

SOMMAIRE

Liste des figures
 Liste des tableaux
 Liste des sigles et abréviations
 Liste des symboles employés dans les formules.

1	INTRODUCTION	10
1.1	LE PROBLEME DE LA SALINITE ET DE LA SODICITE EN AGRICULTURE	10
1.1.1	LES ORIGINES DE LA SALINITE ET DE LA SODICITE.	10
1.1.2	LES IMPACTS DE LA SALINITE ET DE LA SODICITE SUR LES SOLS ET LES CULTURES.	11
1.1.3	LES SOLUTIONS POUR LUTTER CONTRE LA SALINITE ET LA SODICITE.	11
1.2	LA PROBLEMATIQUE DU PERIMETRE IRRIGUE DU TADLA	11
1.3	LE PROJET DE RECHERCHE (CIRAD – CEMAGREF – IAVH2 – ORMVAT)	12
1.4	OBJECTIFS ET DEMARCHE DE L'ETUDE.	12
1.4.1	OBJECTIFS.	12
1.4.2	DEMARCHE.	13
2	CADRE DE L'ETUDE (DESCRIPTION DU PERIMETRE IRRIGUE DE BENI-AMIR).	15
2.1	CADRE GEOGRAPHIQUE.	15
2.2	CADRE ADMINISTRATIF.	15
2.2.1	L'ORMVAT	15
2.2.2	L'AGENCE DE BASSIN.	17
2.3	CADRE ENVIRONNEMENTAL.	17
2.3.1	PLUVIOMETRIE – TEMPERATURES – EVAPOTRANSPIRATION :	17
2.3.2	LA RESSOURCE EN EAU DE SURFACE :	20
2.4	LES POTENTIALITES HYDRO-AGRIQUES DU PERIMETRE IRRIGUE DE BENI-AMIR	22
2.4.1	LE RESEAU DE DISTRIBUTION :	22
2.4.2	LE RESEAU DE DRAINAGE :	24
2.4.3	LES TYPES DE CULTURES PRATIQUEES.	24
3	ANALYSE DE LA GESTION DE L'EAU DE SURFACE ET DES EAUX SOUTERRAINES SUR LE PERIMETRE DE BENI-AMIR.	27
3.1	REGLES OFFICIELLES DE GESTION ET DE DISTRIBUTION DE L'EAU.	27
3.1.1	ALLOCATION DU VOLUME GLOBAL DE LA CAMPAGNE POUR LE PERIMETRE DE BENI-AMIR.	27
3.1.2	REPARTITION DU VOLUME A L'ECHELLE DES SECONDAIRES	27
3.1.3	DE LA DEMANDE DE L'AGRICULTEUR VERS L'ELABORATION D'UN TOUR D'EAU (DISTRIBUTION A L'ECHELLE DES TERTIAIRES):	27
3.1.4	PARAMETRES DE CONTROLE POUR L'ETABLISSEMENT D'UN TOUR D'EAU (MODE DE DETERMINATION DU BAREME).	29
3.1.5	LA TELEMEASURE.	30
3.2	LES INDICATEURS DE PERFORMANCE DU RESEAU.	33
3.2.1	ETUDE THEORIQUE SUR LES INDICATEURS.	33
3.2.2	ANALYSE DES RESULTATS.	36
3.3	BILANS HYDRIQUES SUR LA CAMPAGNE 99-00.	46
3.3.1	LES DIFFERENTS TYPES DE BILAN.	46
3.3.2	ANALYSE DES BILANS.	50
3.4	SALINITE DES EAUX SOUTERRAINES ET STRATEGIES D'UTILISATION DE LA RESSOURCE.	61

3.4.1	EVOLUTION DE LA NAPPE ET DEVELOPPEMENT DU POMPAGE.	61
3.4.2	STRATEGIES DE POMPAGE.	74
3.4.3	INDICATEURS DE QUALITE DES EAUX ET DES SOLS.	79

4 LA MODELISATION INTEGREE.

4.1	LE MODELE INTEGIS.	81
4.1.1	PRESENTATION ET FONCTIONNEMENT DU MODELE.	81
4.1.2	UTILISATION DU MODELE DANS LE CADRE DU PERIMETRE DE BENI-AMIR.	85
4.2	INTERET ET CONCEPTION D'UN MODELE INTEGRE DANS LE CADRE DU PERIMETRE DE BENI-AMIR.	95
4.2.1	EVALUATION DE L'INTERET D'UN MODELE INTEGRE.	95
4.2.2	VERS LA CONCEPTION D'UN MODELE INTEGRE.	95

5 CONCLUSION

Bibliographie

Annexes

Liste des termes employés dans les formules.

c :	Facteur d'ajustement.
dfc :	Débit fictif continu (m ³ /s/ha).
es- e(z) :	Déficit de pression de vapeur saturante.
f(u) :	Fonction vent, $f(u) = 1 + 0,864u^2$ (avec u^2 = vitesse du vent (m/s)
Ir :	Inigation par le réseau
Ir(t) :	Inigation par le réseau au temps t (mm).
m :	Moyenne des températures pour le mois le plus froid (°C).
p :	Pourcentage de la superficie totale emblavée par la culture considérée.
q :	Débit à distribuer (m ³ /s).
s :	Constante de proportionnalité de $\frac{de_a}{dT_a}$ (hPa/K)
t :	Durée du tour d'eau (choisie en concertation) (j).
Alloc :	Dotation à l'hectare (H/ha).
CUC :	Coefficient d'Uniformité de Christiansen.
DH(t) :	Déficit hydrique au temps t (mm).
Dp(t) :	Drainage profond au temps t (mm).
DPR :	Delivery Performance Ratio.
Ece :	Conductivité électrique du sol (dS/m).
EC(t) :	Valeur de la salinité du sol tolérée par la culture pour garantir un rendement potentiel fixé (100% dans notre cas).
ECw :	Conductivité électrique de l'eau d'irigation (dS/m).
ETo :	Evapotranspiration de référence (mm / j)
Etp(t) :	Evapotranspiration réelle potentielle de la culture au temps t (mm).
ETr :	Evapotranspiration de la culture considérée (mm).
ETr :	Evapotranspiration réelle (mm).
Etr(t) :	Evapotranspiration réelle de la culture au temps t (mm).
Kc :	Coefficient cultural.
LF :	Fraction de lessivage.
LR :	Fraction de lessivage nécessaire pour maintenir les sols à une valeur de conductivité électrique inférieure au niveau de tolérance de la culture ECt, par des techniques d'irigation de surface classiques.
M :	Moyenne des températures pour le mois le plus chaud (°C).
N :	Le nombre des observations.
Np :	Nombre de puits total.
P :	Précipitations (mm)
P(t) :	Pluviométrie utile au temps t (mm).
Pa :	Précipitations annuelles (mm).
Paj :	Pourcentage de volume ajouté par rapport au volume prévu.
Pan :	Pourcentage de volume annulé par rapport au volume prévu.
Pe :	Précipitations efficaces (mm).
Pp :	Estimation des volumes pompés (m ³).
Q :	Radiations nettes équivalentes (mm / j)
RDU :	Réserve difficilement utilisable (mm).
RFU :	Réserve facilement utilisable (mm).
RH(t) :	Réserve Hydrique au temps t (mm).
RU :	Réserve utile (mm).
RWS :	Delivery Performance Ratio.
S :	Superficie équivalente à la demande (ha).
Sp :	Superficie dominée par un puit (ha).
Vol.pomp(hors réseau) :	Volume pompé estimé(dans la zone non alimentée par le réseau) (m ³).

Vol.pomp(réseau) : Volume pompé estimé(dans la zone alimentée par le réseau) (m3).

X_n : Valeur de l'observation.

γ : Constante Psychométrique (hPa/K)

$\bar{X}$: La moyenne des observations.

Liste des Figures

Figure 1 : Représentation schématique des échanges de sel entre la solution du sol et le complexe d'échange. Les sels parviennent dans la solution du sol par l'intermédiaire des eaux d'irrigation, des remontées capillaires et des dissolutions alors qu'ils sortent du système par lessivage et précipitation. (Schéma d'après Kuper, 1997).	10
Figure 2 : Evolution de la pluviométrie annuelle de 1951 à 2000.	18
Figure 3: Fréquence cumulée des valeurs de pluviométrie annuelle (1951-2000).	18
Figure 4 : Pluviométrie intra annuelle de la campagne 99-00 et de la moyenne des 50 dernières années.	19
Figure 5: Comparaison entre moyenne des températures mensuelles pour la campagne 99-00 et de la moyenne des minimas et maximas entre 1951 et 1995.	19
Figure 6: Variations mensuelles des précipitations et évaporations sur la campagne 99-00.	20
Figure 7: Variations intra-annuelles de la salinité des eaux de l'oued Oum-Er-Rbia au cours de la campagne 99-00.	21
Figure 8: Evolution des volumes lâchés en tête du canal principal de Beni-Amir de 1978 - 2000.	21
Figure 9: Plan du réseau principal et secondaire du périmètre irrigué de Beni-Amir .(Données Laboratoire SIG ORMVAT).	23
Figure 10: Assolements réalisés par zone de prise secondaire pour la campagne 99-00 sur le périmètre irrigué de Beni-Amir.	25
Figure 11: Evolution du DPR à l'échelle des prises secondaires (exemples de P8 - P20 amont - P17 - P12aval) (30/06/00 au 11/12/00).	37
Figure 12: Pourcentage des volumes annulés (Pan) et volumes ajoutés (Paj) par rapport aux volumes prévus à l'échelle des prises secondaires. (Exemples des prises P12aval et P8).	38
Figure 13 : Comparaison entre le RWS (réseau + pluie) et le RWS (réseau uniquement) à l'échelle du périmètre. Campagne 99-00.	40
Figure 14 : Evolution intra-annuelle du RWS à l'échelle des 4 prises secondaires. (Campagne 99-00).	41
Figure 15: RWS calculé par période (septembre - février et mars - août) pour les 4 prises étudiées.	42
Figure 16 : Consommations annuelles du réseau par hectare. (Campagne 99-00). En bleu foncé : les prises situées le plus en amont du réseau. En bleu ciel : les prises situées le plus en aval du réseau.	43
Figure 17: Schéma simplifié des variations de Kc en fonction du cycle de développement de la culture. (D : début de cycle - F : fin de cycle).(FAO, 1977).	47
Figure 18: Schéma du bilan avec réservoir sol.	48
Figure 19: Bilan hydrologique (sauf pluviométrie) mensuel à l'échelle du réseau (Campagne 99-00).	50
Figure 20: Situation des prises étudiées dans l'échelles des consommations annuelles par hectare (Campagne 99-00).	51
Figure 21 (a) et (b) : Bilans hydriques mensuels des prise P8 et P17 pour la campagne 99-00.	53
Figure 22: (a) et (b) : Bilans hydriques mensuels des prises P12aval et P20amont pour la campagne 99-00.	54
Figure 23 (a) et (b) : Bilan hydrique des sols sur les tertiaires TG5B et TG7E (Campagne 99 - 00).	57
Figure 24: Répartition temporelle des apports d'irrigation à l'échelle d'une exploitation de P20amTG3B (Sahri Khalifa)(Campagne 99- 00).	58
Figure 25: Bilan hydrique à l'échelle d'une exploitation sur P20amTG3B. Campagne 99-00.	59
Figure 26: Evolution du nombre de puits fonctionnels entre 1975 et 2000 dans le périmètre de Beni-Amir. Sources ORMVAT, et Belhacène et Chayat, 1992.	61
Figure 27: Répartition spatiale des agriculteurs et densité des puits par zone de prise secondaire (Données CDA, 2001).	62
Figure 28: Localisation des points de suivi . En rouge (réseau 1975-1991) - En Bleu (réseau 1995-2001).	63
Figure 29: Répartitions spatiales de la piézométrie (interpolations à partir des valeurs du réseau de suivi ORMVAT). Figure (a) : 1975 - Figure (b) : 1980.	65
Figure 30: Répartitions spatiales de la piézométrie (interpolations à partir des valeurs du réseau de suivi ORMVAT). Figure (a) : 1985 - Figure (b) : 1990.	66
Figure 31: Evolution de la piézométrie pour des échantillons de puits regroupés par zone du périmètre entre 1975 et 1991 (Données réseau de suivi ORMVAT).	67

Figure 32: Evolution de la piézométrie pour des échantillons de puits regroupés par zone du périmètre entre 1975 et 1991 (Données réseau de suivi ORMVAT).	68
Figure 33: Evolution de la piézométrie pour des échantillons de puits regroupés par zone du périmètre entre 1995 et 2001 (Données réseau de suivi ORMVAT).	70
Figure 34: Evolution de la piézométrie entre 1975 et 2001 pour le puit (2505-50305) situé dans la zone P11B.	71
Figure 35: Evolution de la salinité pour des échantillons de puits regroupés par zone du périmètre entre 1995 et 2001 (Données réseau de suivi ORMVAT).	72
Figure 36: Représentations spatiales de la salinité (Février 96 - 98 - 00).	73
Figure 37: Sens d'écoulement de la nappe, carte réalisée en faisant une moyenne de la piézométrie par point de suivi sur 5 ans (données réseau de suivi ORMVAT).	74
Figure 38: Schéma de fonctionnement général d'INTEGIS	81
Figure 39: Scénario d'évolution de la nappe et de la salinité du sol à l'équilibre en fonction du pompage sur la prise P12aval (Septembre 99 – Février 00).	86
Figure 40: Scénario d'évolution de la nappe et de la salinité du sol à l'équilibre en fonction du pompage sur la prise P12aval (Mars 00 – Août 00).	87
Figure 41: Scénario d'évolution de la nappe et de la salinité du sol à l'équilibre en fonction du pompage sur la prise P8 (Septembre 99 – Février 00).	88
Figure 42: Scénario d'évolution de la nappe et de la salinité du sol à l'équilibre en fonction du pompage sur la prise P8 (Mars 00 – Août 00).	89
Figure 43: Scénario d'évolution de la nappe et de la salinité du sol en fonction du pompage. P20TG3B (Septembre 99 – Février 00).	90
Figure 44: Scénario d'évolution de la nappe et de la salinité du sol en fonction du pompage. P20TG3B (Mars 00 – Août 00).	91
Figure 45: Evolution de la fraction de lessivage par rapport aux fractions nécessaires pour garantir un rendement potentiel de 100% en fonction du pompage. Cas actuel (salinité de la nappe: 5 dS/m).	92
Figure 46: Scénario d'évolution des fractions de lessivage annuelles par rapport aux doses de lessivage nécessaires pour garantir un rendement potentiel de 100% en fonction du pompage (salinité de la nappe : 2,5 dS/m).	92
Figure 47 : Diagramme de classes du modèle INTEGIS en langage UML.	99
Figure 48: Diagramme de classes du modèle de Beni-Amir en langage UML.	100

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Prises retenues pour certaines parties de l'étude et critères de choix.....	14
Tableau 2 : Qualité globale de la nappe en 2000. (Données ORMVAT).....	22
Tableau 3 : Types d'ouvrages et dimensionnement du réseau de Beni-Amir (Données ORMVAT).....	24
Tableau 4 : Règles de distribution de l'eau aux différentes échelles du périmètre.....	32
Tableau 5 : Exemple de bilan de fin de tour d'eau à l'échelle des prises secondaires. Tour d'eau du 30/06/00 au 06/07/00. Données "Bilan CGR".....	34
Tableau 6 : Indicateur de performance (Kuper, 1997).....	35
Tableau 7 : DPR moyen sur la période 30/06 au 11/11.....	36
Tableau 8 : RWS pour les périodes Septembre-Février et Mars-Août.....	40
Tableau 9 : RWS annuel pour les 4 prises secondaires étudiées.....	41
Tableau 10 : CVR des consommations annuelles par hectare à l'échelle du réseau et à l'échelle des prises secondaires (Campagne 99-00).....	43
Tableau 11 : Bilans Hydriques par saisons et annuel à l'échelle des prises P8, P17, P20am et P12av.....	52
Tableau 12 : Superficie des prises dont la consommation annuelle par hectare est inférieure à 4000m ³ /ha Campagne 99-00.....	55
Tableau 13 : Répartition des puits pour l'année 2000.....	62
Tableau 14 : Echantillons des puits étudiés pour la période 1975 - 1991. (Données réseau de suivi ORMVAT).....	64
Tableau 15 : Echantillons des puits étudiés pour la période 1995 - 2001. (Données réseau de suivi ORMVAT).....	68
Tableau 16 : Ratio des volumes pompés par rapport aux dotations du réseau. Résultats d'enquêtes auprès d'agriculteurs du tertiaire P20amTG3B, réalisées du 01/05/01 au 15/05/01.....	76
Tableau 17 : Ratio des volumes pompés par rapport aux dotations du réseau. Résultats d'enquêtes (Bacot, 2001).....	77
Tableau 18 : Estimations des volumes pompés par ha pendant la saison sèche (m ³ /ha). Estimations à partir d'enquêtes réalisées du 01/05/01 et 15/05/01. (* Estimations à partir de données Bacot, 2001).....	77
Tableau 19 : Estimation de volumes annuels pompés (résultats d'enquêtes réalisés par l'ORMVAT).....	77
Tableau 20 : Estimation des volumes pompés (et du pourcentage de ces volumes par rapport aux apports du réseau pour les campagnes 1985-86 à 1990-91. (Données Belhacène et Chayat, 1992).....	78
Tableau 21 : Salinité et sodicité de la nappe dans les zones de prises secondaires étudiées (P12aval et P20amont). (Données réseau de suivi ORMVAT).....	86
Tableau 22 : Salinité et sodicité de la nappe dans les zones de prises secondaires étudiées (P8 et P17). (Données réseau de suivi ORMVAT).....	88

2 INTRODUCTION

2.1 Le problème de la salinité et de la sodicité en agriculture

La salinisation et la sodisation des terres cultivables est un problème chronique pour les périmètres irrigués dont la pérennité (qui dépend notamment de divers facteurs hydrologiques) ne peut être assurée sans gestion contrôlée de l'accumulation et du drainage des sels (Tanji, 1990). Ce problème constitue un thème essentiel de l'étude proposée, et nous commencerons donc par nous intéresser aux problèmes généraux relatifs à la salinité et la sodicité en agriculture.

2.1.1 Les origines de la salinité et de la sodicité

Les origines de la salinité sont principalement due à l'irrigation de surface et aux remontées capillaires à partir d'une ressource souterraine à proximité de la surface du sol. La disparition de ces sels se fait quant à elle à travers le lessivage. Quoi qu'il en soit le processus physico-chimique de formation des sols salés se fait à la fois par échange de sels entre la solution du sol et son complexe absorbant (fixation des cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ sur les sites d'échange du complexe), mais également par précipitation et dissolution des sels (Figure 1). Ainsi, le transfert des sels dans le sol n'est pas uniquement fonction des apports en eau.

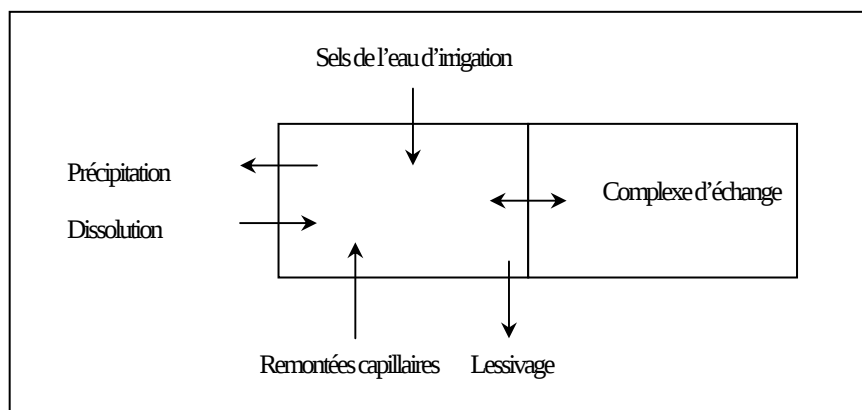


Figure 1 : Représentation schématique des échanges de sel entre la solution du sol et le complexe d'échange. Les sels parviennent dans la solution du sol par l'intermédiaire des eaux d'irrigation, des remontées capillaires et des dissolutions alors qu'ils sortent du système par lessivage et précipitation. (Schéma d'après Kuper, 1997).

La concentration totale en sels est mesurée par la conductivité électrique (CE en dS.m^{-1}) de l'extrait de pâte saturée.

La sodification est le processus de substitution des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} sur le complexe par les ions Na^+ lorsque ceux-ci deviennent prépondérants dans la solution du sol. On utilise généralement l'indicateur SAR (Sodium Absorption Ratio) afin de caractériser la sodicité de l'eau d'irrigation.

$$\text{SAR} = \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{\frac{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]}{2}}}$$

Les concentrations sont exprimées mEq.l^{-1} .

Le SAR s'exprime en $(\text{mmol.l}^{-1})^{0.5}$.

Un autre indicateur important est l'ESP (Exchangeable Sodium Percentage).

$$ESP = \frac{Na^{+} \text{ échangeable}}{\text{Capacité d'échange de cation}} \cdot 100$$

Si le SAR est utilisé pour évaluer la qualité de l'eau, l'ESP est utilisé uniquement pour caractériser la sodicité des sols. La sodification des sols peut avoir pour origine, soit un apport en Na^{+} par une eau riche en sodium, soit par un processus plus indirect de précipitation et dissolution des minéraux.

2.1.2 Les impacts de la salinité et de la sodicité sur les sols et les cultures.

Les sels contenus dans l'eau d'irrigation ou le sol réduisent les disponibilités de la plante au point de nuire à leur rendement. En effet, la présence de sels dans l'eau du sol augmente la force que la plante doit exercer pour extraire l'eau, et cette force additionnelle correspond à l'effet osmotique ou potentiel osmotique (FAO, Bulletin mars 1977).

Les principaux effets d'une élévation de la sodicité combinée à une conductivité électrique faible du sol sont la diminution de la conductivité hydraulique et de la perméabilité du sol ainsi qu'une dégradation de la structure du sol (Quick et Schofield, 1955 ; McNeal et Coleman 1966, McNeal et al. 1968). En effet, une proportion élevée de sodium de calcium dans le sol ou dans l'eau d'irrigation réduit la vitesse de pénétration de celle-ci dans le sol, de telle sorte qu'elle ne peut s'infiltrer en quantité suffisante pour satisfaire les besoins en eau des plantes entre 2 arrosages.

2.1.3 Les solutions pour lutter contre la salinité et la sodicité.

Plusieurs solutions existent pour lutter contre la salinité des sols. Il est d'ailleurs important de noter que celles-ci se situent à différentes échelles des périmètres irrigués. C'est souvent la combinaison de ces diverses solutions, suivant le contexte d'études, qui permet dans la pratique de résoudre le problème rencontré. Comme nous l'avons vu, les problèmes de salinité rencontrés sur les périmètres irrigués sont souvent liés à la présence d'une nappe non contrôlée, avec pour conséquence des remontées capillaires dans la zone racinaire. Le problème se pose donc ici à l'échelle du périmètre. Ainsi, l'installation d'un réseau de drains ouverts ou enterrés ou de puits drainants est nécessaire pour entraîner une partie de l'eau salée vers une zone où celui-ci peut être stocké sans risques. Lorsque la formation de sels solubles dans le sol devient trop importante, les sels peuvent être lessivés en appliquant une quantité d'eau supérieure aux besoins de la plante pendant sa croissance. Le problème ici peut se situer, soit à l'échelle globale du réseau, soit à une échelle plus réduite sur des zones ciblées. Cette eau supplémentaire entraîne au moins une partie des sels en dessous de la zone racinaire par percolation profonde (lessivage). Notons également que toutes les cultures ne réagissent pas à la salinité de la même manière car certaines sont plus aptes aux ajustements osmotiques nécessaires à l'extraction d'eau du sol (FAO, 1977). L'aptitude de la culture à s'adapter à la salinité est donc très utile aux échelles réduites telles que l'exploitation.

Concernant les sols sodiques, ceux-ci doivent être réhabilités par divers amendements. Il faut ainsi remplacer le sodium échangeable du sol par du calcium. Pour ce faire, le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) conviendrait bien, car la source est abondante et bon marché, mais peut présenter des risques de pollution des sols (Job, traité d'irrigation, 1998). Il est également possible d'utiliser l'argile sodique ou l'acide sulfurique mais cela nécessite des investissements importants. Notons également que si l'on dispose de plusieurs ressources en eau d'irrigation, et que celles-ci s'avèrent être de qualités diverses en terme de salinité et de sodicité, le mélange de ces eaux peut être envisagé comme un moyen pour prévenir les impacts respectifs de ces deux problèmes.

➔ Ainsi, la gestion des problèmes de salinité et de sodicité apparaît comme étant complexe du fait de la multitude des échelles spatiales, des acteurs concernés (gestionnaires, exploitants...) mais également des coûts mis en jeu pour appliquer certaines solutions.

Voyons maintenant quelle est précisément la problématique du périmètre irrigué du Tadla dans ce cadre de la gestion des problèmes de salinité et de sodicité en agriculture.

2.2 La problématique du périmètre irrigué du Tadla

Le début de l'irrigation dans les périmètres du Tadla remonte aux années 1940. La superficie actuelle de 100000 hectares est irriguée depuis 1974. Les principales cultures sont le blé tendre, la luzerne, la betterave, l'arboriculture

fruitière et le maraîchage. Comme dans beaucoup de périmètres irrigués, le développement de l'irrigation s'est accompagné d'une remontée générale du niveau de la nappe induisant des problèmes d'engorgement et de salinité. Pour pallier à ces problèmes et pour faire face aux pénuries fréquentes d'eau, les agriculteurs ont recouru à des pompes individuelles. Le nombre de puits est estimé à 10.000 à l'heure actuelle. Cependant, les conditions de pompage ainsi que les volumes mis en jeu font l'objet d'un premier point de préoccupation importante pour l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tadla (ORMVAT) de par ses conséquences en terme de rabattement de la nappe et d'impact de la qualité d'eau sur les rendements. Ainsi, l'ORMVAT suit la salinité des eaux de nappe et des sols depuis 1975 ; elle dispose à cet effet d'un laboratoire de mesure. Dans le cadre d'un programme de coopération avec l'USAID, l'ORMVAT a développé un système performant de gestion des eaux de surface qui permet de rationaliser et planifier la distribution des eaux de surface. Les informations concernant les assolements sont structurées au sein d'une base de données spatialisée (SIG).

Ainsi, malgré sa connaissance du système hydraulique de surface et des niveaux de salinité, l'ORMVAT s'interroge sur la pérennité du système dans un contexte de diversification des spéculations et de pénurie chronique en eau de surface pour l'irrigation. La tendance actuelle des agriculteurs de recourir à de l'eau de nappe pourrait se renforcer dans le contexte de pénurie et de libéralisation des assolements et pourrait conduire à des impacts importants sur la qualité des eaux de nappe et des sols. L'ORMVAT ne dispose pas d'informations précises sur les stratégies d'assolement et d'utilisation conjuguée des eaux de surface et souterraines, ni d'outils et de méthodes pour analyser, prévoir et accompagner ces évolutions en fonction des contraintes agro-économiques des agriculteurs et des risques environnementaux. Les attentes de l'ORMVAT vont donc dans le sens d'une aide à la compréhension des différents processus mis en jeu dans l'apparition de risques environnementaux (contrôle de la nappe sous l'action du pompage, salinité et sodicité des sols. . .) afin de prévoir l'évolution future du périmètre suivant différents scénarios.

2.3 Le projet de recherche (CIRAD – CEMAGREF – IAVH2 – ORMVAT)

Le stage s'est déroulé dans le cadre d'un PRAD (Projet de Recherche Agronomique pour le Développement) entre l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAVH II), le Cemagref et le Cirad. Ce stage s'inscrit également dans le cadre du PCSI (programme commun systèmes irrigués) entre le Cemagref, le Cirad et l'IRD, et de l'élaboration d'une proposition de recherche dans le cadre de l'appel d'offre « Approches écologiques en agriculture » de la DS du CIRAD. Les objectifs du projet concernent :

- L'analyse des stratégies d'assolements et d'utilisation conjuguée des eaux de surface et souterraines par les agriculteurs du périmètre du Tadla.
- L'évaluation des performances agro-économiques de ces différents systèmes de production.
- L'évaluation de l'impact prévisionnel de la gestion, des pratiques et stratégies des acteurs du périmètre sur l'évolution des sols (par salinisation et sodisation) et de la nappe sous l'influence de l'irrigation.
- L'élaboration d'outils et méthodes d'aide à la gestion ou au pilotage des assolements et de l'irrigation par les agriculteurs dans un contexte technique, économique et environnemental variable et/ou évolutif.

Dans ce cadre les actions mises en œuvre pour ce projet sont les suivantes :

1^{ère} année (2000 – 2001) : Phase préliminaire, les travaux ayant pour but une analyse des stratégies des agriculteurs et une évaluation des performances des systèmes techniques de production.

2^{ème} année (2001 – 2002) : En fonction des résultats acquis au cours de la première année, cette seconde phase aurait pour but la conception, puis l'élaboration d'outils d'aide à la gestion. Les résultats attendus concernent tout d'abord la formalisation d'une approche intégrée du fonctionnement du système irrigué, en prenant en compte des critères techniques, économiques, environnementaux et organisationnels.

2.4 Objectifs et Démarche de l'étude.

2.4.1 Objectifs.

Ce stage a pour but de contribuer à l'objectif fixé « Evaluation de l'impact prévisionnel de la gestion, des pratiques et stratégies des agriculteurs sur l'évolution des sols (par salinisation et sodisation) et de la nappe sous l'influence de

l'irrigation ». En se basant sur l'hypothèse qu'une meilleure gestion de la ressource en eau peut s'avérer être l'élément essentiel d'une meilleure maîtrise des problèmes de salinité on se fixera dans cette étude les objectifs suivants :

- Analyser, à partir de bilans hydriques et à travers l'étude des règles actuelles de gestion de l'eau à différentes échelles hydrauliques du périmètre, de la pratique d'utilisation conjuguée en eaux de surface et en eaux souterraines ainsi que des impacts possibles sur la qualité des sols.
- Etablir une proposition d'architecture de modèle intégré permettant de quantifier l'impact de scénarios d'intervention à différentes échelles du périmètre sur ses évolutions potentielles en terme de ressource en eau souterraine, qualité des sols, etc. . .

2.4.2 Démarche

- Afin de comprendre les règles de gestion et de distribution de l'eau du réseau, nous avons procédé à des entretiens auprès des acteurs responsables de l'exécution du tour d'eau. Suivant l'échelle d'étude, il s'est agit du chef de canal et du chef de réseau (gestion du canal principal), des chefs de CGR et des aiguadiers¹ (distribution des prises secondaires aux canaux tertiaires). Nous avons également exploité les données relatives à l'exécution du tour d'eau et restitué les résultats pour permettre d'approfondir les discussions au sujet de ces règles de gestion.
- A la demande des gestionnaires de l'ORMVAT, nous avons effectué une étude sur les indicateurs de performance du réseau pour répondre à leurs attentes vis à vis d'une répartition de l'eau plus proches de leurs objectifs.
- Des bilans hydriques ont ensuite été réalisés à différentes échelles d'espace et de temps afin de comprendre, à l'aide des règles de gestion et des indicateurs, quelles sont les échelles sensibles pour une éventuelle intervention dans la gestion des 2 types de ressources en eau. Ainsi, nous avons cherché entre autre à quantifier les différents apports en eau d'irrigation (réseau d'approvisionnement, pluviométrie) et sorties (évapotranspiration, percolation. . .) avant d'établir les bilans sur une campagne agricole (99 – 00).
Les bilans réalisés aux échelles du réseau et des prises secondaires sont des bilans mensuels. Ils permettent de mettre en évidence les problèmes de répartition de la ressource mais également l'importance de la pluviométrie et de l'adéquation offre/besoins aux grandes échelles hydrauliques du périmètre.
A l'échelle des tertiaires et des exploitations nous avons réalisé des bilans à réservoir sol avec un pas de temps journalier. Ces bilans permettent notamment de mettre en évidence l'importance des volumes percolés, de préciser les périodes de déficit hydrique et d'évaluer la répartition intra-annuelle de l'eau d'irrigation aux petites échelles hydrauliques du périmètre.
La récolte des données nécessaires à la réalisation des bilans a été réalisée sur place (dans les Centres de Développement Agricole et à l'Arrondissement de Beni-Amir) pour ce qui est des volumes desservis par le réseau, la pluviométrie, la réserve utile des sols, et les assolements et intensités culturales permettant d'établir les évapotranspirations des cultures pratiquées (l'office dispose d'une station agroclimatique permettant d'établir l'ETo Penman journalier).
- En parallèle, des enquêtes de terrain ont été réalisées auprès des agriculteurs sur la pratique du pompage en vue d'avoir des estimations quantitatives et qualitatives sur l'exploitation des ressources souterraines, et sur les indicateurs de qualité de l'eau et des sols. Ceci afin de comprendre les attentes et les contraintes des agriculteurs. En effet, toute perspective d'évolution dans la gestion du périmètre étant forcément amenée à impliquer les agriculteurs, il semblait indispensable de connaître leur position actuelle et leurs perspectives.
- De même, auprès des gestionnaires, une présentation d'un modèle intégré (*INTEGIS*, élaboré dans un contexte similaire au Pakistan (collaboration Cemagref-IIMI)) ainsi que diverses restitutions ont été réalisées afin de connaître les attentes de l'ORMVAT vis à vis d'un tel outil. Une partie de ce modèle servira également à évaluer certains scénarios d'évolution du périmètre en terme de recharge de la nappe ou de tendance d'évolution de la qualité des sols, en fonction de paramètres préalablement établis.

¹ Un aiguadier est un agent chargé de l'élaboration des tours d'eau à l'échelle d'une prise secondaire. Il peut y avoir plusieurs aiguadiers sur une même prise suivant la superficie et le nombre d'agriculteurs qu'elle regroupe.

- Enfin, en guise de synthèse nous avons cherché à proposer une architecture de modèle intégré pour le périmètre de Beni-Amir.

- Echantillonnage des prises étudiées:

En ce qui concerne les études sur les indicateurs, sur les bilans hydriques et sur l'évaluation de scénarios à partir d'une partie du modèle Integis, nous n'avons sélectionné que certaines prises secondaires, certains tertiaires et certaines exploitations afin de faire des analyses détaillées qui pourront servir d'exemple pour traiter l'ensemble des autres prises. 4 prises secondaires sur les 20 existantes ont été retenues (Tableau 1) selon les critères suivants :

- Consommation annuelle par hectare en eau du réseau (préalablement calculée pour l'ensemble des prises).
- Situation géographique dans l'architecture du réseau (amont, aval...).
- Situation géographique par rapport à la qualité de la nappe.
- Situation géographique par rapport à la densité de puits.

Nous n'avons donc sélectionné ces prises qu'après avoir récolté et exploité un certain nombre de données relatives aux critères précédemment cités.

Prise	P8	P17	P12aval	P20amont
Consommation annuelle (+ ou – que la moyenne) (Moyenne : 7377m ³ /ha)	8484(+)	7939(+)	6184(-)	6494(-)
Position dans le réseau	Amont	Fin de canal principal	Aval	Aval
Qualité moyenne de la nappe (dS/m) Moyenne 2000 : 3 dS/m	3	2,5	5	4
Nbre d'agriculteurs pour 1 puit Moyenne 2001 : 5 agriculteurs pour 1 puit.	25	8	3	2

Tableau 1 : Prises retenues pour certaines parties de l'étude et critères de choix.

De même, en ce qui concerne le lieu d'enquêtes sur le pompage et les indicateurs de qualité de l'eau et du sol, nous avons retenu en concertation avec l'ORMVAT le tertiaire P20amTG3B pour sa position à l'aval du réseau, sa forte densité de puits (tous les agriculteurs en possèdent un) et la qualité médiocre de la nappe.

- Le choix de la campagne 99-00 :

Le choix de la réalisation de ces bilans sur l'unique campagne agricole 99-00 a été imposé par le fait que les seules données de consommations du réseau exploitables par informatique concernent pour l'instant les années 1999, 2000 et 2001 (en cours). Or, compte tenu des échelles d'étude et de la quantité de données nécessaires pour réaliser ces bilans à des échelles d'espace et de temps réduites, il n'était pas envisageable d'exploiter des archives autres que les données informatiques de la campagne agricole : septembre 99 - août 00. Cette campagne sera donc remplacée dans un contexte hydrologique plus large dans la partie sur l'étude descriptive de l'environnement du périmètre.

3 CADRE DE L'ETUDE (DESCRIPTION DU PERIMETRE IRRIGUE DE BENI-AMIR).

3.1 Cadre géographique.

La plaine du Tadla est une vaste dépression qui, entre le Plateau des Phosphates au Nord et l'Atlas au Sud, se déploie sur 70 km de longueur et 40 km de largeur, à une altitude comprise entre 400 et 500 m. Le Tadla est traversé sur toute sa longueur par l'oued Oum-Er-Rbia, l'un des plus importants fleuves du pays qui partage la plaine en 2 régions hydrauliquement indépendantes :

- Les Beni-Moussa en rive gauche, irrigués par les eaux régularisées du barrage Bin El Ouidane construit en 1954. Ils couvrent une superficie de 66000ha.
- Les Beni-Amir en rive droite, dont les 27868ha sont irrigués par un ouvrage de dérivation au fil de l'eau érigé à Kasba Tadla en 1929. Pour l'an 2002, 2 nouveaux barrages de stockage construits à Dchar el Oued et à Ait Messaoud devraient alimenter le périmètre de Beni-Amir ainsi qu'une centrale hydroélectrique (localisée à Dchar El Oued) (voir Figure 2).

3.2 Cadre administratif.

3.2.1 L'ORMVAT

3.2.1.1 Statut

L'ORMVAT ou Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tadla est un établissement public doté de la personnalité civile et d'une totale autonomie financière. Il est placé sous la tutelle du Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritimes. Ses principales fonctions sont :

- La gestion des ressources en eau à usage agricole de sa zone d'action (Plaine du Tadla).
- L'aménagement hydro-agricole des terres irrigables.
- L'intensification et la mise en valeur agricole.
- L'encadrement des agriculteurs.

3.2.1.2 Structure de l'ORMVAT.

L'ORMVAT contrôle des organes exécutifs appelés Arrondissements, qui chapeautent des structures décentralisées :

- Les CDA (Centre de Développement Agricole) caractérisés par un numéro d'identification (501 à 538). Leur mission est un rôle de suivi des agriculteurs, de vulgarisation, de conseil et d'orientation dans les pratiques agricoles.
- Les CGR (Centre de Gestion du Réseau), dont la mission est l'entretien et le bon fonctionnement des tertiaires et quaternaires. Les aiguadiers et agents de distribution qui organisent et exécutent le tour d'eau sont rattachés aux CGR.

Au niveau de l'ORMVAT, chaque exploitation (ensemble des terres appartenant à un même propriétaire) est enregistré sur un matricule. La distribution de l'eau est assurée pour toute entité desservie par un tertiaire fonctionnel et qui est à jour dans le règlement des factures d'eau. Un détournement d'eau du réseau hors de la parcelle à laquelle elle était destinée est considéré comme une infraction. L'ORMVAT fixe les dotations, organise la distribution de l'eau et établit les factures. Celles-ci doivent être réglées par trimestre et sont proportionnelles aux volumes distribués (tarif : 0,18 DH/ha²).

² 1DH=0,66FF.

Figure 2: Carte du bassin versant de l'Oum-Er-Rbia. Localisation des barrages de Dchar-El-Oued, Ait Massaoud et Kasba Tadla. Localisation du périmètre de Beni-Amir.

En ce qui concerne l'accès à la nappe, toute utilisation doit être soumise à autorisation comme l'explique la loi n°10-95 sur l'eau. L'ORMVAT prend en charge la demande d'autorisation de l'exploitant. Mais cette loi n'est pas respectée et la plus part des puits fonctionnels n'ont pas fait l'objet de procédures d'autorisations.

Du point de vue des assolements, l'ORMVAT n'a plus aucun pouvoir de décision depuis 1996, date à laquelle a été décrétée la libéralisation des assolements.

3.2.2 L'Agence de Bassin.

L'Agence de Bassin et l'ORMVAT sont 2 organismes différents. L'Agence de Bassin gère le bassin (anciennement DRH) de l'oued Oum-er-Rbia sur toute sa longueur. Elle veille à la préservation des ressources en eau et s'intéresse à l'ensemble des acteurs exploitant ces ressources aussi bien dans l'agriculture, l'industrie et l'eau potable. Au niveau du périmètre de grande hydraulique du Tadla, les autorisations de pompage agricole données par l'ORMVAT reçoivent l'aval de l'agence de bassin. La mise en place d'une redevance sur le pompage a été décidée récemment. Mais elle est dans les faits non appliquée. De plus l'ORMVAT est censé reverser 0,02 DH par m³ d'eau déversée en tête de réseau. Mais le texte n'est pas explicite tout comme les lois à caractère environnemental, qui restent floues et difficilement applicables sans l'existence de textes d'application.

3.3 Cadre environnemental.

3.3.1 Pluviométrie – Températures – Evapotranspiration :

Le climat de la région du Tadla est définie entre semi aride et aride grâce au quotient pluviothermique d'Emberger, défini par :

$$Q = \frac{1000.Pa}{\frac{(M - m)(M + m)}{2}}$$

avec :

Pa : Précipitations annuelles (mm).

M : Moyenne des températures pour le mois le plus chaud.

m : Moyenne des températures pour le mois le plus froid.

L'application de ce quotient sur une série climatique permet de déduire la variabilité inter-annuelle du climat d'une région. Les valeurs de ce quotient ont été calculées sur la période 1951-52 à 1993-94 (Jebbour, 1995) et les résultats font en effet ressortir que le climat du Tadla s'inscrit dans l'étage bioclimatique semi aride (20 années sur 43) à aride (21 années sur 43) dont 2 années dans l'étage bioclimatique saharien. Les précipitations annuelles sur cette période varient entre un minimum de 160mm et un maximum de 500mm. Au point de vue de la répartition spatiale on observe un gradient pluviométrique croissant en direction de l'Est en raison de l'influence des montagnes du Moyen et Haut Atlas.

Comme il a été dit précédemment nos différentes études n'ont pu être menées que sur une campagne agricole (99-00), faute de données et de temps. Ainsi, il est important de resituer les caractéristiques climatiques de cette campagne par rapport au contexte globale sur ces 50 dernières années.

En terme de pluviométrie annuelle, la Figure 3 et la Figure 4 nous montre bien que cette campagne 99-00 (232 mm) était une campagne sèche. En effet, moins de 15% des précipitations annuelles ont été inférieures à 240mm à l'échelle des 50 dernières années. La moyenne des précipitations entre 1951 et 2000 étant de 368mm L'échelle inter-annuelle (Figure 5) nous montre que seul le mois de mai a connu une pluviométrie supérieure à la moyenne. En effet, pour tous les autres mois de l'année (en particulier mars et février où il n'a pas plu) les mesures soulignent un déficit pluviométrique.

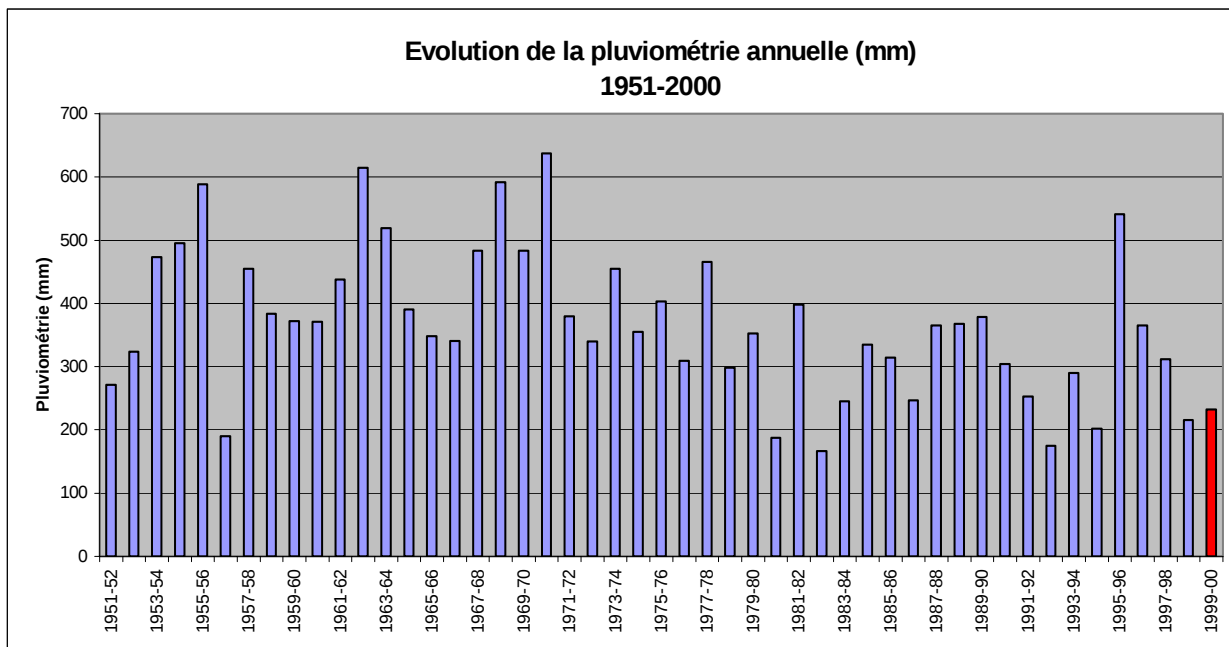


Figure 3 : Evolution de la pluviométrie annuelle de 1951 à 2000.

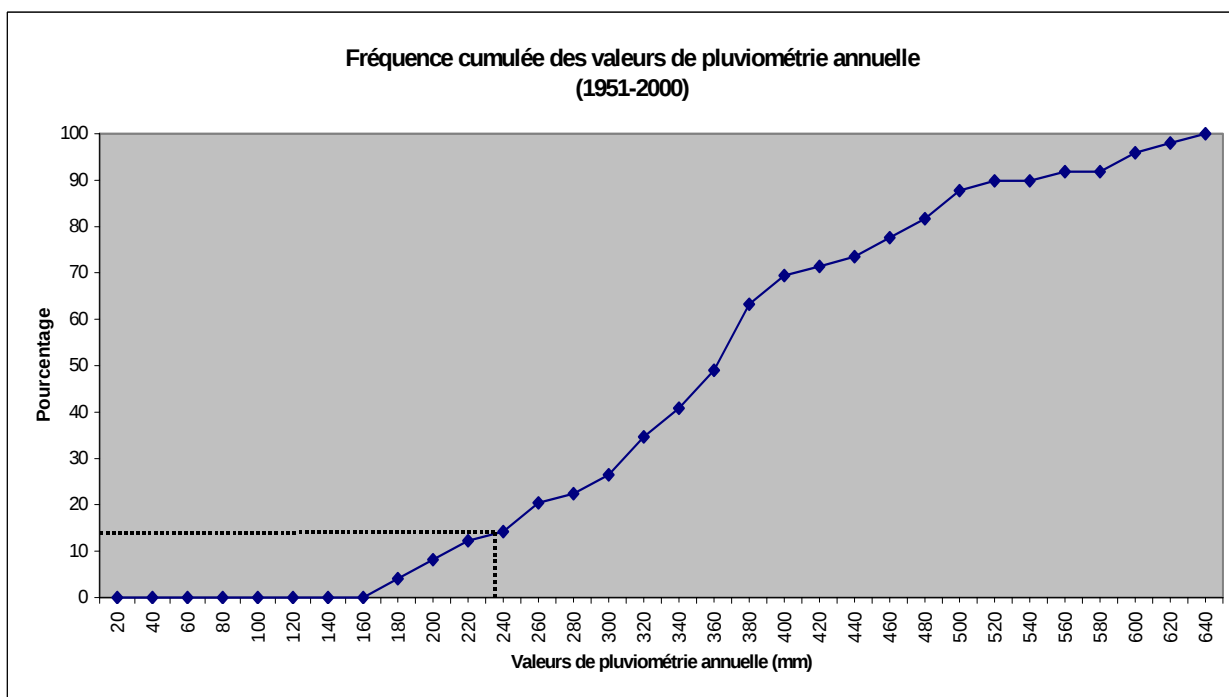


Figure 4: Fréquence cumulée des valeurs de pluviométrie annuelle (1951-2000)

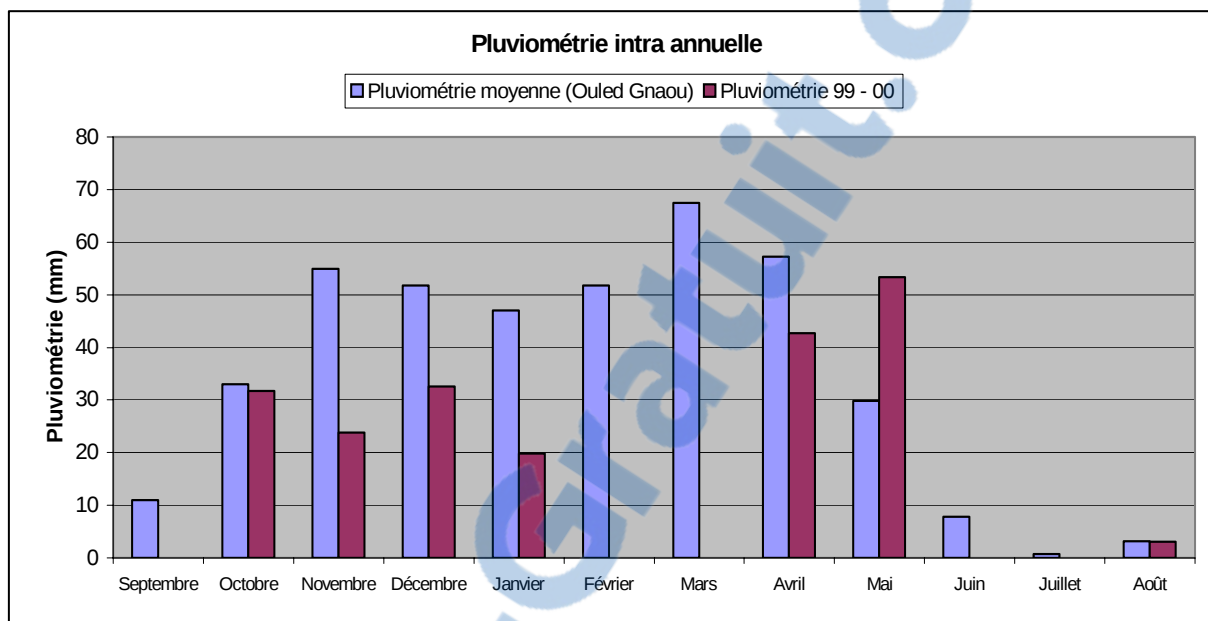


Figure 5 : Pluviométrie intra annuelle de la campagne 99-00 et de la moyenne des 50 dernières années.

En ce qui concerne les températures de la campagne 99-00 (Figure 6) elles apparaissent tout à fait dans la normale si on les compare aux moyennes des maxima et des minima sur une série de 50 années.

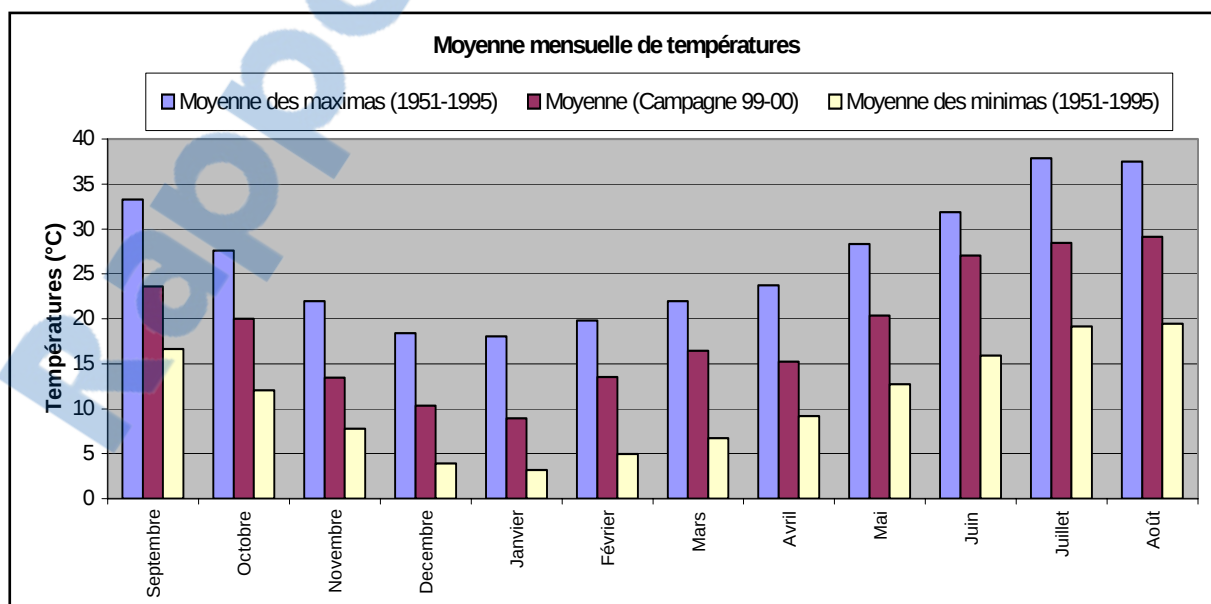


Figure 6: Comparaison entre moyenne des températures mensuelles pour la campagne 99-00 et de la moyenne des minima et maxima entre 1951 et 1995.

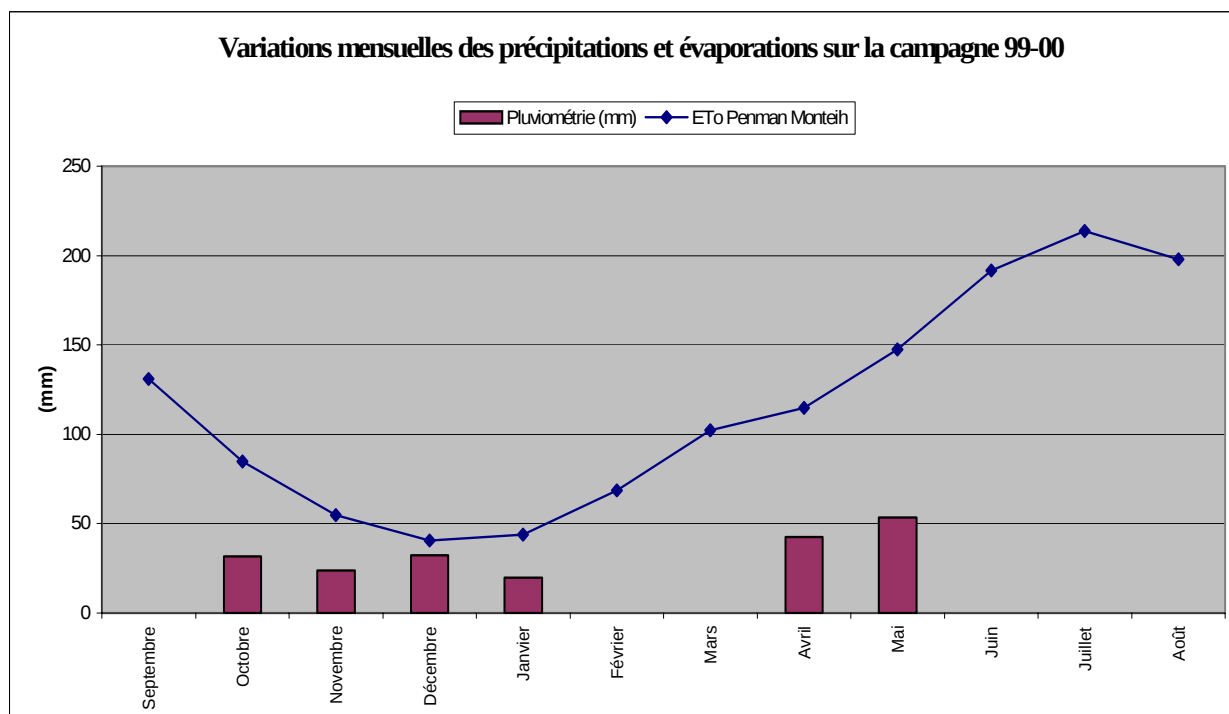


Figure 7: Variations mensuelles des précipitations et évaporations sur la campagne 99-00.

La Figure 7 montre un déficit pluviométrique permanent par rapport à l'évapotranspiration de référence lors de la campagne 99-00.

➔ Ainsi, la campagne 99-00 apparaît comme étant une année sèche à l'échelle des 50 dernières années mais également comme étant en déficit pluviométrique à l'échelle intra annuelle.

3.3.2 La ressource en eau de surface :

Pour situer la campagne 99-00 en terme de disponibilité en eau de surface nous avons observé l'évolution des volumes lâchés au niveau du canal principal. On observe sur la Figure 9 que le volume lâché en tête de canal principal ($256,6 \text{ Mm}^3$) est très légèrement supérieur à la moyenne des 20 dernières années ($252,1 \text{ Mm}^3$). Cela permet donc de considérer les apports en eau de surface de la campagne 99-00 comme représentatifs de la moyenne des apports. Concernant la qualité de l'eau de surface, Jebbour (1995) a étudié les variations intra-annuelles de la salinité pour la campagne 92-93 comme le montre la Figure 8. Cette salinité provient directement des origines de l'oued puisqu'une des deux sources de l'Oum-Er-RBia est saline. Des prélèvements d'échantillons (une dizaine) pendant la période de mars à mai 2001 nous ont permis d'enregistrer une conductivité électrique de 2,4 à 2,6 dS/m (des valeurs supérieures à celles enregistrées lors de la campagne 92-93) laissant penser qu'il existe peut-être également une variabilité inter-annuelle.

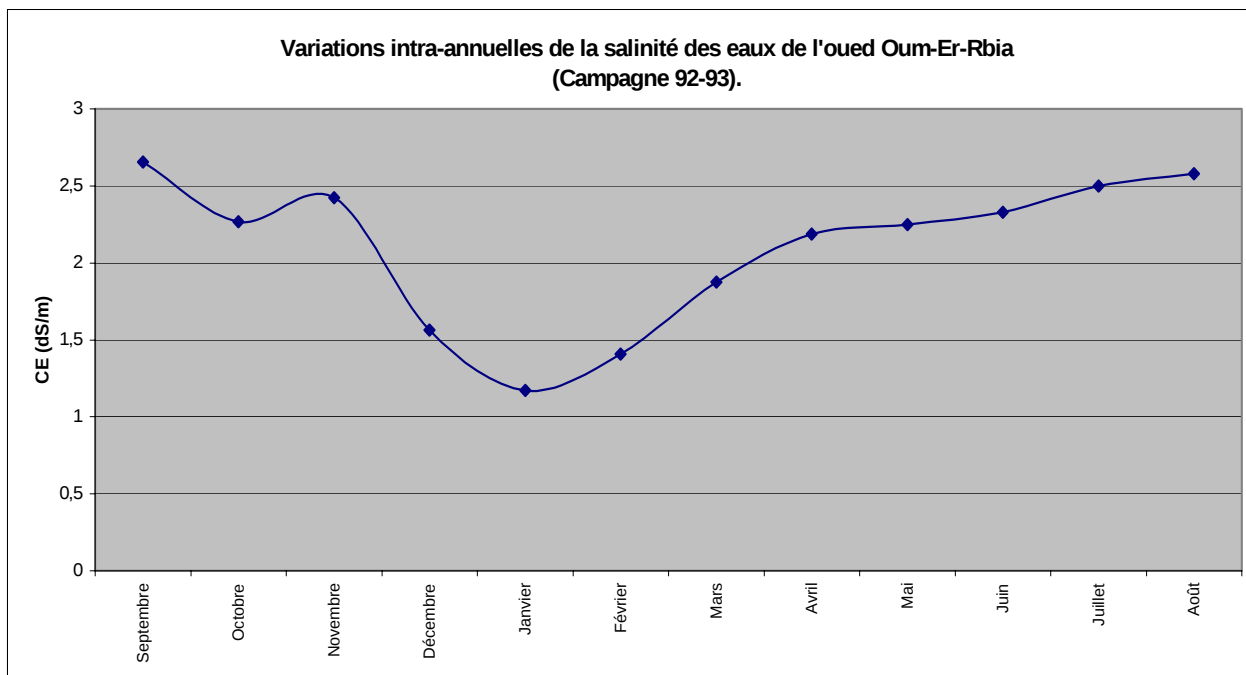


Figure 8: Variations intra-annuelles de la salinité des eaux de l'oued Oum-Er-Rbia au cours de la campagne 99-00.

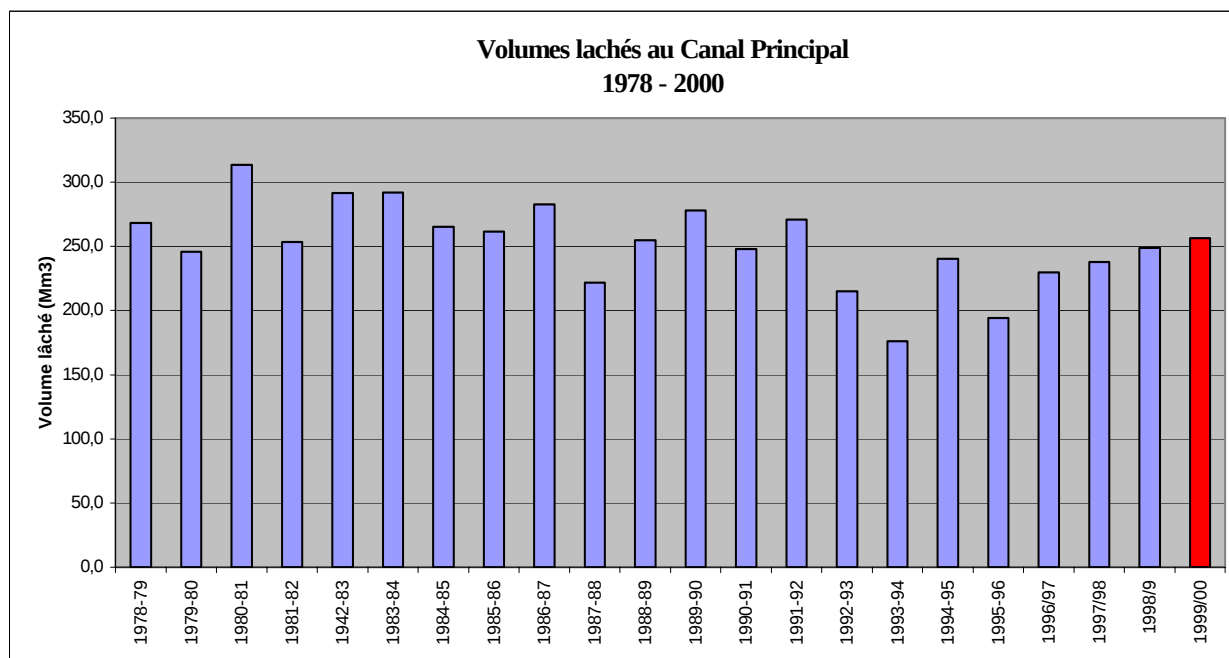


Figure 9: Evolution des volumes lâchés en tête du canal principal de Beni-Amir de 1978 - 2000.



3.3.2.1 La ressource en eau souterraine :

Il existe une nappe phréatique sous chacun des périmètres irrigués de Beni-Amir et de Beni-Moussa. Chacune de ces nappes est indépendante (Belhacène et Chayat, 1992). En ce qui concerne la nappe de Beni-Amir on a pu mettre en évidence le sens d'écoulement NE-SO de celle-ci grâce au réseau de suivi de l'office (voir partie 3.4).

Cette nappe est exploitée par les agriculteurs du fait du manque de ressource en eau de surface. Cette eau est globalement de moins bonne qualité pour l'irrigation que l'eau de canal car plus salée. Nous verrons également que la répartition spatiale de cette salinité à l'échelle du périmètre n'est pas homogène (la partie aval du réseau est plus touchée par la salinité). Pour la campagne 99-00, en effectuant une moyenne annuelle de chacun des points de suivi on obtient le tableau suivant :

	Eau de nappe		
	Min	Moyenne	Max
CE (dS/m) (Année 2000)	0,8	3	5,7
SAR (meq/l)	1,8	6,0	9,5

Tableau 2 : Qualité globale de la nappe en 2000. (Données ORMVAT)

3.4 Les potentialités hydro-agricoles du périmètre irrigué de Beni-Amir

3.4.1 Le réseau de distribution:

Dans le cadre de notre étude nous nous intéresserons uniquement au périmètre irrigué de Beni-Amir. En l'an 2002, le périmètre de Beni-Amir sera alimenté grâce au barrage de stockage de Char-EL-Oued (voir Figure 2). Mais pour les précédentes campagnes et jusqu'à aujourd'hui, le canal principal de Beni-Amir est alimenté exclusivement par les eaux de l'oued Oum Er Rbia grâce à un barrage de dérivation situé au nord est du périmètre (Barrage de Kasba Tadla) et construit en 1929. L'eau dérivée du barrage est acheminée jusqu'à la tête du canal principal grâce à un canal 'Tête Morte' d'une capacité nominale de $19,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce canal transporte l'eau jusqu'au bassin de décantation de Zidania à environ 20Km en aval. La capacité théorique de ce bassin est de $100,000 \text{ m}^3$ mais il apparaît aujourd'hui complètement rempli par les dépôts de sédiments. Il n'y a donc aucune décantation efficace ce qui pose beaucoup de problèmes au niveau du curage et de la maintenance du canal primaire dans lequel se dépose les sédiments. L'ORMVAT estime que chaque 60000 m^3 de sédiments se déposent au niveau du canal tête morte. Notons que la construction prochaine du barrage de Dchar El Oued devrait estomper entre autre ce problème. A partir du bassin de Zidania on distingue 3 sorties par siphons. La sortie principale concerne un siphon qui traverse l'oued pour rejoindre la tête du canal principal qui alimente l'ensemble du périmètre de Beni-Amir. Ce siphon a une capacité maximum de $14 \text{ m}^3/\text{s}$. L'irrigation est prioritaire. S'il reste de l'eau non utilisée pour l'irrigation, elle sera lâchée au niveau de la 2^{ème} sortie grâce à 2 siphons permettant d'alimenter 2 turbines d'une centrale hydroélectrique gérée par L'ONE (Office National d'Electricité). Chaque turbine nécessite pour son fonctionnement un débit minimum de $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$ et un débit max. de $3,6 \text{ m}^3/\text{s}$. La 3^{ème} sortie alimente un siphon d'une capacité de $13 \text{ m}^3/\text{s}$ mais qui n'est pas encore en service. Notons qu'il n'existe pas de réglementation concernant un débit minimum de l'oued Oum-Er-Rbia en aval de l'ouvrage de dérivation. Ainsi, toute l'eau de l'oued sera dérivée dans la limite des $19,5 \text{ m}^3/\text{s}$ de l'entrée du canal 'tête morte'. Le réseau principal et secondaire est représenté sur la Figure 10. Au nord est du périmètre, après l'entrée de la prise P8, le Canal Principal alimente le Canal Médian qui dessert les prises secondaires P9, P10, P18, P19, P20amont et P20aval.. Les types d'ouvrages en entrée des prises secondaires, la longueur et la superficie dominée par le réseau secondaire sont renseignés dans le Tableau 3. Le réseau principal et secondaire fonctionnent en régime continu sauf en cas de délestage (lorsque le débit de l'oued est trop faible, entraînant ainsi la fermeture de un ou plusieurs secondaires) et de fermeture annuelle du réseau. L'ensemble du réseau secondaire a une longueur de 86600 m et couvre une superficie irrigable de 27868 ha.

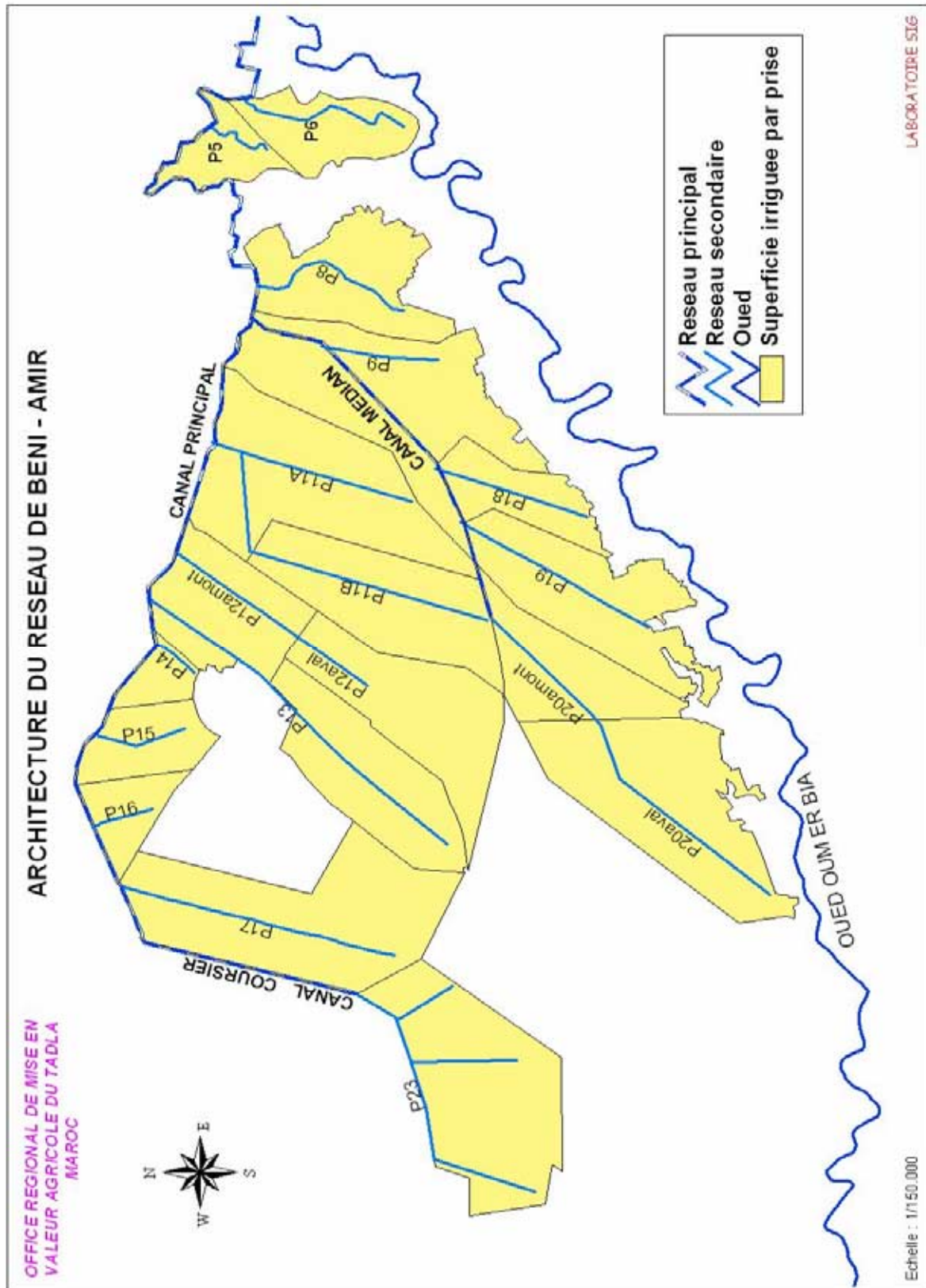


Figure 10: Plan du réseau principal et secondaire du périmètre irrigué de Beni-Amir. (Données Laboratoire SIG ORMVAT)

RESEAU	Superficie (ha)	Longueur (m)	Type d'ouvrages en entrée	Sortie
OULJA	39	-		Modules à masques
P 10	996	4150	Giraudet+Modules	Modules à masques
P 11A	2008	3441	Giraudet+Modules	Modules à masques
P 11B	2660	4250	Giraudet+Modules	Modules à masques
P 12 AMONT	1499	3400	Vanne Amil+Modules	Modules à masques
P 12 AVAL	1847	2727	Vanne Amil+Modules	Modules à masques
P 13	1795	8221	Vanne Amil+Modules	Modules à masques
P 8	1555	5400	Vanne à glissement+Vanne Avio+Modules	Modules à masques
P 14	216	1630	Vanne à glissement+Vanne Avio+Modules	Modules à masques
P 15	484	2595	Vanne Amil	Modules à masques
P 16	467	2881	Modules	Modules à masques
P 17	3106	9475	Vanne Amil	Modules à masques
P 18	822	3611	Giraudet+Modules	Modules à masques
P 19	1877	5120	Giraudet+Modules	Modules à masques
P 20 AMONT	1835	4800	Giraudet+Modules	Modules à masques
P 20 AVAL	2058	2300	Giraudet+Modules	Modules à masques
P 23	3595	12000	Vanne à glissement	Modules à masques
P 5	381	986	Modules	Modules à masques
P 6	296	2135	Vanne Amil	Modules à masques
P 9	1604	7480	Giraudet+Modules	Modules à masques
TOTAL	27868	86600		

Tableau 3 : Types d'ouvrages et dimensionnement du réseau de Beni-Amir (Données ORMVAT).

Définitions :

Vanne Avio : Vannes à niveau aval constant.

Vanne Amil : Vannes à niveau amont constant.

Vanne à glissement : Vannes plates.

Modules à masques : Appareils de prise permettant de prélever des débits constants et ajustables.

3.4.2 Le réseau de drainage :

Concernant le réseau de drainage, l'apparition de zones marécageuses dans les bas fonds de la plaine de Beni-Amir a entraîné l'élaboration d'actions d'assainissement par la mise en place d'un premier réseau principal qui a permis d'abaisser le niveau de la nappe et de la stabiliser (1947). Cependant, ce réseau de drains s'est avéré insuffisant par la suite avec l'extension de l'irrigation (Jebbour, 1995). Les réseaux principaux et secondaires se développent respectivement sur une longueur d'environ 186Km et 61Km avec une densité irrégulière qui varie autour d'une moyenne respective de 5,8 m/ha et 1,9 m/ha. D'après Belhacène et Chayat (1992), la moitié des collecteurs sont pratiquement à sec dès 1981. Ce réseau de drainage n'est donc pas nécessaire à l'heure actuelle puisque le niveau de la nappe est trop bas. A l'heure actuelle, les seuls volumes transités par le réseau de drainage sont les eaux du réseau qui peuvent se déverser dans les drains à la suite de débordements. Ainsi, on ne considèrera pas de terme de drainage latéral par le réseau de drainage dans les termes de bilans (partie 3.3) mais uniquement le terme de drainage par percolation profonde.

3.4.3 Les types de cultures pratiquées.

Les assolements par zone de prise secondaire, réalisés pendant la campagne 99-00 sont représentés sur la Figure 11.

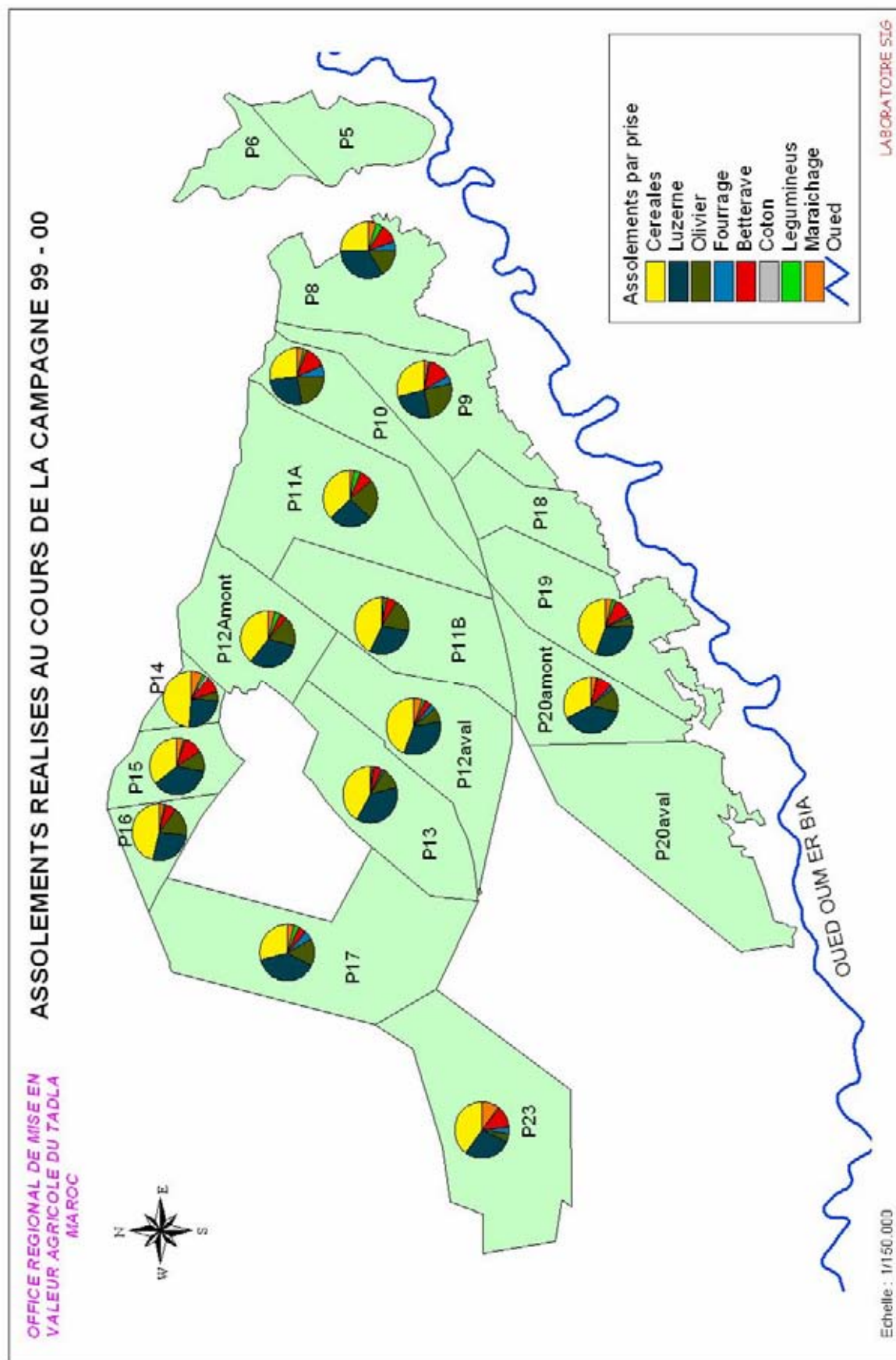


Figure 11: Asselements réalisés par zone de prise secondaire pour la campagne 99-00 sur le périmètre irrigué de Beni-Amir.

On remarque que les 2 cultures principales sont les céréales (essentiellement du blé) et la luzerne qui sont principalement destinées à l'autoconsommation et à la vente sur la marché local. Mais certaines cultures peuvent répondre à une dynamique de plus grande échelle :

- La luzerne non consommée par le bétail local est séchée, mise en bottes et exportée dans toute la partie sud du Maroc.
- L'olivier profite de la présence des huileries et des conserveries sur le périmètre du Tadla.
- La betterave à sucre a le système de production le plus structuré. Trois sucreries sur le périmètre assurent aux exploitants l'achat de la totalité de la récolte et avancent tous les frais. Il est important de noter que les sucreries ont une démarche fortement incitatrice pour que les agriculteurs maintiennent la betterave dans leurs assolements. Le calendrier cultural tel qu'il est pratiqué dans la plaine du Tadla est représenté en annexe.

4 ANALYSE DE LA GESTION DE L'EAU DE SURFACE ET DES EAUX SOUTERRAINES SUR LE PERIMETRE DE BENI-AMIR.

4.1 Règles officielles de gestion et de distribution de l'eau.

Le but de cette partie est de comprendre les objectifs et règles de distribution de l'eau de surface établies entre l'ORMVAT et les agriculteurs. Cet objectif s'inscrit dans une logique plus large de compréhension de l'utilisation conjuguée des eaux de surface et des eaux souterraines dans le périmètre.

4.1.1 Allocation du volume global de la campagne pour le périmètre de Beni-Amir:

En ce qui concerne la dotation en eau (règle en vigueur jusqu'à la campagne 2001 incluse) pour l'année dans les Beni-Amir, les estimations sont faites entre le Service Hydraulique et la direction de l'office selon des prévisions empiriques en tablant sur des espérances défavorables. En 2000 et pour 2001 les estimations ont été de l'ordre de 200 Mm³ pour l'année. Cependant, la consommation réelle est totalement fonction du débit de l'oued : toute l'eau disponible au niveau du barrage de dérivation est le plus souvent consommée dans la limite des 19,5 m³/s en entrée du canal tête morte, à défaut de pouvoir être stockée. Pour la campagne 99-00 par exemple, le volume total lâché au canal principal a été de 256 Mm³. Pour la prochaine campagne à venir (2001-2002), l'estimation du volume disponible sera semblable à celle actuellement en vigueur dans les Beni-Moussa du fait de la construction du nouveau barrage Char El Oued sur l'oued Oum-er-Rbia. Ainsi, au 1^{er} septembre, un examen de la réserve du barrage couplé à des estimations d'apports prévisionnels permettent d'avancer une première valeur du volume disponible (valeur qui pourra être modulé avant le début de l'année). Les estimations des apports à venir se font par des calculs de probabilités pour des fréquences de non dépassement de 10% à 30%. On tient également compte d'un volume minimum à conserver dans le barrage pour l'année suivante. Le volume avancé en septembre est révisable à la hausse ou à la baisse en janvier suivant la tendance. Par contre le volume définitif étant fixé, il ne pourra être dépassé.

4.1.2 Répartition du volume à l'échelle des secondaires

La répartition des volumes du canal primaire vers les canaux secondaires correspond aux règles d'une gestion tactique. La gestion tactique consiste à définir une règle d'allocation de l'eau en fonction des ressources disponibles, des besoins éventuellement affectés de priorités et des contraintes techniques liées à l'infrastructure existante (Fang et al., 1989). Dans le cas du périmètre de Beni-Amir, la répartition des volumes lâchés en entrée de canal principal se fait en théorie au prorata de la superficie irrigable contrôlée par chaque prise et non en fonction de la superficie équivalente à la demande réelle de chaque prise. On se trouve donc à cette échelle dans une logique de répartition équitable de l'offre.

4.1.3 De la demande de l'agriculteur vers l'élaboration d'un tour d'eau (distribution à l'échelle des tertiaires):

Parmi les différentes méthodes de distribution de l'eau aux usagers, Malaterre (1998) explique que dans la distribution au "tour d'eau" les irrigants doivent prélever l'eau selon un calendrier de distribution préétabli (débits, durée et fréquence fixés). Nous allons voir que dans le cadre du Tadla, si le débit est fixé à 30 l/s en sortie de tertiaire, les caractéristiques durée et fréquence sont régulièrement soumises à des fluctuations (débit de l'oued, chutes d'éléments...) entraînant une réactualisation constante mais imprévisible du tour d'eau.

4.1.3.1 Fonctionnement général.

Un jour de la semaine (Lundi en règle générale), les agriculteurs doivent formuler une demande qu'ils remettront à leur point d'attache. L'aiguadier³ responsable de ce point d'attache recueille toutes les demandes et établit alors son tour d'eau de la manière suivante:

³ Un aiguadier est responsable de 300 à 500 agriculteurs répartis sur 1 à plusieurs réseaux secondaires suivant leur taille.

Il commence par remplir un formulaire MV1 (Mise en Valeur 1, voir exemplaire en annexe) mentionnant pour chaque tertiaire les noms et prénoms de chaque agriculteur, leur matricule, la superficie, le débit (30 l/s sauf pour quelques tertiaires), les dates et heures d'ouverture et de fermeture de prise. Pour cela il applique un barème (3h/ha par exemple en période sèche, les durées sont donc en théorie directement proportionnelles à la surface. Cependant dans la pratique il existe des approximations ("arrondis") le plus souvent favorables à l'agriculteur (Par exemple : superficie : 2,6 ha - dotation : 9H) . Mais il doit veiller en même temps à ce que la durée du tour d'eau à l'échelle du secondaire (durée au bout de laquelle toute la superficie du secondaire a reçu sa dotation) soit la plus faible possible, notamment en saison sèche où il suffit de 15j pour évaporer la RFU du sol (voir partie 3.3). Cette durée est décidée en concertation au niveau de l'arrondissement.

Le MV1 terminé, l'aiguadier remplit un MV2 (voir exemplaire en annexe). Pour chaque tertiaire, la semaine est découpée en périodes de 12h. Ainsi, il faut que la durée d'irrigation d'un tertiaire soit un multiple de 14 (14 périodes de 12H pour une semaine). Si ce n'est pas le cas, on ajoute ou on retranche (plus rare) des heures pour avoir un multiple de 12. Ensuite, pour chacune de ces périodes de 12H on mentionne le débit de chaque tertiaire (30l/s sauf exception). Au final, la somme des débits de chaque tertiaire par demi journée ne doit pas dépasser le débit de fonctionnement du secondaire. Si ce n'est pas le cas l'aiguadier doit équilibrer son tour d'eau sur l'ensemble de la semaine en jouant sur l'ordre de rotation des tertiaires. Finalement l'aiguadier doit connaître le volume à fournir en entrée de son secondaire. Il ajoute alors un certain volume pour prendre en considération les pertes du secondaire. Chaque aiguadier étant responsable d'une prise (en général), il connaît pour chaque tertiaire le débit à ajouter en entrée (par l'intermédiaire des modules à masques) pour compenser les pertes diverses (évaporation, transport. . .) et pour que l'aval puisse bénéficier de sa dotation. Ces débits ajoutés en entrée des tertiaires sont ensuite sommés pour connaître le débit supplémentaire en tête du secondaire.

Chaque aiguadier présente finalement un MV2 prévisionnel pour le tour d'eau à venir à son chef de centre (CGR) qui transmet à l'arrondissement. Une vérification est effectuée par le chef de canal. Après contrôle l'aiguadier distribue des bons aux agriculteurs le jeudi pour le tour d'eau de la semaine suivante. Il distribue également un bon à chaque agent de distribution qui sera responsable de la manipulation des prises (dates d'ouverture et de fermeture). Au niveau du barrage de dérivation on additionne tous les débits pour connaître les volumes à lâcher par période de 12h. A la fin de la 1^{ère} semaine, l'aiguadier remet un MV1 et un MV2 de "demi tour d'eau" (aux chefs de CGR) qui tient compte des modifications survenues au cours de la semaine qui seraient dues à des anomalies de fonctionnement. Ces documents sont accompagnés de rapports hebdomadaires précisant les anomalies de service, leurs causes, la date ainsi que les noms des agriculteurs touchés. Des MV2 spéciaux mentionnant uniquement les tours d'eau annulés sont également remis sous 48H. Le chef de CGR fait alors un rapport hebdomadaire (synthèse) sous forme d'évaluation du tour d'eau et de contrôle du travail de l'aiguadier. Celui ci reçoit également à la fin de la 1^{ère} semaine des instructions en cas de modifications significatives du débit de l'oued qui seraient à même de devoir provoquer une modification pour la 2^{ème} semaine. A la fin de la 2^{ème} semaine l'aiguadier fait à nouveau un rapport similaire.

4.1.3.2 Modifications en cas d'anomalies :

Les différents types d'anomalies qui peuvent survenir et entraîner des modifications par rapport au tour d'eau prévisionnel sont les suivantes :

- Chutes d'éléments.
- Siphons ou modules bouchés.
- Sous alimentation (Débit de l'Oued inférieur aux prévisions).
- Pluie.

En cas de chute d'éléments, de siphons (ou modules) bouchés, les agents de distribution et les aiguadiers viennent constater le problème en collaboration avec les agriculteurs. L'intervention pour arrêter l'eau est effectuée par un agent de distribution. L'aiguadier doit alors faire une demande de travaux au chef de centre qui juge de la priorité du travail puis transmet à l'arrondissement, au bureau d'entretien. La durée entre la constatation du problème et la fin des travaux est très variable suivant la priorité accordée aux réparations. Dans tous les cas, l'heure de constatation du problème est mentionnée et bloque ainsi la procédure de taxation. Le volume non alloué à l'agriculteur lui sera restitué dès que possible.

Sur le plan de la consommation en eau, le volume non attribué au canal sinistré est alloué suivant un *tour d'eau de répartition*. Cette ré allocation se fait suivant la demande avec un ordre de priorité non prédéfini mais qui, en règle général donne une importance décroissante aux critères suivants:

- Agriculteur qui n'a pas irrigué depuis longtemps pour causes d'endettement ou s'il a été victime de chute d'élément dans un tour d'eau précédent.
- Agriculteur dont les cultures sont manifestement en manque.
- Agriculteurs appartenant à un tertiaire dont la durée de distribution est longue (du fait de leur grande superficie). On essaie alors dans la mesure du possible (limites de fonctionnement des canaux) d'augmenter le débit.

Notons également que si les demandes sont trop importantes, il n'existe à priori pas d'ordre de priorité dans la distribution.

En cas de sous alimentation au niveau de l'oued (chute de débit qui devient inférieur aux prévisions) on applique la règle du *délestage*. S'il manque par exemple 2m³/s par rapport à la demande du tour d'eau, on ferme un ou plusieurs secondaires dont la somme des débits atteindra les 2m³/s manquants. La durée de fermeture des prises secondaires est le plus souvent de 48h (voir 24h). S'il y a toujours sous alimentation, on procède à une rotation dans la fermeture des prises, en veillant à avoir toujours une offre égale à la demande. Ce processus continue jusqu'à avoir une capacité égale à la demande initiale. Dans tous les cas, les volumes non attribués aux prises pour cause de fermeture leurs sont ré attribués en priorité dès la situation rétablie. S'il le faut, d'autres prises dont la distribution est prévue à cette date (au moment du rétablissement de la situation) sont décalées. Dans la réalité, la recherche d'équité est parfois difficile à respecter du fait des fluctuations importantes des débits de l'oued et du fait du processus de régulation par l'amont du réseau qui provoque forcément des difficultés à garantir une dotation équitable pour l'aval. Notons que ce cas de figure devrait s'estomper à l'avenir, suite à la mise en place du barrage. Celui ci permettant d'utiliser le réseau avec un volume connu (et non pas estimé) par semaine.

En cas de pluie la procédure adoptée est variable suivant la saison et l'intensité de la pluie. Seules les pluies d'hiver relativement longues (plus de 3 à 4 jours) sont en général susceptibles de provoquer un report de la demande par les agriculteurs. Cependant, les délais nécessaires à l'établissement du tour d'eau et l'inertie du système gravitaire font qu'il est délicat de provoquer l'arrêt des apports en cas de pluie, le plus souvent, isolée. Toute fermeture entraîne évidemment l'annulation de la taxation sur les volumes restants.

Le cas où le débit de l'oued est supérieur aux prévisions (relativement rare), un tour d'eau supplémentaire est organisé. La encore la dotation se fait en général aux premiers demandeurs.

4.1.4 Paramètres de contrôle pour l'établissement d'un tour d'eau (Mode de détermination du barème).

Comme nous l'avons vu, à chaque tour d'eau l'aiguadier prépare un MV2 prévisionnel pour les 14 jours suivants. Pour élaborer son tour d'eau, il doit respecter certains paramètres de contrôle interdépendants fixés par le chef de canal. L'aiguadier est ainsi informé d'un barème (Dotation en heures par hectare) et d'un débit limite de fonctionnement du secondaire dont il est responsable pour la mise en place du tour d'eau. Ce débit limite est attribué pour 15 jours mais est modulable à la fin de la première semaine suivant la tendance du débit de l'oued (cette modulation devrait disparaître avec la mise en place définitive du barrage). Enfin, une durée limite du tour d'eau à l'échelle du secondaire (durée au bout de laquelle tous les agriculteurs ont reçu leur dotation en eau (cette durée est en général fixée à 14 jours) et au delà de laquelle la culture non irriguée est jugée en danger.

4.1.4.1 Calcul des paramètres de contrôle

- Dotation à l'hectare :

Elle est attribuée par le chef de canal en concertation avec le chef d'arrondissement, en fonction des disponibilités en eau de l'oued et de l'estimation de la demande. Le calcul est en fait le suivant :

$$Alloc = \frac{q \cdot 24 \cdot t}{0,03 \cdot S} \text{ (H/ha)}$$

Avec :

q : débit à distribuer.

t : durée du tour d'eau (choisie en concertation).

S : Superficie équivalente à la demande.

Par exemple :

Débit en tête de CP (m3/s)	Débit à distribuer (-10%)	Demande (ha)	Durée du TD (j)	Allocation à l'ha (H/ha)
10	9	27800	12	3,1

Dans ce genre de cas de figure, l'allocation est fixée à 3H et le surplus est redistribué à la demande ou à l'amiable.

Si on se réfère à l'exemple de l'année 2000 cette dotation limitée à 3H à l'hectare pendant presque toute la saison sèche (mars à août), du fait d'une demande maximale des agriculteurs et d'une ressource limitée par les capacités de l'oued. Ce calcul est réalisé à une fréquence hebdomadaire.

- Débit limite de fonctionnement pour le secondaire (par semaine):

On calcule dans un premier temps un débit fictif continu :

$$q_{fc} = \frac{\text{Débit CP}}{\text{Surfacetotale}} \text{ (l/s/ha)}$$

Chaque secondaire ayant une surface maximale irrigable fixée on obtient un débit maximal par prise, en considérant que toutes les prises secondaires doivent répondre à une demande maximum, ce qui n'est pas toujours le cas (la demande réelle peut être inférieure à la demande maximale du fait de l'endettement de certains agriculteurs). Ce paramètre est fixé à un pas de temps hebdomadaire.

- Fréquence du tour d'eau :

La durée du tour d'eau dépend de la dotation accordée (nombre d'heures par hectare), de la demande (correspondant à une superficie) et de la main d'eau en sortie de tertiaire qui est de 30 l/s sauf exception. Le gestionnaire est toujours amené à considérer en même temps la dotation à l'hectare et la durée du tour d'eau car les deux sont liées. Du fait de la situation climatique caractéristique d'un climat aride il est évident que le choix d'une durée de tour d'eau est assez restreint. Cependant, la dotation minimale accordée ne peut franchir un seuil de 3H/ha, dotation en dessous de laquelle il devient difficile pour les agriculteurs de manipuler à la parcelle un volume si faible, ce qui peut entraîner des fréquences de retour de l'eau à la parcelle de l'ordre de 15 jours, avec, nous le verrons, tous les effets négatifs que cela peut avoir sur les cultures.

→ L'établissement du tour d'eau et sa programmation sont réalisés en veillant toujours à ce que ces 3 paramètres de contrôle interdépendants soient satisfaits.

4.15 La télémessure

L'arrondissement utilise également la télémessure comme outil de contrôle du bon fonctionnement de la distribution de l'eau. Au niveau des stations de mesure il s'agit d'un dispositif automatique type déversoir à crête épaisse. Des capteurs mesurent automatiquement 2 hauteurs amont et aval, puis la différence est introduite dans une formule qui renvoie la valeur du débit. Toutes les minutes les valeurs sont enregistrées puis moyennées au pas de temps de 15 min. Les différents points de mesures automatiques sont situés aux points suivants :

- Entrée du canal principal.

- Fin du canal principal (entrée de la prise 23).
- Siphon de sécurité (en fin de canal principal).
- Entrée du canal médian.
- Fin du canal médian.

Les données de télémesures sont communiquées à différentes stations de réception par ondes hertziennes. Les stations de réception sont au nombre de quatre :

- Beni Moussa Est.
- Beni Amir.
- Beni Moussa Ouest.
- Station agroclimatique Crat.

Chaque station dispose de 15 minutes par heure pour établir la liaison radio et collecter les valeurs moyennes des débits des différents points de contrôle.

Les résultats sont affectées à une macro afin de constater l'évolution par heure des débits. Les résultats sont utilisés pour le contrôle quotidien de la bonne marche des règles de distribution et pour la vérification en cas de problème ou de plaintes.

Synthèse des règles de gestion:

Le but des gestionnaires de l'office est la satisfaction de la demande individuelle de chaque agriculteur. Cependant, dans le contexte actuel de pénurie d'eau de surface, l'office impose un barème identique pour chaque agriculteur (mais variable dans le temps). La logique actuelle est donc égalitaire, mais d'un contexte favorable on recherche la satisfaction de la demande.

- La gestion tactique (A l'échelle du Canal principal) prévoit une répartition au prorata des surfaces entre secondaires. La demande réelle n'est pas prise en compte. Il n'y a pas d'ordre de priorité entre les prises. Nous sommes ici dans une logique de répartition équitable de l'offre.

- Au sein d'une même prise secondaire, la répartition est organisée par un aiguadier. Chaque agriculteur a droit à une dotation fixée par les règles tactiques. Cependant, les superficies à partir desquelles sont exécutés les barèmes sont arrondies à la discrétion de l'aiguadier. De même, lors de l'établissement du MV2, la somme des heures attribuées aux tertiaires d'une même prise doit être un multiple de 14 (la semaine étant partagée en 14 parties), ceci entraînant l'ajout d'heures pour atteindre ce chiffre. Il est ainsi difficile de retrouver la répartition spatiale de ces heures ajoutées. Dans les cas fréquents où des agriculteurs sont endettés, la dotation qui leur était réservée est répartie encore une fois, par les aiguadiers, entre d'autres agriculteurs du même tertiaire ou vers d'autres tertiaires.

- Ainsi, chaque agriculteur a droit à une dotation minimum quasiment toujours utilisée (sauf cas d'endettement ou de conflit d'héritage...) particulièrement pendant la saison sèche. Cette dotation semble bien respectée. Les règles de distributions sont donc égalitaires à la base (dotation minimum garantie) mais il reste cependant que certains agriculteurs bénéficient de dotations à l'ha plus importantes que d'autres sur l'année. Cependant il reste difficile de connaître le poids des règles de gestion dans les inégalités de consommation annuelle à l'hectare car pour évaluer ces dernières il convient d'y intégrer le dimensionnement du réseau (problème amont aval), l'endettement des agriculteurs, etc...

Le tableau 4 résume les règles de distribution de l'eau aux différentes échelles du périmètre:

Echelle Gestion	Responsable	Règle d'allocation – Distribution.	Equité
Canal Principal Tactique	Chef de canal Chef d'arrondissement	Prorata de la superficie irigable des prises.	Répartition au prorata des superficies irrigables.
Prises secondaires Opérationnelle	Aiguadier	<u>Etablissement du tour d'eau :</u> Barème à l'hectare. Débit limite à respecter. Durée du tour d'eau à minimiser	<u>But :</u> Satisfaction de la demande. Superficie des exploitations arrondies lors de l'application du barème. Possibilité de redistribuer des surplus à la demande.
	Agent de distribution	Action d'ouverture-fermeture des prises.	-
Prises tertiaires Opérationnelle	Agent de distribution (sortie de secondaire)	Exécution du bon distribué par l'aiguadier.	-
	Agriculteur	Chaque agriculteur connaît son horaire de dotation.	Bon fonctionnement observé. Mais possibilité de vols d'eau.

Tableau 4 : Règles de distribution de l'eau aux différentes échelles du périmètre.

4.2 Les indicateurs de performance du réseau.

Dans cette partie nous donnerons quelques indicateurs en terme de performance du réseau. La recherche et le calcul de ces indicateurs sont en effet apparus comme une des attentes des gestionnaires de l'ORMVAT dans le cadre d'une gestion de la ressource de surface à travers le réseau plus proche de leurs objectifs. L'ORMVAT possédant beaucoup de données sur les performances du réseau ou sur les caractéristiques agricoles du périmètre cette attente correspond ainsi à un besoin de retour d'informations synthétique sur le fonctionnement des tours d'eau en termes de service eau, d'équité de distribution et d'équilibre apports-besoins. Nous donnerons ici un exemple d'utilisation de quelques indicateurs simples à différentes échelles d'espace et de temps. Notons que la description des performances d'un réseau d'irrigation par l'intermédiaire d'indicateurs est une notion relativement récente. La Banque Mondiale ainsi que d'autres banques de développement qui ont beaucoup investi dans de nombreux projets sur les périmètres irrigués ont récemment mis en avant la nécessité de pouvoir quantifier les performances des périmètres irrigués afin de préciser entre autre le choix et les sommes des investissements pour la réhabilitation ou la mise en place de systèmes irrigués (Burt and Styles, 1999).

Notons cependant qu'un indicateur isolé ou un petit groupe d'indicateurs ne peuvent pas répondre à toutes les interrogations concernant le fonctionnement et la performance d'un système irrigué (Burt and Styles, 1999). L'information contenue dans un indicateur n'a parfois aucune valeur si elle est analysée seule, sans autres sources extérieures d'informations et surtout sans connaissances des objectifs des gestionnaires. Nous précisons donc dans notre cas que si les 3 indicateurs étudiés permettent de mettre en évidence certains défauts ou qualité de fonctionnement du réseau de Beni-Amir, leur interprétation a été appuyée par des confrontations auprès des gestionnaires locaux et des enquêtes de terrain.

4.2.1 Etude théorique sur les indicateurs.

4.2.1.1 Le DPR.

Un indicateur souvent utilisé pour caractériser les performances du "service eau" est le *Delivery Performance Ratio (DPR)*. C'est le ratio entre le volume réellement délivré et le volume que l'on prévoit de délivrer ou que l'on souhaite délivrer (Molden and Gates, 1992).

$$DPR = (\text{Vol. délivré}) / (\text{Vol. prévu})$$

Cet indicateur est directement lié à l'échelle de temps choisie, les volumes utilisés sont ainsi des moyennes sur une période donnée. Dans le cadre du Tadla, on utilisera cet indicateur pour caractériser les difficultés d'exécution du tour d'eau par rapport à l'objectif initial. Les volumes prévus sont ainsi les volumes additionnés lors de l'établissement du tour d'eau prévisionnel. Les volumes réellement délivrés correspondent aux relevés des consommations. Ainsi le volume prévu correspond au volume normal mentionné dans le MVII. En effet il s'agit du volume demandé par les agriculteurs au niveau des tertiaires, additionné sur l'ensemble de la prise avant l'exécution du tour d'eau (donc le volume prévu). On peut en effet parler de volume prévu car la demande des agriculteurs est limitée par les instructions du chef de canal (barème à l'hectare, limitation du débit en tête de secondaire...) qui sont elles même fonction des estimations empiriques du volume disponible en tête de canal principal (directement fonction du débit de l'oued) pour la semaine à venir. De même le volume réellement attribué correspond au volume facturé (c'est le volume réellement délivré en tête de parcelle). Ce volume tient compte des modifications (volume additif, volume annulé) dues aux tours d'eau additifs et aux volumes annulés pour cause de chutes d'éléments, de débordements, de sous alimentation etc... On ne pourra donc calculer cet indicateur qu'à l'échelle du tertiaire du fait du manque de données concernant les autres échelles d'étude.

Les données de l'ORMVAT utilisées pour le calcul du DPR se présentent sous la forme suivante :

Réseaux	Vol. Lâché	Volume Distribue				Pertes	Vol. Facturé
		Vol. Normal	Vol. Additif	V. Annulé	Total (3+4-5)		
	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
P 8	111780	99900	7128	0	107028	4752	107028
P 9	105300	92664	6480	972	98172	7128	98172
P 10	64152	77436	972	19008	59400	4752	59400
P 11 A	45360	44064	4212	4644	43632	1728	43632
P 11 B	98712	91692	11988	11016	92664	6048	92664

Tableau 5 : Exemple de bilan de fin de tour d'eau à l'échelle des prises secondaires. Tour d'eau du 30/06/00 au 06/07/00. Données "Bilan CGR".

Les termes du bilan sont :

Vol. Lâché : C'est le volume lâché en tête de secondaire pendant la durée du tour d'eau.

Vol. Normal : C'est le volume prévu qui doit être consommé, donc délivré en sortie de tertiaire.

Vol. Additif : C'est le volume ajouté au cours du tour d'eau.

Vol. Annulé : C'est le volume non délivré correspondant aux anomalies de fonctionnement.

Total : C'est le volume réellement délivré en sortie de tertiaire ((3) + (4) – (5)).

Pertes : C'est le volume des pertes par efficacité du réseau (infiltrations, évaporation. . .) ((2)-(6)).

Vol. Facturé : C'est en fait le volume Total. Cette colonne est utilisée comme moyen de contrôle. Elle doit toujours être égale à la colonne Total.

Dans ce tableau on s'aperçoit qu'au cours d'un même tour d'eau il peut y avoir un volume annulé (pertes dues à des anomalies telles que des chutes d'éléments, bouchages de siphons. . .) et un volume additif (volume supplémentaire dont on dispose au moment de l'exécution du tour d'eau mais qui n'était pas prévu). Ainsi, le seul calcul du DPR peut masquer l'importance de ces annulations et de ces compensations pour rétablir une distribution la plus proche possible de l'objectif fixé. Il sera donc important de considérer un nouvel indicateur permettant de souligner l'importance des volumes annulés (et des volumes ajoutés) par rapport aux volumes prévus. Cet indicateur sera exprimé selon la formule suivante :

$$Pan = (\text{Volume annulé} / \text{Volume prévu})$$

$$Paj = (\text{Volume ajouté} / \text{Volume prévu})$$

Avec :

Pan : Part du volume annulé par rapport au volume prévu.

Paj : Part du volume ajouté par rapport au volume prévu.

Les valeurs suivantes du DPR ont été utilisées dans un contexte similaire au Pakistan (Kuper, 1997) et sont indiquées ici à titre indicatif :

Indicateur	Objectif	Valeurs de performance		
		Bon	Moyen	Médiocre
DPR	1	0,9 – 1,1	0,7 – 0,89	< 0,70
			1,11 – 1,30	> 1,30

Tableau 6 : Indicateur de performance (Kuper, 1997).

4.2.1.2 Le RWS. (Relative water supply)

Le RWS est considéré par l'IWMI (sur la base des travaux de Levine, 1982 et Perry, 1996 rapporté par Burt and Style, 1999) comme l'indicateur de base concernant l'approvisionnement en eau. Plus précisément cet indicateur renseigne sur la proportion de l'offre en eau (Irrigation par le réseau + pluie) par rapport aux besoins (besoin en eau réel ou ETr). Notons que nous ne tiendrons pas compte des volumes pompés car nous nous intéressons au fonctionnement du réseau. Il est important de préciser ici que la demande en eau du réseau par l'agriculteur n'est pas influencée par le fait que celui-ci possède un puit ou non. En effet, le pompage étant plus coûteux que l'irrigation par le réseau, l'agriculteur a toujours intérêt à demander la dotation maximale du réseau à laquelle il a droit. La formule théorique est la suivante :

$$RWS = (Ir + P) / ETr$$

Avec :

Ir : Irrigation par le réseau

P : Précipitations

ETr : Evapotranspiration réelle

Le RWS peut être analysé à différentes échelles de temps. Dans un premier temps nous utiliserons cet indicateur comme indice d'un bilan annuel mais on verra par la suite l'importance de diminuer l'échelle de temps pour faire apparaître par exemple quelles sont les périodes où les besoins en eau ne sont pas satisfaits où les périodes où la demande en eau est trop largement supérieure aux besoins.

Au niveau de l'échelle d'espace on a calculé le RWS aux 3 échelles hydrauliques du périmètre:

- Le réseau :

Le terme Ir correspond au volume par ha lâché en tête de réseau.

- La prise:

Le terme Ir correspond au volume lâché en tête de secondaire (volume facturé + volume de pertes ajoutés par l'aiguadier, ce terme est ici un pourcentage moyen du volume consommé que l'on a calculé pour un ensemble de MVII prévisionnels de l'année 2000).

- Le tertiaire :

Le terme Ir correspond au volume lâché en tête de tertiaire.

Pour ces 3 échelles le calcul de l'ETr a été fait (voir le paragraphe 4.4.1 Termes du bilan) sur la base des assolements réalisés pendant la campagne 99-00 (données CDA) et de l'ET₀ Penman-Monteith calculée à la station agrométéorologique CRAT. Pour les coefficients et calendriers culturels nous avons exploité les données de l'office.

4.2.1.3 Le CV_R.

Le CV_R est un coefficient spatial de variation qui permet de renseigner sur l'équité spatiale de distribution. C'est le ratio entre l'écart type de la série des consommations moyennes par prises et la moyenne de cette même série (Molden and Gates, 1992). Soit une série X, la série des consommations moyennes par hectare et par prise:

$$CV_R = \text{Ecart type}(X) / \text{Moyenne}(X)$$

Christiansen (1942, (rapporté par Burt and Styles, 1999)) proposa également un coefficient d'uniformité (CUC) pour l'irrigation qui n'est autre qu'une version modifiée du CV_R :

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum |X_n - \bar{X}|}{N \cdot \bar{X}} \right)$$

Avec :

X_n : la valeur de l'observation.

$\bar{X}$: la moyenne des observations.

N : le nombre des observations.

Notons que la surface totale d'une prise, utilisée dans le calcul des consommations par hectare est la somme des surfaces des tertiaires ayant reçu au moins une irrigation pendant la campagne. Le CV_R peut être utilisé à plusieurs échelles. A l'échelle du périmètre afin de juger de l'équité entre les prises. A l'échelle de la prise pour voir les inégalités de consommations entre les tertiaires d'une même prise. On peut aller jusqu'à descendre à l'échelle du tertiaire pour juger de la disparité des consommations entre agriculteurs. Un CV_R proche de 1 voudra dire que la consommation à l'hectare de l'eau de réseau est homogène. Plus on s'éloigne de 1 en tendant vers 0 et plus l'hétérogénéité est importante. Attention, le CV_R ne permet pas de juger de l'inégalité volontaire de règles de distribution de la ressource en eau de surface mais permet de juger de l'hétérogénéité ou de l'uniformité de la situation en terme de consommation en eau du réseau.

4.2.1.4 L'intervalle entre 2 irrigations par le réseau.

Nous avons décidé de calculer cet indicateur qui renseigne sur la fréquence de retour de l'eau du réseau à la parcelle afin de souligner les périodes de l'année où la combinaison entre dimensionnement des canaux, offre et demande en eau du réseau ne permet pas de garantir une fréquence d'irrigation satisfaisant pour les besoins en eau des cultures.

4.2.2 Analyse des résultats.

4.2.2.1 Le DPR.

Nous disposons des données "Bilans CGR" pour deux trimestres de l'année 2000. Les DPR ont donc été calculé à des pas de temps hebdomadaires pour ces 2 trimestres (du 30/06 au 11/12). Si l'on fait un bilan sur les 2 trimestres, on obtient les résultats suivants :

	P8	P20amont	P17	P12aval
DPR	1,01	1,00	1,02	0,99

Tableau 7 : DPR moyen sur la période 30/06 au 11/11.

On peut remarquer que le DPR est égal à 1 ou très proche du résultat objectif dans les 4 cas ce qui signifie, à priori que sur une échelle relativement longue la dotation que l'on a prévu de verser à l'agriculteur lui est versée.

Considérons l'évolution hebdomadaire de cet indicateur :

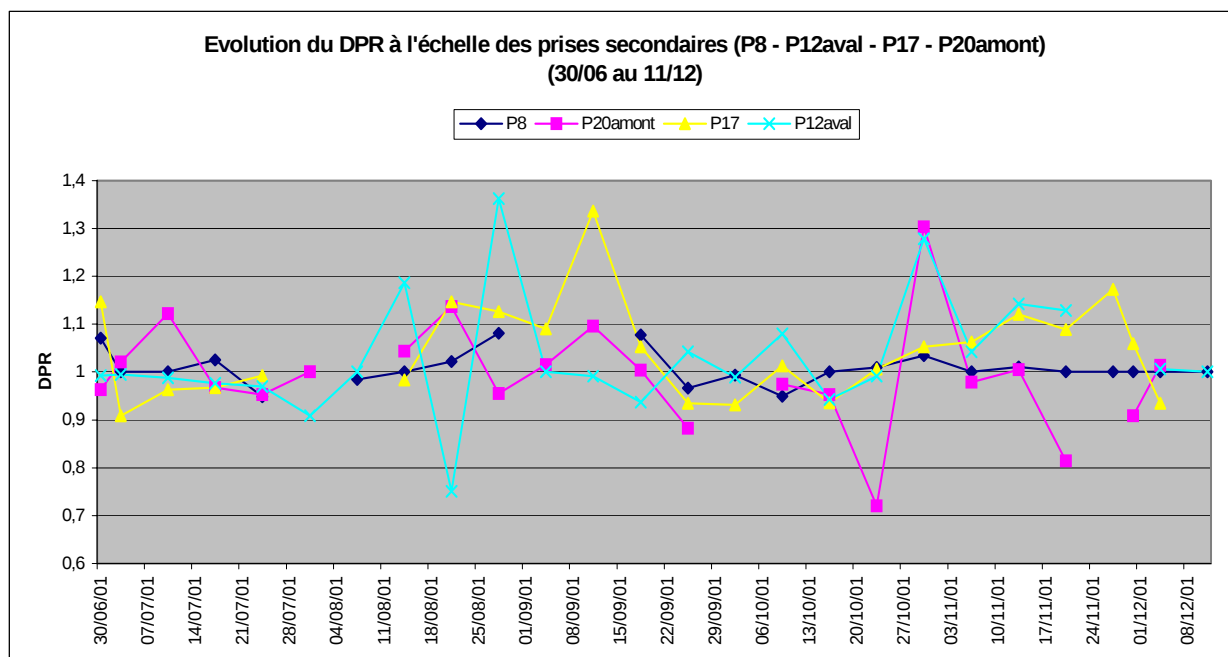


Figure 12: Evolution du DPR à l'échelle des prises secondaires (exemples de P8 - P20 amont - P17 - P12aval) (30/06/00 au 11/12/00).

Nous pouvons remarquer sur cette figure qu'à l'échelle hebdomadaire, si certaines prises présentent une évolution du DPR systématiquement comprise entre 0,9 et 1,1, d'autres comme P20amont ou P12aval présentent des écarts parfois importants par rapport à la valeur objectif (DPR observés à 1,35 ou 0,75 pour un objectif de 1).

Nous pouvons voir également, sur la Figure 13 que la part des volumes annulés et des volumes ajoutés par rapport aux volumes prévus est très variable suivant et les prises. Certaines prises comme P12aval (ou P20amont) sont sujettes à des annulations de volumes (suivies de compensations parfois au cours de la même semaine) très importantes (30 à 40 %), alors que P8 ne connaît presque pas d'anomalies dans l'exécution de son tour d'eau. Sur cette même figure, nous pouvons remarquer que pour chacune des 2 prises P8 et P12aval, les 2 courbes Pan et Paj suivent une évolution très similaire. Cela montre que le tour d'eau n'est pas figé puisque l'on cherche à compenser toutes pertes avant le tour d'eau suivant (dans la mesure du possible). Il y a donc un travail de réactualisation permanente pour que l'agriculteur puisse bénéficier de la dotation à laquelle il a droit. Mais cela montre également des différences entre les prises quand à la difficulté d'exécution du tour d'eau (compensations permanentes). Même si cela demande à être confirmé, les prises situées à l'aval du réseau comme P12aval (ou P20amont) semblent plus exposées à des anomalies de fonctionnement que les prises amont comme P8.

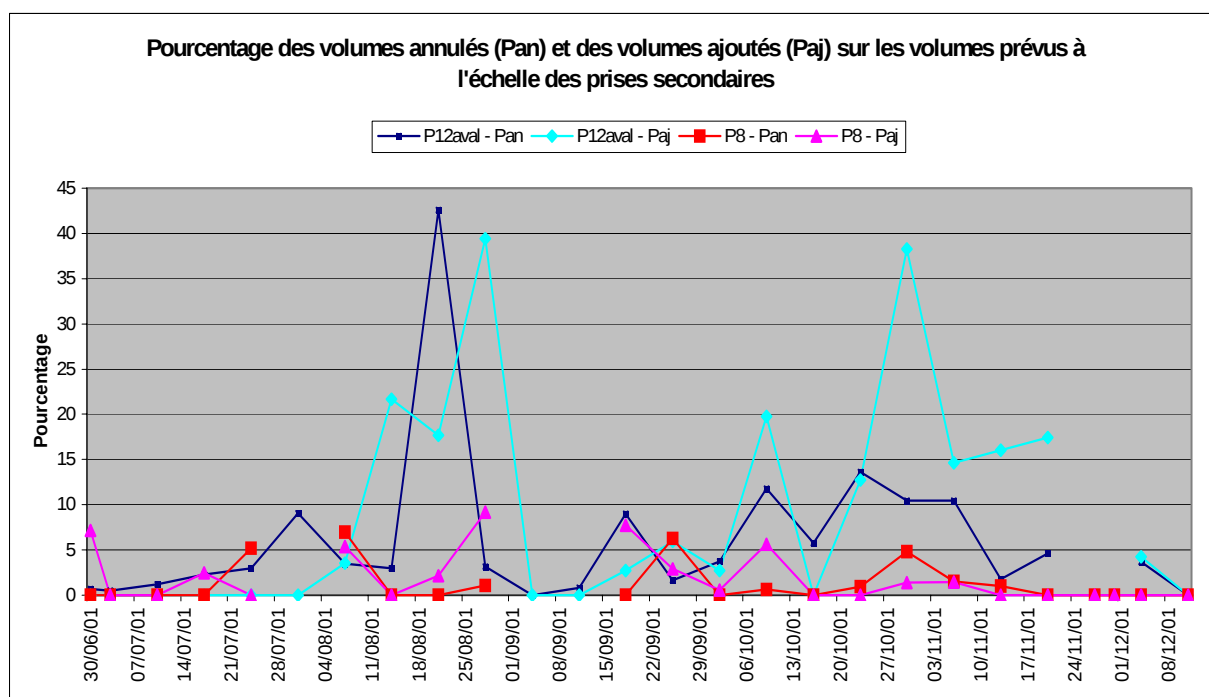


Figure 13: Pourcentage des volumes annulés (Pan) et volumes ajoutés (Paj) par rapport aux volumes prévus à l'échelle des prises secondaires. (Exemples des prises P12aval et P8)

Cependant, les données dont nous disposons à l'heure actuelle ne permettent pas de travailler à une autre échelle que celle de la prise (échelle des tertiaires par exemple) ni à une autre échelle de temps. Ainsi, il n'est pas possible de déterminer pour l'instant si un volume annulé sur un tertiaire au cours d'un certain tour d'eau sera rendu au cours du même tour d'eau ou au tour d'eau suivant. De plus, même si ce volume était rendu au cours du même tour d'eau, sachant que la durée de celui-ci peut être de 15 jours en saison sèche, un tour d'eau additif qui surviendrait 10 jours après la date initiale prévue pour l'irrigation pourrait avoir des conséquences néfastes sur les cultures. Il serait donc intéressant à l'avenir d'éclaircir ces interrogations et d'évaluer ce DPR (par des enquêtes de terrain) à l'échelle du tertiaire.

➔ L'étude du DPR permet de quantifier l'impact des fluctuations de l'oued Oum-Er-Rbia et des divers problèmes liés à l'usure du réseau (chutes d'éléments, bouchages de siphons, débordements...) sur la distribution de l'eau. Il semble d'ailleurs à ce sujet que l'aval (P12aval) connaisse plus de problèmes que l'amont (P8) dans l'exécution du tour d'eau (recherche de l'équilibre entre volumes prévus et volumes distribués) comme le montre la figure 11. Cependant, le fait qu'à une échelle de temps relativement longue (2 trimestres) on ait pour les 4 prises un DPR très proche de 1 montre le souci des gestionnaires d'atteindre l'objectif prévu et de délivrer la dose à laquelle l'agriculteur a droit. Cela passe par une réactualisation permanente (tours d'eau additifs (figure 3)). On peut également dire que les objectifs initiaux sont fixés de façon réaliste.

4.2.2.2 Le RWS.

- Etude à l'échelle du réseau :

Les données disponibles concernant les volumes lâchés au Canal principal permettent d'évaluer le RWS à un pas de temps mensuel.

MOIS	RWS
septembre	1,98
octobre	2,53
novembre	3,25
décembre	0,77
janvier	1,88
février	1,48
mars	0,97
avril	1,22
mai	1,31
juin	0,89
juillet	0,78
août	0,94
Campagne	1,33

Le RWS moyen sur l'ensemble de la campagne laisse penser que les apports sont trop peu supérieurs aux besoins des cultures dans un contexte d'irrigation gravitaire et de travail à la robta au niveau de la parcelle. En effet, même si l'efficience entre l'entrée du canal principal et la sortie des canaux tertiaires est relativement bonne (20 % en moyenne), et compte tenu d'une perte dans les séguis de distribution estimée à 20% du volume en sortie de tertiaire (projet SIT, 1986), le RWS en entrée de parcelle serait par projection, légèrement inférieur à 1 (0,93).

→ La disponibilité de la ressource annuelle en eau de surface et en pluviométrie est supérieure aux besoins en eau des cultures à l'échelle du périmètre mais de manière insuffisante pour le type d'irrigation pratiquée au Tadla.

A l'échelle de temps intra-annuelle, nous avons choisi de comparer le "RWS (réseau + pluie)" (qui correspond à la définition officielle du RWS) au terme appelé "RWS (réseau uniquement)" qui ne tient pas compte de la pluviométrie dans la somme des apports. Ainsi, cela permettra de quantifier l'importance de la pluviométrie pour combler le déficit hydrique du réseau et de préciser la (ou les) période(s) de la saison pendant laquelle le réseau ne peut satisfaire à lui seul les besoins des cultures. Précisons que le contexte de pénurie d'eau, tant pluviométrique que surfacique, n'incite pas les agriculteurs à tenir compte de la pluviométrie dans leur demande en eau du réseau (surtout en période sèche). La demande en eau du réseau peut donc être considérée comme indépendante vis à vis de la pluviométrie.

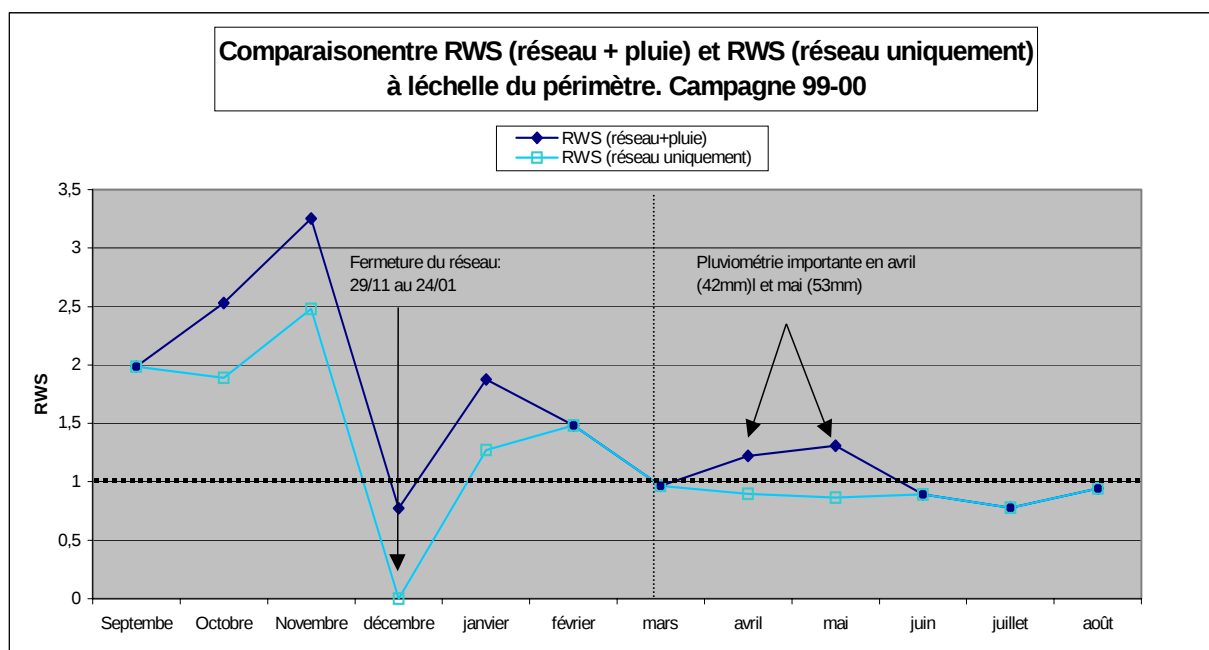


Figure 14 : Comparaison entre le RWS (réseau + pluie) et le RWS (réseau uniquement) à l'échelle du périmètre. Campagne 99-00

Sur cette figure, on peut distinguer 2 périodes caractéristiques concernant le RWS de la campagne 99-00:

- La période de Septembre à Février, pendant laquelle les apports en eau du réseau sont à eux seuls suffisants pour satisfaire la demande évapotranspiratoire (si l'on excepte la période coupure annuelle du réseau en décembre).
- La période de Mars à Août pendant laquelle seules les pluies importantes d'avril et de mai permettent de maintenir pour ces 2 mois un RWS supérieur à 1. En effet, à partir de mars, l'augmentation importante de la demande évapotranspiratoire combinée aux conditions de limitation importante de la ressource surfacique ne permet pas maintenir le RWS au dessus de la valeur critique 1 sans apports pluviométriques importants et sans recours au pompage.

Le RWS moyen pour ces 2 périodes est le suivant:

RWS	
Septembre à Février	Mars à Août
1,97	1,03

Tableau 8 : RWS pour les périodes Septembre-Février et Mars-Août.

→ Le déroulement de la campagne agricole sur Beni-Amir semble donc séparé en 2 saisons (que l'on appellera par la suite hiver et été) avec un net inversement de tendance quand au rapport entre offre et demande qui est la conséquence directe de la combinaison entre une limitation importante des ressources de l'oued et une croissance très marquée de l'évapotranspiration des cultures. Notons que la pluviométrie joue donc en été un rôle cruciale de prévention du déficit hydrique.

- Etude à l'échelle des secondaires :

Les 4 prises P8, P12aval, P17 et P20amont ont été étudiées selon la même méthode que précédemment . Les valeurs moyennes annuelles du RWS sont les suivantes :

RWS	Campagne 99-00
P8	1,10
P12aval	0,95
P17	1,12
P20amont	0,80

Tableau 9 : RWS annuel pour les 4 prises secondaires étudiées.

Les valeurs sont inférieures à celles obtenues à l'échelle du périmètre, ceci étant principalement dû à l'efficacité de distribution dans le canal primaire. On remarque aussi un déficit global pour les prises P12aval et P20amont situées à l'aval du réseau.

A l'échelle intra-annuelle on obtient la figure suivante pour les 4 prises d'étude:

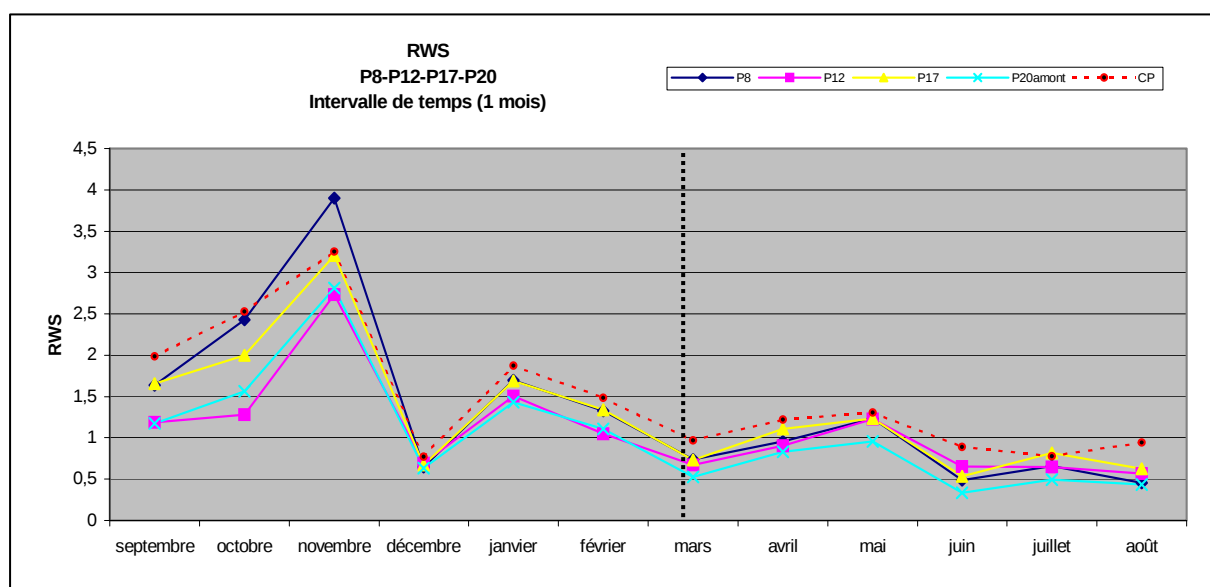


Figure 15 : Evolution intra-annuelle du RWS à l'échelle des 4 prises secondaires. (Campagne 99-00)

Sur la Figure 16, si la saison d'hiver montre un RWS moyen plus faible pour les prises P12aval et P20amont, la période de mars à août montre des évolutions de RWS croisées, laissant penser qu'il n'y a pas d'ordre ni de différences systématiques entre les prises secondaires en ce qui concerne l'adéquation entre offres et besoins. La figure suivante qui représente les valeurs de RWS saisonniers de chaque prise secondaire étudiée confirme ces inversions de tendance dans le classement du RWS notamment avec les exemples de P8 et P12aval ainsi que P12aval et P20amont :

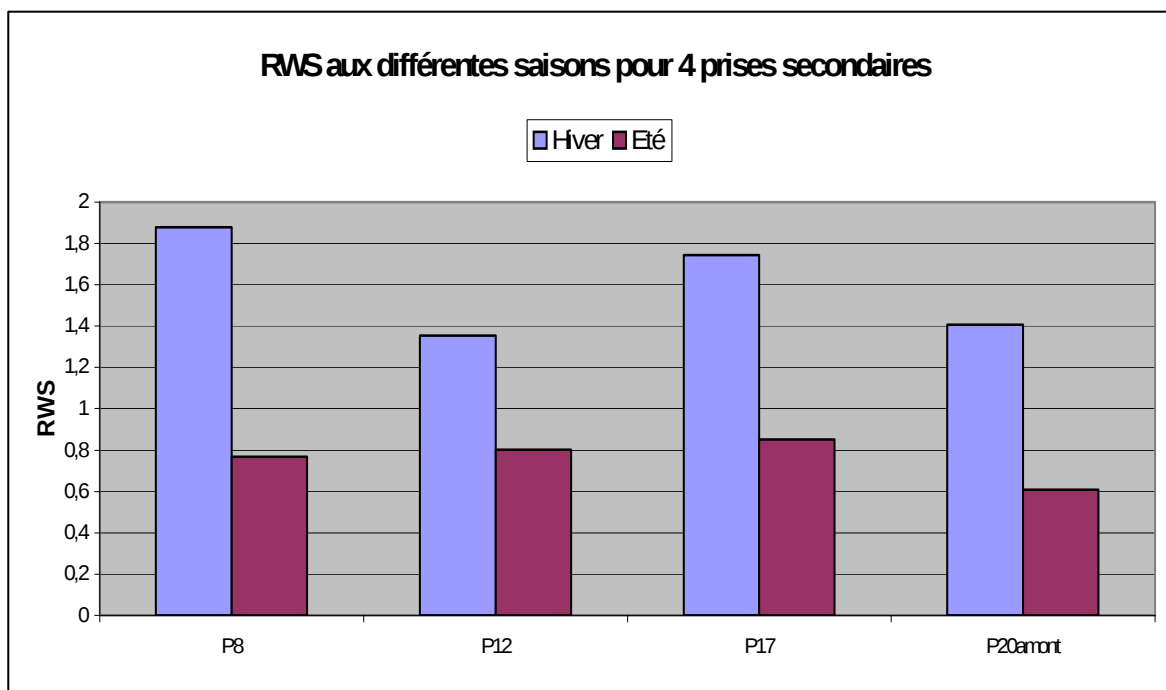


Figure 16: RWS calculé par période (septembre - février et mars - août) pour les 4 prises étudiées.

➔ Concernant l'adéquation entre offre et besoins à l'échelle des secondaires il n'y a donc pas de prises qui soient systématiquement déficitaires par rapport aux autres tout au long de la campagne même si globalement, les prises P12aval et P20amont situées en aval du réseau ont le RWS le plus faible.

- A l'échelle des tertiaires :

A l'échelle des tertiaires on ne dispose pas de données suffisamment nombreuses sur les assolements pour donner une vision globale des différences et inégalités à cette échelle.

4.2.2.3 Le CVR.

Rappelons qu'en matière de répartition des volumes du réseau, l'objectif de l'office est de satisfaire la demande de chaque agriculteur. Cependant, dans le contexte actuel de pénurie en eau de surface (particulièrement en saison sèche), l'office applique un barème identique pour tous les agriculteurs. On se trouve donc actuellement dans une logique égalitaire du fait de conditions limitantes de la ressource mais des conditions plus favorables pourraient modifier cette tendance vers une recherche de la satisfaction individuelle.

Le calcul du CVR a porté sur les consommations par hectare à l'échelle annuelle. Il est difficile de considérer une autre échelle de temps (mensuelle ou hebdomadaire) car chaque prise du réseau ou chaque tertiaire d'une même prise a une fréquence d'irrigation (non connue de manière précise aux échelles des prises ou des tertiaires) différente. Ainsi, calculer un CVR sur une échelle de temps trop courte n'est pas significatif dans ce contexte d'irrigation par tour d'eau à fréquence variable car toutes les prises ou tertiaires n'auront pas effectué le même nombre de tours d'eau. Les échelles de temps retenues sont ainsi l'année mais également les 2 saisons (septembre - février et mars - août) précédemment mis en évidence dans l'évaluation de l'adéquation entre offre et besoins. Les résultats obtenus à l'échelle de temps annuelle et pour différentes échelles spatiales sont les suivants:

CVR				
Réseau	P8	P12aval	P20amont	P17
0,10	0,13	0,45	0,24	0,31

Tableau 10 : CVR des consommations annuelles par hectare à l'échelle du réseau et à l'échelle des prises secondaires (Campagne 99-00).

A l'échelle du réseau, on peut penser qu'il existe une bonne équité entre prises. Cela semblerait confirmer les propos tenus au sujet des règles de gestion, à savoir une gestion tactique égalitaire. Le volume disponible prévisionnel en entrée du canal principal étant redistribué entre les prises⁴ au prorata de leur surface totale (et non pas au prorata de la surface demandeuse en irrigation). Cela pourrait également provenir des assolements mais dans un contexte de rareté de la ressource de surface, dans un contexte d'irrigation à la robta (très consommatrice en eau) et du fait que le coût du pompage est supérieur à celui du réseau on peut considérer que quel que soit l'assolement pratiqué la demande en eau du réseau est supérieure à l'offre et que l'assolement n'influe pas sur les consommations.

Cependant, notons qu'il existe tout de même une différence annuelle de 25 à 30 % entre les consommations à l'hectare des trois prises les moins alimentées et les consommations des 3 prises les plus dotées. La figure suivante montre les différences de consommation annuelle à l'hectare entre les prises pour la campagne étudiée.

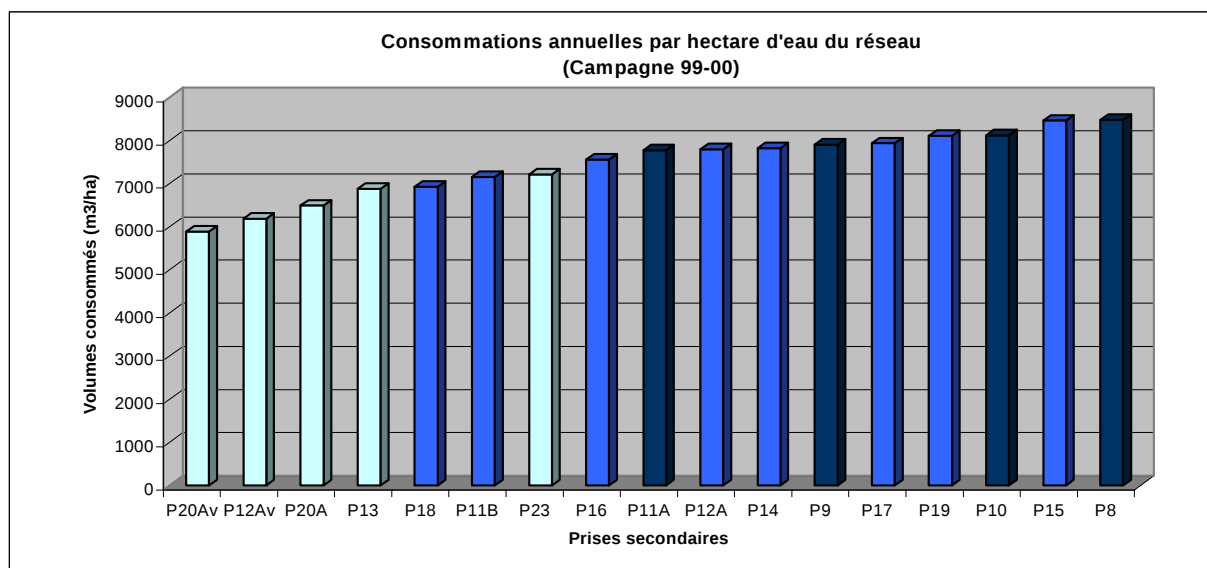


Figure 17 : Consommations annuelles du réseau par hectare. (Campagne 99-00). En bleu foncé : les prises situées le plus en amont du réseau. En bleu ciel : les prises situées le plus en aval du réseau.

Il est important de noter que les 4 prises les moins consommatrices sont toutes situées en aval du réseau.

→ Ainsi, si les règles de gestion semblent égalitaires dans la répartition des consommations entre prises secondaires il est tout de même important de constater qu'il existe un écart assez important (20 à 30%) entre les prises les plus consommatrices et les prises les moins consommatrices et que ces dernières sont situées à l'aval du réseau.. Or on suppose que du fait d'une grande homogénéité des assolements et dans un contexte de rareté de la ressource, la demande en eau du réseau est la même à l'amont qu'à l'aval.

A l'échelle inférieure, l'équité entre tertiaires d'une même prise secondaire est beaucoup plus aléatoire comme le montre les chiffres du Tableau 10. Les facteurs permettant d'expliquer ces différences sont ici plus nombreux et dynamiques qu'à l'échelle supérieure. En ce qui concerne les règles de gestion, même si l'aiguadier est soumis à des

⁴ Sauf P5, P6 et Oulja qui bénéficient à titre expérimental de dotations spéciales pour cette campagne 99-00.

règles égalitaires (barème à l'hectare) il bénéficie d'une certaine souplesse pour établir son tour d'eau (arrondi, redistribution des volumes restants après application du barème, redistribution de volumes non consommés par des agriculteurs endettés...). Le mauvais fonctionnement de certains tertiaires (chutes d'éléments, périodes de restauration...) ou l'endettement de certains agriculteurs sont également des raisons possibles de plus faibles consommations de certains tertiaires par rapport à d'autres.

Synthèse sur les indicateurs de performance du réseau :

Il faut tout d'abord rappeler qu'un indicateur n'est pas une fin en soi. Comme il a déjà été dit, l'information contenue dans un indicateur n'a parfois aucune valeur si elle est analysée seule, sans autres sources extérieures d'informations et surtout sans connaissances des objectifs des gestionnaires.

Nous avons souligné dans les paragraphes précédents l'importance de considérer ces indicateurs à différentes échelles d'espace et de temps (lorsque cela est possible compte tenu du nombre d'informations nécessaires) pour garder une vision dynamique et spatialisée du fonctionnement du périmètre.

Les enseignements que l'on peut tirer de cette première étude sur les indicateurs au cours de la campagne 99-00 sont les suivants:

- La première chose que l'on peut dire est que le tour d'eau n'est pas fixé mais qu'il est au contraire très dynamique. L'analyse du DPR a montré qu'il y a une recherche permanente de l'équilibre entre tour d'eau réalisé et tour d'eau prévisionnel entraînant des modifications permanentes du fait des aléas de la distribution (volumes annulés, volumes ajoutés). Si sur une échelle de temps relativement longue (semestre par exemple), la somme des dotations auxquelles l'agriculteur avait droit lui a été fourni, il n'est pour l'instant pas possible (compte tenu d'un manque de données à l'échelle des tertiaires et de l'exploitation) de conclure quant à la satisfaction de la bonne dose au bon moment. Le terme de volume prévu est de plus élaboré sur la base d'une demande pour la durée d'un tour d'eau, soit entre 6 et 15 jours environ. Ainsi, il n'est pas possible pour le gestionnaire ou pour l'agriculteur de prévoir à moyen ou long terme quel sera le jour où telle exploitation sera irriguée. Or en saison sèche, il est très délicat de retarder une irrigation dans un contexte où la ressource est déjà insuffisante. Ainsi, il serait intéressant à l'avenir de disposer de données en terme de dates d'apports des doses d'irrigation prévues et distribuées à l'échelle des tertiaires ou de l'exploitant.
- En terme d'hétérogénéité des consommations et d'équité entre les prises, on s'aperçoit qu'à l'échelle du réseau, l'équité entre les secondaires est globalement bonne ($c_{vr} = 0,10$), ceci étant fortement lié aux règles de distribution théoriquement égalitaires entre les prises. Cependant, on peut voir que la zone aval du périmètre (4 prises couvrant plus de 7000 ha) a une dotation annuelle à l'hectare en moyenne 20 à 30% inférieure à celles des zones les plus desservies malgré les efforts importants consentis par l'office pour compenser le système de régulation par l'amont. Par contre, à l'échelle des tertiaires on s'aperçoit d'une différence en terme de consommation de la ressource beaucoup plus marquée. Il est plus délicat de connaître tous les facteurs d'influence ainsi que leur sensibilité pour expliquer ces différents comportements. D'une part les règles de gestion ne sont pas les mêmes qu'à l'échelle supérieure et d'autre part, à l'échelle des tertiaires, le poids des différences entre agriculteurs au niveau des stratégies d'assolement, de trésorerie, sur les consommations en eau est beaucoup sensible qu'au niveau des secondaires.
- En ce qui concerne l'adéquation entre apports et besoins, on ressent très nettement l'influence des fluctuations de l'oued et des limites d'un barrage de dérivation. Ainsi, on distingue clairement une période assez largement excédentaire de septembre à février et une période déficitaire de mars à août, largement tributaire de la pluviométrie. De manière globale, la ressource en tête de réseau, même si supérieure aux besoins en eau, n'est pas suffisante dans un contexte d'irrigation gravitaire et traditionnelle pour satisfaire les besoins des cultures actuelles. On souligne donc ici la nécessité d'avoir recours à une ressource complémentaire, en l'occurrence la ressource souterraine.

L'utilisation de ces indicateurs par les gestionnaires de l'ORMVAT peut-être intéressante pour une gestion différente qui réponde à ses objectifs. Par exemple, le calcul du CV_R global après chaque tour d'eau permet ainsi de distinguer quelles sont les prises les moins alimentées et éventuellement de compenser ces sous-alimentations si l'objectif est une répartition égalitaire. De même le calcul du RWS à des pas de temps réguliers permet de mettre en évidence l'inadéquation entre offre du réseau et besoins pour certaines prises et par exemple de sensibiliser les agriculteurs ne possédant pas de puit à une modification des assolements pour pallier ce déficit. Quoi qu'il en soit, le calcul des indicateurs à des pas de temps rapprochés peut permettre aux gestionnaires un suivi régulier du déroulement et de la qualité de la distribution en eau par rapport aux objectifs fixés. Les indicateurs peuvent alors être utilisés comme un outil d'aide à la décision pour la gestion de la distribution de l'eau du réseau.

4.3 Bilans Hydriques sur la campagne 99-00.

Un modèle de bilan hydrique du sol doit remplir une fonction de gestion (ou d'étude de la gestion) de la réserve en eau au cours du temps (Choisnel, 1992). Ainsi, en réalisant des bilans aux différentes échelles du périmètre nous avons cherché à compléter l'étude sur l'identification temporelle et spatiale d'éventuels problèmes de gestion de l'eau et sur les possibilités d'intervention pour une meilleure utilisation de cette ressource.

4.3.1 Les différents types de bilan.

4.3.1.1 A l'échelle du réseau et des prises secondaires :

Pour ces 2 échelles nous avons calculé le bilan mensuel suivant:

$$\text{Bilan} = Ir + Pe - Etr$$

Avec :

Ir : Irigation par le réseau

Pe : Pluviométrie efficace.

ETr : Evapotranspiration réelle.

Le calcul de ces termes a été réalisé de la manière suivante :

- Les apports du réseau :

Quelque soit l'échelle considérée nous considérons les apports du réseau en tête du système considéré (entrée du canal primaire ou entrée des prises secondaires). Les données de l'ORMVAT sont des données de consommation en sortie de tertiaire ainsi qu'en entrée de canal principal. Cependant, à partir des comptes rendus d'exécution des tours d'eau, les volumes ajoutés (aux volumes réclamés par les agriculteurs) de manière empirique par les aiguadiers pour tenir compte des efficacités des prises permettent d'avancer une efficacité des secondaires variant suivant les prises entre 5 et 10%.

Remarque :

Dans le bilan, nous ne prenons pas en compte les apports en eau souterraine par manque de données précises sur les volumes et fréquences de pompage. Cependant, comme nous l'avons dit précédemment dans un contexte de ressource limitée en eau de surface, et du fait que le pompage est plus coûteux que le réseau, nous pouvons très raisonnablement considérer que les apports du réseau ne sont pas liés à la disponibilité d'une ressource souterraine par l'agriculteur. Le pompage est utilisé comme complément d'irrigation.

- La pluviométrie efficace:

Les précipitations dans le Tadla se font sous forme de pluies légères et isolées dans le temps. Pour ne considérer que les pluies entrant dans le système sol nous ne considérerons que les épisodes pluvieux journaliers supérieurs à 5 mm en hiver et 10 mm en saison sèche (Projet SIT). Les données pluviométriques sont celles de la station agroclimatique CRAT qui enregistre les précipitations quotidiennement. Notons qu'il n'existe qu'une seule source de données pluviométriques sur l'ensemble du périmètre de Beni-Amir et que nous considérerons donc que la pluviométrie est répartie de manière homogène sur le périmètre.

- L'évapotranspiration :

La station CRAT récolte quotidiennement toutes les données nécessaires au calcul de l'évapotranspiration selon la formule de Penman Monteith modifiée (FAO Expert Consultation, 1990) qui s'écrit :

$$ET_0 = c \left[\frac{s}{s + \gamma} Q + \frac{\gamma}{s + \gamma} 2,7 f(u)(e_s - e(z)) \right]$$

Avec :

ET_0 : Evapotranspiration de référence (mm / j)

c : Facteur d'ajustement.

Q : Radiations nettes équivalentes (mm / j)

$f(u)$: fonction vent, $f(u) = 1 + 0,864u^2$ (avec u^2 = vitesse du vent (m/s)

$e_s - e(z)$ = déficit de pression de vapeur saturante.

s : Constante de proportionnalité de_a/dT_a (hPa/K)

γ : Constante Psychométrique (hPa/K)

Les coefficients culturaux utilisés pour le calcul de l'évapotranspiration réelle sont issus des données adaptées de références FAO et de références marocaines pour les cultures de blé, de betterave à sucre et tournesol (Belabbès, 2000). Ces coefficients culturaux sont disponibles en annexe.

Ainsi, pour chaque culture pratiquée au Tadla nous avons calculé les évapotranspirations réelles journalières en suivant le calendrier cultural en vigueur sur les périmètres du Tadla et suivant la formule :

$$ET_r = K_c \cdot ET_0$$

Les valeurs de K_c (coefficient cultural) de début et de fin de chaque phase de développement ainsi que leurs durées sont disponibles en annexe. Le schéma des variations de K_c dans le temps est le suivant :

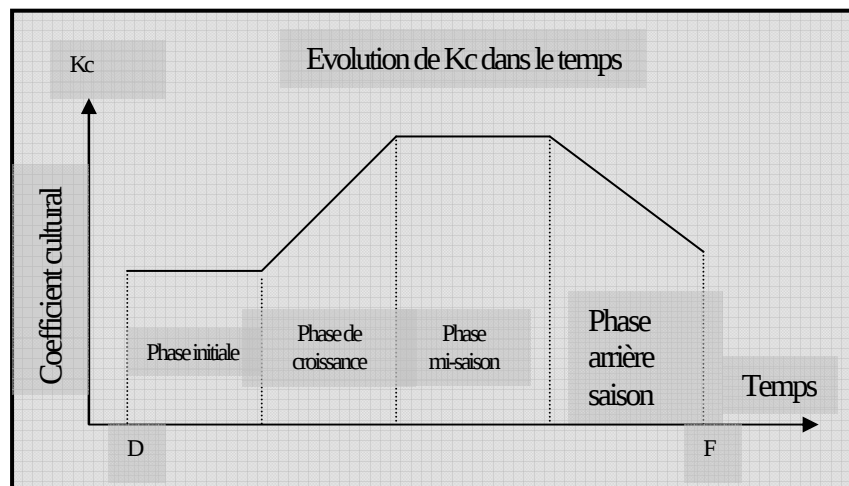


Figure 18: Schéma simplifié des variations de K_c en fonction du cycle de développement de la culture. (D : début de cycle - F : fin de cycle), (FAO, 1977).

Au cours des phases de croissance et d'arrière saison les valeurs de K_c sont calculées en considérant une évolution linéaire.

4.3.1.2 A l'échelle des tertiaires et des exploitations.

A l'échelle des tertiaires et des exploitations, nous avons choisis un modèle simple à réservoir sol (1 seul réservoir correspondant à la RU (Réserve Utile)) découpée en 2 parties : la RDU (Réserve Difficilement Utilisable) et la RFU (Réserve Facilement Utilisable).

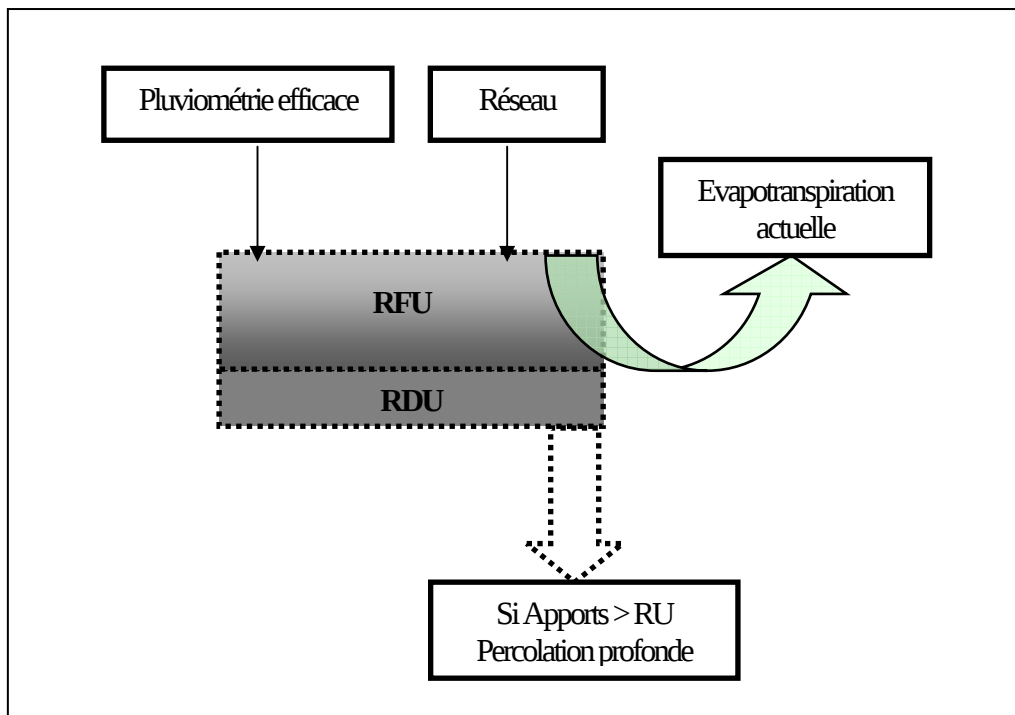


Figure 19: Schéma du bilan avec réservoir sol.

Dans le calcul du bilan, les apports sont :

- Les apports du réseau (volumes journaliers ou hebdomadaires suivants les échelles considérées).
- La pluviométrie efficace.

Les sorties sont :

- L'ET_r (calculée à partir de l'ET₀ Penman Monteith).
- Les pertes par percolation profonde.

Ces termes ont été calculé de la manière suivante :

- La RFU :

Celle ci est dépendante d'un certain nombre de facteurs tels que la structure du sol (porosité, stockage) et le type de cultures considérées, dont la partie souterraine est croissante au fil de son développement. Cependant, du fait des échelles considérées et de la diversité des cultures pratiquées nous simplifieront les calculs en considérant une profondeur utile de réhumidification fixe.

Les principaux sols rencontrés dans le Tadla sont composés de sols isohumiques. Ils sont répartis en trois sous ensembles (Jebbour, 1995) :

- *Bruns subtropicaux modaux* (84%) :

Ce sont des sols de texture équilibrée argileuse présentant un gradient calcaire croissant avec la profondeur (10 à 20 %) et reposant sur dalle calcaire.

- *Bruns subtropicaux salins et ou alcalins* (7%) :

Ce sont des sols calcaires dès la surface reposant sur une dalle épaisse ou croûte friable. Leur réserve facilement utilisable est moyenne (40-50mm) et leur texture est argileuse et argilo-limoneuse.

- *Châtains modaux* (2%) :

Sols non ou peu calcaires, très profonds, de texture équilibrée, ayant une bonne réserve en eau facilement utilisable (60 à 70 mm). Le gradient en matière organique décroît avec la profondeur.

Ainsi, dans nos calculs de bilans hydriques nous considérerons les caractéristiques de sol suivantes reconnues par l'ORMVAT:

$$\begin{aligned}RU &= 90 \text{ mm} \\ RFU &= 60 \text{ mm} \\ RDU &= 30 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Les apports du réseau :

Les apports du réseau ont été calculé de la même manière que précédemment. Pour le calcul de l'efficience à la parcelle, les travaux du projet SIT (Projet Maroc-Belge, rapport n° 4, 1986) ont permis d'évaluer les pertes dans les seguias d'amenée en tête de parcelle à 20% du volume en sortie de tertiaire (les pertes dues aux seguias de distribution intra-parcellaires étant estimées à 25% de ce même volume).

- La pluviométrie efficace:

Le calcul est identique à celui du paragraphe 3.3.1.1.

- L'évapotranspiration :

Le calcul est le même qu'au paragraphe 3.2.1.1 à la différence près que dans le cadre du bilan sol nous tiendrons compte du fait que si la réserve hydrique du sol devient inférieure à sa RDU, la culture devient en situation de stress hydrique et que le terme E_{Tr} devient :

$$E_{Tr} = (K_c \cdot E_{To}) \cdot \alpha$$

$$\text{Avec } \alpha = \frac{RH}{RDU}.$$

- Les pertes par percolation profonde.

N'ayant pas de données sur les valeurs et la répartition des profondeurs de sol au Tadla permettant d'utiliser un modèle à double réservoir, nous considérons en première approximation que tout apport dépassant la RU est un apport potentiel vers la nappe par percolation profonde. Les sols du Tadla ayant une topographie très plane et la technique d'irrigation se faisant à la robta (petits bassins à fond plat) nous considérons que le ruissellement est négligeable.

Le fonctionnement du bilan est le suivant :

Nous considérons qu'au 1^{er} septembre la réserve hydrique du sol est de 30 mm soit la RDU.

A chaque pas de temps (journalier) nous effectuons le bilan suivant:

$$RH(t) = RH(t-1) + P(t) + Ir(t) - E_{Tp}(t)$$

Si $RH(t) > RU$:

$$E_{Tr}(t) = E_{Tp}(t)$$

$$D_p = RH(t-1) + P(t) + Ir(t) - E_{Tp}(t)$$

$$RH(t) = RU$$

Si $RH(t) < RDU$:

$$E_{Tr}(t) = E_{Tp}(t) \cdot RH(t) / RDU.$$

$$DH = E_{Tp}(t) - E_{Tr}(t).$$

Avec :

$RH(t)$: Réserve Hydrique au temps t (mm).

$P(t)$: Pluviométrie utile au temps t (mm).

$Ir(t)$: Apports du réseau d'irrigation au temps t (mm).

$E_{Tp}(t)$: Evapotranspiration réelle potentielle de la culture au temps t (mm).

ETr(t): Evapotranspiration réelle de la culture au temps t (mm).

Dp(t) = Drainage profond au temps t (mm).

DH(t) = Déficit hydrique au temps t (mm).

RU = Réserve utile (mm).

RFU = Réserve facilement utilisable (mm).

RDU = Réserve difficilement utilisable (mm).

→ Il est important de préciser que pour réaliser ce type de bilan sol nous faisons l'hypothèse que la répartition des apports en irrigation se fait de manière homogène sur l'ensemble du tertiaire (ou de l'exploitation suivant l'échelle considérée) et que la mise en place des cultures respecte le calendrier cultural en vigueur dans la plaine du Tadla (voir annexe).

4.3.2 Analyse des bilans.

Les différentes échelles du périmètre qui ont été étudiées sont :

- Le réseau dans sa globalité (tête du canal principal).
- La prise secondaire (P8 – P12aval – P17 – P20amont).
- Le tertiaire.
- L'exploitation.

Le réseau (canal principal):

A l'échelle du réseau nous avons choisi un bilan mensuel :

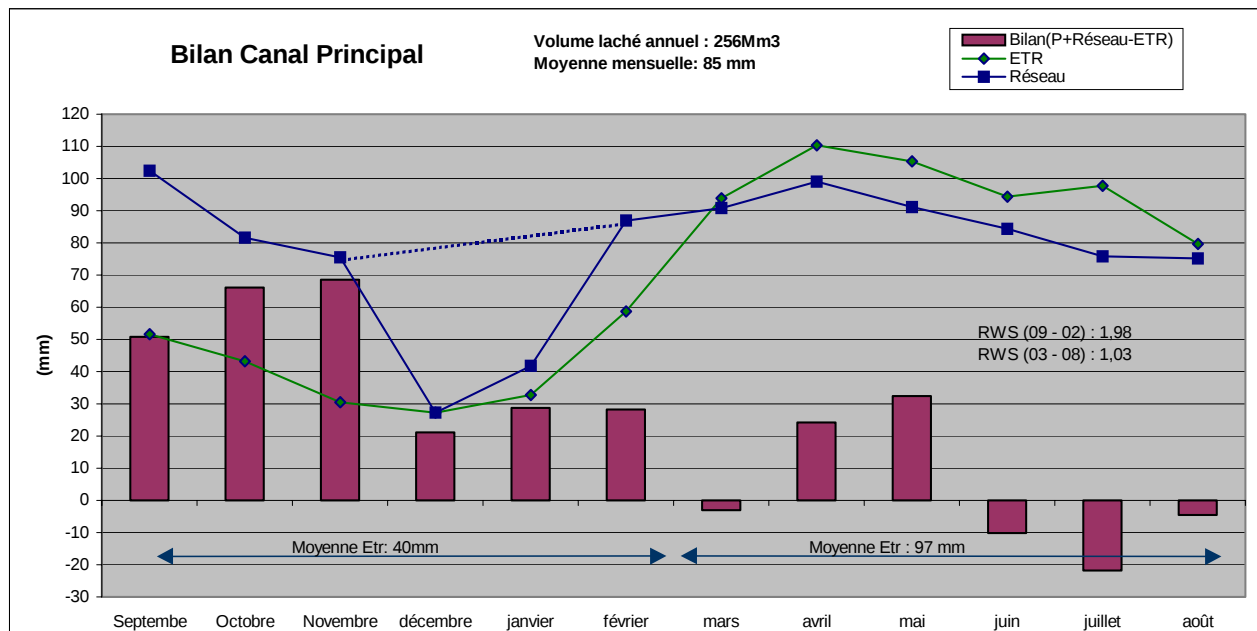


Figure 20: Bilan hydrologique (sauf pluviométrie) mensuel à l'échelle du réseau (Campagne 99-00)

Sur le graphique ci dessus nous pouvons remarquer deux phases bien distinctes en terme d'évapotranspiration :

- Septembre – Février : moyenne de 40 mm.
- Mars – Août : moyenne de 97 mm.

En ce qui concerne les apports par le réseau, l'évolution ne suit pas celle de l'ETR puisqu'elle se situe sur une moyenne assez régulière d'environ 85 mm (si l'on excepte les mois et demi de coupure annuelle, pointillés bleus sur la figure).

Au niveau du bilan, nous remarquons que jusqu'à février nous nous trouvons dans une situation de consommation largement excédentaire puisque la moyenne du RWS (voir la partie sur les indicateurs) (*Relative Water Supply*) est de 1,98 en comptabilisant la période de fermeture du réseau.

Du mois de mars au mois d'août, le RWS moyen chute à 1,03. Notons que les bilans positifs des mois d'avril et de mai (RWS : 1,2 et 1,3) sont fortement influencés par la pluviométrie (35 mm et 45 mm). Cette différenciation entre les 2 périodes vient du fait qu'en hiver, les volumes disponibles au niveau de l'oued sont beaucoup moins limitant qu'en saison sèche et les volumes lâchés, même s'ils obéissent à un barème, satisfont les agriculteurs. Par contre, en été les capacités de l'oued deviennent limitées face à des conditions évapotranspiratoires qui augmentent très fortement.

➔ Nous voyons donc qu'à l'échelle du périmètre, même si la ressource globale du réseau annuelle semble suffisante, sa disponibilité temporelle, fortement sujette aux fluctuations de l'oued, ne permet pas de garantir la satisfaction des besoins en eau des cultures pendant presque 6 mois de l'année (mars à août). La pluviométrie, nous le reverrons, joue un rôle prépondérant pendant cette période.

4.3.2.1 Les secondaires.

Comme il a été dit dans le chapitre concernant les règles de gestion et dans l'étude des indicateurs, la distribution d'eau entre les secondaires est globalement assez homogène mais révèle un déficit important dans un contexte de rareté de la ressource. Nous avons ici étudié le bilan hydrique de 4 prises représentatives des cas extrêmes en terme de consommation à l'hectare afin d'étudier la sensibilité des différences entre ces prises:

- Les secondaires P12aval et P20amont dont les consommations sont parmi les moins importantes et qui sont situées en aval du réseau.
- Le secondaire P17 qui correspond à une situation de consommation annuelle à l'hectare légèrement supérieure à la moyenne et qui se situe en queue de canal principal.
- Le secondaire P8 qui correspond à un exemple de consommation parmi les plus importants et situé en amont du réseau.

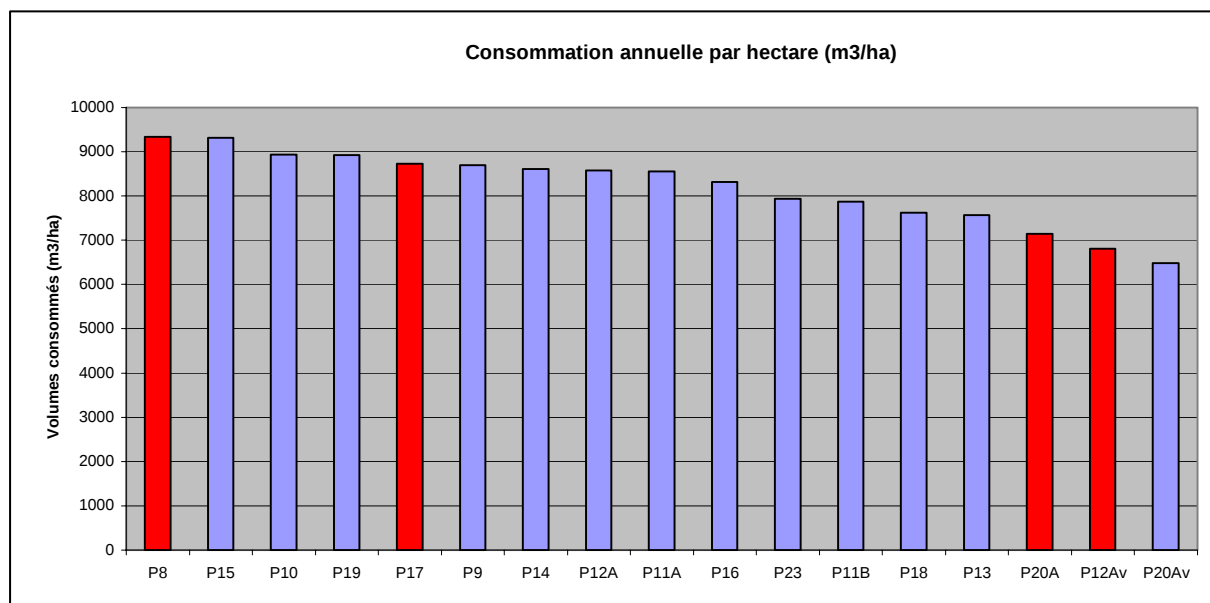


Figure 21: Situation des prises étudiées dans l'échelles des consommations annuelles par hectare (Campagne 99-00).



- Les résultats des bilans hydriques :

Nous remarquons que les 4 bilans ont une allure très semblable à celle observée précédemment au niveau du Canal Principal. Notons tout de même qu'à cette échelle des secondaires nous avons tenu compte de l'efficacité du canal principal qui est de 10%. Ainsi, nous distinguons toujours les 2 périodes précédemment citées :

Septembre - Février :

Pour les mois d'Octobre à Janvier, nous remarquons que quelle que soit la prise secondaire étudiée, la pluviométrie permet de combler un peu plus de la moitié des besoins nécessaires. Ainsi, sur la période de Septembre à Février, les apports totaux permettent de satisfaire la demande évapotranspiratoire (qui est en moyenne inférieure à 50 mm par mois) et de maintenir un bilan positif (si l'on excepte la fermeture annuelle en Décembre-Janvier). Par contre, d'un point de vue quantitatif, cet excès ne se traduit pas de la même manière suivant les prises (voir Tableau 11). Par exemple, en hiver, la prise P8 présente un bilan positif dont l'excédent s'élève à 254 mm alors que celui de la prise P20amont est de 110 mm.

Mars - Août :

Cette période se traduit encore, comme à l'échelle du canal principal, par un déficit global. Quelle que soit la prise étudiée, les mois de mars mais surtout de juin, juillet et août sont tous nettement déficitaires. Seules les pluviométries importantes de mai et d'avril, pour cette campagne 99-00, permettent de maintenir un bilan positif pour P8, P17 et P12aval (sans considérer d'éventuel recours au pompage). Comme pour la saison d'hiver, il existe en été des écarts importants de déficit hydrique entre les prises. Par exemple, la prise P20amont présente un déficit (277 mm) pratiquement trois fois supérieur à celui de la prise P17 (97 mm). Quoi qu'il en soit, il apparaît clairement qu'une ressource supplémentaire est nécessaire en été pour combler le déficit hydrique, et ce, quelle que soit la prise étudiée.

→ Si nous considérons le bilan de l'ensemble de la campagne agricole 99-00, nous pouvons remarquer que pour les prises P8 et P17, le bilan général est positif. Ainsi, une meilleure répartition des volumes dans le temps permettrait de combler les besoins en eau des cultures sans avoir besoin de recourir à une ressource supplémentaire. Nous pouvons penser que le futur contexte d'approvisionnement en eau de surface grâce au barrage de stockage de Dchar-El-Oued pourrait permettre d'envisager cette nouvelle répartition temporelle des volumes. Ceci nécessite cependant de vérifier que le dimensionnement du réseau puisse permettre une distribution de volumes plus importants en été sans que cela n'entraîne une augmentation de la fréquence de retour de l'eau à la parcelle qui devienne préjudiciable aux cultures.

En ce qui concerne les prises secondaires P20amont et P12aval, nous pouvons nous apercevoir que globalement, le recours à une ressource supplémentaire en eau serait nécessaire même si la répartition des volumes était plus équilibrée. Par rapport aux besoins.

PRISE	Bilan Hiver	Bilan Ete	Bilan Annuel
P8	+ 254 mm	- 165 mm	+ 89 mm
P17	+ 210 mm	- 97 mm	+ 113 mm
P20amont	+ 110 mm	- 277 mm	-167 mm
P12aval	+ 95 mm	- 121 mm	- 26 mm

Tableau 11 : Bilans Hydriques par saisons et annuel à l'échelle des prises P8, P17, P20am et P12av.

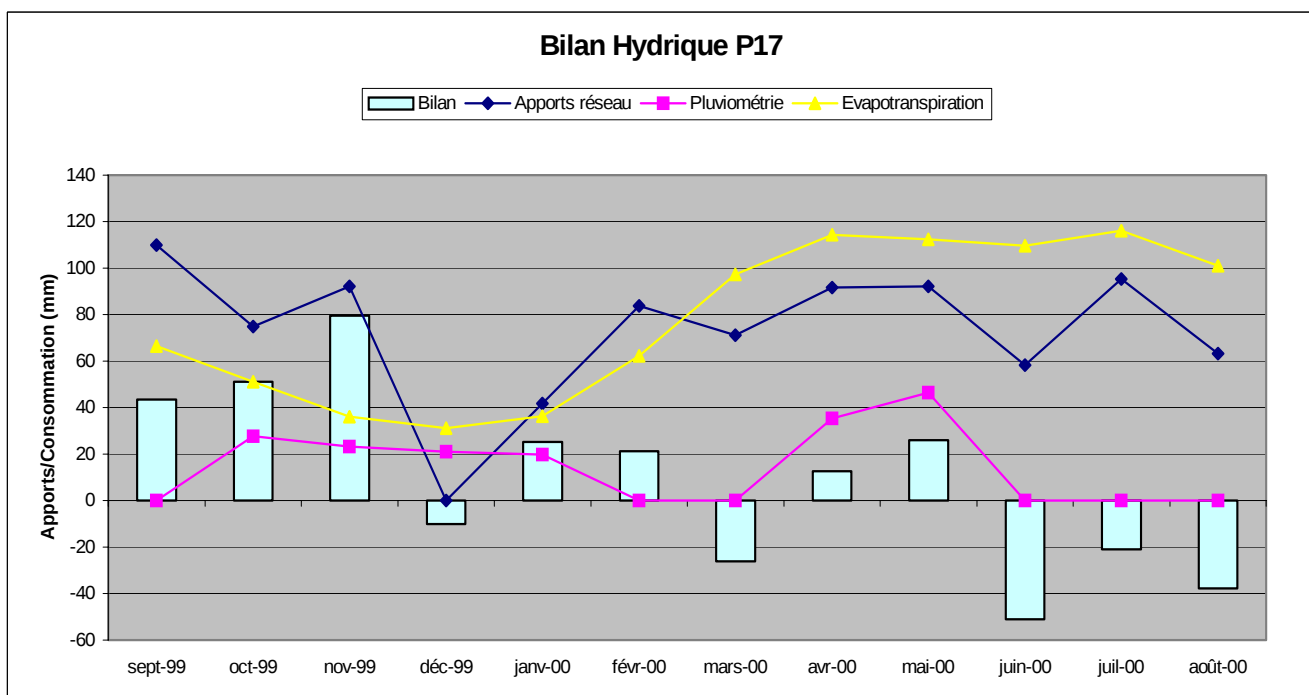
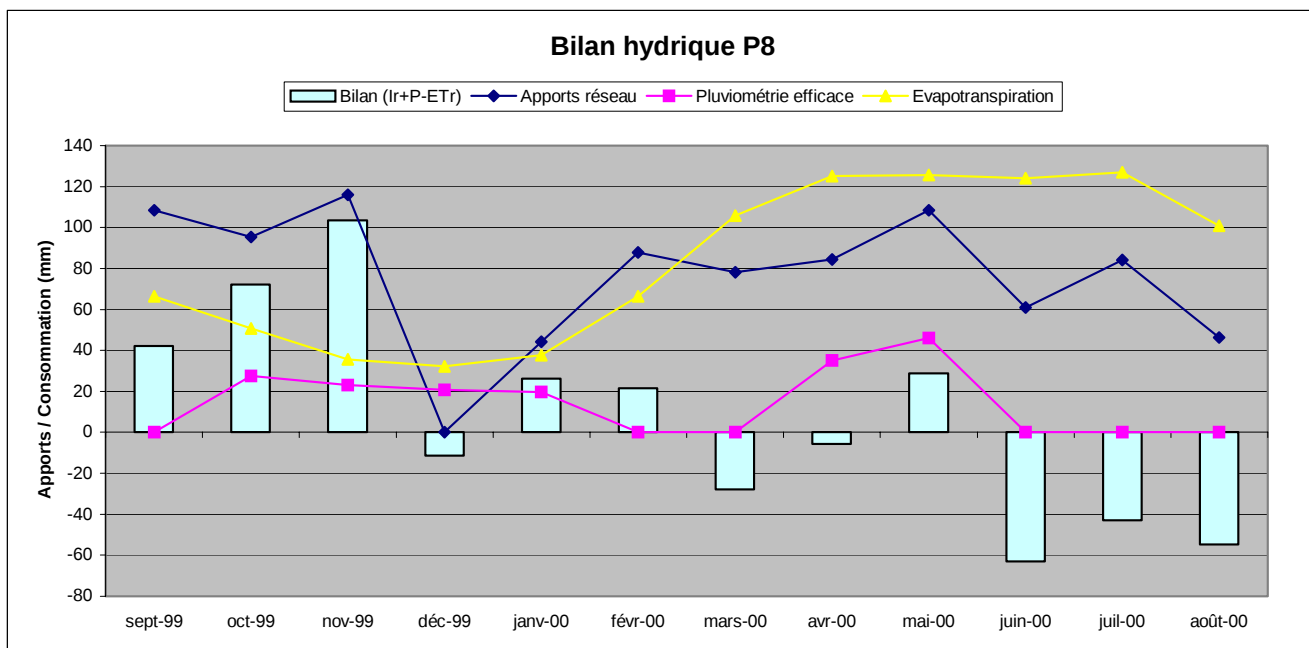


Figure 22 (a) et (b) : Bilans hydriques mensuels des prise P8 et P17 pour la campagne 99-00.

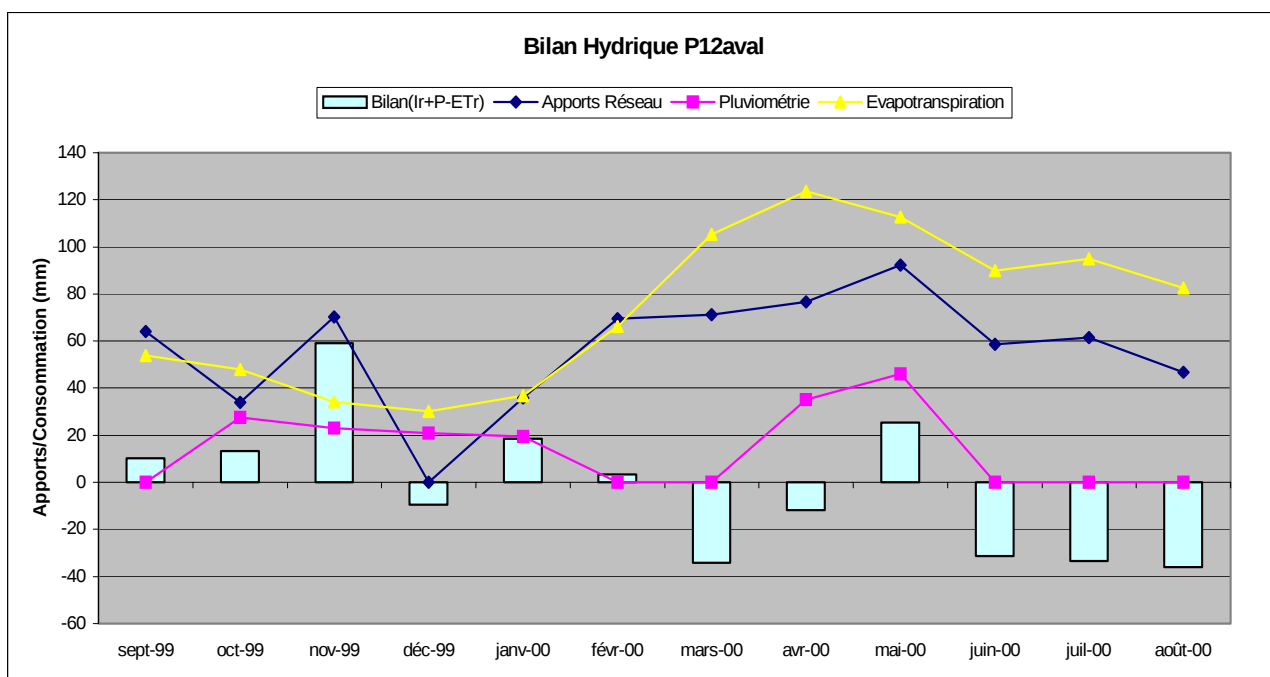
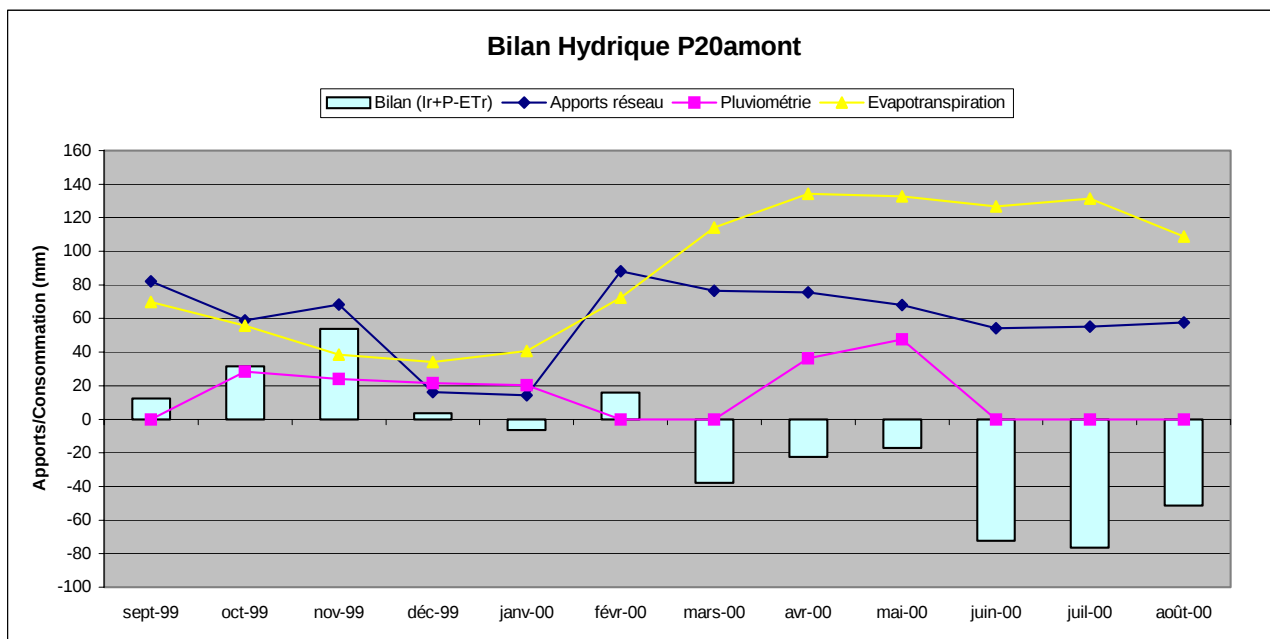


Figure 23: (a) et (b) : Bilans hydriques mensuels des prises P12aval et P20amont pour la campagne 99-00.

4.3.2.2 Les tertiaires et les exploitations :

- Les tertiaires :

Les bilans hydriques réalisés à l'échelle des tertiaires sont bilans avec un réservoir sol.

Nous avons pu noter dans l'étude sur les indicateurs de performance qu'à l'échelle des tertiaires les consommations en eau du réseau sont beaucoup plus hétérogènes qu'à l'échelle des secondaires (voir étude sur les indicateurs). En effet, si pour des prises comme P8 ou P19 nous notons un coefficient d'uniformité (Christiansen,1942) très élevé (respectivement 88 % et 87 %), pour d'autres prises nous avons des coefficients de 55% (P12aval) ou 65% (P20aval), la moyenne des CUC étant de 78%. Ainsi, s'il n'est pas envisageable d'étudier les bilans hydriques de tous les tertiaires nous pouvons tout de même citer des exemples représentatifs d'un certain nombre de prises comme le cas des deux tertiaires suivant (P12TG5B et P12TG7E):

Dans le cas du tertiaire P12TG5B (voir figure 23(a)) nous observons un cas de consommation largement supérieur à la moyenne pour un assolement proportionnel à la moyenne du périmètre. Nous remarquons ainsi que la fréquence et les doses de chaque irrigation sont très largement excédentaires. Le terme de percolation, correspondant aux apports supérieurs à la capacité du réservoir atteint une valeur de 505 mm entre les mois de septembre et de juin soit une fraction de lessivage de l'ordre de 40%.

A l'inverse, le cas de P12TG7E (voir Figure 24) montre un cas d'apport très faible pour un assolement assez semblable au cas précédent. Nous observons ainsi un déficit hydrique quasi permanent. Le cumul de ces déficits hydriques atteint une valeur de 375 mm sur l'année. Or, sur la prise P12aval la superficie des tertiaires dans le même cas que TG7E (critère d'apport inférieur à 4000m³/ha) représente 330ha soit presque 25% de la superficie totale. Le tableau suivant résume la superficie et le pourcentage de la superficie totale des tertiaires dont les apports sont inférieurs à 4000m³/ha (et dont le bilan en terme de déficit hydrique est proche de celui de P12TG7E).

Prise	Superficie (ha)	Pourcentage de la superficie totale
P12aval	330	23
P20aval	240	21
P16	93	20
P11-B	424	17
P13	270	14
P20amont	240	11
P18	38,7	4,5
P17	140	5
P23	182	6,5
P11-A	0	0
P15	0	0
P9	0	0
P8	0	0
P10	0	0
TOTAL	2189	8

**Tableau 12: Superficie des prises dont la consommation annuelle par hectare est inférieure à 4000m³/ha
Campagne 99-00**

Ainsi, ce sont plus de 2000 ha qui sont dans une situation de déficit hydrique critique du fait de l'approvisionnement par le réseau.

Nous remarquons donc à cette échelle là, et notamment en aval du périmètre, une hétérogénéité importante en terme de bilan hydrique du fait d'une consommation très basse du réseau. Il est à priori difficile d'attribuer cette différence aux règles de gestion, à l'état du réseau ou à la trésorerie de l'agriculteur; même si le fait que ce problème ne touche pas toutes les prises peut faire penser qu'il s'agit d'un problème de mauvais fonctionnement physique de certains tertiaires. Toujours est il que c'est à cette échelle que l'on voit clairement émerger le plus clairement des situations préoccupantes en terme de déficit hydrique.

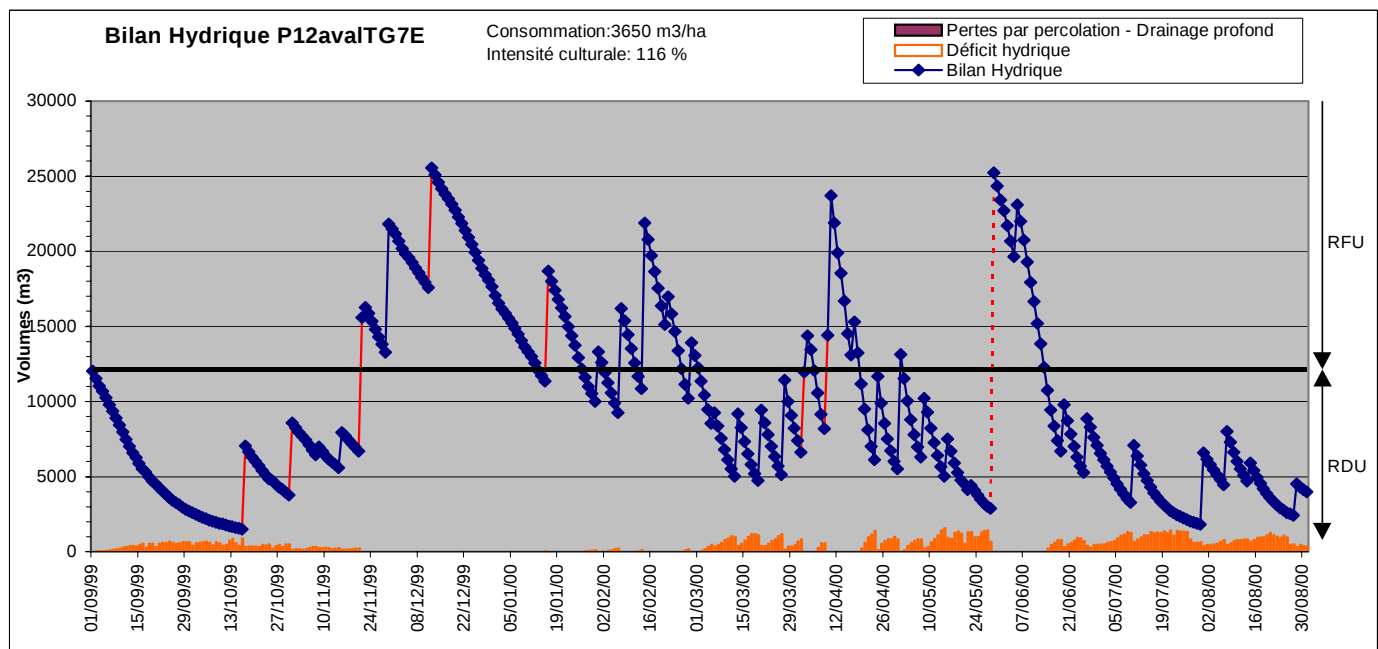
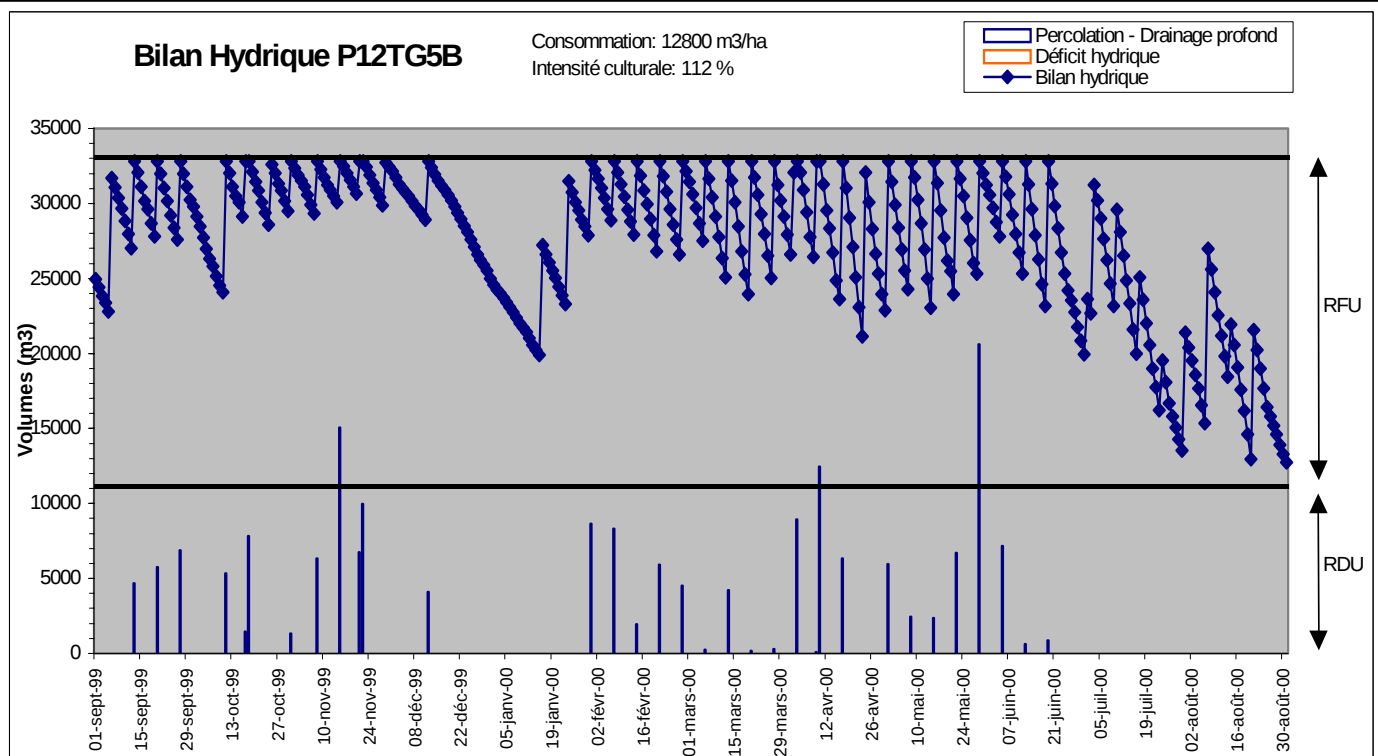


Figure 24 (a) et (b) : Bilan hydrique des sols sur les tertiaires TG5B et TG7E (Campagne 99 – 00).

- L'exploitation :

L'intérêt de l'étude de bilans hydriques à l'échelle de l'exploitation est que les données concernant les apports du réseau sont connues au jour près et non plus par semaine. Ainsi, nous pouvons mettre en évidence le problème de la fréquence des apports qui diminue presque de moitié en saison sèche par rapport à la période humide comme le montre la Figure 25. Nous pouvons donc remarquer qu'au cours de la période allant de septembre à fin février, la fréquence des irrigations est en moyenne de 7,5 jours avec un minimum de 5 jours et un maximum de 11 jours. Par contre, à partir du début du mois de mars et jusqu'au mois d'août, la fréquence de retour de l'eau à la parcelle est en moyenne de 14 jours avec un minimum de 9 jours et un maximum de 20 jours.

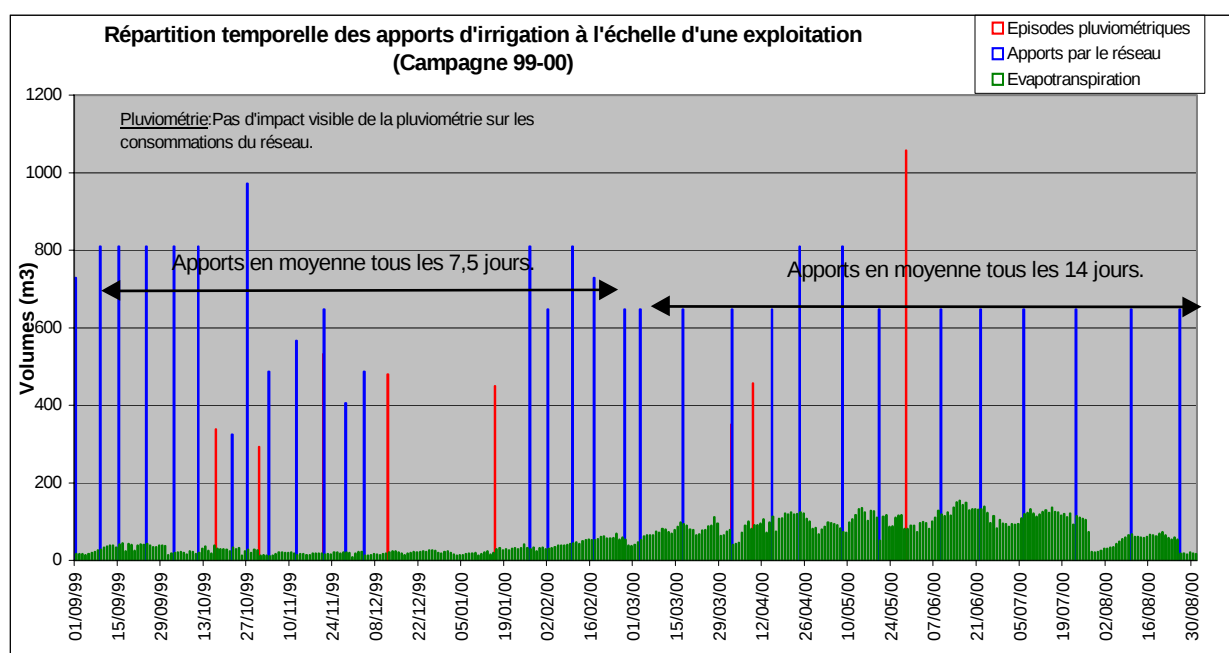


Figure 25: Répartition temporelle des apports d'irrigation à l'échelle d'une exploitation de P20amTG3B (Sahri Khalifa)(Campagne 99- 00)

Ainsi, l'augmentation de la fréquence des apports à partir de mars (même si les doses sont relativement stables d'un point de vue quantitatif par rapport au reste de l'année), ainsi que l'augmentation des besoins en eau des cultures ont un impact considérable sur le bilan hydrique (voir Figure 26). En effet, le déficit hydrique apparaît dès le début du mois de mai et atteint une valeur cumulée de 213 mm mettant encore une fois en évidence la nécessité du recours au pompage. Cette situation de déficit contraste avec la période de septembre à février au cours de laquelle les apports en irrigation sont très largement excédentaires. Le terme de percolation atteint la valeur de 375 mm. Il serait intéressant de savoir si ces irrigations excédentaires sont volontaires de la part de l'agriculteur à des fins, par exemple, de lessivage des sols.

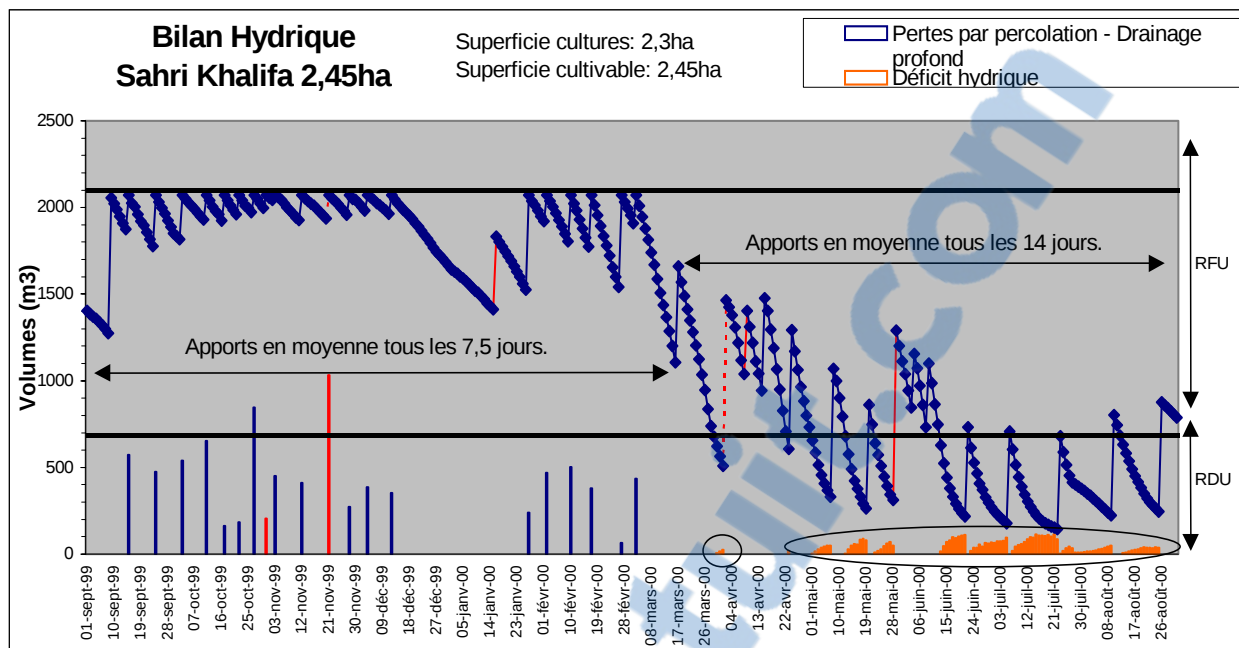


Figure 26: Bilan hydrique à l'échelle d'une exploitation sur P20amTG3B. Campagne 99-00

→ Les bilans hydriques laissent transparaître que les situations d'apparition en saison sèche de déficit en eau sont présentes pour toutes les prises. A l'échelle des tertiaires, l'hétérogénéité des situations vis à vis de la consommation en eau du réseau, et pas seulement à l'aval, laisse transparaître des situations de bilan hydrique largement excédentaire pour certains et très déficitaire pour d'autre, nécessitant dans ce cas un recours obligatoire à des ressources supplémentaires pour ne pas compromettre les rendements et pour limiter le processus de salinisation des sols du fait d'un manque de lessivage.

Ainsi dans la partie suivante nous nous intéresserons à la qualité et la disponibilité d'une ressource supplémentaire souterraine (via la répartition spatiale des puits) ainsi qu'aux stratégies de pompage des agriculteurs dans le but d'estimer la marge de manœuvre des agriculteurs en terme de complément d'irrigation et d'évaluer des tendances d'évolution de la situation via l'élaboration de scénarios.

Synthèse des bilans hydriques :

Les bilans réalisés à l'échelle du périmètre ou des secondaires soulignent bien la présence des 2 saisons précédemment mises en évidence :

- La période de septembre à février est caractérisée par des apports supérieurs aux besoins.
- La période de mars à août au cours de laquelle les besoins sont supérieurs à l'offre, et ce, quelle soit la prise secondaire étudiée. Au cours de cette période on note l'importance de la pluviométrie pour pallier en partie le problème de déficit hydrique. Cependant le recours à une ressource secondaire pendant l'été apparaît comme une nécessité sur l'ensemble du périmètre.

A l'échelle des tertiaires et de l'exploitation, nous pouvons remarquer une hétérogénéité importante des situations. Certains tertiaires étant dans des situations d'apports en large excès (comme P12TG5B) et d'autres dans des situations de stress hydrique permanent (comme P12TG7E) sans recours au pompage (Notons d'ailleurs que pour la campagne 99-00, une proportion importante de tertiaires (voir Tableau 12), notamment dans la partie aval du réseau, ont eu une consommation en eau du réseau très faible (moins de 4000m³/ha) par rapport aux besoins, créant ainsi une situation de forte demande en complément d'irrigation pour éviter des scénarios de stress hydrique).

Ces différents cas de figure posent non seulement le problème de la satisfaction des besoins en eau mais également celui du lessivage des sols et de la recharge de la nappe. En effet si certains tertiaires comme P12TG5B sont irrigués avec une fraction de lessivage de 40%, d'autres comme P12TG7E ont un lessivage quasi nul (sans envisager de recours au pompage). Si ces situations restent stables dans le temps, les tendances évolutives de ces tertiaires en terme de recharge ou décharge de la nappe et de dégradation des sols seront évidemment très différentes sans compter que l'existence ou non d'une opportunité d'accès à une ressource complémentaire va influencer de manière probablement importante ces tendances évolutives. Ce sont ces scénarios d'évolution que nous explorerons dans la partie 4.1.2 en essayant d'évaluer la sensibilité du pompage vis à vis des problèmes environnementaux précédemment cités.

Dans la partie suivante nous nous intéresserons à la ressource souterraine et aux stratégies d'utilisation de cette ressource par les agriculteurs.

4.4 Salinité des eaux souterraines et stratégies d'utilisation de la ressource.

4.4.1 Evolution de la nappe et développement du pompage.

4.4.1.1 Historique.

La nappe du Tadla a connu suite à la mise en place du réseau d'irrigation une remontée rapide de la nappe phréatique. A l'origine la nappe avait une profondeur de l'ordre de 50 m dans la partie amont et de 15m dans la partie aval d'après Belhacène et Chayat (1992). Elle est remontée à partir des années 60 sous l'influence des pertes par infiltration dans les canaux et du fait d'une utilisation largement excédentaire au niveau des parcelles. En effet, les doses d'eau apportées par l'irrigation étaient largement supérieures aux besoins des cultures, les ressources en eau étant à l'époque très abondantes. La nappe atteint une position sub-affleurante à la fin des années 70 (Belhacène et Chayat, 1992) et a contribué à la disparition de terrains cultivables dans certaines zones aval du périmètre. Les remontées capillaires induites par la position élevée de la nappe ont alors conduit à l'apparition de problèmes de salinisation des sols. Un système de drainage a alors été installé mais avec une efficacité limitée du fait d'un fort écartement des drains contraint par la structure initiale du réseau hydraulique. A partir de 82-83 (suite à une période sèche), le pompage dans la nappe a été fortement encouragé (notamment par des aides financières. . .). En parallèle, l'efficacité de transport du réseau a été améliorée permettant de limiter les infiltrations et de contribuer à rabattre le niveau de la nappe. A l'heure actuelle les 10000 puits estimés répartis sur l'ensemble du périmètre (Beni-Amir et Beni-Moussa) participent au drainage vertical de la nappe.

4.4.1.2 Evolution et répartition spatiale des stations de pompage dans le périmètre de Beni-Amir.

- Nombre de puits et localisation:

L'évolution du nombre de puits a été enregistrée entre 1975 et 1991 (Belhacène et Chayat). Nous ne disposons pas pour l'instant des rapports annuels sur les 10 dernières années sauf pour l'année 2000.

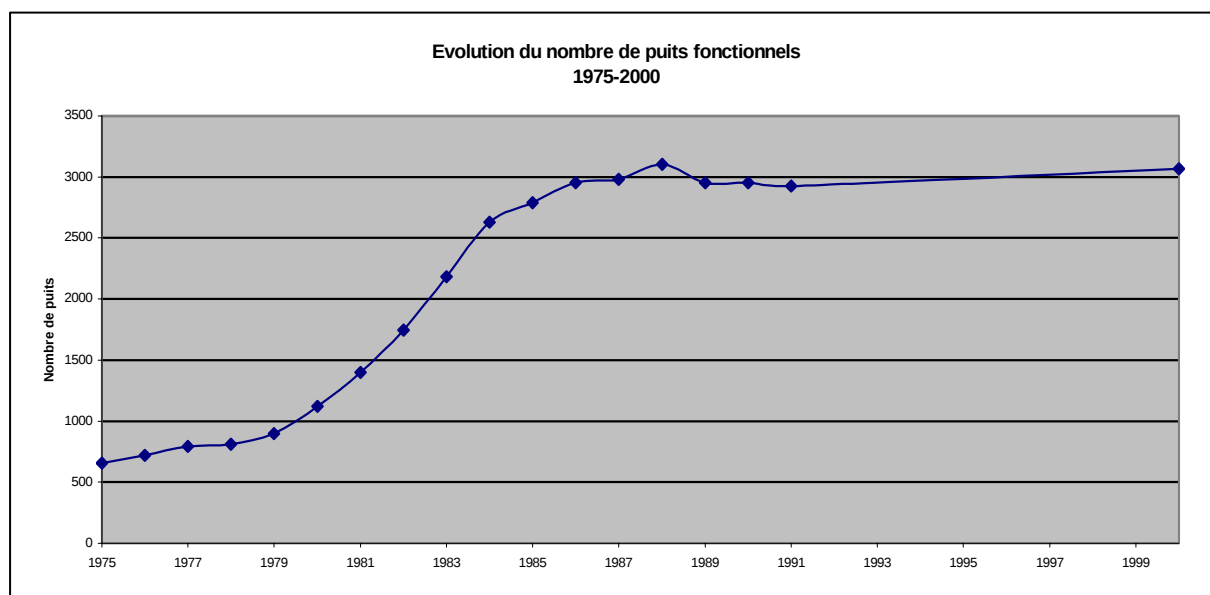


Figure 27: Evolution du nombre de puits fonctionnels entre 1975 et 2000 dans le périmètre de Beni-Amir.
Sources ORMVAT, et Belhacène et Chayat, 1992.

Ainsi, nous remarquons une faible évolution en nombre sur les 10 dernières années. A la fin des années 80, on a assisté au taiselement de certains puits. Depuis cette période et encore aujourd'hui les agriculteurs procèdent à l'approfondissement de leurs puits déjà existants en creusant des forages.

En ce qui concerne la situation actuelle, nous avons pu disposer dans les CDA de données relatives aux stations de pompages privées fonctionnelles dans le périmètre de Beni-Amir pour l'année 2000.

Année	Puits réseau	Puits hors réseau	Total
2000	1639 (53%)	1426 (47%)	3065

Tableau 13 : Répartition des puits pour l'année 2000

Pour l'année 2000, un recensement des données disponibles permettent de faire la distinction entre puits sur zone irriguée par le réseau ("réseau") et puits sur zone n'ayant pas accès aux ressources en eaux de surface ("hors réseau" ou bour).

Le périmètre desservi par le réseau comporte au total environ 8500 agriculteurs. D'après les informations des aiguadiers et des vulgarisateurs, rares sont les agriculteurs qui possèdent 2 puits. Ainsi, nous pouvons dire qu'à l'heure actuelle, sur la zone desservie par le réseau, un peu moins d'un agriculteur sur cinq possède un puit fonctionnel, ayant ainsi accès à 2 ressources différentes (souterraine et surfacique).

Au niveau de la répartition spatiale de ces puits, connaissant la liste des puits référencés par CDA et rattachés à un tertiaire, nous avons pu, par recoupement, sommer ces puits par prise secondaire. Connaissant ainsi le nombre d'agriculteurs pour chaque prise secondaire nous avons pu estimer à cette échelle le nombre moyen d'agriculteurs pour un puit. Sur la carte suivante nous pouvons voir la répartition des puits (réseau) par prise :

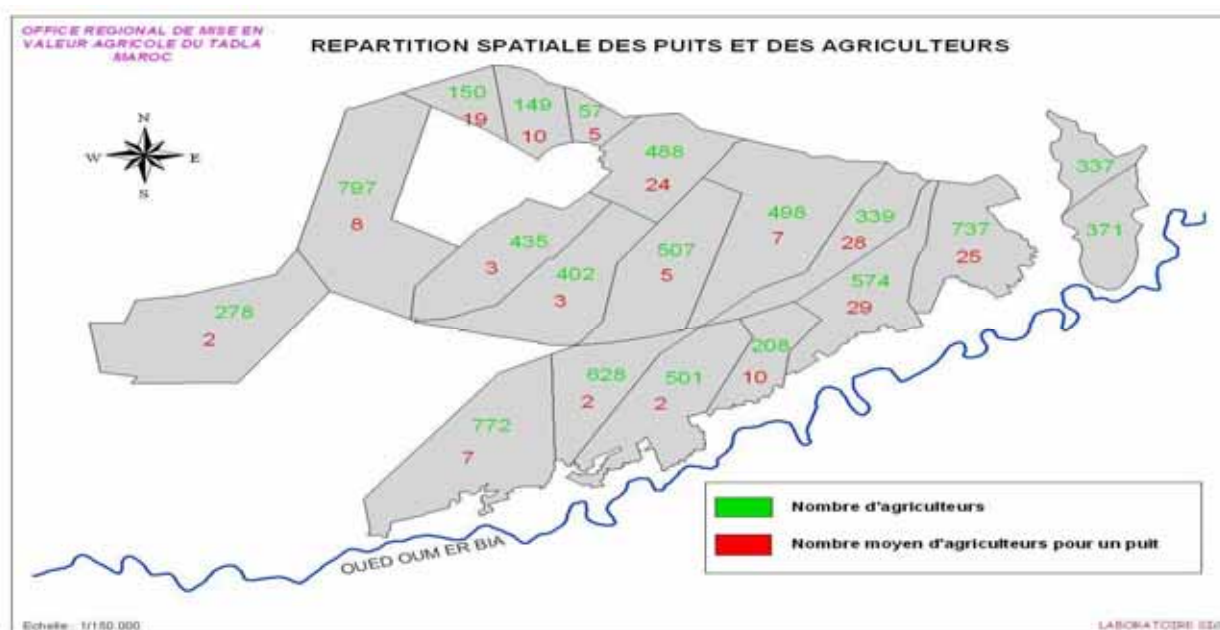


Figure 28: Répartition spatiale des agriculteurs et densité des puits par zone de prise secondaire (Données CDA, 2001).

Ainsi on peut voir que la densité de puits est en moyenne plus importante en aval du périmètre qu'en amont. C'est dans ces zones (P20amont, P20aval, P12aval, P19...) que le pompage est le plus intensif, et nous verrons par la suite que cette zone correspond également à la zone de qualité de la nappe la plus médiocre.

4.4.1.3 Evolution et répartition spatiale de la piézométrie dans le périmètre de Beni-Amir.

L'ORMVAT a mis en place dès 1975 un réseau de puits de suivi pour contrôler l'évolution de la piézométrie, dans le temps et dans l'espace. Ce réseau de 36 puits pour la partie Beni-Amir a été modifié en 1991 avec le projet américain MRT (1990 à 1995). Ce nouveau réseau (toujours en place à l'heure actuelle) comporte 41 puits (dont certains appartenaient à l'ancien réseau) pour lesquels les données récoltées concernent la piézométrie, la conductivité

électrique et le taux de nitrates. Les données sont récoltées en moyenne tous les 2 à 3 mois. Nous avons ainsi pu analyser les données piézométriques pour les périodes 1975 – 1991 et 1995 – 2001, ainsi que les données concernant la conductivité électrique pour la période 1995 à 2001.

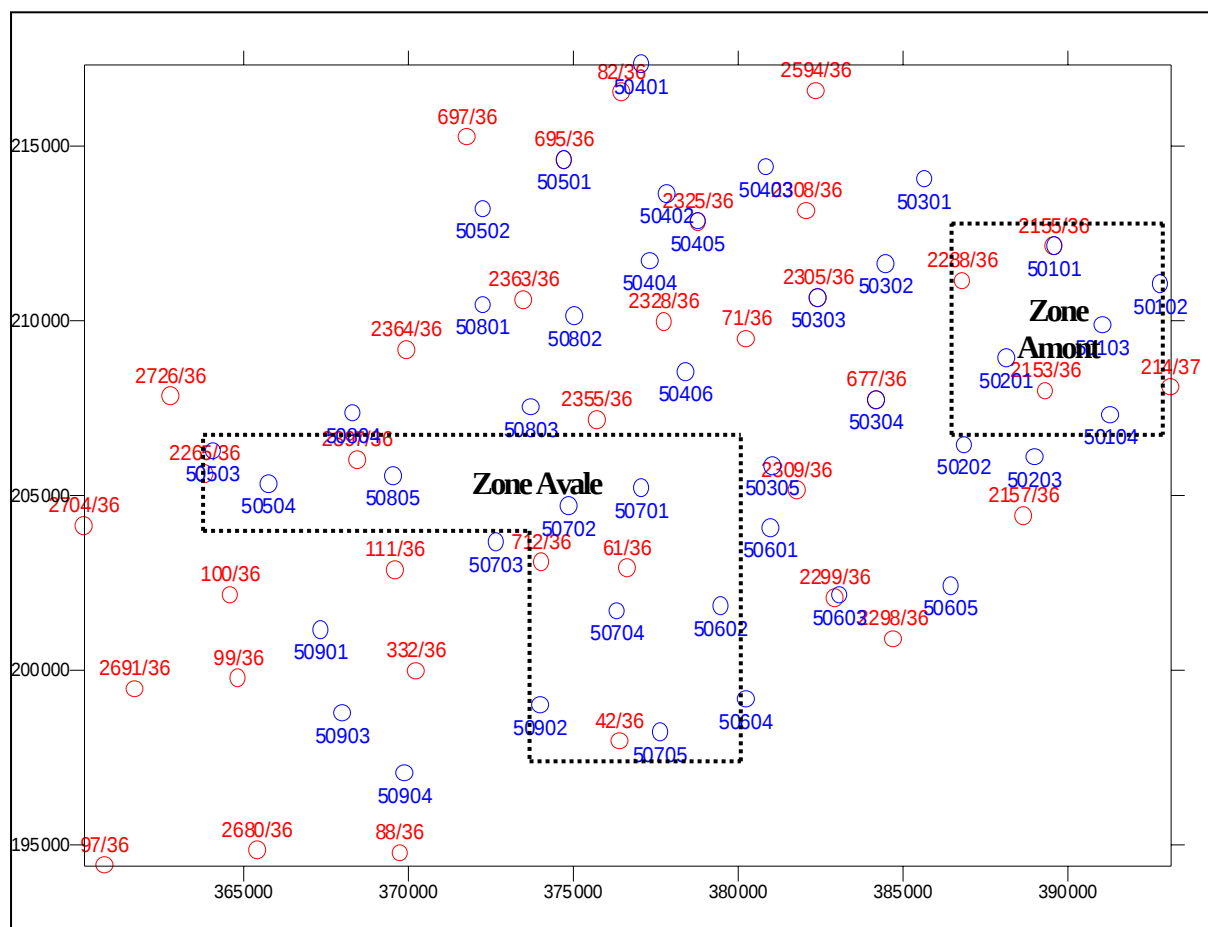


Figure 29: Localisation des points de suivi . En rouge (réseau 1975-1991) - En Bleu (réseau 1995-2001)

Nous avons traité les 2 périodes (75 – 91 et 95 – 01) séparément étant donné qu’elles correspondaient à 2 réseaux de suivi différents.

- Evolution de la piézométrie pour la période 1975 – 1991:

Grâce au logiciel *Surfer* nous avons réalisé des cartes de répartition spatiale de la piézométrie par interpolation. Ces cartes ont été réalisées pour les années 1975, 1980, 1985 et 1990. Pour cela nous avons dans un premier temps fait une moyenne des valeurs intra-annuelles de chacun des points de suivi, puis à partir de ces moyennes, nous avons réalisé des interpolations. Le but était de mettre en évidence une répartition spatiale caractéristique (ou non) et de voir si cette répartition était stable ou variable dans le temps. Les différentes cartes obtenues sont représentées sur la Figure 30 et la Figure 31. Pour les 4 cartes nous constatons une répartition similaire de la piézométrie avec une profondeur plus importante dans la partie nord du périmètre (profondeur comprise entre -8 et -12 m en 1975 et entre -12 et -15 m en 1990). Nous constatons entre 1975 et 1985 la disparition d’une zone sub-affleurante (profondeur comprise entre -1 et -2m) de la nappe dans la partie aval qui semble correspondre aux explications de Belhacène et Chayat (1992) au sujet de l’efficacité du pompage en terme de rabattement dans les années 82-83 (suite à une période de sécheresse). L’évolution globale à la baisse de la nappe ne semble cependant pas très marquée sur l’ensemble du périmètre entre les années 1975 et 1991.

Pour analyser cette évolution temporelle de manière plus précise nous avons choisi un échantillon de 3 puits pour chacune des zones amont et aval ainsi qu'un échantillon de 4 puits choisis pour leur répartition aléatoire sur le reste du périmètre :

Zone (amont/aval/-)	N° d'identification	Zone de prise
Amont	214/37	P8
Amont	2157/36	P9
Amont	2155/36	P10
Aval	42/36	P20amont
Aval	61/36	P12aval
Aval	332/36	Zone Bour
-	2328/36	P13
-	2308/36	P12amont
-	82/36	P15-P16
-	677/36	P11A-P11B

Tableau 14: Echantillons des puits étudiés pour la période 1975 - 1991. (Données réseau de suivi ORMVAT).

Les profils obtenues sont représentés sur la Figure 32 et la Figure 33. Pour chacun des profils des puits de suivi, nous avons superposé une courbe de tendance évaluée avec une moyenne mobile par pas de temps de 5 périodes afin de distinguer l'évolution moyenne de la piézométrie. Nous remarquons ainsi les puits localisés dans les zones P12amont, et P15-P16 traduisent une baisse régulière de la nappe comprise entre 3 et 5 m. L'échantillon situé en aval du réseau semble montrer que s'il y a eu une baisse sensible entre 1982 et 1985 (baisse de 2 à 3 m), la situation semble se stabiliser à partir de 1985. De même, la zone P8 (214/37) et P10 (2155/36) traduisent une diminution importante de la nappe entre 1978 et 1984-85 (diminution de 6 à 8 m) suivie d'une stabilisation pour P10 et d'une remontée assez importante (3 m) pour P8 entre 1985 et 1991. Notons enfin que certains puits comme ceux de la zone P11B et P9 n'ont pratiquement pas observé de variations.

→ S'il est vrai que nous pouvons noter dans certaines zones du périmètre (P12amont, P15, P16 et zone bour) l'existence d'une tendance à la baisse de la nappe entre 1975 et 1991, celle-ci n'est pas généralisable à l'ensemble des puits observés.

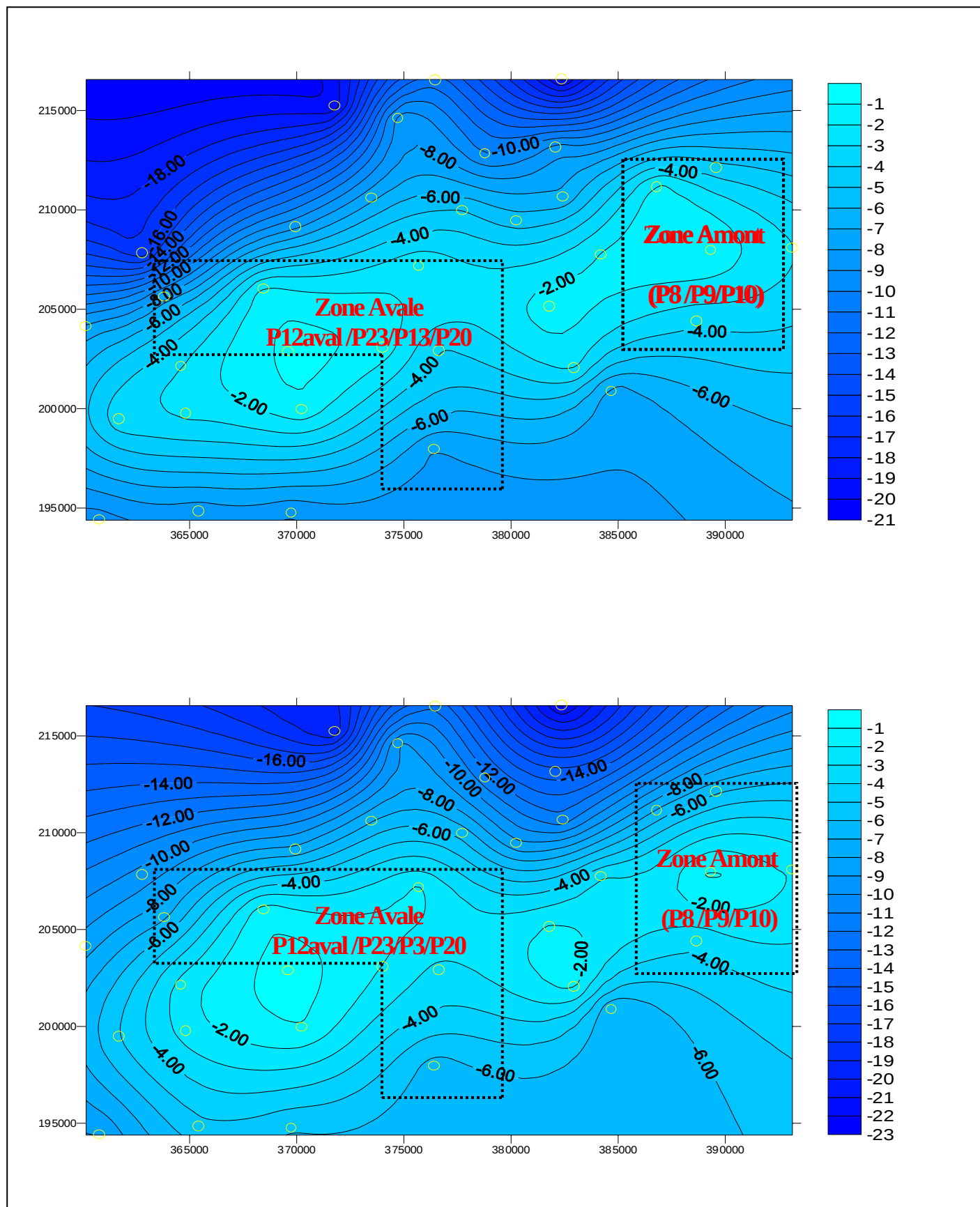


Figure 30: Répartitions spatiales de la piézométrie (interpolations à partir des valeurs du réseau de suivi ORMVAT). Figure (a) : 1975 - Figure (b) : 1980

Les points de suivi sont représentés par des cercles jaunes

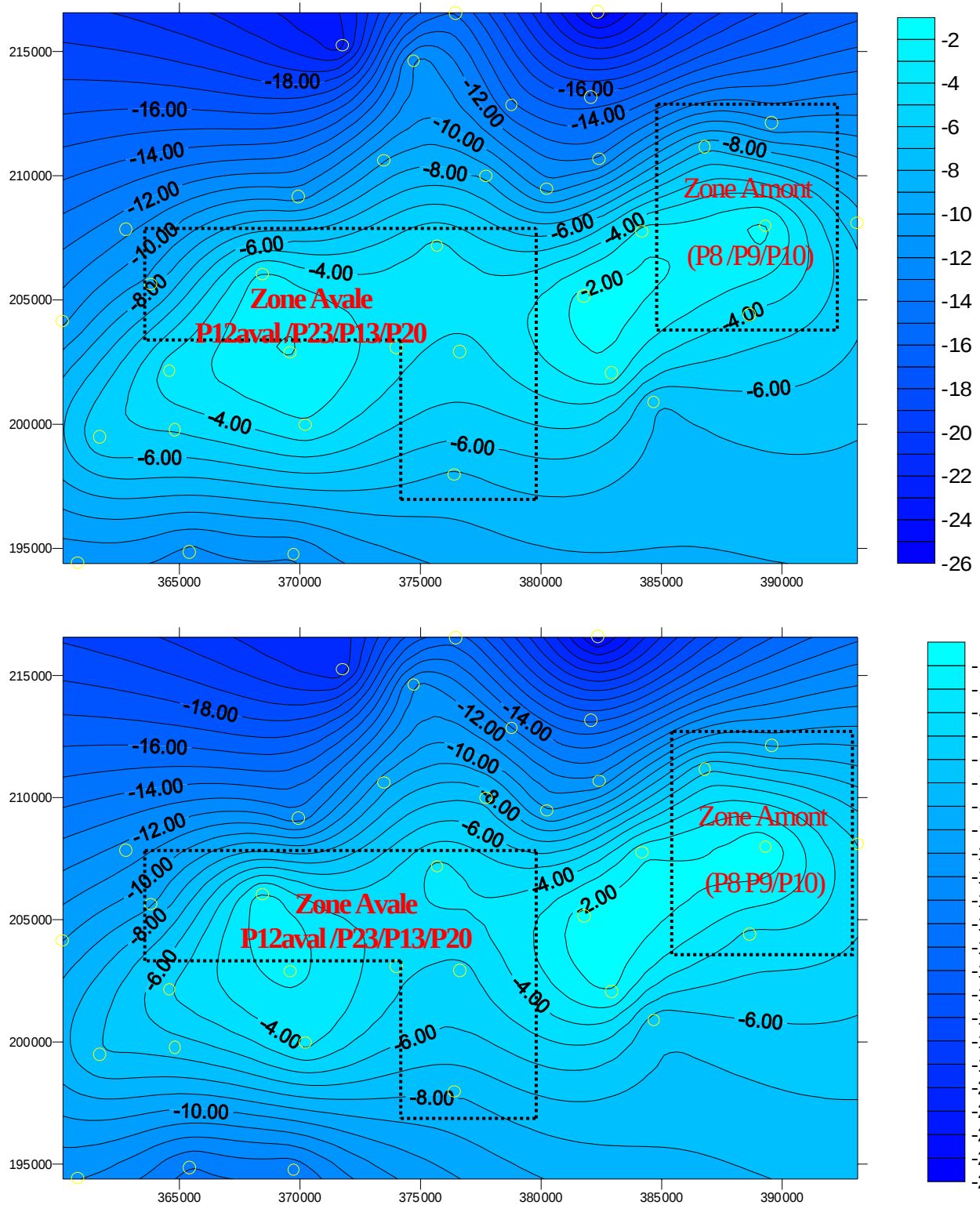
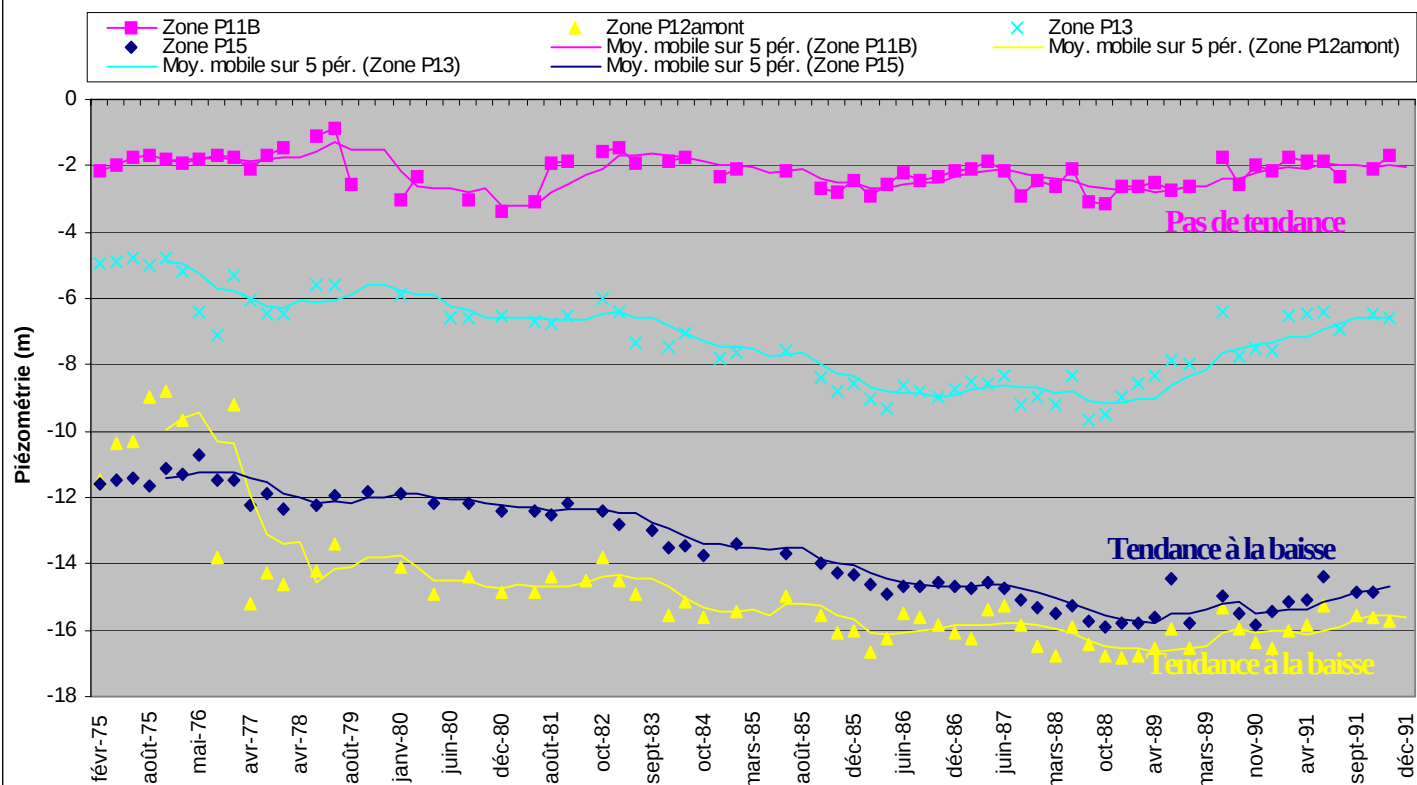


Figure 31: Répartitions spatiales de la piézométrie (interpolations à partir des valeurs du réseau de suivi ORMVAT). Figure (a) : 1985 - Figure (b) : 1990

Les points de suivi sont représentés par des cercles jaunes

Evolution de la piézométrie de 1975 à 1991
(Puits de suivi dans les zones P13, P12amont, P11A et P15)



Evolution de la piézométrie de 1975 à 1991
(Puits de suivi en aval du réseau)

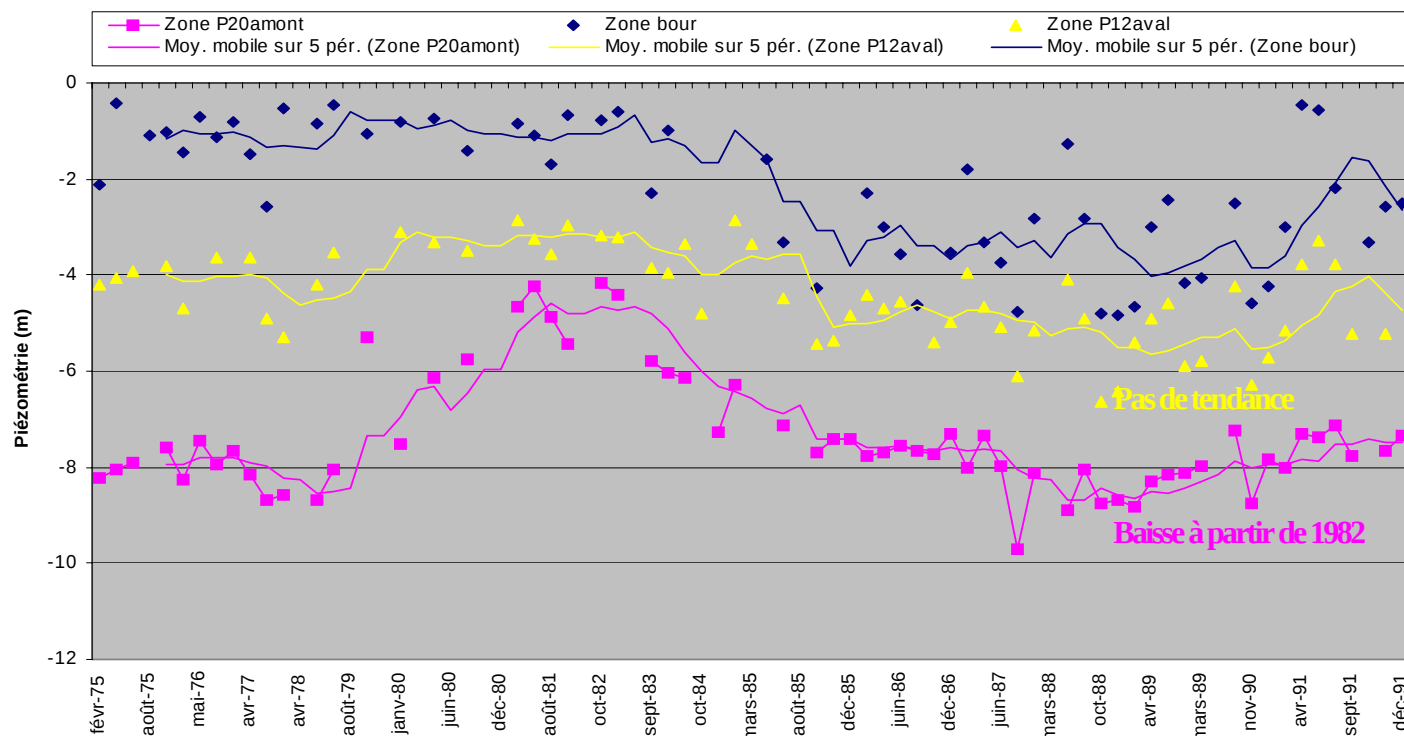


Figure 32: Evolution de la piézométrie pour des échantillons de puits regroupés par zone du périmètre entre 1975 et 1991 (Données réseau de suivi ORMVAT).

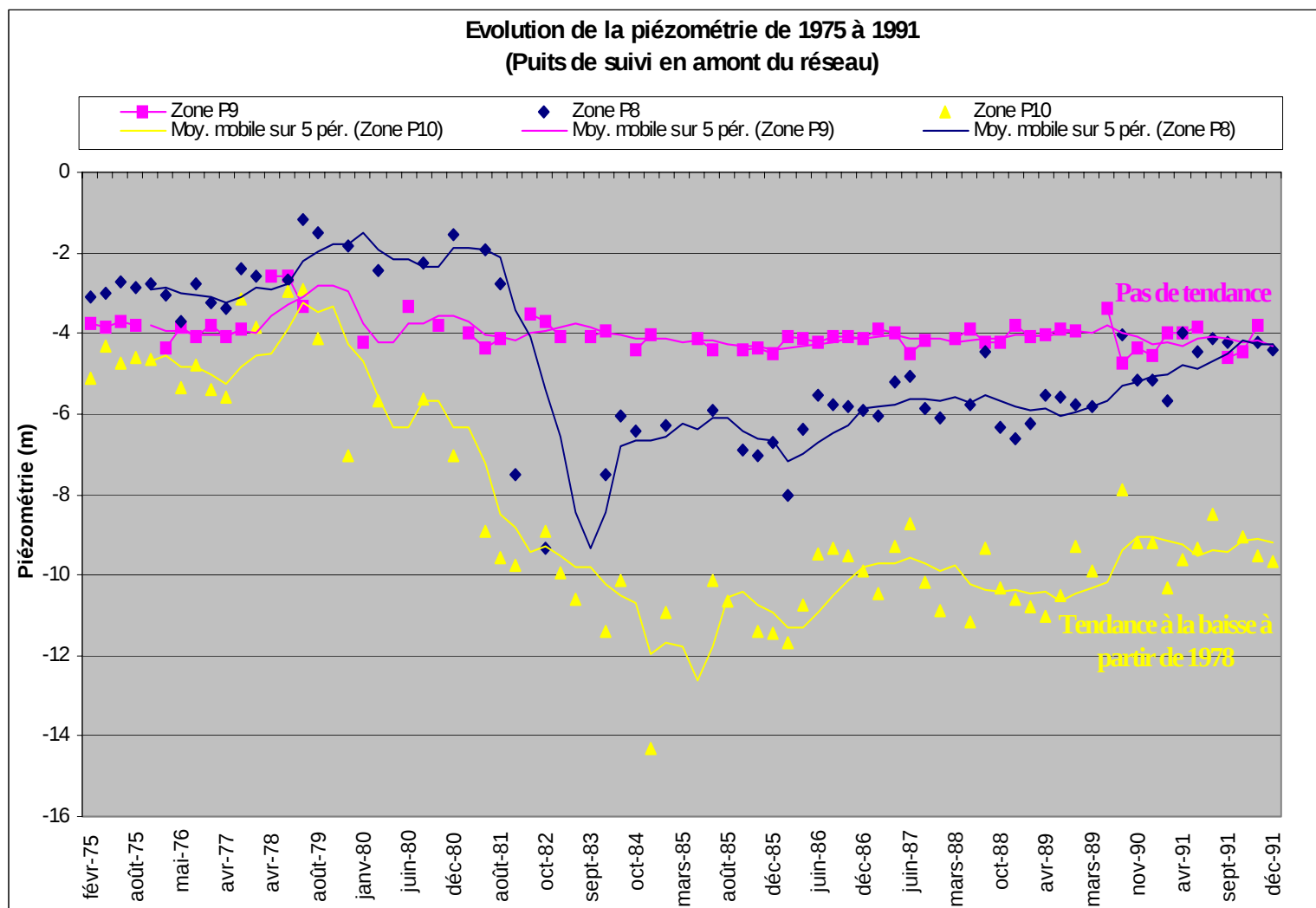


Figure 33: Evolution de la piézométrie pour des échantillons de puits regroupés par zone du périmètre entre 1975 et 1991 (Données réseau de suivi ORMVAT).

- Evolution de la piézométrie pour la période 91-95 :

Nous avons effectué le même type d'analyses que précédemment sur des échantillons de puits différents du fait du changement de réseau mais dans des zones identiques, à l'amont et l'aval du réseau :

N° d'identification du puit	Zone de prise
507/05	P20amont
509/04	Zone bour
508/05	P13
509/01	Zone bour (2)
501/02	P8
501/03	P9
502/01	P10

Tableau 15 : Echantillons des puits étudiés pour la période 1995 - 2001. (Données réseau de suivi ORMVAT).

Les courbes d'évolution de la piézométrie (Figure 34) ainsi que les cartes *Surfer* (en annexe) n'indiquent pas non plus de tendance marquée et généralisée à l'ensemble du périmètre. On remarque cependant, comme pour le réseau de suivi de la période 75-91, des cas de baisse de la profondeur, notamment sur le puit de la zone P8 ou de la zone bour (diminution de 2m en 6 ans). Nous nous sommes intéressé également à l'évolution intra-annuelle de la piézométrie. Nous ne distinguons pas de cycle apparent de recharge ou de rabattement de la nappe malgré le fait que nous ayons précédemment distingué 2 saisons du point de vue des apports de surface avec un surplus de septembre à février et un déficit marqué entre juin et août dont on pouvait penser qu'il entraîne une exploitation importante de la nappe.

Notons que nous avons pu évaluer l'évolution de la piézométrie d'un puit entre 1975 et 2001, celui-ci étant commun aux 2 réseaux de suivi (Figure 35). Nous remarquons ainsi une baisse de la piézométrie entre 1975 et 1985, suivie d'une stabilisation entre 1985 et 1997-1998. Nous considérons ici que la période comprise entre 1991 et 1994 et pour laquelle nous ne possédons pas de données, est relativement stable, à l'image des périodes antérieure et postérieure à ces dates. Nous observons également que la tendance actuelle est à la baisse, celle-ci ayant été amorcée vers le début 1998.

➔ Finalement, sur les 5 dernières années, si certains puits accusent une diminution de la profondeur de la nappe, cette tendance n'est encore une fois pas généralisable car certains puits semblent indiquer une stabilisation du niveau piézométrique. Si cette stabilisation reste à confirmer on peut s'interroger sur ses origines puisque les conditions pluviométriques ainsi que les apports par le réseau de ces 5 dernières années ne semblent pas plus favorables que ceux de la période antérieure à 1985 (période qui a vu une baisse sensible de la nappe). On peut donc imaginer une diminution de l'intensité du pompage sur dernière années pour expliquer cette stabilisation. Ceci reste en tout cas à vérifier et à confirmer.

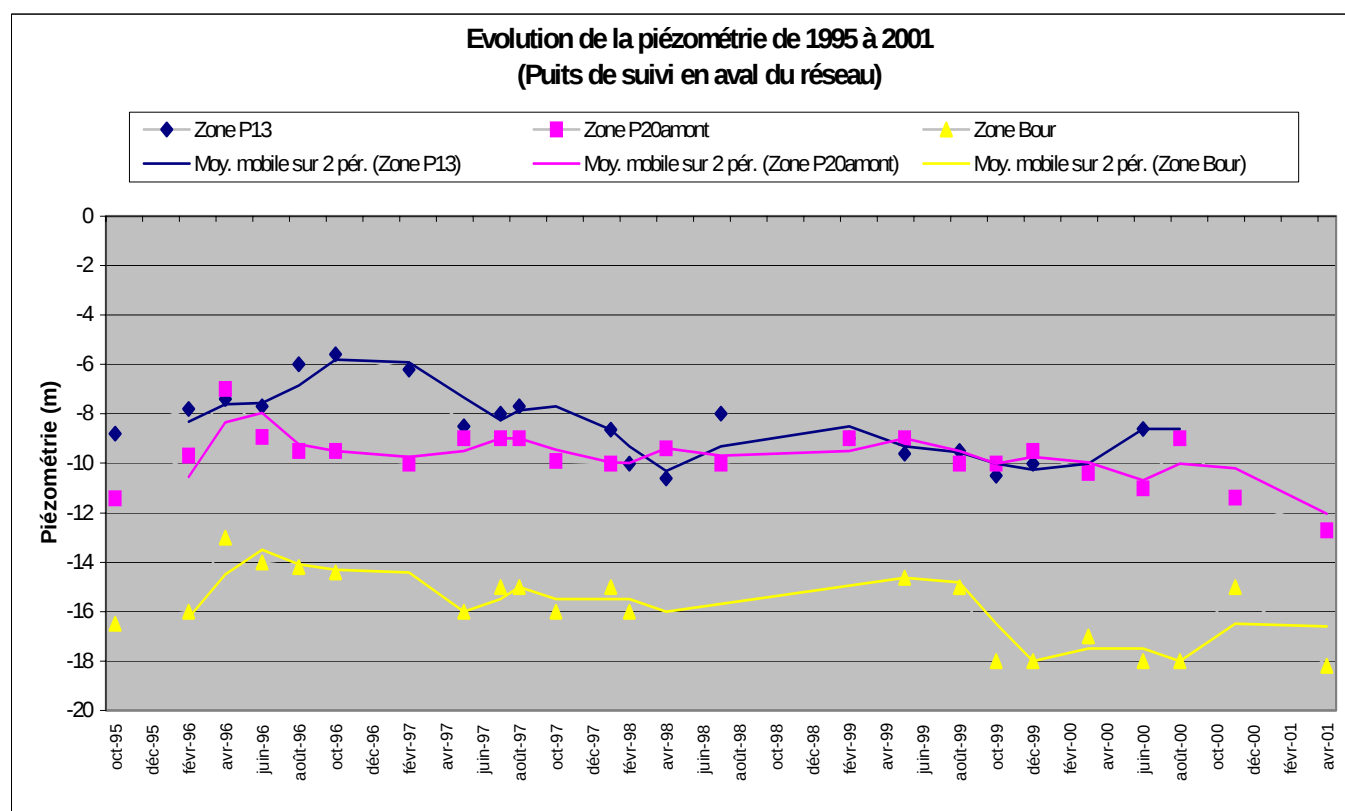
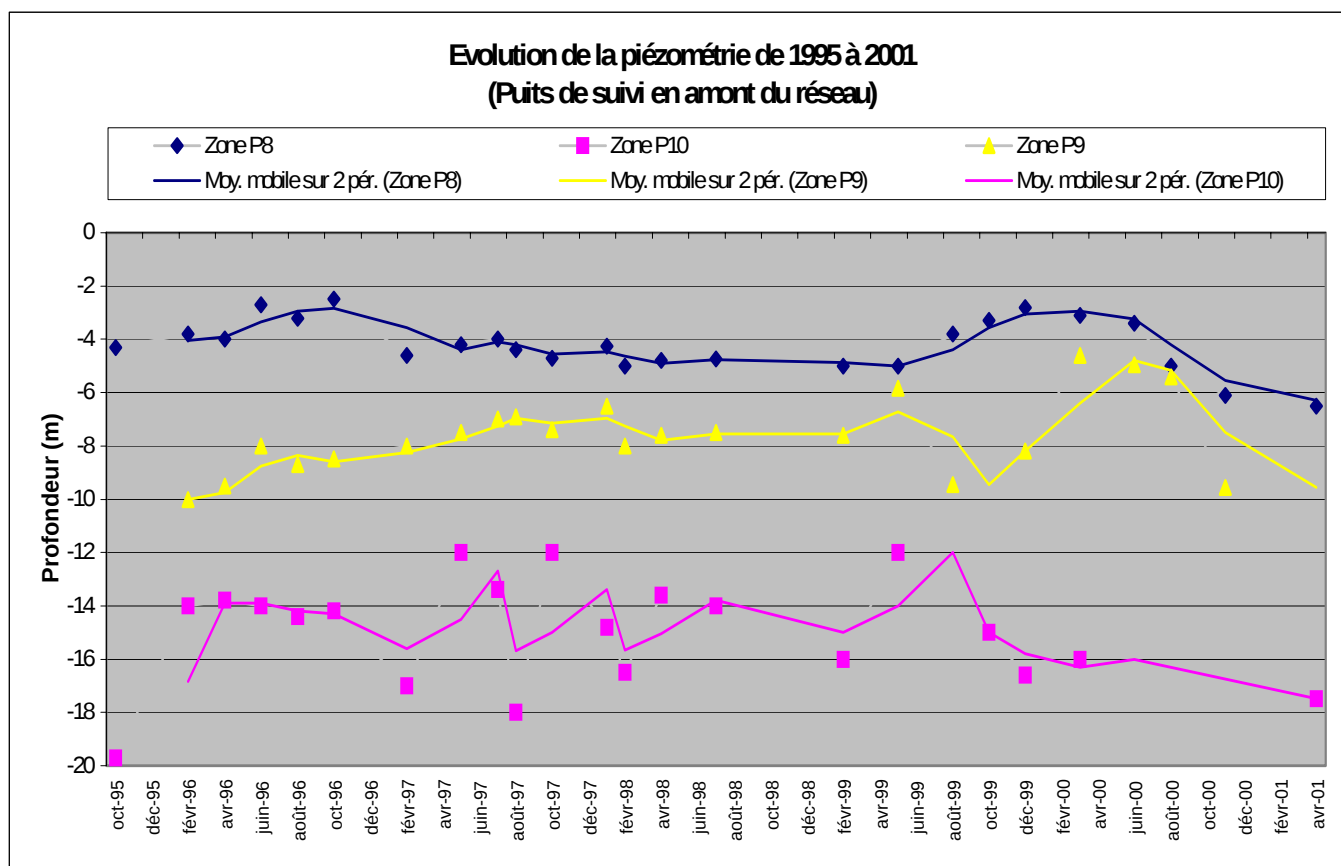


Figure 34: Evolution de la piézométrie pour des échantillons de puits regroupés par zone du périmètre entre 1995 et 2001 (Données réseau de suivi ORMVAT).

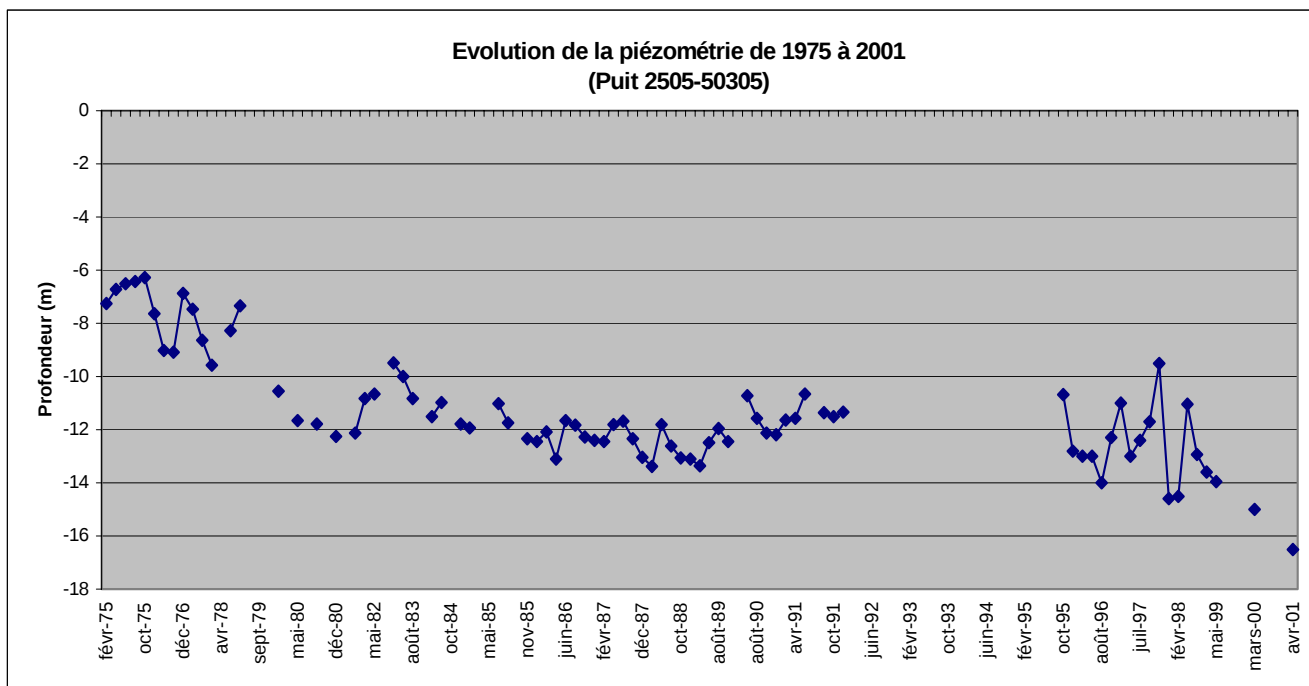


Figure 35: Evolution de la piézométrie entre 1975 et 2001 pour le puit (2505-50305) situé dans la zone P11B.

- Evolution de la salinité pour la période 95 - 01:

Concernant l'évolution de la salinité, nous avons adopté la même méthode que pour la piézométrie à savoir, l'observation d'échantillons de puits situés dans des zones caractéristiques du réseau ainsi que l'observation de cartes interpolées. Les profils d'évolution de la salinité sont représentés sur la Figure 36.

Du point de vue de l'évolution globale de la conductivité électrique, nous distinguons un profil très similaire quelque soit la zone (amont ou aval) où l'on se situe. Il est pour l'instant difficile d'interpréter l'apparition de pics de salinité. Les données disponibles (collectées tous les 2 à 3 mois) ne laissent pas apparaître de corrélation particulière avec une évolution caractérisée de la piézométrie. D'un point de vue quantitatif nous pouvons observer que la zone bour située en aval présente un profil de conductivité électrique de la nappe systématiquement plus élevé que les autres puits. Cette remarque semble confirmée par les cartes de répartition spatiale de la salinité, représentées par la Figure 37. En effet, nous observons sur cartes que la zone sud ouest du périmètre (zone bour) est plus touchée par la mauvaise qualité de la nappe avec une moyenne de 5dS/m. Le fait que la salinité de cette zone soit plus importante que sur le reste du périmètre peut s'expliquer en partie par le fait que l'écoulement de la nappe se fait dans le sens nord-est sud-ouest comme la montre la Figure 38 et par le fait que la nappe ne présente pas d'exutoire dans cette zone (Belhacène et Chayat, 1992). Les sels lessivés ont donc tendance à s'accumuler dans cette zone.

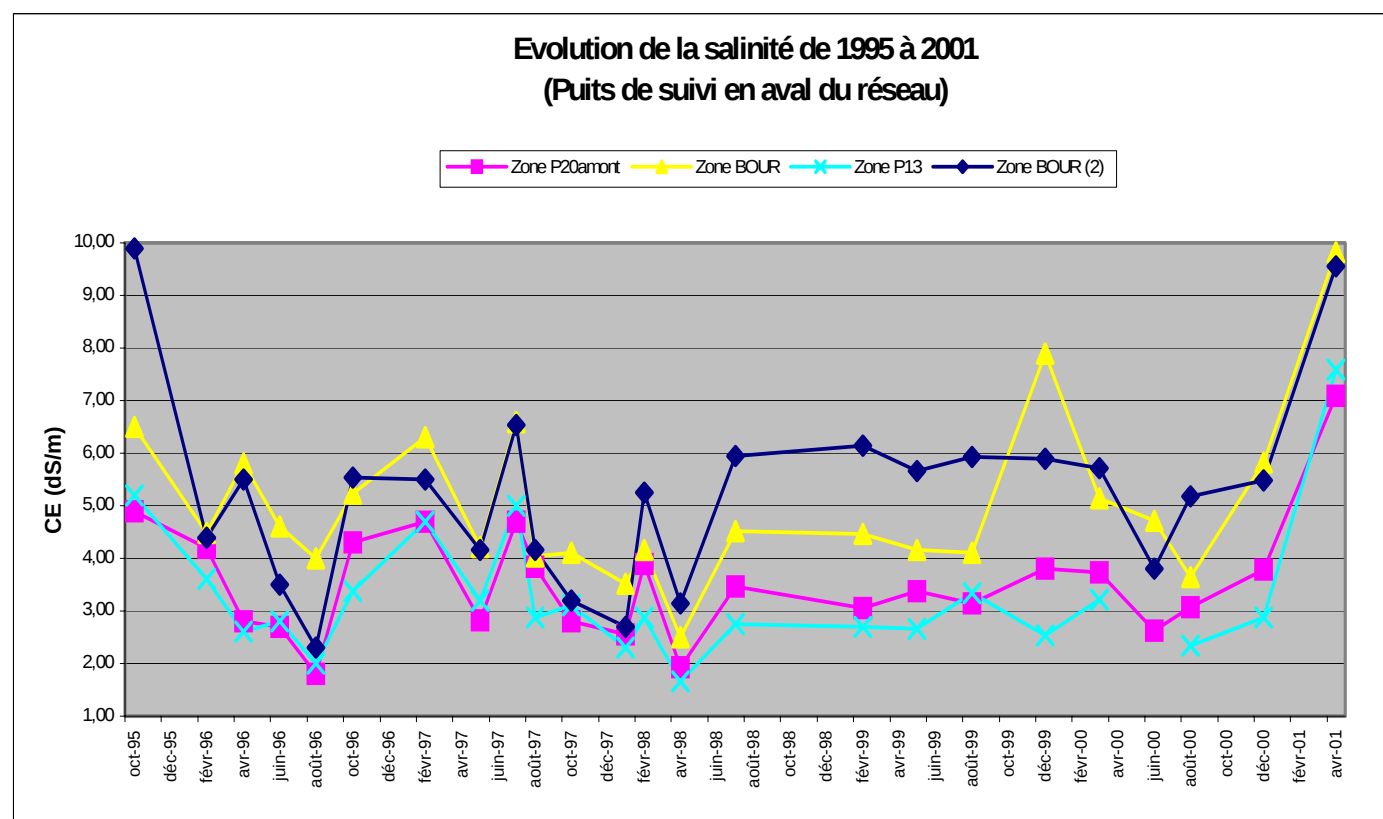
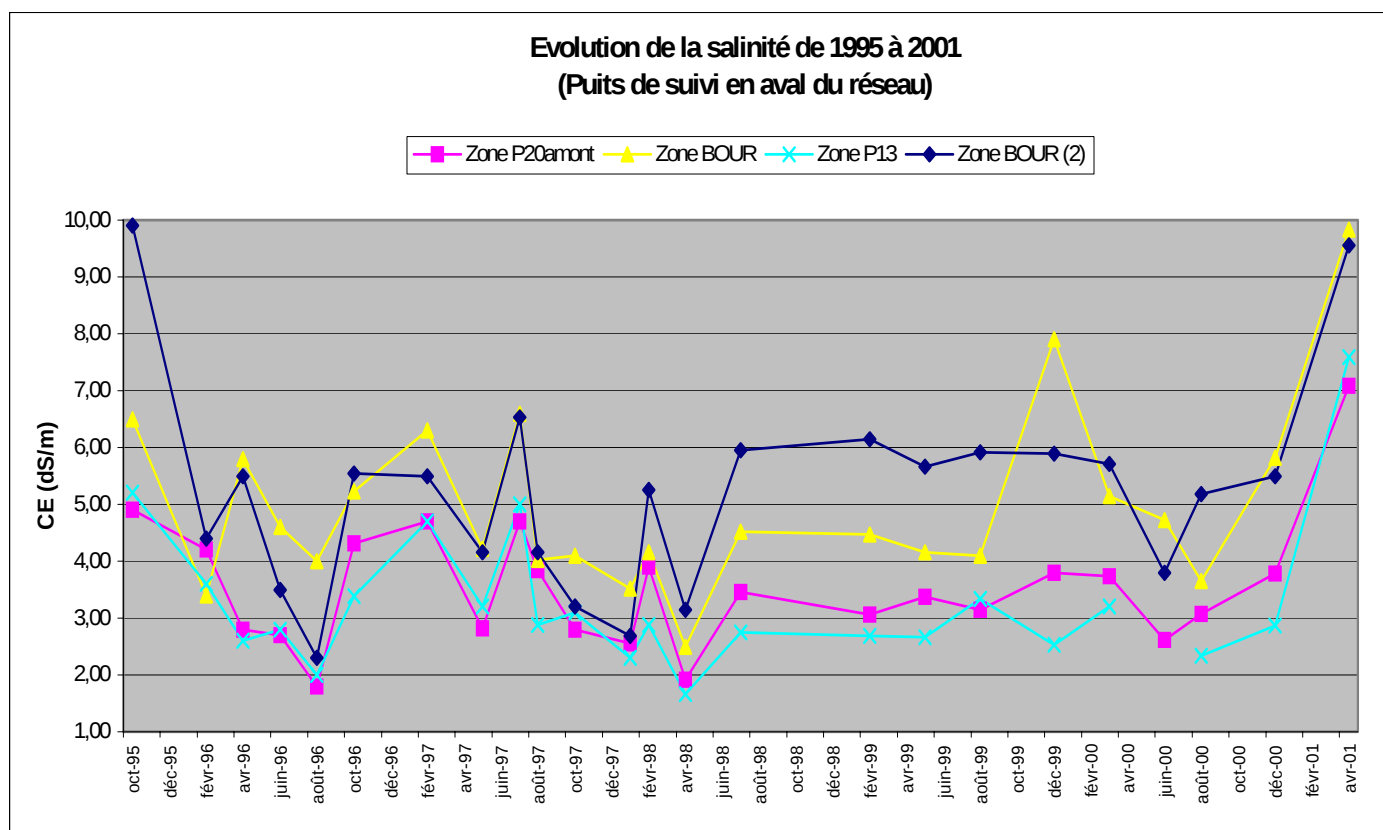


Figure 36: Evolution de la salinité pour des échantillons de puits regroupés par zone du périmètre entre 1995 et 2001 (Données réseau de suivi ORMVAT).

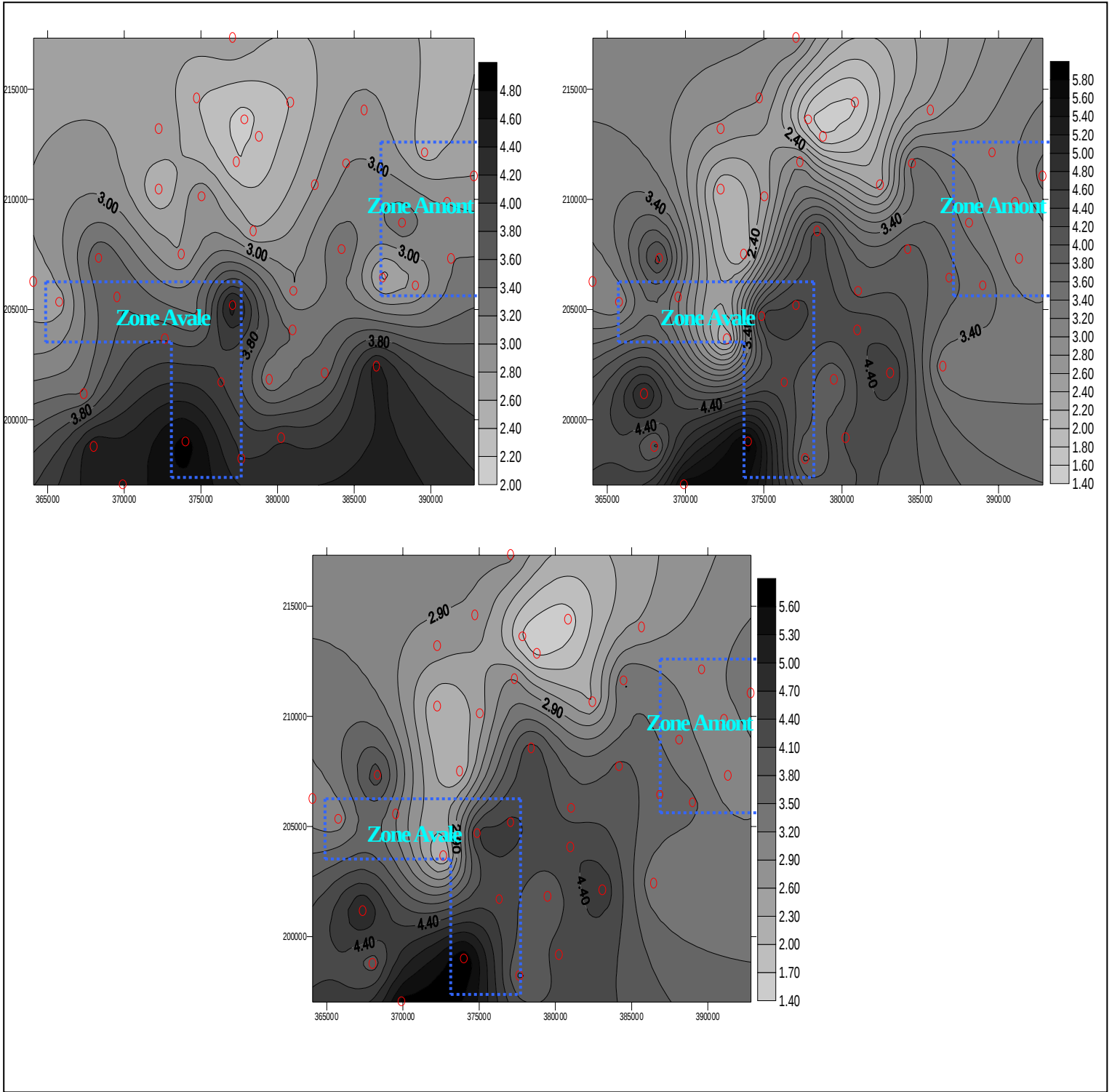


Figure 37: Représentations spatiales de la salinité (Février 96 - 98 - 00).

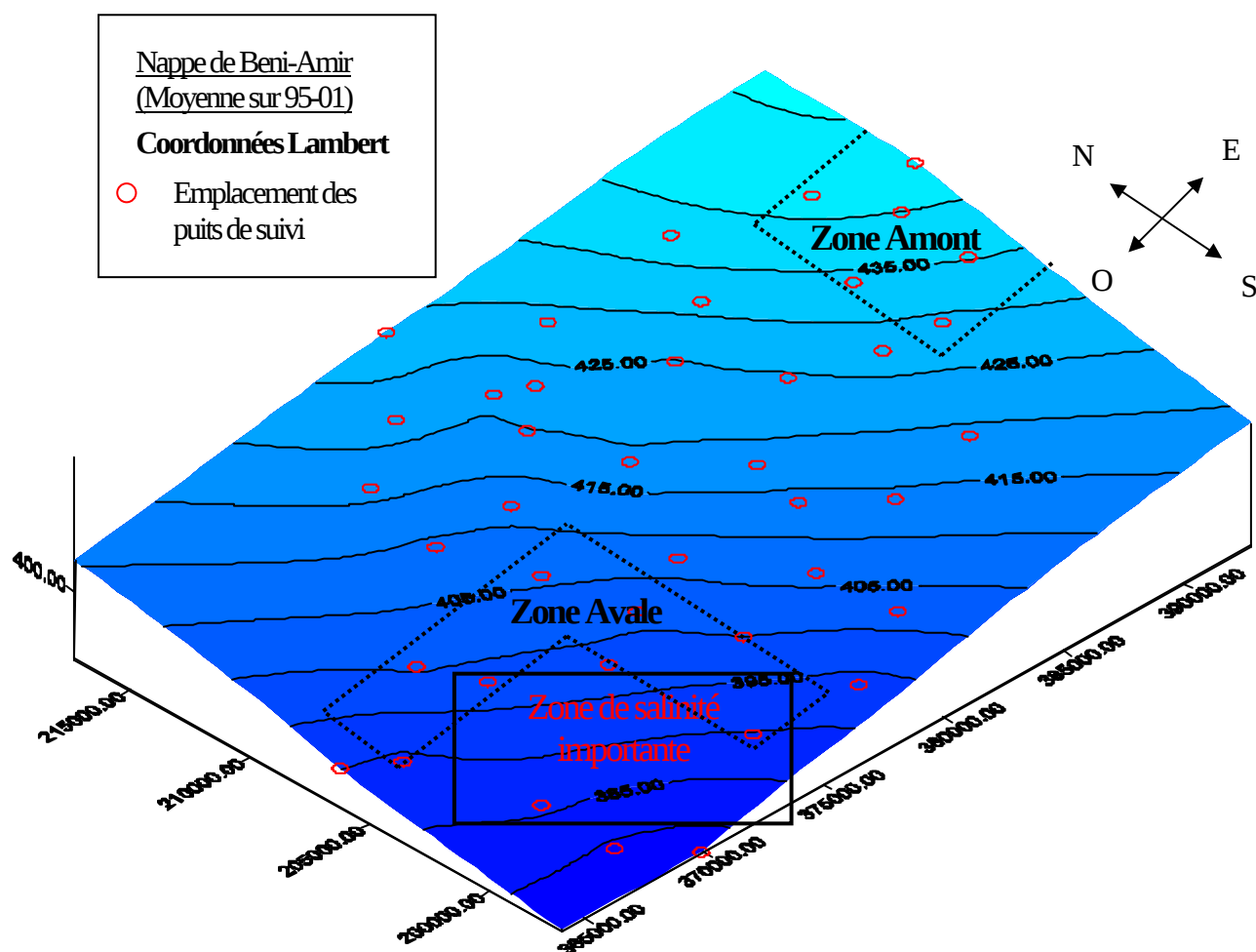


Figure 38: Sens d'écoulement de la nappe, carte réalisée en faisant une moyenne de la piézométrie par point de suivi sur 5 ans (données réseau de suivi ORMVAT).

4.4.2 Stratégies de pompage.

La manière dont les agriculteurs pratiquent le pompage dans la nappe, la manière dont ils gèrent cette ressource à la parcelle et leur sensibilité vis à vis du problème de la salinité de cette ressource représente une grande interrogation pour l'ORMVAT, au moins en ce qui concerne les deux premiers points. Les enquêtes réalisées sur le terrain avaient donc pour but de connaître les indicateurs et motivations des agriculteurs pour l'exploitation de la ressource, ainsi qu'une estimation des volumes pompés dans des conditions de limitation importante de la ressource de surface (période d'enquêtes du 1^{er} au 15 mai). Ces résultats seront comparés dans la mesure du possible aux résultats de travaux antérieurs.

4.4.2.1 Les conditions du pompage.

Les résultats des enquêtes réalisées en Mai 2001 montrent que la ressource souterraine est utilisée en tant que complément à l'irrigation par le réseau (Bacot, 2001). Ainsi, la pratique du mélange de l'eau de canal avec l'eau du puit est pratiquée par la grande majorité des agriculteurs disposant d'un puit. Le mélange se fait soit dans le canal lorsque sa capacité et l'emplacement du puit le permettent, soit dans les seguias d'amenée. Le pompage se pratique durant toute la durée du tour d'eau mais se poursuit très souvent au-delà. En effet, une fois que la dotation en eau de surface est terminée, l'agriculteur laisse très souvent fonctionner sa pompe pendant une durée variable pour terminer son irrigation. La durée du pompage au-delà de la durée du mélange dépend en effet du débit de la pompe (qui est très

fluctuant même à petite échelle de temps), de l'estimation par l'agriculteur des besoins en irrigation, mais aussi d'autres facteurs économiques tels que sa trésorerie. Il ressort également que les agriculteurs situés dans les zones où la nappe est de mauvaise qualité (en aval du réseau principalement) ont parfaitement conscience du problème de la salinité de l'eau d'irrigation et de l'impact que cela peut avoir sur leurs rendements. Tous ont en effet réalisé l'expérience de n'irriguer une partie de leurs cultures qu'avec leur puit et ont pu mesurer, à l'échelle d'une année, l'impact négatif sur leur rendement. Mais comme il a été dit précédemment, le pompage est principalement conditionné par le manque d'eau du réseau. Ainsi la salinité de la nappe n'influe pas ou peu sur l'action du pompage car la dotation actuelle en eau de réseau, jugée insuffisante par les agriculteurs est le problème prioritaire.

4.4.2.2 Estimation des volumes pompés.

Au cours d'études sur des bilans hydrogéologiques des nappes de Beni-Amir et Beni-Moussa (Belhacène et Chayat 1992), l'estimation des exhaures par pompage empruntait la méthodologie suivante :

Connaissant le nombre de puits et estimant la superficie dominée (qui peut être irriguée à elle seule) par un puit, connaissant la répartition des assolements, qui sur les périodes étudiées n'étaient pas libres, et connaissant les besoins en eau de chacune des cultures, l'estimation des volumes pompés a pu se faire par la formule suivante :

$$P_p = \sum_{\text{cultures}} N_p \cdot s \cdot E_{Tr} \cdot p$$

Avec :

- P_p : Estimation des volumes pompés.
- N_p : Nombre de puits total.
- s : Superficie dominée par un puit.
- E_{Tr} : Evapotranspiration de la culture considérée.
- p : Pourcentage de la superficie totale emblavée par la culture considérée.

Ainsi, plusieurs hypothèses sont faites dans ce calcul :

- On considère ici que l'irrigation par pompage est séparée de l'irrigation par le réseau (pas de mélange). En effet, le terme s correspond à une superficie irriguée uniquement par le puit.
- On estime que l'agriculteur pratique le pompage en fonction de la culture irriguée et qu'il différencie les besoins en eau de chaque culture.
- On considère enfin que le pompage se pratique pour l'irrigation de tous les types de cultures.

Il apparaît d'ores et déjà que la première hypothèse du calcul précédemment citée (irrigation par le puit séparée du pompage) soit en contradiction avec les premières enquêtes sur les conditions de pompage (voir paragraphe précédent 3.4.2.1). La méthodologie adoptée dans notre cas pour avoir une idée même approximative des volumes pompés est différente puisque basée sur des enquêtes auprès d'agriculteurs (tertiaire P20amTG3B) et sur l'exploitation d'enquêtes précédemment réalisées dans le cadre d'un stage sur les "stratégies d'irrigation des eaux de surface et des eaux souterraines par les agriculteurs du Tadla" (Bacot, 2001). Les synthèses de ces résultats ont permis de dégager les informations suivantes concernant la pratique du pompage dans le temps ainsi que l'appréciation des agriculteurs face aux problèmes qualitatifs et quantitatifs de la ressource souterraine.

▪ Résultats d'enquêtes réalisées sur le Tertiaire P20amTG3B:

Dans un premier temps, des mesures de débit des pompes ont été réalisées auprès de chaque agriculteur du tertiaire. Il faut savoir que le débit de chaque station est fonction du type de pompe et de la disponibilité de la nappe (donc de la période de l'année). Pendant la période de l'enquête les débits mesurés ont été en moyenne de 5 l/s. La faiblesse de ces débits est due à la fois à la période de l'année (saison sèche) et au problème de tarissement du puit. Si l'agriculteur augmente son débit de pompage, il sera obligé au bout de quelques heures d'arrêter sa pompe pour que l'aquifère puisse se recharger. Connaissant ces débits, les enquêtes ont porté sur le temps de pompage au delà de la période de

mélange ainsi que sur la répartition de l'eau d'irrigation (mélange puis pompage) à chaque tour d'eau afin de savoir si la pratique du pompage est similaire d'un tour d'eau à l'autre. Ainsi, il s'est avéré que certains agriculteurs irriguent toute leur superficie par tour d'eau mais la majorité irriguent une moitié au premier tour d'eau puis l'autre moitié au second. Au niveau des quantités déversées, les agriculteurs ne font à priori pas de distinction entre les cultures. Ainsi, on a pu constater que la pratique du pompage était similaire à chaque tour d'eau sur la période d'étude. Les résultats de la première partie des enquêtes sont ainsi résumés dans les tableaux en annexe.

Les résultats concernant la durée d'irrigation d'un hectare par la technique de la robta (calculés grâce aux données de l'enquête) ont été approuvés par les vulgarisateurs et les agriculteurs eux même après restitutions. Afin de recouper les informations sur les volumes prélevés dans la nappe nous avons demandé aux agriculteurs quelle serait la dotation d'eau de canal nécessaire pour ne plus avoir recours au pompage, en considérant une fréquence de tour d'eau de 15 jours. En effet, tous les agriculteurs questionnés à ce sujet sont prêt à arrêter de pomper si la dotation de surface est "suffisante". Ainsi on s'aperçoit que pour la majorité des agriculteurs interrogés la différence entre le volume total (réseau + pompage) actuellement utilisé pour l'irrigation et le volume souhaité (uniquement par réseau) la différence est très faible. Pour d'autres agriculteurs la différence est plus importante. De plus la dotation souhaitée est plus faible que celle actuellement utilisée. L'explication donnée par les agriculteurs concernés est que l'eau du réseau étant de meilleure qualité, il ne serait pas nécessaire d'en utiliser autant qu'actuellement. De plus, lorsque l'on utilise l'eau de pompage seule, (pour compléter la dotation par mélange) le débit étant faible, les pertes par transport sont plus importantes qu'avec un débit de 30 l/s. Les réponses données au cours des enquêtes correspondent à des volumes pompés dans des cas de recours intensif et systématique au puit. Avoir une estimation annuelle des débits pompés est assez délicat car il faut tenir compte de différents paramètres tels que la trésorerie de l'agriculteur, les fluctuations de débit du puit, la pluviométrie, etc... Ainsi, en l'état actuel des données d'enquêtes, nous avons fait une première approximation des proportions de volumes pompés par rapport aux dotations du réseau en période sèche pour chaque agriculteur du tertiaire P20amTG3B. Ces résultats figurent dans le Tableau 16:

Agri. (Superficie)	Agri. n°1 (2,6)	Agri. n°2 (7)	Agri. n°3 (2,45)	Agri. n°4 (2,98)	Agri. n°5 (1)
Période d'enquêtes	01/05/01 au 15/05/01	01/05/01 au 15/05/01	01/05/01 au 15/05/01	01/05/01 au 15/05/01	01/05/01 au 15/05/01
Volumes réseau par ha (m3/ha)	747,7	709,7	705,3	652,3	648,0
Volumes pompés par ha (m3/ha)	1453,8	236,6	558,4	688,6	1836,0
Ratio (volumes pompés / volumes réseau)	1,9	0,3	0,8	1,1	2,8

Tableau 16 : Ratio des volumes pompés par rapport aux dotations du réseau. Résultats d'enquêtes auprès d'agriculteurs du tertiaire P20amTG3B, réalisées du 01/05/01 au 15/05/01.

On s'aperçoit qu'il existe, à l'échelle des exploitants d'un même tertiaire, une grande diversité de comportements vis à vis du pompage. En effet, pour des consommations à l'hectare du réseau très proches, on a des valeurs de rapport entre volumes pompés et volumes consommés qui vont de 0,3 à 2,8. On retrouve cette variabilité dans les résultats d'enquêtes réalisées par Bacot M. (2001). Les résultats sur les ratios "volumes pompés / volumes du réseau" pour 3 agriculteurs possédant à la fois une ressource souterraine et une ressource de surface sont consignés dans le tableau suivant :

NOM (Superficie)	Agri n°6 (2,5)	Agri n°7 (6)	Agri n°8 (5,1)
Période d'enquêtes	23/02/01 au 11/04/01	22/03/01 au 20/03/01	21/02/01 au 19/04/01
Ratio (volumes pompés / volumes réseau)	0,24	2,90	0,74

Tableau 17: Ratio des volumes pompés par rapport aux dotations du réseau. Résultats d'enquêtes (Bacot, 2001).

Le volume pompé par hectare sur le tertiaire P20amTG3B pendant la période du 01/05/01 au 15/05/01 serait égal à 670 m³/ha (moyenne des agriculteurs enquêtés) soit 95% du volume délivré par le réseau (soit 48% des apports totaux (or pluviométrie)). En considérant une pratique identique du pompage pendant les 6 mois de l'année qui constituent la saison sèche, on obtiendrait une valeur de 4000 m³/ha. Les données du bilan hydrique de P20amTG3B sur la campagne 99-00 fait état d'un déficit hydrique de 1100 m³/ha (voir annexes) en été (période de mars à août). A l'échelle de ce tertiaire, le pompage permettrait donc de combler le déficit des apports de surface et pluviométriques. A l'échelle de l'agriculteur l'estimation des volumes pompés par hectare et par agriculteur pendant la saison sèche est indiquée dans le Tableau 18:

NOM de l'agriculteur (Superficie)	Estimation de consommation du puit pour la saison sèche (m3/ha)
Agri n°6 (2,5)	1382 *
Agri n°7 (6)	6672 *
Agri n°8 (5,1)	2795 *
Agri n°1 (2,6)	8723
Agri n°2 (7)	1419
Agri n°3 (2,45)	3350
Agri n°4 (2,98)	4131
Agri n°5 (1)	11016

Tableau 18 : Estimations des volumes pompés par ha pendant la saison sèche (m3/ha). Estimations à partir d'enquêtes réalisées du 01/05/01 et 15/05/01. (* Estimations à partir de données Bacot, 2001)

La moyenne des consommations d'eau du puit pour ces 8 agriculteurs serait ainsi de 4100m³/ha sur la saison sèche ce qui représente plus de la moitié des consommations moyennes annuelles du réseau pour l'ensemble des agriculteurs du périmètre.

A titre de comparaison, des résultats d'enquêtes sur le pompage réalisées dans la période antérieure à 1991 dans les zones de CDA 508 et 509 (partie sud ouest à l'aval du réseau) sont mentionnées dans le tableau suivant (données Jebbour, 1995). Les résultats ne précisent pas s'il s'agit de pompage en tant que source exclusive d'irrigation ou en tant que complément d'irrigation. :

Année	1975	1983	1984
Zone (CDA) d'enquêtes	509	508 / 509	508 / 509
Estimation des volumes pompés (Mm ³)	33	85	94
Superficie concernée (ha)	4884	11124	12875
Estimation des volumes pompés sur l'année (m ³ /ha)	6756	7641	7301

Tableau 19 : Estimation de volumes annuels pompés (résultats d'enquêtes réalisés par l'ORMVAT).

Ces résultats ont été réalisés ont été estimées à partir de l'occupation du sol et des capacités de pompage dans les puits. Les estimations de Belhacène et Chayat (1992) au sujet des volumes pompés sur l'ensemble du périmètre de Beni-Amir pour les campagnes 1985-86 à 1990-91 ont été faites sur la base des assolements, du nombre de puits et de la superficie moyenne dominée par un puit (voir formule au paragraphe 3.4.2.2). Ces estimations sont consignées dans la tableau suivant :

Campagnes	1985-86	1986-87	1987-88	1988-89	1989-90	1990-91
Volumes pompés (Mm ³)	76,9	82,1	71,8	82,1	87,2	82,1
% (volumes pompés / volumes du réseau)	29	35	31	34	30	34

Tableau 20 : Estimation des volumes pompés (et du pourcentage de ces volumes par rapport aux apports du réseau pour les campagnes 1985-86 à 1990-91. (Données Belhacène et Chayat, 1992).

Ces volumes représentent en moyenne environ 2900 m³/ha sur l'année. A partir de nos estimations de 4100m³/ha pompés pendant la saison sèche sur la base d'enquêtes auprès de 8 agriculteurs, il est possible de faire une estimation des volumes pompés pour l'ensemble des agriculteurs de Beni-Amir ayant aussi accès au réseau (même si la validité du calcul est discutable en regard au petit nombre d'enquêtes).

Les hypothèses de ce calcul sont les suivantes :

- Etant donné que peu d'agriculteurs possèdent plus d'un puit, nous considérons que le nombre de puits fonctionnels correspond au nombre d'agriculteurs utilisant un puit. On considère ainsi qu'il n'y a pas de marché de l'eau de pompage.
- Nous considérons que la superficie moyenne cultivée par les agriculteurs possédant un puit est égale à la superficie moyenne des agriculteurs ne possédant pas de puit.

Ainsi, l'estimation des volumes pompés par les agriculteurs ayant accès au réseau est calculée suivant la formule suivante :

$$Vol.pomp(réseau) = (Conso. moyenne du pompage) \times (\text{Nombre de puits sur le réseau}) / (\text{Nombre total d'agriculteurs})$$

$$Vol.pomp(réseau) = \frac{4100 \times 1639}{8300} = 810 \text{ m}^3/\text{ha}.$$

L'estimation du volume pompé par l'ensemble des agriculteurs ayant accès au réseau s'élève donc à 810 m³/ha pour la saison sèche.

Pour l'estimation des volumes pompés pendant la saison sèche par les agriculteurs du périmètre n'ayant pas accès au réseau, nous avons utilisé les résultats d'enquêtes réalisées par Bacot (2001) concernant le suivi des irrigations (du 09/03 au 29/04) d'un agriculteur n'ayant comme seule source d'irrigation que son puit. Le détail des irrigations est donné en annexe. Ces données permettent de dire que pendant les 50 jours de l'enquête, cet agriculteur a consommé 1300m³/ha. En extrapolant ces données sur les 6 mois de la saison sèche on obtiendrait une valeur de 4700 m³/ha. En reprenant le même calcul que précédemment on obtient comme valeur du volume pompé par l'ensemble des agriculteurs hors réseau :

$$Vol.pomp(hors réseau) = \frac{1639 \times 1426}{8200} = 1630 \text{ m}^3/\text{ha}.$$

L'estimation du volume pompé par l'ensemble des agriculteurs n'ayant pas accès au réseau s'élève donc à 1630 m³/ha pour la saison sèche.

Au total l'estimation des volumes pompés par l'ensemble des agriculteurs ayant un puit, pendant les 6 mois considérés comme une période de demande importante en complément d'irrigation serait de :

$$\begin{aligned}\text{Vol. total pompé} &= \text{Vol. pomp (réseau)} + \text{Vol pomp (hors réseau)} \\ \text{Vol total pompé} &= 1630 + 810 = 2440 \text{ m}^3/\text{ha}.\end{aligned}$$

Nous estimons donc que pendant la période sèche, les volumes pompés sur l'ensemble du périmètre de Beni-Amir sont de $2440 \text{ m}^3/\text{ha}$. Si la période de septembre à février est dans l'ensemble beaucoup moins demandeuse en complément d'irrigation on peut tout de même penser que sur l'année le pompage dépasse les $3000 \text{ m}^3/\text{ha}$.

→ Finalement, les enquêtes réalisées au cours de ce stage ainsi que l'exploitation des résultats d'autres études (Bacot, 2001) permettent de dire que les diversités de comportement vis à vis du pompage sont extrêmement importantes. Il n'y a donc pas, à priori, d'homogénéité de comportement vis à vis de l'utilisation conjuguée des eaux de surface et des eaux souterraines. Les volumes mis en jeu pendant la saison sèche pourraient parfois atteindre des valeurs égales ou supérieures aux apports du réseau. S'il est possible de faire une estimation des volumes pompés sur la base d'enquêtes, il n'en reste pas moins que le faible nombre d'agriculteurs suivis et la diversité des comportements en terme de volumes pompés ne permet pas de considérer la valeur trouvée comme représentative mais plutôt comme un ordre de grandeur.

Nous verrons ainsi dans la partie 3.5 les différents impacts de différents niveaux d'utilisation ou non de la ressource souterraine en terme de recharge ou décharge de la nappe et en terme d'évolution possible de la qualité des sols.

4.4.3 Indicateurs de qualité des eaux et des sols

Au cours des entretiens sur les pratiques de pompage, différentes questions ont été soulevées concernant les indicateurs de qualité d'eau de nappe, les indicateurs de qualité des sols ainsi que l'évolution de la piézométrie et des quantités d'eau de surface. Ces questions avaient pour but de comprendre les contraintes des agriculteurs sur le terrain et d'évaluer la prise en compte d'indicateurs dans leur comportement vis à vis de l'utilisation de l'eau souterraine. Les réponses à ces enquêtes ont été synthétisées comme suit :

4.4.3.1 Les indicateurs de qualité des eaux souterraines :

Tous les agriculteurs interrogés portent un jugement sur la qualité de l'eau d'irrigation en terme d'impact sur le rendement. Or tous ont déjà tenté l'expérience de n'irriguer une parcelle ou une partie de leur parcelle qu'avec l'eau du puit (dont la conductivité électrique se situait aux alentours de 5 dS/m). Les rendements ont toujours été très diminués. L'impact sur le rendement est donc un premier indicateur pour les agriculteurs. Le goût de l'eau renseigne également les agriculteurs sur le degré de salinité. Sur le lieu des enquêtes (tertiaire P20amTG3B en aval du périmètre), l'eau du puit était consommé jusque dans les années 80.

Cette dégradation est imputable selon les agriculteurs à une utilisation excessive d'engrais.

4.4.3.2 Les indicateurs de qualité des sols :

Depuis quelques années les agriculteurs ont vu apparaître sur leur sol des traces blanches en surface qui correspondent à des dépôts de sel dus à l'évaporation des eaux superficielles lors de l'irrigation. Ces traces sont donc également des indicateurs de qualité de l'eau. Cependant, ces traces ne sont pas visibles dans la zone racinaire. La qualité du rendement est aussi, comme pour l'eau, un indicateur de qualité du sol. Certains agriculteurs ont également constaté la dégradation de leur terre devenue friable et fragile (aspect farineux), ceci étant considéré comme un indicateur de mauvaise qualité des sols. En terme de spatialisation intra-parcellaire il n'a jusqu'à maintenant pas été donné de distinguer des zones plus touchées par ces problèmes de salinité ou sodicité des sols. En terme d'évolution il ne semble pas y avoir de changements significatifs à l'échelle intra-annuelle mais plutôt une dégradation lente au fil des années.

4.4.3.3 La piézométrie :

L'avis général concernant les fluctuations du niveau de la nappe est que celle-ci baisse régulièrement depuis les années 1970 malgré des fluctuations intra-annuelles. Notons à ce propos que ces fluctuations ne sont pas régulières et

systematiques. Pour les agriculteurs interrogés, la baisse de la nappe est principalement due à la baisse des apports par le réseau avant d'être due au pompage.

→ Il ressort des enquêtes que les agriculteurs ont une bonne connaissance de la qualité de l'eau d'irrigation et des impacts possibles en terme de qualité des sols et donc de rendement. Cependant, pour la grande majorité des agriculteurs, le problème prioritaire est un problème quantitatif au niveau des apports du réseau. L'aspect qualitatif est connu mais face au manque d'eau de surface il s'agit avant tout de combler le déficit quelle que soit la qualité de l'eau pompée.

Synthèse sur la salinité des eaux souterraines et les stratégies d'utilisation de la ressource.

- Nous avons vu que si l'évolution du nombre de puits a constamment évolué entre 1975 et 1991, il semble que depuis une dizaine d'années, le nombre d'ouvrages fonctionnels ait atteint un palier (environ 3000 puits sur Beni-Amir). La répartition de ces ouvrages fait état d'une densité beaucoup plus importante dans les zones aval du réseau.

- Concernant la piézométrie, certaines zones dans la partie nord (P15-P16, P12amont) et dans la partie amont (P8 – P10) ont subi une baisse de la piézométrie entre 1975 et 1991. De même, entre 1995 et 2001 (nouveau réseau de suivi), les zones P8 et la zone bour accusent une baisse de 2m (parmi les échantillons étudiés). Cependant, cette tendance à la baisse n'apparaît pas généralisable à l'ensemble du périmètre.

- Concernant la salinité de la nappe, nous avons pu constater en observant l'évolution sur ces 6 dernières années que la partie sud ouest du périmètre, en aval du réseau, était systématiquement plus touchée, du fait d'un écoulement de la nappe qui tend à accumuler les sels de l'amont dans cette zone qui ne présente pas d'exutoire.

- Au sujet du comportement des agriculteurs vis à vis de l'exploitation de la ressource souterraine, il semblerait que les conditions de pompage soient assez homogènes pour les agriculteurs étudiés, à savoir l'utilisation de la ressource souterraine avant tout comme complément d'irrigation pour satisfaire les besoins des cultures face à la pénurie d'eau de surface mais également pour faciliter le travail d'irrigation à la robota. Dans la pratique, l'estimation des volumes pompés, à défaut d'être quantitativement précise, nous montre qu'il y a en fait de grandes différences entre les agriculteurs suivis, vis à vis des volumes pompés. L'estimation chiffrée sur la période sèche fortement demandeuse en compléments d'irrigation fait état d'une moyenne d'environ 4000 m³/ha (pour les agriculteurs possédant un puit et ayant accès au réseau), soit plus de la moitié des dotations moyennes annuelles du réseau. Une valeur possible estimée sur la base d'enquêtes, du pompage annuel total sur Beni-Amir serait de plus de 3000 m³/ha, ce qui représente une valeur assez proche de l'estimation de Belhacène et Chayat (1992) pour les campagnes de 1985 à 1991 et qui était de 2900 m³/ha.

Dans la partie suivante, on testera des scénarios (grâce à une partie du modèle *INTEGIS*) d'évolution de la nappe et de qualité des sols en fonction de différents types de comportement vis à vis du pompage.

5 LA MODELISATION INTEGREE.

5.1 Le modèle INTEGRIS.

5.1.1 Présentation et fonctionnement du modèle.

5.1.1.1 Fonctionnement général :

Le modèle INTEGRIS (1997) est un modèle intégré composé de 3 modules permettant d'évaluer à différentes échelles du périmètre irrigué de Chistian au Pakistan le fonctionnement hydraulique du réseau ainsi que les processus décisionnels des agriculteurs en terme d'assolement, d'intensité culturale et de pompage par l'intermédiaire d'un modèle socio-économique de programmation linéaire, puis d'évaluer l'impact environnemental (qualité des sols) par des bilans hydro-salins. Les différents objectifs qui ont guidé la conception de ce modèle sont les suivants :

- Evaluer l'impact des marchés de l'eau sur le fonctionnement du périmètre (impacts sur les assolements, le pompage...).
- Evaluer les impacts de scénarios d'une nouvelle gestion de l'eau pour la maîtrise de la salinité.

Le schéma de fonctionnement général du programme est le suivant :

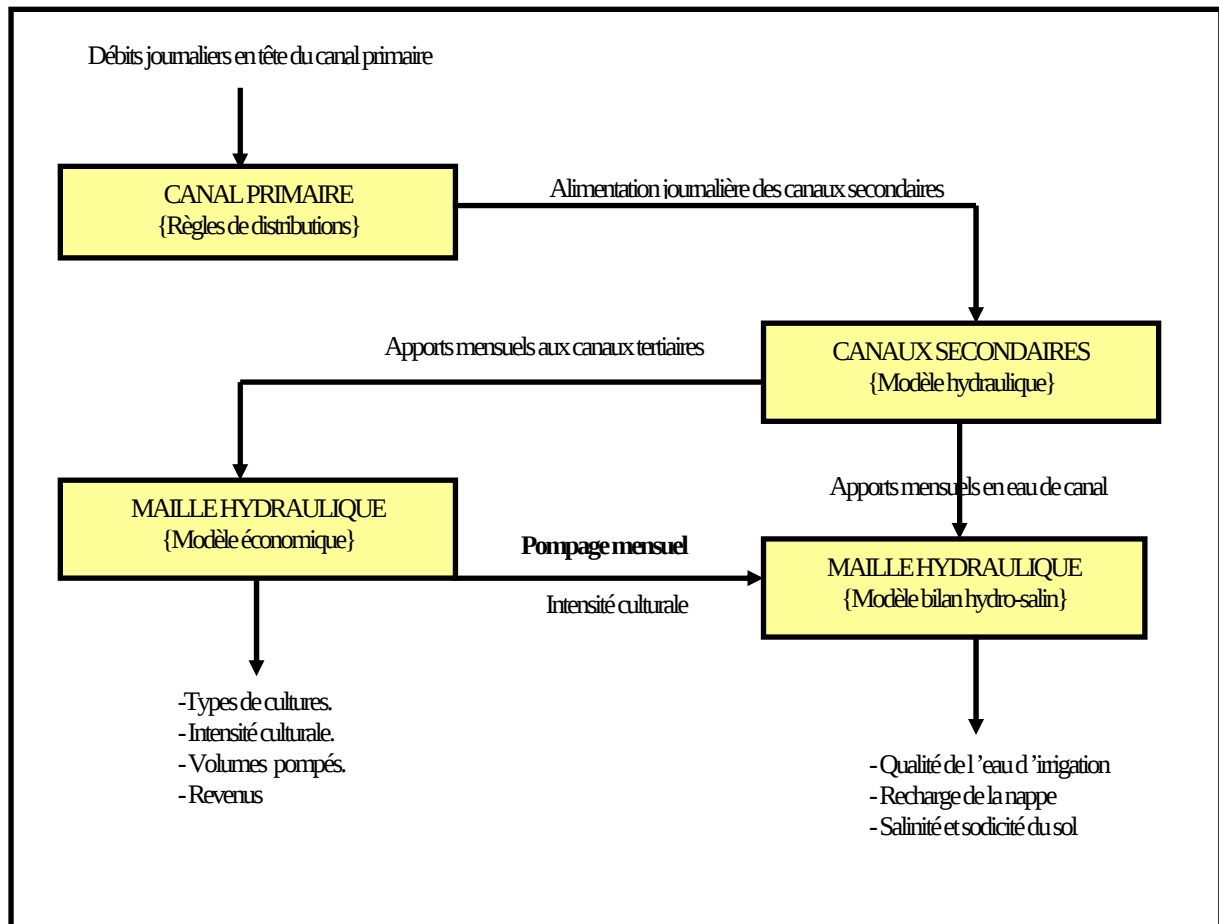


Figure 39: Schéma de fonctionnement général d'INTEGRIS

La programmation a été réalisée en langage Matlab avec une sortie SIG (ArcView).

5.1.1.2 Les différents modules :

- Le module hydraulique :

Le module hydraulique intègre d'une part les règles de distribution et d'allocation du canal principal ainsi que les contraintes hydrauliques du réseau (caractéristiques des ouvrages, débits de fonctionnements, efficacité...) et permet ainsi, à partir de la connaissance des débits en entrée du canal principal de connaître la répartition des volumes attribués à chaque tertiaire ou à chaque prise.

- Le module socio-économique (ou module de planification des assolements):

Le modèle économique développé dans Integis est un modèle de programmation linéaire (LP) d'optimisation économique. Pour cela le processus de décision de 9 agriculteurs individuels représentatifs ont été modélisés (Strosser, 1997). Ainsi, 9 modèles économiques ont été construits calés et validés. De même, 8 mailles hydrauliques (tertiaires) situées sur Fordwah et Azim ont été étudiées en détail. Pour chacun d'eux, un profil socio-économique a été dressé en fonction des 9 classes d'agriculteurs identifiés. Pour ces 8 mailles hydrauliques un modèle économique a pu être construit en agrégeant les matrices individuelles représentées au prorata de la surface qu'elles occupent dans la maille hydraulique. Pour avoir un modèle économique de chacune des mailles hydrauliques de Chistian, une typologie sur des critères socio-économiques et physiques a été effectuée, affectant à chacun le type de l'une des 8 mailles.

Considérations théoriques sur la modélisation linéaire :

Ce modèle microéconomique est basé sur la maximisation d'une fonction d'utilité U :

$U(x) = f(X_1, X_2, \dots, X_3)$ fonction d'utilité

avec $X = \{X_1, X_2, \dots, X_3\}$ domaine d'activités.

Objectif :

Max UX .

Sous les contraintes :

$AX < B$.

$X > 0$.

Avec :

U = fonction d'utilité (1,n)

X = matrice d'activités (n,1)

A = matrice de coefficients techniques (n,m) qui relie le niveau des activités aux contraintes

B = matrice des contraintes (m,1)

On considère que les stratégies sont décidées pour atteindre un objectif de maximisation des profits, en tenant compte d'un certain nombre de contraintes. Dans la phase de prévision, le choix des activités culturales est donc limité par un ensemble de contraintes inamovibles:

- Les contraintes physiques (quantité d'eau disponible, capacité maximale de pompage du fait de l'accès à l'eau de puits, surface maximale cultivable)
- Les contraintes vitales (besoins minimums en blé, en fourrage, en argent pour le coût de la main d'œuvre et le remboursement de divers emprunts).

A partir de là, dans la phase de prévision toujours, l'agriculteur va tenir compte dans son choix du:

- Type de cultures.
- Prix de revient de chaque culture.
- Des variations dans la distribution d'eau de canal.
- Des variations dans les prix de revient des cultures.

Un modèle économique linéaire suppose en outre que :

- Les activités soient des variables continues et proportionnelles (la production doit être proportionnelle (facteur constant) aux variables d'entrée considérées).
- Les contraintes soient linéaires.

Connaissant le volume mensuel de chaque maille hydraulique (bloc d'irrigation), on peut donc prévoir le volume d'eau de canal annuel ou plutôt le volume d'eau pour chaque maille et pour chaque saison (Eté et hiver). C'est le facteur d'entrée du modèle économique qui va permettre de planifier les assolements.

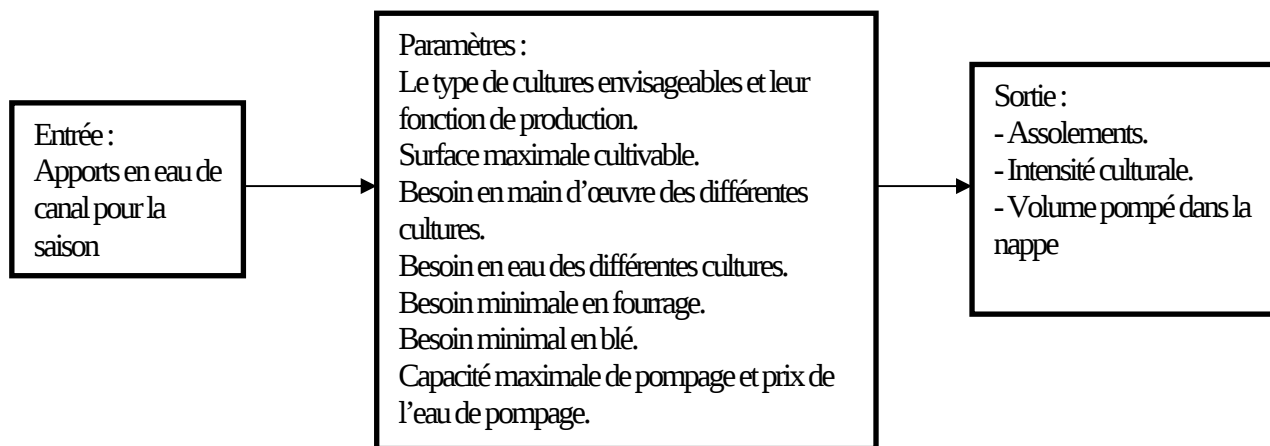
En résumé, pour une maille hydraulique donnée on connaît :

- Le type de cultures envisageable et leur fonction de production.
- Surface maximale cultivable.
- Besoin en main d'œuvre des différentes cultures.
- Besoin en eau des différentes cultures.
- Besoin minimal en fourrage.
- Besoin minimal en blé.
- Capacité maximale de pompage et prix de l'eau de pompage.

Ainsi, le module économique va évaluer les gains et les coûts des différents types d'activités fonctions des stratégies des agriculteurs pour en déduire les assolement et l'intensité culturale qui permettront de maximiser leur revenu.

A la sortie du module on connaît donc :

L'assolement, l'intensité culturale et le volume d'eau pompé dans la nappe pour chaque saison.



▪ Le module environnemental :

La salinisation des sols se calcule selon un bilan entre les entrées en sels (eau d'irrigation (puits+canaux), pluie, remontées capillaires) et les sorties (lessivage). Le calcul fournit une estimation annuelle de la masse de sel apportée.

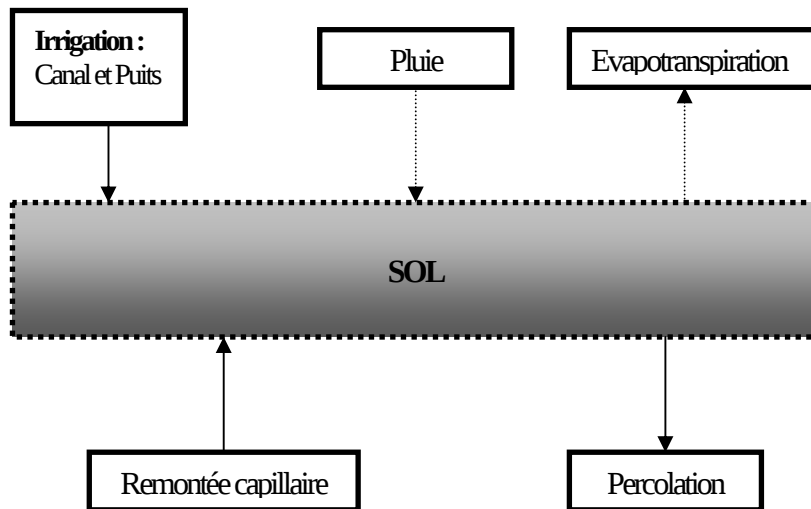
Les données en entrée :

- offre en eau de canal mensuelle.
- assolement des cultures et fourrages et prélèvements dans la nappe (pour chacune des 2 saisons).
- pertes en eau sur la distribution.

De plus le module de calcul utilise des variables dont l'accès est autorisé :

- Type de sol à chaque maille hydraulique (4 sols différents).
- Caractéristiques de ces sols (fixées dans le programme).
- Pourcentage (%) de percolation des parcelles et % de percolation à travers le lit du canal.
- LF : Fraction de lessivage (hauteur d'eau percolant / hauteur d'eau appliquée en surface).
- Profondeur de la nappe (profondeur moyenne pour une année d'observation, calculée par le SIG).
- Salinités et SAR des eaux souterraines et de surface (elles sont fixées pour un an).
- Les précipitations (pour chaque saison).
- Les consommations saisonnières en eau des cultures sont fixées (2 saisons) (Riz, fourrage, coton, canne à sucre, blé).

Les termes du bilan sont les suivants:



Les étapes du calcul sont organisées de la manière suivante :

Connaissant : Assolements, besoins en eau des cultures (et donc du *maillage hydraulique* ET0).

On considère: RWS (offre totale/demande agricole ou satisfaction des besoins) = 100%.

On estime : $Perc_0$ (La percolation) = Offre * (% de percolation)

On calcule : Remontée capillaire (en fonction de la hauteur de la nappe).

On estime : Le bilan hydrique pour refaire une estimation de RWS, soit RWS_0 .

Connaissant : RWS_0 .

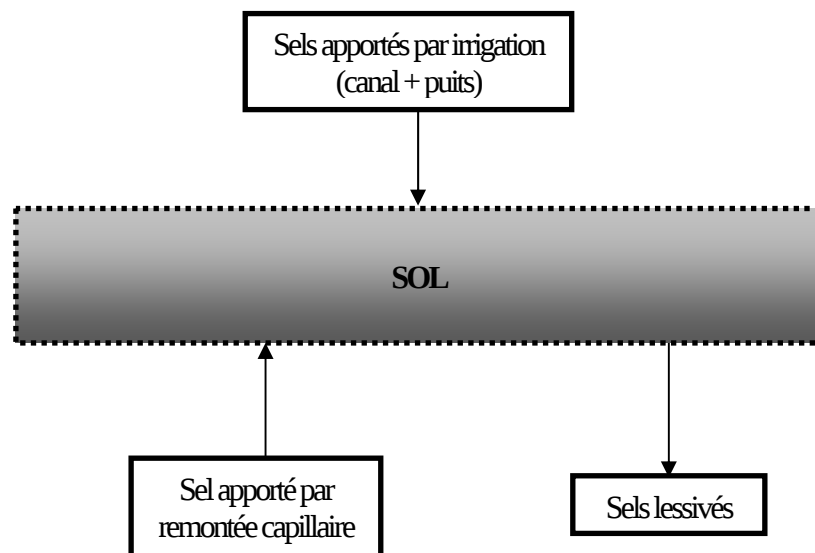
On calcule : $Perc_0$ puis $RWS_{réel}$.

➔ On a finalement une valeur du volume percolé permettant de calculer la recharge de la nappe.

Bilan en sel :

On somme les volumes d'eau d'irrigation (canal + puits), les volumes percolés et les volumes par remontées capillaires pour une année.

On fait alors un bilan entrée/sortie :



Sels entrant : Volumes d'eau par les concentrations respectives.

Sels sortants : Quantités lessivées qui dépendent des volumes percolés, de l'efficacité de la percolation (liée au type de sol) et de la concentration de l'eau du sol.

→ On a finalement les quantités de sels stockées dans le sol sur une année et les quantités déposées dans la nappe.

Estimation de la sodicité :

La sodicité est déterminée à l'aide d'une équation empirique (Kuper, 1997) :

$$SAR = 16.86 + 1.22 SAR_{iw} - 0.17 * \%sand$$

Avec : SAR_{iw} moyenne de l'eau d'irrigation.

$\%sand$ est lié au type de sol, donnée intrinsèque au programme.

5.1.2 Utilisation du modèle dans le cadre du périmètre de Beni-Amir.

Le modèle a été utilisé dans le cadre de Beni-Amir comme exemple de fonctionnement général d'un modèle intégré. Une présentation a été réalisée afin de servir de base de discussion permettant de comprendre les attentes des gestionnaires vis à vis d'un tel outil. mais le module "environnement" a été également utilisé pour évaluer l'impact du pompage et de la gestion actuelle de la ressource de surface sur le lessivage des sols et la recharge de la nappe.

En effet, il est apparu dans les parties précédentes que l'utilisation des ressources souterraines était nécessaire pendant la période de mars à août afin de combler le déficit hydrique causé par le manque de ressources de surface par rapport aux assolements pratiqués. Ainsi, nous avons utilisé une partie du modèle INTEGIS (en l'adaptant sous format Excel) afin de traiter des scénarios d'évolution de la situation en terme de recharge de la nappe et de salinité, sodicité des sols à l'équilibre en faisant varier les volumes de pompage. Une modification a été apportée au programme concernant la formule du calcul de EC_e . Cette formule ayant subi des modifications pour le calage par rapport aux sols du Pakistan, nous avons préféré utiliser la formule FAO (Irrigation and drainage paper 29, Rev.1, 1985) suivante :

$$EC_e = 3,42 \cdot (LF)^{-0,7}$$

Avec :

EC_e : Conductivité électrique du sol (dS/m).

LF : Fraction de lessivage.

Ces scénarios ont été testés sur les 4 prises précédemment étudiées puis sur 1 tertiaire. Il est important de préciser que les résultats obtenus indiquent des tendances d'évolution avec des valeurs à l'équilibre valables pour des cas de consommation régulière et suite à une longue série d'irrigations. Or il est évident que la gestion de l'eau par les agriculteurs peut être sujette à de nombreuses variations quantitatives et qualitatives (exploitation ou non de la nappe suivant la disponibilité de l'eau de surface) à l'échelle inter-annuelle. De plus il n'est pas possible par cette méthode de connaître la vitesse à laquelle l'équilibre serait atteint. Cependant, les résultats permettent d'évaluer la sensibilité des apports par pompage sur l'évolution de la nappe et la qualité du lessivage.

5.1.2.1 Etude à l'échelle des prises.

- Scénarios d'évolution pour P12aval et P20amont :

Les premiers scénarios testés concernent donc 2 prises en aval du réseau (P12aval et P20amont) dont la dotation annuelle à l'hectare est globalement inférieure à la moyenne et dont la nappe apparaît salée et de sodicité variable.

PRISE	CE de la nappe (dS/m)	SAR de la nappe (meq/l)
P12aval	5	1,8
P20amont	4	8,77
Réseau	2,5	12,4

Tableau 21: Salinité et sodicité de la nappe dans les zones de prises secondaires étudiées (P12aval et P20amont). (Données réseau de suivi ORMVAT)

Nous pouvons remarquer que si la salinité de la nappe est plus importante que celle du réseau, la situation est inversée en terme de sodicité.

En hiver les scénarios en terme de recharge de la nappe et de la salinité des sols seraient les suivants:

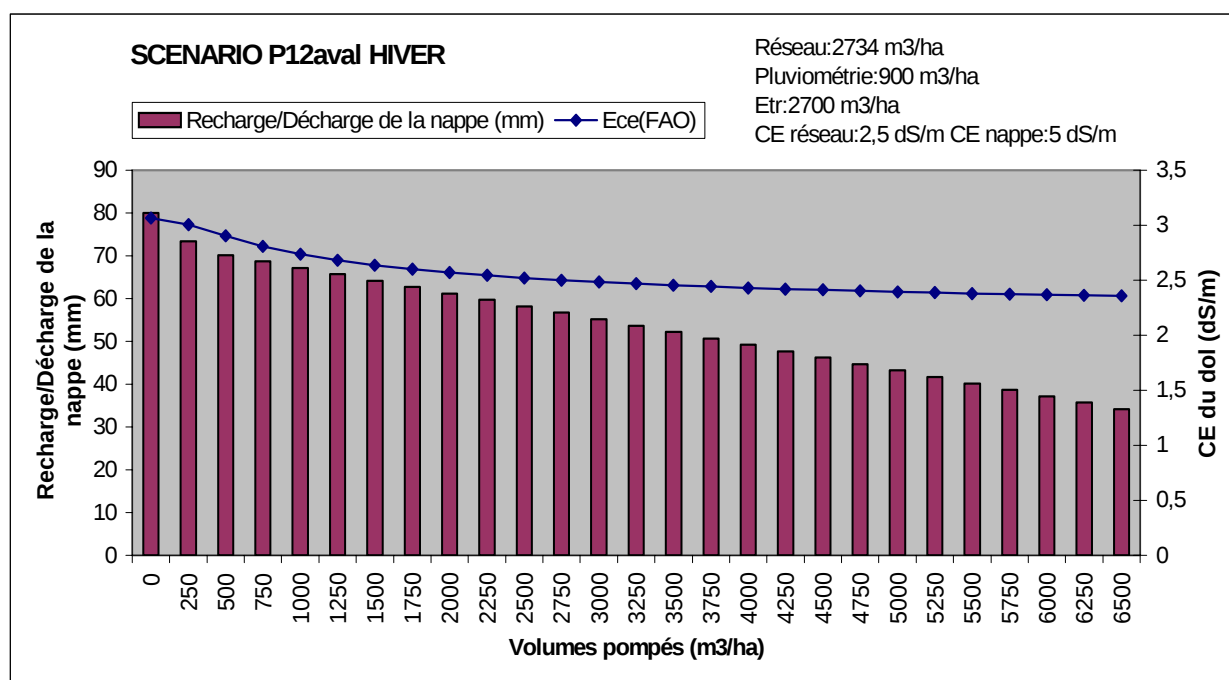


Figure 40: Scénario d'évolution de la nappe et de la salinité du sol à l'équilibre en fonction du pompage sur la prise P12aval (Septembre 99 – Février 00).

Les résultats nous montrent bien que même sans recours au pompage il existe un fort excédent d'eau d'irrigation qui repartirait (en première approximation) sous forme de percolation vers la nappe. On peut estimer que les apports par pompage ne seront pas très importants étant donné que le bilan hydrique (voir partie 3.3) journalier ne montrait pas de période de stress hydrique. Cependant on ne peut pas considérer que ces apports supplémentaires sont nuls du fait que les enquêtes ont révélé que les agriculteurs utilisent leur puit (même si de manière irrégulière et ponctuelle) tout au long de l'année. Quoiqu'il en soit, on voit que l'influence du pompage n'est pas très sensible en terme de recharge de la nappe ou de salinité du sol étant donné que les apports du réseau sont suffisamment importants pour combler les besoins des cultures.

En été la situation conduirait à l'équilibre suivant:

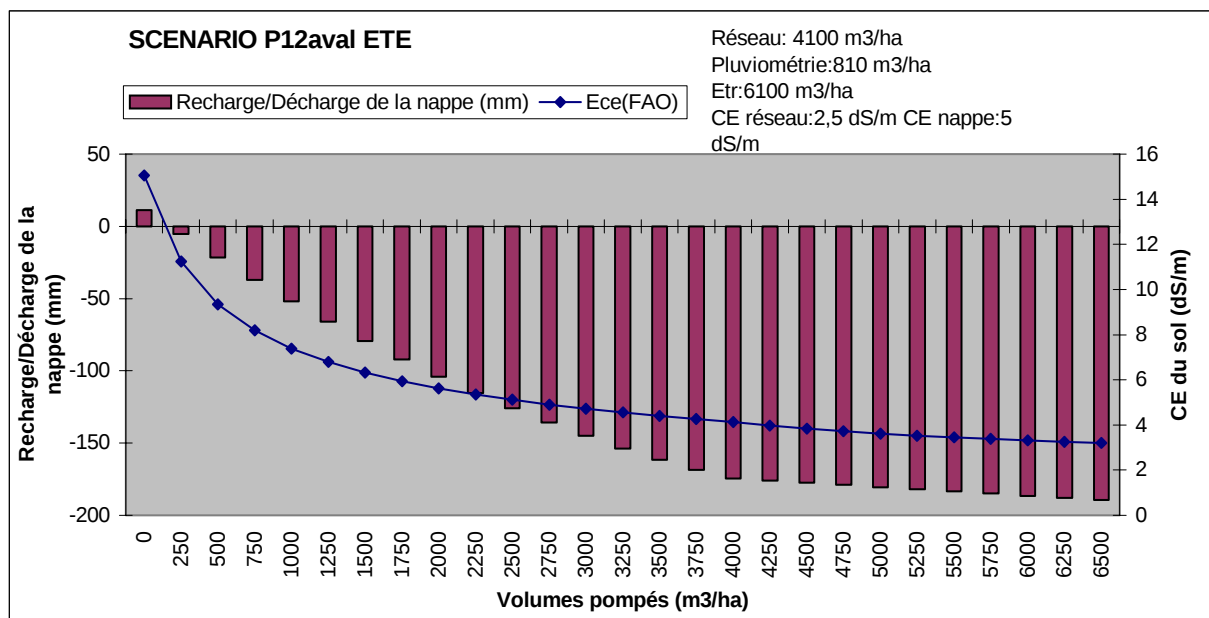


Figure 41: Scénario d'évolution de la nappe et de la salinité du sol à l'équilibre en fonction du pompage sur la prise P12aval (Mars 00 – Août 00).

On a vu grâce aux bilans hydriques qu'à partir de mars les apports deviennent inférieurs aux besoins et que la période de mai à août est extrêmement déficitaire avec une RFU pratiquement vide. Le pompage est donc une nécessité pour satisfaire les besoins des cultures. On s'aperçoit sur la figure ci dessus de l'importance du pompage en terme d'apport supplémentaire permettant un lessivage des sols. En effet, sans pompage on s'aperçoit que la fraction de lessivage est tellement faible (2 %) que l'on parviendrait à l'équilibre à une situation de salinisation des sols très forte (15 dS/m). Les enquêtes (Tableau 18: Estimation des consommations pour 8 agriculteurs) ont révélé que pendant la période avril-mai (dans une situation d'apports du réseau équivalente à celle de l'année précédente) nous pouvions avoir des situations de pompage dont le volume par hectare serait compris entre 1500 et 11000 m³/ha avec une moyenne de 4100m³/ha. Sachant que 50% des agriculteurs ont un puit sur la prise P12aval on obtiendrait une valeur de pompage d'environ 2000 m³/ha. Pour cette valeur on s'aperçoit (Figure 41 ci dessus) que l'impact en terme de lessivage est très important puisque l'on atteindrait à l'équilibre une CE inférieure à 6dS/m (contre 15dS/m sans pompage). Concernant la décharge de la nappe on obtiendrait un rabattement d'environ 100mm. En terme de bilan annuel il est difficile d'estimer à l'échelle de la prise s'il y a recharge ou décharge de la nappe ni même quel serait l'impact en ce qui concerne l'évolution intra annuelle de la qualité des sols. Par contre on se rend compte de la sensibilité du pompage sur ces valeurs.

Du point de vue de la sodicité, les valeurs sont uniquement fonction du SAR de l'eau d'irrigation et du pourcentage de sable dont les variations entre été et hiver sont presque nulles. On notera tout de même que les valeurs obtenus sont très élevées (voir figure en annexe) et peu sensibles au pompage.

Le cas de la prise P20amont (annexes) est tout à fait similaire en hiver. Pour l'été l'impact du pompage est encore plus sensible puisque pour des valeurs de pompage inférieures à 750 m³/ha on atteint les limites de validité du modèle avec une fraction de lessivage nulle (voir figures en annexe).

▪ Scénario d'évolution pour P8 et P17:

Les 2 prises P8 et P17 correspondent à des prises dont la dotation est supérieure à la moyenne. P8 est située en amont du réseau avec une eau de nappe assez peu salée et assez sodique et P17 est située en aval du canal principal avec une nappe peu salée et peu sodique.

PRISE	CE de la nappe (dS/m)	SAR (meq/l)
P8	3	7,6
P17	2,5	1,8
Réseau	2,5	12,4

Tableau 22 : Salinité et sodicité de la nappe dans les zones de prises secondaires étudiées (P8 et P17). (Données réseau de suivi ORMVAT).

On s'aperçoit que pour la prise P17 la qualité générale de la nappe serait meilleure pour l'irrigation que celle du réseau car moins sodique et de salinité égale.

Les tendances d'évolution de la prise P8 sont les suivantes :

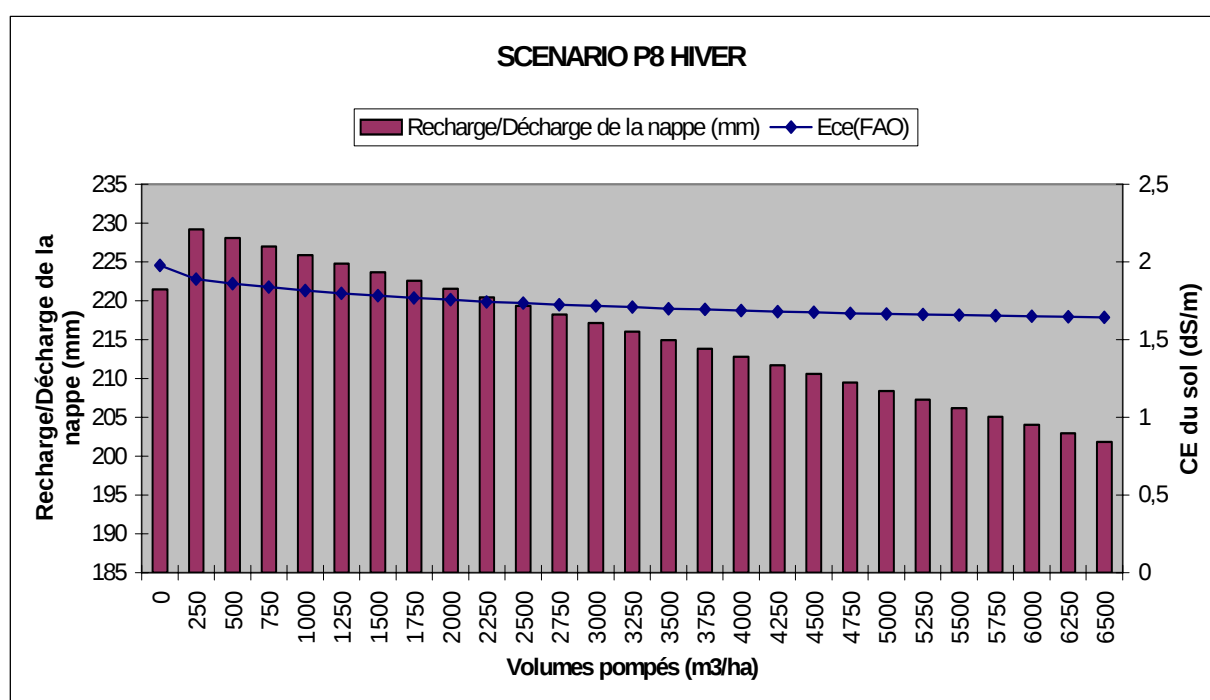


Figure 42: Scénario d'évolution de la nappe et de la salinité du sol à l'équilibre en fonction du pompage sur la prise P8 (Septembre 99 – Février 00).

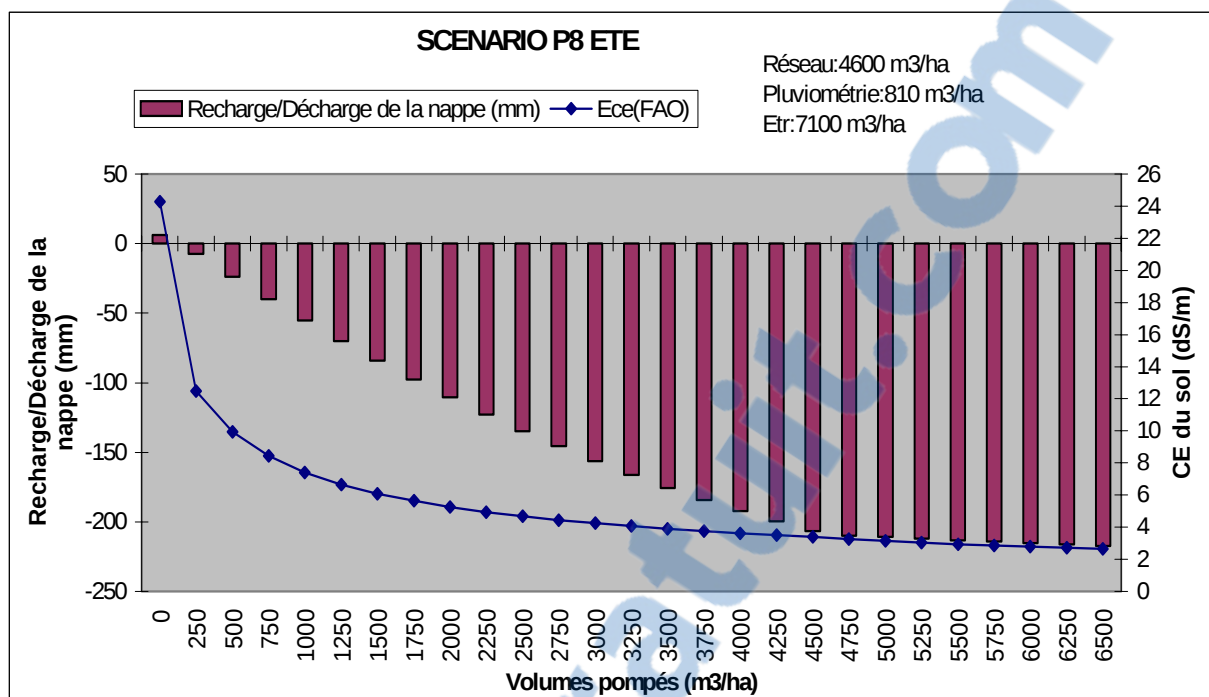


Figure 43: Scénario d'évolution de la nappe et de la salinité du sol à l'équilibre en fonction du pompage sur la prise P8 (Mars 00 – Août 00).

Si on reprend le même raisonnement que précédemment pour P8, sachant que le pompage est très peu présent sur cette zone (1 agriculteur sur 25 seulement possède un puit fonctionnel) on peut estimer que le pompage en été est en moyenne inférieur à 250 m³/ha sur l'ensemble de la prise, ce qui compte tenu des apports de surface et de l'évapotranspiration des cultures pratiquées entraînerait des problèmes de salinisation des sols assez importants puisque les valeurs à l'équilibre atteindraient plus de 12 dS/m (dans cette zone la nappe est de bien meilleure qualité qu'en aval). La décharge de la nappe serait alors minimale voir nulle. Pour l'hiver, la remarque faite pour P12aval est encore valable ici avec un fort lessivage (notons que les courbes d'évolution des fractions de lessivage en fonction des volumes pompés sont disponibles en annexe).

Pour P17 la situation est très similaire (annexes). Le pompage peut ici être estimé à l'échelle de la prise à 500 m³/ha donc une salinité du sol à l'équilibre de l'ordre de 6 dS/m. En hiver le lessivage est toujours très important. Enfin, en terme de SAR, on observe pas de variations par rapport aux autres prises.

→ Ce que l'on peut retenir de l'étude à l'échelle des prises secondaires c'est qu'en été la sensibilité du facteur volume pompé est très importante en terme de lessivage des sols, beaucoup plus que le degré de salinité du mélange (donc de la qualité de la nappe). Les résultats obtenus ne peuvent certes pas être représentatifs de ce qui se passe à l'échelle du tertiaire du fait qu'il y ait une très grande différence entre une exploitation équipée de stations de pompage et une exploitation dépendante uniquement du réseau. A l'échelle de la prise le pompage est considéré comme homogène. Cependant, il est tout de même important de s'intéresser aux différentes tendances entre les prises notamment entre les prises en amont du réseau et peu équipées de station de pompage (comme P8) et les prises comme P12aval ou P20amont qui sont très équipées. Une remarque importante est qu'en terme de salinisation des sols l'absence de pompage en été peut-être catastrophique pour les prises à l'aval du réseau du fait de leur plus faible dotation en eau du réseau. Cette zone étant fortement sujette à l'utilisation de la ressource souterraine (densité de puits importante) on s'aperçoit du problème de baisse de la nappe que cela peut entraîner. En amont du réseau au contraire (P8), le lessivage important en hiver et la faible intensité du pompage (peu de puits) assure une recharge positive de la nappe mais pas excessive.

5.1.2.2 Etude à l'échelle des tertiaires :

■ Exemple de P20amontTG3B :

Le tertiaire P20amTG3B est un tertiaire sur lequel tous les agriculteurs possèdent un puit. L'assolement (annexe) pratiqué est un assolement représentatif de la moyenne (40% de céréales, 35% de luzerne, 15% de betterave, 3% de bersim et 7% en jachère). On retrouve ce type d'assolement pour beaucoup de tertiaires équipés ou non de stations de pompage. D'après l'ORMVAT on ne retrouve pas beaucoup de différences entre les exploitants possédant un puit et ceux qui n'ont pas accès à une ressource souterraine (ceci semble confirmé d'après les exemples d'agriculteurs suivis au cours d'enquêtes réalisées par Bacot (2001). Ainsi il sera intéressant de comparer l'impact du pompage sur ce tertiaire par rapport à un autre tertiaire qui pratiquerait le même type d'assolement, sans pompage.

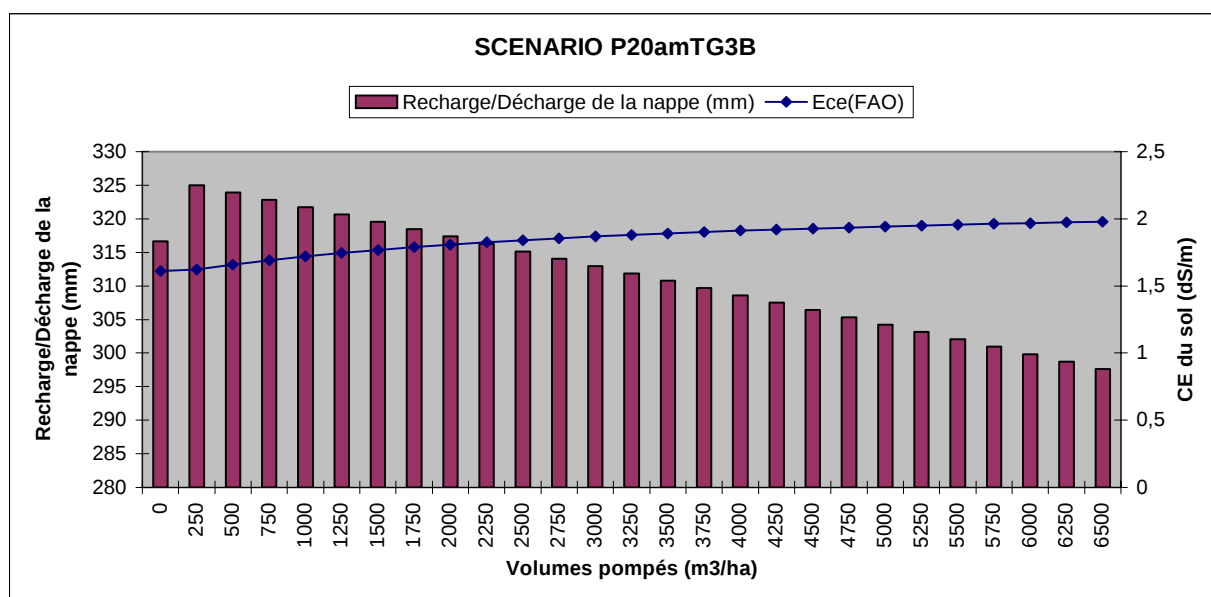


Figure 44: Scénario d'évolution de la nappe et de la salinité du sol en fonction du pompage. P20TG3B (Septembre 99 - Février 00)

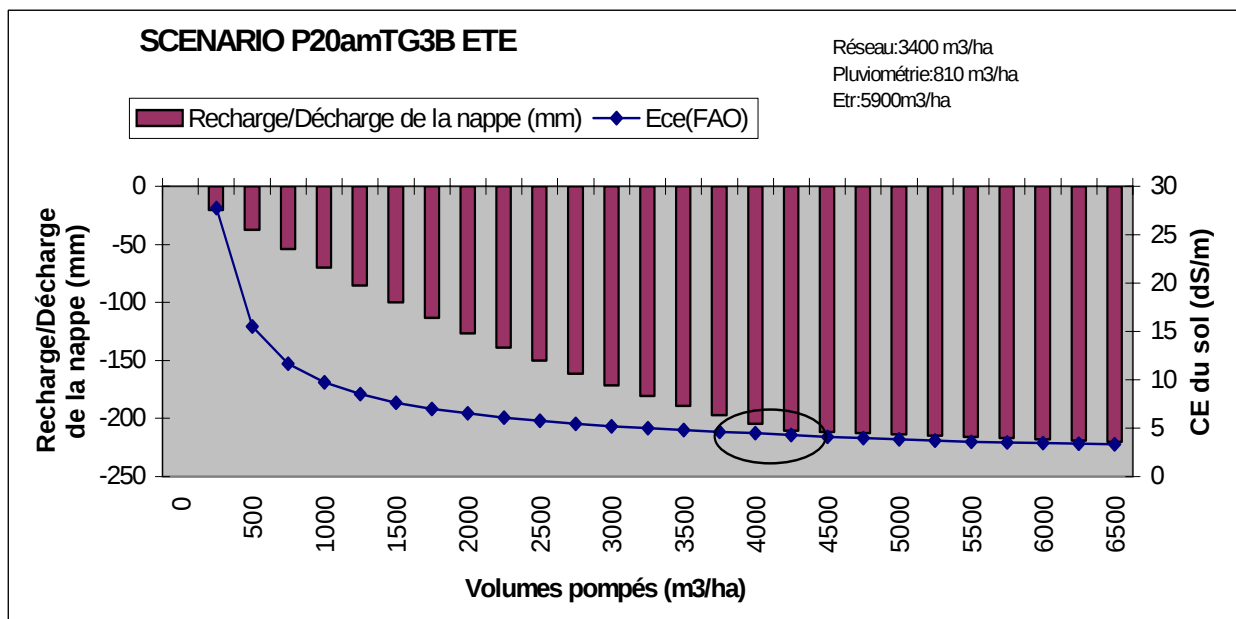


Figure 45: Scénario d'évolution de la nappe et de la salinité du sol en fonction du pompage. P20TG3B (Mars 00 – Août 00)

Ainsi, nous pouvons remarquer que sans pompage, le faible volume apporté par rapport aux besoins des cultures entraînerait un lessivage très faible et donc une accumulation importante des sels dans le sol. En cas de recours intensif au pompage (les estimations résultantes d'enquêtes sur ce tertiaire faisaient état d'une consommation de 4100 m³/ha pendant la saison sèche) et même s'il n'est pas possible par cette approche de bilan de connaître la vitesse à laquelle le système atteindrait un équilibre, on peut tout de même constater que malgré la mauvaise qualité de l'eau de pompage (5 à 6 dS/m en moyenne) l'importance des volumes pompés entraînerait un lessivage permettant d'atteindre à l'équilibre une réduction importante de la conductivité électrique du sol (CE du sol à l'équilibre inférieure à 5dS/m). En terme de décharge de la nappe, d'après la Figure 44, les apports excessifs pendant constituent un volume de drainage profond supérieur à 310 mm. En été (Figure 45) le pompage intensif estimé à 4200m³/ha pendant cette saison entraînerait une décharge de la nappe supérieure à 200 mm. Ainsi, sur l'année, on peut penser que la recharge de la nappe est positive d'environ 100mm sur ce tertiaire.

Il est également intéressant à cette échelle de constater l'impact de la qualité de l'eau d'irrigation en comparant les fractions de lessivage obtenues aux fractions de lessivage nécessaires (LR) pour garantir un rendement potentiel de 100% (donnés FAO, Irrigation and drainage paper, 1985):

$$LR = \frac{ECw}{5(ECt) - ECw}$$

Avec :

LR : Fraction de lessivage nécessaire pour maintenir les sols à une valeur de conductivité électrique inférieure au niveau de tolérance de la culture Ece, par des techniques d'irrigation de surface classiques.

ECw : Conductivité électrique de l'eau d'irrigation (dS/m).

ECt : Valeur de la salinité du sol tolérée par la culture pour garantir un rendement potentiel fixé (100% dans notre cas).

Les valeurs de Ece pour différentes cultures sont disponibles en annexes.

Ainsi, les comparaisons des fractions de lessivage obtenues avec les fractions de lessivage nécessaires (LR) pour garantir un rendement potentiel de 100% ont été réalisées pour les principales cultures pratiquées dans la région du Tadla, à savoir le blé et la luzerne, ainsi que pour le maraîchage (voir Figure 46).

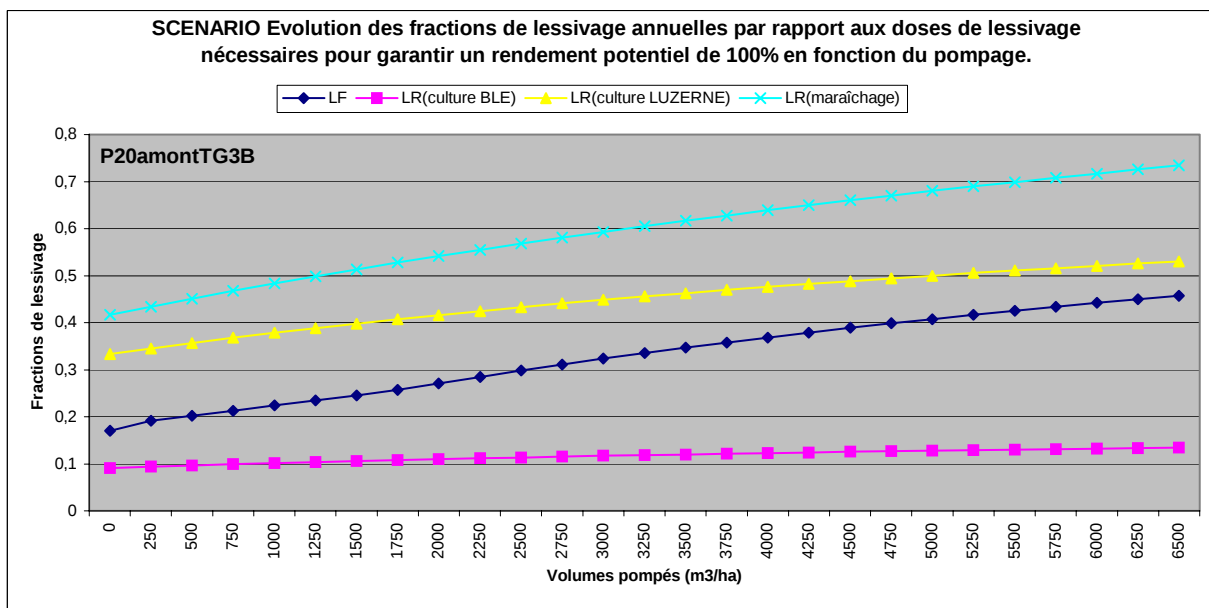


Figure 46: Evolution de la fraction de lessivage par rapport aux fractions nécessaires pour garantir un rendement potentiel de 100% en fonction du pompage. Cas actuel (salinité de la nappe: 5 dS/m).

Ainsi, même si on a vu que le pompage contribuait de manière importante au lessivage des sols et à la réduction de la teneur en sel des sols, on s'aperçoit que pour la situation actuelle (nappe à 5 dS/m) les cultures de la luzerne et du maraîchage subissent des baisses de rendement du fait de la salinisation. Si la nappe était de meilleure qualité la situation serait la suivante :

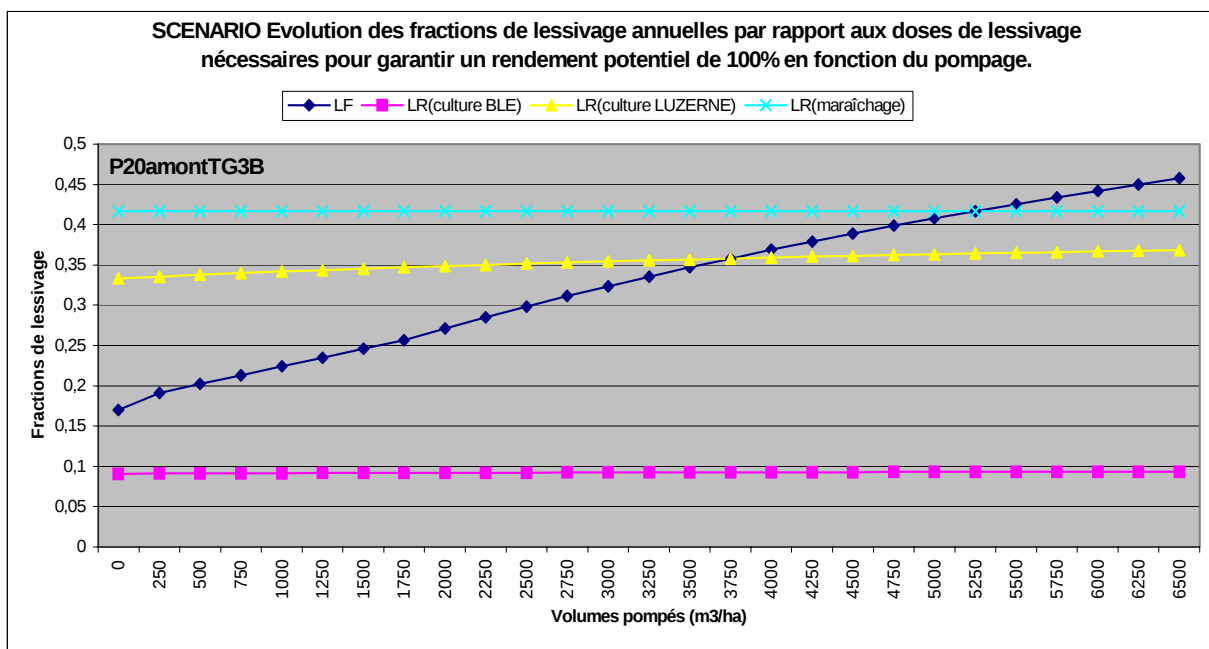


Figure 47: Scénario d'évolution des fractions de lessivage annuelles par rapport aux doses de lessivage nécessaires pour garantir un rendement potentiel de 100% en fonction du pompage (salinité de la nappe : 2,5 dS/m)

On constate ici que pour des volumes pompés de l'ordre de 4200 m³/ha sur l'année (ce qui correspond à l'ordre de grandeur estimé sur ce tertiaire) le lessivage serait suffisant pour garantir un rendement potentiel de 100% pour la luzerne (culture extrêmement pratiquée au Tadla pour le fourrage d'élevage). Il a été confirmé au cours d'entretiens avec les agriculteurs que la qualité décroissante de la nappe sur les 10 dernières années a joué un rôle important sur l'abandon de certaines cultures, en particulier le maraîchage.

Synthèse sur l'utilisation d'Integis dans le cadre du périmètre de Beni-Amir :

Le cadre d'étude du périmètre du Tadla ne permettait pas d'utiliser l'intégralité du modèle Integis car les modules hydrauliques et socio-économiques étaient adaptés aux conditions du Pakistan et n'étaient pas immédiatement transposables au cas de Beni-Amir. Nous avons cependant utilisé le module environnement qui, à partir de bilans, permet d'évaluer la recharge de la nappe et l'évolution de la qualité des sols à l'équilibre. Ainsi, les résultats obtenus permettent de remarquer que la sensibilité du pompage vis à vis de la décharge de la nappe mais aussi en terme de contribution au lessivage des sols est importante :

- Ainsi même si la qualité de la nappe en terme de salinité est globalement moins bonne que celle du réseau et contribue ainsi à dégrader la qualité de l'eau d'irrigation lors des opérations de mélange, le lessivage engendré par des apports supplémentaires permettrait de limiter la salinisation des sols par rapport à une utilisation exclusive du réseau et dans des proportions inférieures. Cependant, ce lessivage ne semble pas nécessaire dans les zones de mauvaise qualité de la nappe (5 à 6 dS/m) pour garantir un rendement de 100% pour la pratique de certaines cultures sensibles comme la luzerne et particulièrement le maraîchage qui a d'ailleurs été pratiquement abandonné dans ces zones.

- En terme de recharge de la nappe, nous pouvons remarquer que dans certaines zones d'étude comme P8, la faible intensité du pompage couplée à une moyenne des apports annuels en eau du réseau relativement importante (environ 8500m³/ha) fait que cette zone contribue à la recharge de la nappe, notamment pendant la période hivernale. A l'inverse sur P12aval, le pompage, plus intensif en été, entraînerait une baisse de la nappe sur l'année (estimée à environ 100mm).

5.2 Intérêt et conception d'un modèle intégré dans le cadre du périmètre de Beni-Amir.

5.2.1 Evaluation de l'intérêt d'un modèle intégré.

Il ressort de l'étude de l'analyse de la gestion des eaux de surface et des eaux souterraines que différents champs disciplinaires, physiques, biophysiques et socio-économiques sont impliqués de manière combinée dans le fonctionnement et l'évolution du périmètre irrigué. La modélisation intégrée aurait comme conception de combiner ces approches physique (fonctionnement du réseau hydraulique), biophysique (dynamique de l'évolution des sols sous irrigation) et socio-économique (processus de décision des agriculteurs en terme de gestion de l'eau et de pratique culturale) en formalisant des liaisons spatiales et temporelles, afin de comprendre le fonctionnement du périmètre irrigué. Or ce type de conception de la modélisation ne consiste pas simplement en la connexion de différents modèles disciplinaires. Il s'agit plutôt de créer de nouveaux outils à partir des différentes connaissances thématiques, en réfléchissant à la méthodologie de leur utilisation future. Le but étant de formaliser les différents systèmes de manière à prévoir la dynamique globale du système.

Dans le cadre du Tadla, différentes problématiques environnementales se posent a priori:

- Problème de pénurie en eau de surface.
- Problème de contrôle de la nappe (piézométrie et qualité).
- Problème de salinisation et sodisation des sols.
- Evolution des assolements.

A ces problématiques s'ajoutent des questions plus politiques :

- Une redevance sur le pompage a récemment été décidée par l'agence de bassin mais n'est pas appliquée. En cas d'application il y aura probablement des conséquences sur la pratique du pompage et l'évolution des assolements.
- Si l'agriculteur est libre de ses choix en matière d'assolement et s'il trouve aujourd'hui que la betterave à sucre n'est plus rentable, il n'en reste pas moins que la volonté politique du pays est l'indépendance total en production sucrière. Or lors de la campagne 00-01, des dotations supplémentaires ont été exceptionnellement allouées pour la betterave. Il peut donc y avoir à terme une modification des règles de gestion et de distribution actuellement en vigueur.

Ainsi, il apparaît que l'eau est l'élément central de ces problématiques et que de nombreux acteurs sont impliqués dans la gestion de cette ressource. Un des premiers intérêts d'un modèle intégré serait donc de servir d'outil de discussion et de négociation en évaluant de manière quantitative l'impact d'un scénario concernant tous ces acteurs (une nouvelle règle de gestion ou une dynamique climatique particulière) sur le fonctionnement du périmètre (assolements, évolution des sols, dynamique de la nappe...). En effet, nous avons vu qu'il existe des différences d'accès à l'eau souterraine et des différences de consommation de la ressource tant souterraine que superficielle. Face à une multitude de variables (disponibilité au niveau du barrage, assolements libres, qualité de la nappe, disponibilité d'une ressource souterraine ou de surface, barèmes variables...) et du fait que chaque acteur du réseau a une influence différente sur ces variables, l'exploration de multiples scénarios d'évolution du périmètre se prête parfaitement à une modélisation intégrée. D'une manière générale, cet outil peut s'avérer intéressant s'il est à même de permettre d'anticiper la dynamique d'évolution des systèmes mis en jeu afin de prévoir et contrôler les conséquences d'une solution palliative.

5.2.2 Vers la conception d'un modèle intégré.

Si la modélisation intégrée doit permettre de servir la démarche d'une gestion intégrée, elle repose pour cela sur un travail d'analyse intégrée. De l'analyse à la modélisation, une démarche adoptée par Kuper (1997) et Strosser (1997) est la suivante (Tableau 23):

1. Définir les sous-systèmes en interaction.
2. Définir les relations d'échelle temps / espace.
3. Choix de construction de chaque sous système.
4. Tester la stabilité numérique de la somme des constructions.
5. Calage, validation, robustesse.

Tableau 23 : Structure de la démarche entre analyse et modélisation selon Kuper et Strosser (1997).

Nous pouvons ici avancer une proposition de réponse aux deux premiers points de la démarche ci-dessus, à savoir :

- Définir les sous-systèmes en interaction.
- Définir les relations d'échelle temps / espace.

5.2.2.1 Définition des sous-systèmes en interaction et relations temps/espace.

■ Le diagramme de classes :

Cette définition est faite par une description schématique selon la formalisation propre au langage objet (*diagramme de classe*) des différentes classes (d'objets) qui interagissent pour caractériser le fonctionnement du périmètre. Ces classes sont définies par des attributs (fixes ou variables) et des méthodes (fonction ou programme interne à une classe ou qui peut constituer un lien entre différentes classes). La méthodologie adoptée pour définir ce diagramme de classes a été la suivante :

- Elaborer le diagramme de classes du modèle Integis de manière à servir d'exemple de formalisation d'un modèle.
- Analyser les processus mis en jeu dans la gestion conjuguée de la ressource de surface et souterraine dans le cadre du périmètre irrigué de Beni-Amir.
- Elaborer un diagramme de classes adapté au cas de Beni-Amir sur la base de l'exemple d'Integis.

Le diagramme de classes du modèle Integis est représenté par la figure 38. Il est important de préciser que le modèle Integis n'a pas été programmé en langage orienté objet et qu'il n'est pas un modèle de simulation mais un outil de planification. En effet, il décrit uniquement l'impact d'une certaine disponibilité en eau associée à des règles de gestion sur les assolements et pompages pour une saison agricole. Les impacts environnementaux (taux de salinité et de sodicité) sont projetés selon une situation à l'équilibre. La formalisation de son diagramme de classes (Figure 48) nous permet de distinguer 2 classes associées :

- Une première classe appelée "maille hydraulique" qui décrit le fonctionnement hydraulique du réseau (répartition des volumes à partir de l'offre en tête de canal principal et des règles de gestion) et qui évalue les impacts environnementaux (salinité-sodicité-recharge de la nappe) résultants des processus décisionnels des agriculteurs de gestion conjuguée des eaux du réseau et souterraines ainsi que des assolements.
- Une deuxième classe appelée "maille économique" et qui évalue les processus socioéconomiques de décision des agriculteurs en terme d'assolement et de pompage en fonction de l'offre en eau du réseau.

Contrairement au modèle Integis, le modèle proposé pour le périmètre de Beni-Amir serait un modèle de simulation sur plusieurs années. En effet, au terme de restitutions et de discussions il apparaît (même si cela demande confirmation) que l'attente principale de l'ORMVAT est de connaître l'impact de la décision de l'agriculteur à la parcelle sur l'évolution à moyen ou long terme:

- Des assolements et de leurs rendements.
- De la dynamique de la qualité des sols.
- Du taux de pompage (localisation spatiale et temporelle).
- De la dynamique de la nappe.

Il s'agirait donc d'un modèle de compréhension.

Ainsi, le diagramme de classe adopté pour formaliser le fonctionnement du périmètre de Beni-Amir est représenté sur la Figure 49

On distingue 2 parties dans ce diagramme :

- Une partie que l'on pourrait qualifier d'agro-économique (en vert sur le diagramme).
- Une partie qui représenterait le fonctionnement hydraulique du réseau (en bleu sur le diagramme).

- Les sous systèmes en interaction:

Le bloc :

Comme il a été précisé au paragraphe 2.1.2.1, chaque exploitation (ensemble des terres appartenant à un même propriétaire est enregistrée sur un matricule. L'ORMVAT distingue au sein d'un même matricule des "parcelles" qui représentent des terres théoriquement indépendantes pour l'alimentation en eau du réseau. Ces parcelles sont alimentées en eau du réseau en sortie de canal tertiaire (un canal tertiaire alimente plusieurs "parcelles"). Nous préférons le terme de "bloc" pour désigner cette unité spatiale. Ces blocs supportent des cultures choisies par l'exploitant. Sur chacun de ces blocs est effectué un bilan hydrique et une évaluation de la salinité et sodicité des sols.

La culture :

Les cultures sont mises en place sur les blocs par la décision de l'exploitant.

L'exploitant :

L'exploitant est la classe centrale de la partie agro-économique. C'est en effet à partir de l'exploitant que se fait le choix des cultures mises en place sur les blocs ou le pompage dans la nappe. L'exploitant est en liaison avec la partie hydraulique par l'intermédiaire de l'aiguadier. Cette liaison correspond à la formulation de la demande en irrigation.

L'aiguadier :

L'aiguadier est la classe centrale de la partie hydraulique. C'est lui qui alloue les débits aux tertiaires en fonction des demandes des exploitants et des contraintes du chef de canal.

Le chef de canal :

Le chef de canal impose les règles de gestion tactique (à l'échelle du réseau) à l'aiguadier pour l'organisation du tour d'eau.

Les canaux d'irrigation :

Chacun des canaux est représenté afin de prendre en compte les contraintes hydrauliques du réseau pour la mise en place du tour d'eau. Les efficacités respectives des canaux participent également à l'alimentation de la nappe.

La nappe :

La nappe est considérée a priori comme une seule unité sur l'ensemble du périmètre de Beni-Amir. Elle est connectée à chaque bloc pour prendre en compte la recharge par l'irrigation et la pluviométrie, et la décharge par le pompage.

En résumé, les sous systèmes du diagramme de classes permettent de définir 2 parties :

- Une partie que l'on pourrait qualifier d'agro-économique qui correspond aux stratégies d'exploitation des blocs par les agriculteurs, le développement des cultures supportées par ces blocs et l'impact environnemental en terme de salinité-sodicité des sols.
- Une partie qui représenterait le fonctionnement hydraulique du réseau avec l'organisation du tour d'eau tant au niveau tactique (chef de canal) qu'au niveau opérationnel (aiguadier). La nappe est également incluse dans cette partie hydraulique mais elle relie à chaque bloc de la partie agro-économique.

Les 2 parties sont évidemment étroitement liées. Nous avons donc repris l'idée d'Integis en associant 2 parties hydraulique et agro-économique. Cependant, la diversité des classes et les liaisons entre chacune de ces parties doit permettre de simuler et prévoir une dynamique d'évolution du périmètre à plus long terme que ne le faisait Integis.

▪ Les relations d'échelle temps / espace :

Les relations d'espace :

C'est le bloc qui représente la structure élémentaire de la partie agro-économique. Il nous est en effet apparu essentiel de descendre à cette échelle d'espace pour caractériser les sous-systèmes en interaction, et ce pour les raisons suivantes :

- Nous avons vu dans l'analyse des consommations du réseau qu'il existe une grande hétérogénéité dans les consommations en eau du réseau lorsque l'on descend à l'échelle du tertiaire. Nous estimons que cette hétérogénéité existe encore à l'échelle des blocs (même si cela devra être vérifié) et que son impact en terme de lessivage des sols, assolements et rendements des cultures est suffisamment sensible pour considérer indépendamment chaque bloc.
- Nous avons vu également dans la partie 4.1.2 que le pompage jouait un rôle très sensible, d'une part au niveau hydrique en tant que complément d'irrigation, et d'autre part au niveau du lessivage des sols en permettant d'accroître la fraction de lessivage. Il existera ainsi une très grande différence en terme d'évolution de la qualité des sols et des rendements entre un bloc ayant accès à une ressource souterraine et un autre bloc uniquement alimenté par le réseau. De plus, nous avons vu qu'en terme de volumes pompés, les différences peuvent être significatives entre 2 agriculteurs (donc entre 2 blocs). Il est donc important, encore une fois de pouvoir considérer chaque bloc de manière indépendante. Chaque bloc est géoréférencé afin de pouvoir visualiser, par exemple, la répartition spatiale de la dynamique des sols, des assolements ou du taux de pompage.

Les relations de temps:

Les pas de temps des fonctions de ce modèle restent à définir mais nous pouvons néanmoins avancer quelques propositions dans ce sens :

- Le bilan hydrique du bloc doit être journalier car l'exploitant évalue quotidiennement la nécessité d'un recours au pompage pour l'irrigation des cultures en fonction de l'état hydrique du sol.
- L'alimentation des blocs par les canaux tertiaires se fait à un pas de temps variable. Ce pas de temps dépend de la demande des exploitants et des contraintes du chef de canal.
- La demande en irrigation par l'exploitant se fait en théorie à un pas de temps hebdomadaire.
- Le pas de temps pour l'évaluation de la salinité et la sodicité des sols reste à définir. Cependant, la dégradation des sols est un phénomène lent et progressif. Les simulations d'évaluation de la qualité des sols doivent donc porter sur une durée de plusieurs campagnes agricoles.
- De même en ce qui concerne la recharge ou la décharge de la nappe, il est nécessaire d'évaluer les fluctuations sur plusieurs années.

DIAGRAMME DE CLASSES INTEGIS

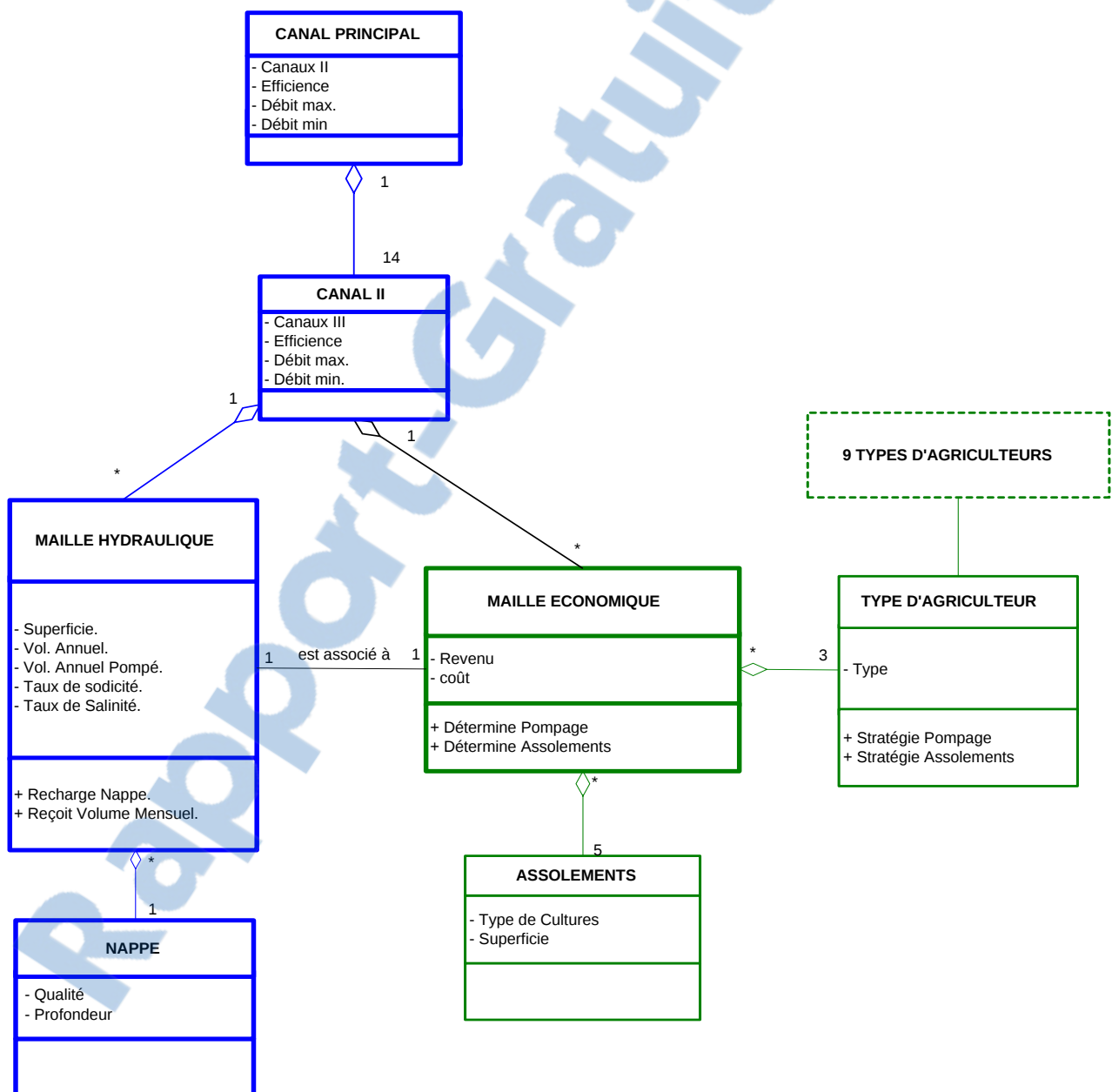


Figure 48 : Diagramme de classes du modèle INTEGIS en langage UML.

6 CONCLUSION

En conclusion, il semble important d'évoquer quelques suggestions sur les études futures à réaliser ainsi que quelques interrogations quant aux perspectives d'évolution du périmètre irrigué de Beni-Amir.

Depuis plusieurs années et encore aujourd'hui, une des interrogations sensibles de l'ORMVAT concerne le pompage dans la nappe par les agriculteurs. Les premières estimations (à base d'enquêtes) de notre étude en terme de volume pompé à l'échelle du périmètre semblent montrer que ces volumes mis en jeu représenteraient plus de 3000 m³/ha sur l'année, soit plus d'un tiers des dotations moyennes par le réseau. De plus, dans le contexte de rareté de la ressource de surface, ces apports importants semblent jouer un rôle très sensible, non seulement pour combler le déficit hydrique, mais également pour assurer un lessivage qui prévienne la salinisation des sols. Mais les enquêtes réalisées au cours de notre étude ainsi que les données acquises par l'ORMVAT ne constituent pas une source d'informations suffisante pour appréhender dans l'espace et dans le temps les impacts du pompage sur la recharge de la nappe, la satisfaction des besoins en eau des cultures ou le lessivage des sols. La mise en place d'un suivi d'enquêtes de terrain aiderait ainsi à compléter la base de données sur la gestion de cette ressource souterraine et à mieux comprendre sa dynamique. Toujours en ce qui concerne la ressource souterraine il semble important de poursuivre le suivi et l'exploitation des données piézométriques car l'analyse de l'évolution de la profondeur d'un certain nombre de puits sur plus de 25 années semble montrer que la tendance à la baisse de la piézométrie n'est pas généralisable à l'ensemble du périmètre. En ce qui concerne la gestion de l'eau de surface entre l'ORMVAT et les agriculteurs, l'impossibilité de stocker (barrage de dérivation) cette ressource et les fluctuations importantes du débit de l'oued Oum-Er-Rbia ne permettent pas de disposer d'un volume suffisant pendant la période sèche (mars à août pour la campagne 99-00) pour répondre aux besoins des assolements pratiqués. Ainsi, les gestionnaires ne disposent pas d'une très grande marge de manœuvre dans la distribution de l'eau de surface. Il n'y a en effet pas de possibilité de programmation stable dans la répartition des dotations. Un travail contraignant est réalisé pour ajuster en permanence le tour d'eau afin de répondre à un objectif de répartition égalitaire. Cependant, dans le contexte à venir de mise en place des barrages de stockage de Char-El-Oued et Ait Massaoud, qui devraient garantir un volume annuel régulé de 408Mm³ pour 35000ha (soit 30% de plus par hectare que pour la campagne 99-00), quels seront les nouveaux objectifs des gestionnaires en terme de distribution de l'eau (Egalité ou satisfaction de la demande)? Quelles seront également les stratégies adaptatives des agriculteurs en terme de pompage et leurs conséquences sur la dynamique de la nappe (remontée ?) et la dynamique d'évolution des sols ? Il est donc nécessaire d'encourager les relations entre agriculteurs et gestionnaires afin de confronter les points de vue et objectifs concernant l'utilisation de l'eau souterraine et l'eau de nappe. L'élaboration d'un modèle intégré de simulation de scénarios d'évolution du périmètre irrigué pourrait permettre d'aller en ce sens en servant d'outil de discussion et de négociation sur des stratégies de gestion conjuguée des différentes ressources en eau en évaluant de manière quantitative l'impact de scénarios concernant tous les acteurs (une nouvelle règle de distribution par exemple) sur le fonctionnement du périmètre (impacts sur la nappe, les assolements. ...).

BIBLIOGRAPHIE

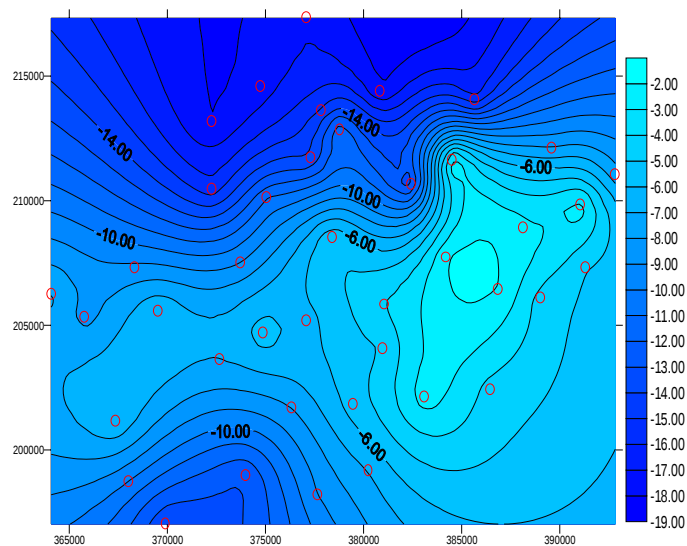
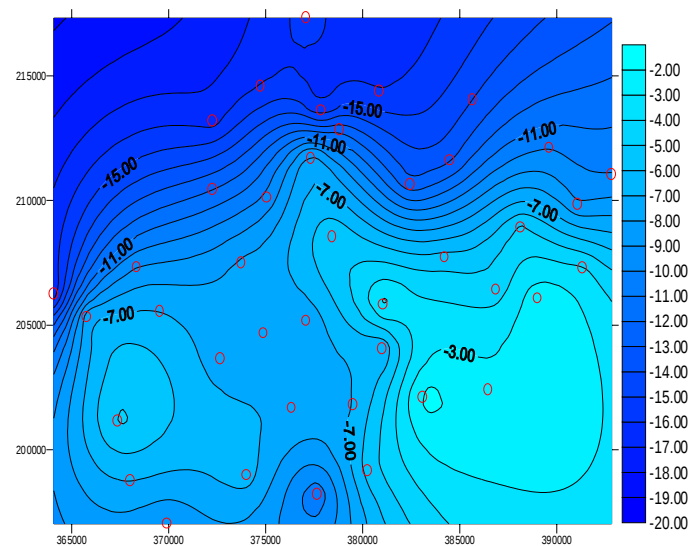
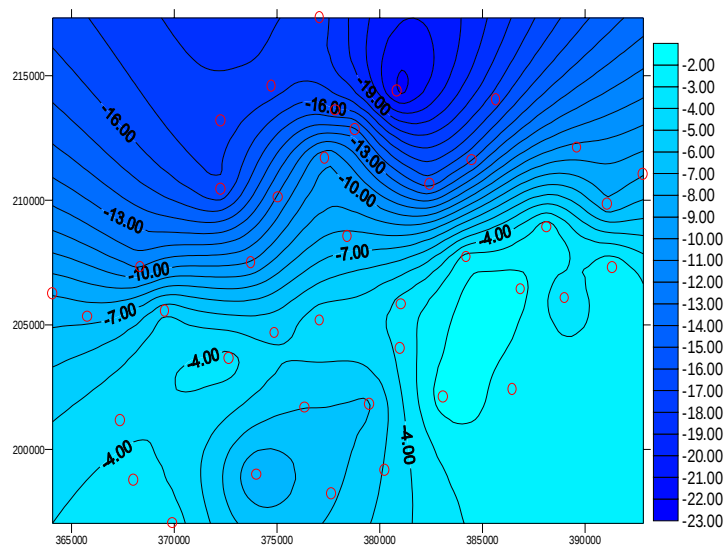
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M, 1998, Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage paper Rome.
- Belhacène et Chayat. 1992., Evolution des problèmes d'engorgement des sol. de drainage et de la qualité des eaux et des sols dans le périmètre du Tadla. Qualité des eaux et des sols dans le périmètre du Tadla. Mémoire de 3^{ème} cycle en agronomie. Option : génie rural (IAVHII), 152 p.
- Belouze P. 1996. Un Modèle Intégré d'un Système Irrigué par la prise en compte de phénomènes hydrauliques, économiques et hydro-pédologiques. Rapport de DEA (SEEC).
- Belabbès K, 2000, Coefficients culturaux Kc des principales cultures méditerranéennes, IAVHII.
- Burt C, Styles S, 1999, Modern water control and management practices in irrigation, Impact on performance, FAO Rome.
- Doorenbos J, Pruitt WO, 1977 Crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper, 24.
- Fang ZX, 1989. Programmation dynamique : application à la gestion d'une retenue pour l'irrigation. Journal Hydrological Sciences (415-424).
- FAO. 1985. La qualité de l'eau en agriculture. Irrigation and drainage paper, 29 rev.1.173p
- Garin P., Kuper M., Labbé F., Strosser P. 1998. Evaluation of the integrated approach developed in the context of the IIMI-Cemagref collaboration in Pakistan, Lessons from a series of workshops and seminars for researchers, policy makers and irrigation system managers.
- Ghassemi F., Jakeman A.J., Nix H.A. Salinisation of land and water resources. CAB International, 1995. 526p.
- Heggeler Nico. 2001. The relative water supply as performance indicator for water delivery, Master of Science Thesis Wageningen University. 90p.
- IIMI, 1994. How do water users perceive the quality of their irrigation services. Report on a training course in the use of participatory rural appraisal for irrigation management research,.
- IIMI Pakistan National Program. 1997. Analysing large scale irrigation systems through an integrated approach. A summary of collaborative research activities, IIMI Pakistan National Program, Lahore, Decembre.
- Jebbour S. 1995. Utilisation conjuguée des eaux de surface et des eaux souterraines dans le périmètre du Tadla : aspect quantitatif et qualitatif – Mémoire de troisième cycle en agronomie, option génie rural : IAVHII, 152p.
- Job, 1998. Traité d'irrigation, Lavoisier Tec et Doc, Coordinateur Tiercelin, 993 p.
- Kuper M. 1997. Irrigation management strategies for improved salinity and sodicity control. Thesis Wageningen University 238p.
- Kuper M., Labbé F., Strosser P., 1998. Implementing an integrated approach to assess the impact of interventions on irrigation system performance, Proceedings, IIMI Lahore.
- Lamacq S. 1997. Coordination entre offre et demande en eau sur un périmètre irrigué : des scénarios, des systèmes et des hommes. . . , Thèse Engref, 137p.
- Legoupil J.C., Dancette C., Godon P., Maïga IM., Ndiaye KM. Pour un Développement Durable de l'Agriculture Irriguée dans la Zone Soudano-Sahélienne. Synthèse des Résultats du Pôle Régional de Recherche sur les Systèmes irrigués (PSI/CORAF). Edition Wecard-Coraf, Juin 2000, 456p.
- Malaterre, 1998. Traité d'irrigation, Lavoisier Tec et Doc, Coordinateur Tiercelin, 993 p.
- Molden and Gates, 1992, Performance measures for evaluation of irrigation-water delivery systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Volume 116.

ANNEXE 1
Calendrier cultural pratiqué dans la plaine du Tadla.

ANNEXE 2(a)
Exemplaire de MV1

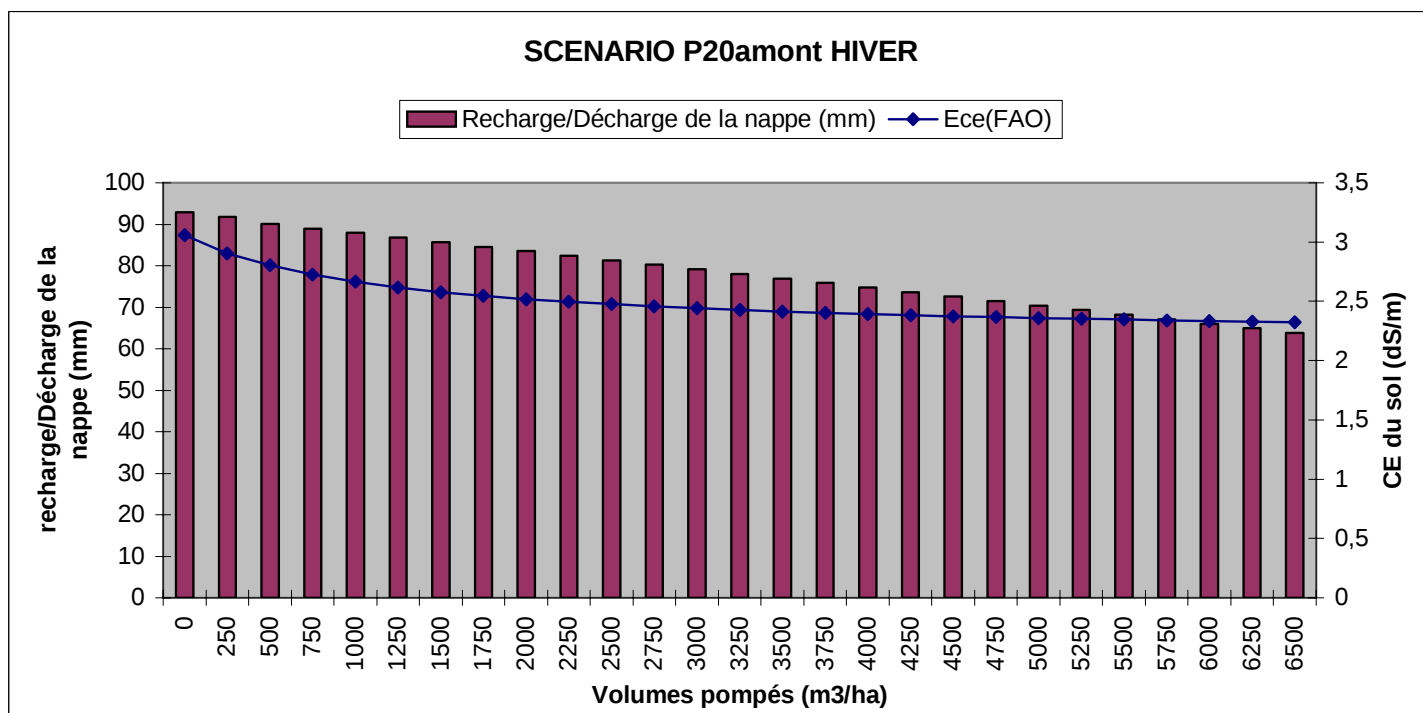
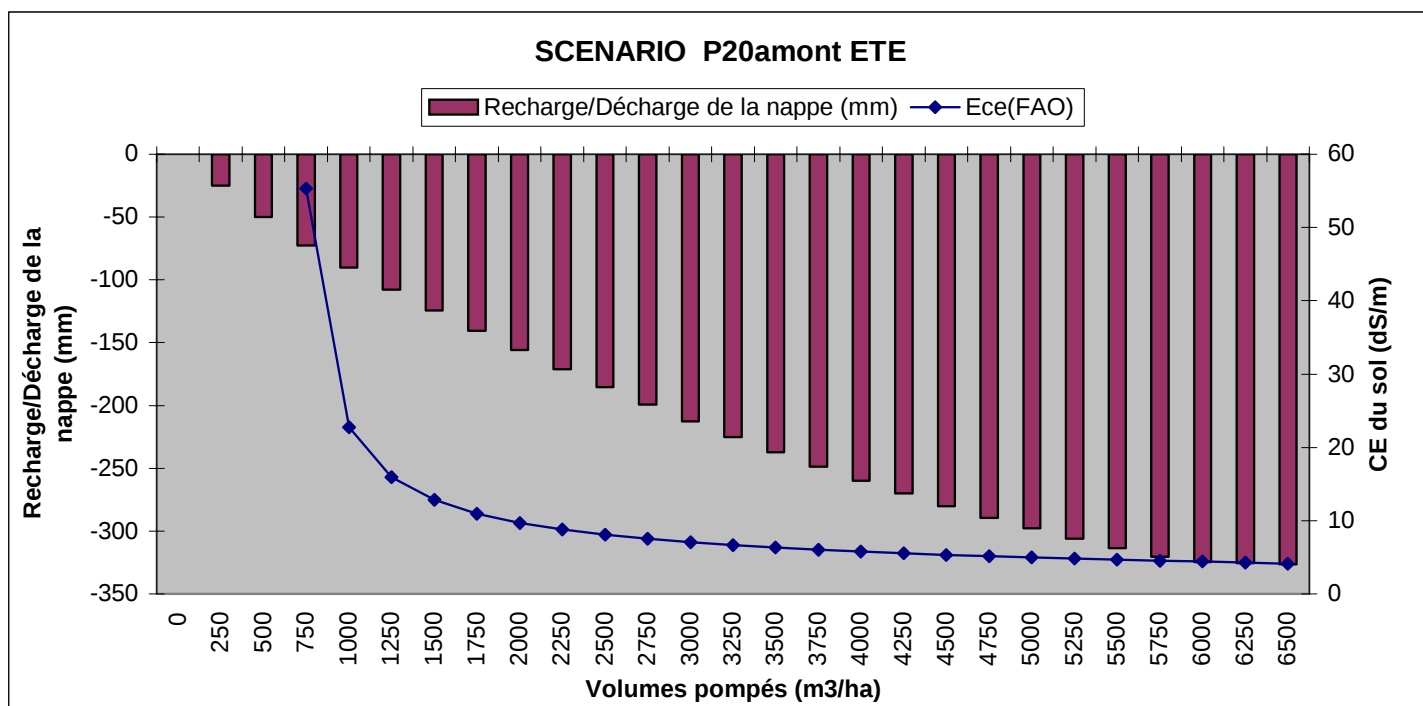
ANNEXE 2 (b)
Exemplaire de MV2

ANNEXE 3
Coefficients cultureux utilisés pour les
calculs d'évapotranspiration



ANNEXE 4

Cartes de répartition spatiale de la piézométrie (96-98 et 00). (Données réseau de suivi ORMVAT)



ANNEXE 6 :

Scénario d'évolution de la nappe et de la salinité du sol à l'équilibre en fonction du pompage sur la prise P20amont (Septembre 99 – Février 00 et Mars 00 – Août 00).

Assolements pratiqués sur le tertiaire P20amTG3B (campagne 99-00) :

P20amTG3B	Superficie (ha)
Céréales (blé)	11,6
Betterave	5
Luzerne	10,5
Bersim	1
total cultures	28,1
Sup. normale	30

Résultats d'enquêtes sur le tertiaire P20amTG3B (période du 01/05 au 15/05) :

AGRICULTEUR	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5
SUPERFICIE (ha)	2,6	7	2,45	2,98	1
CULTURES	luzerne	luzerne-blé-légumes	blé-luzerne-légumes	blé-luzerne	blé
DOTATION (Heures)	9	23	8	9	3
PRATIQUE D'IRRIGATION	Mélange+pompage seul	Mélange	Mélange+pompage seul	Mélange+pompage seul	Réseau+pompage
CONSOMMATION DU RESEAU (m3)	972	2484	864	972	324
CONSO.RESEAU/HA (m3/ha)	374	355	353	326	324
CONSOMMATION DU PUIT (m3)	1890	828	684	1026	918
CONSO PUIT/HA (m3/ha)	727	118	279	344	918
VOLUME TOTAL (m3)	2862	3312	1548	1998	1242
SUPERFICIE IRRIGUEE (ha)	2,6	3	1,1	1,25	1
VOLUME TOTAL DIRRI/HA IRRIGUE (m3/ha)	1101	1104	1407	1598	1242
CONSO RESEAU PAR HA IRRIGUE (m3/ha)	374	828	785	778	324
ROBTA (h/ha)	10,2	10,2	13,0	14,8	11,4
VOLUME PUIT / VOLUME RESEAU	1,9	0,3	0,8	1,1	2,8

ANNEXE 7 :

Assolements et Résultats d'enquêtes sur le tertiaire P20amTG3B.