970, et ce, malgré la mise en place d'un décret de 1992 déclarant la nappe de Kairouan périmètre de sauvegarde et la suspension des subventions pour la construction des puits.

Plusieurs enquêtes ont cependant été menées par les CRA sur les exploitations agricoles mais celles-ci n'étaient pas focalisées sur l'entité puits. Ils n'ont jamais été répertoriés de manière exhaustive et par ailleurs n'ont jamais fait l'objet d'une spatialisation.

En conclusion, la part du prélèvement exercée par les puits privés sur la ressource, bien que non négligeable, reste une inconnue.

Pour répondre à ce problème, il a été décidé de réaliser une enquête exhaustive sur l'ensemble des secteurs de la plaine. Ce travail a été réalisé par Roger Calvez entre 2000 et 2001.

Le projet était d'obtenir pour chaque puits: sa localisation (GPS), le nom du propriétaire, les caractéristiques physiques (profondeur du puits), le type d'équipement d'exhaure (type de pompe, du moteur, l'énergie utilisée), les limites des parcelles irrigables à partir du puits (SIG), les spéculations et les surfaces irriguées au moment de l'enquête, le type d'irrigation pratiquée, les données d'exploitation si accessibles. Dans la pratique, toutes ces données ne sont pas systématiquement accessibles à cause du contexte local. C'est le cas en particulier pour

- l'existence de "sondage à bras": surcreusement manuel des puits d'une profondeur non mesurable qui rend la connaissance de la profondeur réelle de pompage difficile,
- l'influence informelle des douars sur l'organisation sociale, l'absence de plans cadastraux et le peu de clarté dans les titres de propriété,
- la notion d'exploitation agricole difficile à appréhender car très changeante au cours du temps (les pratiques de métayage et de succession sont basés sur des contrats oraux non contrôlables),
- la complexité des relations entre exploitations et puits : plusieurs puits peuvent être détenus par un même agriculteur et un même puits peut être détenu en copropriété par plusieurs agriculteurs (ayant le plus souvent un lien de parenté entre eux mais ne faisant pas pour autant partie de la même exploitation agricole),
- les problèmes d'identification des agriculteurs : utilisation de plusieurs noms d'usages différents de l'état civil.

Au final, la base de données constituée et donnant le nombre total de puits au moment de l'enquête, a pu être renseignée pour l'ensemble des caractéristiques physiques des ouvrages : coordonnées en UTM (mesure GPS), circonférence du puits, profondeur (hors profondeur de sur-creusage en "sondage à bras"), hauteur et diamètre du réservoir quand présent, marque du moteur, énergie(électrique ou gasoil), type de pompe, présence d'un second moteur.

Dans le cas où l'exploitant et (ou) le propriétaire (et/ou) une autre personne était présent et susceptible de nous répondre, l'identité du propriétaire et de l'exploitant, les paramètres d'exploitation du puits, les surfaces cultivées et cultivables relatives au puits, irriguées et irrigables grâce à l'utilisation du puits, les assolements ont pu être renseignés.

A l'aide de la couverture en photo aérienne de la zone à l'échelle 1:10 000, on a pu délimiter le lot de parcelles desservi par le puits. L'information a ensuite été digitalisée à l'écran sur Arcview. L'exploitation par SIG a permis de calculer les surfaces.

On remarque dans la figure ci-dessous qu'un grand nombre de puits du secteur d'Abida (coin inférieur droit de la figure) ne sont pas dans la zone d'étude initialement choisie. Ceci justifiera plus loin une modification en cours de projet de cette zone d'étude afin de pouvoir utiliser les données fournies par le CRDA et qui sont liées aux secteurs.

Figure 13 : Répartition des puits selon le type de moteur : bleu = diesel, rouge = électrique (Calvez 2001)

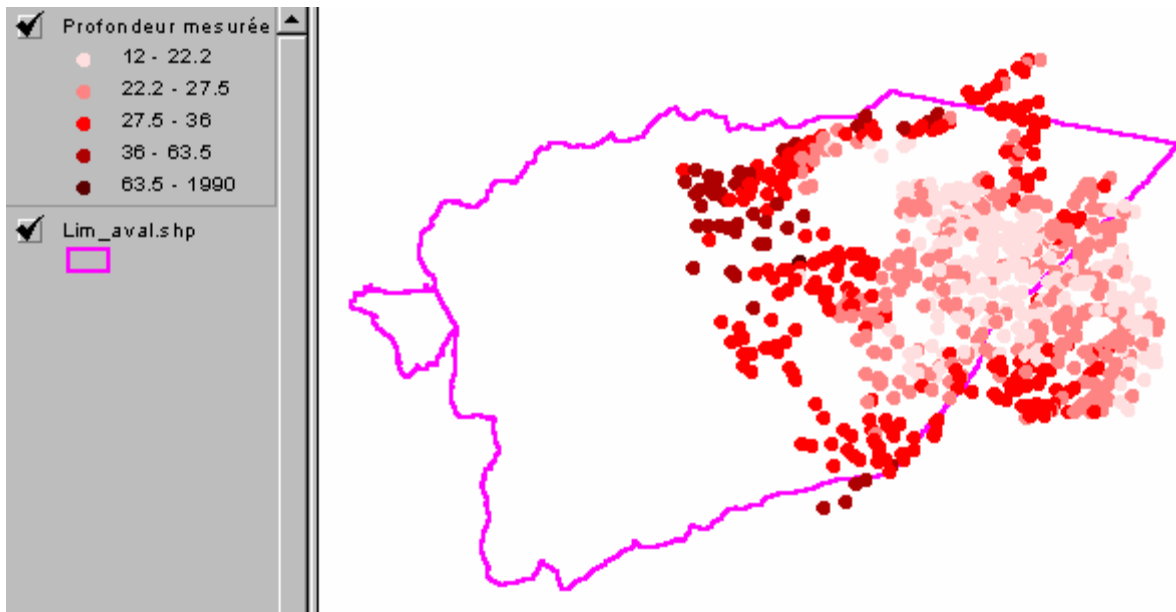


Figure 14 : Profondeur de puits mesurée (Calvez 2001)

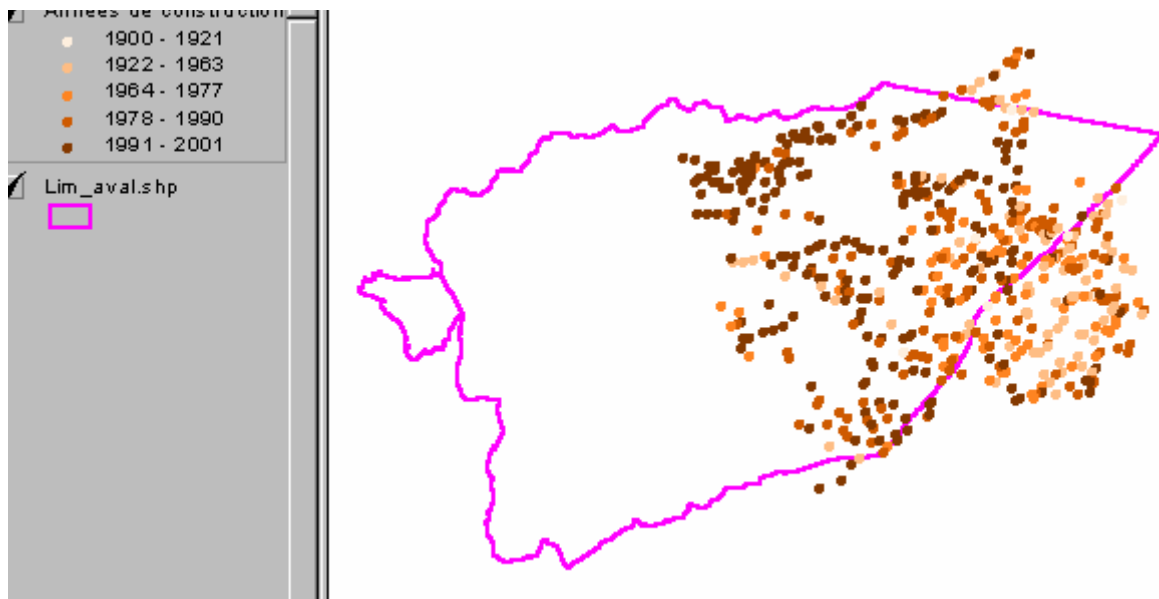


Figure 15 : Année de construction des puits (Calvez 2001)

Le nombre total de puits inventoriés en 2002 est de 847 dont 820 sont associés à une surface totale de parcelles de 10163 ha avec la répartition suivante :

Secteur	Nombre de puits	Surface des parcelles en ha
Abida	473	5501
Sidi Ali Ben Salem + Hammed	147	1724
Chébika	200	2373

Tableau 18 : répartition des puits par secteur Calvez 2001

Afin de rendre les données comparables et aussi de quantifier les évolutions, on a identifié les puits de la zone sud d'Abida qui a été incluse dans les enquêtes "puits".

Cette zone sud, à elle seule, compte 234 puits pour une surface associée de 3322 ha.

Le tableau 19 ci-dessous montre les différences entre les informations anciennes du CRDA et l'inventaire 1999-2001:

Secteur	Nombre de puits		Surface des parcelles en ha	
	List-agri	2001	List-agri	2001
Abida (anciennes limites)	154	239	1437	2744
Sidi Ali Ben Salem + Hammed	88	147	1078	1724
Chébika	113	200	629	2373

Tableau 19 : comparaison des données d'enquêtes list-agri et 2001

Dans cette enquête, seuls 71,5 % des puits ont été renseignés dans leur intégralité.

Les données absentes concernent l'exploitation du puits (temps de marche, cultures pratiquées...)

La surface des parcelles associées aux puits renseignés est de 7169 ha.

Si on calcule la surface théorique de parcelles associées aux puits pour l'ensemble des puits au prorata des puits renseignés, on trouve: 10026 ha à comparer aux 10063 fournis par le SIG.

On va donc par la suite considérer que ces 71,5 % sont représentatifs de la population totale et recalculer les surfaces de cultures sur cette base. On obtient pour la zone et en hectares :

Surface irrigable à partir des puits en ha	10026
Surfaces de cultures irriguées à partir des puits l'année de l'enquête en ha	7979
Olivier irrigué en ha	2074
Arboriculture irriguée en ha	728
Céréales en ha	2078
Melon – pastèque en ha	876
Piment en ha	484
Autres cultures d'été en ha	604
Cultures d'hiver en ha	845
Fourrages en ha	290

Tableau 20 : bilan des cultures irriguées à partir de puits Calvez 2001

D'après le tableau 20, on pourrait déduire que 20% des surfaces irrigables ne sont pas irriguées et que la surface moyenne irriguée par puits est de 9,7 ha. Mais ce calcul ne traduit pas la réalité car il ne prend pas en compte la pratique locale des cultures intercalaires.

Dans son travail d'enquêtes sur les itinéraires techniques de la pastèque, Champion (2003) a relevé les assolements des 104 agriculteurs enquêtés.

La surface totale en olivier obtenue est de 133 ha dont 88 accueillent une culture intercalaire soit 66 %. On propose donc d'appliquer ce ratio aux valeurs précédentes ce qui ramènerait la surface en olivier seul à 684 ha.

De même pour les cultures de melon et pastèque, elles sont toujours associées dans une même année à une autre culture d'été ou d'hiver et donc dans le calcul des surfaces de parcelles irriguées et avec le mode de bilan annuel retenu, on arrive à une surface de parcelles irriguées de 5109 ha (684 + 728 + 2078 + 484 + 604 + 845 + 290).

En conclusion et avec cette surface de **parcelles irriguées de 5109 ha**, la surface moyenne par puit obtenue ainsi est de 6,2 ha beaucoup plus proche de la valeur classiquement retenue par le CRDA qui est de 5 ha.

Quant **au taux d'intensification trouvé**, et égal à 0,8, il est identique à ceux calculés à partir de « list-agri » qui s'établit ainsi :

Secteurs	Taux d'intensification
Abida	0,7
Chébika	0,7
Sidi Ali Ben Salem	0,3
Karma	0,7
Houffia	0,8
Ouled Khelfellah	0,7

Tableau 21 : taux d'intensification des cultures

3.6.1.2.3 Description des enquêtes CRA

Cette enquête a été réalisée en 1999 par les CRA et a concerné 663 exploitations possédant au moins une part de puits, c'est à dire pratiquant une agriculture irriguée.

Les informations utilisables sont par secteur : le nombre de puits, la surface de l'exploitation, les surfaces en olivier et en arboriculture. On a:

Secteurs	Nbre de puits	Surface agricole (ha)	Surface oliviers (ha)	Surface Arbo (ha)
Abida	443	4966	796	431
Sidi Ali Ben Salem	120	1678	37	110
Chébika	145	736	57,5	10

Tableau 22 : Inventaire des puits fait par les CRA en 1999

Les données de nombre de puits sont cohérentes avec celle des enquêtes précédentes de même que les surfaces agricoles d'Abida et de Sidi Ali Ben Salem.

Si on prend le cas d'Abida dans son ensemble, le SIG donne 6967 ha entre les limites du secteur.

La superficie totale des parcelles digitalisées sur écran (à partir de l'enquête Roger Calvez) est de 5950 ha et celle des parcelles en sec (parcelles non desservies par des puits) est de 445 ha, ce qui donne une surface irrigable à partir des puits de 5501 ha pour 473 puits.

Les enquêtes CTV donnent une surface irrigable moyenne par puits de 11,2 ha et celles de Roger Calvez 11,6 ha. Ce qui est totalement cohérent.

On peut enfin calculer une surface non agricole (routes villages, fonds des oueds) en prenant en compte le périmètre irrigué de Mjabraa : 158 ha et on arrive à 859 ha soit 12,3 % de la surface totale.

Par contre, les données de Chébika sur les surfaces et les spéculations ne semblent pas cohérentes.

3.6.1.3 Bilan des surfaces cultivées

Ce bilan va permettre de passer de la parcelle à la zone.

Les tableaux 23 et 24 ci-dessous récapitulent les informations précédentes :

Secteurs	Surf. SIG hors jebel	Surf. agricole déclarée "list-agri"	Rapport "List-Agri"/SIG
Abida (ancienne limite)	3404	1723	51 %
Abida (nouvelle limite)	6967		
Chébika	6040	1932	32 %
Sidi Ali Ben Salem	6589	5347	81 %
Karma	3902	2421	62 %
Houffia	2551	2224	87 %
Ouled Khelfellah	1362	1200	88 %
Total	27411	14847	

Tableau 23 : comparaison surfaces agricoles déclarées et surfaces totales de la zone en ha

Secteurs	Surface SIG hors jebel	Irrigable par puits	Périmètres irrigués	Total irrigable
Abida (nouvelle limite)	6967	5501	158	5659
Chébika	6040	2373	865	3238
Sidi Ali Ben Salem	6589	1724	1745	3469
Karma	3902		1765	1765
Houffia	2551			
Ouled Khelfellah	1362			
Total	27411	9598	4533	14131

Tableau 24 : comparaison surfaces irrigables déclarées et surfaces totales de la zone en ha

Pour Abida, Chébika et Karma, on trouve des valeurs de rapport surface agricole déclarée "list-agri"/surface SIG faible et que l'on ne constate pas lors d'une tournée de terrain.

Pour ces trois secteurs, nous pensons que les valeurs de "list-agri" sont sous-estimées. Les enquêtes "puits" le confirment et la valeur trouvée pour Abida avec ces nouvelles données est de 88 % (cf plus haut : enquêtes CRA) que l'on retrouve à Sidi Ali Ben Salem, Houffia et Ouled Khelfellah.

Pour Chébika, la surface des parcelles en sec est de 794 ha, la surface agricole de la plaine est donc de 4032 ha. Mais il faut ajouter 1200 ha de banquettes soit un total de 5200 ha. On arrive donc à une valeur surface agricole / surface totale de 86 % cohérente avec celle des autres secteurs.

Pour Karma, en l'absence de puits, et donc d'enquête détaillée, nous utiliserons par la suite une valeur surface agricole / surface totale estimée de 85 % et donc une surface agricole de 3300 ha.

Le bilan des surfaces s'établit donc ainsi :

Secteurs	SIG total	SIG hors jebel	Agricole plaine	irrigable
Abida (nouvelle limite)	6899	6899	6108	5659
Chébika	7665	6040	4032 (+ 1200 banquettes)	3238
Sidi Ali Ben Salem	7638	6589	5347	3469
Karma	4462	3902	3300	1765
Houffia	3776	2551	2224	
Ouled Khelfellah	5047	1362	1200	
Total	35487	27343	22211 (+ 1200 banquettes)	14131

Tableau 25 : bilan des surfaces en ha pour le water accounting

En analysant ces chiffres, on constate que 14131 ha sur les 25311 de terres agricoles sont irrigables soit 56 %. Les enquêtes de Sarah Feuillette donnaient une valeur de 51 % ce qui est pratiquement équivalent. 11 180 ha sont obligatoirement conduits en sec.

Ce constat va nous permettre d'utiliser les données de cultures et de travailler au prorata des surfaces actualisées.

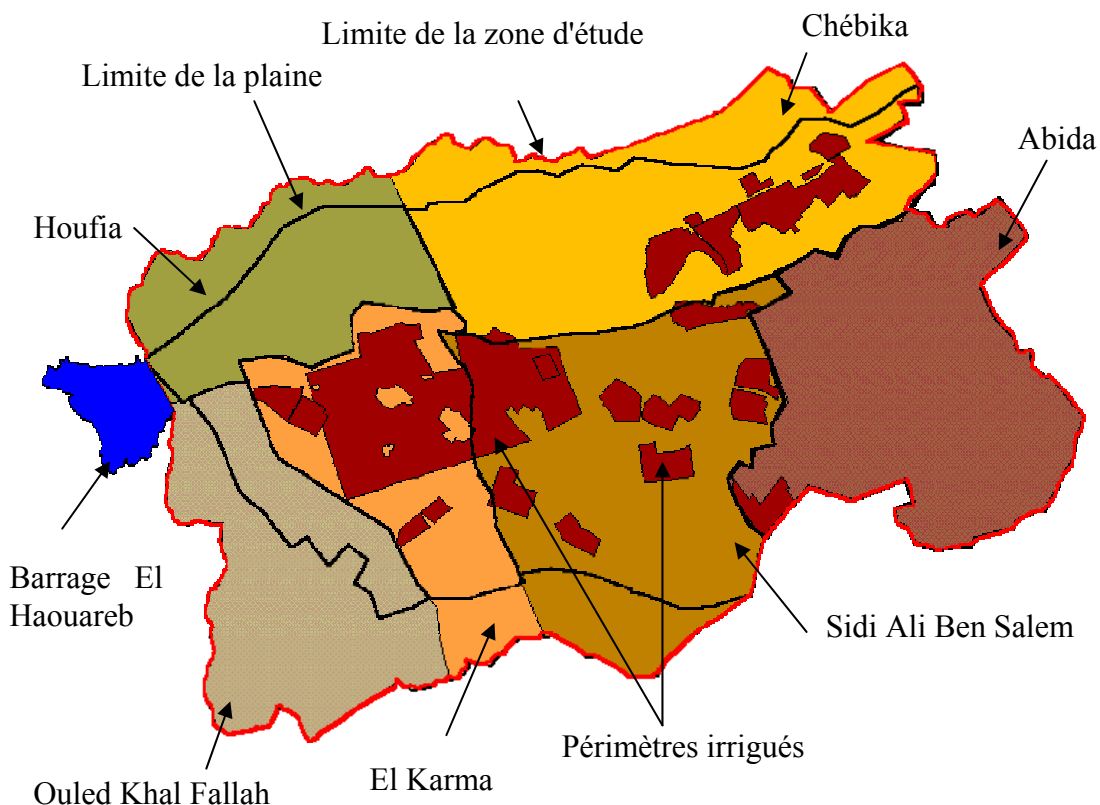


Figure 16 : limites utilisées pour la définition des surfaces.

Le CTV de Chébika réalise chaque année une synthèse des productions et des emblavements de l'ensemble de la délégation qui couvre au total 48733 ha.

Les deux secteurs qui ne sont pas, du tout, dans la plaine couvrent respectivement : Rouissat (11701 ha) et Jouada (5629 ha). Pour l'Aouemria (3471 ha) seuls 200 ha de terres cultivables font partie de la zone d'étude. Pour le secteur de Chébika (7749ha), au contraire, 1709 ha sont hors zone d'étude.

Pour l'ensemble de la délégation, les surfaces emblavées hors cultures pérennes ont été :

Années	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Céréales en irrigué	1800	1890	1850	2040	3920	4250	4500	4700	4950	5250
Céréales en sec	11700	11250	11550	11500	11300	12000	12500	13300	13150	14200
Fèves	450	470	500	480	600	610	650	650	600	650
maraîchage d'hiver	325	325	333	365	965	460	520	545	580	650
Piment	600	600	650	690	720	800	800	700	550	600
total melon -pastèque	800	850	885	980	1070	1750	1750	1600	1700	1700
maraîchage d'été	280	257	275	295	395	420	430	470	475	535
Tomate (Serres)	200	200	200	205	205	220	220	220	220	220
fourrages d'hiver	180	202	197	202	365	370	385	395	415	415
Sorgho	20	25	25	30	45	60	70	75	80	80

Tableau 26 : surfaces emblavées en ha de la délégation de Chébika hors cultures pérennes (CTV Chébika)

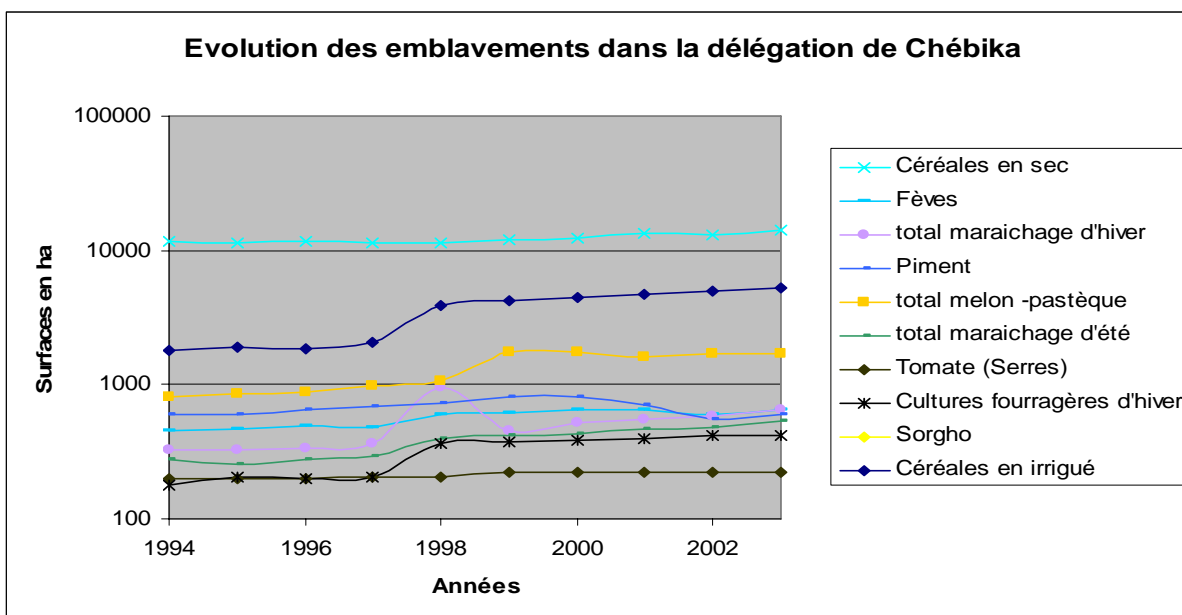


Figure 17 : Evolution des emblavements sur la délégation de Chébika (CTV Chébika)

Si les emblavements d'une majorité de cultures sont restés relativement stables ou ont légèrement augmenté, on constate que l'année 1998 a vu une extension des céréales en irriguées et des fourrages d'hiver. L'année 1999 a marqué une évolution brutale de la somme melon + pastèque qui se stabilise par la suite.

Pour 2003, on dispose des données d'emblavures pour toutes les cultures et pour les secteurs Rouissat, Jouada et l'Aouemria ce qui permet de calculer celles de la zone d'étude.

La surface totale en olivier trouvée est de 6840 ha et celle en arboriculture de 1220 ha.

Pour faire la part entre irrigué et en sec, on utilisera les enquêtes de Roger Clavez qui donnent 2074 ha d'oliviers irrigables à partir des puits pour une surface totale de parcelles de 10026 ha soit donc 21 %. Si on considère que pour les PI qui sont dans la même zone, le ratio est le même, on arrive à une surface d'oliviers irrigués en PI de 906 ha. La base de travail sera donc une surface totale en olivier irrigué de 2980 ha dont 30 % reçoivent des cultures intercalaires soit 900 ha et donc une surface de 3860 ha d'olivier en sec.

On peut donc en déduire les données de la zone d'étude qui figurent dans le tableau 27 ci-après.

Culture	Surface en ha
Céréales en irrigué	3950
Céréales en sec	6100
Fèves	650
maraichage d'hiver	650
Piment	600
total melon -pastèque	1700
maraichage d'été	340
fourrages d'hiver	415
Sorgho	80
Olivier irrigué	2980
Olivier en sec	3860
Arboriculture irriguée	1220

Tableau 27 : bilan des emblavements de la zone d'étude

La somme des surfaces des cultures annuelles irriguées 8385 ha.

La répartition pastèque – melon est respectivement de 2/3 pastèque et 1/3 melons et pratiquement 50 % des pastèques sont suivis de piment soit 500 ha environ. Des différentes enquêtes, il ressort que 25 % des 1700 ha de pastèques ou melon sont cultivés en intercalaire des oliviers soit une surface de 400 ha.

Les calculs de productivité ayant été fait non pas par culture mais par cycle cultural, on va proposer une grille de calcul pour cette productivité :

Culture	Surface en ha	Surface PI	Surface puits
Céréales irriguées seules	3615	1205	2410
Céréales irriguées + olivier	185	62	123
Céréales irriguées + piment	150	50	100
Melon ou pastèque seuls	800	270	530
Melon ou pastèque + piment	500	170	330
Melon ou pastèque + olivier	400	140	260
Maraîchage d'été seul	200	70	130
Maraîchage d'été + olivier	140	45	85
Maraîchage hiver seul	475	160	315
Maraîchage hiver + olivier	175	60	115
Fèves	650	220	430
Fourrages d'hiver	415	140	275
Sorgho	80	25	55
Arboriculture irriguée	1220	406	814
Total	9005	3023	5972

Tableau 28 : Grille de calcul pour la productivité de l'eau

3.6.2 Valeurs de la productivité de l'eau à l'échelle de la zone aval

Les calculs de productivité faits précédemment s'appliquent par culture et à la parcelle.

On peut considérer que ces chiffres sont valables dans le cas des irrigations par puits car, dans ce cas l'alimentation des parcelles se fait pas des tuyaux de polyéthylène pour lesquels les pertes sont nulles ou faibles. De plus pour les irrigations goutte à goutte, les équipements sont très récents.

On ne fait pas non plus de distinction entre techniques d'irrigation à la parcelle car toutes les expériences récentes montrent que l'introduction du goutte à goutte, associé à une fertigation, ne génère pas d'économie d'eau mais une meilleure productivité de cette eau d'ailleurs traduite dans les faits par les augmentations de rendements des dernières années (il est donc même probable que la fraction transpirée par la plante ait augmenté).

Dans le cas des périmètres irrigués, la productivité de l'eau se trouve diminuée du fait des pertes dans les réseaux.

Pour les périmètres gravitaires, l'efficacité du transport par canaux portés a été calculée par Gharb en 2001. On trouve :

Périmètre	Efficacité réseau en %
Sidi Ali Ben Salem II	75
Sidi Ali Ben Salem III	70
Karma I	74
Karma II	76

Tableau 29 : efficacité de périmètres irrigués Gharb (2001)

Pour les périmètres sous pression (El Haouareb, Jefna et Melalsa : surface totale 2954 ha soit 65 % des 4533 ha de périmètres irrigués) et en l'absence de mesure, on prendra une efficacité classique de 90 %

Ce faisant, on peut proposer de nouveaux tableaux de productivité par cultures en périmètres irrigués (annexe 3) en appliquant les coefficients d'efficacité présentés ci-dessus.

Dans le cas des périmètres gravitaires, on constate que la part d'eau bleue produite est très importante et de l'ordre de 50 % de l'eau bleue prélevée (somme des pertes dans les réseaux et au niveau des parcelles).

Conscient de ce problème, l'Etat tunisien a entrepris une grande opération de réhabilitation des périmètres irrigués de la plaine pour passer d'un transport à surface libre à un transport par tuyaux sous moyenne pression.

Sur la base des données ci-dessus et d'une répartition des cultures au prorata des surfaces irriguées en PI ou par des puits privés, on arrive à un bilan « eau bleue » de :

Année	sèche	moyenne	humide
eau bleue prélevée en Mm ³	53,1	38,7	35,7
eau bleue produite en Mm ³	20,6	16,6	14,3
bilan eau bleue consommée en Mm ³	32,6	22	21,4

Tableau 30 : bilan « eau bleue » sur la plaine de Kairouan sous influence de Merguellil

Les données CRDA relatives aux volumes prélevés par les périmètres irrigués donnent une valeur moyenne de 14.8 Mm³

Si on considère que l'efficacité de distribution par les puits est de 1 et les volumes consommés à la parcelle sont identiques avec les deux modes de distribution, on arrive à un volume théorique de prélèvement total de : 44.4 Mm³ très proches du volume estimé ci-dessus. Les options prises se trouvent validées.

Le total des productions agricoles irriguées fourni par le CTV et exprimé en tonnes est:

Année 1999	78900
Année 2002	98500
Année 2003	115800

L'année 2002 étant une année sèche, 2003 une année humide et 1999 une année moyenne, les productivités de l'eau bleue prélevée obtenues sont :

Année sèche	1,98 kg / m ³
Année moyenne	2,03 kg / m ³
Année humide	3,43 kg / m ³

Ces résultats sont à analyser avec prudence car deux phénomènes apparaissent :

- entre 1999 et aujourd'hui, les rendements et les emblavures pour les cultures à fort potentiel de production ont beaucoup augmenté et donc avec une année moyenne actuellement on trouverait une valeur certainement supérieure à 2,03 kg/m³.
- Le devenir des volumes d'eau bleue produite demande à être précisé. Dans nos calculs, nous avons fait l'hypothèse qu'ils s'infiltraient en profondeur. Rien de prouve qu'il n'y a pas une reprise évaporatoire par capillarité au niveau des parcelles qui ne sont pas emblavées. Une solution pourrait être un suivi des nitrates afin de préciser ce problème.

3.6.3 Bilan "eau bleue – eau verte"

Le bilan « eau bleue – eau verte » au niveau des cultures irriguées sur la zone s'établit comme représenté tableau 31. Il a été établi sur la base de la surface de la plaine seule en éliminant les jebels soit 27343 ha.

Il est à noter que la part de l'eau verte consommée dans le bilan est très importante. Mais que les différences, entre années sèches et humides sont parfois très faibles. En réalité, les différences sont très fonction des dates d'apparition des événements pluvieux par rapport à celles de forte demande de la plante.

On constate aussi que la production d'eau bleue est maximale les années sèches ceci s'explique par une demande en eau d'irrigation supérieure et donc des pertes liées à l'efficacité des systèmes qui augmentent.

Culture	eau verte consommée Mm3			eau bleue prélevée Mm3			eau bleue produite Mm3		
	sèche	moyenne	humide	sèche	moyenne	humide	sèche	moyenne	humide
Céréales irriguées seules	6,141	10,990	11,617	20,360	12,339	11,722	7,872	5,566	4,533
Céréales irriguées /piment	0,242	0,434	0,459	1,828	1,609	1,511	0,707	0,659	0,584
Melon ou pastèque seuls	1,293	2,204	2,446	6,992	5,372	4,959	2,704	2,658	2,404
Melon ou pastèque/piment	0,808	1,446	1,528	6,216	5,651	5,167	2,405	2,186	1,999
Melon ou pastèque/olivier	0,646	1,113	1,223	5,118	4,286	4,094	1,982	1,681	1,585
Maraîchage d'été seul	0,323	0,551	0,611	1,919	1,919	1,727	0,743	0,757	0,669
Maraîchage d'été /olivier	0,226	0,390	0,428	1,717	1,438	1,374	0,668	0,566	0,534
Maraîchage hiver seul	0,768	1,322	1,452	2,692	2,077	1,769	1,041	0,850	0,684
Maraîchage hiver /olivier	0,283	0,430	0,535	1,944	1,719	1,550	0,752	0,711	0,600
Fèves	1,050	1,880	1,987	1,682	0,631	0,335	0,651	0,244	0,163
Fourrages d'hiver	0,671	1,200	1,269	2,217	1,344	1,276	0,857	0,606	0,494
Sorgho	0,129	0,231	0,245	0,437	0,265	0,252	0,169	0,119	0,097
Olivier irrigué	3,368	6,027	6,371	11,587	11,587	11,587	4,591	4,591	4,591
Arboriculture irriguée	1,972	3,396	3,730	5,084	5,084	5,084	2,039	2,039	2,039
Total en Mm3	12,581	22,191	23,799	53,123	38,650	35,737	20,551	16,605	14,345

Tableau 31 : bilan « eau bleue » -« eau verte » par spéculations pratiquées

Pour les cultures en sec, céréales et olivier, on a vu que l'intégralité de la pluie était consommée. On a donc une consommation d'eau verte, pour ces cultures, calculée sur la base des surfaces emblavées du 3.6.1.3 (9960 ha) :

Année	sèche	Moyenne	humide
Eau verte consommée en Mm ³	17,9	30,0	36,4

Il apparaît donc que les cultures en sec consomment plus d'eau verte que les cultures irriguées.

Les volumes totaux d'eau verte consommée au niveau de la plaine, s'établissent comme suit

Année	sèche	Moyenne	humide
Apport total pluie en Mm ³	49,2	82,3	99,8
Eau verte totale consommée en Mm ³	30,5	52,2	60,1
Eau verte totale consommée (% pluie)	62	63,4	60,2

On est dans un système où plus de 60 % de l'apport pluviométrique est consommée par les cultures.

Pour les surfaces non cultivées, on a utilisé les résultats du modèle « sol nu » car il correspond aux pratiques de la zone. On obtient une consommation totale de l'eau de pluie sur la période septembre-septembre. Les simulations montrent que les volumes drainés sont nuls tant que le

stock du sol fin Août n'atteint pas 100 mm ce qui est impossible vu la pluviométrie d'Août. On arrive donc à un volume d'eau verte consommée de 25,2 Mm³.

Quant à l'eau bleue, aux prélèvements agricoles sur la nappe de Kairouan, s'ajoutent ceux de l'AEP et de l'industrie. Ils représentent 15 Mm³ (chiffres CRDA).

Si on essaie de représenter ces éléments de bilan, on arrive à la figure 18 suivante :

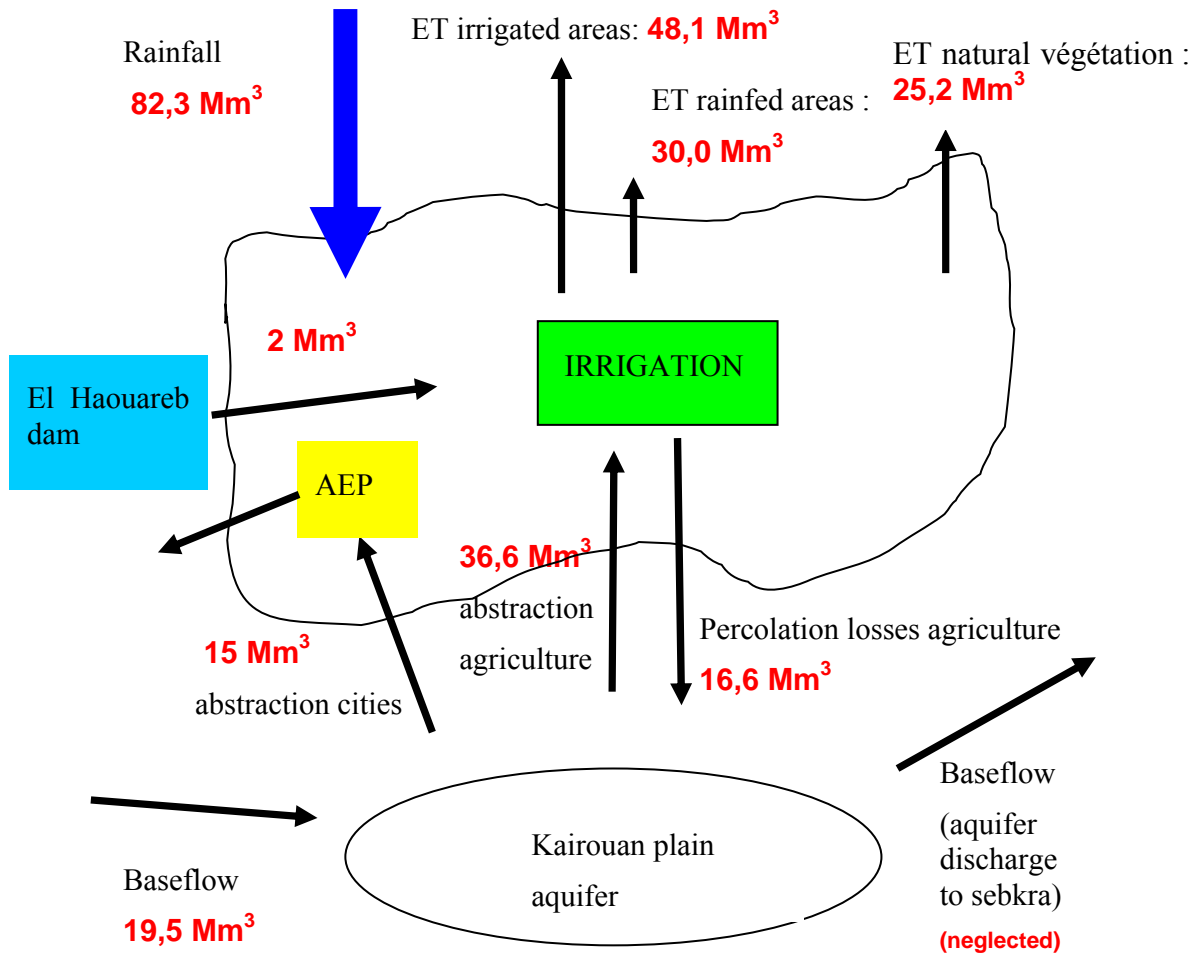


Figure 18 : Bilan des volumes en années moyennes sur la zone de plaine

En commentaire, on peut retenir que dans ce bilan, les analyses dépendent des termes.

Seuls les termes « apport » « pluie et barrage » sont des valeurs mesurées. Tous les autres résultent d'estimation.

Pour les prélèvements sur la nappe, les prélèvements urbains représentent presque la moitié des prélèvements agricoles. Sachant qu'il n'y a aucun retour à la nappe. Il s'agit donc un déficit net pour la zone.

Pour les entrées, on constate que les plus gros volumes sont fournis par les pluies et par les écoulements souterrains. L'apport du barrage est très faible car ce dernier a été plus dimensionné pour protéger la ville de Kairouan des inondations que pour faire un stockage en vu d'un usage agricole ou industriel. Toutes ces dernières années, il a été vide dès le milieu du printemps.

On remarque aussi que les volumes de drainage générés par l'agriculture sont importants.

Si on fait un bilan au niveau de la nappe, il confirme le déséquilibre entrées-sorties (15,5 Mm³).

Si on fait les hypothèses que l'intégralité des pertes agricoles atteint la nappe et que les fuites vers la sebkra sont nulles, on arrive à des prélèvements urbains et agricoles presque équivalents (15 et 20 Mm³ respectivement).

Ces hypothèses restent à confirmer et seule une étude des charges en nitrates des eaux de nappe et de leur évolution permettrait de répondre.

Une autre approche consiste à prendre l'abaissement moyen annuel de 50 cm. Sur une surface (uniquement de la zone d'étude) de 27 243 ha et une porosité de 10 %, il conduit à un déficit de 13,6 Mm³.

Sur cette base, le bilan total pourrait s'établir comme suit :

	Volumes annuels Mm ³
Entrées	
Pluie	82,3
Ecoulements souterrains	19,5
Barrage El Haouareb	2,0
Total entrées	103,8
Sorties	
ET surfaces agricoles irriguées	48,1
ET surfaces agricoles en sec	30,0
ET jachères	25,2
Eau urbaine	15
Total sorties	118,3
Déficit	14,5

On arrive au final à des estimations de déficit qui ne divergent que de 2,5 % du volume total entrant.

Conclusion

On est donc dans une zone où la compétition sur l'eau entre agriculture et autres activités est très forte. Mais de plus, ces deux activités ne subissent pas les mêmes contraintes.

L'alimentation en eau potable est une activité prioritaire dans la loi sur l'eau et les prélèvements se font uniquement par des forages autorisés et dont l'exploitation est contrôlée.

L'eau agricole a pour origine, pour une moitié, des forages eux aussi autorisés et contrôlés et pour l'autre des puits privés sur lesquels l'administration a très peu de contrôle. Ces ouvrages prélèvent l'eau de la même nappe mais diffèrent par leur débit nominal : environ 25 l/s pour les forages et 3 à 4 l/s pour les puits.

On constate pour ces derniers, que les solutions retenues pour limiter les prélèvements (introduction du goutte à goutte, électrification) ont conduit à des effets inverses à cause des emblavements supplémentaires réalisés et de l'introduction des pompes immergées qui autorisent des rabattements plus importants.

L'accès libre à la nappe pose actuellement un réel problème et les agriculteurs prennent de gros risques dans ce contexte où le déséquilibre ressources-usages existe et où l'irrigation n'est pas jugée prioritaire en cas de pénurie

4 Application à la zone amont du barrage El Haouareb

4.1 Données

4.1.1 Pluie

La distance depuis le barrage El Haouareb jusqu'à l'extrémité amont du bassin versant est de 60 km. Les altitudes varient de 250 m au barrage à 1000 m à Kesra.

On a donc retenu trois sites de mesures de pluie pour représenter le bassin : Haffouz (très près du barrage), Skhira à mi-bassin et Kesra au nord-ouest.

Les données de pluie de ces stations analysées sur plus de 20 ans sont:

station	Altitude (m)	Pluie année moyenne (mm)	Pluie 1 ^{er} quartile (mm)	Pluie 3 ^{ème} quartile (mm)
Haffouz	280	317	271	352
Année correspondante		1996	1978	1984
Skhira	600	321	247	289
Année correspondante		1986	1981	1979
Kesra	1000	409	298	491
Année correspondante		1980	1981	1973

Tableau 32 : données de pluies retenues pour le water accounting

On constate que entre Haffouz et Skhira, les différences sont peu importantes, Kesra présente une pluviométrie nettement supérieure.

4.1.2 ETo

Ne disposant pas de série longue de mesure d'ETP sur le bassin amont, on a retenu d'utiliser la comparaison réalisée par l'IRD entre les évaporations bac de Chébika dans la plaine et de Fidh Ben Naceur relativement au centre du bassin.

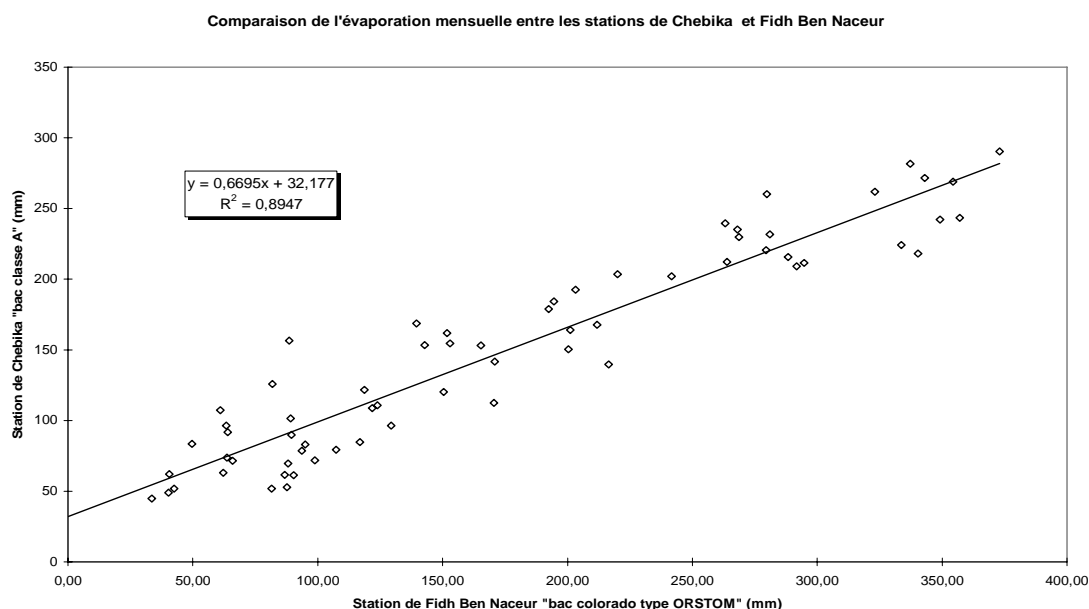


Figure 19 : Comparaison des données d'évaporation entre Chébika et Fidh Ben Naceur

La régression proposée nous a permis de calculer les valeurs mensuelles en mm qui sont présentées dans le tableau 33 ci-après :

septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février
132,8	91,3	43,6	22,3	29,3	25,1

mars	avril	mai	juin	juillet	août
75,0	109,4	186,3	224,2	251,4	218,2

Tableau 33 : Données d'évapotranspiration potentielle retenues pour le water accounting

Ce sont ces données que l'on utilisera pour l'ensemble du bassin.

4.2 Bilan à l'échelle parcellaire

Il sera réalisé sur la base d'une ETP identique sur l'ensemble du bassin et estimée sur une station centrale à partir d'une relation établie expérimentalement par l'IRD lors des travaux du projet « Petits barrages ».

Par contre, le gradient pluviométrique lié à l'augmentation d'altitude sera pris en compte en divisant le bassin en trois zones : basse, moyenne et haute, représentées chacune par une station pluviométrique respectivement : Haffouz, Skhira et Kesra.

4.2.1 Productivité de l'eau

Les cultures majoritairement représentées sur le bassin sont les céréales et les oliviers en sec.

Pour les céréales, si on calcule le bilan pour les différentes stations avec les données présentées précédemment, on obtient le tableau 34 suivant :

Céréales en sec	Haffouz			Skhira			Kesra		
	sèche	moy.	humide	sèche	moy.	humide	sèche	moy.	humide
Pluie en mm	271	317	352	247	315	381	298	409	491
apport brut en mm	271	317	352	247	315	381	298	409	491
apport net en mm	287	314	354	274	336	392	326	419	473
conso productive en mm	201	210	240	176	232	252	210	257	256
taux consommation brut	0,74	0,66	0,68	0,71	0,74	0,66	0,71	0,63	0,52
taux consommation net	0,70	0,67	0,68	0,64	0,69	0,64	0,65	0,61	0,54
Production en kg/ha	800	1000	1200	800	1000	1200	800	1000	1200
productivité nette kg/m ³	0,28	0,32	0,34	0,29	0,30	0,31	0,25	0,24	0,25
eau verte consommée en mm	287	314	354	274	336	392	326	419	473

Tableau 34 : bilan de productivité pour les céréales sec sur l'ensemble du bassin amont

Les valeurs de rendements ont été calées sur les données des CTV.

La différence entre l'eau verte consommée et la consommation productive a pour origine uniquement l'eau qui est évaporée hors période culture. La modélisation confirme que la présence d'une culture pendant la saison pluvieuse supprime tout phénomène de recharge de nappe.

On peut être étonné de valeurs aussi faibles de rendement, même en année humide. Les informations collectées montrent que l'aversion au risque des agriculteurs fait qu'ils limitent systématiquement leur fertilisation limitant par là même le potentiel de production.

Pour les oliviers, si on applique la formule de SNANE *et al* (1991) on aurait des productions par arbre allant de 36 à 72 kg/arbre sur le bassin versant.

Pour les parcours et les forêts, des relations existent entre la consommation et la production. On va donc partir d'une estimation de la production pour définir une consommation.

Pour les parcours, les productions estimées sont de 400 à 800 kg de matière sèche à l'ha (Lapeyronnie, com. pers.) permettant de nourrir 1 brebis pour 2 ha soit une consommation d'eau verte de l'ordre de 40 à 80 mm.

Pour les forêts et en tenant compte du type de couvert peu dense, on pourra retenir une production 3 m³ de bois par ha et par an dont la consommation d'eau est estimée à 100 mm. (communication orale Claude Barbier, ONF)

Pour les cultures irriguées, on verra plus loin qu'elles sont très peu représentées, sur l'ensemble du bassin versant.

Le calcul du bilan pour cette spéculation nous donne :

Année	Sèche	Moyenne	humide
Pluie en mm	271	320	352
Besoins d'irrigation en mm	115	109	105
apport brut en mm	204	199	196
apport net en mm	202	199	197
conso productive en mm	140	140	140
taux consommation brut	0,69	0,71	0,72
taux consommation net	0,69	0,71	0,71
production en kg/ha	5000	5000	5000
productivité nette kg/m ³	0,247	0,251	0,253
productivité /besoin d'irrigation kg/m ³	0,435	0,459	0,476
eau verte	271	320	350
eau bleue prélevée	176	167	161
eau bleue produite	61	58	56

Tableau 35 : bilan de productivité pour l'arboriculture à Haffouz

Le rendement pris en compte est le rendement moyen fourni par les enquêtes faites en 2002 par des étudiants de l'INAT dans la délégation d'Haffouz auprès de 250 agriculteurs.

Rendement	Conduite en sec			Conduite en irriguée		
	Rdt moyen	Rdt min	Rdt max	Rdt moyen	Rdt min	Rdt max
Olivier kg/arbre	28,1	0,8	70	51,2	1	192,5
Amandier kg/arbre	6	0,24	20	11,3	0,2	50
Abricotier kg/arbre	0	0	0	42,9	2,1	250
Pommier kg/arbre	0	0	0	66,3	42	300
Blé (qx/ha)	12,3	9,3	14	0	0	0
Orge (qx/ha)	8	2,5	11,3	16,0	16	16

Tableau 50 : rendement des cultures dans la délégation d'Haffouz

4.2.2 Bilan "eau bleue – eau verte"

Les calculs faits ci-dessus montrent que les céréales sont capables de consommer toute l'eau verte mise à leur disposition et donc, dans ces conditions, ne produisent pas d'eau bleue. La seule exception concerne l'année humide à Kesra où on a un léger stockage dans le sol.

Dridi (2000) a confirmé ce phénomène dans les zones aménagées en banquettes à rétention totale.

Pour les autres surfaces, Mekki (2003) a montré dans sa thèse réalisée sur le bassin versant de Kamech au cap Bon que bien que l'infiltrabilité du sol varie au cours de l'année, celle de parcelles cultivées reste toujours supérieures à celle des parcours. Le ruissellement mesuré atteint des valeurs cumulées de l'ordre de 12 à 20 mm dès que la pluie cumulée d'un épisode

pluvieux dépasse 200 mm. Pour des pluies supérieures, les valeurs ne changent plus. Ceci quelles que soient la pente ou la nature du sol.

Ce résultat est cohérent avec celui de Dridi (2000) qui a mesuré qu'à Haffouz, 88 % de la pluie journalière (< 15mm) ne ruisselait pas.

4.3 Bilan au niveau des aménagements de CES

Cet étude d'impact a fait l'objet d'une thèse à l'ULP de Strasbourg, « *Impact des aménagements sur la disponibilité des eaux de surface dans le bassin versant du Merguellil* » (Dridi, 2000).

Elle présente une approche « globale » de l'évaluation de la capacité de rétention des banquettes basée sur le milieu et sur certaines caractéristiques de l'ouvrage qui, en mettant en œuvre une typologie des banquettes, se révèle bien adaptée à l'étude de bassins moyens ou grands. Dans cette étude, on note que l'impact de ce type d'ouvrage est limité par la petite taille de l'aménagement mais qu'il devient important au niveau du bassin par la superficie aménagée.

La capacité moyenne de rétention des banquettes varie de 45 à 250 mm sur l'ensemble du bassin et la médiane est de 85 mm ce qui correspondant environ au quart de la pluviométrie annuelle dans le bassin. Ceci suppose bien entendu que les banquettes de terre soient correctement réalisées par rapport aux courbes de niveau. Dans ce cas, l'impact sur l'écoulement peut être considéré en année moyenne comme proportionnel à la surface aménagée et varie de 2 % à 22 % selon les bassins. L'impact est négligeable pour le sous bassin de Skhira et maximal pour le sous bassin de Zebbes (tableau 36).

Nom du bassin	Surface des bassins : ha	Surface aménagée : ha	% surface aménagée	Nbre de sites
Skhira	19000	292	2	4
El Morra	1150	135	12	3
Zebbes	16028	3511	22	27
Haffouz	66700	10819	16	81
El Haouareb	117300	19566	17	112

Tableau 36 : Surface aménagée en banquettes par sous bassins Dridi (2000)

4.4 Bilan au niveau des lacs et barrages collinaires

Les lacs collinaires contrôlent une superficie de 100 km² avec une capacité initiale dans les conditions optimales de remplissage de 2,8 millions de m³. Les barrages collinaires contrôlent une superficie de 58 km² et disposent d'une capacité initiale totale de 3,05 millions de m³. Le volume stockable dans les lacs représente une lame de 9 mm sur la totalité du bassin de Haffouz (650 km²) alors qu'il est de 56 mm sur le bassin d'El Morra (11,5 km²).

Le taux d'envasement moyen des retenues collinaires est de 4,6 %. (Albergel, 1998). Avec ce taux de perte, la durée de vie des lacs est de l'ordre de 22 années. Pour le barrage d'El Haouareb, la perte de capacité est estimée à 2 % par an (Kingumbi, 1999).

L'impact global de ces divers aménagements, retenues et banquettes dans les conditions optimales de remplissage (conditions initiales) serait, sur le bassin de Haffouz, une réduction de près de 50 % de l'écoulement moyen, (les 16 % sont assurés par les banquettes et les 30 % par les retenues collinaires) et de 35% environ celui sur le bassin entier (17 % pour les banquettes et 17 % pour les retenues collinaires)

En comparant la capacité de ces ouvrages au ruissellement produit par une parcelle et calculé à partir d'une modélisation basée sur l'étude des précipitations et du ruissellement par le

simulateur « manuel », cette étude (Dridi 2000) établit que, même pour des pluies décennales, tout le ruissellement reste contenu par les ouvrages, sans risque de destruction.

En tenant compte des 43 retenues collinaires recensées, cette étude évalue le déficit d'écoulement en année moyenne à 30%, ce qui correspond approximativement au déficit moyen des apports au barrage d'El Haouareb depuis sa mise en eau.

4.5 Bilan à l'échelle du bassin versant

4.5.1 Relation limites administratives et limites hydrologiques

Le bassin versant amont couvre trois délégations du gouvernorat de Kairouan : Haffouz, El Ala et Oueslatia et deux délégations du gouvernorat de Siliana : Makthar et Kesra.

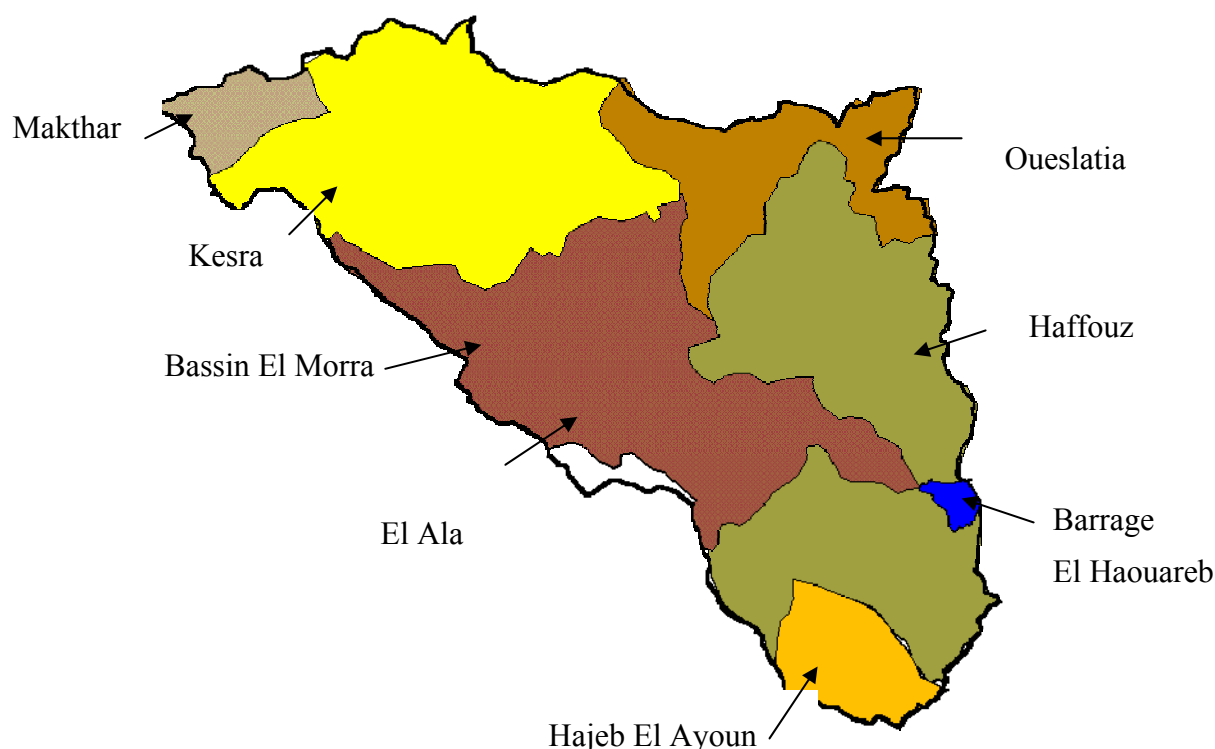


Figure 20 : répartition des secteurs de la zone amont

Comme à l'aval, les limites des délégations dépassent les limites du bassin et la répartition des surfaces est présentée dans le tableau suivant :

Délégation	Surface totale en ha	Surface dans le bassin en ha	Rapport en %
Haffouz	60739	35464	58
El Ala	37646	30866	82
Hajeb El Ayoun	60789	7704	13
Oueslatia	91364	11601	13
Kesra	43371	28143	65
Makthar	35462	3595	10
Total	329371	117373	

Tableau 37 : Surfaces des délégations « amont » comprises dans la zone d'étude

4.5.2 Surfaces aménagées

Après une politique d'aménagements orientées vers les grands barrages, l'Etat Tunisien a mis en place depuis 1990 une vaste programme de conservation des eaux et des sols dans le but de limiter l'envasement des barrages, lutter contre les inondations en réduisant les ruissellements lors des forts épisodes pluvieux mais aussi favoriser l'agriculture en sec en stockant l'eau dans les sols aménagés. Aujourd'hui, ces aménagements sont présents sur l'ensemble du bassin versant et la répartition présentée figure 25 en est l'illustration.

Répartition des aménagements en 1997

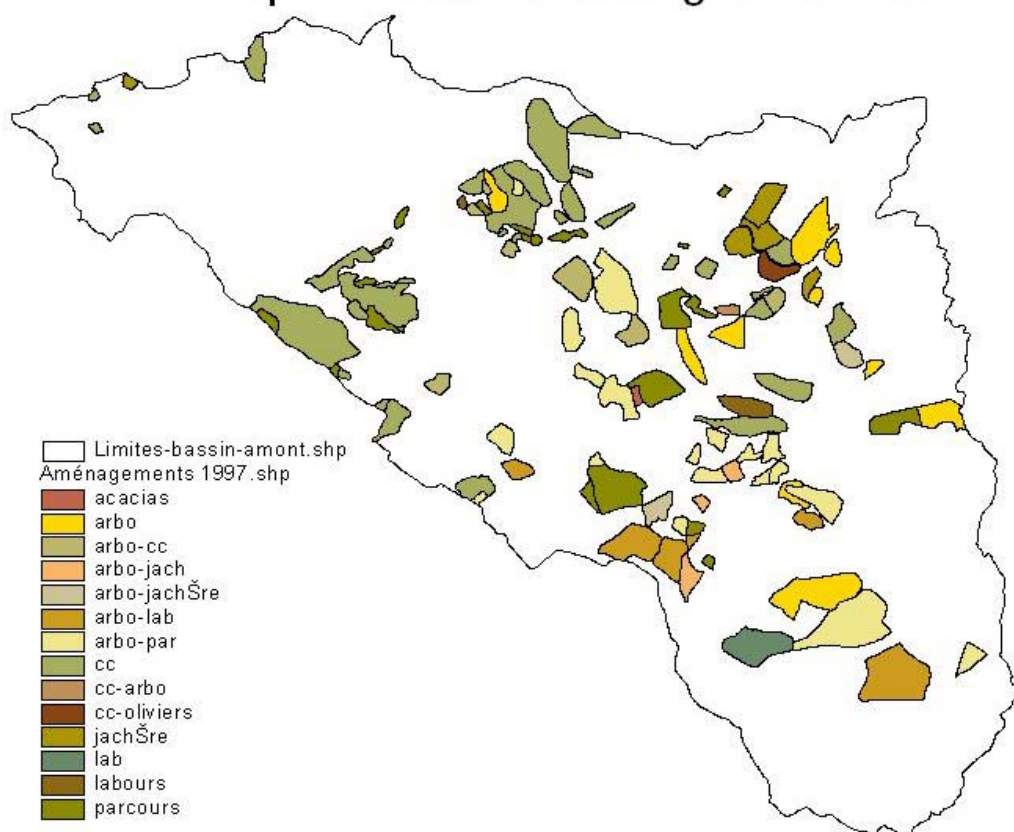


Figure 25 : Répartition des aménagements 1997 de la zone amont (Dridi, 2000)

Depuis 1997, date de la carte, le CRDA de Kairouan a poursuivi ses efforts d'aménagements et les surfaces aménagées apparaissent dans le tableau 38 ci-dessous.

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Terrasses manuelles en ha	57	0	0	0	0	23	0
Terrasses mécaniques en ha	1700	3934	1573	640	210	1850	0
Comblements de ravins (nombre)	162	59	60	33	26,5	147	65
Aménagement de cuvettes en ha	809	12	20	0	12	189	40,5
Cordons en km	59	22	18	9	16	144,5	8
Aménagements de parcours en ha	472	135	297	52	0	353	60,5

Tableau 38 : réalisations de CES par le CRDA de Kairouan depuis 1997 (THAMEUR A, 2004)

Cette politique conduit, en réalité, à une réallocation de la ressource sur l'ensemble du bassin amont au détriment des nappes de la zone aval du bassin amont et de celle de la plaine aval. La poursuite de ces aménagements ne peut donc se faire sans une stratégie globale intégrant l'ensemble des usages sur le bassin du Merguellil.

4.5.3 Occupation du sol

La figure 21 ci-dessous donne une représentation générale de l'occupation des sols avec trois grandes types : des forêts à l'amont, des parcours et des cultures imbriqués sur le reste de la zone.

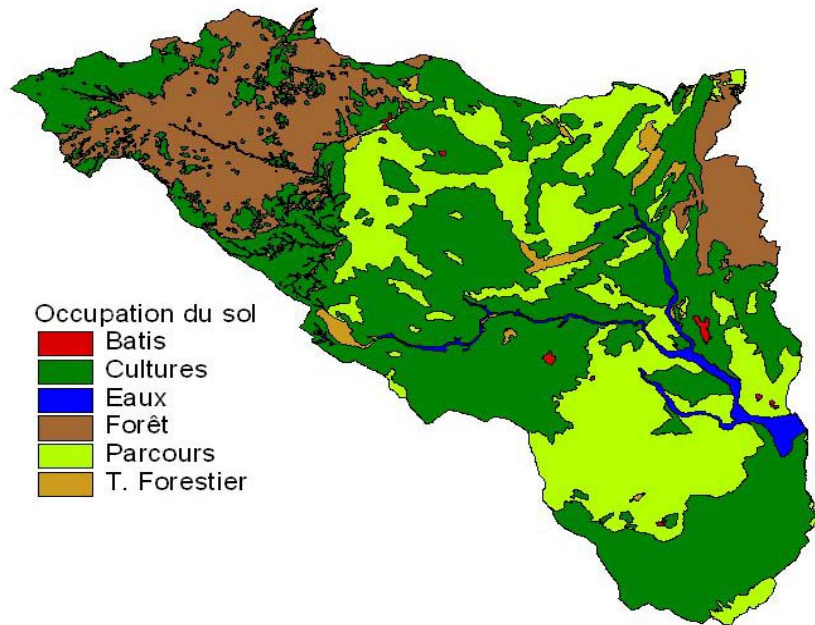


Figure 21 : Répartition de l'occupation des sols 1997 de la zone amont (Dridi, 2000)

4.5.4 Analyse détaillée de la délégation d'Haffouz

Dans le cadre d'un projet de soutien à la petite agriculture familiale, la délégation d'Haffouz a été retenue comme délégation pilote et a fait l'objet d'une enquête exhaustive de toutes les petites exploitations. Les données suivantes correspondent aux résultats de l'analyse des informations collectées réalisées par Albouchi en 2004.

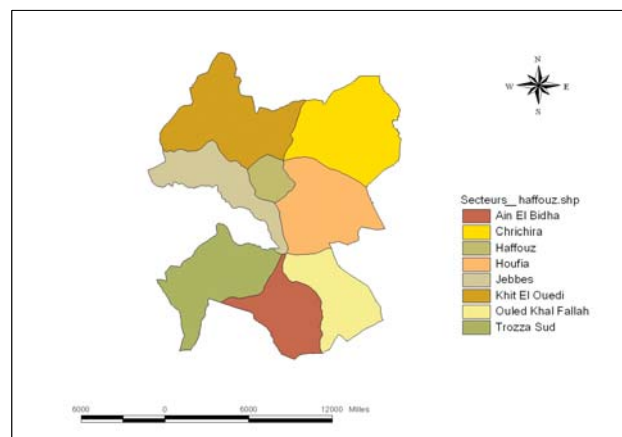


Figure 22 : Représentation des secteurs administratifs de la délégation d'Haffouz

D'après les données collectées lors de l'enquête exhaustive réalisée en 2000-01, la délégation de Haffouz regroupe 5045 exploitations agricoles réparties sur les huit secteurs administratifs. Le tableau ci-dessous représente le nombre des exploitations agricoles identifiées par secteur.

Secteurs administratifs	Nombre d'enquêtes	% par rapport au total
Ain baidha	891	18
Chrichira	641	13
Haffouz	243	5
Houffia	537	11
Jebbes	585	12
Khit el oued	1058	21
Ouled kalfallah	440	9
Troza sud	650	13
Total	5045	100

Tableau 39 : répartition du nombre d'enquêtes par secteurs (Enquête de structure Haffouz 2000-01)

Les deux secteurs de Kit El oued et Ain Baidha sont relativement les secteurs les plus denses en terme du nombre d'exploitations dont ils regroupent respectivement 21% et 18% du total des exploitations de la délégation

Parmi les exploitations (5045) enquêtées, 546 exploitations sont déclarées gérées ou détenues par des femmes soit 11% du total des exploitations.

Après identification et localisation des douars nous avons essayé de localiser géographiquement les exploitations agricoles de la délégation de Haffouz sur ces douars. En effet, selon les déclarations des exploitants enquêtés, 102 douars ont été identifiés. Nous avons regroupé les plus petits pour aboutir à 81 douars présentés ci-dessous.

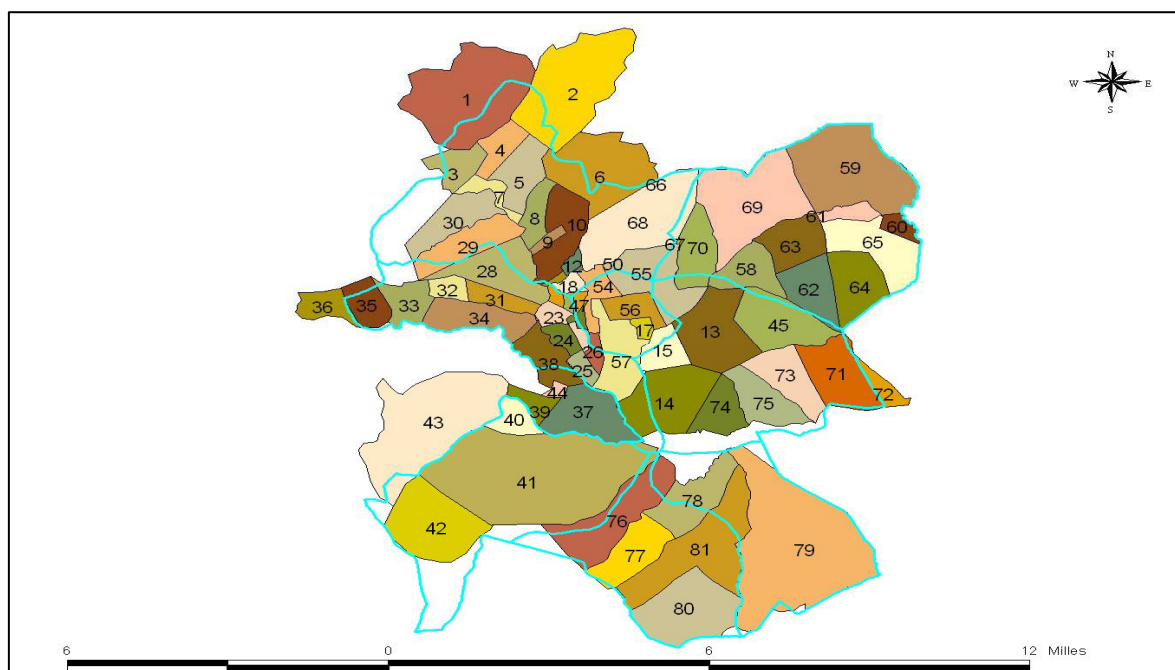


Figure 23 : répartition des douars de la délégation d'Haffouz (Calvez et Albouchi 2004)

77% des exploitants s'adonnent exclusivement aux activités agricoles. Les autres qui constituent 23% des exploitants exercent en parallèle avec l'activité agricole, d'autres activités tel que salarié agricole.

Secteurs	Surface SIG	Petite exploitation	terres domaniales louées	terres privées	terres domaniales	forêts
Aïn Baïdha	6175	3720				
Kit el oued	10984	6566				
Chrichira	10982	7656				
Ouled Kalfallah	6845	1973				
Jebbes	6226	4010				
Haffouz	1991	979				
Houffia	9090	2948				
Trozza sud	8798	4508				
Somme secteur	61091	32360				
Délégation	60737		14063	18811	18826	6600

Tableau 40 : répartition des surfaces en ha de la propriété des terres sur Haffouz

Les petites exploitations ne sont propriétaires que 18297 ha mais ils exploitent en location 14063 ha de terres domaniales.

La répartition de la surface agricole utile (SAU) est présentée dans le tableau ci-dessous.

Secteurs	Surface totale	Surface inculte	Surface labourable	Surface irrigable
Ain Baidha	3720	119	3578	573
Kit El Oued	6566	1178	5231	593
Chrichira	7656	886	6721	461
Ouled Kalfallah	1973	55	1801	46
Jebbes	4010	194	3880	106
Haffouz	979	24	970	345
Houffia	2948	222	2667	200
Trozza	4508	436	4090	222
Total	32360	3115	28937	2546

Tableau 41 : Répartition de la surface agricole utile (SAU) en ha (Enquête de structure Haffouz 2000-01)

Les terres incultes faisant partie des exploitations recensées sur la délégation de Haffouz couvrent 3115 ha soit 10% de la superficie totale. Ces terres incultes, d'après les déclarations des agriculteurs, sont de l'ordre de 1178 ha sur le secteur de Kit El Oued (zone montagneuse).

Toutefois, le tableau 40 ci-dessus montre bien la faiblesse du potentiel d'irrigation ou des superficies irrigables sur la délégation. La superficie irrigable représente uniquement 9% de la superficie agricole utile sur la délégation de Haffouz.

Bien que le secteur de Kit El Oued regroupe plus d'exploitations agricoles, c'est le secteur de Chrichira qui a la superficie la plus grande (25% de la superficie totale réparties sur 13% du total exploitations).

La superficie agricole moyenne par exploitation pour l'ensemble des secteurs est de 6,4 ha dont 5,7 ha sont de terre agricole utile avec une moyenne par exploitation de 2,7 ha d'arboriculture et 0,5 ha de terre irriguée.

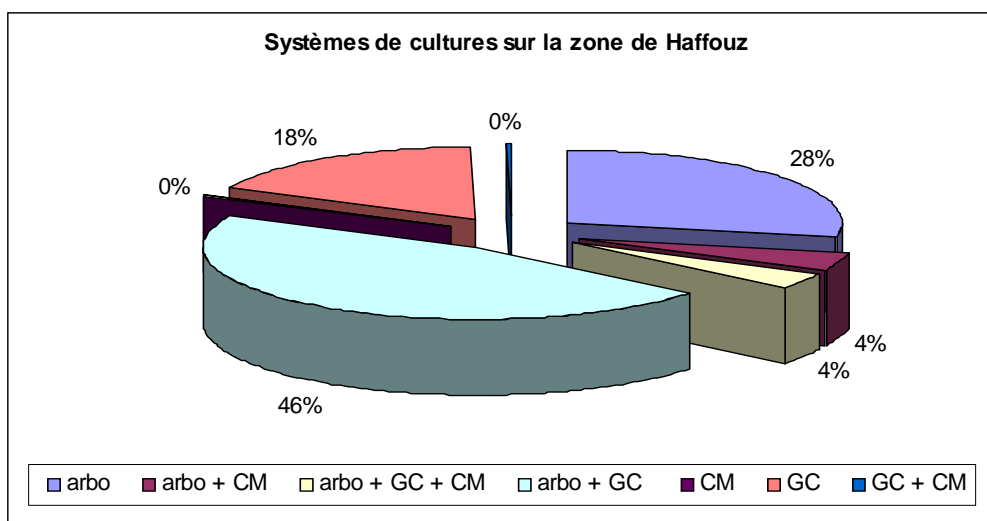
Pour l'occupation du sol, on obtient les valeurs présentées tableau 42 ci-après.

Cultures Secteurs	Grandes cultures		Arboriculture		Cultures maraîchères		Total cultures	Taux occupation (%)
	Sec	Irrigué	Sec	Irrigué	Hiver	Eté		
Ain Baidha	426	48	2400	523	157	77	3630	101
Chrichira	3379	22	1022	23	1	11	4457	66
O. Kalfallah	451	22	1231	32	1	29	1765	98
Jebbes	1613	17	1403	128	11	24	3195	82
Haffouz	218	7	229	306	15	28	803	83
Houffia	1372	104	981	62	9	99	2627	98
Kit El Oued	3205	54	845	428	67	34	4633	89
Trozza	2182	9	1379	224	24	77	3894	95
Total	12845	282	9489	1725	283	379	25003	86

Tableau 42 : Occupation du sol en ha (Enquête de structure Haffouz 2000-01)

Cultures	Superficie (ha)	Superficie (en % /Total)
Arboriculture	11214	45
en sec	9489	38
en irrigué	1725	7
Grandes cultures	13127	53
en sec	12845	51
en irrigué	282	1
Cultures maraîchères	662	3
d'hiver	283	1
d'été	379	2
Total cultures	25003	100
Total cultures en irrigué	2669	11
Total cultures en sec	22334	89

Tableau 43 : Répartition des cultures par conduite (Enquête de structure Haffouz 2000-01)



CM : Cultures maraîchères
GC : Grandes cultures

Figure 24 : répartition des systèmes de culture de la zone d'Haffouz (Albouchi 2004)

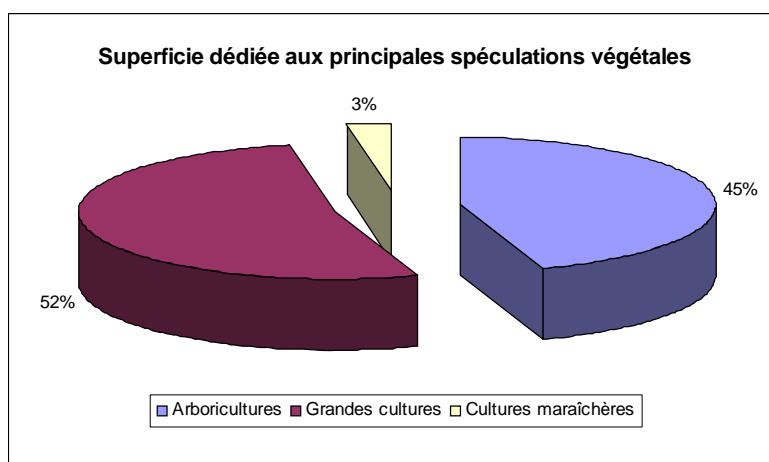


Figure 25 : répartition des superficies des principales spéculations agricoles de la zone d'Haffouz (Albouchi 2004)

Secteurs	Accès à l'eau	% /total exploitants	Superficie irrigable (ha)	%/ Superficie totale
Ain Baidh	355	40	565	15
Kit El Oued	532	83	590	9
Chrichira	101	42	387	5
Ouled Kalfallah	32	6	46	2
Jebbes	103	18	106	3
Haffouz	310	29	348	31
Trozza	85	19	275	8
Houffia	135	21	230	5
Total	1653	33	2546	8

Tableau 44 : Répartition des irrigants et des terres irriguées par secteurs administratifs

(Enquêtes de structure Haffouz 2000-01)

Les systèmes en sec, sont caractérisés par les grandes cultures (essentiellement de l'orge) et l'arboriculture (oliviers et amandiers). Pour les systèmes irrigués, il s'agit plutôt de bassins de production autour des points d'eau comme le lit de l'oued Merguellil : secteur Haffouz

Dans ce cas, on constate une certaine complémentarité entre système de cultures en sec et celui des cultures conduites en irrigué (11% en irrigué et 89% en sec).

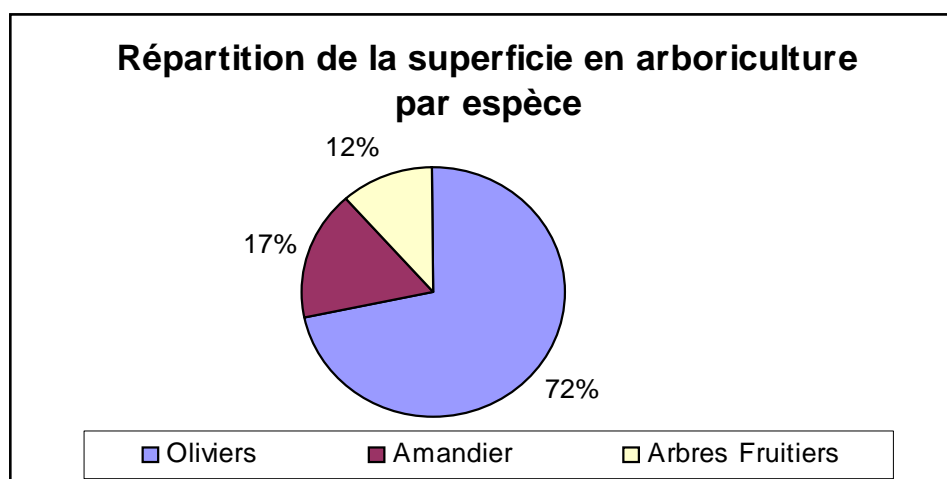


Figure 26 : répartition de la superficie en arboriculture de la délégation d'Haffouz (Albouchi 2004)

Les enquêtes donnent accès au nombre déclaré des exploitations qui ont accès à l'eau par type d'ouvrage et par secteur

La difficulté d'interprétation vient du fait que plusieurs exploitations peuvent avoir accès au même type d'ouvrage et inversement. Les chiffres surestiment le nombre d'ouvrages (commentaire oral CTV Haffouz).

Secteurs administratifs	Puits	Dont, puits équipés	Sondages	Dont, sondages équipés	Bornes d'irrigation	Pompes sur Oued
Ain Baidha	126	86	107	34	1	1
Kit El Oued	146	115	41	1	100	129
Chrichira	53	36	0	3	4	5
Ouled Kalfallah	18	8	3	0	3	0
Jebbes	50	44	0	0	7	2
Haffouz	158	151	0	0	0	1
Trozza	32	23	12	10	4	4
Houffia	84	45	4	2	0	0
Total	667	508	167	50	119	142

Tableau 45 : modes d'accès à l'eau (Enquêtes de structure Haffouz 2000-01)

Selon certains responsables au niveau du CTV Haffouz, la zone dénombre comme aménagement hydraulique ou source d'approvisionnement en eau, 11 sondages pour l'eau potable, 16 sondages pour l'irrigation, 2 barrages collinaires et 20 lacs collinaires

En conclusion, il faut remarquer que ce travail ne donne pas une vue complète de la zone à cause des points suivants :

- l'absence des grandes exploitations (nous supposons qu'il s'agit de sous-estimation de la taille des exploitations ou bien que les enquêtes ont concerné uniquement les petites et moyennes exploitations),
- la présence d'exploitations qui n'ont pas de la terre mais qui ont un troupeau principalement d'élevage ovin et d'autres exploitations qui ont de la terre mais aucune activité agricole (nous supposons qu'il s'agit de parcours ou bien de la terre donnée en location),
- certaines exploitations agricoles ont été déclarées plus d'une fois (des exploitations déclarées sur le nom du père et sur l'un ou plusieurs de ses enfants),
- suite à une rapide discussion avec un vulgarisateur de la production animale de CTV Haffouz, il paraît qu'il y a une sous-estimation du troupeau pour l'élevage en particulier celui de l'élevage ovin et de l'apiculture,
- l'enquête n'offre aucune idée sur les informations concernant le nombre de puits, des bornes d'irrigation et des AIC. Le nombre d'agriculteurs qui ont accès à l'eau par type d'aménagement, nous permet de déduire, par exemple le nombre des irrigants qui ont accès à des puits et non pas le nombre de puits.

4.5.5 Bilan des surfaces

Les emblavements fournis par les CTV concernent l'ensemble de chaque délégation et le tableau ci-dessous donne un bilan de 2004 en ha.

Délégation	Céréales en sec	Oliviers	Arboriculture	Parcours	Forêts
Haffouz	13000	9500	2000	3115	6600
Hajeb El Ayoun	10500	4300	3700	5450	5735
El Ala	8600	2500	9500	5400	1800
Oueslatia	29700	4300	3000	14400	33200
Kesra	8800	2400	500	4900	27400

Tableau 46 : emblavements sur les différentes délégations

Pour Makthar, on a pu isoler les données du secteur Essoulem qui est entièrement sur le bassin. On propose donc de calculer des surfaces agricoles au prorata des surfaces physiques définies plus haut. On obtient une nouvelle répartition :

Délégation	Céréales en sec	Oliviers	Arboriculture	Parcours	Forêts
Haffouz	7540	5510	1160	1807	3828
Hajeb El Ayoun	1365	559	481	709	746
El Ala	7052	2050	7790	4428	1476
Oueslatia	3861	559	390	1872	4316
Kesra	5720	1560	325	3185	17810
Essoulem (Makthar)	1300	250		1000	
Total	26838	10488	10146	13000	28176

Tableau 47 : emblavements retenus pour le water accounting

Dans ce tableau 47, n'apparaissent pas les 2 500 ha d'arboriculture irriguée de Haffouz.

Ailleurs, les autres superficies irriguées sont très faibles même si localement elles peuvent apporter un complément de revenu à l'exploitation agricole.

4.5.6 Bilan « eau bleue » - « eau verte » de la zone amont

Pour réaliser ce bilan, on a utilisé :

- les bilans du barrage El Haouareb (Kingumbi, 1999) et des informations sur les données de pompages des forages de la zone fournies par le CRDA de Kairouan,
- les surfaces agricoles et les bilans parcellaires calculées précédemment
- une estimation à 1,4 Mm³ l'eau évaporée par les lacs et barrages autres que El Haouareb

On a aussi considéré que le prélèvement d'eau bleue agricole ne se fait que par l'arboriculture d'Haffouz. et on aurait donc :

	Mm ³
Pluie	409
Eau verte consommée: cultures	134
Eau verte consommée: parcours	33
Eau verte consommée : forêts	28
Eau verte utile (production végétale valorisée)	197
Eau verte consommée: autre végétation naturelle (surfaces inaccessibles)	168
Eau bleue consommée: évaporation lacs et barrages (pertes)	7
Eau bleue prélevée pour l'irrigation	4.2
Eau bleue produite par l'irrigation	1.5
Eau bleue produite par les écoulements	23
Eau bleue produite par la recharge de nappe	22
Eau bleue exportée	34.2

Tableau 48 : bilan « eau verte » sur le bassin amont

La première constatation est que 175 Mm³ (168 +7) soit 43 % de l'apport, sont perdus en évaporation non productive.

Pour la partie productive de l'eau, les zones cultivées et en parcours représentant une surface totale de 605 km², et sur la base de ce bilan, valorisent 42 % de la pluie apportée au système par l'intermédiaire de l'eau verte consommée.

L'eau bleue produite (écoulements et recharge de nappe) ne représente que 12 % de l'apport pluviométrique ce qui est relativement faible. Si en plus, on prend en compte l'évaporation au

niveau du barrage El Haouareb, l'eau bleue valorisable ne représente seulement 7,8 % de cet apport.

On mesure ainsi, dans ces milieux semi-aride tout l'intérêt de l'agriculture en sec qui a un potentiel de mobilisation de l'eau bien supérieure à celui de l'agriculture irriguée qui passe obligatoirement par un stockage dans un réservoir naturel (nappe) ou artificiel (barrage) dont le rendement est faible (< 8 % dans notre cas).

Par contre, l'agriculture en sec utilise la capacité de stockage en eau des sols qui est très importante (600 Mm³ à l'échelle du bassin versant pour les terres cultivées, parcours et forêts sur la base d'une réserve utile de 100mm) et dont le rendement de stockage est bien supérieur (88 % pour des pluies journalières inférieures à 15 mm (Dridi, 2000))

Si on voulait remplacer la production céréalière en sec du bassin versant qui produit en moyenne 260 000 qt (sur la base de 10qt /h) par une production en irriguée, il faudrait emblaver 6500 ha (40 qt/ha) qui demanderaient 14 Mm³ (6500ha x 1500 m³ / 0,7 rendement) d'eau bleue soit 44 % de celle qui est exportée aujourd'hui.

On mesure ainsi tout l'intérêt de rechercher des variétés résistantes à la sécheresse.

Les flux au niveau du bassin amont sont présentés figure 27.

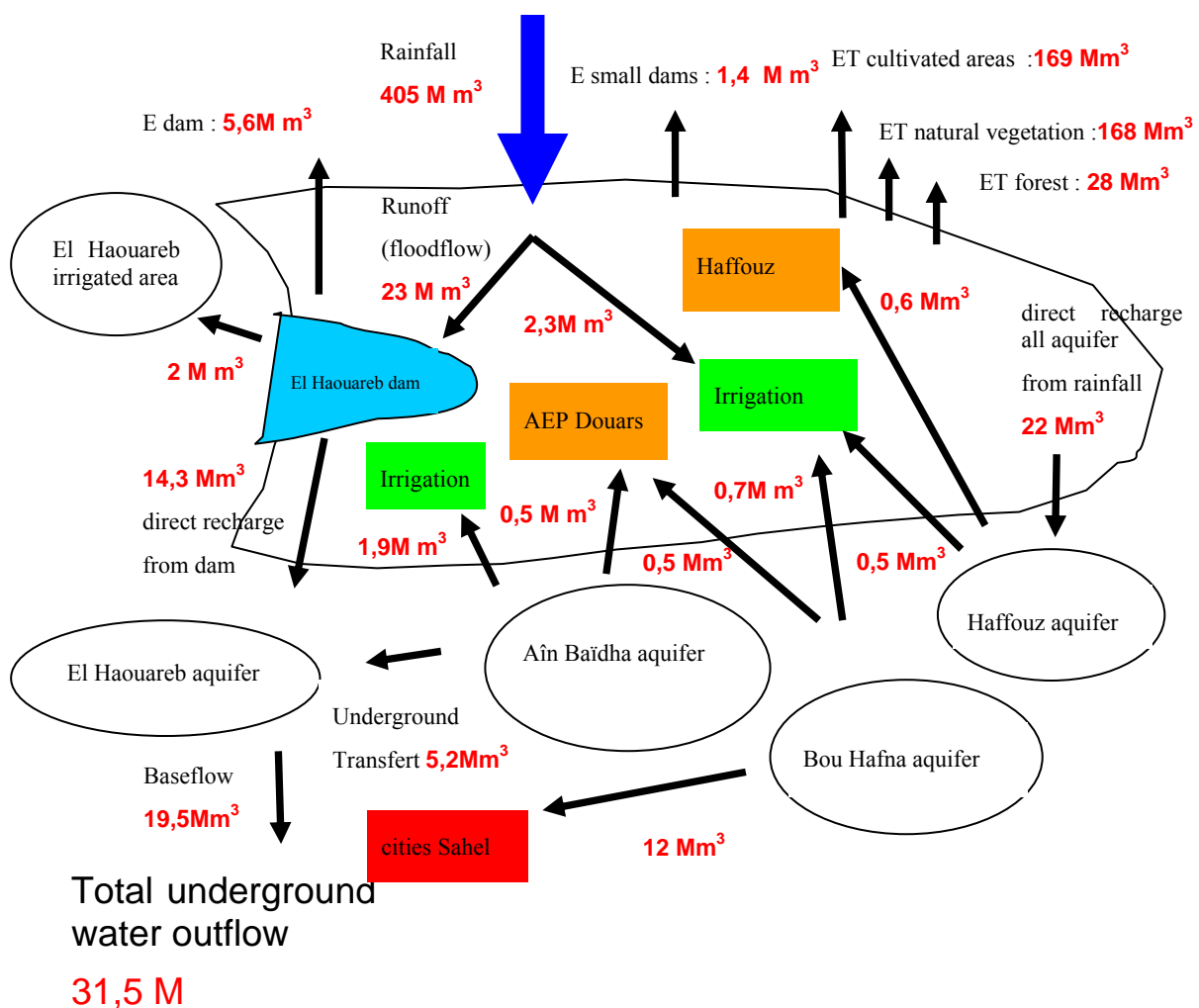


Figure 27 : bilan des flux moyens de la zone amont du bassin du Merguellil

Conclusion

La particularité de ce bassin amont est d'avoir un exutoire naturel souterrain qui alimente la nappe de plaine et qui a été favorisé par la construction du barrage. On a constaté, après 1989 une remontée de la nappe de plaine liée à la mise en eau du barrage.

De plus, un accident technique, à la construction, a créé une fuite naturelle du barrage (émergence) juste à l'aval de la retenue qui se perd très rapidement dans l'ancien lit de l'oued et réalimente aussi la nappe de plaine.

Le barrage a donc une gestion naturelle et la faiblesse des apports depuis sa mise en eau n'a pas permis de compléter cette gestion naturelle par une gestion programmée. Le barrage se retrouve pratiquement à sec chaque année.

Actuellement, les nappes de l'amont sont en équilibre ce qui veut dire que les apports ($36,3 \text{ Mm}^3$) couvrent encore les prélèvements ($35,6 \text{ Mm}^3$).

On avait aussi constaté que depuis la mise en eau, les apports au barrage avaient été réduits de 30 % consécutivement aux aménagements amonts (lacs collinaires et banquettes) réalisés.

Le danger actuellement pourrait venir d'une extension de ces aménagements qui remettraient en cause l'équilibre actuel.

Le déséquilibre serait encore plus important si les prélèvements urbains augmentaient car générant un abaissement des nappes ils entraîneraient de facto une diminution des flux souterrains donc de la nappe de plaine.

5 Global water accounting

Les options qui ont été prises tout au long du travail conduisent à considérer l'ensemble amont-aval comme un système sans exutoire naturel donc comme un bassin fermé.

Les exportations sont anthropiques et uniquement consacrées à l'eau potable qui, au total, représentent des volumes non négligeables (27 Mm³) par rapport aux prélèvements agricoles (42 Mm³).

Cette importance est accrue quand on constate qu'il s'agit d'exportations nettes alors que pour les prélèvements agricoles, 17 Mm³ reviennent à la nappe. Au final, les exportations nettes sont de même valeur.

Le tableau 48 ci-dessous retrace le bilan général.

Mm3		Upstream basin	Downstream basin	Basin
Area (km2)		1173	273	1446
Inflow	Direct rainfall	405	82	487
	Import/inflow from other basins		2	
	Lateral groundwater flows		19,5	
Gross inflow		405	103	487
Storage change	Aquifer	0	-15	-15
	Soil	0		0
Net inflow		405	118	502
Depletion	Process (Crop ETM irrigated)		48	48
	Process (Crop ET rainfed)	169	30	199
	Process (Crop ET forest)	28		28
	Process (Industry)			0
	Process (Drinking)	1	15	16
	Evaporation from reservoirs	7		7
	Evap from Nat.veget (low benef)	168	25	193
Total depleted		373	118	491
Outflow	Committed water			
	Non committed water	21,5		
	Export to other basins (drinking)	12		12
Total outflow		34	0	12
Available water		405	118	502
Aquifer overdraft		0	15	15
bilan		-2	0	-1

Tableau 48 : global water accounting ;

Le bilan s'équilibre au prix d'un déficit de la nappe de plaine de 15 Mm³.

Il peut être traduit en indicateurs tels que calculés dans le tableau 49 ci après.

Indicators		%	%	%
Depleted fraction	-of gross inflow	92	100	94
	-of available water	92	113	96
Process fraction	-of gross inflow	42	78	50
	-of depleted water	46	79	54
	-of available water	42	89	52
Irrigation	- of process depletion	0	52	18
	- of depleted water	0	41	10
	-of available water	0	46	9

Conclusion générale

Les outils développés ont permis de faire la part entre les différents types d'eau et en particulier, pour la production agricole, l'eau verte consommée, l'eau bleue prélevée et l'eau bleue produite.

En milieux semi-arides pour lesquels les écoulements sont très violents et sporadiques, les ressources en eau ne sont mobilisables qu'à travers l'existence de stockages qui peuvent être naturels (sols, nappes) ou artificiels (lacs et barrages).

Dans ces stockages, les sols jouent un rôle très important du fait que pratiquement, en toute période, la hauteur d'eau disponible dans le sol pour le stockage de l'eau de pluie est supérieure à la hauteur de l'épisode pluvieux. On arrive donc à des rendements de stockage qui dépassent les 80 %. Les hauteurs écoulées ou infiltrées et transformées en eau bleue ne dépassent pas 12 % de la pluviométrie.

Dans ce contexte, mobiliser l'eau verte stockée dans le sol présente un intérêt majeur.

Aujourd'hui, on constate que sur le bassin amont, l'eau verte assume pratiquement l'intégralité de la production agricole, sa participation dans la zone de plaine est aussi très importante. Dans les deux cas, plus de la moitié de la pluie est productive.

Pour l'eau bleue au niveau global, les prélèvements « eau potable et industrielle » (27 Mm³) et ceux liés à l'irrigation (34 Mm³) sont du même ordre de grandeur et sont réalisés presque exclusivement sur les nappes.

On peut considérer que l'équilibre entrées-sorties existe sur le bassin amont du fait de la stabilité constatée du niveau de celles-ci. Mais il faut remarquer qu'il y est fragile et qu'en particulier les simulations faites ont montré que le remplacement de la culture en sec par une culture en irrigué compromettrait totalement celui-ci et remettrait en cause les exportations d'eau potable vers la zone du Sahel.

A l'aval, le bilan est plus complexe. On constate que la nappe baisse mais son fonctionnement est mal connu. Les sorties vers la sebkra ne sont pas quantifiées. La production d'eau bleue par les systèmes d'irrigation est supérieure les années sèches à celle des années humides. Ceci s'explique par la mauvaise efficacité des réseaux d'irrigation. En irrigant plus, les pertes augmentent. Mais les volumes parvenant réellement à la nappe ne sont pas connus à ce jour.

Plus généralement, le bassin étant fermé et aucun exutoire naturel ne fonctionnant sauf la sebkra et la mer en cas d'évènement climatique extrême, la seule exportation d'eau bleue est liée au transfert des eaux urbaines depuis les nappes amont vers le Sahel. Les volumes exportés (12 Mm³) sont pratiquement équivalents au déstockage de la nappe de plaine.

Dans ce système déjà en déséquilibre, créer des lacs ou barrages collinaires sur le bassin amont n'aboutirait qu'à re-répartir la ressource et non à l'augmenter, réduisant par là même les disponibilités à l'aval.

La seule eau qui ne soit pas encore totalement mobilisée est l'eau verte. A cause de l'aversion aux risques des agriculteurs, les rendements en sec même les années humides sont limités. Un progrès important est donc possible sur ce créneau, en développant des variétés mieux résistantes à la sécheresse et en introduisant des mécanismes de gestion de cette eau verte (dry farming, jachère travaillée.....).

Reste que la part très importante d'eau potable, fournie par le bassin dans son ensemble, introduit une véritable concurrence sur les usages de l'eau et pourrait mettre les agriculteurs en grosses difficultés en cas de pénurie car l'eau potable est une priorité nationale.

BIBLIOGRAPHIE

ABID-KARRAY Jihène : Modélisation du bilan hydrique des cultures en association, application au cas olivier – pomme de terre ; Thèse de l'Agro-Montpellier ; soutenance prévue en 2005

ALBERGEL J., BOUFAROUA M., PEPIN Y. (1998) : Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires en climat semi-aride tunisien ; Bulletin du Réseau Erosion n°18, 1998, p 67-75

ALBOUCHI L. (2004) : Enquêtes de structure des exploitations agricoles de la zone pilote de la petite agriculture à caractère familial et social (PACFS), cas de la délégation de Haffouz, Gouvernorat de Kairouan.

BAIZE (2000) : Guide des analyses en pédologie, 2eme édition, INRA Editions, 257 pages.

BARBERY et MOHDI, (1983) : Carte des ressources en sols de la Tunisie, Feuille de Kairouan ; Direction des sols de Tunis ; 49 pages.

BARON C, PEREZ P, MARAUX F (1996) Guides d'utilisation de SARRAMET, SARRABIL, SARRAZON. Doc Multigraphiées. Ed. CIRAD, Montpellier.

BASTET ET AL. (1998) : Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT) : Une analyse bibliographique ; Etude et gestion des sols (Afes)

BELL et VAN KEULEN (1995) : Soil pedotransfert functions for four mexican soils ; Soil Science Society Of America Journal ; 59 (3): 865-871 ; ISSN : 0361-5995

BEN HAMOUDA N. (1999) Stratégies des agriculteurs irriguants confrontés à une situation de pénurie d'eau. Cas d'un périmètre irrigué privé dans le bassin du Merguellil en Tunisie Centrale; Master of Science du CIHEAM de Montpellier, 159 p+ A

BEN MANSOUR H. (2000) Apport de la télédétection pour l'étude de la dynamique des aménagements de conservation des eaux et du sol (banquettes) et impact sur le régime hydrologique d bassin versant du Merguellil (Tunisie centrale); Mémoire de DAA Traitement de l'Information Spatialisée, ENSA Rennes, 60 p + A

BOIVIN P. (1990) : Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katoure (Basse Casamance, Sénégal) : variabilité spatiale et relation avec les caractéristiques pédologiques. Thèse Université Paris VI, Ed. ORSTOM Paris, Série Etudes et Thèses, 226 pages.

BOURGUIGNON Pierre (2002) : Application de lois de pédo-transferts à la détermination de la réserve utile des sols de la plaine de Kairouan, stage post-grade de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, décembre 2002.

BRUAND et TESSIER, (2000) : Water retention properties of the clay in soils devdloped on clayey sediments : significance of parentat materiel and soil history ; European Journal of Soil Science ; 51, 679-688 ; ISSN : 1351-0754.

CHAMPION Jean (2002): Itinéraires techniques et calendriers cultureux pour les cultures de melon et de piments sur la plaine de Kairouan, positionnement par rapport aux pluies. Stage de PFE Ecole Supérieure d'Agronomie de PURPAN, décembre 2002.

DELHOMME, (1978) : La théorie des variables généralisées ; Extrait du bulletin du BRGM (2) III 4-1978

- DOORENBOS J., KASSAM A.H.(1987) – Réponse des rendements à l'eau - Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, n°33 - Rome : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 1987, 235 p.
- DHAOUI Y. (1998) Etude hydrologique et modélisation pluie-débit sur le bassin versant de Zebbes (Centre Tunisie); Projet de fin d'études Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis; 70 p
- DRIDI B. (2000) : Impact des aménagements sur les ressources en eau de surface du bassin du Merguellil en amont d'El Haouareb; Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg, 2000
- EAGLEMAN JR ((1971) An experimentally derived model for actual evapotranspiration. Agricultural Meteorology, 8 (4) p 385-394
- ELLEUCH H., BEN NOSRA Y. (1999) Application du modèle CEQUEAU pour l'estimation des apports dans le bassin versant de l'oued Merguellil; Projet de fin d'études Ingénieur en binôme Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis et Institut National Agronomique de Tunis, 110 p. + A.
- FALKENMARK M . (1995) : Land-water linkages – A synopsis in land and water integration and river basin management . FAO Land and Water Bulletin N°1: 15-16 FAO, Rome, Italy
- FALKENMARK M., FOX P., PERSSON G., ROKSTROM J. (2001): Water harvesting for upgrading of rainfed agriculture SIWI Report 11, Stockholm International Water Institute, Stockholm, Sweden.
- FEUILLETTE S. (1998) Délégations de Chébika et Haffouz- Caractéristiques principales de l'ensemble des exploitations agricoles dans la zone minimale d'étude du projet Mergusie en aval du barrage d'El Haouareb; Note technique Mergusie.
- FEUILLETTE S. (2001) : Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressources usages par les systèmes multi-agents ; application à la nappe de Kairouan, Tunisie Centrale; Thèse de doctorat de l'université de Montpellier II.
- GASCUEL-ODOUX C., BOIVIN P., (1994) : Variability of variograms and spatial estimates due to soil sampling : a case study, GEODERMA, 62 (1994) p 165-182
- GHARB S. (2001) : Quantification des performances des infrastructures de distribution de l'eau sur les périmètres irrigués sous forages de la plaine de Kairouan PFE Institut National Agronomique de Tunis
- KADI A. (2002) : Modèle de simulation régional agricole et aide à la décision pour une gestion stratégique de la demande en eau, cas de la plaine de Kairouan en Tunisie ; Master of Science, CIHEAM, sept 2002.
- KONERT et VANDENBERGHE (1997) : Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis : a solution for the underestimation of the clay fraction ; Sedimentology ; 44 ; 523-535.
- KINGUMBI A. (1997) Caractérisation morphométrique du bassin versant du Merguellil ; Application à la simulation des écoulements de surface et à l'érosion; Projet de fin d'étude Ingénieur HA, ESIER; 64 p + A
- KINGUMBI A (1999) Bilan et modélisation du système El Haouareb. Analyse des bilans superficiels et souterrains de la retenue d'El Haouareb et modélisation de son réservoir; Mémoire de DEA Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis; 109 p + A
- LARDILLEUX S. (2000) Fonctionnement de périmètres irrigués à différents stades d'évolution en Tunisie Centrale: Analyse des irrigations par modélisation du bilan hydrique; Mémoire d'ingénieur ENGEES; 76 p + A

- LEBRETON L. (1999) Un système d'information à références spatiales comme outil d'aide à la gestion intégrée de l'eau en Tunisie centrale; Mémoire de DAA en environnement et gestion de l'espace à l'ENSA Toulouse, 118 p + A
- LEBRETON L. (2000) *MERGUSIG* : Un Système d'Information Géographique comme aide à la gestion intégrée de l'eau en Tunisie Centrale; Manuel de l'utilisateur de MERGUSIG
- MOLDEN D. (1997) : Accounting for water use and productivity. SWIM paper 1, IWMI, Colombo, Sri Lanka, 16 p
- MONAT F. (2000) Mise en place d'un système d'information géographique sur le bassin du Merguellil; Rapport technique
- MONAT F. (2000) Mise en place d'un système d'information géographique sur le bassin du Merguellil; Mode d'emploi du SIG Mergusie amont
- NAZOU MOU Y. (2002): Impact des barrages sur la recharge des nappes en zone aride Etude par modélisation numérique sur le cas de Kairouan ; Thèse de doctorat l'Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis : Université de Tunis El Manar.
- PABIOT F. (1999) Optimisation de la gestion d'un barrage collinaire en zone semi-aride; Mémoire de DAA en génie hydrologique de l'ENSA Rennes, 87 p + A
- PEYREMORTE P, (1986) : Simplification de l'estimation approximative des besoins d'arrosage: le Bilaneaumètre, Eau et aménagement de la région provençale, N°43, 1986
- RABHI J. (1997) : Etude hydrologique & Aménagements du Haut Bassin versant du Merguellil; Projet de fin d'étude Institut National Agronomique de Tunis; 72 p + A
- REZIG M. (2004): Etude de l'efficience des systèmes traditionnels d'irrigation sur la plaine de Kairouan, Mastère Agronomie Institut National Agronomique de Tunis
- ROCKTRÖM J. (1997) : On-farm agro-hydrological analysis of the sahelien yield crisis : rainfall partitioning, soil nutrients and water use efficiency of pearl millet. PhD-Thesis in Natural resources management, department of Systems Ecology, Stockholm univervisty, Stockholm, Sweden.
- RIOU C. (1980) Une formule empirique simple pour estimer l'évapotranspiration potentielle moyenne en Tunisie - Cahiers ORSTOM, série hydrologie, volume XVII, n°2, 1980 - p.130-137
- SABLAYROLLES C. (2001) : Evaluation des performances des infrastructures d'exhaure des périmètres irrigués de la plaine de Kairouan, PFE ENSHM. Grenoble.
- SECKLER D. (1992) : Irrigation policy, management and monitoring in developing countries. In Roundtable on Egyptian Water Policy, Conference Proceedings, Water Research Center, Ministry of Public Works and Water Resources, Cairo, Egypt.
- SNANE M.H., TOUMI M. CHAABOUNI Z. (1991) : Un modèle d'optimisation des pluies pour les oliveraies, SECHERESSE 1991, 2, p12 à 16
- THAMEUR A (2004) : Evolution des aménagements de CES sur le bassin du Merguellil, données CRDA Kairouan, communication électronique.
- VAN ALPHEN et al. (2001) : Combining pedotransfer functions with physical measurements to improve the estimation of soil hydraulic properties ; GEODERMA ; 103 (1-2): 133-147 ; ISSN : 0016-706.

Annexe 1

Détermination de la réserve en eau des sols de la plaine de Kairouan

Résumé du mémoire post-grade de Pierre Bourguignon EPFL (2002)

La méthodologie a été construite selon deux approches complémentaires : la mise au point d'une méthode opérationnelle d'accès à la réserve utile du sol et ensuite la spatialisation de cette grandeur à l'échelle de la plaine.

La notion de 'réservoir utilisable' est distinguée de la notion de 'réserve utile'. Un réservoir est un volume de porosité qui peut contenir durablement de l'eau (propriété relativement permanente d'un horizon ou d'un sol). Une réserve est une quantité d'eau à un moment donné, dans le réservoir et par conséquent est une notion dynamique.

Le Réservoir Utilisable Maximum correspond au volume d'eau compris entre la teneur en eau à la capacité au champ et celle au point de flétrissement permanent et ceci pour une épaisseur de sol donnée.

Le RUM d'un sol peut être exprimé sous la forme d'une tranche d'eau en mm afin d'être comparé aisément à des précipitations, des doses d'irrigation, etc. La formule du RUM correspond ainsi à :

$$\text{RUM de chaque horizon} = E * Da * (Wc - Wpf)$$

E : épaisseur de l'horizon

Da : densité apparente

Wc et Wpf : teneur en eau pondérale respectivement de la capacité au champ et du point de flétrissement permanent

Ce sont donc ces deux teneurs en eau qui seront nécessaires à l'étude en cours et plusieurs méthodes sont utilisables pour leur détermination.

La plus courante est celle utilisant les dispositifs de type presse à plaque ou presse de Richards sur échantillons remaniés ou mottes non remaniées au laboratoire. L'analyse d'un grand nombre d'échantillons se révèle coûteuse et longue. C'est pourquoi des méthodes d'estimation indirectes, basées sur l'établissement de corrélations entre les teneurs en eau et des paramètres des sols plus facilement accessibles, ont été développées. Ce sont les fonctions de pédotransfert (FPT).

Ces relations constituent un ensemble hétérogène d'outils d'estimation des propriétés de rétention en eau des sols.

Il existe deux grands types de FPT :

Les FPT ponctuelles estiment une teneur en eau à un potentiel de pression donné. Le calcul d'une FPT ponctuelle correspond à la régression multiple entre la teneur en eau à un potentiel de pression donné (variable dépendante) et les différentes caractéristiques du sol simples à obtenir (variables explicatives). Elles s'expriment par une fonction du type :

$$Y = a_1 C_1 + a_2 C_2 + a_3 C_3 + a_i C_i + b$$

dans laquelle C_i est une caractéristique pédologique, a_i , le coefficient correspondant, b , l'ordonnée à l'origine et Y , la teneur en eau

Les FPT continues estiment les paramètres d'un modèle mathématique utilisé pour décrire la courbe $h(\theta)$. Le calcul d'une FPT continue correspond à la régression multiple entre les paramètres du modèle (variables dépendantes) et les différentes caractéristiques du sol simples à obtenir (variables explicatives). La difficulté de détermination de ces FPT continues vient du fait qu'elles utilisent des paramètres de calage mathématique qui n'ont pas de sens physique et donc pas de lien avec les propriétés des sols.

Dans notre cas, le choix a été fait de calculer des FPT ponctuelles et ce uniquement pour les valeurs de teneurs en eau au potentiel de pression caractéristiques nécessaires pour l'étude :

- FPT pour la teneur en eau à la capacité au champ
- FPT pour la teneur en eau au point de flétrissement permanent.

Ces deux teneurs en eau dépendent des propriétés de l'espace poral.

Dans la plaine de Kairouan et dans la zone d'étude, nous sommes en présence de sols alluviaux qui ont tous la même origine géologique. Ils diffèrent essentiellement par les conditions de vitesse de l'eau de l'oued au moment de leur mise en place. Les éléments de différenciation vont donc être : la granulométrie (et notamment des particules fines), l'activité chimique des particules (c'est à dire de leur capacité d'échange cationique (CEC) et la densité apparente. C'est pourquoi, nous avons retenu ces trois caractéristiques pédologiques comme variables explicatives lors du calcul des FPT ponctuelles.

Pour la granulométrie, deux méthodes peuvent être mises en œuvre classiquement : la granulométrie laser et la granulométrie par sédimentation.

La granulométrie laser donne la distribution de tailles des particules physiques basée sur le principe de la mesure de la diffraction du rayon par les bordures des particules. La technique par sédimentation suppose quant à elle des particules sphériques. Il est donc probable que les résultats obtenus par sédimentation et granulométrie laser marquent des différences nettes, en particulier en présence de matériaux solubles tels que les carbonates.

Dans l'expérimentation, les FTP ont été calculées avec les deux types de mesures de granulométrie et comparées.

Pour la CEC afin de faire la différence entre les argiles minéralogiques et texturales ; il a été proposé d'utiliser non pas la CEC du sol mais la CEC divisée par le pourcentage de particules fines. Ce rapport permet d'obtenir la CEC à quantité de particules fines égales et est donc le reflet d'un changement de réactivité des constituants.

Pour la densité apparente, elle dépend de la teneur en eau au moment du prélèvement et différents auteurs (Bruand et Tessier, 2000), Boivin (1990), ont proposé des méthodes de mesures pour approcher la porosité intra-agrégats qui est une donnée physique intéressante pour les FTP. Dans notre cas et vu les contraintes de terrain, seule une trentaine de mottes d'horizons de surface a été collectée pour en mesurer la densité apparente.

Grâce à l'utilisation des fonctions de pédotransfert, spatialiser le RUM revient à spatialiser les propriétés physiques retenues.

Pour ce faire, nous disposons de la carte pédologique (Barbery 1983) définissant 20 unités de sols dans la zone d'étude.

Afin d'accéder à la variabilité des paramètres physiques à l'intérieur de ces unités et entre ces unités, il a été décidé de mettre en œuvre la méthode de géostatistique basée sur la théorie de variables aléatoires régionalisées (Matheron in Delhomme 1978).

L'utilisation du logiciel Géostat-PC mise au point par Boivin (1990) a permis de définir le schéma d'échantillonnage, d'obtenir et d'analyser le variogramme moyen et directionnel (fréquences des classes de particules de tailles 0-2 μ m, 2-4 μ m, 4-6 μ m, 6-8 μ m, 8-10 μ m et CEC/0-10 μ m).

Enfin pour la spatialisation des données, deux choix étaient possibles :

1° : Interpoler par krigeage d'abord les caractéristiques du sol (CEC, fréquences des particules fines) puis appliquer les FPT à ces données interpolées afin d'obtenir la spatialisation des teneurs en eau.

2° : Appliquer d'abord les FPT aux caractéristiques du sol pour obtenir les teneurs en eau à chaque point d'échantillonnage puis interpoler par krigeage ces teneurs en eau pour obtenir leur spatialisation.

Or, SINOWSKI *et al.* (1997) ont montré que les erreurs sont significativement plus faibles sur les teneurs en eau en utilisant la première méthode. Ce sont donc les caractéristiques du sol qui ont été interpolées par krigeage.

Les FPT ont ensuite été appliquées aux valeurs des caractéristiques pédologiques interpolées par krigeage. Pour chaque nouveau point issu de l'interpolation, on a obtenu ainsi une estimation de la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement.

Pour mettre en œuvre ce travail, la première étape a été une analyse de la zone d'étude qui avait pour but la vérification des limites de la zone d'étude, la vérification des hypothèses nécessaires à l'utilisation de la géostatistique, le choix du schéma d'échantillonnage, des mailles de la stratification, de la profondeur d'échantillonnage.

La carte pédologique (1/100000) de 1981 de la feuille de Kairouan faite par BARBERY et MOHDI et les photos aériennes (1/60000) année 1990, après numérisation, ont servi de support pour la mise en place de l'échantillonnage de départ : nombre et taille des unités pédologiques.

Les premières sorties sur le terrain ont permis de vérifier les informations indiquées sur ces documents : les limites des unités pédologiques par sondage tarière et celle de la zone d'étude, notamment en fonction de la position du relief et des oueds dont la position peut fortement varier en fonction des crues.

Pour construire le schéma d'échantillonnage en vue du positionnement des points de prélèvement tarière, on a utilisé un échantillonnage aléatoire stratifié défini à l'aide du logiciel Géostat-PC (Boivin, 1990B).

Sachant qu'il faut 150 points minimum (Gascuel-Oudoux and Boivin, 1994) pour obtenir des variogrammes représentatifs, qu'il y a un peu moins de 20 unités pédologiques sur la carte pédologique de référence, que le schéma gigogne utilisé pour permettre d'obtenir un nombre de couples suffisant comprend 4 points de sondage, on arrive à un minimum de 2 séries de 4 points par unités pédologiques $\rightarrow 20*2=40$ et $40*4=160$ points de sondage tarière.

Pour l'implantation des trous de tarière, on a utilisé le schéma gigogne positionné aléatoirement selon 8 possibilités dans lequel 20 m séparent A et B ; 100 m séparent B et C ; 400 m séparent C et D.

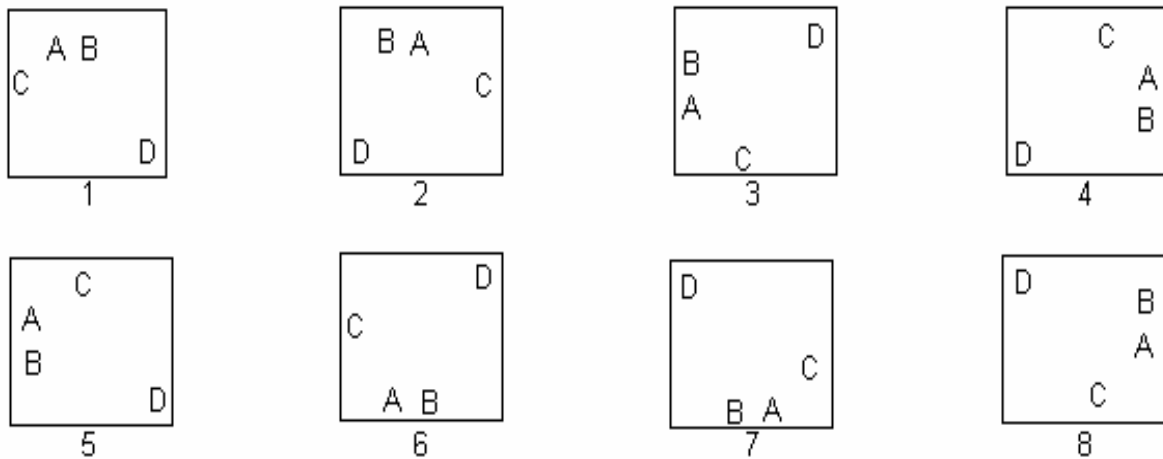


Figure 1 : schéma gigogne de l'implantation des trous de tarière

Ces trous de tarières ont été complétés par 13 fosses pédologiques destinées à une description de profil, un prélèvement de terre et une motte par horizon de surface, et par unité pédologique.

Pour chaque sondage tarière un prélèvement de terre a été effectué tous les 20 centimètres jusqu'à 1,20 mètre. Au final, 149 points ont été échantillonnés dont 136 sondages tarière (réduction de la zone d'étude : relief et oueds) et 13 fosses pédologiques ce qui a produit 816 échantillons de sol pour analyses.

Une représentation des unités telles que définies dans la carte pédologique de Barbery est présentée figure 1.

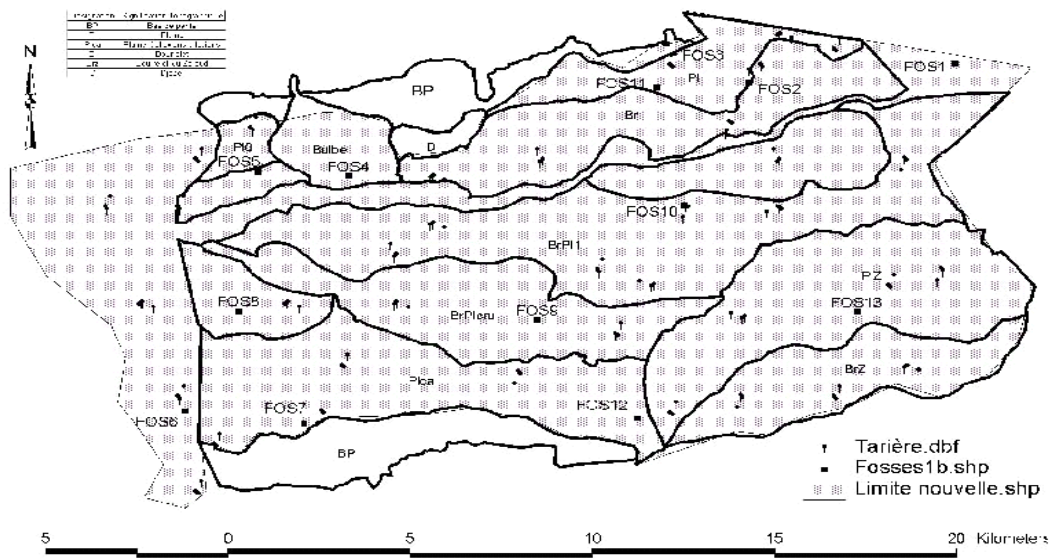


Figure 2 : carte pédologique de Barbery pour la plaine de Kairouan

Les granulométries ont été faites par granulométrie laser (FRITSCH 'Laser Particle Sizer' A22) au Centre d'Analyse Minéralogique de l'Université de Lausanne et à l'EPFL par sédimentation. Les CEC et les mesures de pF ont également été faites à l'EPFL. Enfin, les densités apparentes sur mottes ont pu être mesurées au laboratoire d'hydrologie de l'INRGREF (Institut National de Recherche en Génie Rural, Eau et Forêts) de Tunis.

Les résultats bruts donnés par le granulomètre laser correspondent au spectre des fréquences de tailles des particules pour la fraction inférieure à 300µm. Ces résultats sont recalculés pour correspondre à la fraction 0-2mm (la fraction 300µm-2mm étant séparée par tamisage et pesée). Puis les fréquences des classes de particules de tailles 0-2µm, 2-4µm, 4-6µm, 6-8µm, 8-10µm et 0-10µm sont calculées. Ces différentes classes de tailles ont été utilisées pour tester différentes FPT.

De plus, Konert et Vandenberghe (1997) qui ont utilisé le même granulomètre laser (A22) ont montré que le pourcentage d'argile mesuré par sédimentation correspondait à la fraction 0-8µm mesurée par l'A22. On essaiera également de vérifier la relation entre le pourcentage d'argile mesuré par sédimentation et la fraction 0-8µm mesurée par l'A22. Il est donc envisageable de tester plusieurs classes de tailles de particules en tant que variables explicatives afin d'améliorer les FPT.

Les descriptions de profils pédologiques confirment que ces sols sont développés dans des matériaux récents, les alluvions fluviatiles, mis en place par transport puis sédimentation en milieu aqueux. Ces sols sont donc des sols alluviaux fluviatiles typiques. Ceci leur confère une grande variété de types au niveau granulométrique allant du sol argilo-limoneux au sol sableux. En corollaire, les CEC varient de 3 à 30 cmol/Kg de sol.

Pour la granulométrie, un premier travail a été de s'assurer de la reproductibilité de la mesure au granulomètre laser. Le passage régulier d'un témoin toutes les 10 analyses a permis, malgré quelques séries inutilisables écartées car immédiatement détectables sur le graphique de distribution des fréquences de tailles, de montrer que la reproductibilité de mesure est bonne. L'histogramme de la figure 2 montre les fréquences de tailles obtenues sur le témoin. On obtient un coefficient de variation très faible pour les classes 0-2 microns, 0-8 microns et 8-50 microns.

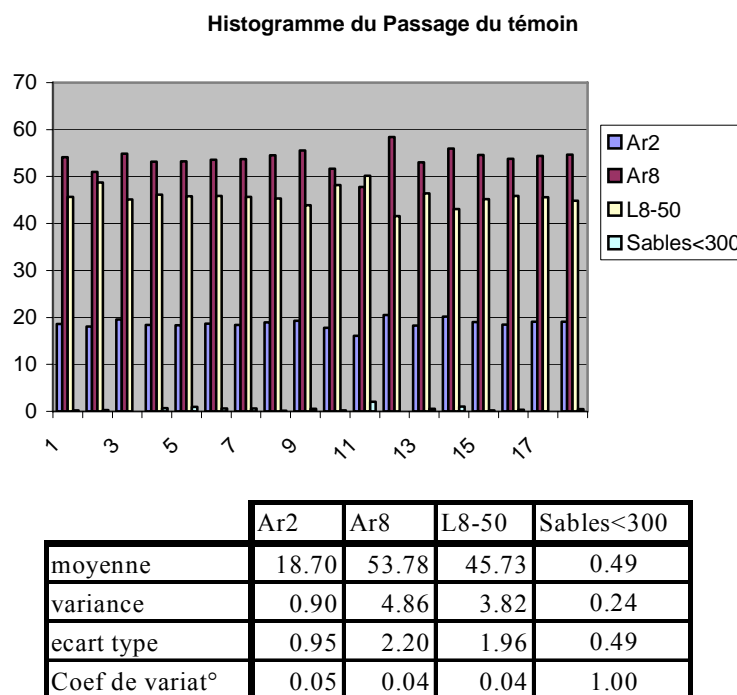


Figure 3 : histogramme du passage de témoin :Bourguignon (2003)

Pour la comparaison entre granulomètre laser et sédimentation, les résultats obtenus sur les échantillons de calibrage de Tunisie lors de la corrélation entre différentes classes laser et sédimentation $<2\mu\text{m}$ sont nettement moins bons (figure 10) que ceux de Konert et Vandenberghe (1997) qui obtiennent un coefficient de corrélation $r=0,939$ et une équation de droite $Y=0,999-1,146$ pour la corrélation entre l'analyse laser $<8\mu\text{m}$ et l'analyse par sédimentation de la classe $<2\mu\text{m}$. Le meilleur coefficient de corrélation (0,894) est trouvé pour l'analyse laser $<5\mu\text{m}$ mais la pente la plus proche de 1 (0,6826) correspond à l'analyse laser $<10\mu\text{m}$. En revanche, les ordonnées à l'origine sont toujours très éloignées de 0 et la plus faible est de 15 pour l'analyse laser $<5\mu\text{m}$.

Plusieurs explications sont alors à envisager bien que le manque de temps n'ait pas permis leur vérification : mauvais fonctionnement du granulomètre laser, puissance de la dispersion par ultrasons, destruction de la matière organique par l'eau oxygénée pour la sédimentation

Quoiqu'il en soit, le laser donne un signal reproductible reflétant la granulométrie. On a donc testé l'emploi de différentes gammes de tailles de particules pour le calcul des FPT ponctuelles. La question de la relation entre la granulométrie laser et la granulométrie par sédimentation reste ouverte et n'est pas explicable dans le cadre de ce travail.

Pour le calcul des fonctions de pédotransfert, le raisonnement n'a été conduit, à ce jour, que pour le seul horizon de surface (manque de disponibilité du laboratoire)

Un lot de 30 échantillons a été utilisé pour le calage des FPT : 13 fosses pédologiques et 17 sondages tarière répartis sur la zone d'étude et les analyses suivantes ont été réalisées : CEC, granulométrie laser, granulométrie par sédimentation, et densité apparente sur motte qui sont les variables explicatives.

La teneur en eau au pF 2,5 a été retenue comme variable dépendante pour calibrer la FPT de la teneur en eau à la capacité au champ et la teneur en eau au pF 4,2 celle de la teneur en eau au point de flétrissement.

Le calcul des FPT a été fait par régression linéaire multiple entre les teneurs en eau, mesurées sur les 30 échantillons de calage et les valeurs des caractéristiques pédologiques utilisées comme variables explicatives (CEC, Fréquences des différentes classe de tailles de particules, Da).

A fin de comparaison, les FPT ont été dans un premier temps calculées en effectuant la régression avec la CEC (CEC/[argile sédimentation]) et le pourcentage d'argile mesuré par sédimentation (2 variables explicatives). Dans un deuxième temps les FPT ont été calculées en effectuant la régression avec la CEC (CEC/[particules laser 0-10 μ]) et différentes gammes de tailles de particules données par la granulométrie laser.

Ces différentes régressions ont été calculées, comparées, puis utilisées en fonction de la qualité de l'estimation des teneurs en eau qu'elles permettaient d'obtenir c'est à dire en fonction du coefficient de régression.

Une série de densités apparentes a été employée pour tenter d'améliorer les FPT mais n'est pas utilisée pour la spatialisation du RUM.

Le tableau 1 ci-après présentent les principaux résultats des différents calculs de régression linéaire.

Teneurs en eau Variables explicatives	à la capacité au champ		au point de flétrissement	
	Coefficients des variables	Coefficients de régression	Coefficients des variables	Coefficients de régression
CEC/Arg Sed	26,215	0,940	16,712	0,935
Arg Sed	0,566		0,47	
b	-13,97		-10,223	
CEC/Arg 0-10	39,083	0,958	24,925	0,937
Arg 0-2	0,558		0,681	
Arg 2-4	1,957		-0,305	
Arg 4-6	-6,958		1,403	
Arg 6-8	17,598		-4,397	
Arg 8-10	-6,411		4,602	
b	-15,027		-16,604	
CEC/Arg 0-10	41,339	0,959	26,846	0,938
Arg 0-2	0,695		0,798	
Arg 2-4	1,431		-0,753	
Arg 4-6	-6,385		1,891	
Arg 6-8	18,718		-3,443	
Arg 8-10	-7,645		3,548	
Da	5,093		4,337	
b	-23,372		-23,697	

Tableau 1 : Coefficient FPT

On constate que les coefficients de régression pour les FPT utilisant différentes gammes granulométriques laser sont meilleurs que les coefficients de régressions des FPT utilisant le pourcentage d'argile par sédimentation. Ce résultat plaide indirectement pour la pertinence de la détermination au laser

Cette amélioration est modeste eus égard au nombre de variables utilisées. Il faut remarquer cependant que la régression obtenue en utilisant la granulométrie classique est déjà très bonne : aucune amélioration spectaculaire n'était possible de ce fait. L'amélioration obtenue est donc intéressante dans la problématique globale des FPT. En effet, les régressions publiées sont généralement nettement moins bonnes que les nôtres (ex : $R=0,811$ pour VAN ALPHEN *et al.* (2001)) et la question de leur amélioration est donc souvent posée. De ce point de vue, le potentiel de la granulométrie laser nous semble à considérer. De plus cette approche originale ne demande pas de surcoût de travail par rapport à la méthode par sédimentation.

Si on analyse les variations de la fraction Argile 0-10 et celle de la CEC on trouve respectivement des valeurs qui vont de 20 à 75 % pour l' Argile 0-10 et de 5 à 30 cmole/kg pour le CEC.

La spatialisation des caractéristiques du sol choisies pour les FPT a été réalisée à partir de l'analyse des différents variogrammes des classes de texture.

Sur les variogrammes moyens (figures 11), les variables sont régionalisées pour une portée de 2500 à 6000 mètres. La variance augmente à partir de 15000 mètres. L'observation du variogramme directionnel ouest-->est (figure 12) montre cette tendance tout comme le variogramme directionnel sud-ouest-->nord-est.

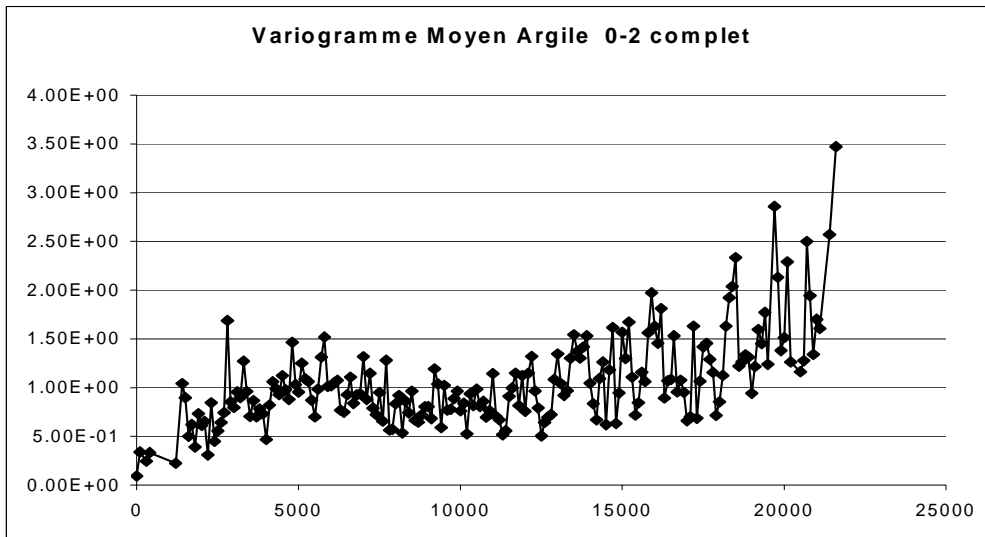


Figure 4 : variogramme moyen argile 0-2 Bourguignon (2003)

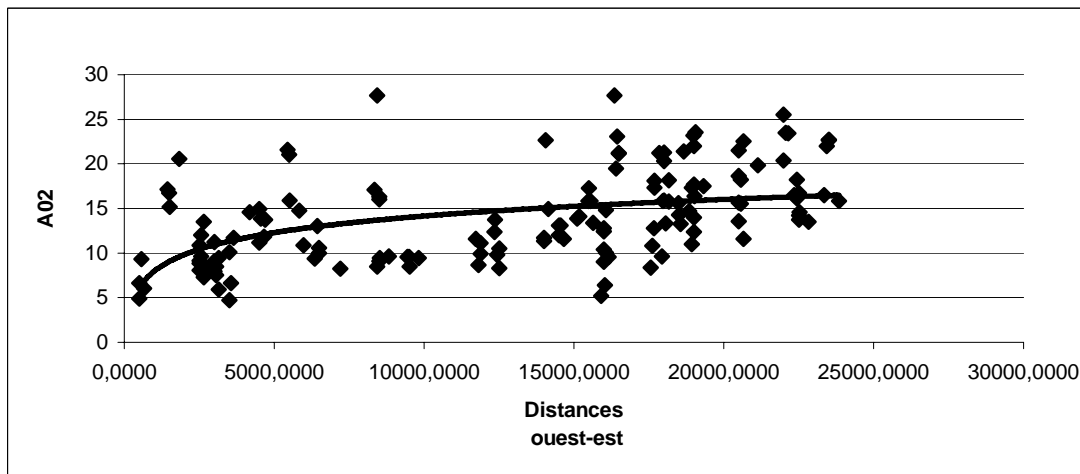


Figure 5 : variogramme directionnelle Ouest-est, argile 0-2 Bourguignon (2003)

Les variogrammes aux grandes distances des variables ‘particules laser 0-2 μm ’, 2-4 μm , 4-6 μm et 6-8 μm présentent une régionalisation d’une portée d’environ 3100 mètres, une légère dérive aux grandes distances et une structure périodique qui apparaît à 8000 mètres (diminution de la variance de corrélation à proximité de cette distance). Cette structure est certainement un artefact dû à l’espacement Nord-Sud entre les oueds et les djebels.

Les variogrammes considérés à la demi-longueur pour les différentes caractéristiques sont tous quasiment identiques et les variogrammes directionnels montrent, tous les quatre, une variance proche de la variance expérimentale. On peut donc utiliser le variogramme moyen pour décrire la structure de la variable.

Les modèles ont tous été ajustés sur la base des variogrammes correspondant à chaque variable ayant comme pas de distance maximum 7500 mètres.

Les modèles des différentes variables sont répertoriés dans le tableau 7 ci-dessous :

a : palier en pourcentage de la variance expérimentale

b : portée en m

pépité : effet de pépité en pourcentage de la variance expérimentale

Variables	Modèle	paramètres du modèle			Test de validation croisée	
		a	b	pépite	Erreur moyenne	rapport
Argile 0-2	sphérique	0.7655	5206.748	0.2351	3.40E-02	0.825
Argile 2-4	sphérique	0.7733	6036.785	0.2071	5.10E-03	1.01
Argile 4-6	sphérique	0.6681	5227.833	0.308	1.26E-03	0.93
Argile 6-8	sphérique	0.6914	2875.955	0.292	1.02E-02	0.97
Argile 8-10	sphérique	0.7927	2507.121	0.2666	1.19E-02	1.01
CEC/0-10	sphérique	0.9298	2841.63	0.174	5.50E-05	1.05

Tableau 2 : modèles de différentes variables Bourguignon (2003)

L'ensemble des erreurs moyennes lors des tests de validation croisée est proche de 0. L'ensemble des rapports moyen d'erreur d'estimation (réelle) par l'écart type d'estimation (calculé) (rapport dans le tableau 7) est proche de 1. L'analyse des graphiques (non présentés) présente dans l'ensemble une bonne répartition du nuage de point du graphique valeurs observées/valeurs estimées autour de la droite de pente 1 et passant par 0.

Annexe 2

Productivité de l'eau à l'échelle de la parcelle pour différentes cultures

Cultures d'été	Melon de saison			Tomate			piment d'été		
Année	Sèche	Moyenne	Humide	Sèche	Moyenne	Humide	Sèche	Moyenne	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Besoins d'irrigation en mm	540	520	480	600	600	540	450	450	450
apport brut en mm	1011	1101	1104	1103	1224	1196	872	993	1058
apport net en mm	1015	1108	1082	1108	1231	1174	864	1004	1045
conso productive en mm	606	606	606	667	667	667	481	481	481
taux consommation brut	0,60	0,55	0,55	0,60	0,54	0,56	0,55	0,48	0,46
taux consommation net	0,60	0,55	0,56	0,60	0,54	0,57	0,56	0,48	0,46
production en kg/ha	25000	25000	25000	60000	60000	60000	8300	8300	8300
productivité nette en kg/m3	2,46	2,26	2,31	5,42	4,87	5,11	0,96	0,83	0,79
productivité /besoin d'irrigation en kg/m3	4,63	4,81	5,21	10,00	10,00	11,11	1,84	1,84	1,84

Tableau 1

Cultures d'hiver	Fève			Pomme de terre			blé d'hiver		
Année	Sèche	Moyenne	Humide	Sèche	Moyenne	Humide	Sèche	Moyenne	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Besoins d'irrigation en mm	160	60	40	350	270	230	330	200	190
apport brut en mm	451	402	433	773	758	755	739	640	687
apport net en mm	444	376	391	778	766	733	744	647	665
conso productive en mm	212	212	212	411	411	411	426	426	426
taux consommation brut	0,47	0,53	0,49	0,53	0,54	0,54	0,58	0,67	0,62
taux consommation net	0,48	0,56	0,54	0,53	0,54	0,56	0,57	0,66	0,64
production en kg/ha	12000	12000	12000	17500	17500	17500	3500	3500	3500
productivité nette en kg/m3	2,70	3,19	3,07	2,25	2,28	2,39	0,47	0,54	0,53
productivité /besoin d'irrigation en kg/m3	7,50	20,00	30,00	5,00	6,48	7,61	1,06	1,75	1,84

Tableau 2

Cultures associées	melon préc. + piment			Maraîchage d'été			blé + piment d'été		
Année	Sèche	Moyenne	Humide	Sèche	Moyenne	Humide	Sèche	Moyenne	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Besoins d'irrigation en mm	770	700	640	600	600	540	750	660	620
apport brut en mm	1485	1487	1450	1197	1318	1281	1451	1419	1416
apport net en mm	1460	1463	1440	1202	1325	1259	1460	1421	1421
conso productive en mm	895	895	895	667	667	667	899	899	899
taux consommation brut	0,60	0,60	0,62	0,56	0,51	0,52	0,62	0,63	0,64
taux consommation net	0,61	0,61	0,62	0,55	0,50	0,53	0,62	0,63	0,63
production en kg/ha	30000	30000	30000	60000	60000	60000	11500	11500	11500
productivité nette en kg/m3	2,06	2,05	2,08	4,99	4,53	4,77	0,79	0,81	0,81
productivité /besoin d'irrigation en kg/m3	3,90	4,29	4,69	10,00	10,00	11,11	1,53	1,74	1,85

Tableau 3

Cultures pérennes	olivier irrigué			Arboriculture			Olivier + pastèque saison		
	Sèche	Moyenne	Humide	Sèche	Moyenne	Humide	Sèche	Moyenne	Humide
Année									
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Besoins d'irrigation en mm	450	400	300	1000	920	850	800	670	640
apport brut en mm	872	916	827	1718	1716	1673	1411	1331	1350
apport net en mm	833	909	803	1677	1677	1647	1372	1314	1326
conso productive en mm	450	450	450	1108	1108	1108	845	845	845
taux consommation brut	0,52	0,49	0,54	0,64	0,65	0,66	0,60	0,64	0,63
taux consommation net	0,54	0,50	0,56	0,66	0,66	0,67	0,62	0,64	0,64
production en kg/ha	2500	2500	2500	6000	6000	6000	26500	26500	26500
productivité nette en kg/m3	0,30	0,28	0,31	0,36	0,36	0,36	1,93	2,02	2,00
productivité /besoin d'irrigation en kg/m3	0,56	0,63	0,83	0,60	0,65	0,71	3,31	3,96	4,14

Tableau 4

Annexe 3

Productivité de l'eau à l'échelle de la zone aval et bilan « eau bleue – eau verte » pour différentes cultures

Année	Melon de saison			Tomate			piment d'été		
	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Irrigation en mm	540	520	480	600	600	540	450	450	450
apport brut en mm	1282	1362	1345	1404	1525	1467	1098	1219	1284
apport net en mm	1287	1370	1323	1409	1533	1445	1090	1230	1271
conso productive en mm	606	606	606	667	667	667	481	481	481
taux consommation brut	0,47	0,44	0,45	0,47	0,44	0,45	0,44	0,39	0,38
taux consommation net	0,47	0,44	0,46	0,47	0,43	0,46	0,44	0,39	0,38
production en kg/ha	25000	25000	25000	60000	60000	60000	8300	8300	8300
productivité nette en kg/m3	1,94	1,83	1,89	4,26	3,91	4,15	0,76	0,67	0,65
productivité /besoin d'irrigation en kg/m3	4,63	4,81	5,21	10,00	10,00	11,11	1,84	1,84	1,84
eau verte consommée en mm	162	276	306	162	276	306	162	279	306
eau bleue prélevée en mm	1102	1061	980	1224	1224	1102	918	918	918
eau bleue produite en mm	562	548	500	624	631	562	468	473	468
irrigation déclarée en mm	500	500	500	0	0	0	440	400	280

Tableau 1 : productivité de l'eau en périmètre irrigué gravitairement

Année	Fève			pomme de terre			blé d'hiver		
	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Irrigation en mm	160	60	40	350	270	230	330	200	190
apport brut en mm	506	423	447	894	852	835	853	709	753
apport net en mm	499	397	405	899	859	813	858	717	731
conso productive en mm	212	212	212	411	411	411	426	426	426
taux consommation brut	0,42	0,50	0,47	0,46	0,48	0,49	0,50	0,60	0,57
taux consommation net	0,43	0,53	0,52	0,46	0,48	0,51	0,50	0,59	0,58
production en kg/ha	12000	12000	12000	17500	17500	17500	3500	3500	3500
productivité nette en kg/m3	2,40	3,02	2,97	1,95	2,04	2,15	0,41	0,49	0,48
productivité /besoin d'irrigation en kg/m3	7,50	20,00	30,00	5,00	6,48	7,61	1,06	1,75	1,84
eau verte consommée en mm	162	289	306	162	278	306	162	289	306
eau bleue prélevée en mm	327	122	82	714	551	469	673	408	388
eau bleue produite en mm	167	62	42	364	291	239	343	229	198
irrigation déclarée en mm	280	140	100	0	0	0	170	150	300

Tableau 2 : productivité de l'eau en périmètre irrigué gravitairement

Année	melon précoce +piment			Maraîchage d'été			blé + piment d'été		
	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Irrigation en mm	770	700	640	600	600	540	750	660	620
apport brut en mm	1751	1729	1671	1404	1525	1467	1711	1648	1631
apport net en mm	1726	1705	1661	1409	1533	1445	1720	1649	1636
conso productive en mm	895	895	895	667	667	667	899	899	899
taux consommation brut	0,51	0,52	0,54	0,47	0,44	0,45	0,53	0,55	0,55
taux consommation net	0,52	0,53	0,54	0,47	0,43	0,46	0,52	0,55	0,55
production en kg/ha	30000	30000	30000	60000	60000	60000	11500	11500	11500
productivité nette en kg/m3	1,74	1,76	1,81	4,26	3,91	4,15	0,67	0,70	0,70
productivité /besoin d'irrigation en kg/m3	3,90	4,29	4,69	10,00	10,00	11,11	1,53	1,74	1,85
eau verte consommée en mm	162	289	306	162	276	306	162	289	306
eau bleue prélevée en mm	1571	1429	1306	1224	1224	1102	1531	1347	1265
eau bleue produite en mm	801	729	666	624	631	562	781	712	645
irrigation déclarée en mm	600	600	350	440	400	280	610	550	310

Tableau 3 : productivité de l'eau en périmètre irrigué gravitairement

Cultures pérennes	olivier irrigué			Arboriculture			olivier + pastèque saison		
	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide
Année	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Irrigation en mm	450	400	300	1000	920	850	800	670	640
apport brut en mm	1098	1117	978	2221	2178	2100	1813	1668	1671
apport net en mm	1059	1109	954	2180	2139	2074	1774	1651	1648
conso productive en mm	450	450	450	1108	1108	1108	845	845	845
taux consommation brut	0,41	0,40	0,46	0,50	0,51	0,53	0,47	0,51	0,51
taux consommation net	0,42	0,41	0,47	0,51	0,52	0,53	0,48	0,51	0,51
production en kg/ha	2500	2500	2500	6000	6000	6000	26500	26500	26500
productivité nette en kg/m3	0,24	0,23	0,26	0,28	0,28	0,29	1,49	1,61	1,61
productivité /besoin d'irrigation en kg/m3	0,56	0,63	0,83	0,60	0,65	0,71	3,31	3,96	4,14
eau verte consommée en mm	162	289	306	162	289	306	162	278	306
eau bleue prélevée en mm	918	816	612	2041	1878	1735	1633	1367	1306
eau bleue produite en mm	468	416	312	1041	958	885	833	703	666
irrigation déclarée en mm	200	150	135	720	600	600	500	500	400

Tableau 4 : productivité de l'eau en périmètre irrigué gravitairement

Année	Melon de saison			Tomate			piment d'été		
	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Irrigation en mm	540	520	480	600	600	540	450	450	450
apport brut en mm	1095	1182	1179	1197	1318	1281	872	993	1058
apport net en mm	1100	1190	1157	1202	1325	1259	864	1004	1045
conso productive en mm	606	606	606	667	667	667	481	481	481
taux consommation brut	0,55	0,51	0,51	0,56	0,51	0,52	0,55	0,48	0,46
taux consommation net	0,55	0,51	0,52	0,55	0,50	0,53	0,56	0,48	0,46
production en kg/ha	25000	25000	25000	60000	60000	60000	8300	8300	8300
productivité nette en kg/m3	2,27	2,10	2,16	4,99	4,53	4,77	0,96	0,83	0,79
productivité /besoin d'irrigation en kg/m3	4,63	4,81	5,21	10,00	10,00	11,11	1,84	1,84	1,84
eau verte consommée en mm	162	276	306	162	276	306	162	279	306
eau bleue prélevée en mm	915	881	814	1017	1017	915	692	692	692
eau bleue produite en mm	375	368	334	417	424	375	242	247	242
irrigation déclarée en mm	500	500	500	0	0	0	440	400	280

Tableau 5 : productivité de l'eau en périmètre irrigué sous pression

Année	Fève			pomme de terre			blé d'hiver		
	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Irrigation en mm	160	60	40	350	270	230	330	200	190
apport brut en mm	451	402	433	773	758	755	739	640	687
apport net en mm	444	376	391	778	766	733	744	647	665
conso productive en mm	212	212	212	411	411	411	426	426	426
taux consommation brut	0,47	0,53	0,49	0,53	0,54	0,54	0,58	0,67	0,62
taux consommation net	0,48	0,56	0,54	0,53	0,54	0,56	0,57	0,66	0,64
production en kg/ha	12000	12000	12000	17500	17500	17500	3500	3500	3500
productivité nette en kg/m3	2,70	3,19	3,07	2,25	2,28	2,39	0,47	0,54	0,53
productivité /besoin d'irrigation en kg/m3	7,50	20,00	30,00	5,00	6,48	7,61	1,06	1,75	1,84
eau verte consommée en mm	162	289	306	162	278	306	162	289	306
eau bleue prélevée en mm	271	102	68	593	458	390	559	339	322
eau bleue produite en mm	111	42	28	243	198	160	229	160	132
irrigation déclarée en mm	280	140	100	0	0	0	170	150	300

Tableau 6 : productivité de l'eau en périmètre irrigué sous pression

Année	melon précoce +piment			Maraîchage d'été			blé + piment d'été		
	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Irrigation en mm	770	700	640	600	600	540	750	660	620
apport brut en mm	1485	1487	1450	1197	1318	1281	1451	1419	1416
apport net en mm	1460	1463	1440	1202	1325	1259	1460	1421	1421
conso productive en mm	895	895	895	667	667	667	899	899	899
taux consommation brut	0,60	0,60	0,62	0,56	0,51	0,52	0,62	0,63	0,64
taux consommation net	0,61	0,61	0,62	0,55	0,50	0,53	0,62	0,63	0,63
production en kg/ha	30000	30000	30000	60000	60000	60000	11500	11500	11500
productivité nette en kg/m3	2,06	2,05	2,08	4,99	4,53	4,77	0,79	0,81	0,81
productivité /besoin d'irrigation en kg/m3	3,90	4,29	4,69	10,00	10,00	11,11	1,53	1,74	1,85
eau verte consommée en mm	162	289	306	162	276	306	162	289	306
eau bleue prélevée en mm	1305	1186	1085	1017	1017	915	1271	1119	1051
eau bleue produite en mm	535	486	445	417	424	375	521	484	431
irrigation déclarée en mm	600	600	350	440	400	280	610	550	310

Tableau 7 : productivité de l'eau en périmètre irrigué sous pression

Année	Cultures pérennes			Arboriculture			olivier + pastèque saison		
	olivier irrigué			Sèche	Moy.	Humide	Sèche	Moy.	Humide
Pluie en mm	180	301	365	180	301	365	180	301	365
Irrigation en mm	450	400	300	1000	920	850	800	670	640
apport brut en mm	943	979	874	1875	1860	1806	1536	1436	1450
apport net en mm	904	971	850	1834	1821	1780	1497	1419	1426
conso productive en mm	450	450	450	1108	1108	1108	845	845	845
taux consommation brut	0,48	0,46	0,51	0,59	0,60	0,61	0,55	0,59	0,58
taux consommation net	0,50	0,46	0,53	0,60	0,61	0,62	0,56	0,60	0,59
production en kg/ha	2500	2500	2500	6000	6000	6000	26500	26500	26500
productivité nette en kg/m3	0,28	0,26	0,29	0,33	0,33	0,34	1,77	1,87	1,86
productivité /besoin d'irrigation en kg/m3	0,56	0,63	0,83	0,60	0,65	0,71	3,31	3,96	4,14
eau verte consommée en mm	162	289	306	162	289	306	162	278	306
eau bleue prélevée en mm	763	678	508	1695	1559	1441	1356	1136	1085
eau bleue produite en mm	313	278	208	695	640	591	556	471	445
irrigation déclarée en mm	200	150	135	500	500	500	500	500	500

Tableau 8 : productivité de l'eau en périmètre irrigué sous pression