



HAL
open science

Comment l'évolution de l'évaporation potentielle impacte les sécheresses

Paul Royer-Gaspard, Vazken Andréassian, Guillaume Thirel, Charles Perrin

► **To cite this version:**

Paul Royer-Gaspard, Vazken Andréassian, Guillaume Thirel, Charles Perrin. Comment l'évolution de l'évaporation potentielle impacte les sécheresses. Colloque UNESCO-SHF : " Sécheresses 2019, Paris 11-12 et 13 décembre 2019 ", Dec 2019, Paris, France. hal-03278562

HAL Id: hal-03278562

<https://hal.inrae.fr/hal-03278562>

Submitted on 5 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Comment l'évolution de l'évaporation potentielle impacte les sécheresses

Paul ROYER-GASPARD¹, Vazken ANDRÉASSIAN¹,
Guillaume THIREL¹, Charles PERRIN¹

¹ Irstea, Unité de Recherche HYCAR, Antony, France – paul.royer-gaspard@irstea.fr

Les variations interannuelles du débit des rivières sont intimement liées à celles du climat, en particulier aux variations des précipitations et de l'évaporation. Tandis que les précipitations varient fortement d'une année sur l'autre, l'évaporation évolue lentement, avec des variations naturelles parfois difficiles à différencier du signal de celui du réchauffement planétaire. L'évaluation de l'évaporation potentielle, utilisée en hydrologie pour accéder à l'évaporation réelle, et de son impact sur les sécheresses est difficile car cette grandeur n'est pas directement mesurable (sauf exception) et elle résulte donc presque toujours d'un calcul. Pour nous aider à choisir la formulation de l'évaporation potentielle la plus sûre pour des projections futures, nous nous proposons d'utiliser un large ensemble de bassins versants français pour lequel de longues séries de débits et de données climatiques permettent d'évaluer l'élasticité du module de l'écoulement aux précipitations et à l'évaporation potentielle au moyen d'une relation linéaire. Nous testons sur cet échantillon de bassins un ensemble de formulations de l'évaporation potentielle populaires en hydrologie et discutons des possibilités d'identifier la formule la plus représentative des variations interannuelles du débit à l'échelle de la France.

Mots-clefs : évaporation potentielle, élasticité empirique, variabilité naturelle.

How the evolution of potential evaporation impacts droughts

Interannual variations in river flow are closely related to those of the climate, primarily variations in precipitation and in evaporation. While precipitation varies greatly from one year to the next, evaporation is slowly changing and its natural variations sometimes difficult to differentiate from the signal of the global warming. The evaluation of potential evaporation, used in hydrology to assess actual evaporation, and its impacts on droughts is difficult because this quantity is not directly measurable (or exceptionally) and it therefore almost always results from a model. To help us choose the the most reliable formulation of potential evaporation for future projections, we propose to evaluate the elasticity of the modulus of flow to precipitation and potential evaporation through a linear relationship, on a large set of French catchments for which long series of flows and climatic data are available. On this set of basins, we test a set of potential evaporation formulations popular in hydrology and we discuss the possibilities of identifying the most representative formula for the interannual variations of flow at the scale of France.

Key words: potential evaporation, empirical elasticity, natural variability.

I INTRODUCTION

Les sécheresses suivent des dynamiques bien plus lentes que celles des événements de crue. Dans les grands bassins versants, les sécheresses hydrologiques ne s'installent qu'au terme de plusieurs mois et elles peuvent être favorisées par la succession d'années déficitaires en précipitations. Une analyse interannuelle est parfois nécessaire pour étudier la dynamique générale de ces événements.

Les déterminants du niveau de sécheresse d'une région sont au premier ordre les précipitations et au second ordre l'évaporation. Alors que les premières sont mesurées depuis la fin du 19^e siècle en France grâce à un réseau dense de stations ponctuelles au sol, l'évaporation reste une grandeur physique dont les mesures sont rares et/ou peu fiables. À défaut de mesures directes, les hydrologues ont en général recours à des modèles pour évaluer l'évaporation potentielle, quantité d'eau que les conditions atmosphériques permettraient d'extraire du bassin versant si le sol et les plantes étaient saturés en eau et l'air suffisamment sec. Cette grandeur étant théorique, sa définition exacte est sujette à controverse au sein de la communauté et il en résulte une profusion de formules pour la calculer, presque irréfutables directement [Lhomme, 1997 ; McMahan et al., 2013]. Les différences conceptuelles entre les modèles concernent la terminologie même de la notion d'évaporation, l'inclusion des effets météorologiques locaux et les rétroactions de l'évaporation dans le calcul de la demande évaporatoire (et donc de la surface sur laquelle ce calcul est pertinent).

Dans le domaine de la modélisation hydrologique, les résultats sont *en apparence* peu influencés par le choix de la formulation retenue pour calculer l'évaporation potentielle, limitant ainsi les possibilités d'arbitrer définitivement [Oudin et al., 2005a]. Des formulations simples se révèlent parfois être les meilleures pour simuler le débit d'une rivière [Oudin et al., 2005b]. Une raison avancée pour expliquer ce constat est la compensation des différences entre les diverses formules d'évaporation potentielle par le calage des paramètres des modèles pluies-débits, via un ajustement des paramètres, afin de fermer le bilan de hydrique. La compensation opérée par les paramètres en calage peut néanmoins se faire au prix des performances du modèle en évaluation lorsque les données d'entrée sont fausses [Andréassian et al., 2012; Kelleher & Shaw, 2018] et diminuer considérablement ses capacités prédictives en contexte de changement climatique [Thirel et al., 2015].

Dans ce contexte, nous avons tenté d'éclairer les différences de quelques formulations d'évaporation potentielle couramment utilisées en hydrologie en revenant aux fondamentaux de la modélisation. Les modèles hydrologiques simples choisis relient les anomalies interannuelles de précipitations et d'évaporation potentielle à celles des débits par une relation linéaire. Un autre modèle linéaire reliant le rendement hydrologique des précipitations (\bar{Q}/\bar{P}) et l'indice d'humidité, inspiré de la formule proposée par Oldekop [1911], a été utilisé en complément.

II BASE DE DONNÉES

II.1 Échantillon de bassins versants d'étude

L'échantillon est constitué de 395 bassins versants en France métropolitaine (Figure 1). Ces bassins versants ont été choisis peu influencés par les activités humaines, afin de mieux identifier les effets de la variabilité climatique sur les débits observés. Ils sont également caractérisés par des régimes principalement pluviaux et la fraction solide moyenne des précipitations n'excède pas 10%. L'étude portant sur des anomalies annuelles, les années hydrologiques pendant lesquelles plus de 10% des données étaient absentes ou douteuses ont été retirées des séries temporelles pour ne pas fausser la répartition des années sèches et humides. Toutes les années hydrologiques ont été définies à partir du 1^{er} octobre de l'année calendaire précédente jusqu'au 30 septembre suivant. Les séries obtenues contiennent au minimum 20 valeurs, entre 1959 et 2017.

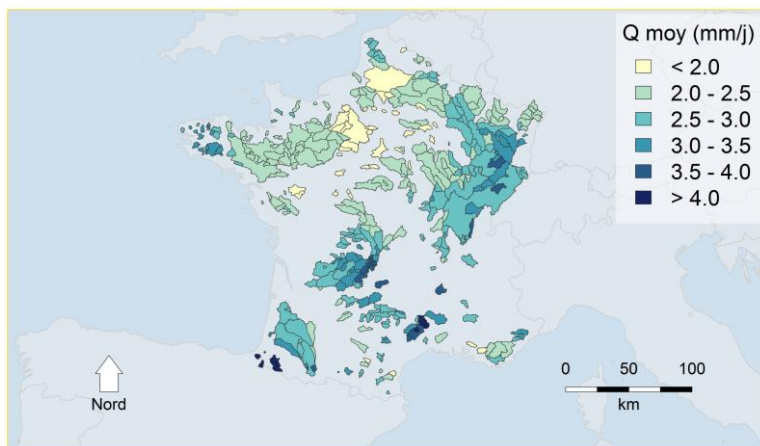


Figure 1. Carte des bassins versants utilisés. L'échelle de couleur représente le débit moyen à l'exutoire.

II.2 Formules d'évaporation potentielle

Les formulations d'évaporation potentielle évaluées dans cet article sont celles d'Oudin et al. [2005], de Penman [1948], de Penman-Monteith [1965] et de Morton [1983]. Les trois premières sont très couramment utilisées en modélisation hydrologique en France, et mis à part la grande similarité entre les formules de Penman et de Penman-Monteith, ces modèles présentent des conceptions hétérogènes de l'évaporation potentielle. La formule de Morton, peu utilisée en France, l'est très couramment en Australie [Chiew et al., 2009 ; Fowler et al., 2016]. Les formules sont récapitulées dans le Tableau 1, par ordre de complexité. Les paramétrages des formules de Penman et Penman-Monteith sont issues d'Allen et al. [1998]. La valeur de l'albédo utilisée dans ces deux formules, prise par défaut égale à 0.23 (herbe verte), a été corrigée au moyen du modèle degré-jour d'accumulation et de fonte de la neige CemaNeige [Valéry et al., 2014]. La formule de

Morton dispose de son propre module de calcul de l'albédo. Morton ayant proposé plusieurs formules, il faut préciser que la formule testée correspond à sa formule dite « d'évaporation réelle en milieu humide » [Morton, 1983], qui est plus adaptée pour être utilisée comme donnée d'entrée d'un modèle hydrologique que sa propre formule d'évaporation potentielle [Chiew & McMahon, 1991]. Des mesures de rayonnements lumineux basses et hautes fréquences incidents étant disponibles dans la base de données utilisée, certains calculs intermédiaires de la formule de Morton ont pu être évités.

Nom (acronyme)	Variables d'entrée	Formule
Oudin (Ou)	T	$E = \frac{R_e T + 5}{\lambda p \cdot 100} \text{ si } T + 5 > 0 ;$ $E = 0 \text{ sinon}$ (1)
Morton (Mo)	T, HR, R	$E = b_1 + b_2 \frac{R_{Tp} \Delta p}{\Delta p + \gamma P}$ (2)
Penman (Pe)	T, HR, R, U	$E = \frac{R_T \Delta T + f(v - v_D) \gamma P}{\Delta T + \gamma P}$ (3)
Penman-Monteith (PM)	T, HR, R, U	$E = \frac{R_T \Delta T + f(v - v_D) \gamma P}{\Delta T + \gamma P \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}$ (4)

Tableau 1. Caractéristiques principales des formules d'évaporation potentielle (E). Parmi les variables d'entrée nécessaires au calcul des différents modèles, T désigne la température de l'air (K), HR l'humidité relative (%), R le rayonnement incident au niveau du sol ($W.m^{-2}$), et U la vitesse du vent ($m.s^{-1}$) à 2 mètres du sol. Les grandeurs utilisées dans les formules et leur unité sont décrites en section VII NOMENCLATURE.

Au regard des séries obtenues avec les différentes formules, on remarque que les précipitations annuelles sont largement plus variables d'une année à l'autre que l'évaporation potentielle (Figure 2.a). La variabilité interannuelle du débit est par conséquent proche de celle des précipitations. L'influence de l'évaporation potentielle est en revanche plus visible au regard du cycle saisonnier des débits moyens (Figure 2.b).

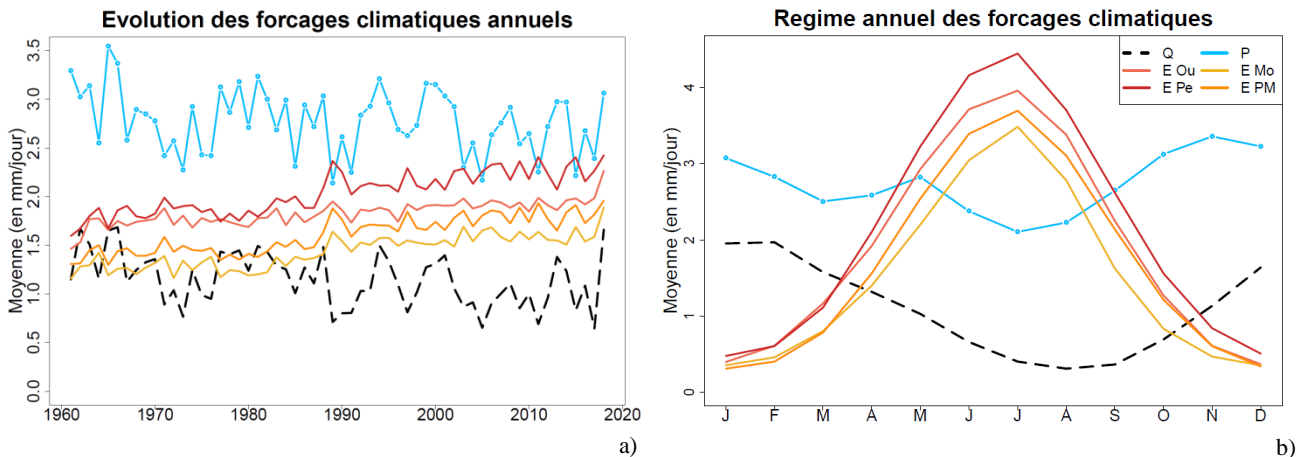


Figure 2. a) Valeurs annuelles moyennes des précipitations (bleu), débits (noir pointillé) et diverses évaporations potentielles (du jaune au rouge : Morton, Penman-Monteith, Oudin, Penman), tous bassins confondus. b) Valeurs mensuelles moyennes des grandeurs précédentes, tous bassins confondus.

Les différences entre les modèles d'évaporation concernent principalement les valeurs moyennes, plaçant celui de Penman au-dessus de celui d'Oudin, de celui de Penman-Monteith puis de celui de Morton (dans l'ordre décroissant). La formule d'Oudin paraît en outre moins variable à l'échelle interannuelle que les trois autres : elle dépend uniquement de la température, alors que les autres formules dépendent d'un plus grand nombre de variables qui évoluent avec le temps [Vicente-Serrano et al., 2014].

III MÉTHODOLOGIE

III.1 Variables explicatives

La réalité des processus hydrologiques est loin d'être linéaire et supposer que les débits annuels sont liés aux variables climatiques par des relations affines est à l'évidence une hypothèse simplificatrice forte.

Cette hypothèse est néanmoins formulée pour la simplicité d'analyse qu'elle offre. Les coefficients de la régression du débit sur les précipitations et l'évaporation potentielle prennent en effet par construction les valeurs de l'élasticité du débit vis-à-vis de ces variables, valeurs facilement interprétables et déjà abordées par d'autres études [Sankarasubramanian et al., 2001 ; Andréassian et al., 2016]. L'élasticité indique le taux de variation d'une variable résultant d'une variation de 1% d'une variable explicative [Schaake & Liu, 1989]. Elle se calcule avec la formule suivante :

$$\varepsilon_{Q/X} = \frac{\Delta Q / \bar{Q}}{\Delta X / \bar{X}} \quad (6)$$

Où ΔQ et ΔX représentent respectivement les variations, pour une date donnée, du débit et de la variable climatique X , \bar{Q} et \bar{X} correspondent aux moyennes de long terme de ces variables. La facilité d'interprétation des coefficients permet la comparaison à la fois de l'influence des précipitations et de l'évaporation sur le débit et celle des différentes évaporations potentielles entre elles. La linéarité des équations présente également l'avantage de moins diluer les différences entre les formulations d'évaporation dans la complexité d'un modèle, qui autoriserait les compensations entre paramètres. Pour résumer succinctement, formuler l'hypothèse linéaire permet paradoxalement de ne pas en formuler d'autres.

Malgré ses qualités, elle possède néanmoins quelques défauts. Certains d'entre eux sont liés au choix de variables explicatives purement climatiques : celui de ne pas inclure les changements d'usage du sol et de l'eau d'origines anthropiques et celui de ne pas fermer le bilan hydrique et donc d'évacuer la question des échanges entre bassins. Le cadre de l'étude répond partiellement à ces deux lacunes : les bassins ont été choisis peu influencés parmi les bassins français instrumentés existants et leur nombre est suffisant pour qu'on puisse supposer, qu'en moyenne, il y a autant de bassins déficitaires que bénéficiaires de ces échanges. D'autres limitations existent, liées au caractère linéaire des modèles employés, notamment l'absence de représentation de la rétroaction de l'état hydrologique du bassin sur la relation qui lie le débit au climat. Néanmoins, pour pallier cette faille et inclure dans les modèles une représentation de la mémoire du bassin, les variables climatiques des années précédentes ont été ajoutées aux variables explicatives, suivant cette structure :

$$\frac{\Delta Y_n}{\bar{Y}} = 0 + \sum_i \varepsilon_{i,n} \frac{\Delta X_{i,n}}{\bar{X}_i} + \sum_i \varepsilon_{i,n-1} \frac{\Delta X_{i,n-1}}{\bar{X}_i} \quad (5)$$

Où Y est la variable expliquée (par exemple le débit), (X_i) représente l'ensemble des variables climatiques explicatives du débit annuel et n l'année considérée. Le terme ε_i correspond à l'élasticité de la variable expliquée vis-à-vis de la variable explicative X_i . Dans la suite, on désignera par « mémoire » l'influence du climat des années passées sur l'hydrologie d'un bassin à une date donnée.

III.2 Modèles testés

Quatre modèles ont été construits et testés, conçus comme deux paires comprenant un modèle de référence sans mémoire et un modèle avec mémoire. La première paire est modèle naïf, strictement linéaire, liant débits et variables climatiques, la deuxième paire s'inspire de ce que les hydrologues ont coutume d'appeler « l'hypothèse de Budyko » en reliant (ici linéairement) le rendement des précipitations (Q/P) à l'indice d'humidité (pour mémoire, l'indice d'humidité P/E est l'inverse de l'indice d'aridité E/P). Dans le deuxième cas, les anomalies de débit sont donc reliées aux anomalies de précipitations et d'évaporation potentielle par une relation non linéaire.

$$\ll N0 \gg \quad \frac{\Delta Q_n}{\bar{Q}} = 0 + \varepsilon_{P,n}^0 \frac{\Delta P_n}{\bar{P}} + \varepsilon_{E,n}^0 \frac{\Delta E_n}{\bar{E}} \quad (7)$$

$$\ll N1 \gg \quad \frac{\Delta Q_n}{\bar{Q}} = 0 + \varepsilon_{P,n}^1 \frac{\Delta P_n}{\bar{P}} + \varepsilon_{E,n}^1 \frac{\Delta E_n}{\bar{E}} + \varepsilon_{P,n-1}^1 \frac{\Delta P_{n-1}}{\bar{P}} + \varepsilon_{E,n-1}^1 \frac{\Delta E_{n-1}}{\bar{E}} \quad (8)$$

$$\ll \text{B0} \gg \quad \frac{\Delta(Q/P)_n}{\overline{Q/P}} = 0 + \varepsilon_{P/E,n}^0 \frac{\Delta(P/E)_n}{\overline{P/E}} \quad (9)$$

$$\ll \text{B1} \gg \quad \frac{\Delta(Q/P)_n}{\overline{Q/P}} = 0 + \varepsilon_{P/E,n}^1 \frac{\Delta(P/E)_n}{\overline{P/E}} + \varepsilon_{P/E,n-1}^1 \frac{\Delta(P/E)_{n-1}}{\overline{P/E}} \quad (10)$$

Caler quatre paramètres sur des séries d'une vingtaine d'observations peut produire des résultats très incertains et en ce sens les deux modèles « B » diminuent ce risque par rapport aux modèles « N », à mémoire constante, en offrant une vision plus condensée des processus hydrologiques. Toutefois, ils ne permettent pas d'arbitrer entre les rôles respectifs des précipitations et de l'évaporation dans le bilan hydrologique. L'utilisation des deux types de modèle est donc complémentaire et permet de valider la pertinence de l'ajout d'une forme de mémoire aux modèles.

III.3 Estimation des paramètres des modèles

La méthode présentée jusqu'à ce point possède deux problèmes d'ordre purement statistique. Utiliser une simple régression pour expliquer une variable auto-corrélée peut entraîner des compensations dans l'estimation des paramètres des variables explicatives. Par ailleurs, l'ajout des variables climatiques décalées d'un an invalide l'hypothèse d'indépendance des variables explicatives de la régression linéaire. Le débit de l'année $n + 1$ dépend partiellement des variables explicatives du débit de l'année n .

Pour remédier à ces deux problèmes, la méthode des moindres carrés généralisés (MCG) a donc été préférée à la régression linéaire simple [Aitken, 1936]. Les résultats présentés dans la suite sont ceux issus de ce modèle. La significativité des paramètres calés est calculée au moyen d'un test de Student. Sont considérés significatifs les paramètres dont la valeur aurait moins de 10% de chance d'être atteinte sachant l'hypothèse nulle.

Les résultats ont été confirmés par l'implémentation d'un modèle linéaire simple s'appuyant sur une méthode de ré-échantillonnage de type Monte Carlo (résultats non présentés). Ce modèle permet également de s'affranchir de l'autocorrélation des débits annuels, en considérant formulant l'hypothèse que l'ordre (i.e. le temps) n'a pas de valeur explicative. Le tirage aléatoire des observations a été construit de telle sorte à ne pas sélectionner d'années consécutives, afin de ne pas réutiliser deux fois la même valeur d'une variable explicative. Les résultats obtenus ainsi sont similaires à ceux produits par la méthode des moindres carrés généralisés, et ne sont pas présentés dans la suite.

IV ÉLASTICITÉ DU DÉBIT VIS-À-VIS DES VARIABLES CLIMATIQUES

IV.1 Modèles N0 et N1

Les significativités (p-values) respectives des différentes variables climatiques sont très hétérogènes : si les précipitations de l'année en cours ont (logiquement) une influence forte sur les écoulements, on ne peut en dire autant des autres variables (Figure 3). Nos résultats indiquent que la significativité de la relation entre précipitations et évaporation de l'année précédente n'est pas établie pour une part importante de l'échantillon, tandis que l'évaporation de l'année en cours n'a aucune valeur explicative pour la très grande majorité des bassins, et cela quelle que soit la formule d'évaporation utilisée. Ce résultat en apparence surprenant peut être expliqué en partie par la définition de l'année hydrologique en France métropolitaine, qui commence au début de la saison froide et humide et termine à la fin de la saison chaude et sèche. En effet, les anomalies annuelles d'évaporation potentielle, dont les valeurs sont très stables d'hiver en hiver, sont principalement portées par ses variations estivales. Les précipitations saisonnières sont plus aléatoires d'une année à l'autre et donc plus susceptibles d'expliquer l'écoulement moyen pendant une année hydrologique complète. Néanmoins la part très faible de bassins pour lesquels l'évaporation potentielle de l'année n est associée à un coefficient significativement négatif reste un résultat surprenant.

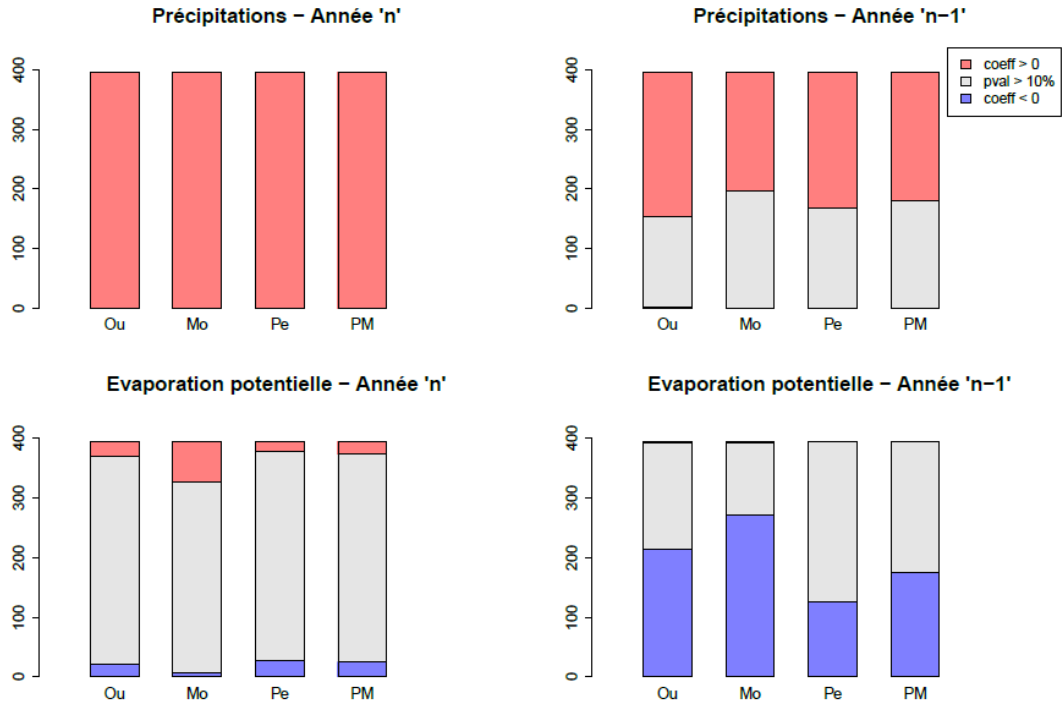


Figure 3. Résultats du modèle N1. On a figuré en gris le nombre de bassins pour lesquels le paramètre est considéré comme non-significatif (p -value supérieure à 10%). On a figuré en rouge (respectivement en bleu) le nombre de bassins pour lesquels le coefficient de régression de la variable est positif (respectivement négatif) et dont la p -value est inférieure à 10%.

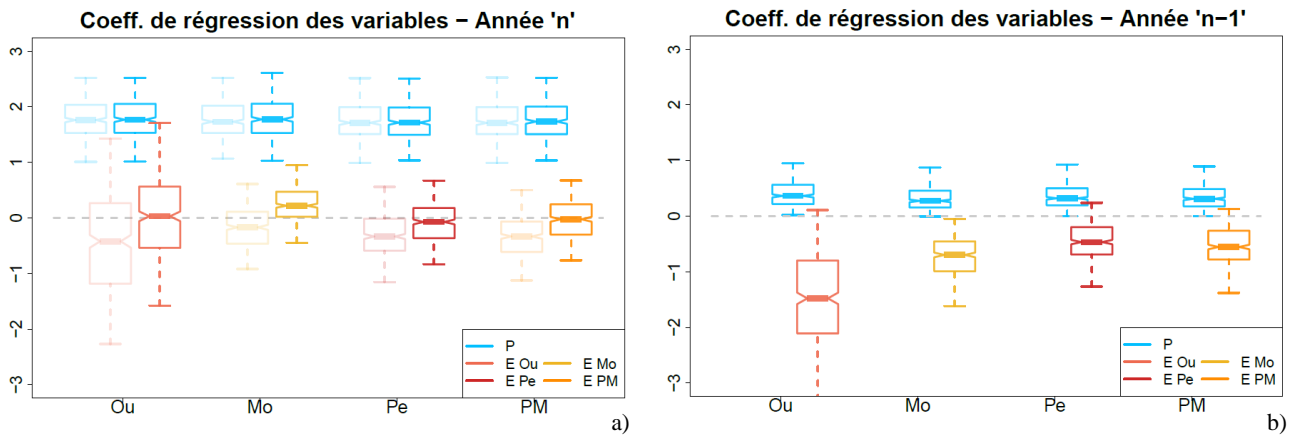


Figure 4. a) Répartition des coefficients médians des variables de l'année n , à raison d'une valeur par bassin, des modèles N0 (trait quasi transparent) et N1 (trait opaque). En bleu les coefficients des précipitations et en couleurs chaudes ceux de l'évaporation potentielle, suivant le même code couleur qu'en Figure 2 pour chaque formulation.

Les modèles N0 et N1, appliqués avec les différentes formulations de l'évaporation, présentent des résultats très homogènes concernant l'élasticité du débit par rapport aux précipitations, dont la valeur est supérieure à 1 pour la plupart des bassins de l'échantillon (Figure 4). Il convient de noter que cela ne signifie pas que le débit augmente plus que le volume des précipitations, puisque l'élasticité fait intervenir des variations en pourcentage. Les différences entre les modèles sont visibles en revanche au regard des valeurs de l'élasticité des débits vis-à-vis de l'évaporation potentielle de l'année précédente. Les valeurs correspondant à la formule d'Oudin sont nettement supérieures en valeur absolue et réparties sur spectre plus large que les valeurs issues des autres formules. L'évaporation calculée avec cette formule varie peu à l'échelle interannuelle, ce qui amène vraisemblablement le modèle linéaire à compenser par une valeur élevée en valeur absolue des coefficients de la régression. La dispersion des valeurs d'élasticité obtenues avec la formule d'Oudin est surprenante, alors qu'on attendrait une certaine cohérence dans la relation qui lie l'évaporation potentielle au débit au regard de la cohérence des liens qu'entretient l'écoulement avec ses

autres déterminants (précipitations, géologie). On note que la formulation de Morton semble procurer une contribution plus importante à l'évaporation potentielle que celle obtenue avec les autres formulations.

IV.2 Modèles B0 et B1

Les résultats obtenus avec les modèles inspirés de « l'hypothèse de Budyko » confirment l'importance de la situation climatique pendant l'année hydrologique $n - 1$, puisque l'humidité des années n et $n - 1$ est considérée significative au moins pour les trois quarts des bassins de l'étude (Figure 5). Au contraire des conclusions précédentes, les quatre formulations de l'évaporation potentielle ne conduisent pas à des résultats significativement différents (Figure 6). La variabilité interbassin des valeurs d'élasticité obtenues avec la formule d'Oudin est en effet comparable à celle des trois autres formules.

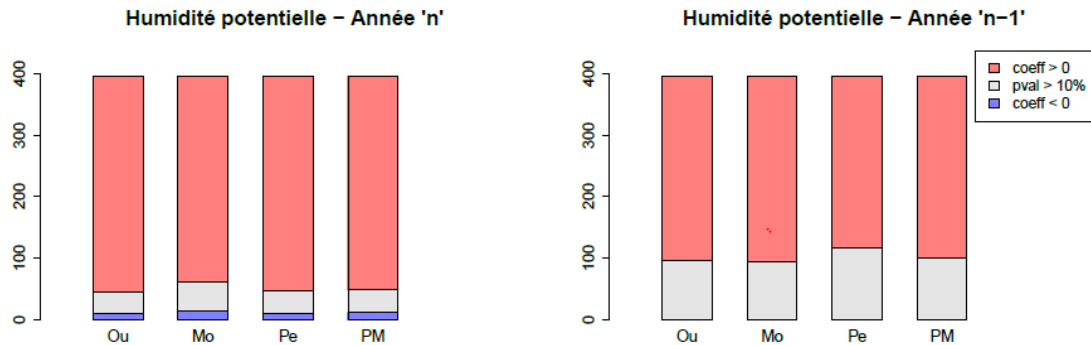


Figure 5. Significativité des variables du modèle B1 : à gauche et à droite respectivement celles de l'année n et $n - 1$. On a figuré en gris la part des bassins pour lesquels le paramètre est considéré comme non-significatif (p -valeur supérieure à 10%). On a figuré en rouge (respectivement en bleu) la part des bassins pour lesquels le coefficient de régression de la variable est positif (respectivement négatif) et dont la p -valeur est inférieure à 10%.

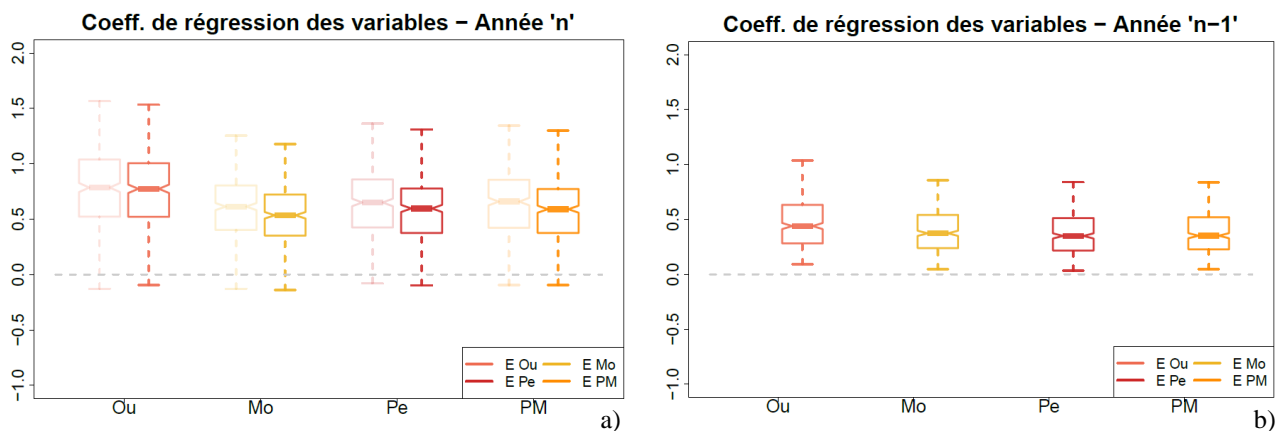


Figure 6. a) Répartition des coefficients médians des variables de l'année n , à raison d'une valeur par bassin, des modèles B0 (trait quasi transparent) et B1 (trait opaque). Les couleurs chaudes désignent les paramètres de l'humidité potentielle, suivant le même code couleur qu'en Figure 2 pour chaque formulation d'évaporation potentielle.

V DISCUSSION AU REGARD DES PERFORMANCES DES MODÈLES

Dans la suite, les performances des modèles testés sont discutées afin d'évaluer le potentiel explicatif des différentes formulations d'évaporation potentielle et de l'apport d'une mémoire aux modèles. Pour simplifier l'analyse, les performances sont évaluées au regard du débit pour les deux types de modèles.

Les performances des deux types de modèles confirment l'importance de l'information portée par l'année hydrologique précédant l'année en cours. Dans plus de 95% des cas, pour toutes les structures de modèle et toutes les formules d'évaporation potentielle, les performances du modèle avec la prise en compte de l'année précédente surpassent les performances du modèle qui utilisent juste l'année en cours. Ces gains correspondent en moyenne à un gain de 10% de variance expliquée du débit (Figure 7). Les bassins pour lesquels l'ajout d'une mémoire entraîne une baisse de performance (modèles « B » uniquement) sont généralement situés dans des zones de formations géologiques très faiblement perméables, où les capacités de réserve du sol sont modestes (Figure 8).

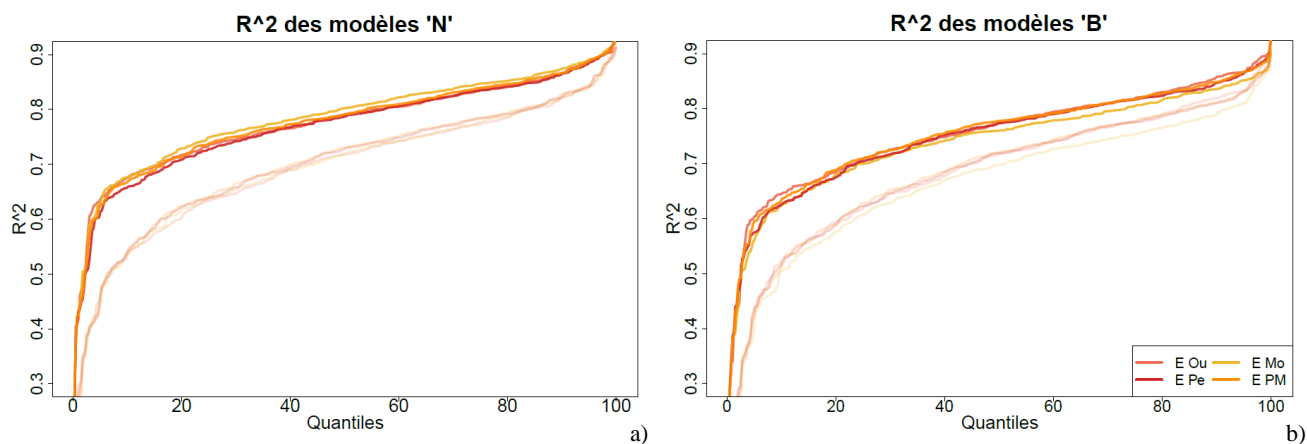


Figure 7. Fréquences cumulées des performances des modèles « N » (à gauche) et des modèles « B » (à droite), sur les bassins versants de l'étude. Les couleurs chaudes désignent les valeurs du coefficient de détermination (R^2), suivant le même code couleur qu'en Figure 2 pour chaque formulation d'évaporation potentielle. Les traits quasi transparents correspondent aux modèles sans mémoire (« N0 » et « B0 »), les traits opaques correspondent aux modèles à mémoire (« N1 » et « B1 »).

Les tests réalisés sur des modèles ayant une mémoire jusqu'à $n - 2$ montrent une légère amélioration des performances, de quelques centièmes de points de R^2 seulement (résultats non inclus). On peut donc conclure que dans la grande majorité des bassins français étudiés, le climat de l'année en cours et de l'année précédente déterminent significativement les dynamiques de l'écoulement annuel.

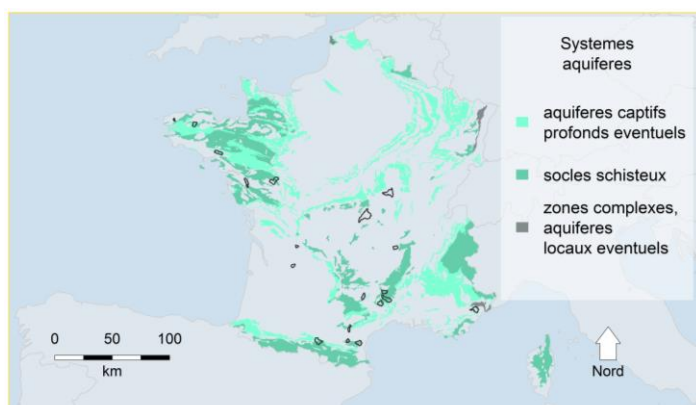


Figure 8. Carte des bassins versants où les performances des modèles « B » sans mémoire sont supérieures à celles des modèles « B » avec mémoire (contours noirs), replacés dans leur contexte hydrogéologique. Les surfaces colorées (vert clair, vert foncé, gris foncé) correspondent aux régions où les sous-sols sont constitués de formations très peu perméables, d'après les données issues de la « Carte hydrogéologique de la France – Systèmes Aquifères » [B.R.G.M., J. Margat, 1980].

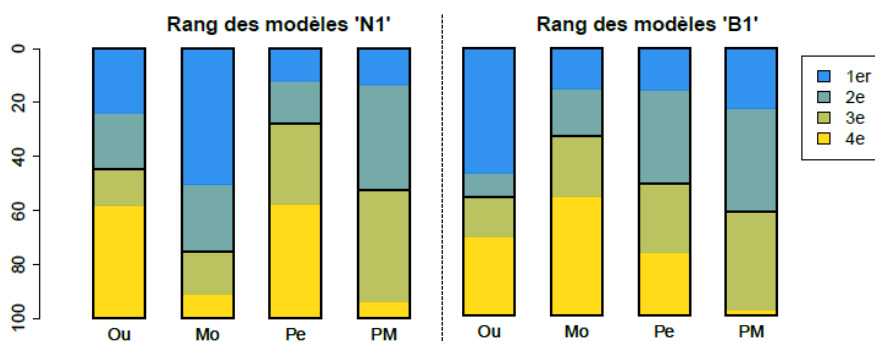


Figure 9. Rang des modèles « N1 » (à gauche) et des modèles « B1 » (à droite) munis des différentes formules d'évaporation potentielle. Plus il y a de bleu dans la colonne correspondant à une évaporation potentielle, plus grande est la part de bassins pour lesquels elle donne les performances optimales (R^2) par rapport aux autres.

Les écarts de performance des modèles utilisés avec les diverses formulations d'évaporation sont faibles par rapport aux gains apportés par l'ajout d'une mémoire (Figure 7). Malgré ces différences ténues, on constate sur la Figure 9 que la formule de Morton donne les meilleurs résultats avec les modèles « N » dans près de 50% des cas (contre 23% avec celle d'Oudin), tandis qu'avec les modèles « B » la formule d'Oudin permet de maximiser le R^2 dans près de 46% des cas (contre 16% avec celle de Morton). Les deux formules reposant sur la formule de Penman jouent quant à elles un rôle moyen. La formule de Penman-Monteith semble en particulier faire office du choix par défaut le plus solide (arrive à la première ou à la deuxième place dans environ 60% des bassins, quel que soit le modèle testé).

La structure du modèle influence donc fortement la relation d'ordre entre les différentes formules au regard des performances obtenues. Les modèles « N » permettent mieux de les distinguer les unes des autres, en particulier celle de Morton (cf. IV.1), pour autant il semble hasardeux de donner du crédit à ces résultats tant ils se démarquent de ceux obtenus avec les modèles « B », qui gomment les écarts de significativité et de performance. Par ailleurs, les modèles mis en œuvre ne reposent pas sur le calcul de l'évaporation réelle et cela bride également leurs performances, bien que cette simplicité ait été choisie à dessein puisqu'elle permet d'éviter la représentation de mécanismes complexes comme la transpiration des plantes. Les variations interannuelles de l'évaporation réelle ne sont en effet pas simplement déterminées par celles de l'évaporation potentielle mais également par la synchronisation de cette dernière avec le contenu en eau des sols. Certaines variations de l'évaporation potentielle ne peuvent donc pas expliquer celles du débit à l'échelle annuelle.

VI CONCLUSION

Dans cet article, nous avons comparé l'applicabilité en modélisation hydrologique de plusieurs formulations d'évaporation potentielle (Oudin, Morton, Penman et Penman-Monteith), au moyen de modèles linéaires liant les anomalies annuelles de variables hydrologiques aux anomalies des forçages climatiques, sur un large échantillon de 395 bassins de France métropolitaine. La méthodologie mise en place a également permis de caractériser l'élasticité du débit vis-à-vis des variables climatiques, ainsi que le temps de relaxation moyen de l'écoulement interannuel, par l'inclusion des années précédentes parmi les variables explicatives de certains modèles. Deux types de modèles ont été distingués : ceux reliant débits, précipitations et évaporation potentielle par une fonction linéaire, appelés modèles « N » ; ceux reliant rendement des précipitations et humidité potentielle par une fonction linéaire, inspirés de « l'hypothèse de Budyko » et appelés modèles « B ». Les modèles ont été calés avec la méthode des moindres carrés généralisés afin de tenir compte de l'autocorrélation des débits et de la colinéarité des variables explicatives.

Les résultats permettent d'affirmer que l'écoulement annuel est significativement relié aux forçages climatiques de l'année en cours et de l'année précédente, dans la grande majorité des bassins étudiés. Les bassins qui ne bénéficient pas de l'ajout d'une « mémoire » de l'année précédente semblent situés dans des zones géologiques très peu perméables, où les capacités de stockage de l'eau dans le sous-sol sont faibles. Ils illustrent la difficulté d'arbitrer définitivement entre les modèles d'évaporation potentielle, malgré leurs différences qualitatives et quantitatives. La formule de Morton apparaît comme la meilleure avec les modèles de type « N », au contraire de celle d'Oudin, avec laquelle on obtient les résultats les plus probants au regard des modèles « B ». La formulation de Penman-Monteith semble être un bon choix par défaut, pour n'être presque jamais le pire.

VII NOMENCLATURE

HR	Humidité relative (S.U.)	R	Rayonnement incident au sol ($W.m^{-2}$)
U	Vitesse du vent à 2m au-dessus du sol ($m.s^{-1}$)	T	Température journalière (K)
R_{Tp}	Rayonnement net au niveau d'un sol à la température d'équilibre ($W.m^{-2}$)	R_T	Rayonnement net au niveau d'un sol à la température de l'air ($W.m^{-2}$)
λ	Enthalpie de vaporisation de l'eau ($J.kg^{-1}$)	ρ	Masse volumique de l'eau ($kg.m^{-3}$)
Δ_T	Pente de la courbe de vapeur saturante à la température de l'air ($Pa.K^{-1}$)	Δ_p	Pente de la courbe de vapeur saturante à la température d'équilibre ($Pa.K^{-1}$)
b_1	Constante empirique définie par Morton (1983) ($W.m^{-2}$)	b_2	c.f. b_1
v	Pression de vapeur saturante à la température de l'air (Pa)	v_D	Pression de vapeur saturante au point triple (Pa)
γ	Constante psychrométrique ($Pa.K^{-1}$)	P	Pression atmosphérique (Pa)
r_c	Résistance de la canopée ($s.m^{-1}$)	r_a	Résistance aérodynamique ($s.m^{-1}$)
f	Coefficient de transfert de la vapeur d'eau ($W.m^{-2}.Pa^{-1}$)	R_e	Rayonnement extra-terrestre incident ($W.m^{-2}$)

VIII REFERENCES

- Aitken, A. C. (1936), IV.—On least squares and linear combination of observations, *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 55, 42-48.

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome, 300(9)*, D05109.
- Andréassian, V., Le Moine, N., Perrin, C., Ramos, M.-H., Oudin, L., Mathevet, T., ... Berthet, L. (2012). All that glitters is not gold: the case of calibrating hydrological models. *Hydrological Processes, 26(14)*, 2206-2210.
- Andréassian, V., Coron, L., Lerat, J., & Le Moine, N. (2016). Climate elasticity of streamflow revisited – an elasticity index based on long-term hydrometeorological records. *Hydrology and Earth System Sciences, 20(11)*, 4503-4524.
- Chiew, F. H., & McMahon, T. A. (1991). The applicability of Morton's and Penman's evapotranspiration estimates in rainfall-runoff modeling. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 27(4)*, 611-620.
- Chiew, F. H. S., Teng, J., Vaze, J., Post, D. A., Perraud, J. M., Kirono, D. G. C., & Viney, N. R. (2009). Estimating climate change impact on runoff across southeast Australia: Method, results, and implications of the modeling method. *Water Resources Research, 45(10)*.
- Fowler, K. J. A., Peel, M. C., Western, A. W., Zhang, L., & Peterson, T. J. (2016). Simulating runoff under changing climatic conditions: Revisiting an apparent deficiency of conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research, 52(3)*, 1820-1846.
- Kelleher, C. A., & Shaw, S. B. (2018). Is ET often oversimplified in hydrologic models? Using long records to elucidate unaccounted for controls on ET. *Journal of Hydrology, 557*, 160-172.
- Lhomme, J.-P. (1997). Towards a rational definition of potential evaporation. *Hydrology and Earth System Sciences, 1(2)*, 257-264.
- McMahon, T. A., M. C. Peel, L. Lowe, R. Srikanthan, and T. R. McVicar (2013), Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis, *Hydrology and Earth System Sciences, 17(4)*, 1331-1363, doi:10.5194/hess-17-1331-2013.
- Margat, J. (1980). Carte hydrogéologique de la France à l'échelle 1/1500 000-Systèmes aquifères. *Marseille, BRGM*.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment, in the state and movement of water in living organisms. *Paper presented at the Symp. Soc. Exp. Biol.*
- Morton, F. I. (1983). Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology, 66(1-4)*, 1-76.
- Oldekop, E. (1911). Ob hparenii s Poverkhnosti Rechnykh Basseinov (On Evaporation of River Basin Surfaces). *In: Yuriev*.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005b). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? *Journal of Hydrology, 303(1-4)*, 290-306.
- Oudin, L., Michel, C., & Anctil, F. (2005a). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? *Journal of Hydrology, 303(1-4)*, 275-289.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 193(1032)*, 120-145.
- Sankarasubramanian, A., Vogel, R. M., & Limbrunner, J. F. (2001). Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resources Research, 37(6)*, 1771-1781.
- Schaake, J., & Liu, C. (1989). Development and application of simple water balance models to understand the relationship between climate and water resources. *Paper presented at the New Directions for Surface Water Modeling Proceedings of the Baltimore Symposium*.
- Thirel, G., Andréassian, V., Perrin, C., Audouy, J. N., Berthet, L., Edwards, P., ... Vaze, J. (2015). Hydrology under change: an evaluation protocol to investigate how hydrological models deal with changing catchments. *Hydrological Sciences Journal, 60(7-8)*, 1184-1199.
- Valéry, A., Andréassian, V., & Perrin, C. (2014). 'As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of Hydrology, 517*, 1176-1187.
- Vicente-Serrano, S. M., C. Azorin-Molina, A. Sanchez-Lorenzo, J. Revuelto, E. Morán-Tejeda, J. I. López-Moreno, and F. Espejo (2014), Sensitivity of reference evapotranspiration to changes in meteorological parameters in Spain (1961-2011), *Water Resources Research, 50(11)*, 8458-8480, doi:10.1002/2014wr015427.