

Estimation et spatialisation des réserves hydriques du sol, application au bassin versant de l'oued Zanfour, Tunisie

Jean Collinet (*), Patrick Zante (*)

(*) IRD, UMR LISAH 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex

Résumé

Le barrage de Zanfour (Tunisie centrale) collecte les eaux d'un bassin de 43,4 km². La moitié des terres supporte une céréaliculture et un élevage extensif, l'autre moitié, est couverte de forêts claires et de garrigues.

En zone semi-aride, la disponibilité en eau est le facteur primordial pour définir les potentialités des terres. Cette disponibilité est généralement évaluée à partir de critères climatiques prenant en compte la pluie et l'évaporation, le stockage hydrique des sols étant fixé, une fois pour toute, quelle que soit la nature des sols.

Nous proposons une évaluation et une cartographie des réserves hydriques utilisables prenant en compte les caractéristiques des différents types de sols d'un bassin versant déjà étudié à d'autres fins. Cette approche nécessite la connaissance des limites de rétention de l'eau dans le sol, celles-ci sont soit mesurées par expérimentation soit calculées en utilisant les différentes informations statistiques sur les transferts hydriques des sols. Nous avons retenu cette seconde possibilité en calculant des teneurs en eau pour les différents états de rétention hydrique à partir d'analyses multivariées prenant en compte la texture, le taux de matière organique et la densité apparente des sols selon une méthode déjà mise en œuvre par l'INRA en France.

Dans un premier temps, on a déterminé les limites d'humidité au point de flétrissement et à la capacité au champ. Les réserves utiles de chaque unité de sols ont ensuite été calculées et cartographiées à l'aide d'un système d'information géographique prenant en compte les caractéristiques physiques de chaque unité de sol.

Dans un second temps, ces données ont été incorporées dans un modèle simplifié de bilan hydrique pour obtenir: (a) les périodes déficitaires et excédentaires pour différentes classes de réserves utiles, (b) les réserves utiles à l'échelle du bassin et la pluviométrie permettant leurs remplissages, (c) une prévision des doses d'irrigation.

Mots clés

Réserves hydriques utiles, bilans hydriques, bassin versant, cartographie, système d'information géographique.

1 Introduction

Les réserves hydriques utiles pour le développement des végétaux cultivés sont souvent estimées sur des sols dont on suppose l'homogénéité des caractéristiques physiques sur une épaisseur constante. Pour simplifier leurs modèles, une partie des agro-climatologues a retenu une réserve hydrique de 100mm comme représentative de ce que peuvent contenir et céder aux plantes la plupart des sols (Penmann 1948, Thorthwaite et Mather 1957, Turc 1961). Par la suite, l'évaluation des réserves hydriques utilisables fut approchée par un coefficient d'utilisation de ces réserves par la plante, ce coefficient prend en compte le stade de développement de la plante donc celui concomitant de son système racinaire donc, de l'épaisseur de sol prospecté (Hallaire et Bouchet 1965, Riou 1967). Cette prise en compte de l'épaisseur accessible aux racines ne donne cependant aucune information sur les caractéristiques physiques des matériaux susceptibles de contrôler l'accessibilité et le volume des réserves utiles aux plantes, ni sur les possibilités de remontées capillaires offertes par des volumes plus importants que ceux délimités par le seul profil racinaire.

Il manque enfin une spatialisation des informations précédentes pour dépasser celles du champ et pouvoir accéder aux réserves hydriques de plus grandes superficies telles que celles de bassins versants.

Nous avons extrait de la carte pédologique du bassin de Zanfour (Collinet, Zante, Ghesmi, 2001) toutes les données utiles à cette représentation spatialisée des caractéristiques hydriques d'un bassin. Comme nous disposons de données précises sur la pluviométrie et l'évaporation (Vacher 2000), l'analyse a pu dépasser cette simple représentation spatiale des réserves en approchant le bilan hydrique du bassin faisant apparaître les périodes déficitaires et permettant de préconiser des exemples de doses d'irrigation pour les cultures les plus pratiquées dans la région.

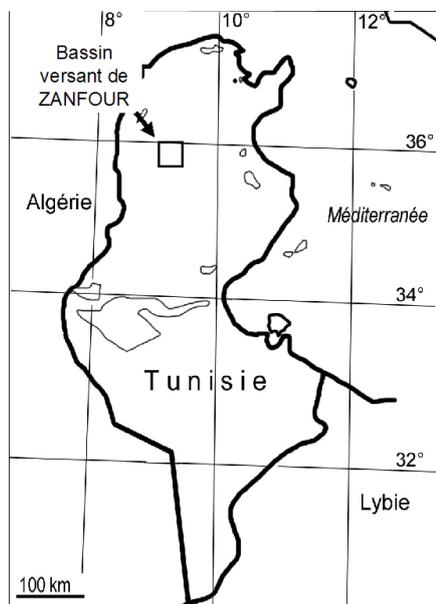
Le site de Zanfour, situé dans le « Haut Tell » tunisien, intéresse le Commissariat Régional pour le Développement Agricole (CRDA) du Kef en raison de la forte demande en eau et des aménagements spontanés qu'a suscité la création du lac collinaire. Ce travail entre dans le cadre d'une opération de recherches en développement « Développement durable autour des retenues collinaires et suivi de l'érosion » menée dans le « Programme de développement intégré du nord et du nord-est du Kef (PDAINNEK) à l'origine d'une convention entre le CRDA du Kef, l'Ecole Supérieure d'Agriculture du Kef (ESAK) et l'Institut français de Recherche pour le Développement (IRD).

Cet article s'inspire du rapport remis aux signataires en décembre 2002.

2 Matériel et méthodes

2.1 Caractéristiques du site

Le bassin versant est en limite des gouvernorats de Siliana et du Kef. Le barrage est situé sur le gouvernorat du Kef. Les coordonnées de la digue sont les suivantes : 35° 57' 51.6'' N, 09° 00' 14.9'' E.

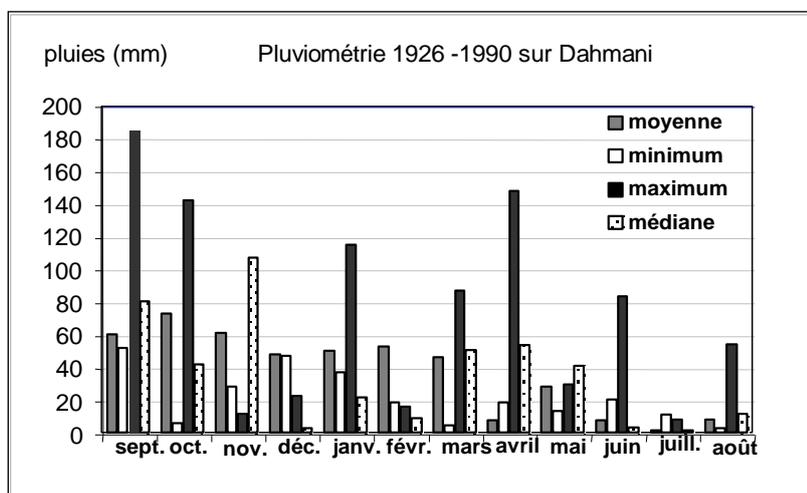


La construction du barrage date de décembre 1996, le volume initial du lac à la cote de déversement est de 710000m³ ce qui correspond à une superficie de 24 ha, le bassin versant faisant, quant à lui, 4316 ha. Un limnigraphe permet l'enregistrement des variations du niveau du lac. La pluie est enregistrée par deux pluviographes et un pluviomètre. L'évaporation journalière est relevée au bac Colorado.

La zone étudiée se situe sous une pluviométrie de 400 à 500mm. Elle appartient au bioclimat semi-aride inférieur avec une amplitude thermique annuelle forte de 32 à 33°C., une saison sèche de 7 mois, 80 jours de pluies entre septembre et mai et une humidité atmosphérique moyenne annuelle de 65%.

L'équipement du bassin versant de Zanfour est trop récent pour pouvoir disposer d'une longue série de données pluviométriques, aussi utiliserons-nous les informations du poste de Dahmani (anciennement Ebba Ksour) situé à 15km du bassin de Zanfour

Figure 1 : Localisation du bassin versant de Zanfour



La pluviométrie médiane d'Ebba Ksour est de 431mm, Le minimum de 1945 (267mm) correspond à une occurrence cinquantennale sèche, l'année très humide de 1972 (909mm) dépasse l'année centennale humide qui n'est que 850mm.

Figure 2 : La pluviométrie à Ebba Ksour (1926-1990)

Géologiquement, le bassin s'inscrit dans un anticlinal creusé en son axe par l'oued Zanfour. Les roches les plus âgées (-80.10⁶ années) sont des marnes campaniennes qui occupent le centre du bassin. Les formations de plus en plus récentes jusqu'à l'éocène (-56.10⁶ années) affleurent latéralement et en amont du bassin où l'on découvre la puissante corniche calcaire du Maestrichtien. Au Quaternaire, l'érosion de toutes ces séries aboutit à la formation d'un vaste glacis dont on retrouve quelques surfaces généralement avec des croûtes carbonatées plus ou moins épaisses, consolidées ou friables (torba).

Cette histoire géologique et morphologique a marqué les paysages :

- l'amont du bassin est montagneux, il culmine à plus de 1100m au Djebel ben Hassen, vient ensuite un replat vers +1000m traversé par des gorges où s'encaisse l'oued Zanfouar à écoulement semi-permanent ; là, des terrasses alluviales dominent le lit de plus de 6m.

- le milieu du bassin, sur Santonien puis Campanien devient marneux, le relief s'atténue et la vallée s'élargit, limitée latéralement par des corniches calcaires du Maestrichtien. Les versants d'abord concavo-rectilignes sur d'épaisses colluvions, s'entaillent de profonds ravins dès qu'affleurent les marnes santoniennes.

- en aval, le lac ferme le bassin vers +600m, les collines le ceinturant culminant à 720m, les bad-lands sur marnes de l'amont passent à des versants rectilignes encroûtés qui caractérisent les sols sur l'Eocène calcaire.

Un tiers du bassin est occupé par la forêt en rive droite amont. Cette forêt a reculé pour laisser la place à des terres de parcours ou des cultures en rive gauche amont et sur toute la partie aval.

2.2 Calcul des réserves hydriques utiles

2.2.1 Teneurs en eau aux potentiels délimitant les réserves utiles

En l'absence d'informations expérimentales sur les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement, on a utilisé les formulations les plus récentes, établissant des relations entre les caractéristiques physiques facilement accessibles des sols et les teneurs en eau aux potentiels permettant de déterminer les RU. Les derniers travaux à ce sujet ont été présentés par Bruand et al. en 2002. Les prédécesseurs dans ce domaine ont été Jamagne et al (1977), Tessier et Pedro (1984), Tessier (1987), Curmi (1987), Bruand (1988), Bruand et al (1994).

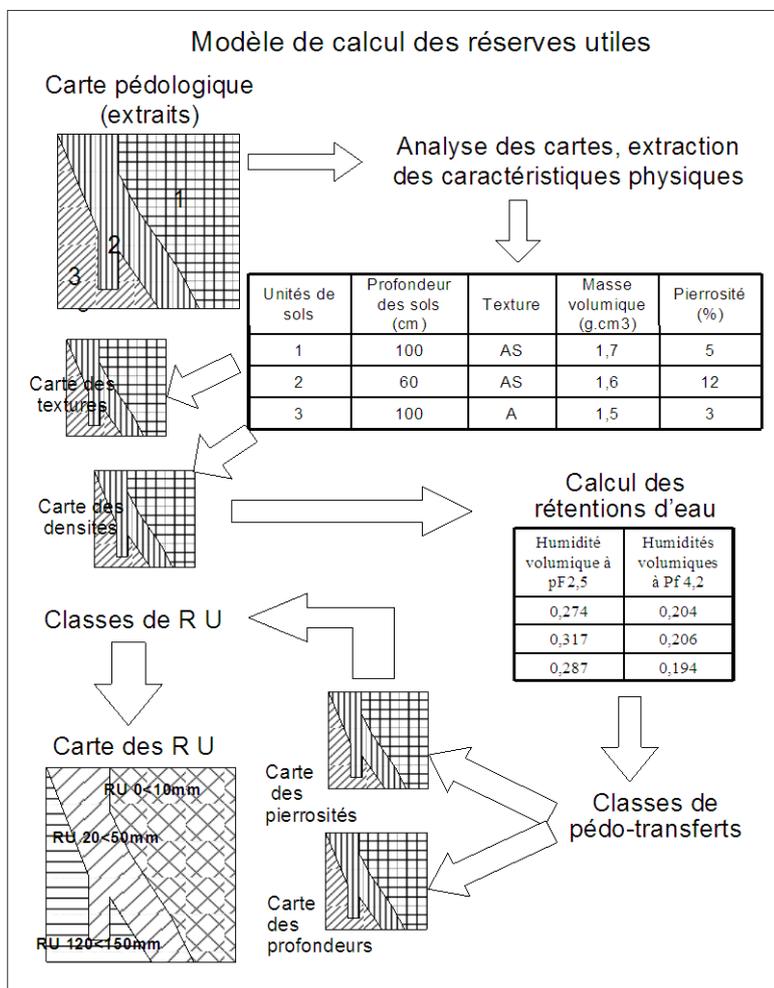
Tous ces travaux se fondent sur des analyses multivariées. Les travaux de Bruand et al, (2002) s'appuient sur un effectif de 219 horizons de sols des régions tempérées du nord au sud-ouest de la France, choisis de telle sorte que toutes les classes texturales soient représentées. Des paramètres du sol conditionnant la teneur en eau ont été mis en relation avec les teneurs en eaux massiques aux potentiels matriciels suivants : pF 1,0 - 2,0 - 2,5 - 3,0 - 3,5 et 4,2. Les variables les plus pertinentes sont la texture et la densité apparente sur motte. Les teneurs en matière organique, la capacité d'échange cationique et la teneur en calcaire actif ont été utilisées pour une pré-classification.

Comme textures et densités apparentes ne sont pas strictement indépendantes, l'analyse a été menée par étapes :

- établissement de classes texturales des échantillons provenant des différents horizons,
- calcul des teneurs massiques en eau, aux pF remarquables, au sein de chaque classe texturale,
- répartition des échantillons de chaque classe texturale dans des sous-classes définies par les densités apparentes mesurées sur des mottes de quelques centimètres de diamètre et contenant donc les porosités efficaces aux potentiels hydriques remarquables précédents, c'est ainsi que la porosité fissurale grossière n'est pas prise en compte,
- calcul des teneurs en eau massiques moyennes au sein de chaque sous-classe construite par la stratification texturo-structurale précédente,
- enfin, calcul des teneurs en eau volumiques moyennes en prenant comme densité apparente représentative de l'ensemble de l'horizon la moyenne des densités sur mottes des échantillons prélevés dans cet horizon. De cette façon on ne prend pas en compte la macroporosité qui n'intervient pas dans le stockage hydrique attribué aux RU.

Les principaux résultats obtenus par Bruand et al. (2002) sont consignés dans le tableau de l'annexe A.

2.2.2 Modèle de calcul des réserves utiles des sols du bassin versant



Le calcul des RU nécessite la connaissance de différentes variables :

- les textures et les densités apparentes des sols, cette information est obtenue à partir de la carte pédologique qui fournit les limites des unités homogènes.
- l'épaisseur du sol, pour pouvoir transformer les teneurs volumiques en lame d'eau (mm) contenue dans la partie du sol participant à la R U.
- la teneur en éléments grossiers ; en effet, la porosité stockant la RU ne s'applique qu'au matériau meuble, aussi une pondération doit-elle être faite en tenant compte des éventuelles charges en éléments grossiers non poreux.

Cette organisation des analyses successives est schématisée sur

l'organigramme de la figure 3.

Figure 3 : Modèle de calcul et de cartographie des réserves utiles

La carte pédologique permet d'identifier différentes unités de sols caractérisées par toute une série de variables dont celles qui sont également utiles pour le calcul des teneurs en eau aux potentiels remarquables, ce sont: la texture, une évaluation des masses volumiques, la profondeur des sols et leur pierrosité.

L'utilisation d'un système d'information géographique (Arc View) permet de construire une table des variables, de calculer les humidités volumiques aux potentiels remarquables (différents pF) puis les réserves utiles. En regroupant chacune de ces variables par classe il est possible de dresser les cartes correspondantes pour indiquer leur répartition dans l'espace.

2.3 Calcul du bilan hydrique

La connaissance des RU correspondant aux caractéristiques réelles des sols d'un bassin versant permet de calculer la disponibilité en eau pour les plantes dans un bilan hydrique où rentrent également pluviométrie et évaporation. L'établissement de ce bilan soulève deux problèmes,

celui des données climatiques disponibles dans la région considérée et celui du pas de temps de l'analyse permettant de mieux rendre compte de l'utilisation de l'eau par les plantes compte tenu de la porosité du sol et des périodes excédentaires ou déficitaires.

Tant que les réserves hydriques sont suffisantes, les plantes utilisent une quantité maximale d'eau. Cette utilisation couvre des processus physiologiques complexes dont le moteur est l'évapotranspiration de la plante. Pour éviter toutes confusions terminologiques ultérieures, rappelons les définitions suivantes :

- l'évapotranspiration potentielle (ETP) est l'évaporation d'un gazon ras très couvrant, bien arrosé, en bon état végétatif ; dans ces conditions cette ETP ne dépend que des paramètres climatiques locaux tels que rayonnement, insolation, température, humidité de l'air, vitesse du vent,
- l'évaporation de tout autre type de couvert végétal bien arrosé et en bon état végétatif correspond à l'évapotranspiration maximum (ETM) de ce couvert végétal,
- l'évapotranspiration réelle (ETR) d'un couvert végétal naturel ou cultivé dépend du type de couvert végétal, des espèces végétales, de la structure du couvert, du stade phénologique des plantes et du climat local.

Les plantes n'évapotranspirent à l'ETM que si elles sont au stade de développement maximum de leur surface foliaire et si elles sont correctement alimentées en eau, c'est ainsi qu'en début de cycle végétatif on a $ETR = 0,2 \text{ à } 0,3 \text{ ETP}$.

Compte tenu de ce qui précède le bilan hydrique peut se formuler de la façon suivante :

$$P + (I) + R \pm D \pm \Delta H - ETR = 0 \quad (1)$$

avec :

P = pluies en mm,

(I) = compléments hydriques d'une irrigation éventuelle (mm),

R = ruissellement (mm),

à l'échelle d'une parcelle la présentation du ruissellement pose problème car le ruissellement entre et sort de la parcelle, il apparaît dans les apports R_e (ruissellements entrant) et dans les pertes R_s (ruissellements sortant). Par soucis de simplification, on fait l'hypothèse que $R_e = R_s$ pour éliminer ce terme de l'équation.

D = drainage (mm),

ΔH = variation du stock hydrique S du sol (mm) entre des instants i et i-1

$$\Delta H = S_i - S_{i-1}$$

avec : S_i = stock hydrique du sol à l'instant i et S_{i-1} = stock hydrique à i-1

Ici, les variations de stocks concernent l'eau utile (R U), donc à l'exclusion de l'eau de gravité transitant rapidement dans la macroporosité du sol et de l'eau fortement fixée par les éléments du sol et non accessible aux plantes.

lorsque $P - ETR > 0$, $\Delta H > 0$, la réserve hydrique (R U) se remplit,

lorsque $P - ETR < 0$, $\Delta H < 0$, la réserve hydrique (R U) se vide ou ne peut se remplir.

L'équipement météorologique du barrage a permis de disposer d'un enregistrement pluviométrique journalier et de l'évaporation journalière en bac Colorado, de septembre 2000 à septembre 2001.

Nous n'avons pas l'occupation détaillée du sol, notamment pour les cultures annuelles, sur le bassin versant pour la période considérée ; nous ne pouvons donc pas calculer, par type de couvert, par surface cultivée et par période, des variations d'ETR. Pour ces raisons nous avons assimilé ETR à ETP. Les travaux de J. Vacher (2000) sur le site voisin de El Gouazine ont permis de passer de l'évaporation bac à l'ETP avec la relation suivante :

$$ETP = 1,088 E_{\text{bac}}$$

Sous ces climats, du fait de l'importante demande évaporatoire, (#1900mm/an), et de la faiblesse des pluies (350 mm/an), les calculs aux pas de temps mensuels, décennaires et même pentadaires ne montrent qu'un déficit de saturation permanent et ne permettant aucun stockage d'eau donc aucun développement végétal. L'équipement installé sur le bassin versant a permis d'établir les bilans journaliers de septembre 2000 à septembre 2001. On accède alors à des différences P-ETP montrant les cycles des stockages et des utilisations voire des excédents hydriques.

On présente sur le tableau 1 un exemple de situation théorique permettant de suivre la procédure de calcul des termes du bilan.

Pour cet exemple on a considéré trois capacités de réserves utiles RU pouvant correspondre aux classes suivantes de représentation cartographique:

- RU de 0 à 10mm, soit une capacité moyenne de 5mm
- RU de 10 à 20mm, soit une capacité moyenne de 15mm,
- RU de 20 à 50mm, soit une capacité moyenne de 35mm.

Tableau 1: Exemple d'établissement d'un bilan hydrique

Date	P	ETP	P-ETP	RU 5	Exc.	Déf.	RU 15	Exc.	Déf.	RU 35	Exc.	Déf.
	mm	mm	mm	mm	mm	%	mm	mm	%	mm	mm	%
1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	0,00	5,00	-5,00	0,00	0,00	100	0,00	0,00	100	0,00	0,00	100
B	14,50	4,00	10,50	5,00	5,50	0	10,50	0,00	30	10,50	0,00	70
C	15,40	3,50	11,90	5,00	11,90	0	15,00	7,40	0	22,40	0,00	36
D	0,10	2,20	-2,10	5,00	0,00	0	15,00	0,00	0	20,30	0,00	42
E	14,50	3,20	11,30	5,00	11,30	0	15,00	11,30	0	31,60	0,00	9,7
F	0,50	4,20	-3,70	5,00	0,00	0	15,00	0,00	0	29,70	0,00	15
G	8,50	4,70	3,80	5,00	3,80	0	15,00	3,80	0	33,50	0,00	4

Les termes du bilan se calculent de la façon suivante

Pour RU 5 :

Jour A, P-ETP <0, RU reste nulle

Jour B, P-ETP = 10.5, 5 remplissent la RU, 5.5 drainent ou ruissellent

Jour C, P-ETP = 11.9, mais la RU est déjà pleine, donc 11.9 drainent ou ruissellent

Jour D, P-ETP = -2.10, mais la RU reste à 5 car il y a l'excédent du jour C, l'excédent du jour D est zéro (on ne reporte pas les excédents, sauf pour remplir la RU du jour suivant)

Jour E, P-ETP = 11.3, la RU est déjà pleine, 11.3 drainent ou ruissellent

Jour F, P-ETP = -3.7, mais il y a l'excédent de la veille, donc la RU peut se remplir, par contre il n'y a pas d'excédent.

Jour G, P-ETP = 3.8, la RU est déjà pleine, il y a 3.8 d'excédent. Pas de déficit

Pour RU15 :

Jour A, P-ETP <0, RU reste à zéro

Jour B, P-ETP = 10.5, 10.5 remplissent la RU, pas d'excédents

Jour C, P-ETP = 11.9, la RU se complète à 15, donc $11.9 - (15 - 10.5) = 7.4$ drainent ou ruissellent

Jour D, P-ETP = -2.10, la RU serait à $15 - 2.1$, mais il y a un excédent de la veille, donc elle reste à 15 par contre l'excédent du jour D est zéro (on ne reporte pas les excédents, sauf pour remplir la RU)

Jour E, P-ETP = 11.3, la RU est déjà pleine, 11.3 drainent ou ruissellent

Jour F, P-ETP = -3.7, mais il y a l'excédent de la veille, donc la RU peut se remplir, par contre il n'y a pas d'excédent.

Jour G, P-ETP = 3.8, la RU est déjà pleine, il y a 3.8 d'excédent

3. Résultats

3.1 Les données de base

3.1.1 La carte pédologique

Le point de départ est une carte des sols du bassin versant de Zanfour présentant une mosaïque d'unités (UC) contenant des informations classées selon une adaptation à la Tunisie de la CPCS 1967. (Voir carte couleur 1). La légende de cette carte descend assez loin dans la taxonomie pour pouvoir dégager la profondeur, la pierrosité et la texture des sols, tous caractères utiles au calcul des réserves hydriques (RU) :

épaisseur : quatre classes :

- classe A avec des sols très peu épais sur calcaires limitrophes du bassin et parfois sur croûtes calcaires dures (unités 1,3), parfois sur altérites de marnes (2)
- classe B avec des sols peu épais sur calcaires ou sur marnes (4,5,6)
- classe C avec des sols épais calcimagnésiques carbonatés et brun calcaires (7,9)
- classe D avec des sols très épais sur colluvions (8, 10, 11)

pierrosité

- sols très caillouteux (5) et caillouteux (parfois 9) essentiellement sur colluvions de roches calcaires,

texture : deux catégories dominantes, en relation avec les types d'argiles et la dynamique structurale que leur présence impose :

- sur marnes, la pédogenèse fournit beaucoup d'argiles gonflantes et les sols sont argileux à argilo-sableux (5, 8)

- si les calcaires dominant, la pédogenèse fournit peu d'argiles gonflantes, les sols sont alors limoneux à limono-sableux (7, 9)
Profondeur A : 0 à 10cm de sol meuble (UC 1, 2, 3)

UC 1

Superficie : 4,8 % du bassin versant.

Profil : R c'est à dire affleurements de roches dures, de croûte calcaire continue.

Strate herbacée et arbustive maigre (garrigue peu dense) ancrée dans les fissures des roches.

Economie de l'eau : très mauvaise sauf sur roche très fissurée.

UC 2

Superficie : 6,8 % du bassin versant

Profil R, voire C sur les flancs des ravines vives des marnes et argilites, pentes trop fortes et écoulements trop intenses pour permettre une accumulation de matière organique.

Economie de l'eau: mauvaise car toute l'eau ruisselle sauf dans certaines ravines

Problème: tous les sols de cette unité sont profondément ravinés

UC 3

Superficie : 11,1 % du bassin versant

Profil R, ce sont en effet des colluvions d'éléments rocheux, moins de 5 % d'horizon organique de type (A), souvent en contrebas de l'UC 1 dès que la pente faiblit.

Occupation: garrigue dense ou forêt claire, strates herbacée et arbustive ménageant des zones de sol nu.

Economie de l'eau : mauvaise à moyenne si les épandages sont plus graveleux que caillouteux.

Profondeur B: 10 à 50 cm de sol meuble (unités 4, 5, 6)

UC 4

Superficie : 13,5 % du bassin versant,

Profil AC obtenu par évolution de l'UC 1 ou dégradation de l'UC 9, 10 à 50cm de terre moins caillouteuse mais avec un épandage superficiel pouvant atteindre 10% d'éléments grossiers.

Horizon organique A très sombre, structure fragmentaire fine bien développée, texture argilo-limono-sableuse à sablo-limoneuse.

Occupation : forêt dense, garrigue dense à Romarin, cultures s'installant en lisières.

Economie de l'eau : intéressante pour des forêts et plantations forestières, il y a assez d'eau pour les jeunes plants, les forêts âgées sont de belle venue mais hétérogènes car tout dépend de la profondeur de l'exploration racinaire permise par la fissuration des calcaires.

Problème: sur les pentes >10%, ces sols encore riches en matière organique sont actuellement défrichés ; ils ne résisteront que quelques décades sous cultures et que quelques années sous élevage ovin.

UC 5

Superficie : 17,9 % du bassin versant

Profil AC ou R. Epandage de 50% de graviers et cailloux calcaires au dessus d'une UC4. Ces éléments grossiers proviennent soit d'un épandage lié au ruissellement (allochtonie), soit d'une accumulation relative par épuisement du matériau meuble de sols initialement graveleux et caillouteux (autochtonie), il y a souvent concomitance des deux processus.

Economie de l'eau : plus intéressante que UC 4 car l'épandage joue le rôle de mulch.

Occupation : forêt dense et garrigue,

Problème: pierrosité top importante pour la culture.

U C 6

Superficie : 6,7 % du bassin versant

Profil AC, la limite entre A et C est difficile à déterminer car les altérations de marnes sont elles-mêmes souvent meubles. Sols très limoneux, beige clair, faible teneur en matière organique.

Structure fine à moyenne bien développée en jachère mais donnant rapidement des pellicules de battance après labour.

Economie de l'eau: faible infiltrabilité à cause des pellicules de battance.

Occupation : céréales sur les pentes <10% , sur des pentes supérieures, une mise en défens s'impose.

Problème: ces sols s'érodent rapidement sous forme linéaire sur des pentes >10%, ceci pourrait être limité par des traitements de CES qui devraient laisser se développer des couverts herbacés et buissonnants bas, surtout pas d'arboriculture ; les banquettes n'y sont pas non plus recommandées (risques de renards, d'effondrements).

Profondeur C : 50 à 100 cm de sol meuble (UC 7, 9)

U C 7

Superficie : 2,4 % du bassin versant.

Profil A (B) C voire A B C, texture argilo-limoneuse à argilo-limono-sableuse, structure fine bien à moyennement développée, brun foncé homogène sur au moins 50cm, taux d'éléments grossiers variable.

Economie de l'eau : bonne.

Occupation : forêt en cours de dégradation.

U C 9

Superficie : 11,3 % du bassin versant

Profil A (B) C ou A B C, argilo-limono-sableux, moyennement graveleux et caillouteux dans le profil mais accumulation relative pouvant atteindre 30% en surface; teinte brune à brun-jaunâtre sur 15cm marquant des taux de 0,7 à 2% de matière organique ; structure fine grenue et grumeleuse bien développée sur 15cm en hiver, devient massive en-dessous ; ces sols se forment sur un mélange de bancs calcaires dominant et marneux plus minces, les pentes varient de 5 à 7%.

Economie de l'eau : moyenne à cause de pellicules de battance limitant leur infiltrabilité et d'une charge en éléments grossiers limitant leurs réserves utiles.

Occupation : céréaliculture, maraîchage et fruitiers irrigués.

Problème: ces sols cultivés ont une structure fragile, les mottes de labour s'effondrent après quelque 25mm de pluies cumulées, ils ruissellent rapidement et s'érodent surtout en nappe, ils sont actuellement fort efficacement protégés par des banquettes en aval du bassin.

Profondeur D : 100 à 150 cm de sol meuble (UC 8, 10, 11)

U C 8

Superficie : 9 % du bassin versant

Profil A (B) C., la limite entre (B) et C est difficile à déterminer car les altérations de marnes sont elles-mêmes meubles ; texture argileuse à argilo-limoneuse, structure fine grenue et grumeleuse bien développée en hiver, forte dynamique structurale grâce aux smectites ; ces sols forment plutôt des pellicules structurales après labour et restent donc assez perméables après l'effondrement des mottes ; teinte brun-foncé sur 15cm soulignant les 1,5 % à 2,0 % de matière organique ; ces sols se forment sur des marnes en bancs plus épais que les calcaires.

Economie de l'eau : bonne pour les textures les moins fines, moyennes pour les plus argileuses car la gamme d'eau utilisable est déviée vers les fortes humidités, infiltrabilité bonne grâce à la dynamique structurale évoquée précédemment.

Occupation : céréales

Problème : cette unité n° 8 possède de très bonnes caractéristiques ce qui la différencie des unités 6 et 2 également sur marnes. Ces sols sont peu érodibles sur pentes de 5 à 10%, ils le deviennent par contre au delà de ces seuils, la meilleure protection peut être obtenue si on recherche un bon calage

du calendrier cultural : un labour précoce limitera le ruissellement. Comme pour les autres sols sur marnes les banquettes sont à proscrire.

U C 10

Superficie : 15,9 % du bassin versant

Profil A (B) C ou A B C: ce sont les sols les plus profonds du bassin car ils se différencient sur des matériaux colluvionnés hétérogènes verticalement et latéralement provenant du mélange de ce qui est en amont, assez peu de cailloux, nombreux sols enterrés; texture argilo-limoneuse à argileuse, structure fine bien développée en hiver mais sensible au tassement; couleur brun jaunâtre, plus foncée sur 20cm signalant des taux de 1,0 à 1,7 % de matière organique.

Economie de l'eau : RU excellente, infiltrabilité bonne car les pellicules structurales de surface sont plus fréquentes que les pellicules de battance.

Occupation : céréales, maraîchage et fruitiers dans les zones irrigables.

Problème: vitesse d'effondrement des mottes de labour moyennement rapide, sur certains sols, enfin les remontées capillaires peuvent poser problème à cause de l'hétérogénéité verticale des matériaux.

U C 11

Alluvions et affleurements rocheux nus des oueds (pour mémoire, non cartographiables)

3.1.2 La profondeur des sols

Les classes de profondeurs proviennent de l'analyse des cartes pédologiques. On note que les sols les plus épais sont groupés en amont du bassin sur les marnes et que les plus minces correspondent aux limites est et ouest du bassin, souvent sur corniches calcaires, et à l'aval sur encroûtements calcaires.

Enfin, près de 70% des sols ont moins de 50cm de profondeur ce qui limite fortement les possibilités de stockage hydrique.

Tableau 2 : Profondeur des sols

Profondeurs (cm)	Effectif d'unités	Surfaces (m²)	Surfaces (%)
0-10	202	12642300	28,94
11-50	219	17431882	39,90
51-100	112	7570267	17,33
101-150	44	5760467	13,19
<i>lec</i>	1	283667	0,65

3.1.3 Les textures

Si l'on considère en même temps la carte pédologique et celle des textures, on constate une étroite relation entre les classes argileuses (A) et argilo-sableuses (AS) et l'extension des sols différenciés sur marnes, l'ensemble couvrant plus de 25% du bassin surtout en amont et au centre du bassin à plus forte densité hydrographique.

La forte proportion de sols limoneux (L et LS = 52%) atteste de la jeunesse de ces sols incessamment remaniés par érosion.

Tableau 3 : Texture des sols

Texture	Effectif unités	Surfaces (m ²)	Surfaces (%)
A	81	10490735	24,01
AS	157	9426605	21,58
L	166	15044447	34,44
LS	151	7888296	18,06
LTS	22	554833	1,27
<i>Lac</i>	1	283667	0,65

3.1.4 La charge en éléments grossiers inclus

La charge en éléments grossiers inclus dans le sol péjore la capacité de stockage en eau. Ceux-ci, généralement non poreux, occupent en effet la place du matériau poreux, ils constituent aussi une gêne pour le travail du sol sur environ 15% de la superficie où leur pourcentage dépasse 40%.

Par contre, une accumulation relative de ces éléments grossiers en surface est intéressante pour des taux <40% car ils absorbent l'énergie des pluies, ils constituent un « mulch » limitant l'évaporation et enfin, ils diminuent l'accélération des écoulements donc l'abrasion linéaire.

Tableau 4 : Charge en éléments grossiers

Eléments grossiers (%)	Effectif unités	Surfaces (m ²)	Surfaces (%)
0,0	132	10608255	24,28
10,0	165	10473270	23,97
20,0	84	7246372	16,59
30,0	119	8570873	19,62
40,0	70	5028003	11,51
50,0	7	1478143	3,38
<i>lac</i>	1	283667	0,65

3.2. Les réserves en eau du sol

3.2.1 Les humidités volumiques aux potentiels remarquables (pF 2,5 et pF 4,2)

Les humidités équivalentes à la capacité au champ (pF2,5) plus élevées appartiennent aux sols à texture fine, les mises en réserves hydriques sont plus exclusivement liées aux vides d'assemblages édifiés plus par une dynamique mésostructurale saisonnière que par une activité biologique extrêmement faible dans ces sols des zones semi-arides.

Tableau 5 : Humidités volumiques à pF 2,5

Hum.vol. pF 2,5	Effectif unités	Surfaces (m ²)	Surfaces (%)
23-25 %	66	2687283	6,15
25-27 %	147	8308518	19,02
27-29 %	105	10509270	24,05
29-31 %	220	19029918	43,56
31-33 %	39	2869927	6,57
<i>lac</i>	1	283667	0,65

Sur la carte des humidités volumiques au point de flétrissement (pF4,2), on note que près de 55% des sols permettent la survie des végétaux avec des teneurs en eau très basses (13 à 17%); de

faibles précipitations, situation caractéristique de cette zone, permettent d'atteindre rapidement ces humidités qui assurent une survie sinon la croissance des végétaux. (Voir Carte couleur 2 : Cartes des humidités volumiques à pF 2.5 et pF 4,2)

Tableau 6 : Humidités volumiques à pF 4,2

Hum vol. pF 4,2	Effectif unités	Surfaces (m²)	Surface (%)
13<15 %	180	12113100	27,73
15<17 %	159	11374476	26,04
17<19 %	57	2801868	6,41
19<21 %	113	9144192	20,93
21<23 %	68	7971280	18,25
<i>lac</i>	1	283667	0,65

3.2.2 Les réserves hydriques utilisables

Rappelons que le calcul des RU s'appuie sur l'établissement d'un stock en partant de la gamme d'eau utilisable (Hv pF2,5 - Hv pF4,2) appliqué à une épaisseur de sol (z) et possédant des caractéristiques hydrophysiques homogènes sur cette épaisseur. (Voir carte couleur 3: carte des réserves hydriques utilisables)

Tableau 7 : Réserves utiles

Cl. de réserves utiles (mm)	Effectif unités	Surfaces (m²)	Surfaces (%)
0<10	104	4806192	11,00
10<20	169	12024976	27,52
20<50	103	6090040	13,94
50<80	96	9433057	21,59
80<120	94	9875615	22,60
120<150	11	1175036	2,69
<i>lac</i>	1	283667	0,65

Cette simplification est acceptable sur ce bassin car tous les sols sont jeunes donc peu différenciés verticalement. Les sols sur colluvions échappent tant soit peu à cette simplification, elle sera cependant retenue car seules des prospections beaucoup plus détaillées auraient permis de révéler des horizons de différentes compositions susceptibles de modifier sensiblement les valeurs des stocks hydriques.

Par rapport à la complexité de la carte pédologique, la carte des R U montre finalement une distribution assez homogène des classes de réserves hydriques sur le bassin. Cette homogénéité résulte de compensations entre les RU dépendant des textures ou des pierrosités et celles dépendant plutôt des épaisseurs de sols ; c'est par exemple le cas de l'UC 9, à texture assez grossière, mais sur une grande épaisseur.

3.3 L'analyse des termes du bilan hydrique

3.3.1 Le climat

Il est tombé 350mm en 2000-2001, ce qui correspond à une année déficitaire si l'on se réfère à la pluviométrie médiane d'Ebba Ksour (431mm). L'évaporation (bac Colorado) sur le barrage a atteint 1895mm cette même année.

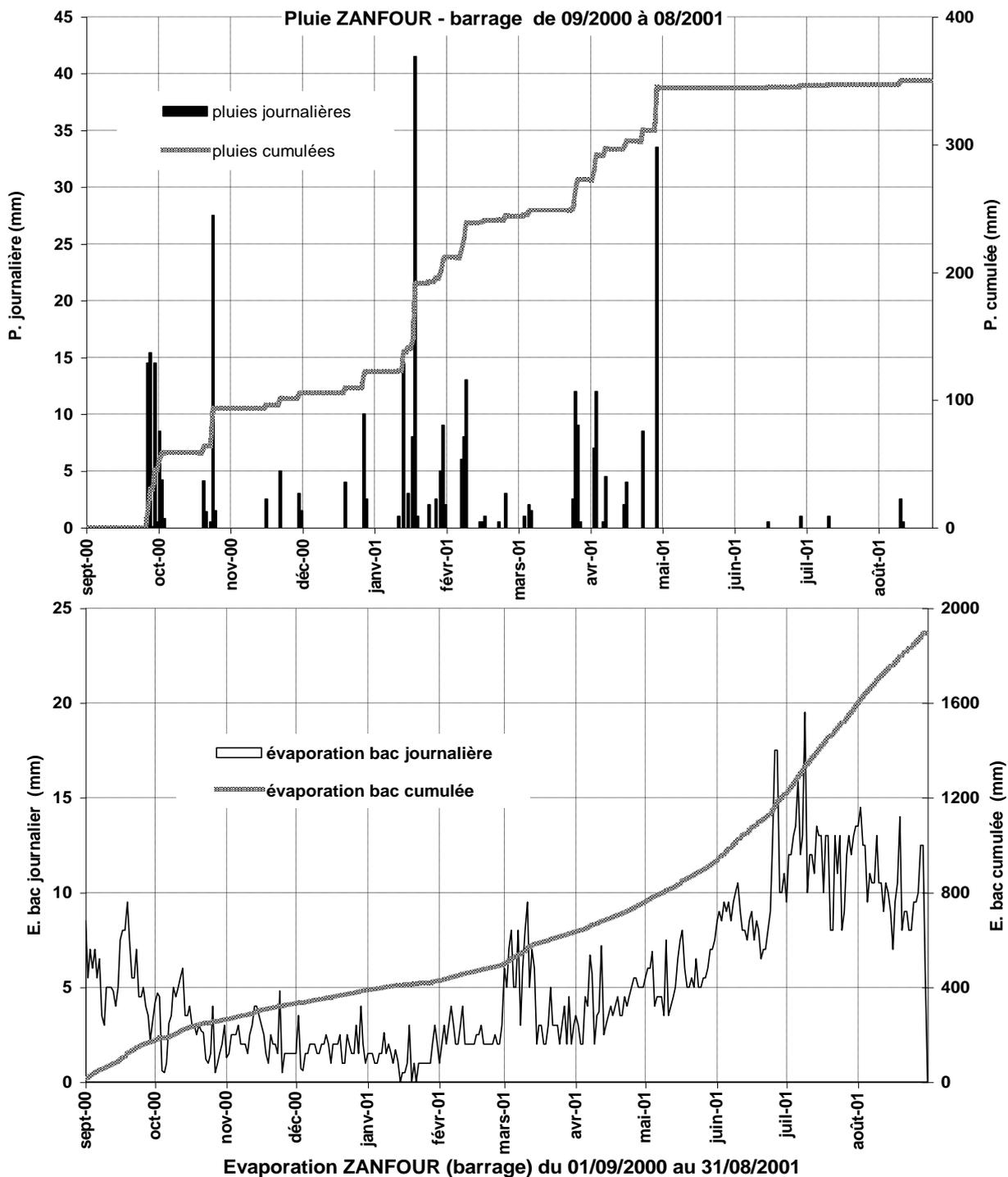


Figure 4 : Pluies et évaporation bac 2000-2001 sur Zanfour

Le cycle évaporatoire apparaît nettement sur la figure 4 avec des minimums de novembre à février (# 3 mm / j) explicables par la diminution des radiations et un maximum sur juillet et août (#11 mm / j) correspondant au cumul de l'advection et de radiations plus fortes.

La distribution des précipitations est caractéristique de ce que l'on observe en année déficitaire avec:

- des pics pluviométriques peu élevés,

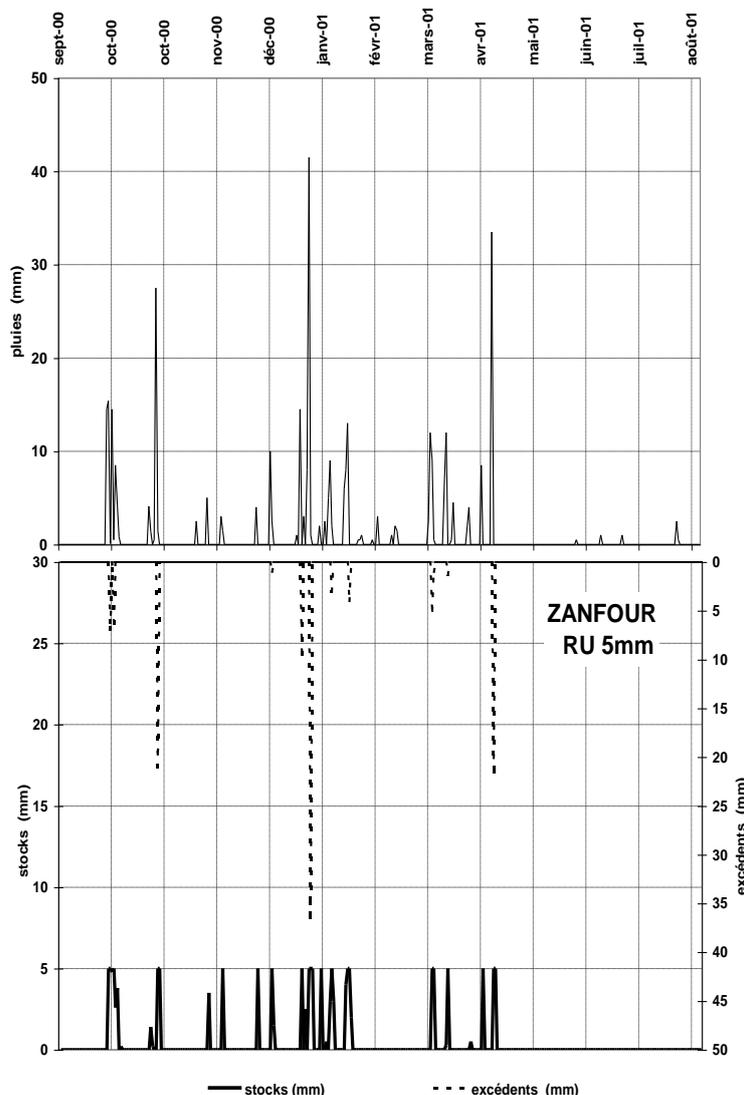
- un ralentissement excessif en décembre,
- trop peu de pluies en février, mars et avril, période critique parce que la demande évaporatoire reprend de l'importance.

3.3.2 L'évolution des stocks et excédents par classes de RU

Les bilans hydriques complets figurent sur un tableau de l'annexe B. La figure 5 résume les évolutions des stocks et des excédents ainsi que les pluies dont ils sont issus. Cet exemple correspond à une classe de sols très minces à texture équilibrée ou des sols un peu plus épais à texture grossière et ne possédant donc qu'une réserve hydrique maximale R U de 5 mm.

Graphique et tableau montrent que les sols de cette classe « RU 5 mm » se saturent 21 fois sur 37 remplissages ce qui représente 143 mm et détermine, sur l'année 2000-2001, un excédent de 117 mm dont 35 mm en janvier 2001.

Figure 5 : Pluies, stocks et excédents hydriques pour les sols à R U de 5mm



L'excédent correspond au flux se départageant entre ce qui peut drainer plus profondément dans une roche fissurée par exemple et ce qui s'écoule superficiellement.

Rappelons qu'une partie de l'excédent du jour $J-1$ participe à la recharge de RU au jour J .

Sur sols minces, il ne fait aucun doute que bien des sols à faible RU sont à l'origine de forts ruissellements que nous avons supposés dans un précédent travail (Collinet, Zante, Ghesmi 2001).

Les autres situations issues de sols à classes de RU supérieures sont résumées dans le tableau 8 et illustrées par la figure 6.

Compte tenu des faibles précipitations (350mm) et d'une ETP annuelle de 1896mm, les réserves atteignent un maximum de 291 mm pour les sols profonds de la classe des RU de 65mm. Le remplissage maximum des RU n'est atteint que 21 fois pour RU 5

mm, 4 fois pour RU 15 mm, une fois pour RU 35 mm, il n'est jamais atteint pour RU 65 mm qui ne devrait jamais donner lieu à des ruissellements.

Tableau 8 : Résumés des bilans sur 4 classes de réserves hydriques

Classes de RU (mm)	Stocks cumulés (mm)	Excédents cumulés (mm)	Jours remplissage total	Jours remplissage partiel
5	134	138	21	15
15	193	49	4	26
35	220	6	1	29
65	291	0	0	37

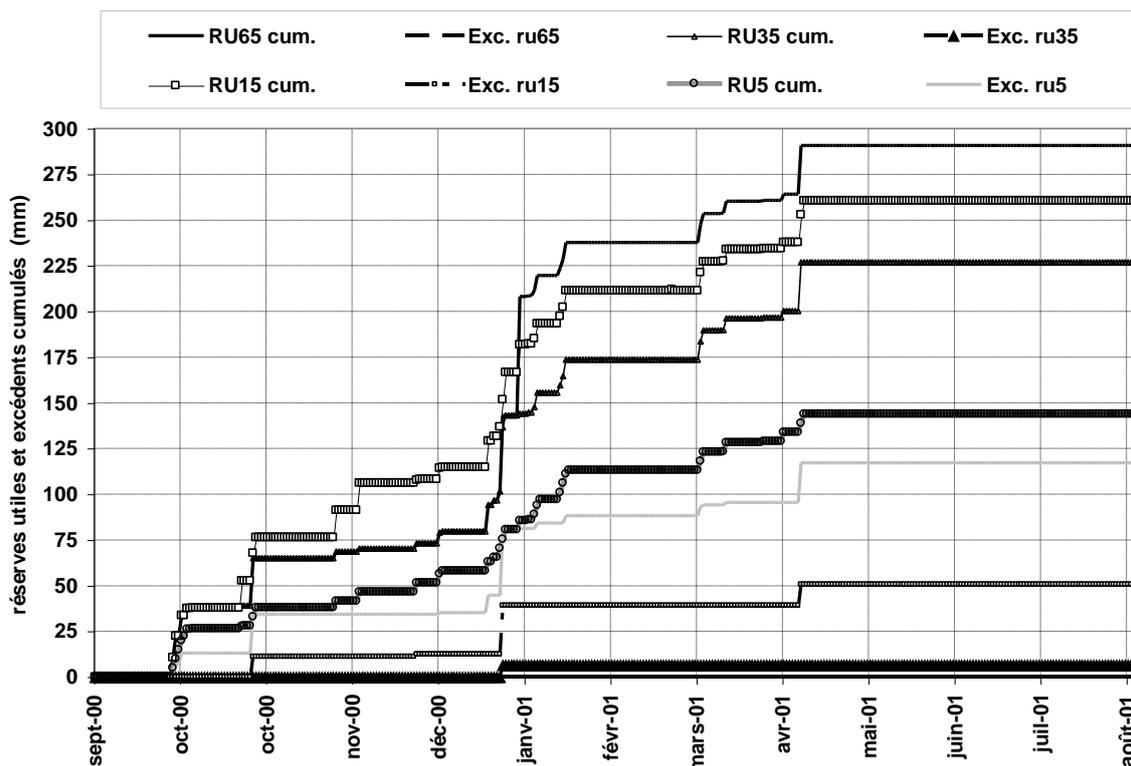


Figure 6 : Cumul des stocks, cumul des excédents sur le bassin de Zanfour en 2000-2001

Une hypothèse simplificatrice, qui accorderait aux surfaces des sols une conductivité superficielle saturée infinie et stable indiquerait que seulement 52% des sols du bassin sont susceptibles de ruisseler par saturation des porosités des classes de RU : 0/10, 10/20 et 20/50 mm (cf. carte des RU).

La figure 6 représente les cumuls des réserves utiles et des excédents de quatre classes de RU précédentes. On peut ainsi distinguer les périodes de plus fortes intensités des transferts hydriques : en début et fin octobre, en janvier, en mars et en avril.

3.4 L'Évaluation des compléments d'irrigation

Le calcul des données journalières du bilan permet aussi une évaluation des compléments hydriques à apporter par irrigation. Les doses journalières sont calculées en retenant les valeurs négatives de P-E.

J.Vacher (2000) a établi pour la région les dates et durées des différents stades phénologiques (du semis à la récolte) et a calculé pour chaque culture et chaque calendrier un coefficient cultural « k » tel que $ETR = k ETP$ pour préciser l'utilisation de l'énergie en fonction du développement de la plante. Nous avons repris les informations concernant les calendriers culturaux mais ne disposons cependant pas assez d'informations pour calculer les coefficients culturaux. Pour simplifier on considérera que $k = 1$ pendant tout le cycle ce qui surestime sensiblement les doses d'irrigation pendant la levée.

Le tableau 9 présente un exemple de proposition d'irrigation pour le blé, l'orge et l'avoine.

Les doses journalières de complémentation sont calculées en établissant les déficits P-ETP et le cumul de ces déficits journaliers fournit les besoins correspondant aux différents stades phénologiques. Les différences de doses qui apparaissent entre les trois céréales résultent du calage dans l'année de cycles culturaux sensiblement différents, en ce sens l'orge est mieux adapté aux caractéristiques climatiques de la zone.

Tableau 9 : Compléments hydriques pour céréales sur Zanfour (exemple 2000-2001)

	Blé	Orge	Avoine
Période semis +levée	01/12 au 16/12	01/11 au 10/11	01/11 au 15/11
Irrigation période (mm)	23,8	22,3	26,3
Période maturation	17/12 au 01/04	11/11 au 28/02	16/11 au 25/02
Irrigation période (mm)	111,4	60,5	50,5
Période maturité	02/04 au 01/06(*)	01/03 au 10/04(*)	26/02 au 18/04(*)
Irrigation période (mm)	221,7	121,9	153,8
Totaux des cycles (mm)	356,9	204,7	230,6

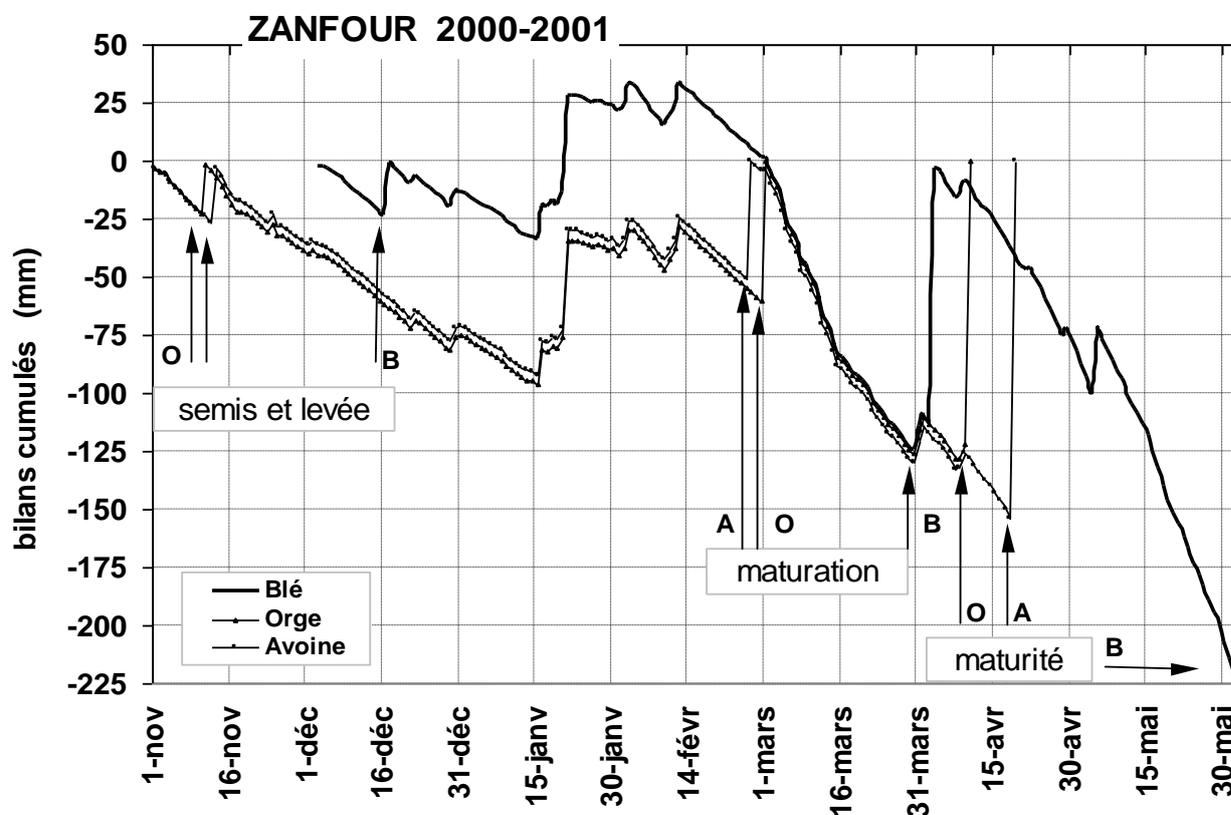


Figure 7 : Analyse des déficits hydriques sous trois cultures

La figure 7 représente les évolutions de ces déficits hydriques pour les trois céréales. Pendant une vingtaine de jours $P-ETP > 0$, les réserves peuvent alors se regarnir partiellement ou totalement ce qui correspond aux inflexions positives des courbes sur le graphique.

3.5 L'évaluation du stockage total des sols

Les sols du bassin versant sont susceptibles de contenir d'importants volumes d'eau. Ces réserves hydriques fluctuent évidemment selon les caractéristiques pluviométriques inter-annuelles.

Il est instructif d'utiliser les informations de la carte des réserves hydriques pour pouvoir comparer ces teneurs selon différentes hypothèses :

- hypothèse d'une saturation des RU sur toute la superficie du bassin,

Le remplissage total des réserves hydriques utiles de tous les sols du bassin versant donnerait un stockage de 2 176 400 m³ (tableau 10).

Selon cette hypothèse, on imite évidemment une situation correspondant à une année exceptionnellement humide dont il est possible de connaître la pluviométrie puisque nous avons pu établir un bilan hydrique pour l'année 2000-2001 dont nous connaissons la pluviométrie.

Tableau 10 : Volume des réserves hydriques du bassin dans le cas d'une saturation totale

RU moyennes par classe (mm)	Surfaces des unités de chaque classe (ha)	Volumes = R U x surface (m ³)
5	481	24050
15	1202	180300
35	609	213150
65	943	612950
100	988	988000
135	117	157950
totaux	4340	2176400

Tableau 11 : Volume des réserves hydriques du bassin versant en 2000-2001

RU moyennes par classe (mm)	Surfaces des unités (ha)	Coefficient d'abattement St.cum / Pcum	Volumes R U x surf x coef. (m ³)
5	481	0,29	6974
15	1202	0,51	91953
35	609	0,63	134284
65	943	0,65	398417
100	988	0,65	642200
135	117	0,65	102667
totaux	4340		1376495

- hypothèse d'un remplissage partiel des RU des sols du bassin,

Les taux de remplissage réels des différentes RU des sols du bassin à l'issue de l'année 2000-2001, où il est tombé 350mm, sont obtenus par un cumul annuel des volumes de différentes classes (annexe B). La comparaison de ces cumuls de réserves saturées avec ceux des réserves non saturées de l'année 2000-2001 permet d'établir toute une série de coefficients d'abattement indiqués en colonne 3 du tableau 11. On note ainsi :

- que le rapport des volumes totaux des RU saturées de l'année « x » / RU partiellement remplies de 2000-2001 = 1,58,

- que la pluie de l'année « X » permettant de remplir toutes les réserves du bassin serait de $350 \times 1,58 = 553$ mm, qui correspond à une occurrence vicennale humide.

On se rend compte que les sols saturés du bassin pour cette année exceptionnellement humide contiendraient trois fois plus d'eau que le réservoir qui contient 710 000 m³ avant déversement et que, en 2000-2001, année d'occurrence quinquennale sèche, les sols du bassin contiennent encore deux fois plus d'eau que le réservoir. Bien évidemment il est rare d'observer une saturation simultanée de tous les sols du bassin versant ne serait-ce qu'à cause de l'hétérogénéité des précipitations sur des superficies de plusieurs km².

4 Conclusion

Le calcul et la représentation cartographique des réserves hydriques utilisables (RU) ont été réalisés à l'aide d'un S I G (Arc View) où la première couche d'information représente les contours d'unités de sols levées lors d'une prospection pédologique. Les autres couches, construites avec cette première carte, regroupent toutes les données nécessaires au calcul des RU : profondeur, texture et pierrosité.

Les données à notre disposition nous ont permis de déterminer six classes de RU, quatre d'entre elles se distribuent de façon assez homogène (# 20% de la superficie du BV), la classe la plus faible (0 à 10mm) ne représentant que 11% et la plus forte (120 à 150mm) à peine 3%. Deux processus orientent la distribution des classes de R U :

a) l'opposition des sols formés sur marnes de ceux formés sur calcaires, ce qui donne des RU assez étendues mais déviées vers de fortes humidités sur marnes, et des RU plus étroites et dans une gamme moins humide sur calcaires.

b) les différences de profondeur et de charge en cailloux qui révèlent deux groupes :

- des sols peu épais et caillouteux en sommets de formes, en limite de bassin et en aval sur croûtes,
- des sols épais, meubles sur les colluvions de versant et en élargissement de vallée.

Comme nous disposons des pluies et évaporations journalières de l'année 2000-2001, nous avons calculé les bilans hydriques journaliers prenant en compte les capacités réelles des RU ; il est apparu que les réserves ont été utilisées 32 fois en un an avec les seules saturations suivantes :

- o sols à R U moyenne de 5 mm : 21 saturations
- o sols à R U moyenne de 15 mm: 4 saturations
- o sols à R U moyenne de 35mm : 1 saturation
- o sols à R U moyenne de 65, 100 et 135 mm : jamais de saturation.

Compte tenu des faibles précipitations (350mm) et d'une ETP annuelle de 1896mm, les réserves atteignent un maximum de 291 mm pour les sols profonds de la classe des RU de 65mm.

Une utilisation simplifiée du bilan a permis de prévoir les doses d'irrigation pour trois céréales.

En travaillant uniquement sur les réservoirs hydriques, on a reconstitué, par classe de RU puis pour toutes les classes cumulées, un stockage de $1,38.10^6$ m³ qui représente en 2000-001, année déficitaire, déjà deux fois la capacité du barrage avant déversement. De la même façon, si la totalité,

des RU venait à être saturée, on arriverait à un stockage total dans le sol de $2,18 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ce qui représenterait trois fois la capacité du barrage. Cette situation hypothétique correspondrait à une pluviométrie annuelle de 553mm, événement d'occurrence vicennale.

5 Bibliographie

Baize D. 1989 : *Guide des analyses courantes en Pédologie – choix, expression, présentation, interprétation*. INRA, 147 rue de l'Université 75007 Paris. 173p.

Brochet P., Gerbier N., 1974 : *L'évapotranspiration. Aspect agrométéorologique*. Mono.65, Météo Nat., Paris

Bruand A., Baize D., Hardy M., 1994: Prediction of water retention properties of clayey soils: validity of relationships using a single soil characteristic. *Soil Use manag*, 10, 3, 99-103.

Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M. 1996 : Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols: importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*. Vol. 3, n°1. 1996. pp 27 – 40.

Bruand A., Perez Fernandez P., Duval O., Quetin P., Nicoullaud B., Gaillard H., Raison L. 2002 : Estimation des propriétés de rétention en eau des sols, utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *EGS/AFES*. Vol. 9, n°2 2002. pp 105 – 125

Collinet J., Zante P., Ghesmi M., 2001 : *Cartographie des risques érosifs sur le bassin versant du barrage collinaire de Zanfour (nord dorsale tunisienne)*. Convention CRDA Kef/ESAK/IRD, Programme : Développement durable autour des retenues collinaires et suivi de l'érosion - Opération : suivi pédologique de l'érosion des versants et impact des différentes techniques de CES sur les bilans de l'eau et des transports solides, Mission I R D de Tunis, Rapport Multigr 60p.

CPCS, 1967 : *Classification des sols par la Commission de Pédologie et Cartographie des Sols*. Coord. J. Boulaine , 27 collaborations. Labo. De Géologie – Pédologie de l'ENSA de Grignon. 87p.

Curmi P., 1987 : Comportement physique intrinsèque de mottes à macroporosité différente. In : *Soil compaction and regeneration* (G. Monnier et M.J. Goss eds.). Proc. Workshop on soil compaction: consequences and structural regeneration process, Avignon, 17-18 sept 1985, Balkema, Rotterdam.

F A O , 1968: *Definitions of Soil Units for the Soil Map of the World*. World Soil Resources Report, FAO n°33. 73p.

Hallaire M., Bouchet R S., 1965 : La recherche de techniques nouvelles pour la mesure des évapotranspirations potentielle et réelle. *C. R. Acad. d'Agriculture de France*. Paris.

Jamagne M., Betremieux R., Begon J.C., Mori A., 1977 : Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bulletin Technique d'Information*. pp. 324-325, 627-641.

Penman HL., 1948 : National evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. T193 Londres*

Thornthwaite CW, Mather JR, 1957: Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publ. Climatol.*, 311 p.

Turc L., 1961: Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évaporation potentielle. *Annales Agronomiques*. Paris.

Vacher J, 2000 : *Quelques résultats des recherches en agroclimatologie dans le programme HYDROMED*. Mission IRD Tunis, Rapport 17p.

ANNEXES

Annexe A : Table pour l'estimation des teneurs en eau aux potentiels remarquables, d'après Bruand *et al.*, 2002

Tableau 7 – Teneurs en eau volumiques aux différents potentiels de l'eau calculés à partir des classes de pédotransfert proposées après stratification texturo-structurale (tableau 3) et pour différentes valeurs de densité apparente de l'horizon ($D_{a,h}$) estimées à partir de la valeur médiane de la densité apparente de motte ($D_{a,m}$) au sein de chaque classe de $D_{a,m}$.

Table 7 – Volumetric water contents at the different water potentials that were calculated using the class pedotransfer functions proposed after texturo-structural stratification (table 3) and for different values of horizon bulk density ($D_{a,h}$) that were similar to the median value of the clod bulk density ($D_{a,m}$) within every class of $D_{a,m}$.

Classe de texture	Classe de $D_{a,m}$	Valeur estimée de $D_{a,h}$	Teneur en eau volumique $\theta_{\log h\psi}$						
			$\theta_{1,0}$	$\theta_{1,5}$	$\theta_{2,0}$	$\theta_{2,5}$	$\theta_{3,0}$	$\theta_{3,5}$	$\theta_{4,2}$
Argile lourde (ALO)	[1,2-1,3]	1,25	0,538	0,521	0,500	0,473	0,440	0,428	0,330
		1,15	0,495	0,480	0,460	0,435	0,405	0,393	0,304
	]1,3-1,4]	1,35	0,473	0,467	0,451	0,428	0,400	0,378	0,305
		1,25	0,438	0,433	0,418	0,396	0,370	0,350	0,283
	]1,4-1,5]	1,45	0,480	0,467	0,451	0,434	0,403	0,379	0,315
		1,35	0,447	0,435	0,420	0,404	0,375	0,352	0,293
	]1,5-1,6]	1,55	0,402	0,395	0,388	0,374	0,349	0,324	0,287
		1,45	0,376	0,370	0,363	0,350	0,326	0,303	0,268
	]1,6-1,7]	1,65	0,376	0,361	0,348	0,333	0,317	0,300	0,266
		1,55	0,353	0,340	0,327	0,313	0,298	0,282	0,250
Argile (A, AL)	[1,4-1,5]	1,45	0,381	0,365	0,344	0,318	0,284	0,247	0,216
		1,35	0,355	0,340	0,320	0,296	0,265	0,230	0,201
	]1,5-1,6]	1,55	0,363	0,357	0,324	0,321	0,291	0,256	0,223
		1,45	0,339	0,334	0,303	0,300	0,273	0,239	0,209
	]1,6-1,7]	1,65	0,374	0,360	0,345	0,329	0,300	0,269	0,228
		1,55	0,352	0,338	0,324	0,309	0,282	0,253	0,214
	]1,7-1,8]	1,75	0,348	0,347	0,329	0,306	0,298	0,285	0,240
		1,65	0,328	0,327	0,310	0,289	0,281	0,269	0,226
	]1,8-1,9]	1,85	0,317	0,309	0,296	0,283	0,287	0,278	0,233
		1,75	0,300	0,292	0,280	0,268	0,271	0,263	0,221
Argile sableuse (AS)	[1,5-1,7]	1,60	0,358	0,341	0,325	0,317	0,280	0,259	0,206
		1,50	0,336	0,320	0,305	0,287	0,263	0,243	0,194
	]1,7-1,9]	1,80	0,333	0,328	0,308	0,290	0,274	0,245	0,216
		1,70	0,315	0,309	0,291	0,274	0,258	0,231	0,204
Limon (LM, LA)	[1,4-1,5]	1,45	0,386	0,365	0,351	0,305	0,234	0,183	0,155
		1,35	0,359	0,340	0,327	0,284	0,217	0,170	0,145
	]1,5-1,6]	1,55	0,369	0,352	0,341	0,302	0,253	0,195	0,163
		1,45	0,345	0,329	0,319	0,283	0,236	0,183	0,152
	]1,6-1,7]	1,65	0,371	0,360	0,343	0,320	0,266	0,211	0,173
1,55		0,349	0,338	0,322	0,300	0,250	0,198	0,163	
Limon sableux (LMS, LAS)	[1,5-1,6]	1,55	0,355	0,344	0,313	0,259	0,209	0,189	0,160
		1,45	0,332	0,322	0,293	0,242	0,196	0,177	0,149
	]1,6-1,7]	1,65	0,355	0,345	0,325	0,290	0,236	0,182	0,144
		1,55	0,333	0,324	0,305	0,273	0,222	0,171	0,135
	1,75	0,324	0,301	0,308	0,292	0,245	0,208	0,137	
1,65	0,305	0,284	0,290	0,276	0,231	0,196	0,129		
Limon très sableux (LS, LSA)	[1,5-1,7]	1,60	0,334	0,310	0,282	0,246	0,214	0,182	0,160
		1,50	0,314	0,291	0,264	0,231	0,201	0,171	0,150
	]1,7-1,9]	1,80	0,317	0,304	0,288	0,270	0,252	0,211	0,160
		1,70	0,299	0,287	0,272	0,255	0,238	0,199	0,151
Sable argilo-limoneux (SL, SA)	[1,6-1,75]	1,68	0,306	0,286	0,254	0,212	0,180	0,148	0,121
		1,58	0,288	0,269	0,239	0,199	0,169	0,139	0,144
	]1,75-1,9]	1,83	0,317	0,297	0,262	0,225	0,185	0,157	0,119
		1,73	0,299	0,280	0,247	0,213	0,174	0,149	0,113
Sable (S)	[1,6-1,7]	1,65	0,279	0,229	0,163	0,140	0,112	0,086	0,061
		1,55	0,262	0,216	0,154	0,132	0,105	0,081	0,057
	]1,7-1,8]	1,75	0,236	0,207	0,133	0,107	0,075	0,067	0,058
		1,65	0,223	0,195	0,125	0,101	0,071	0,063	0,055

Annexe B : Exemple de calcul pour les RU 5 et 15mm en octobre 2000

Date	P	P cum	E bac	E cum	P-Ebac	P-Ecum	RU5	EXC5	DEF 5	RU15	EXC15	DEF 15	RU35	EXC35	DEF 35
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
01/10/00	14.5	44.5	3.2	171.7	11.3	-127.2	5	11.3	0	11.3	0	25	11.3	0	68
02/10/00	0.5	45	4.2	175.9	-3.7	-130.9	5	0	0	0	0	100	0	0	100
03/10/00	8.5	53.5	4.7	180.6	3.8	-127.1	3.8	0	24	3.8	0	75	3.8	0	89
04/10/00	4.2	57.7	4.5	185.1	-0.3	-127.4	0	0	100	0	0	100	0	0	100
05/10/00	0.8	58.5	0.6	185.7	0.2	-127.2	0.2	0	96	0.2	0	99	0.2	0	99
06/10/00	0	58.5	0.5	186.2	-0.5	-127.7	0	0	100	0	0	100	0	0	100
07/10/00	0	58.5	1	187.2	-1	-128.7	0	0	100	0	0	100	0	0	100
08/10/00	0	58.5	3.1	190.3	-3.1	-131.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
09/10/00	0	58.5	3.5	193.8	-3.5	-135.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
10/10/00	0	58.5	5	198.8	-5	-140.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
11/10/00	0	58.5	4.5	203.3	-4.5	-144.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
12/10/00	0	58.5	5	208.3	-5	-149.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
13/10/00	0	58.5	5.5	213.8	-5.5	-155.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
14/10/00	0	58.5	6	219.8	-6	-161.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
15/10/00	0	58.5	3.5	223.3	-3.5	-164.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
16/10/00	0	58.5	3.5	226.8	-3.5	-168.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
17/10/00	0	58.5	4	230.8	-4	-172.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
18/10/00	0	58.5	3	233.8	-3	-175.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
19/10/00	0	58.5	3	236.8	-3	-178.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
20/10/00	0	58.5	2.5	239.3	-2.5	-180.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
21/10/00	0	58.5	3	242.3	-3	-183.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
22/10/00	4.1	62.6	2.7	245	1.4	-182.4	1.4	0	72	1.4	0	91	1.4	0	96
23/10/00	1.4	64	2.6	247.6	-1.2	-183.6	0	0	100	0	0	100	0	0	100
24/10/00	0	64	1.2	248.8	-1.2	-184.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
25/10/00	0.5	64.5	1	249.8	-0.5	-185.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
26/10/00	27.5	92	1.5	251.3	26	-159.3	5	21	0	15	11	0	26	0	26
27/10/00	1.5	93.5	4	255.3	-2.5	-161.8	5	0	0	0	0	100	0	0	100
28/10/00	0	93.5	0.5	255.8	-0.5	-162.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
29/10/00	0	93.5	1	256.8	-1	-163.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
30/10/00	0	93.5	1.5	258.3	-1.5	-164.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
31/10/00	0	93.5	2	260.3	-2	-166.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100

Légende des colonnes :

(1) : date en jours, mois, années,

(2) : P = pluies en mm/jour,

(3) : P.cum = pluies cumulées en mm, depuis le 01/09

(4) : E. bac = évaporation mesurée sur un bac de type Colorado, en mm/jour,

(5) : E. cum = évaporation bac cumulée en mm, depuis le 01/09

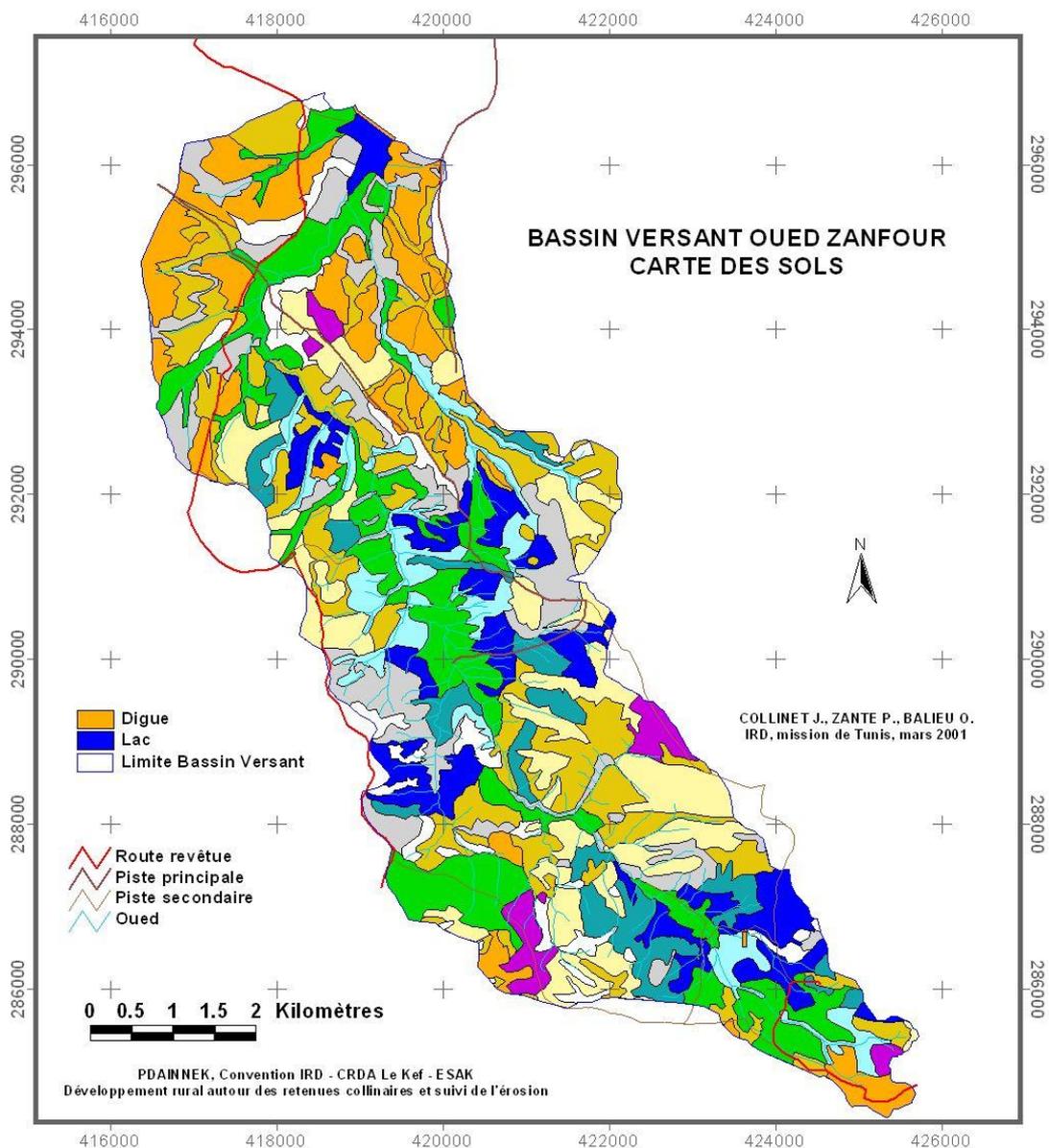
(6) : P-Ej = différence pluie-évaporation journalière, ce paramètre permet aussi de calculer les doses d'irrigation d'appoint,

(7) : P-Ej cum = différence pluies – évaporations cumulées, permet de connaître le déficit annuel

(8), (11) (14) : RU 5, RU 15, RU 35 sont les réserves hydriques utilisables de sols disposant de 5, 15 ou 35mm de capacité de stockage, ces réserves sont totalement remplies si la différence P-E est respectivement ≥ 5 , 15 ou 35mm,

(9), (12), (15) : Exc 5, Exc 15, Exc 35 sont les excédents journaliers qui se partagent entre ce qui peut drainer plus profondément que le sol lui-même (roche fissurée) et ce qui ruisselle, en notant que l'excédent de J_{-1} participe à la recharge de RU au jour J,

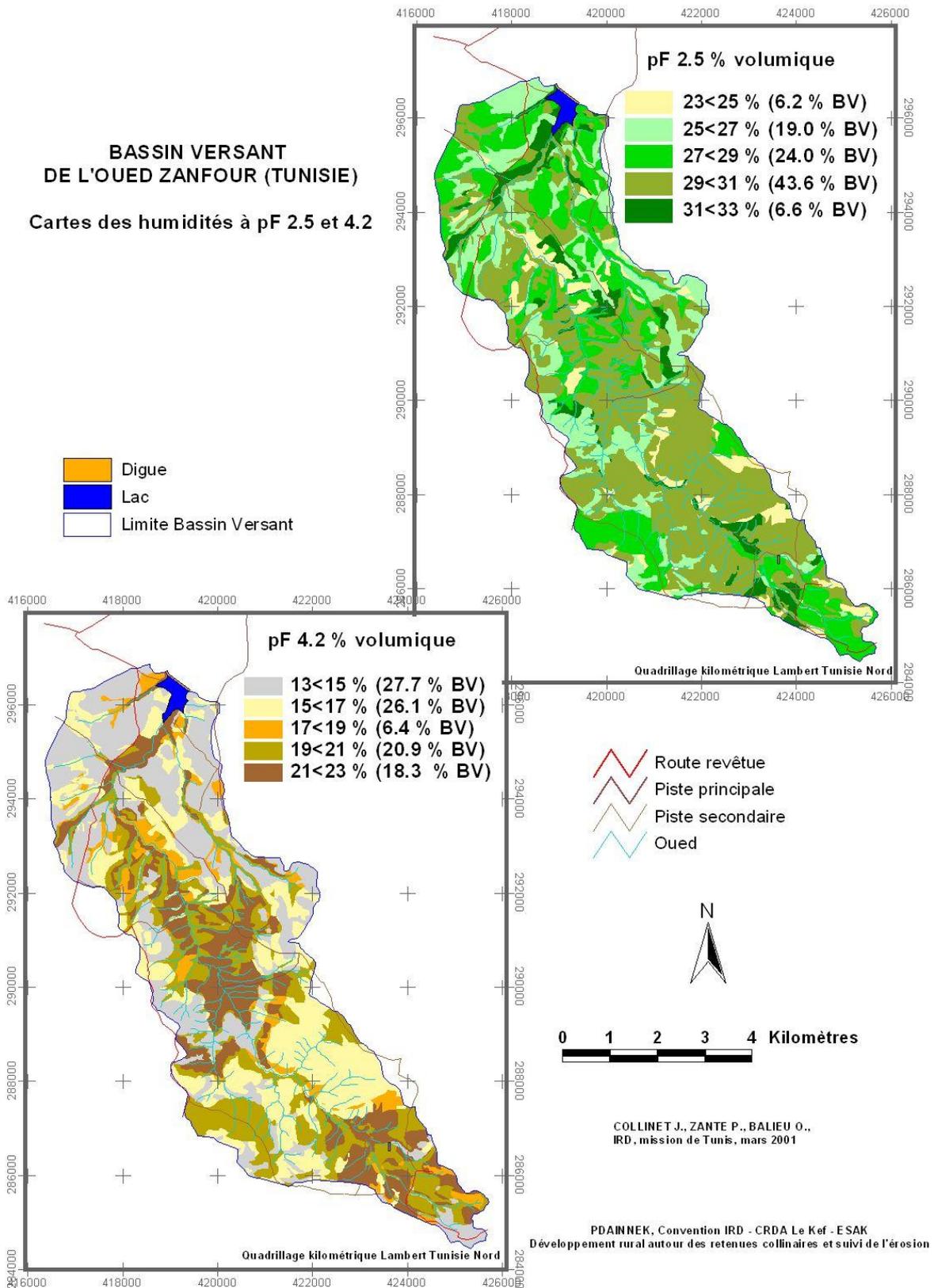
(10), (13), (16) : Déficit en % de la capacité de la RU



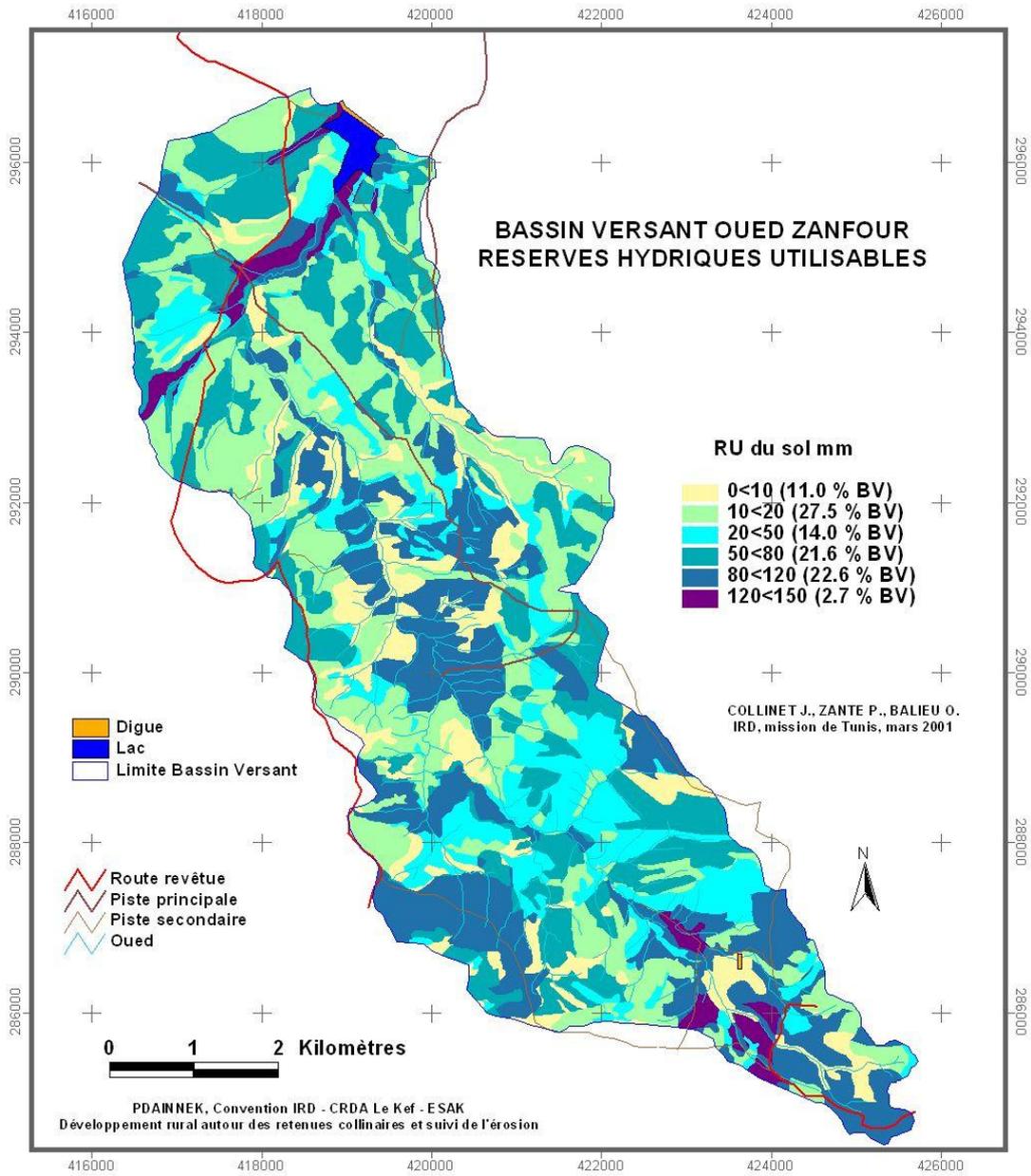
- | | | | |
|---|--|---|--|
|  | UC 1: Sols minéraux bruts, d'érosion, lithosoliques sur bancs calcaires et croûtes calcaires dures |  | U C 6: Sols peu évolués d'érosion, régosoliques, sur marnes |
|  | U C 2: Sols minéraux bruts, d'érosion, régosoliques sur bancs marneux |  | U C 7: Sols idohumiques à pédoclimats frais, marrons ou bruns modaux ou encroûtés sur roches carbonatées |
|  | U C 3: Sols minéraux bruts, d'apport colluvial et épandages d'éléments grossiers calcaires sur bancs rocheux |  | U C 8: Juxtaposition de sols calcimagnésiques carbonatés, bruns calcaires modaux, à croûtes, et bruns calciques, sur marnes dominantes |
|  | U C 4: Juxtaposition de sols peu évolués d'érosion, lithiques, sur calcaires durs et croûtes |  | U C 9: Juxtaposition de sols calcimagnésiques carbonatés, bruns calcaires modaux, à croûtes, sur calcaires dominants |
|  | U C 5: Sols peu évolués, d'érosion, ou d'apport colluvial, avec épandages d'éléments grossiers, sur matériaux meubles puis roches ou croûtes calcaires |  | U C 10: Juxtaposition de sols calcimagnésiques carbonatés, bruns calcaires modaux, à encroûtements sur colluvions de comblements de vallées ou terrasses |

Carte couleur 1 : Carte pédologique du bassin versant de Zanfour

**BASSIN VERSANT
DE L'OUED ZANFOUR (TUNISIE)**
Cartes des humidités à pF 2.5 et 4.2



Carte couleur 2 : Carte des humidités à pF 2,5 et à pF 4,2



Carte couleur 3 : Carte des réserves hydriques utilisables du bassin versant de Zanfour