

**COLLOQUE INTERNATIONAL LES 4, ET 5 JUIN 2012 .
CONSTANTINE (ALGÉRIE)**

**L'estimation de l'évapotranspiration réelle : quels réseaux
de suivi ?**

ZOUBEIDA BARGAOUI , AHMED HOUCINE, Hammouda Dakhlaoui

*Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, ENIT, BP 37 1002 Tunis, Université
Tunis El Manar, Tunisie*

Introduction

- La gestion intégrée des ressources en eau nécessite une évaluation des différents termes du cycle hydrologique avec une précision acceptable.
- la présentation s'intéresse à l'estimation de l'évapotranspiration réelle ETR, qui représente en quantité, le terme le plus important du cycle hydrologique.
- **Les réseaux** météorologiques et hydrologiques de mesure permettent via **la modélisation du bilan hydrique** d'atteindre cet objectif.
- Avec quelle précision ces réseaux restituent-ils ETR?

Importance de l'ETR pour la production primaire

Evolution-of-ModernHydrology.pdf - Adobe Reader

Fichier Edition Affichage Document Outils Fenêtre Aide

10 / 16 100%

observation, as well as adequately faithful to biology and physics? It is here that science meets art, and we call that engineering!

We choose to describe the water use of the plant community in terms of two parameters which measure its most physically significant features. We ask (i) how much is there? (The fractional coverage or 'canopy

ual equation form:

$$P - (1 - M)E_p\beta(S) - ME_p k_v - R(S) = \frac{dS}{dt} \quad (2)$$

We are searching for the natural laws that define k_v (vegetation type) and M (vegetation state) in terms of the local climate and soil. Having such relationships would allow us to solve the water balance equation for the moisture state, S (and hence the individual fluxes), without independent observations of the vegetation.

Fig. 17. Model of vegetation water use. (After Eagleson and Segarra.¹¹)

Fig. 18. Evapotranspiration as a surrogate for productivity. (After Whittaker²⁶ and Rosenzweig.²³)

228,6 x 304,8 mm

Rechercher

démarrer hydro Microsoft Word Microsoft PowerPoint ... Evolution-of-Modern... FR 08:57

Eagleson P. (1994). The evolution of modern hydrology. *Advances in Water resources*. 17 (1994) ; 3-18.

Adaptation de la végétation aux facteurs de stress environnementaux

The evolution of modern hydrology 13

Fig. 19. Vegetation selection and adaptation in response to environmental stress. (After Ehleringer.¹²)

Alternatively since the vegetation is readily observed

grows rapidly, using the available soil moisture as fast as the atmosphere can remove it (i.e. $k_v = 1$). In this case however, the soil moisture supply is rapidly exhausted and the stress grows. The plant produces its seeds and then, having no internal mechanism for regulating its water consumption, dies under the high stress. The seeds remain to start the cycle anew in the next season. Anthropomorphizing, these plants can be seen as risk-taking 'type B' individuals with a reckless, 'who cares about tomorrow? Use it while you have it', philosophy of life.

In contrast consider next the right-most solid curve of Fig. 19 labeled perennial desert plants. Here selection has provided a second strategy for coping with periodic and prolonged water-demand stress, that is species with the ability to restrict transpiration to less than atmospheric demand (i.e. $k_v \ll 1$) in order to survive the dry periods. Continuing the anthropomorphism, these are the risk-averse 'type A, belt and suspenders' individuals who have opted for maximum security and are literally saving for the next rainy day.

Perhaps the most interesting case, because of its nat-

228,6 x 304,8 mm

Rechercher

démarrer hydro Microsoft Word Microsoft PowerPoint ... Evolution-of-Modern... FR 08:58

Eagleson P. (1994). The evolution of modern hydrology. *Advances in Water resources*. 17 (1994) ; 3-18.

Problématique

- La combinaison des facteurs climatiques (température, humidité de l'air ou ensoleillement, précipitation) détermine le développement des espèces végétales dans une région donnée.
- La classification spatiale des facteurs écologiques (climatiques, édaphiques, topographiques et hydrologiques) place **la classification hydroclimatique comme cadre général** pour l'interprétation du bilan hydrique.
- La **prise en compte de la végétation** intervient dans la modélisation de l'évapotranspiration comme terme du bilan hydrique.
- Le calcul de l'évapotranspiration intègre le **couplage des flux d'eau avec les flux énergétiques**.

Problématique

- Le rayonnement solaire est le facteur énergétique essentiel, qui conditionne l'activité photosynthétique et contrôle le cycle vital des végétaux.
- **Le rayonnement solaire net à la surface** du sol se répartit essentiellement entre les flux de chaleur sensible et ceux de chaleur latente.
- l'ETR ou chaleur latente qu'un couplage est assuré entre bilans hydrique et radiatif.
- Facteur de contrôle des écoulements, **l'ETR constitue un paramètre bio-climatique** très important en milieu continental.

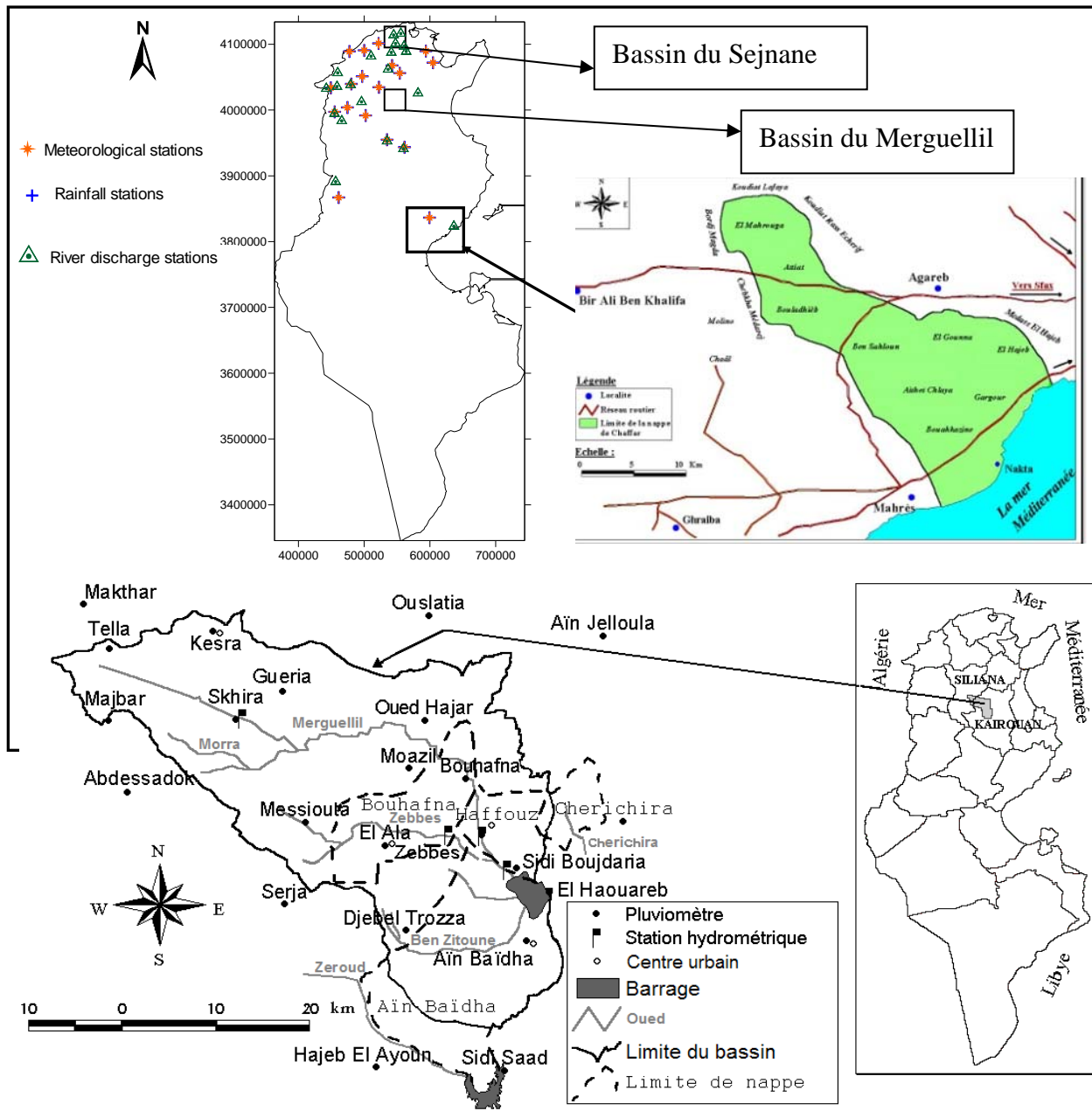
Data

- Wadi Chaffar watershed (250 km²) situated in the arid climate of southern Tunisia
- **Meteorological data** (solar radiation, air temperature and humidity, sky cloudiness, wind and Piche evaporation) are available from **September 1989 to August 1999**
- Daily reference evapotranspiration ET_0 computed according to Allen *et al.* (1998).
- The ET_0 is multiplied by the crop coefficient K_c of **olives trees** to obtain daily potential evapotranspiration (ETP) (Allen *et al.*, 1998).
- **Daily average basin rainfall data** are available from September 1985 to August 1999 using the Thiessen method based on a network of 10 raingauges.
- **Stream discharge data** are available for the basin outlet at the **daily time step** for the same period.

Méthodologie

- Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) à l'échelle régionale à partir du rayonnement net et de l'évapotranspiration potentielle (ETP)
 - Application à l'estimation de l'ETR régionale en Tunisie
- Evaluation par modèles de bilan hydrique
 - Le modèle HBV
 - Modèle MODCOU
 - Modèle BBH

Données



Estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle régionale à partir du rayonnement net et de l'évapotranspiration potentielle

- Estimation de l'évapotranspiration moyenne annuelle à partir de R_n et P exprimés en mm ou de ETP et P
- Modèle de Budyko (1948)

$$ETR/P = \phi(R_n/P) \quad \phi(x) = [x (\operatorname{th}(x^{-1})) (1 - \cosh(x) + \sinh(x))]^{1/2}$$

- Approximation de Hsuen Chen (1988)

$$ETR = ETP \left[\frac{(P/ETP)^K}{1 + (P/ETP)^K} \right]^{1/K}$$

Application à l'estimation de l'ETR régionale en Tunisie

- Neuf stations climatiques.
 - durée d'insolation, température minimale et maximale de l'air, humidité de l'air et pluviométrie, mensuelles (1990-2000)
- Débits moyens annuels d'un réseau de 20 stations hydrométriques contrôlant des bassins (superficies entre 56 et 9014 km²)
- Pluie moyenne interannuelle du bassin
 - publiée par la Direction Générale des ressources en eau dans ses rapports hydrométriques.
 - ou station pluviométrique représentative rattachée au bassin

Evaluation de l'ETR d'après les réseaux climatique, pluviométrique et hydrométrique

- Chaque station hydrométrique est rattachée à une station climatologique voisine.
- Rayonnement net interannuel estimé à la station climatologique appliqué au bassin versant pour estimer l'indice DI.
- la lame écoulee moyenne interannuelle = moyenne interannuelle des volumes écoulés est rapportée à la superficie contrôlée.
- $ETR = \text{Pluie moyenne interannuelle} - \text{lame écoulee}$

Figure 2. ETR des bassins contrôlés et des modèles en fonction de la pluviométrie
ETR estimated compared to ETR of Gauging stations vs rainfall

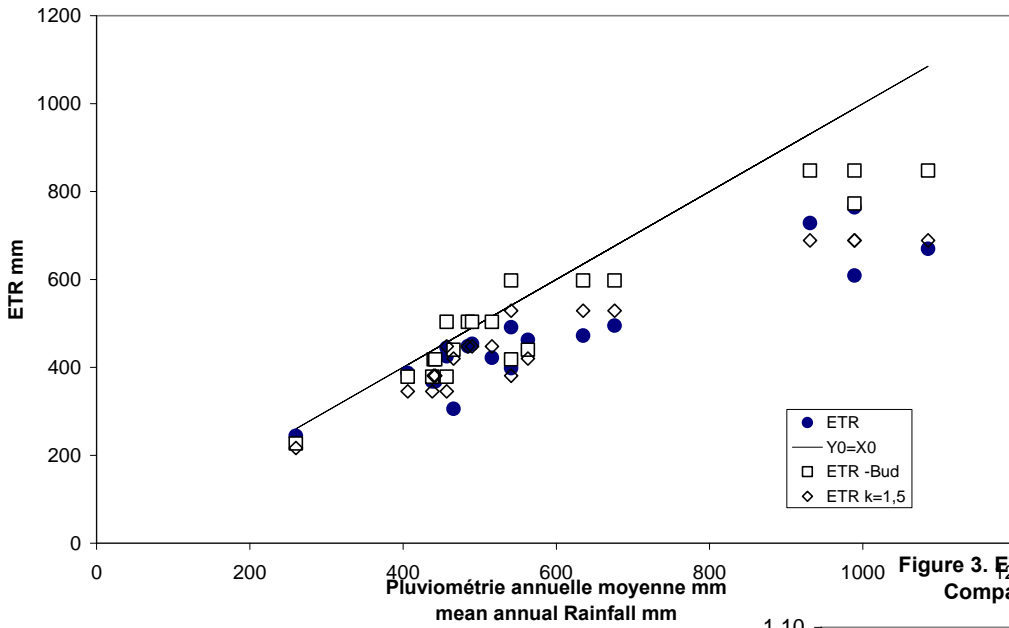
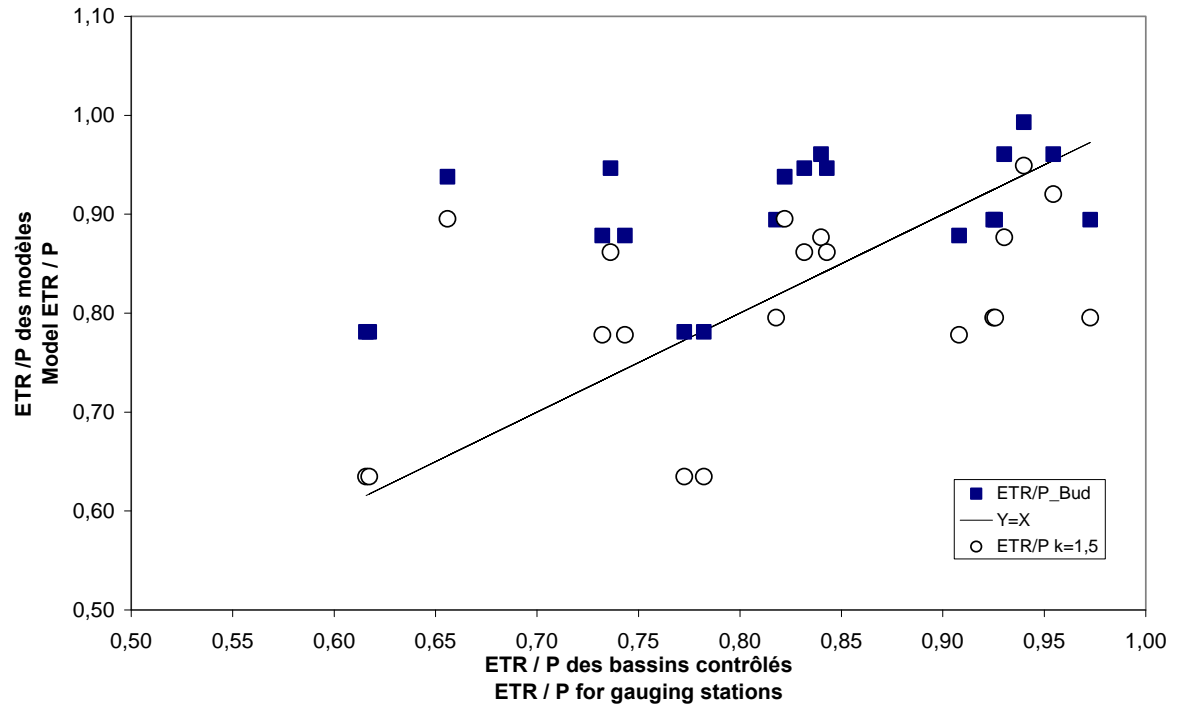
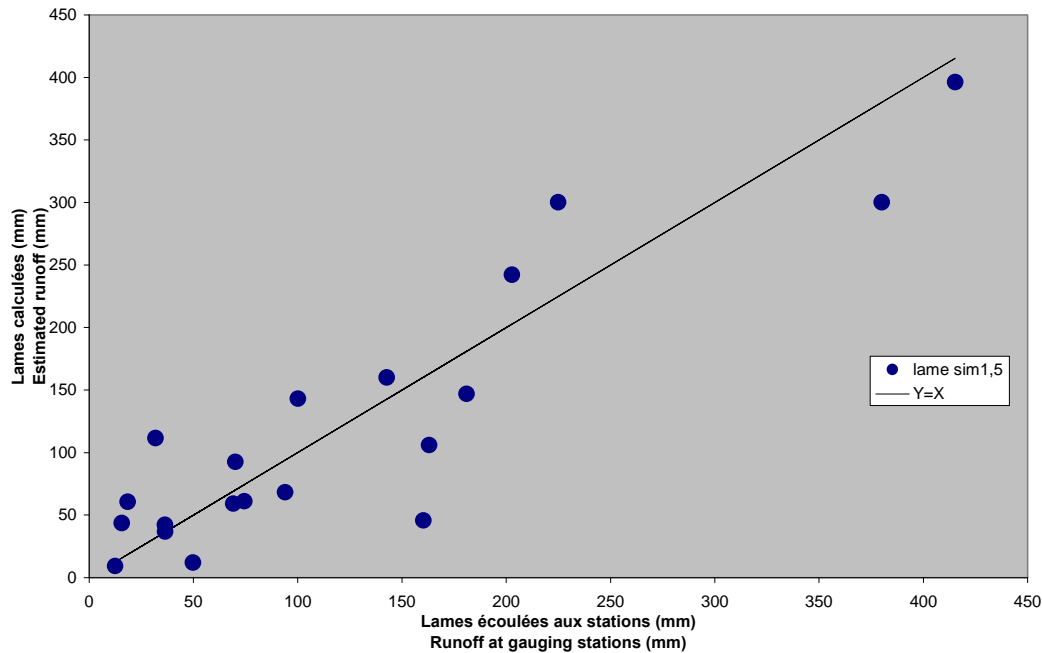


Figure 3. ETR/P des bassins contrôlés comparé aux indices calculés (ETP selon Turc)
Comparison of estimated ETR/P to gauging stations values (ETP Turc model)



Calage du modèle HC (k=1.5)

Figure 4. Comparaison des lames écoulées du modèle HC (k=1,5) avec à celles des stations
comparison of stations runoff to the HC (k=1) model simulations



Evaluation par un modèle de bilan hydrique (1)

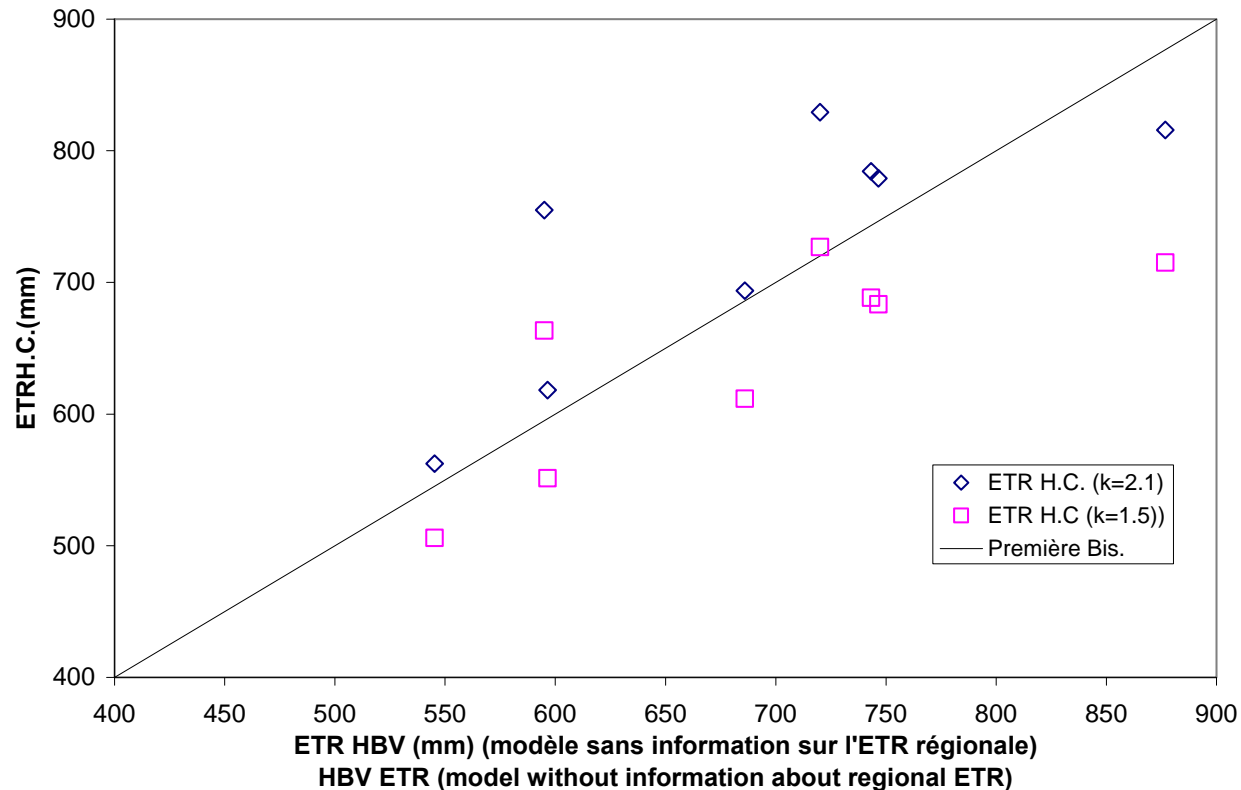
- Modèle HBV (Begström, 1976) de transformation pluie-débit conceptuel à réservoirs pour la prédiction des débits moyens journaliers
- Bassin versant montagneux de l'oued Sejnane 378 km², qui fait partie des 20 bassins étudiés plus haut.
- Période d'observation : huit années hydrologiques (du premier septembre au 31 août) entre 1964 -1965 à 1970-1971.

calage du modèle

- une fonction objectif qui considère deux termes.
- $FO = \text{Nash}_{\text{DEB}} - w \text{ER}_{\text{BILAN,DEBITS}}$
- Nash_{DEB} coefficient de Nash correspondant à l'écart entre débits moyens journaliers calculés et mesurés
- $\text{ER}_{\text{BILAN,DEBITS}}$ est la valeur absolue de l'erreur relative sur le total annuel des débits. (terme de bilan hydrique)
- w poids généralement pris égal à 0.1 (Lindström and al. 1997)

Après optimisation, on trouve un coefficient de Nash des débits est égal à 0.81 et un écart relatif ($100 * ER_{\text{BILAN,DEBITS}} / \text{apport annuel moyen} = 5\%$).

Figure 5. séries annuelles de l'ETR des modèles H.C en fonction de l'ETR HBV
Figure 5. Annual ETR for models HC vs ETR from HBV simulations

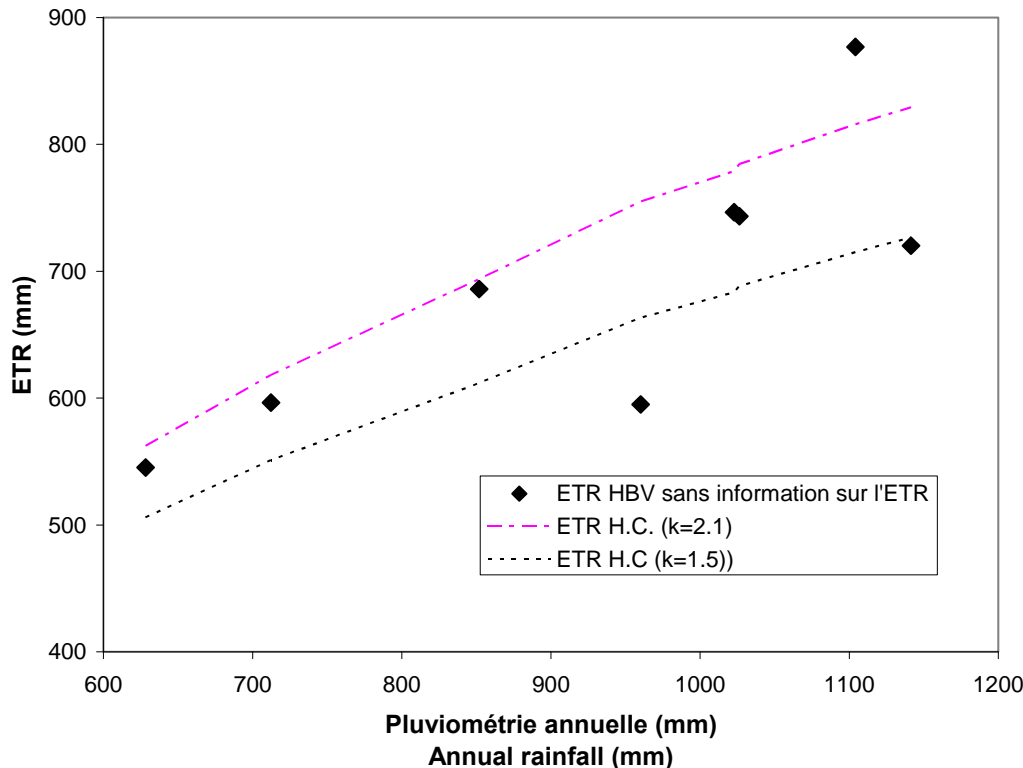


La Figure 5 compare l'ETR HBV et l'ETR H.C pour les années de simulation. Il y a cohérence des résultats.

La figure 6 reporte l'ETR annuelle simulée par HBV en fonction de la pluviométrie.

Figure 6. ETR annuelle simulée par HBV comparativement aux modèles HC portée en fonction de la pluviométrie

Figure 6. Annual values of ETR (HBV and HC models) vs precipitation data



Les simulations par HBV sont plus proches de celles du modèle HC pour $k=2.1$ (rouge) que pour $k=1.5$ (noir) alors que le modèle d'ETR régional est plus adéquat avec $k=1.5$.

Malgré un très bon niveau de reconstitution des débits (Nash=0.81), l'information sur les débits ne semble pas suffisante pour garantir des sorties d'ETR compatibles avec la zonalité climatique et géobotanique

contrôle de l'ETR par la pluviométrie

Evaluation par un modèle de bilan hydrique (2)

- Estimation du bilan hydrique du bassin du Merguellil (Tunisie Centrale) (Thèse de A. Kingumbi à l'ENIT)
- Le modèle MODCOU (Ledoux, 1980) qui simule à la fois les écoulements de surface et souterrains a été utilisé pour la prédiction des débits des cours d'eau et de l'évolution piézométrique.
- Le bassin comprend un grand nombre d'aménagements de conservation en eau et sols (CES) qui ont été pris en compte dans la modélisation à travers une paramétrisation de la fonction de production.

Kingumbi A., Bargaoui Z., Ledoux E., Besbes M., Hubert P. et (2007), Modélisation hydrologique stochastique d'un bassin affecté par des changements d'occupation: cas du Merguellil en Tunisie Centrale, *Hydrological Sciences Journal*, 52(6), 1232-1253.

Données

- Vingt trois stations pluviométriques situées sur le bassin et dans ses environs sont utilisées pour estimer les précipitations d'entrée au modèle sur une période d'environ 40 ans.
- L'estimation des prélèvements en eau dans la nappe phréatique a été effectuée sur la base des annuaires quinquennaux publiés par le Ministère de l'Agriculture (DGRE, 1985-2000).
- Pour la nappe profonde les annuaires d'exploitation des nappes profondes (DGRE, 1973-2000) ont été utilisés.
- Les séries de quatre stations hydrométriques ainsi qu'une série d'apports journaliers reconstitués par bilan hydrique pour la retenue d'El Houareb.
- Une carte piézométrique de référence a été construite pour l'année 1970 en vue de la reconstitution de l'état initial du système souterrain.
- Treize puits ont été sélectionnés pour suivre l'évolution temporelle du niveau piézométrique de la nappe phréatique. Les mesures piézométriques sont semestrielles.
- Le suivi temporel du niveau piézométrique de la nappe profonde est effectué à l'aide de treize piézomètres.
- Les transmissivités et les coefficients d'emmagasinement ont été estimés d'après une soixantaine d'essais de pompage.

Calage MODCOU

- Le calage du modèle a été effectué par une approche stochastique.
- Dix milles jeux de paramètres du modèle Modcou ont été ainsi générés avec lesquels une reconstitution des débits et des piézométries a été effectuée.
- Un critère numérique de sélection des meilleures simulations inspiré de Lamb *et al.* (1998) présente l'avantage de pouvoir comparer les sorties du modèle aux mesures sur un ou plusieurs sites.
- Ref: Lamb, R. Beven, K. & Myrabo, S. (1998) Use of spatially distributed water table observations to constrain uncertainty in a rainfall-runoff model. *Adv. Water Resour.*, **22**(4), 305-317.

Calage MODCOU

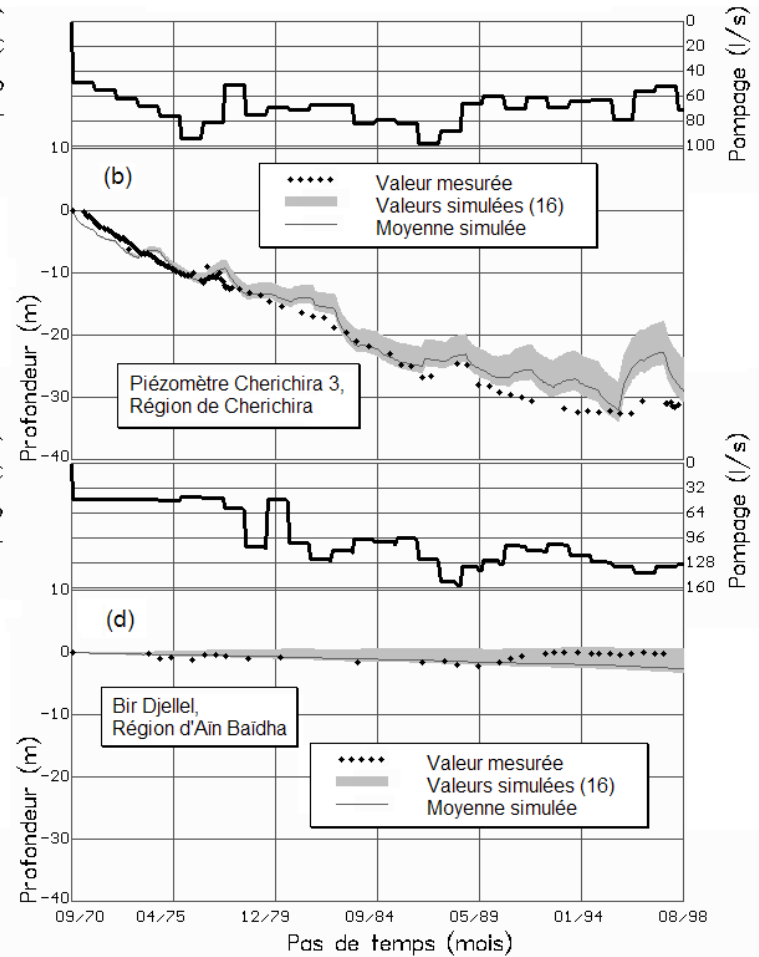
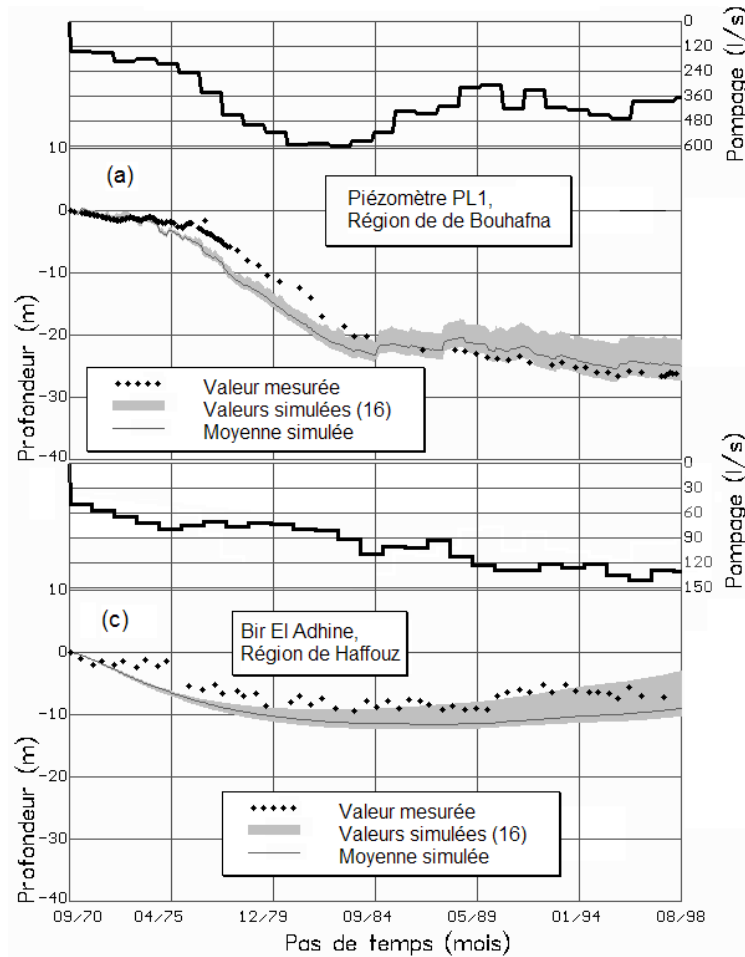
$$\text{Fonction objectif} = \sum_{j=1}^M W_j * \exp \left[- \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (y_{o,i,j} - y_{c,i,j})^2}{\sum_{i=1}^{n_j} (y_{o,i,j} - \overline{y_{o,j}})^2} \right]$$

- Avec $y_{c,i,j}$ et $y_{o,i,j}$ débit ou piézométrie calculé et observé à l'instant i à la station j ;
- $\overline{y_{o,j}}$ moyenne des n_j valeurs observées à la station j ;
- W_j poids affecté à la station j ;
- M nombre total des sites de mesures.
- Les pondérations (W_j) ont été attribuées à parts égales entre les stations hydrométriques et piézométriques.

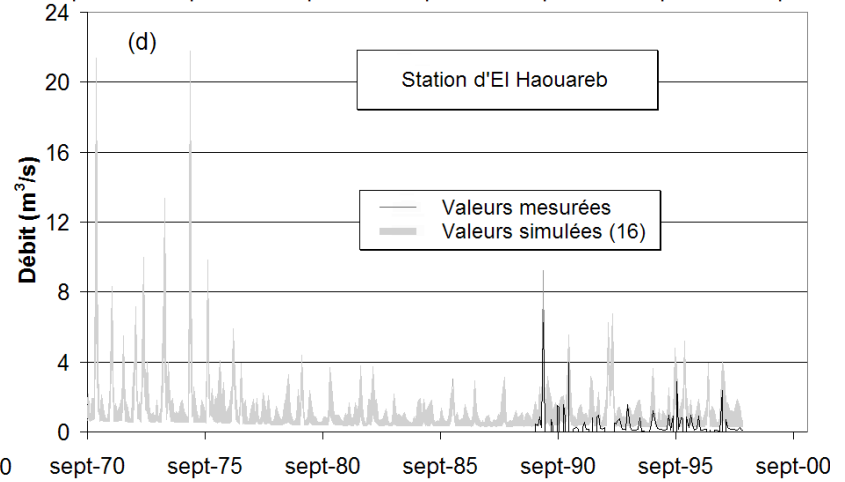
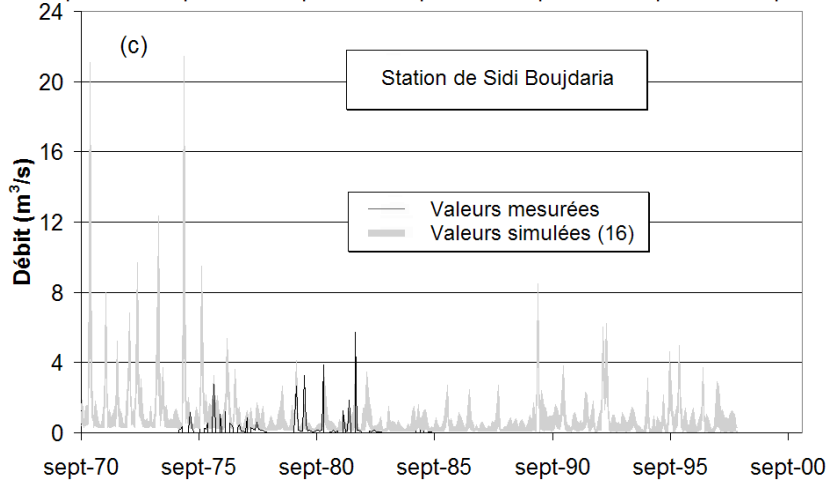
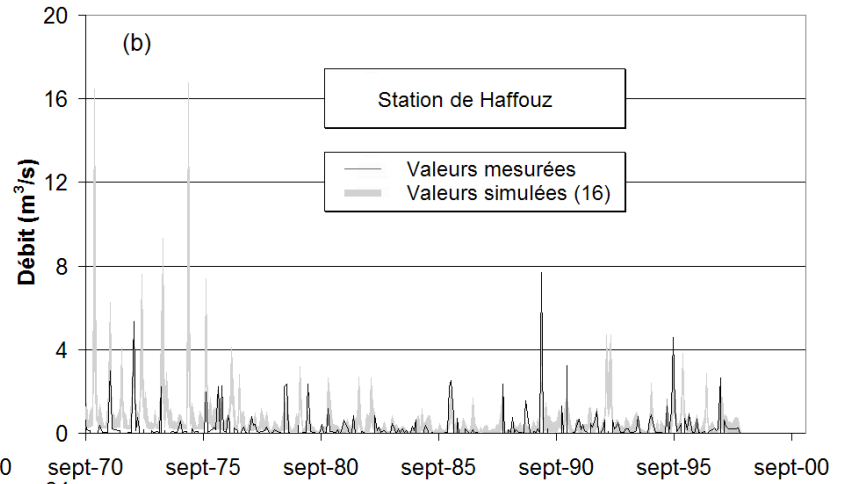
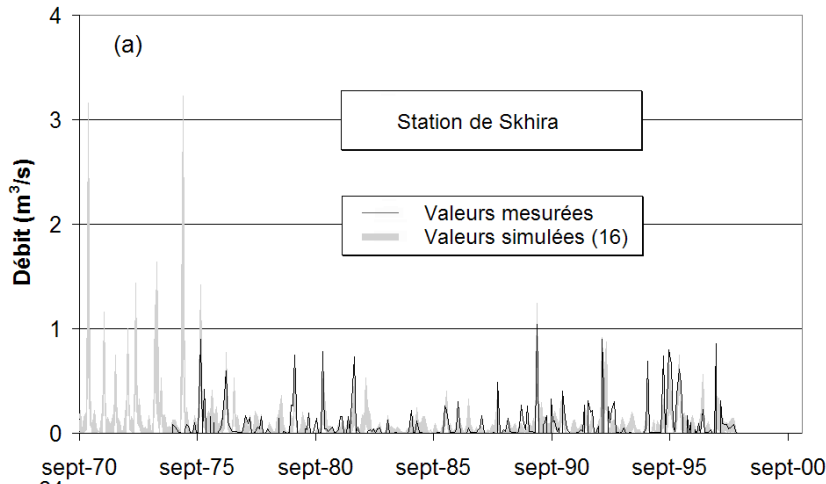
Calage MODCOU

- Les valeurs de la fonction objectif sont calculées pour les 10 000 jeux de paramètres (simulations) générés aléatoirement et sont classées pour en identifier les meilleures.
- On trouve $FO < 0.7$ pour toutes les simulations.
- En ne considérant que les simulations avec $FO > 0.65$ on obtient **16 jeux de paramètres** qui seront retenus.
- L'analyse des éléments du bilan hydrologique permet de constater que **l'évapotranspiration constitue de loin l'élément prépondérant du bilan hydrologique de surface puisqu'elle représente environ 92% des précipitations** tombées annuellement sur le bassin du Merguellil sur la période étudiée (1970-1998). Le ruissellement et l'infiltration représentent respectivement 5% et 3% des précipitations.

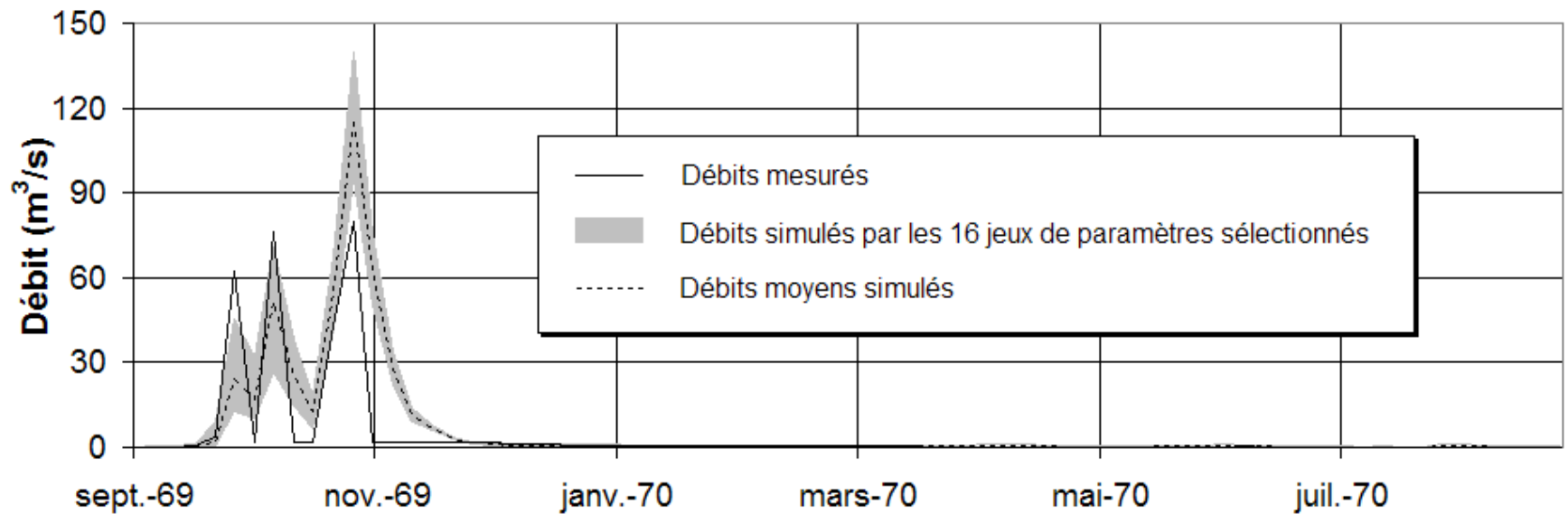
Qualité du calage de la piézométrie



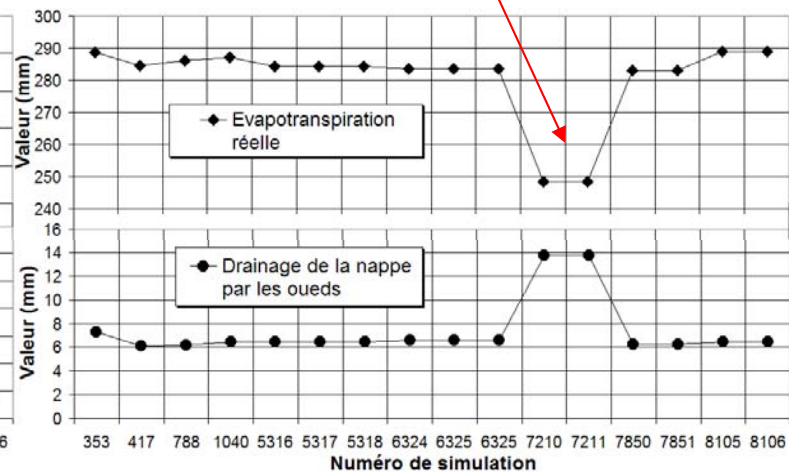
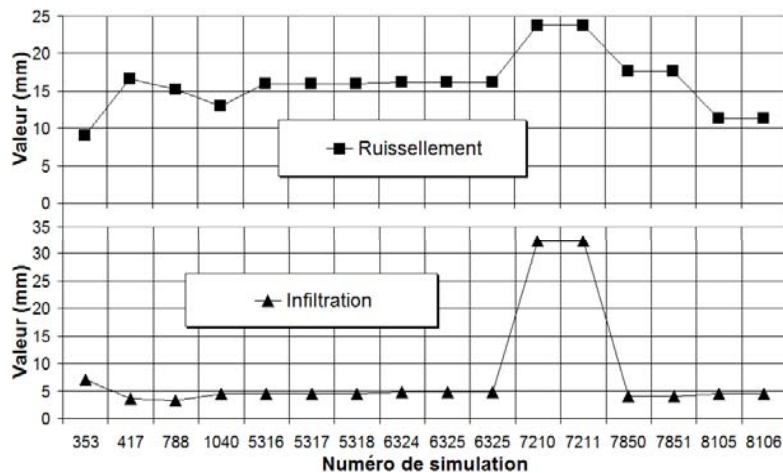
Qualité du calage des débits



Validation du modèle par la reconstitution d'une crue exceptionnelle (hors période de calage)



- Parmi les 16 meilleures solutions, deux se distinguent et conduisent à des estimations plus faibles de l'ETR moyenne interannuelle au profit des autres termes.
- Ainsi, malgré le très nombre de séries observées de pluie, débit et piézométrie adoptées pour caler e modèle, et malgré un calage acceptable pour les débits moyens journaliers, **il reste une grande indétermination sur les termes du bilan hydrique notamment l'ETR.**



Calage BBH modifié (avec l'information sur les débits)

- Une fonction objective reliée à la qualité de **reconstitution des lames écoulées à l'échelle annuelle** est considérée. Elle quantifie le **biais annuel relatif en valeur absolue**.

$$C_y(\sigma, \eta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| (y_{si} - y_{oi}) / y_{oi} \right|$$

- avec y_{oi} lame écoulée annuelle pour l'année i ; y_{si} lame écoulée annuelle calculée par le modèle pour l'année i ; N nombre d'années d'observation
- Les solutions verifiant: $C_y(\sigma, \eta) < \alpha\%$ + **Nash mensuel des débits** $R_N > R_{N0}$ fixée sont sélectionnées.

Calage BBH modifié (avec l'information sur l'ETR)

- Utilisant l'information sur E_m un autre critère est proposé: $C_E(\sigma, \eta)$ valeur absolue de l'erreur relative sur l'évapotranspiration annuelle en comparaison avec E_m

$$C_E(\sigma, \eta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(E_{si} - E_m) / E_m|$$

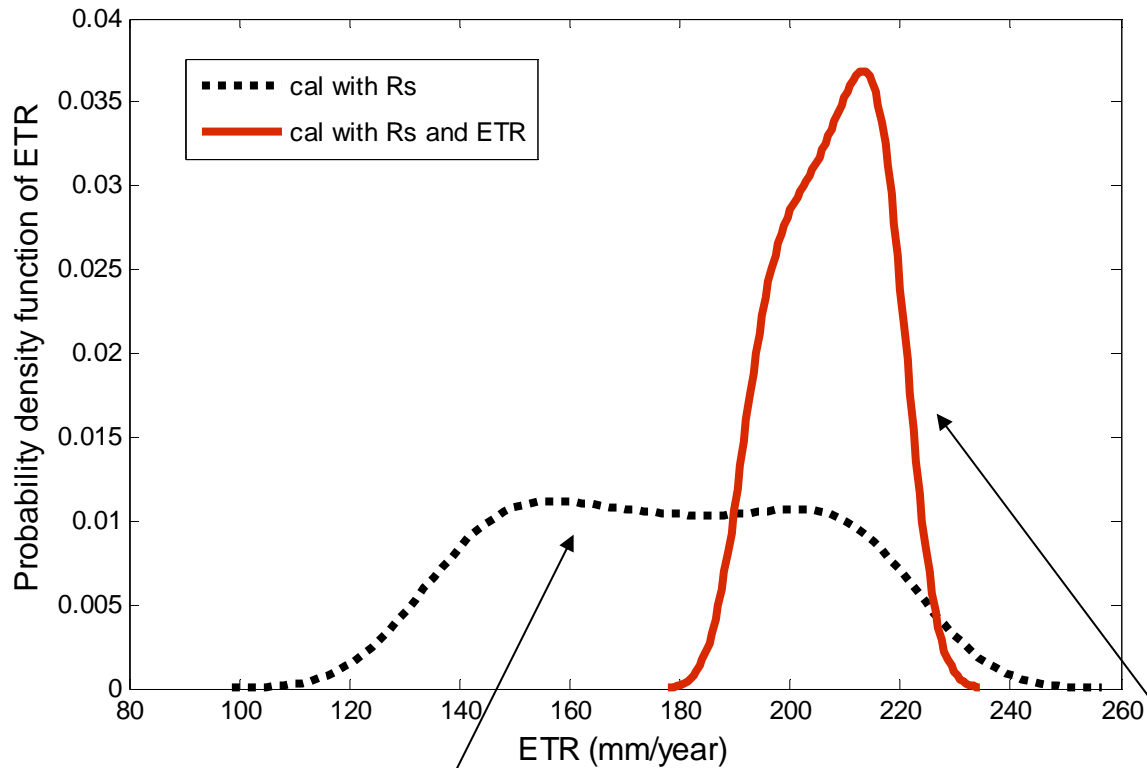
$$C_y(\sigma, \eta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(y_{si} - y_{oi}) / y_{oi}|$$

- Les solutions vérifiant $C_y(\sigma, \eta) < \alpha + C_E(\sigma, \eta) < \alpha' + R_N > R_{N0}$ sont sélectionnées.
- Avec $\alpha = 20\%$; $\alpha' = 30\%$;
- $R_{N0} = 0.5$

Données

- Bassin du Chaffar (250 km²) en climat aride.
- Pluies moyennes journalières (1989-1990, 1998-1999) à partir de 10 pluviomètres.
- Débits moyens journaliers (1989-1990, 1998-1999) convertis en lames écoulées.

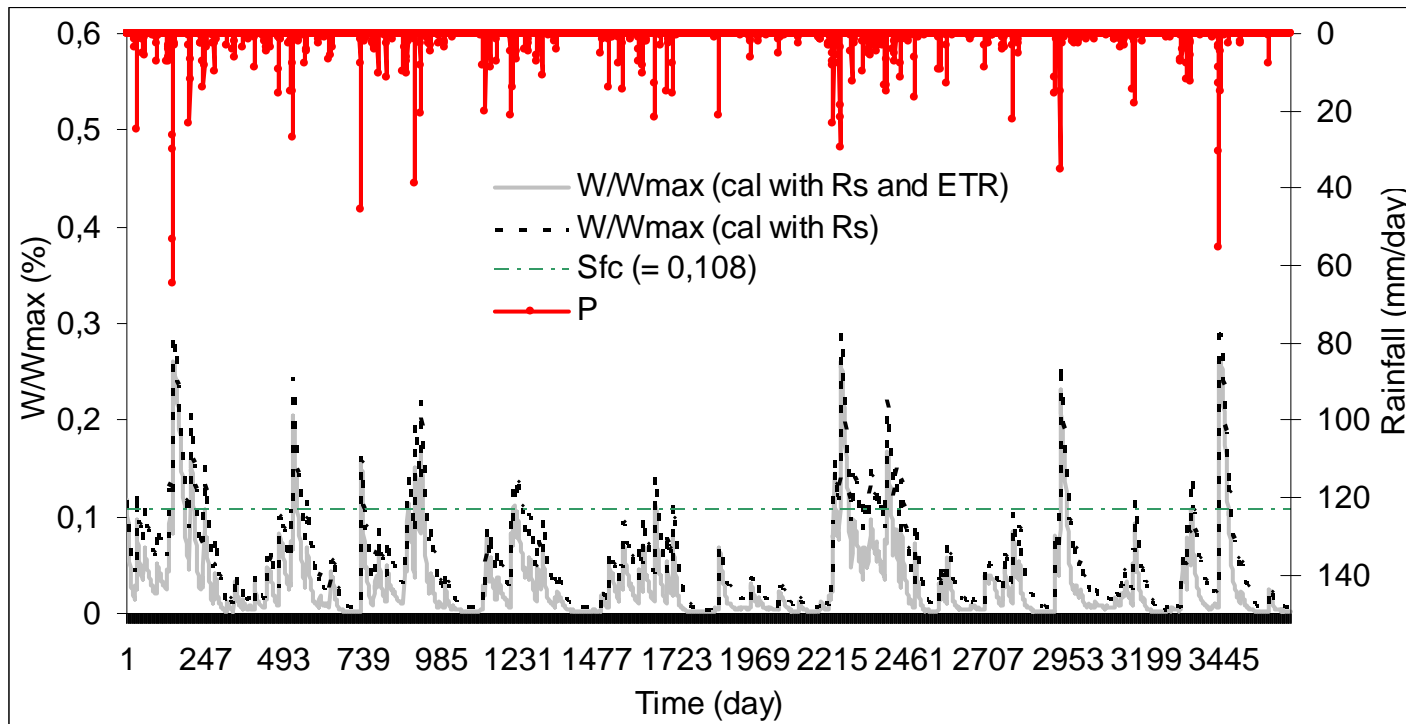
Différence entre les estimations de l'ETR d'après les deux critères



Grande incertitude sur ETR si seule l'information sur les débits est utilisée

Réduction de l'incertitude sur ETR si l'information sur E_m est introduite

Sorties du modèle



Suivi de la teneur en eau du sol au cours du temps

- Pour le suivi de la teneur en eau du sol au cours du temps, on adopte les variables suivantes :
- la teneur en eau q volumique (m^3/m^3) qui représente le volume d'eau dans l'échantillon de sol rapporté au volume total de sol $=V_w / V_{tot}$.
- la teneur en eau massique (kg/kg) représentant la masse d'eau dans l'échantillon de sol rapportée à la masse de la matrice solide de cet échantillon. Par convention, on sèche l'échantillon dans une étuve à $105\text{ }^\circ\text{C}$ (jusqu'à obtention d'un poids constant). La pesée donne la masse sèche (de la matrice solide de l'échantillon). La durée de séchage est variable selon les sols et leur contenu en matière organique (autour de 24h). On a une relation entre teneur en eau massique et volumique. $= (\text{masse volumique sèche} / \text{masse volumique de l'eau}) * \text{teneur en eau massique}$; les masses volumiques sont en kg/m^3
- le degré de saturation s qui représente le volume d'eau rapporté au volume des vides $=V_w / V_v$.

Mesure de la teneur en eau du sol

- se fait soit
 - directement par **mesures gravimétriques** (relevé d'échantillons à la tarière et détermination de q au laboratoire)
 - soit sur site **indirectement en utilisant des mesures de certaines propriétés du sol** et en reliant les valeurs à la teneur en eau du sol par une courbe d'étalonnage ;
- **Le TDR (time domain reflectometry) est une méthode due à Topp et al. (1980)** (Topp, G. C, Davis, J. L. & Annan, A. P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Wat. Resour. Res.* 16, 574-582).
- Elle repose sur la propagation dans le sol d'une onde électromagnétique. Le temps de propagation dépend de la **capacité diélectrique du sol** ϵ , qui est différente pour l'eau (valeur égale à 80 à 20° C) et le sol sec (2 à 5). Elle est égale à l'unité pour l'air.
- La présence d'eau dans le sol est donc indiquée par la valeur de ce paramètre. Un signal électromagnétique se déplace le long de deux tiges métalliques implantées dans le sol jusqu'à la profondeur de mesure puis se propage dans le milieu entre les deux tiges et autour; on analyse le signal réfléchi, ce qui permet **d'estimer la constante diélectrique du milieu et de déduire la teneur en eau volumique**.
- Une **relation polynomiale** a été proposée par Todd et al. (1980) entre la constante diélectrique et la teneur en eau du sol. $\theta = (0.043 \epsilon^3 - 5.5 \epsilon^2 - 292 \epsilon - 530) 10^{-4}$. (on a pu également mettre en évidence d'une relation entre ϵ et la conductivité électrique du sol).

Conclusions

- Le calage des modèles de bilan hydrique à partir de l'information hydrométrique et piézométrique est insuffisant pour cerner l'ETR
- La mesure de la teneur en eau du sol pourrait pallier à cette carence
- L'estimation satellitaire est également une perspective mais nécessite tout autant un calage au sol.
- ces suivis nécessiteraient de résoudre des questions d'ordre institutionnel (quels sont les services les plus à même de réaliser ces mesures ?)
- L'estimation précise de l'ETR suppose des synergies entre les services météorologiques, hydrologiques, pédologiques, agricoles, forestiers et environnementaux.
- Le concept d'**écohydrologie** proposée par Eagleson depuis 1994 semble approprié pour saisir cette question

Merci