

**Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris
& École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

**Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie**

ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ INTERANNUELLE DE L'ÉVAPORATION POTENTIELLE

Conséquence sur les prévisions de l'impact hydrologique du changement climatique.

Antoine QUENTIN

Encadrant de stage : Vazken Andréassian, IRSTEA

Co-encadrant : Matthieu Le Lay, EDF DTG

Nicolas Le Moine, UPMC



IRSTEA : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
- Antony



EDF/ DTG : Électricité de France/ Division Technique Générale - Grenoble



Structure et fonctionnement des systèmes hydriques continentaux : Unité Mixte de Recherche 7619 -Paris

Février à août 2015



L'épuisante manœuvre recommença plusieurs fois, car sans cesse la caravane escaladait une colline abrupte pour la dévaler aussitôt et en gravir une autre. Et toujours et partout le regard n'embrassait que des crêtes et des creux couverts de pierres noires. On eût dit qu'une mer d'encre s'était là, depuis des siècles, figée et que la caravane, comme une pirogue étroite, traversait ses lames sans mouvement. Aucun point de repère ne semblait diriger l'abane. Pourtant, il avançait sans hésiter, sec, muet et suivant son bâton. Parfois, il se courbait à demi, comme pour flairer le sol et reprenait sa marche régulière, assurée. Le soleil était à son zénith, lorsque, dans une dépression, le guide s'arrêta.

- L'eau, dit-il.

ABSTRACT

Evapotranspiration represents 30% of precipitation for the wettest or coldest areas, and up to 90% for the driest areas. Potential evapotranspiration is the only rainfall-runoff model input which needs to be calculated, the other two, temperature and precipitation, are measured. To simulate future runoff, it is necessary to extrapolate these forcings, and evapotranspiration is at the center of the problem due to lack of knowledge on this phenomenon at large scale.

The aim of this research project is to enhance the performance of rainfall-runoff models period by using a better adapted formula able to correctly replicate the multiple effects of climate change on evapotranspiration.

The Penman Monteith formula (1965) is considered by the scientific community as the most physically realistic. In 1998, the FAO opted for this formula and fixed certain parameters to meet the needs of the agricultural sector. Our goal is to find a new ET_0 adapted to hydrological studies performing as well as Oudin's PET^1 formula. This improvement would enable us to have a more solid physical basis in order to project with a wider range of climatic parameters.

By the means of a sensitivity analysis of the formula of Penman Monteith FAO 56 ET_0 , we questioned the bioclimatic ($r_s = 70 \text{ s / m}$) and physical (albedo = 0.23) parameter calibrated to a standard crop, a green grass of 12cm height. We looked for the best values highlighted by evaluations GR4J's criteria for 600 watersheds spread across France. This ET_0 is used as such in GR4J and transformed into ET_m in MORDOR.

Then we study how GR4J and MORDOR integrate this new information in calibration and validation against Oudin's PET and the Penman Monteith FAO56 ET_0 , using as a sample the 222 watersheds from the Coron data base with new rainfall data and new assessment criteria adapted to the study of evapotranspiration.

We found that a variable albedo depending on snowfall and on average lower (0.06) improves hydrological models' performances in calibration and validation; however a wider study with *in situ* measurements of radiation should be conducted to confirm this implausible albedo. On the other hand a surface resistance fading with rain provides better calibration performances but can still be improved in validation.

¹ Potential Evapotranspiration

AVANT-PROPOS

La première semaine de février 2015, j'ai intégré l'équipe HBAN-HYDRO de l'IRSTEA à Antony. Mon stage fut en partenariat avec l'Université Pierre et Marie Curie et EDF DTG Grenoble. Ces trois organismes qui poursuivent des objectifs différents quant à la modélisation hydrologique, se sont rejoints une nouvelle fois le temps d'une étude scientifique, en l'occurrence, sur l'un des forçages des modèles hydrologiques : l'évapotranspiration.

IRSTEA est un institut de recherche public dans le domaine de l'environnement et de l'agriculture. Les travaux de l'équipe HBAN-HYDRO portent sur le développement de modèles hydrologiques de la famille GR et de méthodologies d'application pour des besoins en hydrologie opérationnelle d'intérêt général comme la prévision des crues et des étiages.

En 2014, 77% de l'électricité produite en France venait de l'énergie nucléaire, 12,6% de ce qu'on appelait houille blanche, de l'énergie hydraulique. EDF premier producteur et fournisseur d'électricité en France, a donc développé une famille de modèle hydrologique (MORDOR), pour répondre aux besoins de ses activités industrielles autour de l'eau ; les barrages et le refroidissement des réacteurs nucléaires.

REMERCIEMENTS

C'est très compliqué parce que l'on est limité à 50 pages maximum et mes remerciements sont les premiers à subir les conséquences de cet espace restreint, mais si j'avais eu la place libre à ma prose, j'aurais pu en écrire bien plus. Je viens de perdre déjà quatre lignes, je commence.

Une semaine après notre arrivée avec José Manuel, Florent Lobligeois quittait l'IRSTEA pour rejoindre AXA. Dans son discours d'au revoir, il dit qu'en se levant pour venir travailler chaque matin, jamais il n'eut le cœur serré. Après 5 mois passés dans l'équipe hydro, je vous le confirme, on travaille dans d'excellentes conditions et dans une super ambiance, personne ne refuse jamais d'apporter une aide. Je remercie mes encadrants, pour leur écoute, leurs pistes, leurs visions : Vazken, Matthieu, Nicolas. Ce sont d'excellents scientifiques et pédagogues. Je suis reconnaissant de la confiance que vous m'avez accordé.

Merci à Vazken qui aime les poèmes subtils et les frisbees virils, sport pour le moins curieux, mais finalement réjouissant.

Merci à Matthieu pour l'accueil et la semaine passée à EDF Grenoble, on ne fera pas de compétition chronométrée en GR et MORDOR.

Les doctorantes Louise et Laure qui m'ont sorti des situations compliquées sur R et FORTRAN. Olivier pour les situations très compliquées sur R, voire insurmontables, qu'il règle en trois lignes, Charles, Carina, Guillaume, Maria-Hélène, Philippe, Pierre N (pour son coup droit magnifique), Pierre B, Andrea que j'attends toujours sur les terrains de football. Une pensée pour mes camarades stagiaires, José le sumo, Audrey et sa motivation, Yacine pour les unes deux, Morgan et ses pauses, et tous mes coéquipiers et adversaires au frisbee, football, boxe, on est en sport-étude à l'IRSTEA.

Une pensée à mes parents, ma famille, Robert et Jérémy à Saint-Nizier, mes amis, et mes camarades du master HH.

Merci à mes professeurs à l'université Pierre Ribstein et Ludovic Oudin, pour leur temps et leur écoute accordé à chacun d'entre nous pour la construction et le suivi de nos projets professionnels.

SOMMAIRE

ABSTRACT	2
AVANT-PROPOS.....	3
REMERCIEMENTS.....	3
SOMMAIRE.....	4
INTRODUCTION GENERALE.....	5
1 L'EVAPOTRANSPIRATION, QUELLE DEFINITION POUR QUELLE SCIENCE ?.....	6
1.1 Le concept de potentialité de l'évapotranspiration : AED	6
1.1.1 De l'AED à l'ETR pour les agronomes.....	7
1.1.2 De l'AED à l'ETR pour les hydrologues.....	7
2 DONNEES CLIMATIQUES ET BASSINS VERSANTS ETUDIES	9
2.1 Les données climatiques, SAFRAN, SPAZM	9
2.1.1 SAFRAN.....	9
2.1.2 SPAZM	10
2.2 Les bassins versants, les débits	10
2.2.1 Échantillon pour la première expérience	10
2.2.2 Échantillon pour la seconde expérience.....	11
3 LES MODELES HYDROLOGIQUES, GR4J ET MORDOR.....	12
3.1 GR4J	13
3.2 MORDOR SD (2014)	13
3.2.1 L'ETP dans MORDOR	14
3.3 Les cumuls d'ETR dans les deux modèles.....	15
4 CRITERES D'EVALUATIONS, FONCTIONS OBJECTIVES, PRESENTATION DES RESULTATS	16
4.1 Critères d'évaluations pour la première expérience.....	16
4.2 Présentation des résultats pour la première expérience.....	16
4.3 Critères d'évaluations pour la seconde expérience	19
4.4 Présentation des résultats pour la seconde expérience	19
5 POURQUOI L'ANALYSE DE SENSIBILITE DE PENMAN MONTEITH ?.....	21
5.1 L'évapotranspiration : une source d'incertitude supplémentaire pour la projection des débits.....	21
5.2 Quelle formule pour l'extrapolation ?	22
6 ANALYSE DE SENSIBILITE PENMAN MONTEITH : L'ALBEDO	22
6.1 L'albédo variable avec la neige	23
6.1.1 Méthode.....	23
6.1.2 Résultats avec SAFRAN	24
6.1.3 Résultats avec GR4J	28
6.2 Recherche de la meilleure valeur moyenne d'albédo.....	29
6.2.1 Méthode.....	29
6.2.2 Résultats GR4J	29
6.3 Résultats, Critiques, Conclusion sur l'albédo	30
6.3.1 Critique : une sous/sur-estimation des rayonnements SAFRAN ?.....	31
6.3.2 Conclusion	33
7 ANALYSE DE SENSIBILITE PENMAN MONTEITH : LA RESISTANCE DE SURFACE R_s	35
7.1 Pourquoi la résistance de surface est intéressante ?.....	36
7.2 La résistance de surface s'annulant avec la pluie	37
7.2.1 Résultat avec SAFRAN	37
7.2.2 Résultats avec GR4J	37
7.3 Recherche de la valeur moyenne de résistance de surface	39
7.4 Les modèles de résistance de surface.....	39
7.4.1 Approche physique, mécaniste	39
7.4.2 Approche physiologique.....	40
7.4.3 Approche climatique	40
7.5 Conclusion.....	40
8 SECONDE EXPERIENCE : ETUDE DES CHRONIQUES D'ETP : GR4J, ET MORDOR	41
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	45
Liste des figures.....	48
RESUME.....	50

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En entrée des modèles pluie-débit, trois forçages sont requis, deux sont mesurés, la température et les précipitations, le troisième est calculé, l'évapotranspiration. Pour simuler des débits futurs, il est nécessaire d'extrapoler ces forçages et l'évapotranspiration est au centre de la problématique de l'exercice du fait de la méconnaissance de ce phénomène à grande échelle.

Oudin (2004) proposait à l'issue de sa thèse, une formule d'évapotranspiration nécessitant peu de données, et ayant une grande robustesse spatiale, optimisée pour répondre aux besoins de la modélisation hydrologique en climat stationnaire. Pour cette ETP, qui fait suite à une recalibration de la formule de McGuinness (1972), la question de l'extrapolation n'a pas été abordée. Moins réaliste physiquement que l'équation de Penman Monteith (1965), sa significativité en projection peut être questionnée vis-à-vis de son seul paramètre climatique variable : la température.

D'autre part, les modèles hydrologiques ont montré de grandes dépendances vis-à-vis de leur période de calage (Coron et al., 2014). Coron pointait du doigt l'évapotranspiration comme facteur principal de ce biais du fait qu'il y ait trop grande rigidité dans son mode de calcul.

Jusqu'à présent IRSTEA emploie dans les modèles hydrologiques de la famille GR deux formulations d'évapotranspiration ; la première celle d'Oudin (2005), la seconde; la formule ET_0 de Penman Monteith FAO 56 (Allen et al., 1998). Développée par et pour les agronomes, cette dernière a été calibrée pour reproduire l'évapotranspiration potentielle d'une parcelle standard ; celle d'une herbe verte de 12cm. Cette ET_0 qui a des performances inférieures à celle d'Oudin, peut être utilisée comme forçage alternatif des modèles GR pour tous bassins versants, quels que soient leurs climats ou leurs végétations dominantes.

Les travaux de Coron (2013) poussèrent EDF à revoir la gestion de l'ETP dans leur modèle. Poncelet (2013) proposait à partir d'une formule d' ET_0 ou d'ETP et non plus de l'unique température, un nouveau traitement de l'évapotranspiration potentielle dans MORDOR, assignant deux paramètres à caler (*cetp*, *kmin*), devant une formule d' ET_0 ou ETP, ces coefficients vont moduler le bilan, l'amplitude et la phase du signal de l'évapotranspiration potentielle annuelle. Cette nouvelle approche se veut plus réaliste par rapport aux anciennes valeurs d'ETP produite par MORDOR, cependant l'ajustement du bilan se fait au moyen du paramètre *cetp*.

L'objectif de ce stage est d'améliorer les performances de la formule de Penman Monteith, en remettant en cause les paramètres fixés par la FAO, afin d'obtenir une ET_0 adaptée à l'étude hydrologique avec des performances aussi bonnes que l'ETP d'Oudin. Cette amélioration nous permettrait d'avoir une base physique solide et plus de confiance pour se projeter avec une gamme de paramètres climatiques plus large.

Dans ce mémoire, nous présenterons deux expériences, menées respectivement avec GR4J puis GR4J et MORDOR :

Première expérience :

Nous réaliserons une analyse de sensibilité de la formule d' ET_0 de Penman Monteith FAO 56 en questionnant le paramètre bioclimatique (*rs*) et physique (albédo) calibrés pour une parcelle standard, une herbe verte de 12cm, en cherchant quelles en sont les meilleures valeurs au vu des critères d'évaluations de GR4J pour 600 bassins versants répartis dans toute la France. Le but est

d'avoir une nouvelle ET_0 adaptée à l'hydrologie. ET_0 , utilisée telle quelle dans GR4J et transformée en ET_m dans MORDOR.

Seconde expérience :

Nous étudions comment GR4J et MORDOR digèrent cette nouvelle information en calage/validation par rapport à l'ETP de Ludovic Oudin et l' ET_0 Penman Monteith FAO56, avec comme banc d'essai : 222 bassins versants issus de la base Coron et de nouveaux critères d'évaluation adaptés à l'étude de l'évapotranspiration.

L'originalité de cette recherche par rapport aux travaux déjà menés sur l'évapotranspiration tient aussi sur l'étude des années hydrologiques extrêmes 1976, 2003. Extrêmes de façons différentes, 1976 pour sa sécheresse et 2003 pour ses chaleurs.

1 L'ÉVAPOTRANSPIRATION, QUELLE DÉFINITION POUR QUELLE SCIENCE ?

Définir l'évapotranspiration n'est pas simple tant les termes regroupant tous les phénomènes d'ascension d'eau, reprise par l'atmosphère ont été nombreux dans l'histoire scientifique. Plusieurs sciences sont concernées par le phénomène ; la biologie, l'agronomie, l'hydrologie, la climatologie, et plusieurs définitions et formulations ont été proposées adaptées à l'échelle de leur objet d'étude.

Évaporation du latin impérial *evaporatio*, « fait de se disperser sous forme de vapeur » E , est le passage progressif de l'état liquide à l'état gazeux. Le phénomène est à distinguer de la vaporisation, par le fait qu'il n'y a pas d'ébullition.

Transpiration du latin médiéval *transpirare*, 'sudation', T , est le « Rejet de vapeur d'eau par une plante, favorisant l'ascension de la sève brute. » Larousse.

Évapotranspiration ET , apparu au XX^e siècle dans le langage scientifique, est la combinaison de l'évaporation et de la transpiration. Dans le bilan en eau d'un bassin versant, l'évapotranspiration représente de 30% des précipitations pour les bassins les plus humides ou plus froids, et jusqu'à 90% des précipitations pour les plus arides.

1.1 LE CONCEPT DE POTENTIALITE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION : AED

Plusieurs évapotranspirations « potentielles » sont distinguées par les spécialistes. Elles se différencient par des résolutions spatiales et temporelles différentes avec un mode de calcul pour obtenir une évapotranspiration réelle par échelon, en une ou plusieurs étapes. Chaque science a son approche et considère un degré de justesse physique propre, plus ou moins grossier selon ses exigences, mais toute parlent du même phénomène physique, l'AED : « *Atmospheric Evaporative Demand* ».

L'évapotranspiration réelle est obtenue en fonction de la réserve utilisée du sol quelque que soit la discipline, c'est-à-dire de l'eau effectivement disponible à l'évapotranspiration.

1.1.1 De l'AED à l'ETR pour les agronomes

Pour les agronomes, l'évapotranspiration réelle se calcule en deux étapes, et doit être le plus physiquement et physiologiquement juste à l'échelle de la parcelle : ces étapes ont été détaillées par le rapport 56 de la FAO² de 1998 ([Allen et al., 1998](#)). L'objectif agronomique est de connaître l'évapotranspiration réelle d'une espèce en connaissant son évapotranspiration maximale, c'est-à-dire sa quantité d'eau maximale consommable physiologiquement.

Évaporation de référence E_0 , revient à estimer quelle quantité d'eau est effectivement reprise par l'atmosphère pour une condition climatique particulière. Elle est équivalente à l' $E_{\text{surface libre}}$, calculée à partir de la formule de Penman Monteith ([1965](#)), une formule à bases physique obtenue avec des paramètres aérodynamiques, et suivant le bilan d'énergie.

Évapotranspiration de référence ET_0 , à la différence de l'évaporation de référence E_0 , ET_0 prend en compte une résistance *standard* à l'écoulement du flux de vapeur. Cette résistance est celle d'une parcelle hypothétique d'herbe verte de 0,12m de haut. On distingue deux résistances, l'interne et l'externe, aussi appelées respectivement de surface et aérodynamique.

$$E_0 > ET_0$$

Évapotranspiration maximale ET_m , intègre des paramètres bioclimatiques soit en facteur, devant la formule (*approche two-step*), soit dans la formule (*approche one-step*), afin de décrire physiologiquement, pour une espèce donnée, quelle serait la quantité d'eau maximale consommable. Elle peut être supérieure ou inférieure à l' ET_0 en fonction de l'espèce étudiée A ou B par rapport à l'herbe verte. C'est une transpiration spécifique.

$$ET_{mA} > ET_0 > ET_{mB}$$

Évapotranspiration réelle l' ETR , est une fraction de l'évapotranspiration maximale, elle est fonction de la réserve utile du sol, c'est-à-dire de la quantité d'eau pour une espèce disponible à l'évapotranspiration.

$$ET_m \geq ETR$$

1.1.2 De l'AED à l'ETR pour les hydrologues

Pour les hydrologues, l'approche est différente, traditionnellement l'évapotranspiration réelle est obtenue en une étape : de la « potentielle » à la réelle.

Évapotranspiration potentielle, l' ETP est un terme banni du langage des agronomes depuis la publication de la FAO 56 ([Allen et al., 1998](#)), car il est ambigu de leur point de vue. « *The use of other denominations such as potential ET is strongly discouraged due to ambiguities in their definitions.* ». Ambiguë parce qu'une ETP peut être à la fois une E_0 , une ET_0 et une ET_m ou aucune

² FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations

d'entre elles, tout dépend de son mode de calcul et de sa formule. La formule d'Oudin ne peut pas être considérée comme une E_0 , une ET_0 et une ET_m , c'est une ETP.

L'hydrologie actuelle est très tolérante par rapport à la réalité physique de l'évaporation et de la transpiration. Cette tolérance vient du fait qu'un hydrologue travaille à l'échelle d'un bassin versant et qu'à cette échelle les précisions physiologiques souhaitées par les agronomes par le biais des paramètres bioclimatiques sont inestimables.

Pourquoi ne pas employer le terme d'évaporation potentielle EP en supprimant la *transpiration* ?

Pour les agronomes la transpiration est spécifique à une espèce, elle peut être moyennée à plus grande échelle pour différentes cultures, mais elle doit être obtenue par des observations physiologiques, et/ou étalonner avec des mesures directes par exemple lysimétriques.

Pour les hydrologues, la transpiration est synonyme de résistance. Selon les formules elle est calculée directement par le biais de coefficients cultureux, de résistances internes et externes comme chez les agronomes, ou indirectement, sans la nommer, par les jeux de coefficient placés devant les paramètres climatiques.

Les formules d'ETP peuvent être empiriques Turc (1953), semi-empirique Penman Monteith FAO-56 (1998) ou physique Penman Monteith (1965), selon plusieurs approches pouvant être regroupées en plusieurs classes : bilan hydrique, aérodynamique, température, rayonnement, et combinatoire.

Nous emploierons pour ce mémoire l'acronyme ETP pour désigner de façon la plus globale possible, à l'échelle du bassin, la demande évaporatoire de l'atmosphère ou force évaporatoire quand la précision sur l' ET_0 ou l' ET_m n'est pas nécessaire.

Dans le cas des formules simples, basées sur le rayonnement ou la température, T de ETP ne représente finalement qu'une résistance du flux à l'écoulement par les jeux de coefficient.

$$ETP \geq ETR$$

La définition de l'ETR ne change pas, elle est une fraction de l'évapotranspiration potentielle. Par définition, l'ETR ne peut **jamais** dépasser l'ETP.

Nous suivrons le plan suivant : une présentation de l'échantillon de données et des fonctions objectives, une revue bibliographique sur l'intérêt d'extrapoler la formule de Penman Monteith. Puis les expériences un et deux menées respectivement avec GR4J puis GR4J et MORDOR.

2 DONNEES CLIMATIQUES ET BASSINS VERSANTS ETUDIES

Notre échantillon de données se divise en deux branches : les données climatiques d'une part et les données de débit d'autre part.

Les données climatiques alimentent les formules d'évapotranspiration selon leur besoin (température de l'air, vitesse du vent ...) et les modèles hydrologiques en précipitations. Nous utiliserons SAFRAN³, des données standardisées et réanalysées, qui sont disponibles pour l'ensemble de la France, sans lacune et sans discontinuité géographique de 1958 à 2013.

Pour la précipitation nous nous servirons pour la seconde expérience des données SPAZM⁴. SPAZM est un système d'analyse adapté au relief issu du réseau d'observation EDF et météo France ([Gottardi, 2009](#)).

Les données de débits qui alimentent les modèles hydrologiques sont fournies par la banque Hydro.

2.1 LES DONNÉES CLIMATIQUES, SAFRAN, SPAZM

2.1.1 SAFRAN

Les données SAFRAN sont des données dites « réanalysées ». La réanalyse est une méthode combinatoire entre un modèle climatique et des mesures terrains. Elles ont été compilées par le centre d'étude de la neige CROCUS, et aujourd'hui produites par Météo-France au CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques). Elles sont issues d'une méthode géostatistique, reposant sur le principe de l'interpolation optimale entre les données calculées et observées ([Durand, 1995](#)). Les données sont ensuite projetées sur une grille régulière Lambert-II, pour un nombre total de 9882 mailles dont 8585 mailles sur le territoire français (les mailles SAFRAN ont été étendues au bassin versant du Rhône et du Rhin en Suisse et en France). Chaque grille a une résolution spatiale de 8km*8km. SAFRAN est particulièrement intéressant pour les zones montagneuses, le modèle ayant été discrétisé verticalement par bande d'altitude. Chacune de ces bandes a été obtenue par l'interpolation verticale avec les bandes supérieure et inférieure qui l'encadrent ([Le Moigne, 2002](#)).



SAFRAN ne prend pas en compte des spécificités régionales comme des masques constitués localement par le relief ou la végétation, ce qui peut entraîner à l'occasion, une sous-estimation des rayonnements visibles modélisés ([Etchevers, 2000](#)). Nous serons amenés à nous questionner sur les valeurs des rayonnements visibles fournies par SAFRAN au cours de ce mémoire.

La répartition des quantités de précipitations et leur phase (liquide, solide) n'a pas été validée de manière systématique au pas de temps horaire, mais reste très correcte au pas de temps journalier.

Nous utiliserons 11 champs SAFRAN avec un pas de temps journalier, excepté pour la température avec deux valeurs par jour (minimum et maximum).

³ *Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie*

⁴ *SPAtialisation en Zones de Montagne*

Les champs que nous utiliserons :

- Date : date (AAAAMMJJ)
- Psol : précipitations solides (mm)
- Pliq : précipitations liquides (mm)
- Temp : température de l'air (°C)
- Vent : vitesse du vent (m/s)
- Humi : humidité spécifique de l'air (g/kg)
- DLI : rayonnement atmosphérique (J/cm²)
- SSI : rayonnement visible (J/cm²)
- SWE : équivalent en eau de la neige (mm) du modèle ISBA
- TN : température minimale de l'air (°C)
- TX : température maximale de l'air (°C)

2.1.2 SPAZM

La réanalyse SPAZM est interne à EDF, elle est issue du croisement d'une maille plus fine 1km*1km et d'un réseau de mesure plus dense et adapté à la montagne. Ce réseau a été implanté de façon stratégique pour EDF et les besoins de ses activités économiques dans le but de mieux rendre compte de l'hydrométéorologie des bassins versants de montagne qui est particulièrement complexe du fait de l'hétérogénéité de la topographie. Les effets orographiques sont pris en compte, modélisés par une relation linéaire reliant les précipitations et de la circulation atmosphérique ([Gottardi, 2009](#)).

Pour la première expérience, nous utiliserons les 11 champs fournis par SAFRAN, pour la seconde, les données de précipitation de SPAZM en lieu et place de la précipitation totale de SAFRAN. La pluie SPAZM n'est pas disponible sur tout le territoire, seulement dans la moitié sud.

2.2 LES BASSINS VERSANTS, LES DÉBITS

Nous utiliserons des données de débits fournies par la banque hydro avec moins de 15% de lacunes sur notre période de calage/validation du 01/09/1987 au 31/08/2006. Les données des mailles SAFRAN et SPAZM sont interpolées aux limites des bassins versants par une moyenne pondérée fonction du taux de recouvrement spatial entre la maille et le bassin.

Nous aurons deux échantillons de bassins versants pour nos deux expériences.

2.2.1 Échantillon pour la première expérience

Le premier échantillon (600 bv) ([Figure 1](#)) est réparti dans toute la France, il nous servira à trouver avec des simulations multiples, quelles sont les meilleures valeurs dans l' ET_0 ; d'albédo, et de résistance interne pour GR4J. La ([Figure 1](#)) illustre également notre sous sélection dans la base des 600 bv avec une condition sur les 60 plus hauts exutoires, cette sous-sélection correspondra aux bassins de montagne. Elle permettra de mettre en évidence les réactions de ces bassins aux formules d'ETP testées. Les 60 bassins versant de montagne ont des exutoires compris entre 708 m et 2154 m d'altitude.

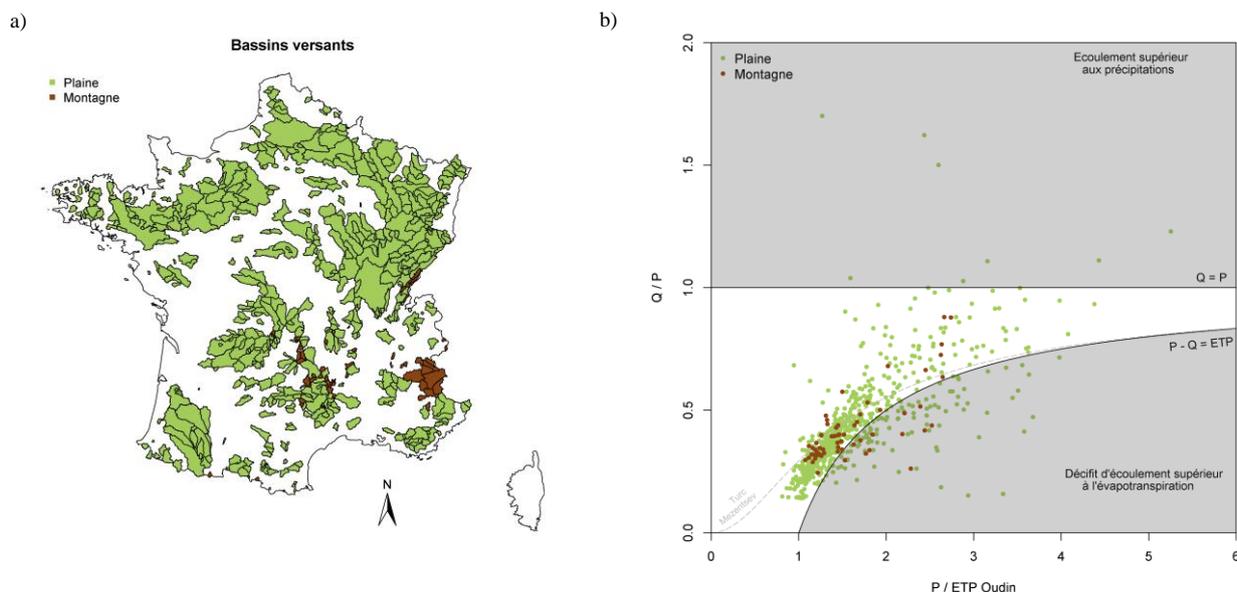


Figure 1 : a) Carte et b) représentation adimensionnelle des 600 bassins versants. Les points du graphique adimensionnel correspondent aux moyennes des séries temporelles de P_{SAFRAN} , Q et ETP_{OUDIN} (1958-2013). En pointillé la relation de Turc-Mezentsev (1954), l'axe P/ETP est un indice d'aridité, l'axe Q/P est un indice de rendement.

C'est un échantillon large et varié de bassins versants, de toutes les tailles et à toutes les altitudes : de 5,3 km² à 26058 km², du niveau de la mer à 2154 m. Ce panel de bassins offre une grande variabilité de signatures climatiques et hydrologiques.

Tous les bassins sont acceptés pour la recherche dans l' ET_0 de Penman Monteith de paramètre (albédo, résistance) adapté à l'hydrologie, même ceux dont l'écoulement est supérieur aux précipitations, qui par définition ne pourront jamais boucler leur bilan avec une ETP.

Les 8 bassins sur 600 dans la partie grisée supérieure (Figure 1): *écoulement supérieur aux précipitations* devraient avoir un impact très modeste sur la calibration des paramètres dans l' ET_0 . Ils nous permettront en revanche par leur valeur de savoir si le modèle cherche à rééquilibrer le bilan du bassin en préférant des paramètres d' ET_0 faible ou forte qui tendraient à la diminuer ou augmenter l' ET_0 .

En toute logique, dans cette partie grisée supérieure, nous devrions avoir des paramètres qui diminueraient l' ET_0 , car nous y sommes limités par l'eau et inversement dans la partie grisée inférieure avec des paramètres qui augmenteraient l' ET_0 , car nous y sommes limités par l'énergie.

2.2.2 Échantillon pour la seconde expérience

Le second échantillon de bassins versants : (222 bv) (Figure 2) est une sous sélection du précédent échantillon (600 bv) (Figure 1). Nous aurons également une condition sur les 50 plus hauts exutoires,. Une description détaillée est disponible dans Coron(2013).

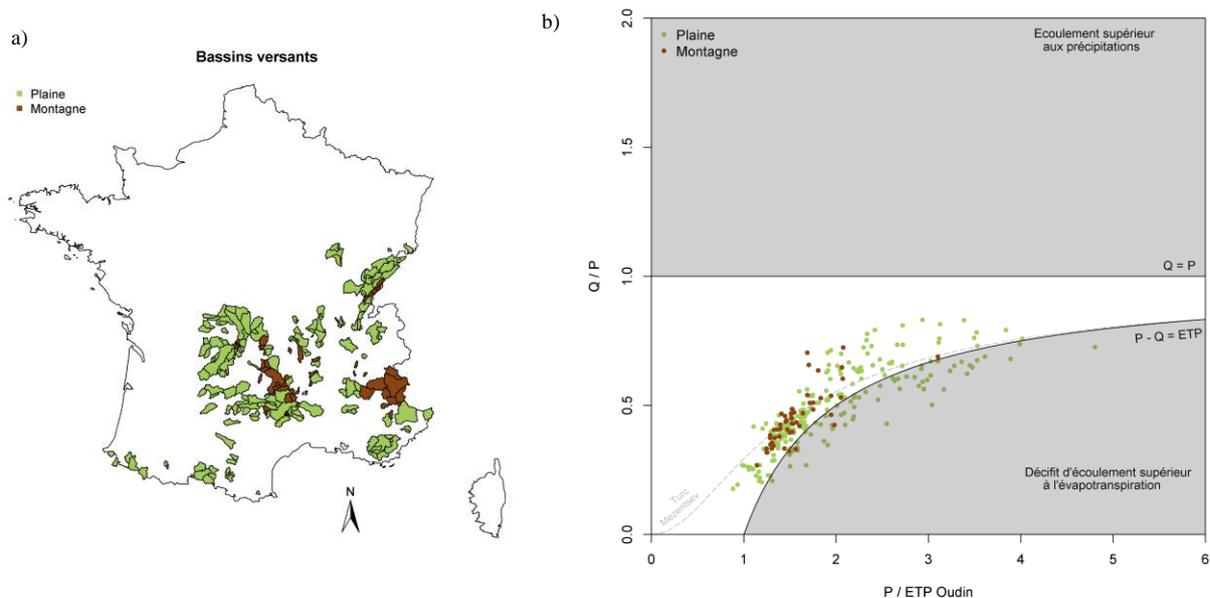


Figure 2 : a) Carte et b) représentation adimensionnelle des 222 bassins versants. Les points du graphique adimensionnel correspondent aux moyennes des séries temporelles de P_{SPAZM} , Q et ETP_{OUDIN} (1958-2013). En pointillé la relation de Turc-Mezentsev (1954), l'axe P/ETP est un indice d'aridité, l'axe Q/P est un indice de rendement.

Cet échantillon résulte d'un tri réalisé par EDF sur la base (Coron, 2013). Ces bassins ont des bilans hydriques clos rendant cette sélection spécifique à l'étude de l'évapotranspiration, c'est-à-dire que pour tous les bassins versants :

- La pluie peut fournir en quantité suffisante le débit à l'écoulement, autrement dit : il n'y a plus de limite en eau, donc l' ET_0 aura un rôle à jouer dans le bilan.
- Le déficit d'écoulement est globalement inférieur ou égal à l'évapotranspiration, il y aura *moins* de limites en énergie autrement dit l' ET_0 aura la force de retourner l'atmosphère suffisamment d'eau pour boucler le bilan.

Ces 222 bv bénéficient de la haute résolution des pluies SPAZM et certaines surfaces ont été corrigées suivant plusieurs critères : une correction par rapport au bilan hydrologique et par rapport aux surfaces de la banque Hydro (Morales, 2014).

3 LES MODÈLES HYDROLOGIQUES, GR4J ET MORDOR

Dans la famille GR (Perrin et al., 2007), nous utiliserons GR4J (Perrin et al., 2003), car il n'y a pas de différence pour l'ETP et ETR avec les versions les plus récentes du modèle à cinq paramètres (GR5J ; (Le Moine, 2008)) et à six paramètres (GR6J ; (Pushpalatha, 2013)). Dans la famille MORDOR (Garçon, 1999), nous utiliserons la dernière version semi-distribuée, pas encore référencée, à 17 paramètres.

Le temps de calcul est un élément important dans la recherche scientifique, les modèles hydrologiques pour optimiser leur débit simulé par rapport à l'observation font des itérations sur les valeurs allouées aux réservoirs, aux coefficients d'échanges afin de trouver le meilleur jeu de paramètre possible.

Le nombre de paramètres à caler est le principal facteur chronophage et l'ajout de paramètre augmente de façon exponentielle le temps de calcul, de ce fait, les différences de temps de calcul sont très marquées entre nos deux modèles.

3.1 GR4J⁵

Dans notre version de GR4J, le réservoir de production est étagé en 5 bandes d'altitude de même surface (Figure 3), discrétisant au pas de temps journalier les forçages E_0 , T et P . Forçages extrapolés par rapport à courbe hypsométrique du bassin.

Il n'y a pas de paramètre dans GR4J qui module l'ETP elle est directement transformée en ETR en fonction de l'eau disponible à l'évapotranspiration, dans le réservoir de production.

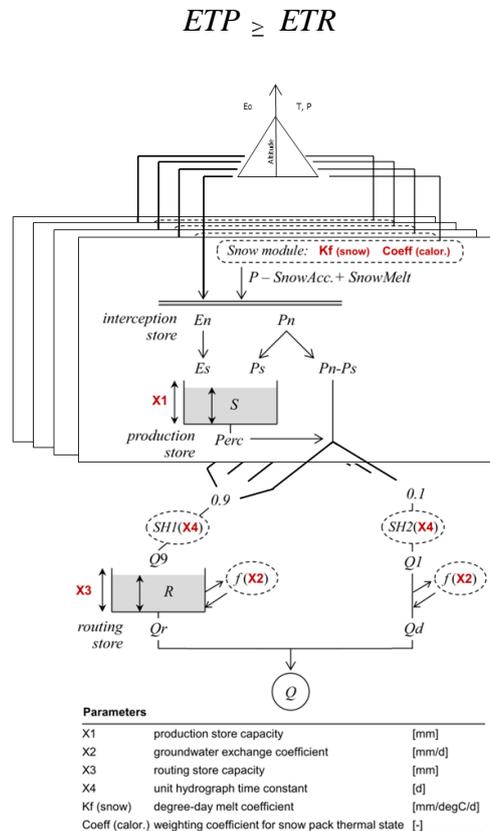


Figure 3 Schéma du modèle GR4J semi-distribué en bandes d'altitude et module CemaNeige

3.2 MORDOR SD⁶(2014)

Nous travaillerons avec la nouvelle version de MORDOR SD pour Semi-Distribué (Figure 4). C'est la première modification profonde du modèle hydrologique depuis sa formulation initiale en 1999. Ce nouveau Mordor étagé a maintenant 17 paramètres, quand la version précédente [Vo 2013] en avait 23.

MORDOR SD 2014 a jusqu'à présent été testé avec un jeu de 50 bassins versants de la base de données EDF DTG Grenoble. Notre expérience avec 222 bassins versants est inédite.

⁵ Génie Rural à 4 paramètres Journalier

⁶ (MOdèle à Réservoirs de Détermination Objective du ruissellement semi-distribué)

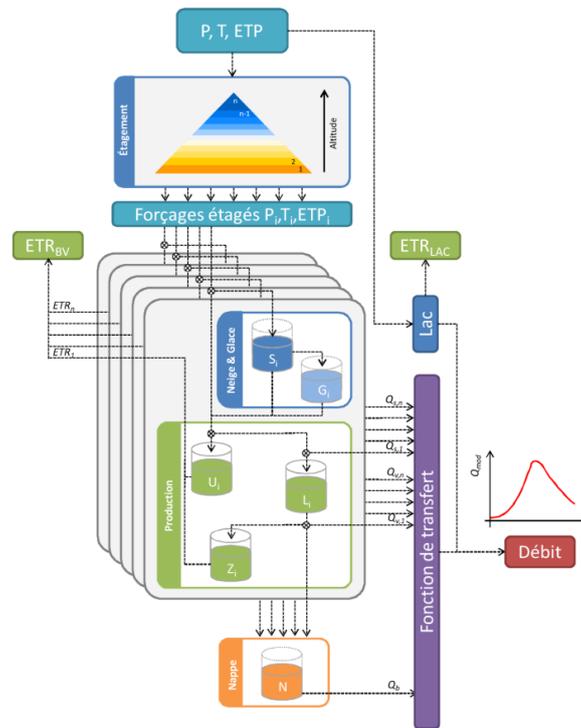


Figure 4 Schéma du modèle MORDOR semi distribué en bande d'altitude.

3.2.1 L'ETP dans MORDOR

Dans l'ancienne version de MORDOR, l'ETP était calée avec un paramètre en fonction de la température médiane du bassin versant considéré. Ce paramètre étant très libre, il pouvait entraîner des valeurs aberrantes d'ETP par rapport aux formules traditionnelles ; par exemple jusqu'à 2000mm/an pour le bassin versant du Verdon ([Poncelet, 2013](#)) quand les ETP traditionnelles donnaient entre 500 mm/an et 700 mm/an.

L'ETP atteignait ces valeurs dans MORDOR puisque la seule évacuation possible d'eau en cas de surplus était l'ETR. Le modèle n'ayant pas de coefficient d'échange interbassin, il n'hésitait pas à donner des valeurs très fortes à ce paramètre multiplicateur de la température pour boucler son bilan.

Dans le nouveau MORDOR SD, l'ETP issue d'une formule *traditionnelle* (Oudin, Penman Monteith,..) est calée avec deux paramètres *cetp* et *kmin* qui corrigent le bilan en eau et la saisonnalité en fonction des besoins du modèle. A l'issue de ce calage, le modèle produit une ETM (E_{max}) ([Figure 5](#)).

$$E_{max} \text{ bv } A \geq ETP \geq E_{max} \text{ bv } B$$

$$E_{max} \geq ETR$$

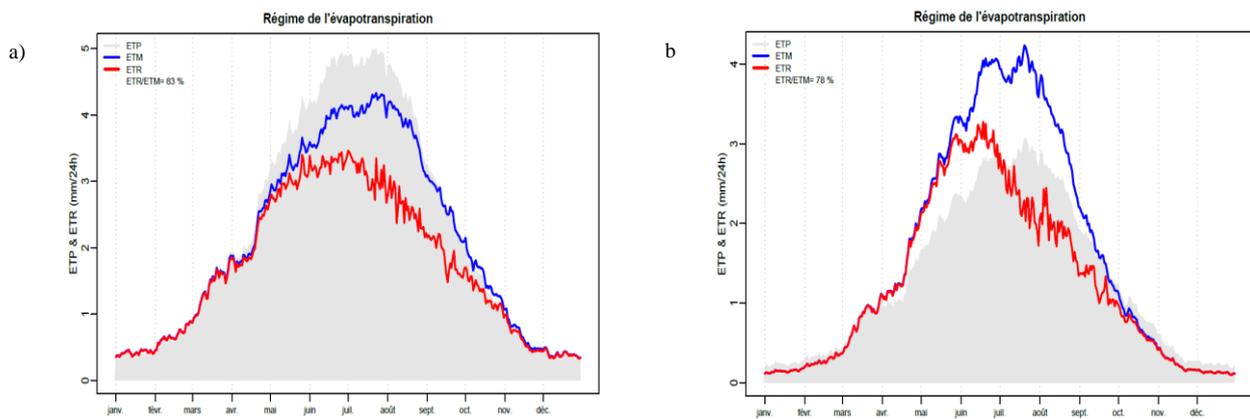


Figure 5 Exemple de correction de l'ETP Oudin par les coefficients c_{etp} et k_{min} pour a) le bassin A1050310 ($c_{etp} = 1.21$, $k_{min} = 1.50$), b) le bassin O7234010 ($c_{etp} = 0.80$, $k_{min} = 0.18$)

3.3 LES CUMULS D'ETR DANS LES DEUX MODÈLES

Deux modèles, deux finalités opérationnelles.

Chaque modèle a son approche du surplus d'eau, une évacuation par le bas, ou par le haut : MORDOR a été conçu pour répondre au besoin de modélisation hydrologique d'EDF, son rayon d'action est principalement en montagne sur des lithologies en majorité cristallines avec très peu d'infiltration profonde, le modèle n'a pas de paramètres d'échanges interbassins, à la différence de GR4J.

Mordor est donc obligé de boucler son bilan en eau avec l'ETR dans les limites de l'ETM et de ses deux paramètres. GR4J, peut quant à lui s'adapter en *infiltrant* le surplus d'eau via le coefficient d'échange.

- Dans GR (Figure 11) les chroniques d'ETR sont plus faibles et plus lisses, donnant de faible variabilité interannuelle due au paramètre d'échange souterrain. Cet échange suit le déficit d'écoulement ($P - Q$), l'ETR est très libre par rapport à l'ETP.
- Dans Mordor l'ETR est contrainte, elle a plus tendance à suivre le déficit d'écoulement, et d'être proche de l'ETP et donc de la formule choisie (Figure 11).

Notre second échantillon de bassins, n'étant ni limité par l'énergie, ni par l'eau, devrait limiter les échanges souterrains de GR4J et donner plus de marge à l'ETR dans l'ETP pour Mordor. La nécessité de boucler le bilan en eau permet d'éviter des bassins avec d'éventuels problèmes de mesure (Le Moine et al., 2007).

4 CRITÈRES D'ÉVALUATIONS, FONCTIONS OBJECTIVES, PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

4.1 CRITÈRES D'ÉVALUATIONS POUR LA PREMIERE EXPERIENCE

Pour notre première expérience (cf [partie 2.2.1](#)) avec GR4J et la base des 600 bassins versants, nous utiliserons des critères d'évaluations classiques des modèles hydrologiques, à savoir le NASH sur la racine des débits (version C2M) et le KGE pour comparer les différentes ETP testées.

Le C2M ([Mathevet et al., 2006](#)) est un critère de NASH ([Nash and Sutcliffe, 1970](#)) borné. Son principal atout est qu'il est borné en moins l'infini. Il a été développé et testé pour répondre aux besoins d'étude à large échantillon de bassins versants.

$$NASH = 1 - \frac{\sum (\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{mod}})^2}{\sum (\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{obs}})^2}$$

$$C2M = \frac{NASH}{2 - NASH}$$

À noter que le C2M est légèrement moins optimiste que le NASH.

Le KGE ([Gupta et al., 2009](#)) est la moyenne quadratique, d'un biais de moyenne, d'un coefficient de corrélation entre les débits observés et simulés et d'un biais de variance.

$$KGE = 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{\mu_{mod}}{\mu_{obs}}\right)^2 + (1 - cor(obs; mod))^2 + \left(1 - \frac{\sigma_{mod}}{\sigma_{obs}}\right)^2}$$

Ces critères permettent de rendre compte de la préférence des modèles vis-à-vis de la formule d'ETP choisie, cependant, ils ne ciblent pas l'ETP, mais l'ensemble du modèle, de sa capacité à bien modéliser le débit, en intégrant l'ensemble des processus hydrologiques; des forçages, aux variables internes. Ce sont des critères globaux.

4.2 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS POUR LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE

Compte tenu du grand nombre de données et de résultats, il est important de trouver une façon simple et lisible pour les interpréter.

Pour notre première expérience, nous optons pour une représentation *classique* des résultats ([Figure 6](#)). Avec nos 600 bassins versants, nous obtenons 600 critères d'évaluations, la distribution des critères d'évaluation peut être représenté à l'aide de boîtes à moustaches représentant les quantiles de l'échantillon de donnée : q10, q25, q50, q75, q90 et un point correspondant à la moyenne.

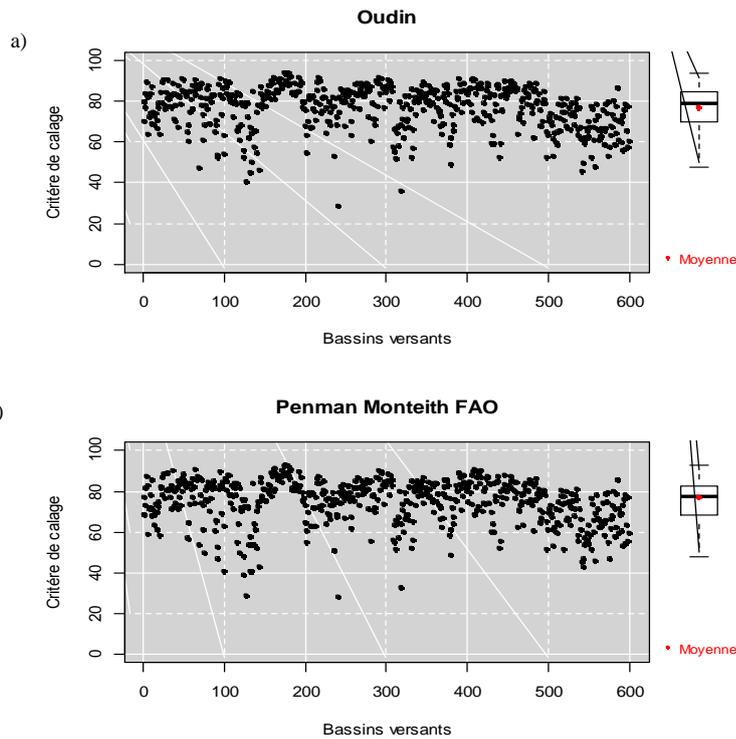


Figure 6 Présentation des résultats : a) Critère de calage et boîte à moustache ETP Oudin ; b) Critère de calage et boîte à moustache ET_0 Penman Monteith FAO56

Voici notre point de départ (Figure 7), les boîtes à moustaches représentant la distribution en C2M des 600 bv de notre première expérience : On remarquera que l'ETP de d'Oudin est meilleure que l' ET_0 Penman Monteith FAO dans toutes les situations, en calage, validation, et en validation sur les années extrêmes.

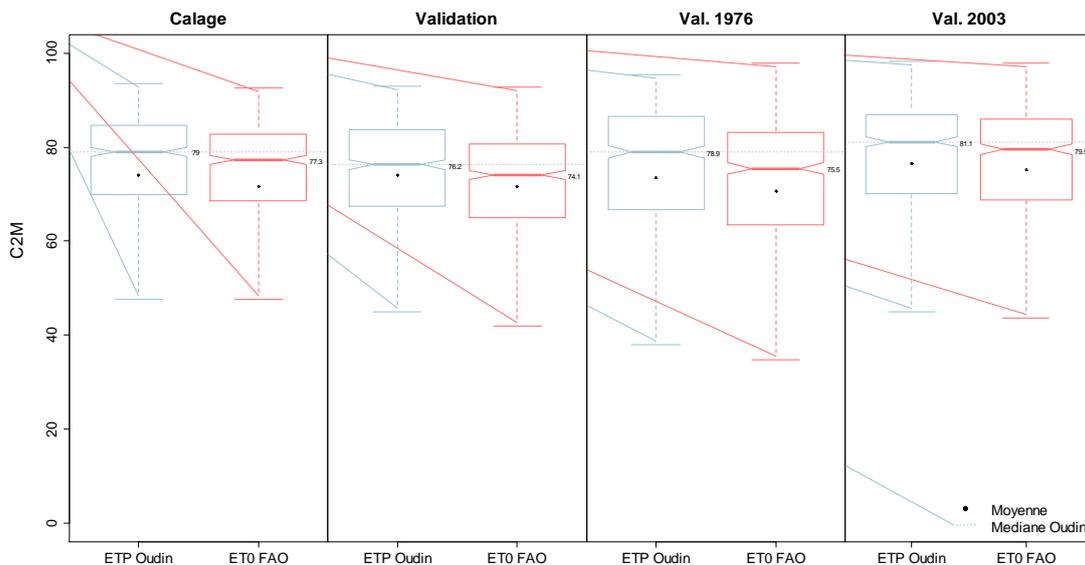


Figure 7 Comparaison de boîtes à moustache entre ETP_{Oudin} en bleu et ET_{0FAO56} en rouge pour 600 bv en C2M, avec les périodes de calage du 01/09/1987 au 31/08/1996 et validation du 01/09/1996 au 31/08/2006 et validation sur les années extrêmes 1976 et 2003,

Ainsi que sur les bassins de montagnes (Figure 8), pour les mêmes exercices de calage/validation.

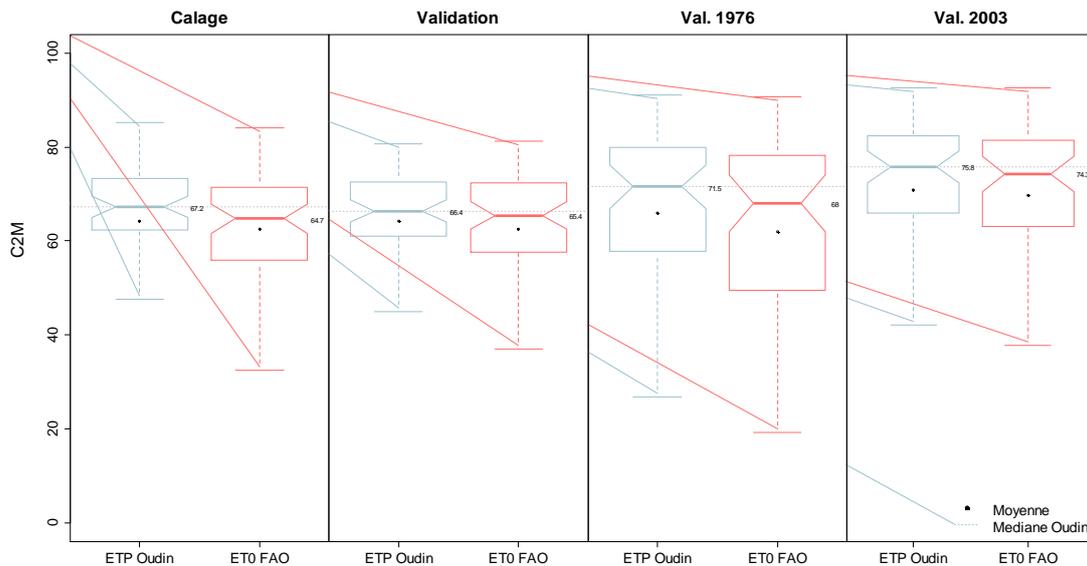


Figure 8 Comparaison de boîtes à moustache entre ETP_{Oudin} et ET_{0FAO56} pour les 60 bv les plus hauts au sein 600 en C2M, avec les périodes de calage du 01/09/1987 au 31/08/1996 et validation du 01/09/1996 au 31/08/2006 et validation sur les années extrêmes 1976 et 2003.

Une autre façon de représenter les résultats est une carte et la représentation adimensionnelle de Turc des 600 bv (Figure 9). Les bassins sont colorisés en fonction des performances des ETP et ET_{0FAO} . Pour l'ensemble de ce mémoire, le thème bleu correspondra à l'ETP d'Oudin qui a de meilleures performances en C2M et KGE, et le thème rouge l' ET_{0FAO} Penman Monteith FAO56.

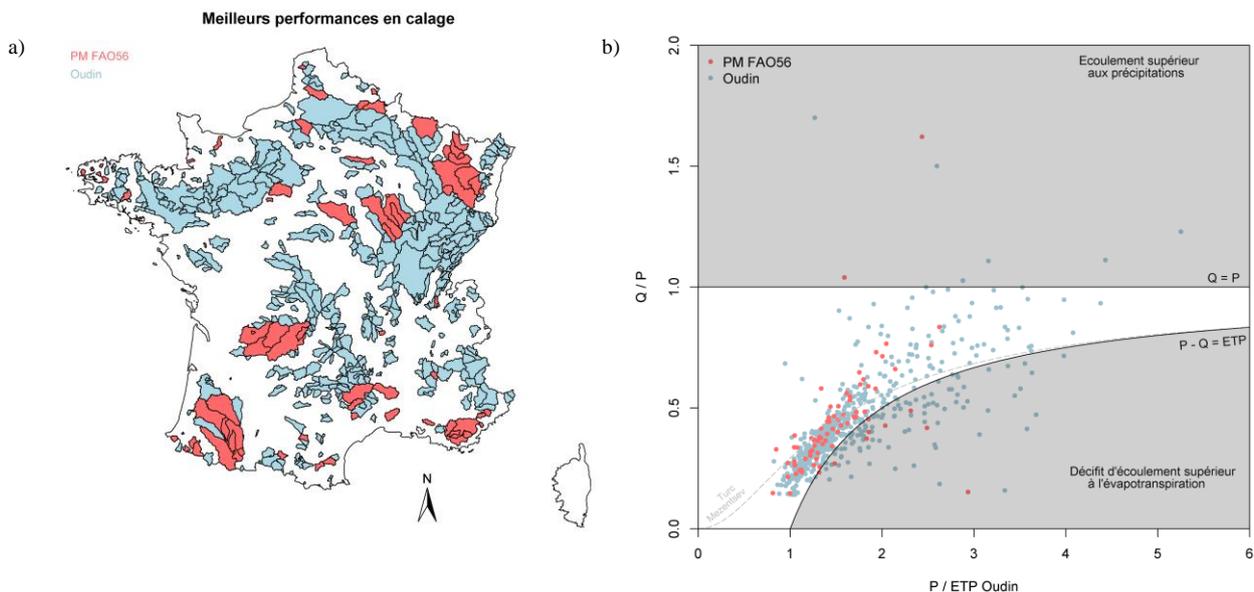


Figure 9 : a) Carte et b) représentation adimensionnelle des 600 bassins versants. Le thème rouge correspond aux bassins ayant de meilleures performances en critère d'évaluation avec l' ET_{0FAO56} , le thème bleu aux bassins ayant de meilleures performances en critère d'évaluation avec l'ETP d'Oudin. Les points du graphique adimensionnel correspondent aux moyennes des séries temporelles de P_{SAFRAN} , Q et ETP_{OUDIN} (1958-2013).

4.3 CRITÈRES D'ÉVALUATIONS POUR LA SECONDE EXPERIENCE

Pour notre seconde expérience (cf [partie2.2.2](#)) avec GR4J et MORDOR et la base des 222 bassins versants, nous étudierons des critères supplémentaires, permettant d'aller au-delà des performances globales en définissant des critères dédiés.

Nous calerons dans un premier temps, les deux modèles en KGE, avec les périodes de calage du 01/09/1987 au 31/08/1996 et validation recoupant le calage du 01/09/1987 au 31/08/2006 afin d'étudier les sorties pour certains bassins choisis dans la liste des 222.

Nous étudierons les chroniques d'ETP, ET_0 , E_{max} (ETP MORDOR) en les comparant aux déficits d'écoulement (P-Q) pour les deux modèles, les chroniques des débits observés et simulés en fonction du choix d'évaporation potentielle, puis la comparaison des déficits d'écoulement observé et simulé (Dobs,Dsim) et enfin les corrections du bilan apportées par les modèles qui modulent l'ETP dans MORDOR (*cetp* et *kmin*) et nous les comparerons aux coefficients d'échange interbassins dans GR4J (P-Q-ETR).

4.4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS POUR LA SECONDE EXPERIENCE

Nous présenterons de façon synthétique avec une figure pour un bassin ([Figure 10](#)), se lisant comme un tableau, aux lignes 1 et 2 respectivement GR4J et MORDOR et aux colonnes 1, 2, 3 respectivement les chroniques d'ETP, d' ET_0 , d'ETR, les chroniques de débit observé et simulé avec KGE, et les déficits d'écoulements (P-Q) observés par rapport aux simulés en cumul annuel et leurs régressions linéaires correspondantes ([Figure 11](#)).

Par exemple pour parler des déficits d'écoulement pour MORDOR, on emploie [\[2,3\]](#).

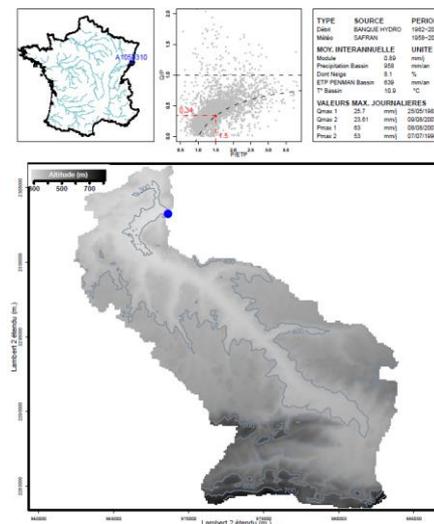


Figure 10 Code banque Hydro : A1050310, fiche bassin IRSTEA Lobligois F. ; Bourgin P.Y, 2012

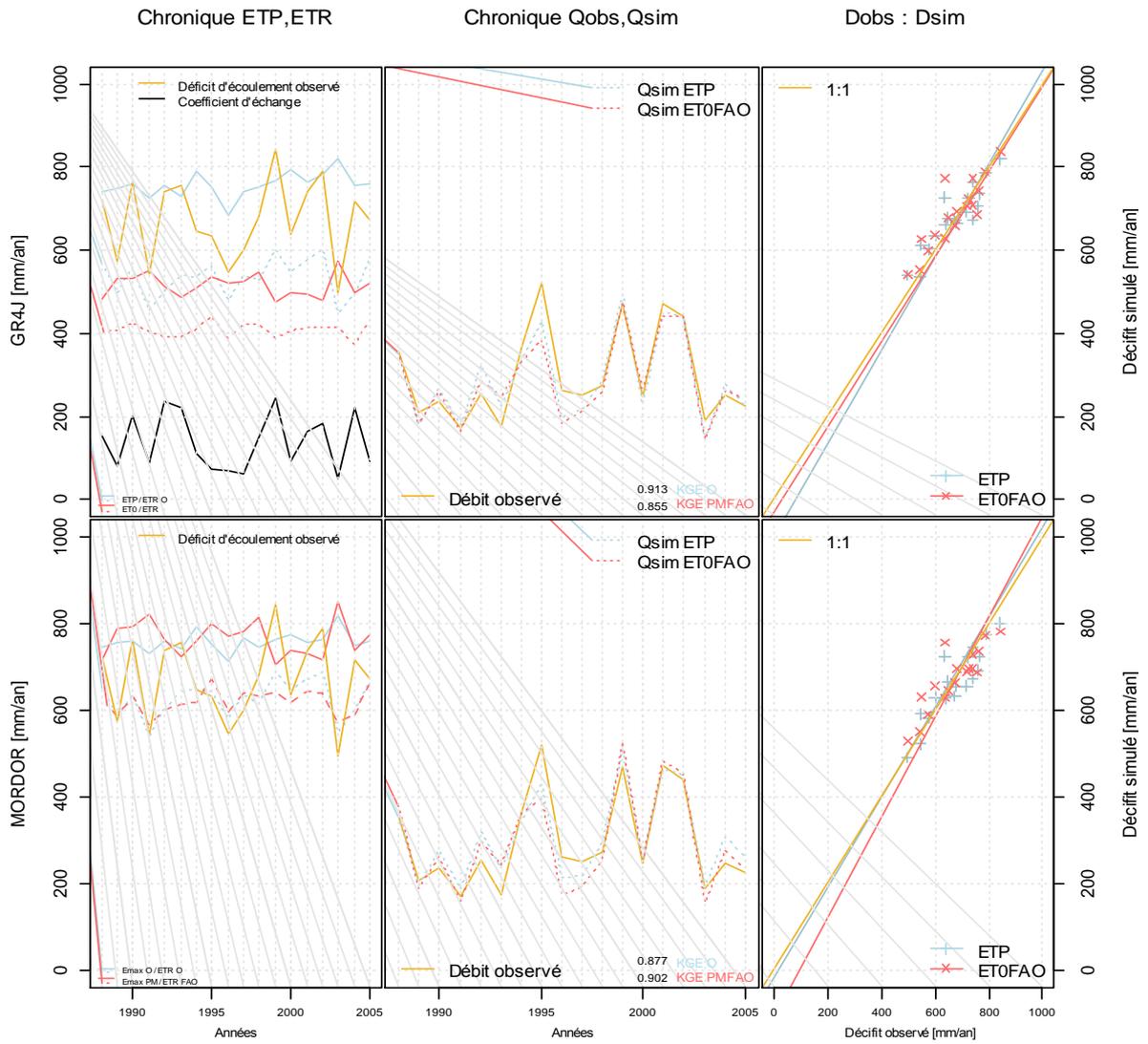


Figure 11 Bassin A1050310, L'Ill à Altkirch, 233 km², Haut-Rhin (68), régime peu influencé.

5 POURQUOI L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ DE PENMAN MONTEITH ?

5.1 L'ÉVAPOTRANSPIRATION : UNE SOURCE D'INCERTITUDE SUPPLÉMENTAIRE POUR LA PROJECTION DES DÉBITS

Des trois forçages des modèles hydrologiques, seule l'évapotranspiration est calculée, car sa mesure est très difficile et pose des problèmes de résolution spatiale et temporelle. Son calcul peut se faire avec des formules plus ou moins complexes, donnant des résultats différents, pouvant être une source d'incertitudes majeures pour la modélisation hydrologique actuelle ([Andréassian et al., 2004](#)).

De nombreuses formules d'ETP existent ([Xu and Singh, 1998](#)) et elles utilisent des paramètres climatiques et/ou astronomiques différents et de façons différentes. Les formules les plus complexes et physiquement *justifiables* n'offrent pas nécessairement les meilleurs résultats ([Oudin et al., 2005](#)). Les formules simples sont souvent préférées pour la modélisation opérationnelle actuelle, leur robustesse spatiale ayant été prouvée.

Afin d'éviter d'ajouter les incertitudes, qui découlent en cascade en premier lieu des scénarios d'émission de CO₂, du choix du modèle climatique de circulation générale (MCG), du modèle de descente d'échelle, du modèle hydrologique, et enfin des paramètres du modèle hydrologique, certains auteurs préfèrent ces formulations d'évapotranspiration simples avec peu de paramètres qui peuvent sembler être plus prudentes en projection car elles réduisent les incertitudes sur les paramètres climatiques projetés ([Ekström et al., 2007](#); [Kay and Davies, 2008](#); [van der Schrier et al., 2011](#)).

Cependant pour la projection, une grande robustesse spatiale n'est pas nécessairement synonyme de robustesse temporelle, ces formules simples limitent la gamme de projections ([McKenney and Rosenberg, 1993](#)), la restreignant souvent qu'à la température et donc peuvent omettre des rétroactions, qu'elles soient positives ou négatives ([Hobbins et al., 2004](#)).

Les formules qui prennent en compte des gammes plus importantes de paramètres peuvent assimiler ces rétroactions dans leur mécanisme et donner des résultats différents en sortie, comme l'effet limitant de l'humidité du sol sur l'évapotranspiration, qui est déjà important pour le climat actuel ([Jung et al., 2010](#)) et répondent généralement en extrapolation, par une diminution de l'évapotranspiration ([Boé and Terray, 2008](#)) : dans ce cas : plus un sol sera sec, plus la résistance de surface r_s sera élevée, s'éloignant du cas de l'évapotranspiration à surface humide $ET_{\text{surface humide}}$ ⁷, et diminuant l'évapotranspiration.

C'est une projection contraire à une extrapolation calculée par une formule d'évapotranspiration simple qui n'aurait pris en compte que la température, qui a une tendance globale à la hausse d'ici les siècles à venir ([Solomon, 2007](#)).

⁷ Une surface humide est différente d'une surface libre, il y a toujours une résistance aérodynamique mais plus de résistance de surface.

5.2 QUELLE FORMULE POUR L'EXTRAPOLATION ?

Parmi les formules simples et complexes, deux se distinguent. La formule de d'Oudin (2005) est reconnue comme être la meilleure pour les modèles pluie-débit en critère d'évaluation, c'est une formule « *légère* » demandant peu d'information contrairement à la formule de Penman-Monteith (1965) qui offre une meilleure représentation de la réalité au sens physique, mais qui est plus « *lourde* » à mettre en place nécessitant plus de données. Ceci est un inconvénient pour les études d'impact du changement climatique à long terme nécessitant des projections pour chacun des paramètres ; de température, de vitesse du vent, de rayonnement, de pression de l'air, etc... et l'addition des incertitudes pour chacun d'entre eux (Gong et al., 2006).

Néanmoins, la formule de Penman-Monteith est souvent préférée en extrapolation d'évapotranspiration pour sa « base physique » (Liu and McVicar, 2012), qui est plus susceptible d'être sensible aux multiples effets du changement climatique (Bell et al., 2011). Par exemple, la formule de Penman-Monteith, peut rendre compte des tendances sur l'occupation des sols, et du type de surface (enneigée ou non) avec l'albédo, des tendances de l'humidité du sol, en jouant sur le paramètre de la résistance de surface r_s , des tendances déjà enregistrées sur les paramètres de pression de l'air, vitesse du vent, et le rayonnement net (Donohue et al., 2010).

La r_s permet aussi de modéliser les variations de concentration atmosphérique en CO₂. Une forte concentration en CO₂ atmosphérique, conduit à la fermeture des stomates (Farquhar and Sharkey, 1982), augmentant ainsi la résistance de surface r_s ayant pour conséquence finale la diminution de l'évapotranspiration.

Mais d'autres questions se poseront ; comment prédire l'adaptabilité des futurs écosystèmes aux nouvelles conditions atmosphériques en extrapolation ? Est-ce que les plantes, augmenteront/diminueront leur résistance pour garder les mêmes performances d'ETP interannuelle, ou aura-t-on de nouvelles plantes qui auront de mêmes r_s , mais avec des bilans d'ETP différents ?

6 ANALYSE DE SENSIBILITÉ PENMAN MONTEITH : L'ALBÉDO

Pour cette première expérience, nous nous focaliserons sur l'équation de Penman Monteith avec comme jeu de donnée pour critiquer les recommandations de l'ET₀ de la FAO 56, nos 600 bv avec GR4J avec deux fonctions objectives C2M et KGE dans ce premier cas.

Le mot albédo qui tire ses origines du latin *albus* signifiant blancheur, a été introduit au XVIII^e siècle par le mathématicien et astronome suisse Jean-Henri Lambert. L'albédo est le pouvoir réfléchissant d'une surface, soit le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie à l'énergie lumineuse incidente. L'albédo d'une surface est fonction de sa position sur le spectre de la lumière visible, de la couleur du corps. Il varie du noir au blanc, de 0 à 1. Un blanc pur, éclatant diffuse dans toutes les directions et sans absorption les rayonnements visibles qu'il reçoit contrairement au noir absolu qui absorbe intégralement tous les rayonnements visibles.

La FAO (Allen et al., 1998) proposa de fixer l'albédo à l'instar des résistances internes et externes à une valeur de référence : 0.23, qui correspondrait à l'albédo d'une herbe verte.

« A hypothetical reference crop with an assumed crop height of 0.12 m, a fixed surface resistance of 70 s m⁻¹ and an albedo of 0.23 ».

Nous discuterons de la valeur 0.23 de deux façons, dans un cas particulier, quand il neige puis de façon générale.

6.1 L'ALBÉDO VARIABLE AVEC LA NEIGE

6.1.1 Méthode

Nous avons décidé dans un premier temps de faire varier l'albédo en fonction de la neige ([Figure 12](#)), avec les conditions suivantes :

Quand il neige sur une maille SAFRAN, l'albédo passe à 0,95, soit un blanc éclatant. Au fur et à mesure que la neige vieillit et perd de son éclat, l'albédo diminue selon une exponentielle décroissante ([Gsell, 2014](#)). Si de nouvelles neiges ne sont pas tombées, l'albédo retourne alors sa valeur initiale conseillée par la FAO à 0,23 au bout de $\tau = 40$ jours.⁸

L'albédo α apparaît dans la formule de Penman Monteith dans le calcul du rayonnement net « R_n », en corrigeant le rayonnement global d'onde courte « R_g » qui sont les rayons visibles, du soleil.

$$ETP = \frac{\delta R_n + \left(\frac{\gamma(e_s - e_a)}{r_a} \right)}{\lambda \rho \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]}$$

R_g	Rayonnement global onde courte W/m2
R_a	Rayonnement onde longue atmosphérique W/m2
T	Température moyenne de l'air en °C
ϵ	Émissivité de l'herbe verte : 0.95
σ	Constante de Boltzmann : 5.6697E-8

$$R_n = (1 - \alpha) * R_g + R_a - \epsilon * \sigma * (T + 273.15)^4$$

Quand l'albédo augmente, le rayonnement global d'onde courte diminue, diminuant l'évapotranspiration.

$$\alpha = 0.23 + (0.95 - 0.23) * e^{\left(\frac{\beta}{\tau}\right)}$$

β =jour passé depuis la dernière chute de neige.

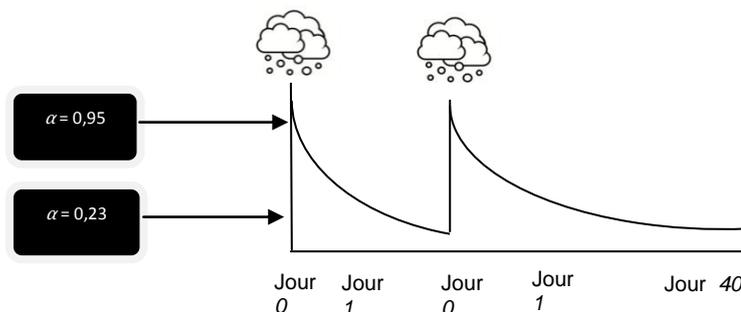


Figure 12 Schéma du principe de fonctionnement de l'albédo variable avec la neige

⁸ Adaptation de la méthode proposée dans la thèse de Pierre-Stéphane Gsell page 113

6.1.2 Résultats avec SAFRAN

Pour illustrer les différences entre albédo fixe et variable, nous allons confronter nos nouvelles ET_0 à la formule d' ET_0 FAO56, avec des cartes, et des courbes de régime moyen interannuel sur les mailles SAFRAN. Il ne s'agit pour l'instant que d'une étude de sensibilité sur l'albédo, les autres paramètres gardent les valeurs proposées par la FAO.

❖ Courbes de régime moyen interannuel

Nous avons choisi deux mailles particulières sur l'échiquier français grâce au sélecteur de maille SAFRAN, un service opéré par le plateau géomatique INRA PACA à Avignon.

La maille n°8862, en Camargue

La maille 8862, en Camargue, au sud du département du Gard, région Languedoc-Roussillon (Figure 13), est une maille intéressante pour étudier les climats secs français. C'est en Camargue et en Corse et dans les Pyrénées orientales que l'on enregistre les plus fortes ETP en France selon l'ETP d'Oudin.

Lambert Longitude barycentre: 764000 Lambert Latitude barycentre: 1849000 Altitude moyenne: 2m

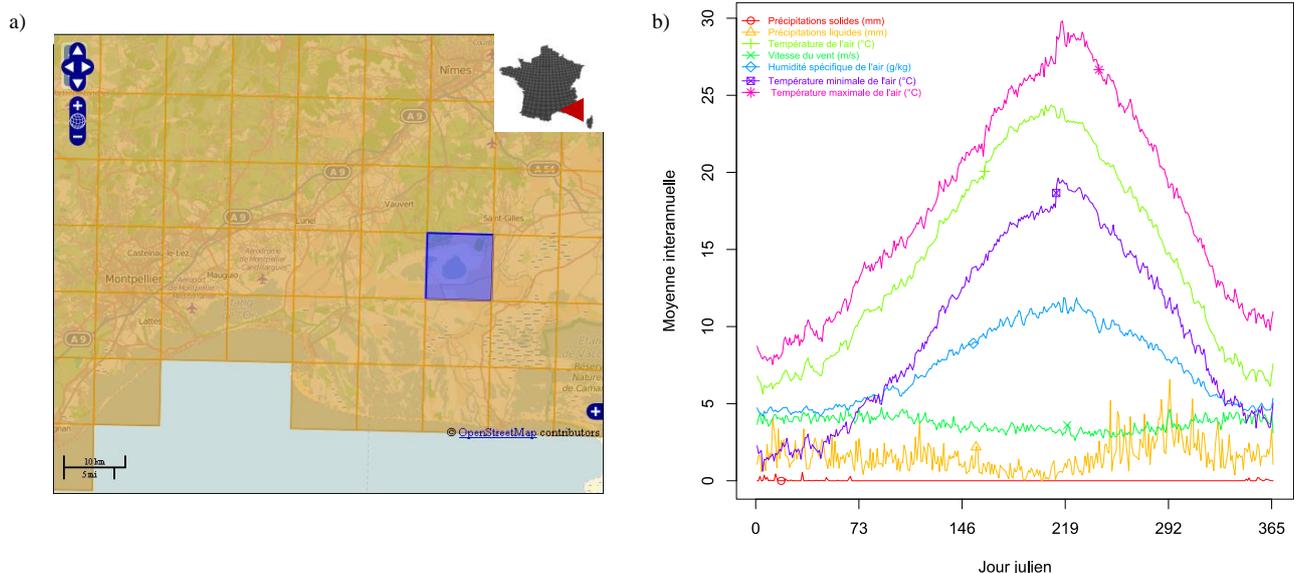


Figure 13 Maille SAFRAN n°8862 a) Situation géographique b) Régime des paramètres climatiques en moyenne interannuelle 1958-2013.

L'influence d'un l'albédo variable en fonction de la neige sur l'évapotranspiration de Penman Monteith est comme nous pouvions nous y attendre, très faible (Figure 14 a) : l' ET_0 FAO56 est 0.22% supérieur en moyenne interannuelle à notre ET_0 (neige). Une légère différence est perceptible pour quelques jours en hiver. La similarité entre les deux paramètres pour cette maille est certaine quand on les compare l'un en fonction de l'autre (Figure 14 b) .

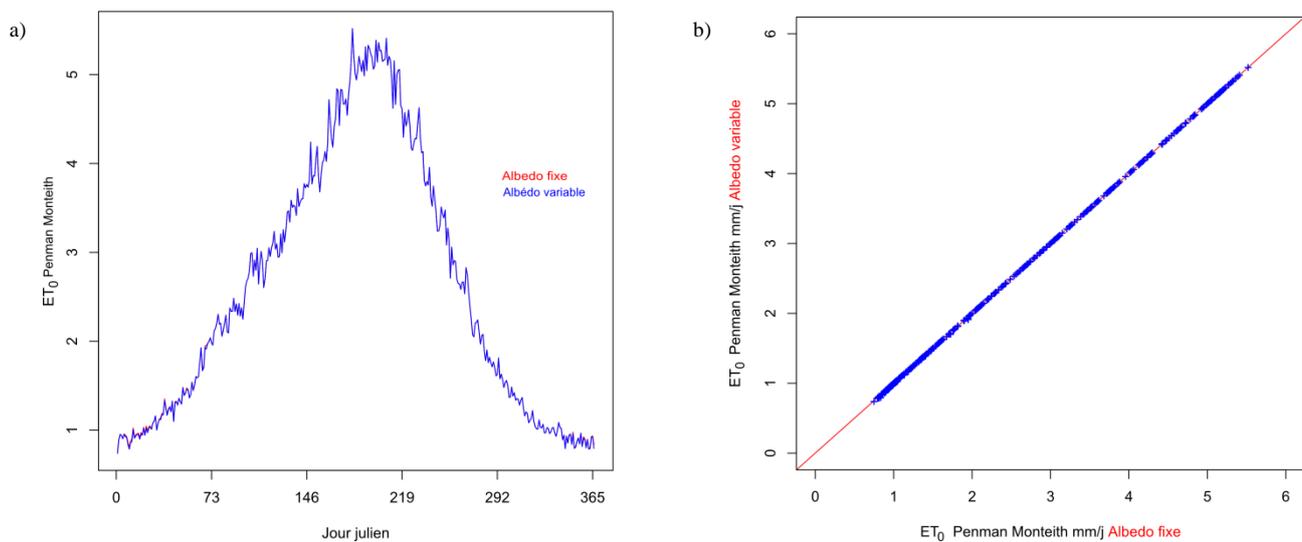


Figure 14 Maille SAFRAN n°8862 a) Courbes de régime en moyenne interannuelle (1958-2013) avec l'albédo fixe et variable pour l'ET₀ Penman Monteith en mm/j b) Corrélation entre albédo fixe en rouge et variable_(neige) en bleu pour l'ET₀ Penman Monteith en mm/j

La maille n°6758, parc national Vanoise

La maille 6758 se trouve en Savoie, région Rhône-Alpes, couvre le parc national de la Vanoise (Figure 15). Sa particularité géographique est le sommet de la Grande Casse culminant à 3 855 m, plus haut sommet de Savoie, qui est entouré de glaciers ; le Grand Couloirs sur le versant Ouest, le glacier de la Grande Casse versant Nord-Ouest et le glacier Rosolin sur le versant Nord-Est.

Lambert Longitude barycentre: 956000 Lambert Latitude barycentre : 2049000 Altitude moyenne : 2748m

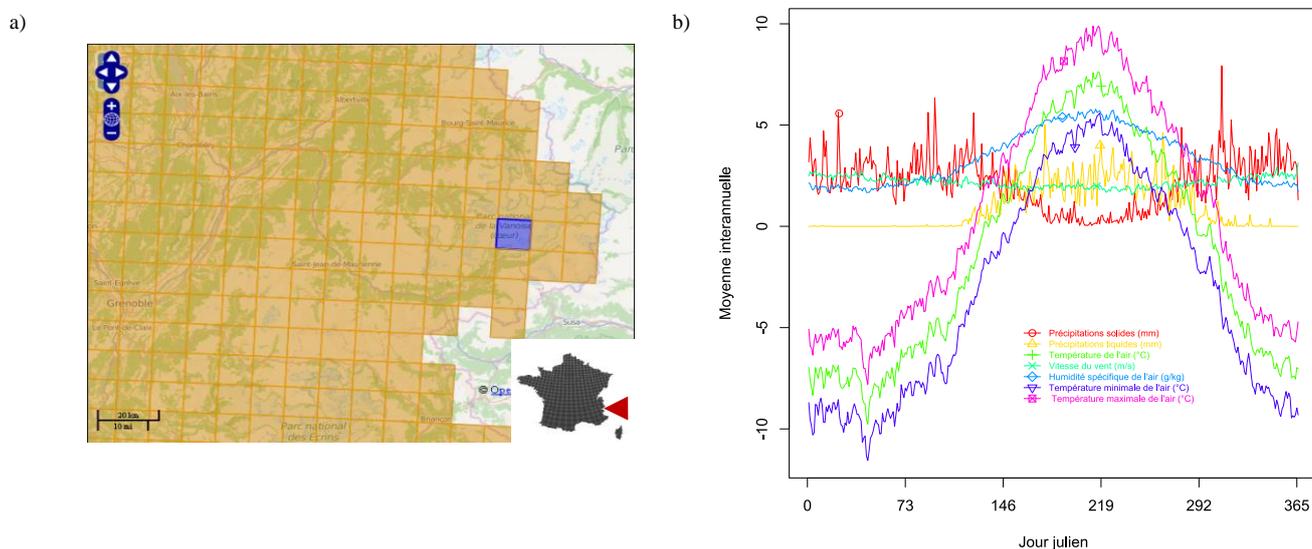


Figure 15 Maille SAFRAN n°6758 a) Situation géographique b) Régime des paramètres climatiques en moyenne interannuelle 1958-2013

Cette fois la différence est notable (Figure 16), pour une maille avec une altitude moyenne de 2748m, un albédo variable avec la neige a quasi systématiquement une évapotranspiration plus faible, sauf pour quelques jours en été. L'ET_{0 FAO56} est 318.29% supérieur en moyenne interannuelle à notre ET_{0 α (neige)}. Pour certains jours en mars/avril, on atteint des différences jusqu'à 1000%.

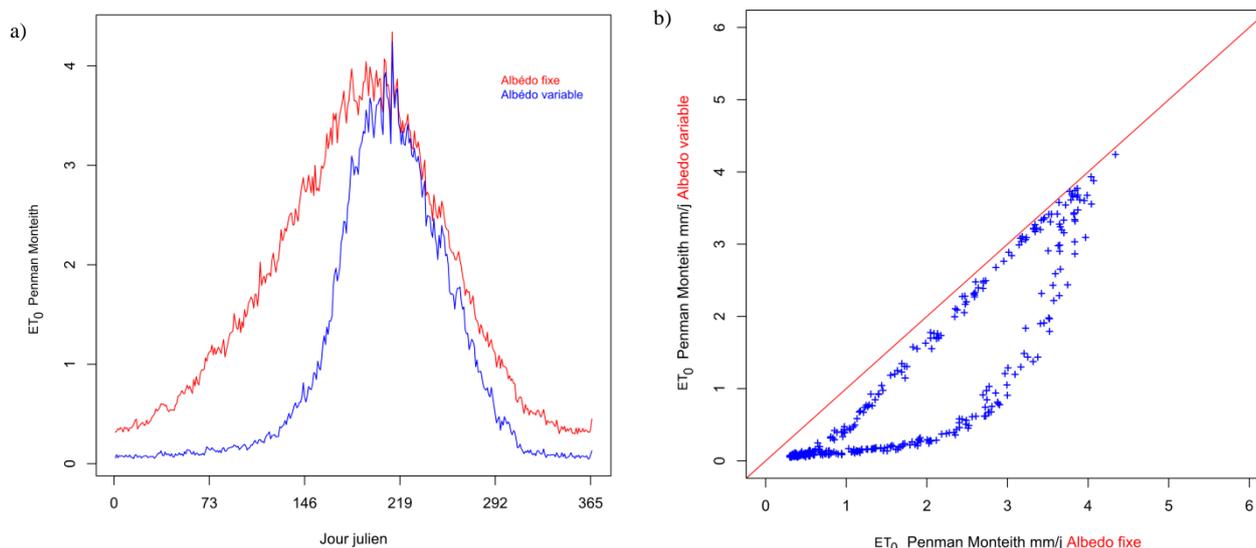


Figure 16 Maille SAFRAN n°6758 a) Courbes de régime en moyenne interannuelle (1958-2013) avec l'albédo fixe et variable pour l'ET₀ Penman Monteith en mm/j b) Corrélation entre albédo fixe en rouge et variable (neige) en bleu pour l'ET₀ Penman Monteith en mm/j

En comparant les régimes d'évapotranspiration en moyenne interannuelle de nos trois formules (Figure 17), on note que l'ETP d'Oudin est toujours inférieure à l'ET₀ FAO et à notre ET_{0 α}(neige).

Avec l'ET_{0 α}(neige) nous obtenons des évapotranspirations basses, voire nulles en hiver. Si l'on se réfère à la littérature, l'équation de Penman Monteith (1965) est celle qui se corréle le mieux aux mesures lysimétriques irriguées en montagne (Herrnegger et al., 2012), reproduisant avec précision les pics d'évapotranspirations estivaux, qui peuvent être fort, même à haute altitude, contrairement à la formule d'ETP (Hargreaves and Samani, 1982), basée comme celle d'Oudin sur le rayonnement extraterrestre et la température, qui peut être jusqu'à trois fois inférieures à la mesure lysimétrique en été.

D'autre part, une évapotranspiration ET₀ FAO56 atteignant en moyenne jusqu'à 2.5 mm/j par jour au jour julien 146 avec des températures à la même période en moyenne de 0°C (Figure 15 b)) semblait peu réaliste.

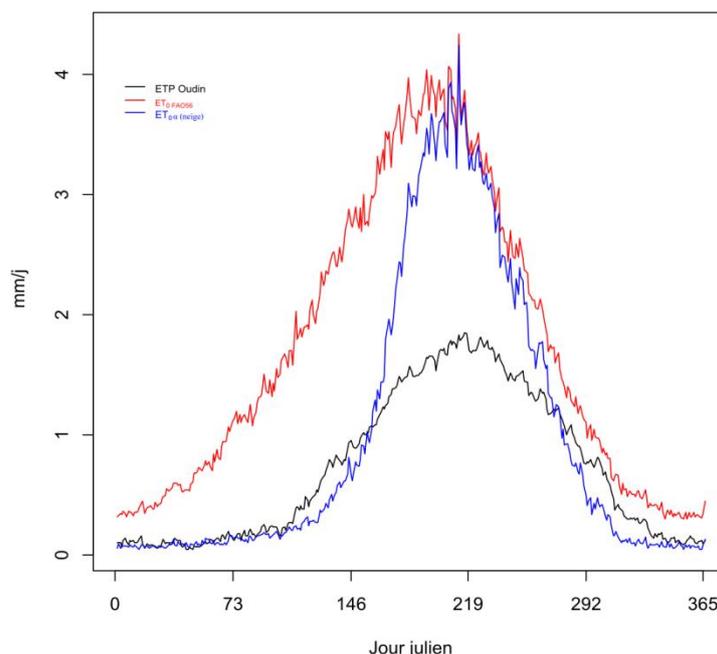


Figure 17 Maille SAFRAN n°6758 a) Courbes de régime en moyenne interannuelle (1958-2013) pour l'ET₀ FAO56 (albédo fixe) en rouge, l'ET_{0 α}(neige) en bleu variable et l'ETP d'Oudin en noir.

❖ Cartes SAFRAN

À l'échelle de la France (Figure 18), on peut voir l'étendue de la modification d'un albédo variable avec la neige, avec des valeurs plus faibles dans les Alpes, les Pyrénées et le Massif Central.

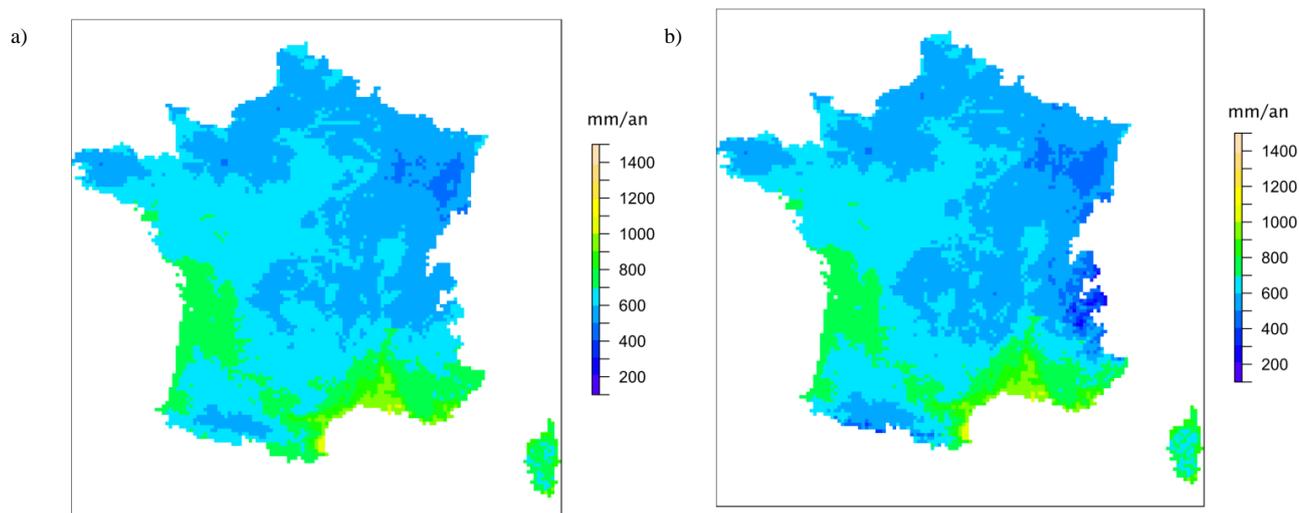


Figure 18 Cartes des 8585 mailles SAFRAN françaises en moyenne interannuelle en mm/an
a) ET_0 FAO56 (albédo fixe) b) $ET_0 \alpha_{(neige)}$

Le coefficient de variation (Figure 19 b) augmente fortement pour ces mailles, c'est-à-dire qu'à l'échelle d'une année, il y a plus de variation entre l'hiver et l'été.

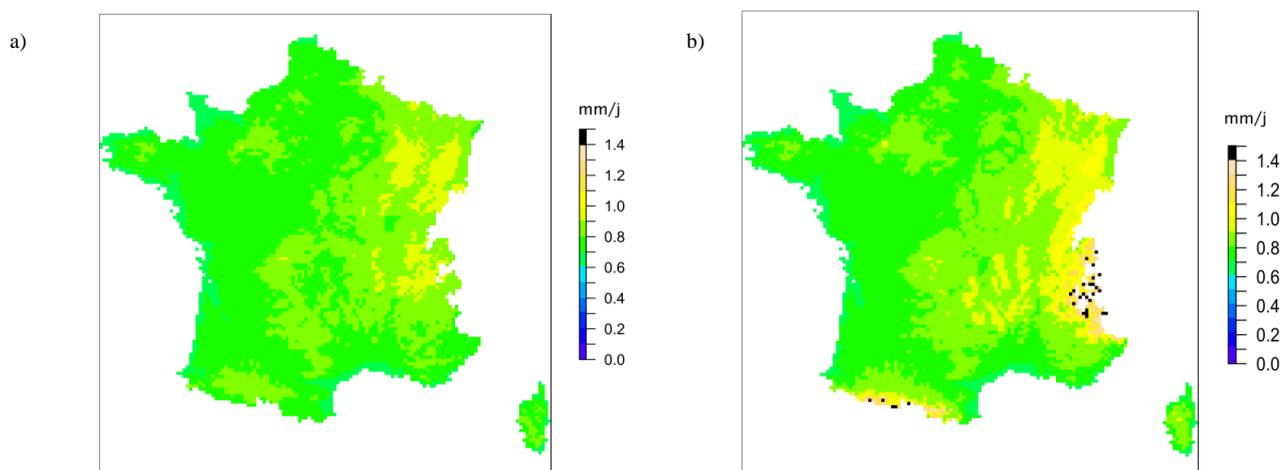


Figure 19 Cartes des 8585 mailles SAFRAN françaises en coefficient de variation interannuelle en mm/j
a) ET_0 FAO56 (albédo fixe) b) $ET_0 \alpha_{(neige)}$

❖ Conclusion

Un albédo variable avec la neige a une influence principalement pour les mailles en montagne, avec une grande dépendance à l'altitude, mais qui peut aussi engendrer une évapotranspiration jusqu'à 20% en plaine, principalement à la sortie de l'hiver. La correction de l'albédo décale, sans les diminuer, l'arrivée des fortes évapotranspirations estivales.

6.1.3 Résultats avec GR4J

Pour l'ensemble des 600 bv (Figure 20), un albédo variable en fonction de la neige n'apporte qu'une très légère amélioration des critères d'évaluation :

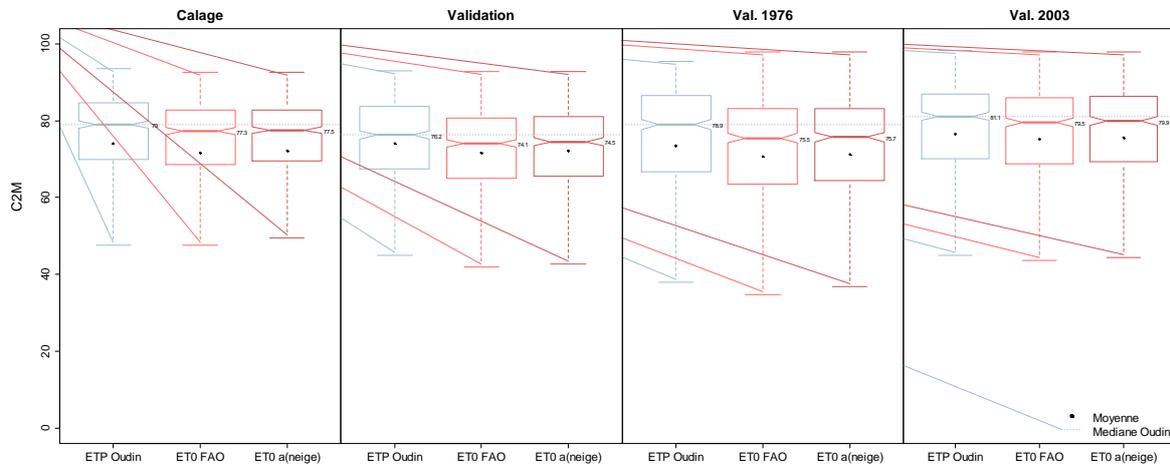


Figure 20 Comparaison de boîtes à moustache entre ETP_{Oudin} , ET_{0FAO56} et $l'ET_0 \alpha_{(neige)}$ pour 600 bv en C2M, avec les périodes de calage du 01/09/1987 au 31/08/1996 et validation du 01/09/1996 au 31/08/2006 et validation sur les années extrêmes 1976 et 2003. La ligne bleue pointillée correspond à la médiane de l'ETP d'Oudin.

Cependant, pour les bassins en montagne, l'amélioration est notable (Figure 21), nous sommes équivalents à l'ETP d'Oudin en calage et meilleur en validation. Sur les années extrêmes, nous améliorons également les performances de cette ET_0 par rapport à la FAO56.

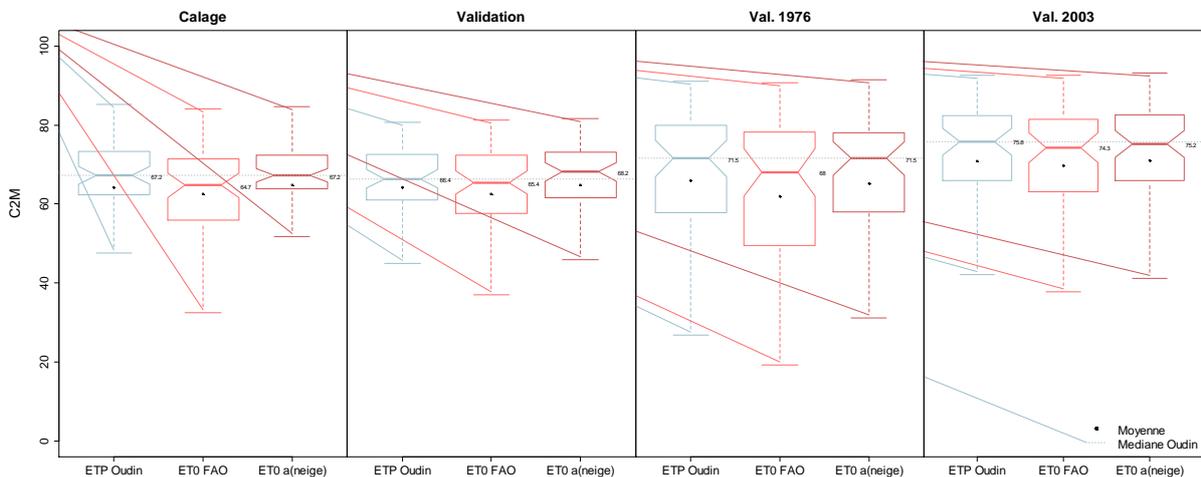


Figure 21 Comparaison de boîtes à moustache entre ETP_{Oudin} , ET_{0FAO56} et $l'ET_0 \alpha_{(neige)}$ pour 60 bv (montagne dans 600) en C2M, avec les périodes de calage du 01/09/1987 au 31/08/1996 et validation du 01/09/1996 au 31/08/2006 et validation sur les années extrêmes 1976 et 2003. La ligne bleue pointillée correspond à la médiane de l'ETP d'Oudin.

GR4J dont des travaux ultérieurs avaient relevé l'indifférence à une chronologie fine de l'ETP se comportant comme un filtre passe-bas pour les données atmosphériques atténuant la variabilité des entrées climatiques (Oudin, 2004), semble cette fois apprécier cette nouvelle information.

6.2 RECHERCHE DE LA MEILLEURE VALEUR MOYENNE D'ALBÉDO

Nous recherchons dans cette partie une nouvelle valeur de l'albédo pour l' ET_0 pour l'ensemble de nos 600 bv. Rappelons que l' ET_0 est un standard à partir duquel on s'adapte pour des conditions particulières et obtenir une ET_m .

6.2.1 Méthode

Notre méthode consiste à tester avec GR4J plusieurs valeurs d'albédo successives et de comparer ces valeurs entre elles à l'aide de boîte à moustache.

Nous commençons par essayer avec des *pas* larges, d'un albédo de 0.00 à 0.60 (Figure 22), puis nous affinons par étape sur le maximum local.

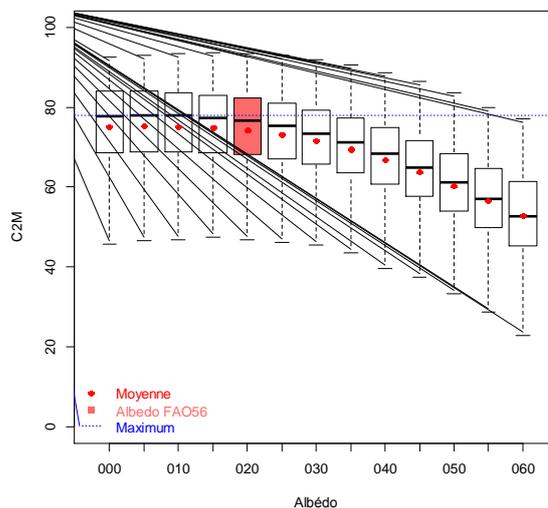


Figure 22 Comparaison de boîtes à moustache de l' $ET_0 \alpha_{(0)}$ à l' $ET_0 \alpha_{(0.60)}$, la boîte à moustache couleur rouge brique est la valeur ET_0 FAO 56 $\alpha_{(0.20)}$, la ligne bleue pointillée correspond à la médiane maximum de l' $ET_0 \alpha_{(0.05)}$.

6.2.2 Résultats GR4J

Nous avons répété cet exercice plusieurs fois avec nos deux critères d'évaluations, le C2M et le KGE, et pour chacun de ces deux critères, nous avons trouvé un maximum entre 0.05 et 0.08 d'albédo.

En mettant sur l'un contre l'autre ces deux critères (Figure 23) nous pouvons identifier un *optimum de Pareto*, c'est une valeur d'albédo optimal pour laquelle on ne peut plus améliorer les performances d'un critère d'évaluation sans détériorer celui d'un autre.

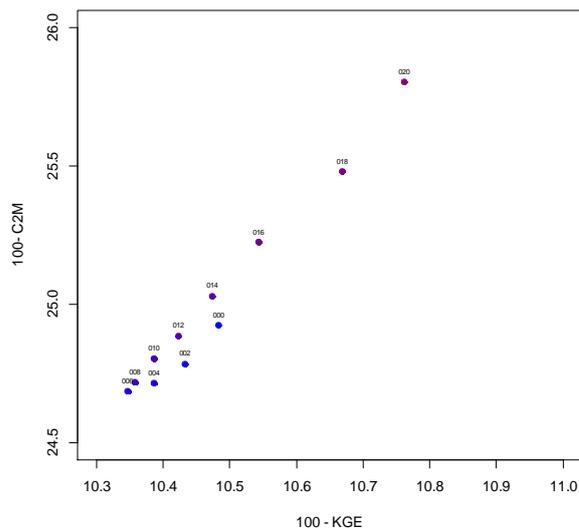


Figure 23 Front de Pareto entre C2M et KGE sur la valeur de l'albédo dans l' ET_0 , chaque point correspond à la médiane du critère d'évaluation pour 600 bv.

Cet optimum est à 0.06 soit une valeur peu crédible, proche d'une surface noire.

6.3 RESULTATS, CRITIQUES, CONCLUSION SUR L'ALBEDO

Nous avons également testé d'autres constantes de temps pour l'albédo variable avec la neige, fixé au préalable à 40 jours, le modèle sembla insensible à cette nouvelle information. Nous comparons alors quatre résultats ; nous avons regroupé sur le même graphique (Figure 24), l'ETP d'Oudin, l'ET₀ FAO56, l'ET₀ α_(neige) et une ET₀ baptisé *essai* qui prend en compte l'albédo variable en fonction de la neige et un albédo moyen de 0.06 soit la formule suivante :

$$\alpha = 0.06 + (0.95 - 0.06) * e^{\left(\frac{\beta}{\tau}\right)}$$

Pour l'ensemble des 600 bv (Figure 24), notre *essai* d'ET₀ obtient des performances proche de l'ETP de d'Oudin en calage, mais pas en validation, améliorant tout de même les performances du modèle par rapport à l'ET₀ Penman Monteith FAO56.

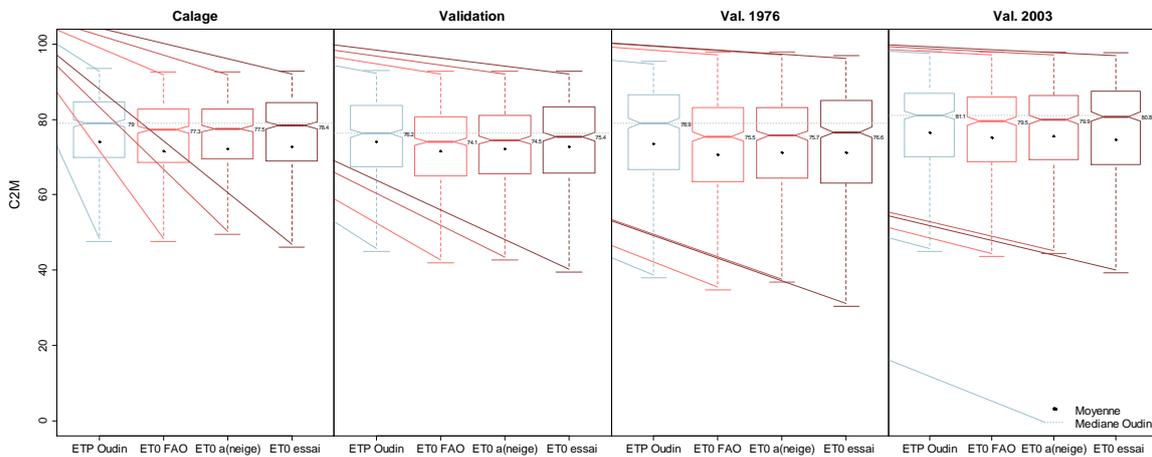


Figure 24 Comparaison de boîtes à moustache de l'ETP_{Oudin}, de l'ET₀FAO56 à l'ET₀ α_(neige) et à l'ET₀ *essai* α_(neige, 0.06) pour 600 bv en C2M, en calage/validation. La ligne bleue pointillée correspond à la médiane de l'ETP d'Oudin.

C'est en montagne (Figure 25) que les résultats sont les plus intéressants avec de meilleures performances en validation que l'ETP d'Oudin.

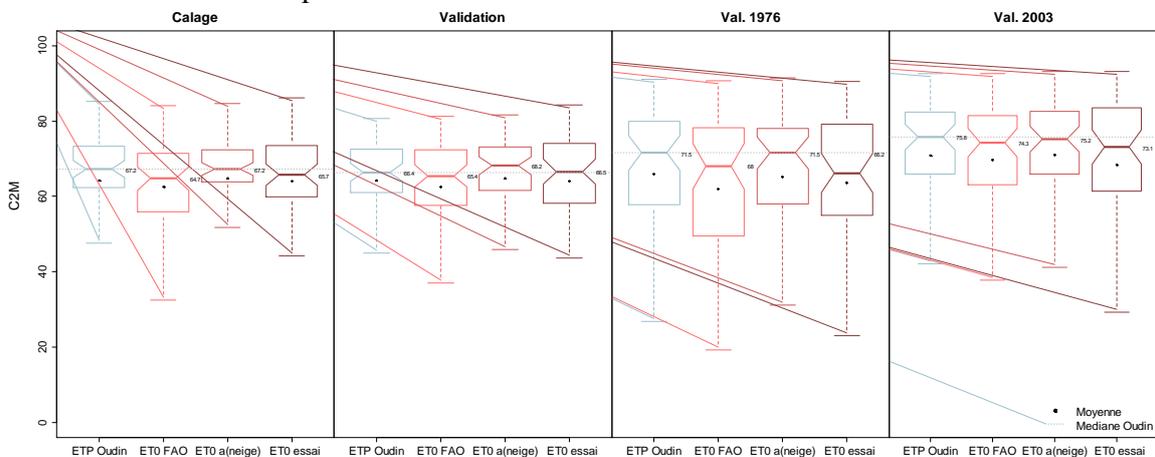


Figure 25 Comparaison de boîtes à moustache de l'ETP_{Oudin}, de l'ET₀FAO56 à l'ET₀ α_(neige) et à l'ET₀ *essai* α_(neige, 0.06) pour 60 bv (montagne dans 600 bv) en C2M, en calage/validation. La ligne bleue pointillée correspond à la médiane de l'ETP d'Oudin.

6.3.1 Critique : une sous/sur-estimation des rayonnements SAFRAN ?

Pour résumer, il semblerait que le modèle apprécie davantage, un **albédo très fort** en hiver en montagne, d'où son indifférence avec plusieurs constantes de temps (*testé sur l'albédo variable avec la neige jusqu'à 100j*) et un **albédo très faible** (0.06) en plaine (600 bv).

Pour traduire en ET_0 , le modèle a besoin de plus d' ET_0 en plaine et de moins en montagne en hiver. D'où les trois questions que l'on peut se poser :

Est-ce que l'amélioration des critères d'évaluation avec un albédo modifié traduit une :

- Réalité physique? (*la neige est blanche*)
- Une sous/sur évaluation des rayonnements fournis par SAFRAN ?
- Un besoin du modèle pour rééquilibrer le bilan en eau ?

Sur le graphique adimensionnel (Figure 26), on remarque que la distribution des points à gauche (Figure 26 a) n'est pas homogène, les points rouges de l' $ET_{0\text{FAO56}}$ se trouvent en majorité pour des bassins arides (*moins de 3mm/j sur l'axe P/ETP*). Avec notre l' $ET_{0\text{essai}}$ (Figure 26 b), nous rééquilibrons et rendons plus homogène les performances de Penman Monteith en étant performant même pour les bassins très humides ou froids à droite du graphique.

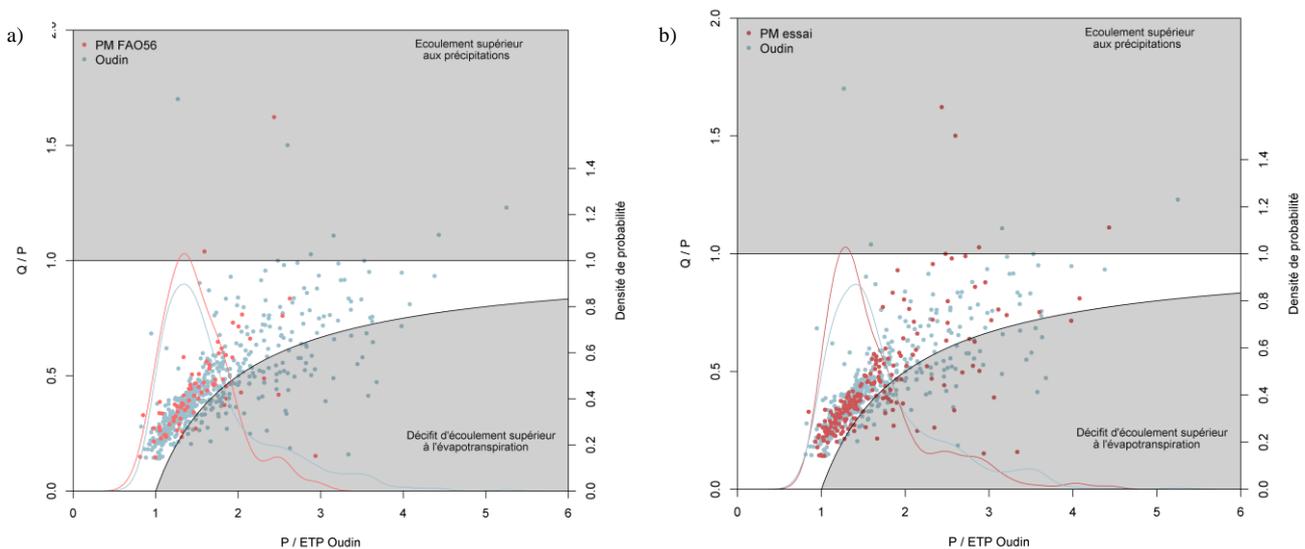
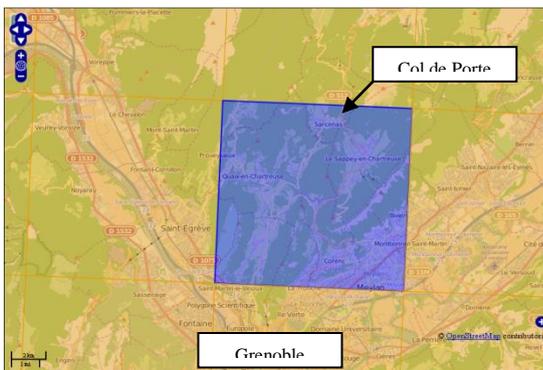


Figure 26 Représentation adimensionnelle des 600 bassins versants. Le thème bleu correspond aux bassins ayant de meilleures performances en critère d'évaluation avec l'ETP d'Oudin, le thème rouge aux bassins ayant de meilleures performances en critère d'évaluation avec en a) l' $ET_{0\text{FAO56}}$ et en b) l' $ET_{0\text{essai}}$. Les courbes correspondent aux densités de probabilité représentent P / ETP_{Oudin} .



Nous décidons alors de comparer la réanalyse SAFRAN avec des mesures in situ de rayonnement.

Rappelons que l'équation de Penman Monteith nécessite deux rayonnements, les rayonnements infrarouges et visibles respectivement *long wave* et *short wave*.

Le pouvoir réfléchissant d'une surface (*albédo*) a une influence uniquement sur les ondes courtes dans l'équation.

Pour comparer la mesure *in situ* à la réanalyse, nous optons pour la station météorologique du Col de Porte dans l'Isère, au nord de Grenoble. Cette station fournit des mesures de rayonnement d'onde courte et longue de 1993 à 2011 au pas de temps horaire (Morin et al., 2012). Nous moyennons ces valeurs à la journée pour les comparer à celle de la Maille SAFRAN n°6913.

Les *long wave* (*infrarouge*) se corrèlent, mais pas les *short wave* (*visible*) (Figure 27). Les données de la maille n°6913 surestiment quasi systématiquement les ondes courtes, d'où *peut-être* la nécessité d'augmenter l'albédo en montagne pour avoir une énergie équivalente. Une maille SAFRAN fait 8km*8km et il se pourrait que cette surestimation vienne du fait que la maille n°6913 descende jusque dans la vallée de l'Isère à 204 m d'altitude par rapport au col de Porte à 1 326 m, mais les résultats sont les mêmes pour la maille au-dessus la n°6830 qui est en moyenne plus haute.

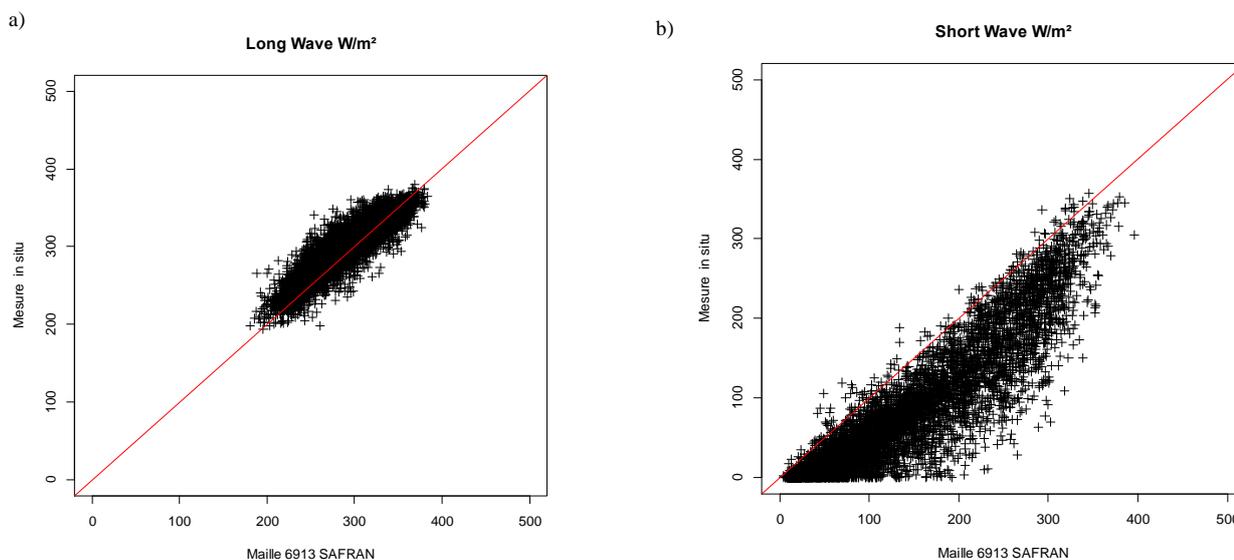


Figure 27 Corrélation entre la mesure *in situ* au Col de Porte et réanalyse SAFRAN de la maille n°6913
a) onde longue (infra-rouge) b) onde courte (visible)

Pour confirmer nos soupçons, une comparaison plus large devra être menée.

Concernant la deuxième question que l'on se pose, si un albédo en moyenne plus faible correspond à un besoin du modèle, la (Figure 28 b)) peut nous apporter un élément de réponse. Les points situés dans la partie grisée supérieure sont limités en eau, ils devraient en toute logique avoir des valeurs d'albédo conduisant à une diminution de l' ET_0 , avec de forte valeur d'albédo et tendre vers le rouge. Et inversement dans la partie grisée inférieure limitée en énergie.

Or le modèle n'essaie pas de rattraper le bilan avec l' ET_0 de façon systématique, seulement pour 4 d'entre eux, pour les bassins très éloignés de la limite en eau $Q = P$, le modèle au contraire s'éloigne du bouclage du bilan en préférant des albédos faibles conduisant à de forte ET_0 . Pour être complet, il faudrait étudier les coefficients d'échange interbassins dans les deux cas.

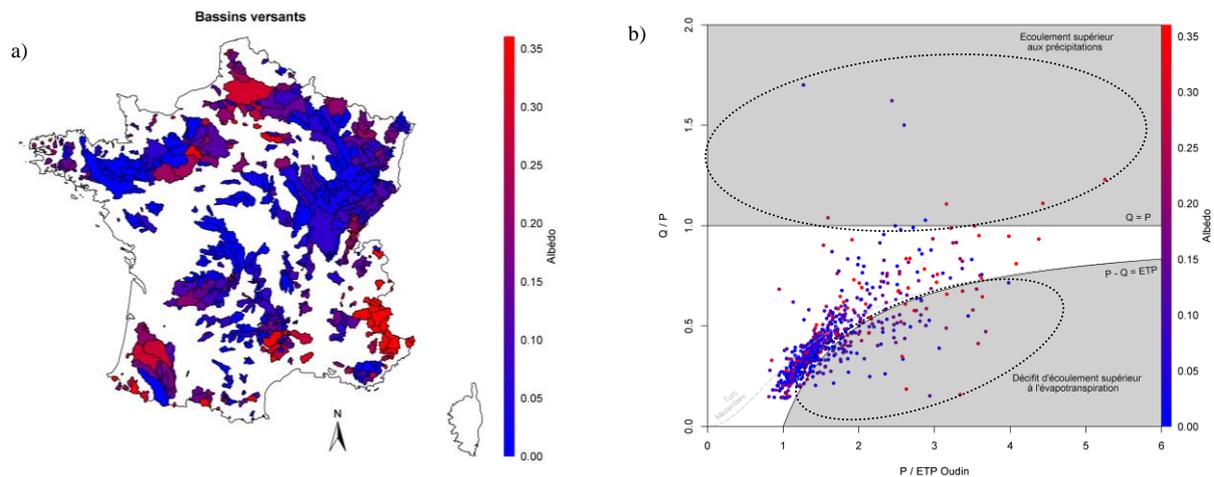


Figure 28 a) Carte et b) représentation adimensionnelle des 600 bassins versants. Les bassins versants sont teintés avec une couleur correspondant à la valeur d'albédo ayant eu les meilleures performances en C2M (médiane). Les points du graphique adimensionnel correspondent aux moyennes des séries temporelles de P_{SAFRAN} , Q et ETP_{OUDIN} (1958-2013).

À première vue, le besoin en énergie des bassins via l'albédo n'est pas fonction de leur position sur le graphique adimensionnel, donc il ne s'agit pas d'un besoin du modèle pour rééquilibrer le bilan. Sur la carte ([Figure 28 a\)](#)) des tendances régionales sont marquées, cela nous pousse à nous questionner sur la qualité du rayonnement visible.

6.3.2 Conclusion

Notre nouvelle ET_0_{essai} à de meilleures performances que l' ET_0_{FAO56} , mais l'ETP d'Oudin reste la meilleure pour la majorité des bassins versants en calage ([Figure 29](#)). Nous améliorons également la validation par rapport à l' ET_0_{FAO56} et nous sommes meilleurs que l'ETP d'Oudin en montagne pour nos deux critères C2M et KGE ([Figure 30](#)). Sur les années extrêmes nous avons des performances semblables à l'ETP d'Oudin quel que soit le critère, mais nous sommes parfois moins bon que l' ET_0_{FAO56} . Une étude plus approfondie devra être menée sur ces cas particuliers.

Pour trouver un albédo moyen adéquat à nos modèles hydrologiques, et à nos bassins versants, nous devons chercher d'autres données de rayonnement. Ce nouvel albédo de l' ET_0 sera une base plus solide que celui de l'herbe verte appliquée jusqu'à présent même en montagne en hiver. En vue de la projection climatique, l'occupation du sol, et la fréquence de la neige changeront, et nous aurons de quoi présenter mathématiquement ces changements, si tant est que les modèles hydrologiques acceptent cette information.

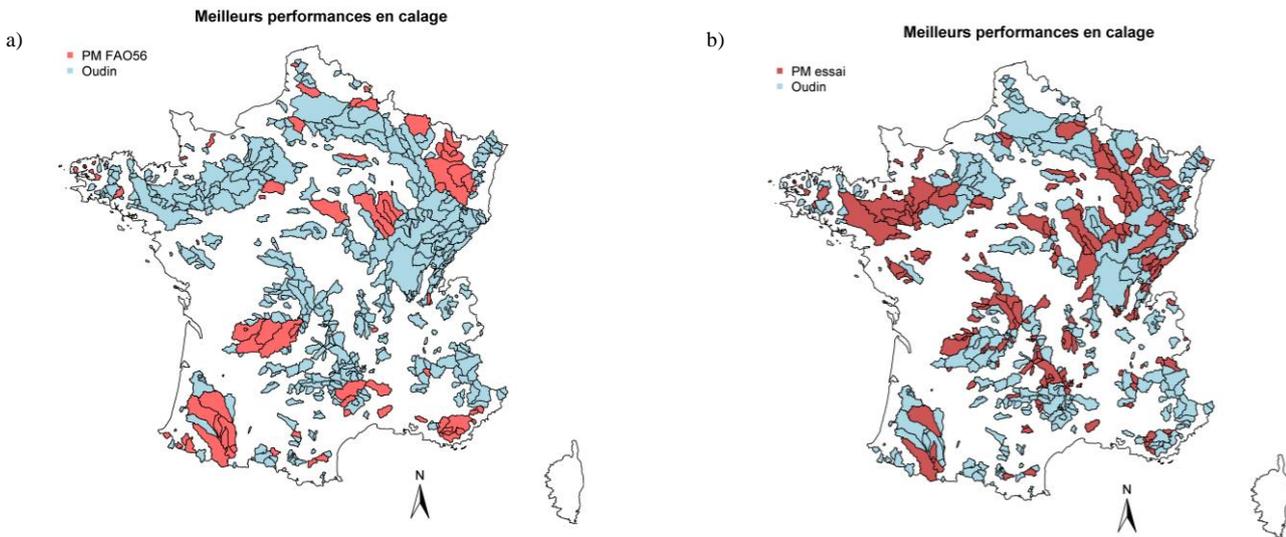


Figure 29 Cartes des 600 bv. Le thème bleu correspond aux bassins ayant de meilleures performances en critère d'évaluation avec l'ETP d'Oudin, le thème rouge aux bassins ayant de meilleures performances en critère d'évaluation avec a) l' ET_{0FAO5} (77 bv contre 523 bv), b) l' ET_{0essai} (209 bv contre 391 bv)

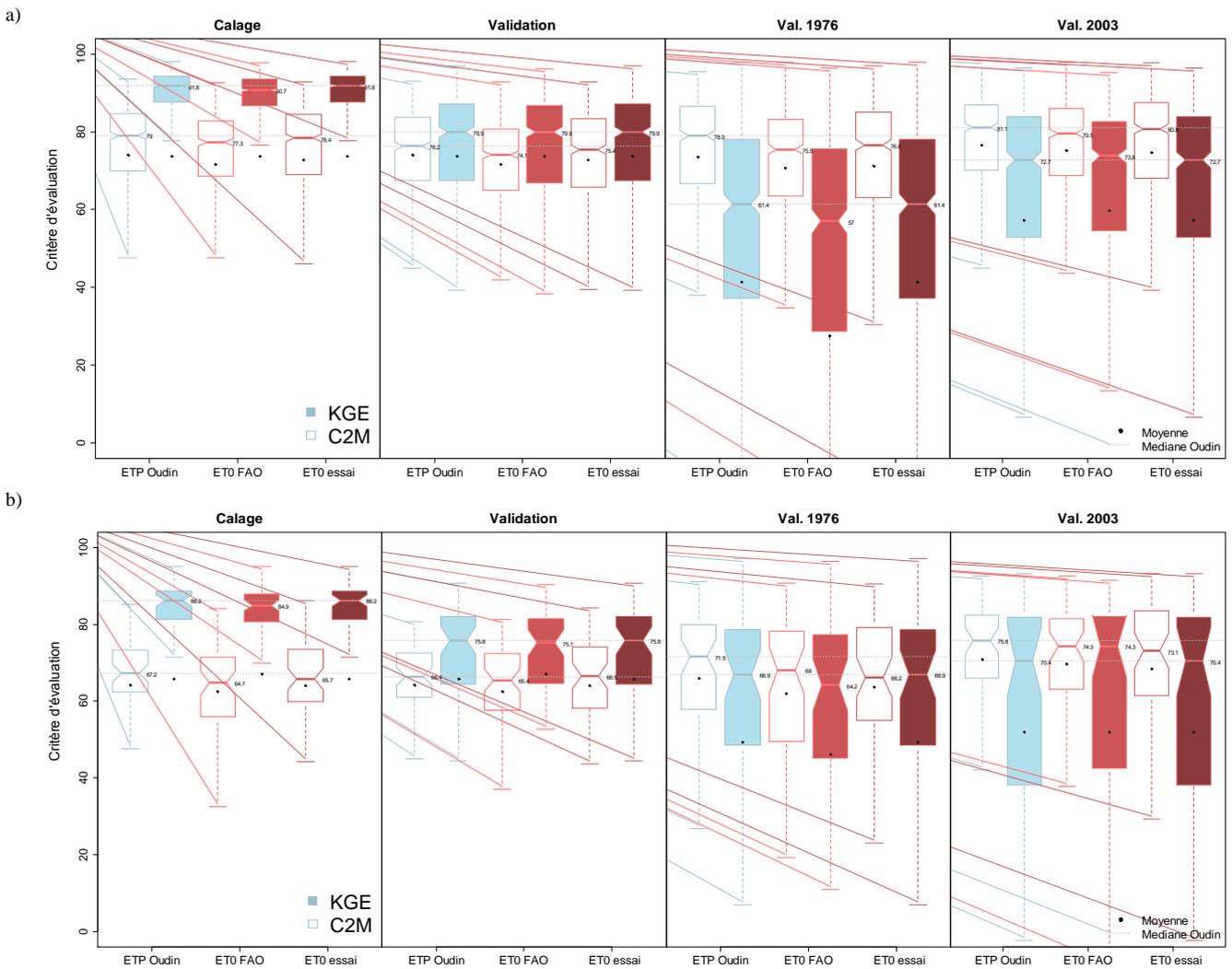
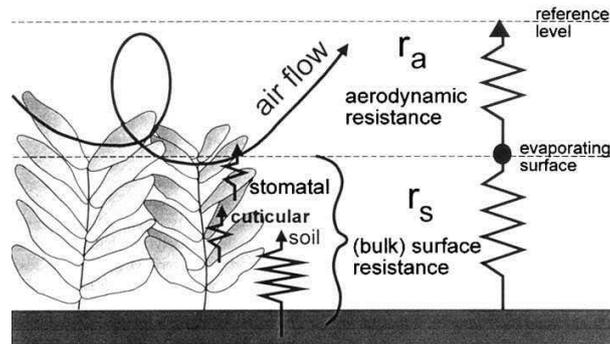


Figure 30 Comparaison de boîtes à moustache de l'ETP $Oudin$, de l' ET_{0FAO56} et à l' ET_{0essai} $\alpha_{(neige, 0,06)}$ en C2M et KGE, en calage/validation. La ligne bleue pointillée correspond à la médiane C2M et KGE de l'ETP d'Oudin, a) pour 600 bv, b) pour 60 bv en montage

7 ANALYSE DE SENSIBILITÉ PENMAN MONTEITH : LA RÉSISTANCE DE SURFACE r_s



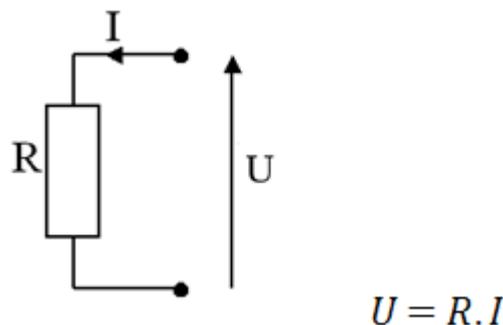
La résistance de surface r_s ($s.m^{-1}$), décrit l'effet couplé de la résistance à l'écoulement du flux vapeur à travers les stomates et du sol vers la surface ([Allen et al., 2006](#)). Selon cette définition, la résistance de surface est donc la combinaison de paramètres physiologique (espèce, surface foliaire ...) et lithologique (porosité...). De nombreuses approches et méthodes de calcul sont disponibles dans la littérature, toujours selon les échelles et les besoins de la science considérée : la résistance de surface peut être estimée minutieusement pour une espèce à l'aide d'observations biologiques, ou estimer plus grossièrement avec des modèles se basant sur les conditions climatiques. De la cellule, à l'écosystème. Elle s'exprime en s/m .

La définition de la résistance de surface r_s est très large, et plusieurs noms sont en compétition pour décrire le phénomène : *Résistance ; stomatale, de surface, de canopée*, ou inversement chez les biologistes *conductance stomatale*, on retrouve ici toute l'ambiguïté de la définition de l'évapotranspiration.

La résistance de surface est différente de la résistance stomatale. Suite à un échange entre le biologiste John Phillip ([1966](#)) et l'agronome John Monteith, ce dernier changea le nom de sa variable dans son équation d'évapotranspiration. Pour J.Phillip la résistance stomatale était un artefact d'agronome dont la signification physiologique était questionable. [Page 264]

La résistance de surface pose des problèmes de monter d'échelle (*upscaling*) pour les agronomes ([Lhomme, 1991](#)), ce problème devrait s'accroître lorsque que l'on voudra passer d'une parcelle à une espèce unique, à la diversité d'un bassin versant.

Pour monter d'échelle, en spatialisation, la résistance de surface r_s est généralement comparée par une analogie à la résistance électrique de la loi d'Ohm ([Monteith and Unsworth, 1973](#); [Penman, 1952](#)) : relation entre l'intensité et la tension :



L'intensité I (un flux potentiel) correspondrait par analogie à l'évaporation d'eau à surface libre E_0 . La tension U (circulation effective), à l'évapotranspiration potentielle ET_0 et R la résistance à l'écoulement du flux soit dans ce cas ; la parcelle standard d'herbe verte de 12 cm de haut.

Monteith (1973) compara, la résistance de surface r_s globale d'une parcelle à toutes les résistances r_s de chaque feuille comme montée en parallèle. Si l'on s'en tient la loi d'Ohm, la définition de résistance en parallèle est qu'une résistance totale équivalente R_{eq} est plus faible que chacune des résistances individuelles composant le circuit.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

C'est-à-dire que sur une maille SAFRAN, où il y aurait une forêt sur 30% : à 400 s.m^{-1} (Stewart and Thom, 1973), des prairies sur 60% à 20 s.m^{-1} (Szeicz and Long, 1969) et un lac sur 1% : à 0 s.m^{-1} , on aurait une résistance totale à 0 s.m^{-1} . Comment représenter la résistance de surface r_s globale en respectant l'idée de John Monteith, quel poids doit-on donner aux fortes, faibles valeurs ? Par une moyenne ? Arithmétique, géométrique ?

7.1 POURQUOI LA RÉSISTANCE DE SURFACE EST INTÉRESSANTE ?

Pour passer d'une ET_0 évapotranspiration de *référence* à une évapotranspiration *maximale* spécifique à une espèce végétale ET_m deux approches sont possibles :

La première « *two-step* » est de placer un coefficient cultural (Doorenbos and Pruitt, 1977) devant la formule de Penman Monteith, ce coefficient varie d'une espèce à l'autre et selon les saisons :

$$ET_m = kc \cdot ET_0$$

On obtient alors une formule d'évapotranspiration maximale pour une espèce donnée avec de l'eau en accès illimité. C'est la nouvelle méthode pour le MORDOR SD avec deux paramètres à caler devant l' ET_0 ; $cetp$ et $kmin$, mais ces coefficients répondent aux besoins du modèle pour boucler son bilan, ils ne sont pas issue d'étude indépendante.

$$ETP = \frac{\delta R_n + \left(\frac{\gamma(e_s - e_a)}{r_a} \right)}{\lambda \rho \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]}$$

La seconde approche « *one-step* », est de modifier directement dans la formule d'évapotranspiration de Penman Monteith: les résistances de surface r_s aérodynamique r_a , en leur donnant des valeurs correspondantes aux espèces/espaces étudiées.

BEVEN (1979) réalisa une étude de sensibilité des deux résistances de surface et aérodynamique de la formule de Penman-Monteith pour trois stations météorologiques en Angleterre. La variation de **la résistance aérodynamique** dominait celle des rayonnements dans le cas d'une forêt, et dans certaines conditions sèches, pour l'Angleterre cependant c'est le terme de **résistance de surface** qui avait la plus forte influence sur le résultat final.

La résistance de surface peut faire varier l'évapotranspiration d'un facteur 0 à 2, comme en témoigne les résultats de projection entre des résistances de surface r_s fixe, et des r_s obtenues par des modèles climatiques, donc non stationnaires dans le temps, dans Bell (2011).

Pour notre recherche d'un standard « hydrologique » d' ET_0 , nous appliquerons les mêmes méthodes que pour l'albédo, afin de trouver la meilleure valeur de r_s possible pour l'ensemble des 600 bv et avec un test sur une condition particulière, ici quand il pleut. Cette ET_0 , utilisé telle quelle dans GR, et adapté en l' ET_m (E_{max}) dans MORDOR.

7.2 LA RÉSISTANCE DE SURFACE S'ANNULANT AVEC LA PLUIE

7.2.1 Résultat avec SAFRAN

Dès lors qu'il pleut, que le sol et les plantes s'humidifient, la résistance de surface tend vers zéro se rapprochant du cas d'une surface libre, c'est-à-dire que l'eau à la surface des feuilles et du sol s'évapore sans résistance (Hong et al., 2014; Stewart, 1977; Zhang et al., 2014) et inversement en cas de stress hydrique la résistance de surface augmente (Hatfield and Allen, 1996; Stewart and Verma, 1992).

La condition est simple, quand il pleut sur une maille, la résistance de surface est égale à zéro. On obtient une augmentation générale de l'évapotranspiration potentielle par rapport à l' ET_{0FAO} , et ce, pour toutes les mailles étudiées, ici (Figure 31) l'exemple de la maille 6758 plutôt humide (Figure 15 b)).

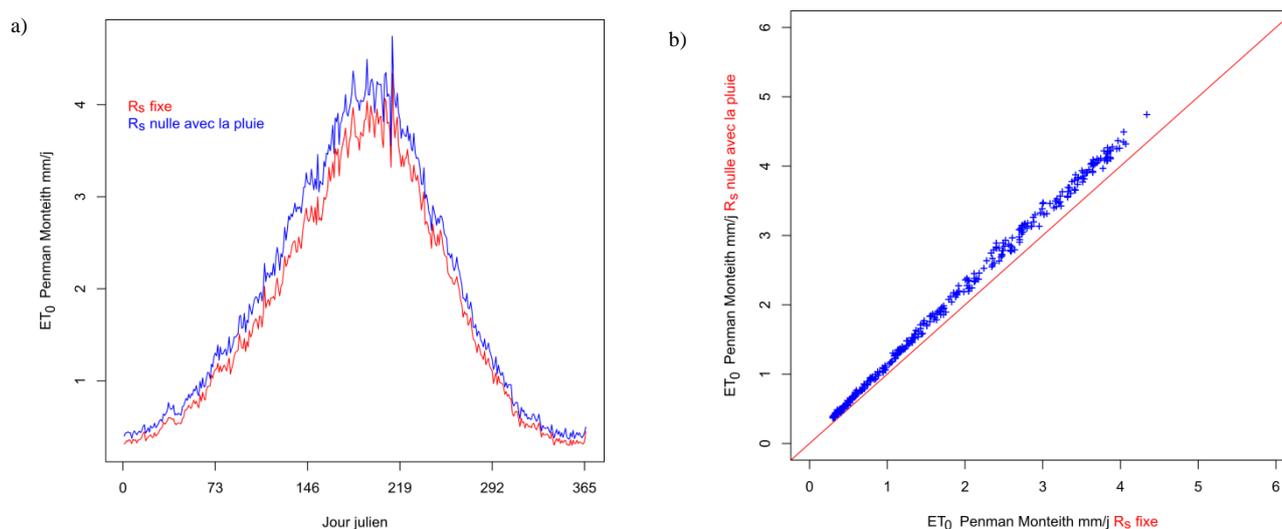


Figure 31 Maille SAFRAN n°6758 a) Courbes de régime en moyenne interannuelle (1958-2013) avec r_s fixe *FAO* et r_s pour l' ET_0 Penman Monteith en mm/j b) Corrélation entre r_s fixe en rouge et $r_{s(pluie)}$ en bleu pour l' ET_0 Penman Monteith en mm/j

7.2.2 Résultats avec GR4J

Nous reproduisons le même schéma d'expérience que pour l'albédo dans la partie (6.1), en testant ici la résistance de surface avec une condition simple sur la pluie sur nos 600bv et avec GR4J (Figure 32). Nous essayons aussi cette condition avec notre ET_0 *essai* qui bénéficiait d'un albédo moyen de 0.06 et variable avec la neige. Ce nouveau l' ET_0 *essai* $r_{s(pluie)}$ α (neige, 0.06) améliore les performances de l' ET_0 par rapport à la FAO en calage et validation, et nous améliorons

également les performances de notre ET_0 *essai* (Figure 20). Nous sommes cette fois très proches de l'ETP d'Oudin.

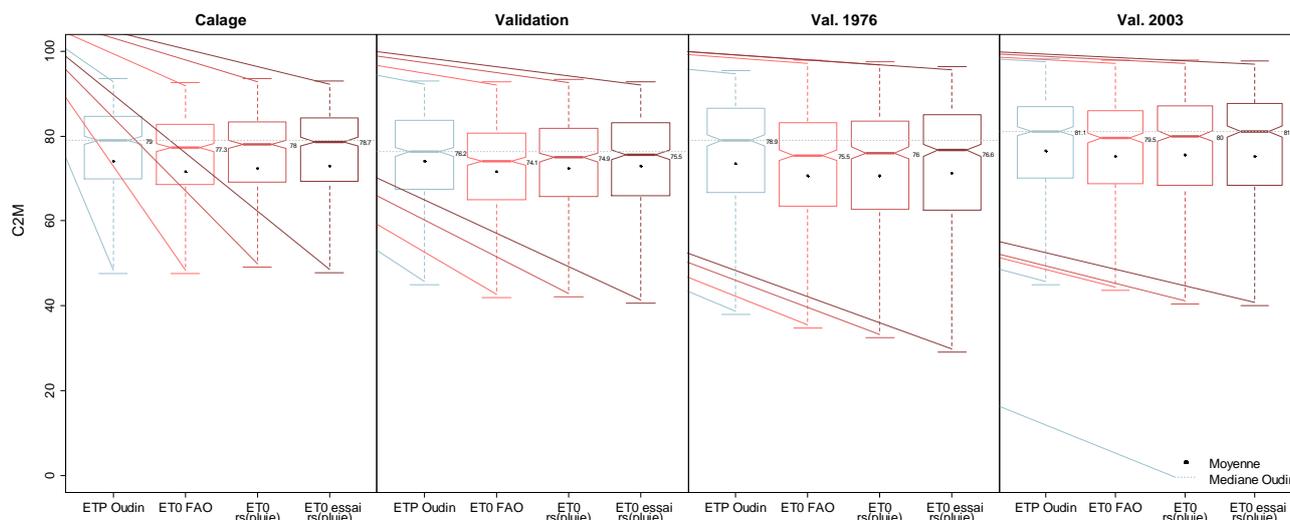


Figure 32 Comparaison de boîtes à moustache de l'ETP $ET_{0\text{Oudin}}$, de l' $ET_{0\text{FAO56}}$ à l' $ET_{0\text{rs(pluie)}}$ et à l' $ET_{0\text{essai rs(pluie)}}$ α (neige, 0.06) pour 600 bv en C2M, en calage/validation. La ligne bleue pointillée correspond à la médiane de l'ETP d'Oudin.

Les performances sont aussi bonnes en montagne (Figure 33) pour l' ET_0 *essai* rs (pluie). Les performances en baisse de l' $ET_{0\text{rs(pluie)}}$ en calage par rapport à l' $ET_{0\text{FAO}}$ confirment que le modèle cherche une évapotranspiration plus faible en montagne.

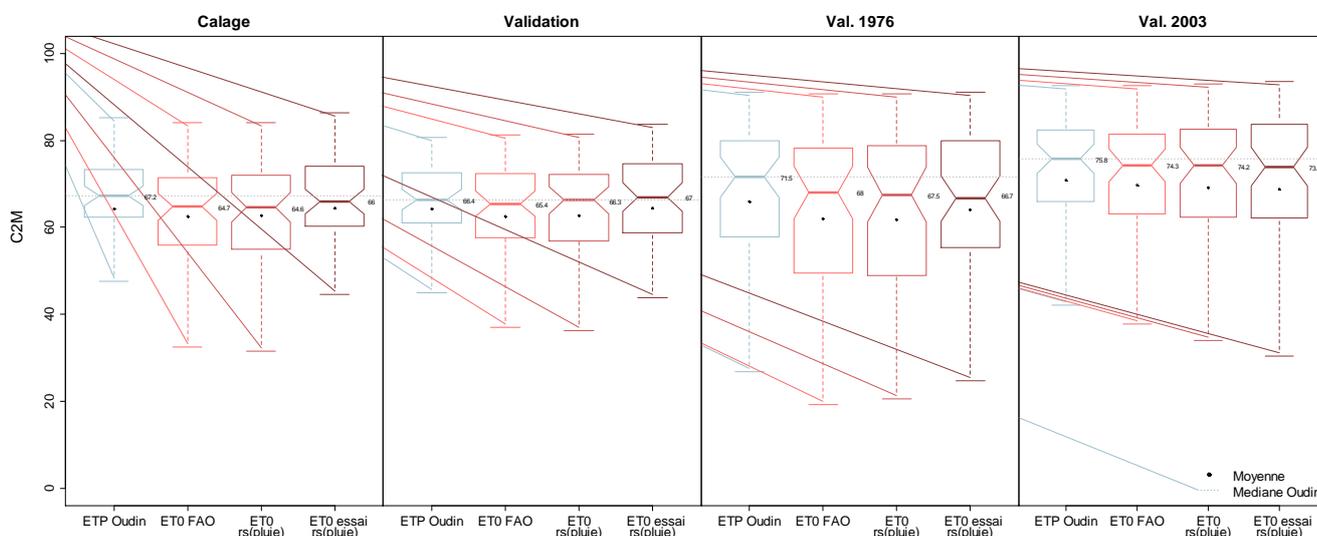


Figure 33 Comparaison de boîtes à moustache de l'ETP $ET_{0\text{Oudin}}$, de l' $ET_{0\text{FAO56}}$ à l' $ET_{0\text{rs(pluie)}}$ et à l' $ET_{0\text{essai rs(pluie)}}$ α (neige, 0.06) pour 60 bv en C2M, en calage/validation. La ligne bleue pointillée correspond à la médiane de l'ETP d'Oudin.

Il semblerait aussi dans ce cas, de façon générale pour l'ensemble de nos 600 bv, que le modèle préfère une augmentation générale de l'évapotranspiration. $ET_{0\text{FAO56}} < ET_{0\text{rs(pluie)}}$

7.3 RECHERCHE DE LA VALEUR MOYENNE DE RESISTANCE DE SURFACE

Nous reproduisons le même schéma d'expérience que pour l'albédo dans la partie (6.2), en testant plusieurs valeurs successives de résistance de surface, les autres paramètres restant à la valeur FAO. Nous obtenons une valeur optimale vers 20s.m^{-1} (Figure 34), ici pour le C2M.

Cette valeur n'est pas complémentaire de la condition avec la pluie, contrairement à l'albédo moyen et la condition sur la neige. Elle tend vers plus d'évapotranspiration. Nous décidons de ne pas poursuivre les recherches dans cette direction pour l'instant.

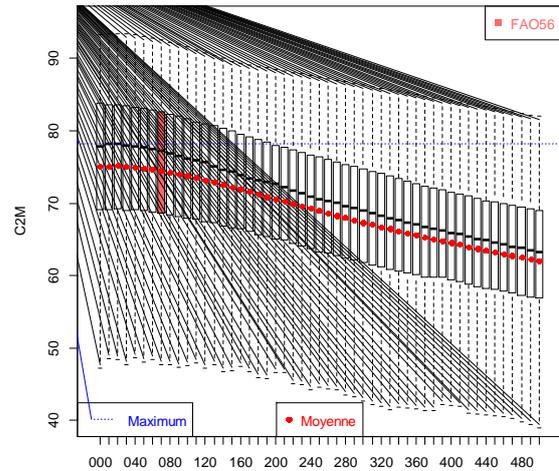


Figure 34 Comparaison boîtes à moustache de l'ET₀ rs₍₀₎ à l'ET₀ rs₍₅₀₀₎, la boîte à moustache couleur rouge brique est la valeur ET₀ FAO 56 rs₍₇₀₎, la ligne bleue pointillée correspond à la médiane maximum de l'ET₀ rs₍₂₀₎.

Une carte et un graphique adimensionnel des 600 bv pourrait être envisagé comme pour l'albédo, afin d'identifier d'éventuelle tendances régionales et comment se comportent les bassins et leurs préférences pour une valeur de r_s sur la graphique adimensionnel de Turc.

7.4 LES MODELES DE RESISTANCE DE SURFACE

Il existe plusieurs approches pour la r_s , la calculer avec des modèles ou la fixer comme le préconise la FAO. Monteith (1965) proposa trois méthodes de calcul pour la résistance de surface. Deux à partir de paramètres climatiques (pression de vapeur, température de surface...) et une troisième à partir de la surface foliaire et de la vitesse du vent. Ce modèle peut atteindre 50% d'erreur selon (Bakker, 1986).

Dans la publication de la FAO 56 (1998), la résistance de surface r_s est définie comme le rapport entre la résistance stomatique de la feuille « bien éclairée » r_1 et de l'indice foliaire LAI_{active}.

7.4.1 Approche physique, mécaniste

Modèle couche unique : « *The Big leaf model* », la solution est de considérer une seule *grande feuille*, sur la surface qu'on souhaite représenter. Cette feuille représente la résistance qu'aurait chacune des feuilles de l'ensemble comme si elles étaient montées en parallèle. (Jarvis, 1995; Sellers and Dorman, 1987)

Modèle multicouche : L'avantage de cette méthode est son traitement séparé à deux niveaux : sol et végétation (Shuttleworth and Wallace, 1985). Cette approche est cependant compliquée à mettre en place du fait qu'il faut en chaque point de la grille à modéliser, calculer les flux convectifs totaux au sommet de la canopée en les étalonnant avec des profils de température et d'humidité mesuré *in situ*.

7.4.2 Approche physiologique

Les biologistes emploient le terme conductance, et non de résistance pour décrire le phénomène. Ils ont développé des formules en fonction du potentiel hydrique de la plante, et la position des feuilles ([Alves et al., 1998](#))

7.4.3 Approche climatique

Il existe plusieurs modèles pour évaluer la résistance de surface r_s avec des paramètres climatiques, deux d'entre eux ont été comparés par Lecina ([2003](#)) et évalués avec des mesures lysimétriques.

Il serait intéressant dans des travaux ultérieurs de tester ces différentes approches de modélisation de la r_s et la réaction des modèles à leurs dépens.

7.5 CONCLUSION

Nous arrivons au terme de l'analyse de sensibilité de la formule de Penman Monteith FAO56. Avec la ([Figure 34](#)) nous notons les progrès accomplis avec nos deux critères d'évaluation KGE et C2M de l' ET_0 FAO56 à l' ET_0 *essai* r_s (pluie), α (neige, 0.06). Une formule d' ET_0 qui prend en compte les améliorations sur l'albédo et la résistance de surface. Nous améliorons les performances de l' ET_{0FAO56} pour le calage et la validation dans 6 cas sur 8 sur l'ensemble de la période.

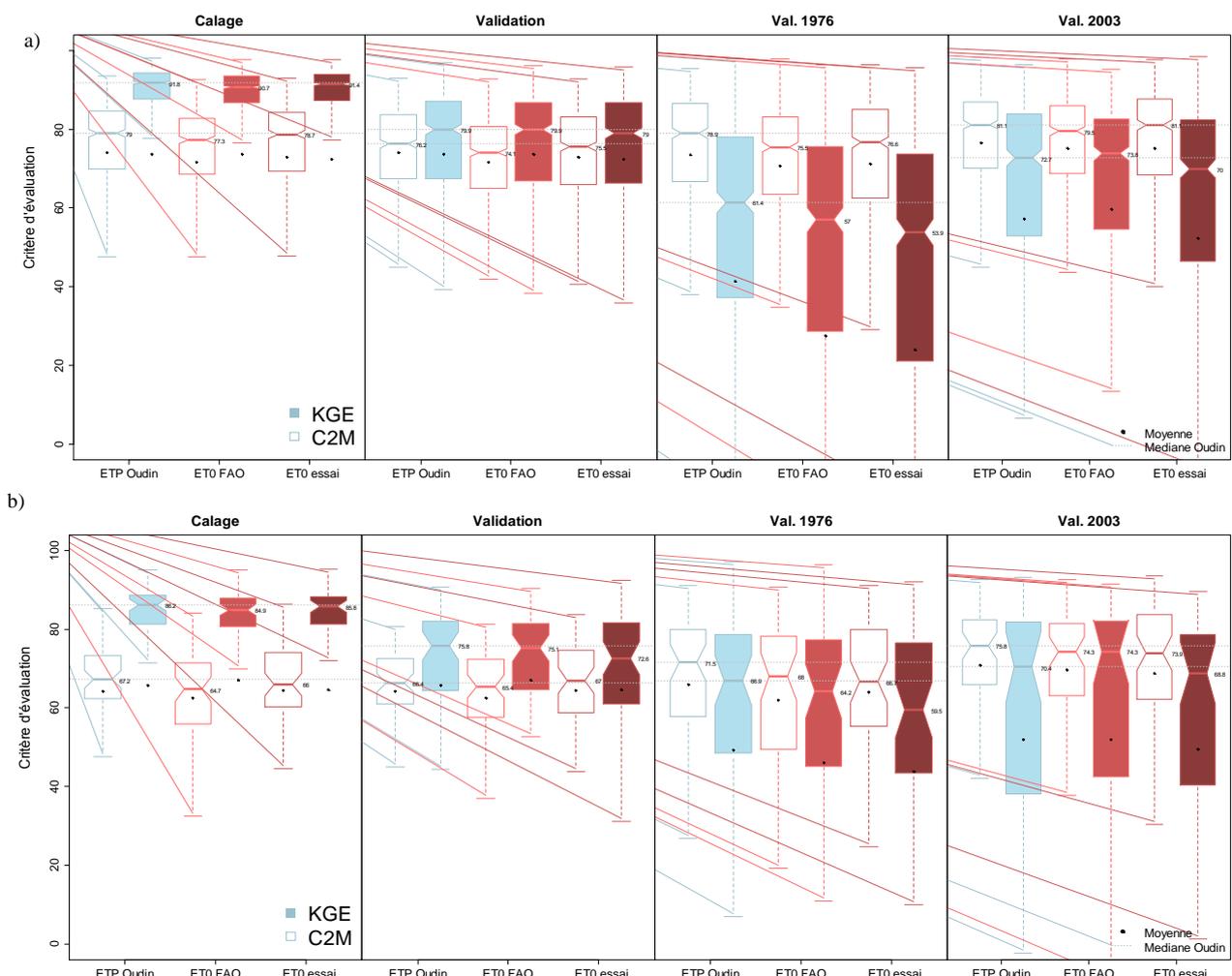


Figure 35 Comparaison de boîtes à moustache de l' ETP_{Oudin} , de l' ET_{0FAO56} et à l' ET_0 *essai* r_s (pluie), α (neige, 0.06) en C2M et KGE, en calage/validation. La ligne bleue pointillée correspond à la médiane C2M et KGE de l' ETP d'Oudin, a) pour 600 bv, b) pour 60 bv en montagne

8 SECONDE EXPERIENCE : ETUDE DES CHRONIQUES D'ETP : GR4J, ET MORDOR

Dans cette seconde expérience nous évaluerons avec GR4J et MORDOR sur des bassins choisis dans la liste des 222 bv (pluie SPAZM) (Figure 2), l'ETP d'Oudin, l'ET_{0FAO}, et notre ET_{0 essai} qui prend en compte un albédo moyen de 0.06 et variable avec la neige :

$$\alpha = 0.06 + (0.95 - 0.06) * e^{\left(\frac{\beta}{\tau}\right)}$$

, et la résistance de surface s'annulant avec la pluie.

Le premier bassin étudié K2064010 est le Langouyrou à Langogne (Figure 36) avec un régime non influencé. Les différences entre nos deux modèles sont particulièrement marquées ici (Figure 37). MODOR applique une forte correction à ces deux paramètres $cep=0.5$ et $kmin=0.77$, les Emax qui en résultent sont beaucoup plus faibles [2,1] que les ETP et ET₀ [1,1] se rapprochant ainsi du déficit d'écoulement observé.

Les deux modèles ont des performances différentes sur les périodes de calage (1987-1996), validation (1996-2006) en particulier sur les années de hautes eaux 1994 et 1996.

GR4J sur le calage est bien corrélé tandis que MORDOR sous-estime les cumuls de débits annuels des années de hautes eaux 1994 et 1996 et inversement sur la période validation GR4J surestime les cumuls de débits tandis que MORDOR est bien corrélé.

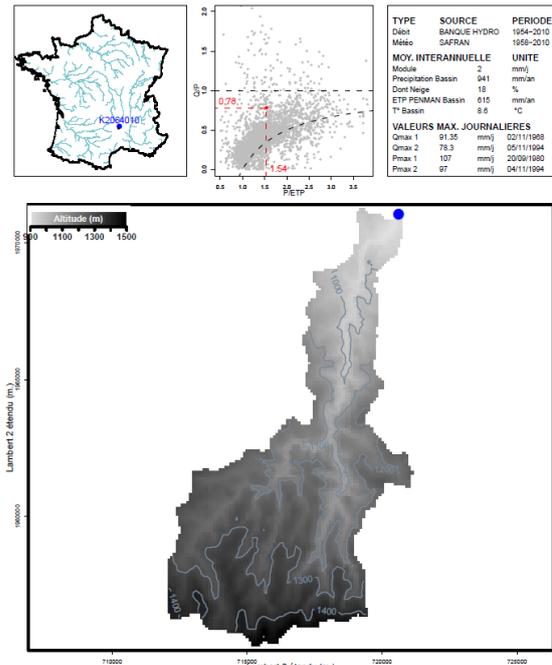


Figure 36 Code banque Hydro K2064010, fiche bassin IRSTEA Lobligeois F. ; Bourgin P.Y, 2012

L'ETR avec GR4J est plus élevée en moyenne glissante sur les deux périodes, quelque que soit l'ETP choisie. Tandis que MORDOR a des ETR sur les même périodes jusqu'à 100mm/an plus faible (Tableau 1). On constate une augmentation entre les deux périodes sur l'ETR.

Une forte ETR entraine moins d'écoulement, pourtant GR4J a de meilleures performances sur les années de hautes eaux 1994 et 1996. Sur la seconde période (validation) l'ETR augmentant mais pas assez, trop d'eau est toujours disponible à l'écoulement, le modèle surestime les cumuls annuels de débit, le coefficient d'échange interbassin ne permettant pas de rattraper le bilan.

Les plus faibles ETR de MORDOR sur la période de calage devraient théoriquement entrainer des débits plus forts, pourtant le modèle sous-estime sur les années de hautes eaux 1994 et 1996. Cependant cette fois le modèle a de meilleures performances sur la période de validation car son ETR plus forte permet de mieux équilibrer le bilan.

Pour ce bassin versant, le déficit d'écoulement de GR4J est mieux modélisé que celui de MORDOR et l'ET_{0 essai} a eu de meilleures performances avec GR4J sur l'ensemble de la période et sur la validation avec MORDOR.

Ici les modèles ont montré des différences de simulation de débit entre périodes de calage, validation, illustrant leur différence de gestion du forçage ETP.

Tableau 1 Moyenne glissante ETP/Emax/ETR et KGE période pour le bassin : K2064010

GR4J	Oudin (mm/an)		PM FAO (mm/an)		Pm essai (mm/an)	
	1987-1996 (calage)	1996-2006 (validation)	1987-1996 (calage)	1996-2006 (validation)	1987-1996 (calage)	1996-2006 (validation)
ETP GR4J	609.42	621.61	614.56	624.81	715.68	735.54
ETR GR4J	417.14	436.41	429.27	444.17	454.05	475.34
KGE	0.924	0.853	0.898	0.894	0.933	0.919

MORDOR	Oudin (mm/an)		PM FAO (mm/an)		Pm essai (mm/an)	
	1987-1996 (calage)	1996-2006 (validation)	1987-1996 (calage)	1996-2006 (validation)	1987-1996 (calage)	1996-2006 (validation)
Emax MORDOR	423.27	440.31	380.60	388.47	418.58	439.21
ETR MORDOR	369.07	389.81	335.34	347.19	357.53	380.77
KGE	0.766	0.811	0.806	0.824	0.793	0.830

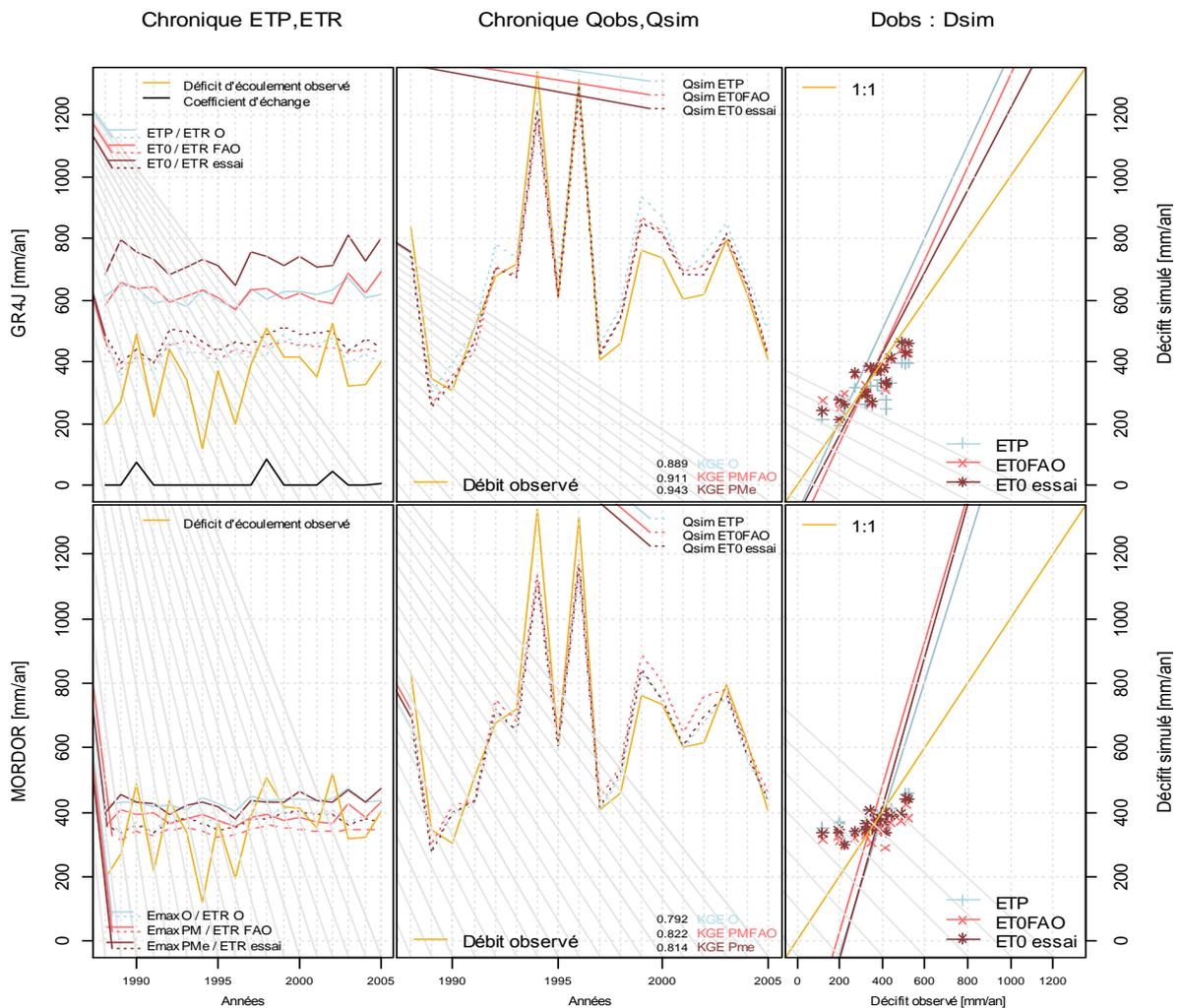


Figure 37 K2064010 Le Langouyrou à Langogne, comparaison de cumul annuel en mm entre GR4J et MORDOR

Le second bassin étudié est la Vienne à Peyrelevalde [La Rigole du Diable] (Figure 38). Il s'agit aussi d'un cas intéressant puisque les cumuls annuels de débit issu de l'ETP d'Oudin sont surestimés pour les deux modèles GR4J et MORDOR, par rapport aux autres ET_0 ainsi qu'à l'observation (Figure 39). Une surestimation sur l'ensemble de la période de validation 1996-2006,

mettant en évidence le manque de robustesse du calage avec une formule *rigide* d'ETP (Coron, 2013). Ici l'ET₀ *essai* a eu de meilleures performances en validation avec GR4J et MORDOR. Ce cas n'est pas isolé, d'autres bassins ont présenté des résultats semblables. Ici ce ne sont plus les modèles mais les formulations d'ETP qui entraînent des différences de simulation de débit.

Conclusion

Ces deux résultats nous permettent de nous plonger dans les modèles et comment le forçage ETP est assimilée selon ces différentes formulations. Pour aller plus loin, il serait intéressant de sortir des statistiques d'ensemble pour ces 222 bv avec les différences de critère d'évaluation entre deux périodes de calage et validation pour noter combien de bassins ont des biais en validation avec l'ETP d'Oudin par rapport aux formules de Penman Monteith.

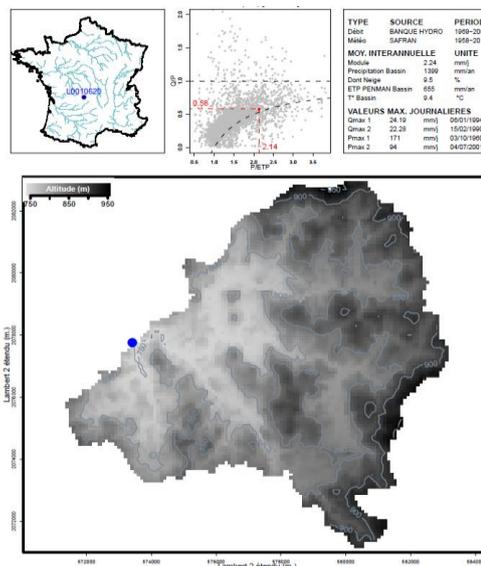


Figure 38 Code banque Hydro L0010620, fiche bassin IRSTEA Lobligeois F. ; Bourgin P.Y, 2012

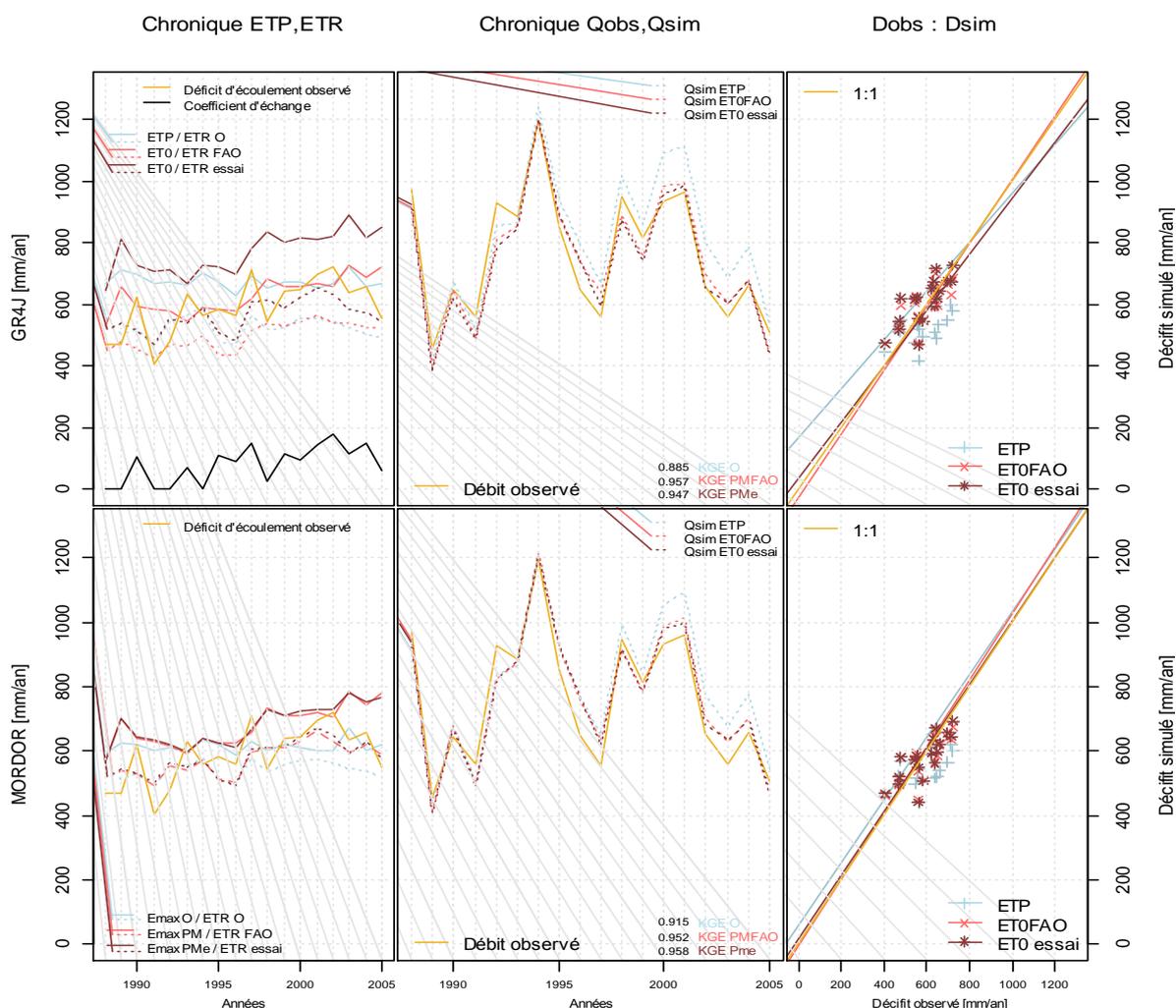


Figure 39 L0010620 La Vienne à Peyrelevade [La Rigole du Diable], comparaison de cumul annuel entre GR4J et MORDOR

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons au cours de ce mémoire, critiqué les recommandations de la FAO 56 concernant les paramètres d'albédo et de résistance de surface fixé aux valeurs respectives de 0.23 et 70s/m. Nous avons trouvé qu'avec nos données SAFRAN, qu'un faible albédo (0.06) convient plus à notre modèle hydrologique GR4J au vu des critères d'évaluations testés, C2M et KGE pour l'ensemble de nos 600 bassins versants. Nous avons également testé un albédo variable avec la neige en montagne, les résultats ont été très concluant en critère d'évaluation pour les périodes de calage et validation sur nos bassins ayant les exutoires les plus hauts.

De ce fait nous avons entrepris une critique des données de rayonnement fournis par SAFRAN, une critique qui montra une différence importante entre la mesure *in situ* et la réanalyse. Pour trouver une valeur d'albédo adapté à l'hydrologie dans l' ET_0 , il nous faudra multiplier et croiser les vérifications des données proposées par SAFRAN météo France.

Pour la résistance de surface, nous avons appliqué les mêmes schémas d'expérience, à savoir la recherche d'une valeur moyenne adaptée et une condition particulière: quand il pleut la résistance de surface s'annule. Seul le deuxième exercice a montré des résultats intéressants, améliorant les critères d'évaluation sur les périodes de calage mais pas sur la validation.

La résistance de surface est un paramètre bioclimatique, ce mot qui englobe deux notions, biologie et climat, traduit un phénomène fortement influencé par la saisonnalité et l'altitude. Il serait intéressant de voir la réaction des modèles hydrologiques avec une r_s modélisée.

Nous pourrions envisager caler une sinusoïde annuelle par des paramètres jour julien, altitude, latitude afin de produire une ET_m en approche « *one-step* » et de comparer cette ET_m avec des mesures indépendantes des besoins en eau du modèle.

Nous avons référencé de nombreux modèles de r_s sans pouvoir les tester, de plus les données MODIS offrent des perspectives intéressantes fournissant une r_s réanalysé en fonction d'observation satellite ([Nemani and Running, 1989](#)).

Avec la seconde expérience nous avons pu mettre en évidence les différences d'approches de simulation entre modèles hydrologiques et le manque de robustesse de ces mêmes modèles entre la période de calage et validation en fonction du choix de la formulation d'ETP pour certains bassins versants.

Une étude statistique d'ensemble pour ces 222 bv devra être menée pour noter combien de bassins ont des biais en validation sur une période plus chaude avec l'ETP d'Oudin par rapport aux formules de Penman Monteith.

Les chroniques d'ETR et d'ETP issues des modèles hydrologiques pourraient être comparées à des mesures lysimétriques irriguées ou non, aux données de tour à flux, et à d'autre modélisation (MODIS) d'ETP et ETR indépendantes des besoins en eau des modèles pluie-débit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome* **300**.
- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Wright, J. L., Howell, T. A., Ventura, F., Snyder, R., Itenfisu, D., Steduto, P., Berengena, J., Yrisarry, J. B., Smith, M., Pereira, L. S., Raes, D., Perrier, A., Alves, I., Walter, I., and Elliott, R. (2006). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management* **81**, 1-22.
- Alves, I., Perrier, A., and Pereira, L. (1998). Aerodynamic and surface resistances of complete cover crops: How good is the "big leaf"? *Transactions of the ASAE* **41**, 345-352.
- Andréassian, V., Perrin, C., and Michel, C. (2004). Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models. *Journal of Hydrology* **286**, 19-35.
- Bakker, J. (1986). Measurement of canopy transpiration or evapotranspiration in greenhouses by means of a simple vapour balance model. *Agricultural and forest meteorology* **37**, 133-141.
- Bell, V. A., Gedney, N., Kay, A. L., Smith, R. N. B., Jones, R. G., and Moore, R. J. (2011). Estimating Potential Evaporation from Vegetated Surfaces for Water Management Impact Assessments Using Climate Model Output. *Journal of Hydrometeorology* **12**, 1127-1136.
- Beven, K. (1979). A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology* **44**, 169-190.
- Boé, J., and Terray, L. (2008). Uncertainties in summer evapotranspiration changes over Europe and implications for regional climate change. *Geophysical Research Letters* **35**.
- Coron, L. (2013). Les modèles hydrologiques conceptuels sont-ils robustes face à un climat en évolution? Diagnostic sur un échantillon de bassins versants français et australiens, AgroParisTech.
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Bourqui, M., and Hendrickx, F. (2014). On the lack of robustness of hydrologic models regarding water balance simulation: a diagnostic approach applied to three models of increasing complexity on 20 mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* **18**, 727-746.
- Donohue, R. J., McVicar, T. R., and Roderick, M. L. (2010). Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. *Journal of Hydrology* **386**, 186-197.
- Doorenbos, J., and Pruitt, W. (1977). Crop Water Requirements, Irrigation and Drainage Paper. No. 24. *FAO, Rome*.
- Durand, Y. (1995). Analyse des principaux paramètres météorologiques de surface sur les massifs alpins et d'autres zones climatiquement homogènes. *Note scientifique et technique SAFRAN, CEN, Grenoble*.
- Ekström, M., Jones, P., Fowler, H., Lenderink, G., Buishand, T., and Conway, D. (2007). Regional climate model data used within the SWURVE project? 1: projected changes in seasonal patterns and estimation of PET. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* **11**, 1069-1083.
- Etchevers, P. (2000). Modélisation de la phase continentale du cycle de l'eau à l'échelle régionale. Impact de la modélisation de la neige sur l'hydrologie du bassin versant du Rhône, Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III.
- Farquhar, G. D., and Sharkey, T. D. (1982). Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual review of plant physiology* **33**, 317-345.
- Garçon, R. (1999). Modèle global pluie-débit pour la prévision et la prédétermination des crues. *La Houille Blanche*, 88-95.

- Gong, L., Xu, C.-y., Chen, D., Halldin, S., and Chen, Y. D. (2006). Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology* **329**, 620-629.
- Gottardi, F. (2009). Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement Application aux grands massifs montagneux français, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- Gsell, P.-S. p. (2014). Apports et voies d'amélioration de la représentation des glaciers et de leur évolution au sein d'un modèle hydrologique, Paris 6.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* **377**, 80-91.
- Hargreaves, G. H., and Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* **108**, 225-230.
- Hatfield, J., and Allen, R. (1996). Evapotranspiration estimates under deficient water supplies. *Journal of irrigation and drainage engineering* **122**, 301-308.
- Herrnegger, M., Nachtnebel, H.-P., and Haiden, T. (2012). Evapotranspiration in high alpine catchments—an important part of the water balance! *Hydrology Research* **43**, 460-475.
- Hobbins, M. T., Ramírez, J. A., and Brown, T. C. (2004). Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous US: Paradoxical or complementary? *Geophysical Research Letters* **31**.
- Hong, J., Takagi, K., Ohta, T., and Kodama, Y. (2014). Wet surface resistance of forest canopy in monsoon Asia: Implications for eddy-covariance measurement of evapotranspiration. *Hydrological Processes* **28**, 37-42.
- Jarvis, P. (1995). Scaling processes and problems. *Plant, Cell & Environment* **18**, 1079-1089.
- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S. I., Sheffield, J., Goulden, M. L., Bonan, G., Cescatti, A., Chen, J., de Jeu, R., Dolman, A. J., Eugster, W., Gerten, D., Gianelle, D., Gobron, N., Heinke, J., Kimball, J., Law, B. E., Montagnani, L., Mu, Q., Mueller, B., Oleson, K., Papale, D., Richardson, A. D., Rouspard, O., Running, S., Tomelleri, E., Viovy, N., Weber, U., Williams, C., Wood, E., Zaehle, S., and Zhang, K. (2010). Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature* **467**, 951-4.
- Kay, A., and Davies, H. (2008). Calculating potential evaporation from climate model data: a source of uncertainty for hydrological climate change impacts. *Journal of Hydrology* **358**, 221-239.
- Le Moigne, P. (2002). Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. *Rap. tech., Météo-France CNRM/GMME/MC2*.
- Le Moine, N. (2008). Le bassin versant de surface vu par le souterrain: une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit?, Paris 6.
- Le Moine, N., Andréassian, V., Perrin, C., and Michel, C. (2007). How can rainfall-runoff models handle intercatchment groundwater flows? Theoretical study based on 1040 French catchments. *Water Resources Research* **43**.
- Lecina, S., Martínez-Cob, A., Pérez, P. J., Villalobos, F. J., and Baselga, J. J. (2003). Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman–Monteith equation under semiarid conditions. *Agricultural Water Management* **60**, 181-198.
- Lhomme, J.-P. (1991). The concept of canopy resistance: historical survey and comparison of different approaches. *Agricultural and forest meteorology* **54**, 227-240.
- Liu, Q., and McVicar, T. R. (2012). Assessing climate change induced modification of Penman potential evaporation and runoff sensitivity in a large water-limited basin. *Journal of Hydrology* **464**, 352-362.
- Mathevet, T., Michel, C., Andreassian, V., and Perrin, C. (2006). A bounded version of the Nash–Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins. *IAHS PUBLICATION* **307**, 211.

- McGuinness, J. L., and Bordne, E. F. (1972). "A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values," US Dept. of Agriculture.
- McKenney, M. S., and Rosenberg, N. J. (1993). Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* **64**, 81-110.
- Monteith, J. (1965). Evaporation and environment. In "Symp. Soc. Exp. Biol", Vol. 19, pp. 4.
- Monteith, J., and Unsworth, M. (1973). "Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere," Academic Press.
- Morales, N. P. (2014). Etude des bilans hydrologiques sur une large base de bassins versants français. *Rapport de stage Assistant Ingénieur, ENSEEE, Grenoble*.
- Morin, S., Lejeune, Y., Lesaffre, B., Panel, J.-M., Poncet, D., David, P., and Sudul, M. (2012). An 18-yr long (1993–2011) snow and meteorological dataset from a mid-altitude mountain site (Col de Porte, France, 1325 m alt.) for driving and evaluating snowpack models. *Earth System Science Data* **4**, 13-21.
- Nash, J., and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology* **10**, 282-290.
- Nemani, R. R., and Running, S. W. (1989). Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. *Journal of Applied meteorology* **28**, 276-284.
- Oudin, L. (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global, ENGREF (AgroParisTech).
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., and Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? *Journal of Hydrology* **303**, 290-306.
- Penman, H. (1952). The physical bases of irrigation control. In "13th International hort. Congress". London.
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* **279**, 275-289.
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. (2007). Modèles hydrologiques du génie rural (GR). *Rapport, Edition CEMAGREF*.
- Philip, J. R. (1966). Plant water relations: some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology* **17**, 245-268.
- Poncelet (2013). L'évapotranspiration dans le modèle hydrologique MORDOR. Diagnostic, tentative de reformulation et potentiel des produits satellitaires. *Mémoire de fin d'étude, SupAgro, Montpellier*.
- Pushpalatha, R. (2013). Simulation et prévision des étiages sur des bassins versants français: Approche fondée sur la modélisation hydrologique, Paris, AgroParisTech.
- Sellers, P., and Dorman, J. (1987). Testing the simple biosphere model (SiB) using point micrometeorological and biophysical data. *Journal of Climate and Applied Meteorology* **26**, 622-651.
- Shuttleworth, W. J., and Wallace, J. (1985). Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **111**, 839-855.
- Solomon, S. (2007). "Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC," Cambridge University Press.
- Stewart, J. (1977). Evaporation from the wet canopy of a pine forest. *Water Resources Research* **13**, 915-921.
- Stewart, J., and Thom, A. (1973). Energy budgets in pine forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **99**, 154-170.
- Stewart, J., and Verma, S. (1992). Comparison of surface fluxes and conductances at two contrasting sites within the FIFE area. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)* **97**, 18623-18628.
- Szeicz, G., and Long, I. (1969). Surface resistance of crop canopies. *Water Resources Research* **5**, 622-633.

- Turc (1954). Calcul du bilan de l'eau: évaluation en fonction des précipitations et des températures. *IAHS Publ* **37**.
- Turc, L. (1953). "Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement," Institute National de la Recherche Agronomique.
- van der Schrier, G., Jones, P. D., and Briffa, K. R. (2011). The sensitivity of the PDSI to the Thornthwaite and Penman-Monteith parameterizations for potential evapotranspiration. *Journal of Geophysical Research* **116**.
- Xu, C., and Singh, V. (1998). Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods. *Hydrological processes* **12**, 429-442.
- Zhang, G., Zhou, G., Chen, F., and Wang, Y. (2014). Analysis of the variability of canopy resistance over a desert steppe site in Inner Mongolia, China. *Advances in Atmospheric Sciences* **31**, 681-692.

Liste des figures

FIGURE 1 : A) CARTE ET B) REPRESENTATION ADIMENSIONNELLE DES 600 BASSINS VERSANTS. LES POINTS DU GRAPHIQUE ADIMENSIONNEL CORRESPONDENT AUX MOYENNES DES SERIES TEMPORELLES DE P_{SAFRAN} , Q ET ETP_{OUDIN} (1958-2013). EN POINTILLE LA RELATION DE TURC-MEZENTSEV (1954), L'AXE P/ETP EST UN INDICE D'ARIDITE, L'AXE Q/P EST UN INDICE DE RENDEMENT.....	11
FIGURE 2 : A) CARTE ET B) REPRESENTATION ADIMENSIONNELLE DES 222 BASSINS VERSANTS. LES POINTS DU GRAPHIQUE ADIMENSIONNEL CORRESPONDENT AUX MOYENNES DES SERIES TEMPORELLES DE P_{SPAZM} , Q ET ETP_{OUDIN} (1958-2013). EN POINTILLE LA RELATION DE TURC-MEZENTSEV (1954), L'AXE P/ETP EST UN INDICE D'ARIDITE, L'AXE Q/P EST UN INDICE DE RENDEMENT.....	12
FIGURE 3 SCHEMA DU MODELE GR4J SEMI-DISTRIBUE EN BANDES D'ALTITUDE ET MODULE CEMANEIGE	13
FIGURE 4 SCHEMA DU MODELE MORDOR SEMI DISTRIBUE EN BANDE D'ALTITUDE.	14
FIGURE 5 EXEMPLE DE CORRECTION DE L'ETP OUDIN PAR LES COEFFICIENTS $CETP$ ET $KMIN$ POUR A) LE BASSIN A1050310 ($CETP = 1.21$, $KMIN = 1.50$), B) LE BASSIN O7234010 ($CETP = 0.80$, $KMIN = 0.18$).....	15
FIGURE 6 PRESENTATION DES RESULTATS : A) CRITERE DE CALAGE ET BOITE A MOUSTACHE ETP OUDIN ; B) CRITERE DE CALAGE ET BOITE A MOUSTACHE ET_0 PENMAN MONTEITH FAO56.....	17
FIGURE 7 COMPARAISON DE BOITES A MOUSTACHE ENTRE ETP_{OUDIN} EN BLEU ET ET_0_{FAO56} EN ROUGE POUR 600 BV EN C2M, AVEC LES PERIODES DE CALAGE DU 01/09/1987 AU 31/08/1996 ET VALIDATION DU 01/09/1996 AU 31/08/2006 ET VALIDATION SUR LES ANNEES EXTREMES 1976 ET 2003,	17
FIGURE 8 COMPARAISON DE BOITES A MOUSTACHE ENTRE ETP_{OUDIN} ET ET_0_{FAO56} POUR LES 60 BV LES PLUS HAUTS AU SEIN 600 EN C2M, AVEC LES PERIODES DE CALAGE DU 01/09/1987 AU 31/08/1996 ET VALIDATION DU 01/09/1996 AU 31/08/2006 ET VALIDATION SUR LES ANNEES EXTREMES 1976 ET 2003.	18
FIGURE 9 : A) CARTE ET B) REPRESENTATION ADIMENSIONNELLE DES 600 BASSINS VERSANTS. LE THEME ROUGE CORRESPOND AUX BASSINS AYANT DE MEILLEURES PERFORMANCES EN CRITERE D'EVALUATION AVEC L' ET_0_{FAO56} , LE THEME BLEU AUX BASSINS AYANT DE MEILLEURES PERFORMANCES EN CRITERE D'EVALUATION AVEC L'ETP D' OUDIN. LES POINTS DU GRAPHIQUE ADIMENSIONNEL CORRESPONDENT AUX MOYENNES DES SERIES TEMPORELLES DE P_{SAFRAN} , Q ET ETP_{OUDIN} (1958-2013).	18
FIGURE 10 CODE BANQUE HYDRO : A1050310, FICHE BASSIN IRSTEA LOBLIGEIS F. ; BOURGIN P.Y, 2012	19
FIGURE 11 BASSIN A1050310, L'ILL A ALTKIRCH, 233 km^2 , HAUT-RHIN (68), REGIME PEU INFLUENCE.	20
FIGURE 12 SCHEMA DU PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'ALBEDO VARIABLE AVEC LA NEIGE	23
FIGURE 13 MAILLE SAFRAN n°8862 A) SITUATION GEOGRAPHIQUE B) REGIME DES PARAMETRES CLIMATIQUES EN MOYENNE INTERANNUELLE 1958-2013.	24
FIGURE 14 MAILLE SAFRAN n°8862 A) COURBES DE REGIME EN MOYENNE INTERANNUELLE (1958-2013) AVEC L'ALBEDO FIXE ET VARIABLE POUR L' ET_0 PENMAN MONTEITH EN MM/J B) CORRELATION ENTRE ALBEDO FIXE EN ROUGE ET VARIABLE $(NEIGE)$ EN BLEU POUR L' ET_0 PENMAN MONTEITH EN MM/J.....	25
FIGURE 15 MAILLE SAFRAN n°6758 A) SITUATION GEOGRAPHIQUE B) REGIME DES PARAMETRES CLIMATIQUES EN MOYENNE INTERANNUELLE 1958-2013	25
FIGURE 16 MAILLE SAFRAN n°6758 A) COURBES DE REGIME EN MOYENNE INTERANNUELLE (1958-2013) AVEC L'ALBEDO FIXE ET VARIABLE POUR L' ET_0 PENMAN MONTEITH EN MM/J B) CORRELATION ENTRE ALBEDO FIXE EN ROUGE ET VARIABLE $(NEIGE)$ EN BLEU POUR L' ET_0 PENMAN MONTEITH EN MM/J.....	26
FIGURE 17 MAILLE SAFRAN n°6758 A) COURBES DE REGIME EN MOYENNE INTERANNUELLE (1958-2013) POUR L' ET_0 FAO56 (ALBEDO FIXE) EN ROUGE, L' ET_0 A $(NEIGE)$ EN BLEU VARIABLE ET L'ETP D' OUDIN EN NOIR.	26
FIGURE 18 CARTES DES 8585 MAILLES SAFRAN FRANÇAISES EN MOYENNE INTERANNUELLE EN MM/AN	27

FIGURE 19 CARTES DES 8585 MAILLES SAFRAN FRANÇAISES EN COEFFICIENT DE VARIATION INTERANNUELLE EN MM/J.....	27
FIGURE 20 COMPARAISON DE BOITES A MOUSTACHE ENTRE ETP_{OUDIN} , $ET_{0\text{FAO56}}$ ET $L'ET_0 A_{(\text{NEIGE})}$ POUR 600 BV EN C2M, AVEC LES PERIODES DE CALAGE DU 01/09/1987 AU 31/08/1996 ET VALIDATION DU 01/09/1996 AU 31/08/2006 ET VALIDATION SUR LES ANNEES EXTREMES 1976 ET 2003. LA LIGNE BLEUE POINTILLEE CORRESPOND A LA MEDIANE DE L'ETP D'OUDIN.	28
FIGURE 21 COMPARAISON DE BOITES A MOUSTACHE ENTRE ETP_{OUDIN} , $ET_{0\text{FAO56}}$ ET $L'ET_0 A_{(\text{NEIGE})}$ POUR 60 BV (MONTAGNE DANS 600) EN C2M, AVEC LES PERIODES DE CALAGE DU 01/09/1987 AU 31/08/1996 ET VALIDATION DU 01/09/1996 AU 31/08/2006 ET VALIDATION SUR LES ANNEES EXTREMES 1976 ET 2003. LA LIGNE BLEUE POINTILLEE CORRESPOND A LA MEDIANE DE L'ETP D'OUDIN.	28
FIGURE 22 COMPARAISON DE BOITES A MOUSTACHE DE $L'ET_0 A_{(0)}$ A $L'ET_0 A_{(0,60)}$, LA BOITE A MOUSTACHE COULEUR ROUGE BRIQUE EST LA VALEUR $ET_{0\text{FAO}} 56 A_{(0,20)}$, LA LIGNE BLEUE POINTILLEE CORRESPOND A LA MEDIANE MAXIMUM DE $L'ET_0 A_{(0,05)}$	29
FIGURE 23 FRONT DE PARETO ENTRE C2M ET KGE SUR LA VALEUR DE L'ALBEDO DANS $L'ET_0$, CHAQUE POINT CORRESPOND A LA MEDIANE DU CRITERE D'EVALUATION POUR 600 BV.	29
FIGURE 24 COMPARAISON DE BOITES A MOUSTACHE DE $L'ETP_{\text{OUDIN}}$, DE $L'ET_{0\text{FAO56}}$ A $L'ET_0 A_{(\text{NEIGE})}$ ET A $L'ET_0 \text{ESSAI} A_{(\text{NEIGE}, 0,06)}$ POUR 600 BV EN C2M, EN CALAGE/VALIDATION. LA LIGNE BLEUE POINTILLEE CORRESPOND A LA MEDIANE DE L'ETP D'OUDIN.	30
FIGURE 25 COMPARAISON DE BOITES A MOUSTACHE DE $L'ETP_{\text{OUDIN}}$, DE $L'ET_{0\text{FAO56}}$ A $L'ET_0 A_{(\text{NEIGE})}$ ET A $L'ET_0 \text{ESSAI} A_{(\text{NEIGE}, 0,06)}$ POUR 60 BV (MONTAGNE DANS 600 BV) EN C2M, EN CALAGE/VALIDATION. LA LIGNE BLEUE POINTILLEE CORRESPOND A LA MEDIANE DE L'ETP D'OUDIN.	30
FIGURE 26 REPRESENTATION ADIMENSIONNELLE DES 600 BASSINS VERSANTS. LE THEME BLEU CORRESPOND AUX BASSINS AYANT DE MEILLEURES PERFORMANCES EN CRITERE D'EVALUATION AVEC L'ETP D'OUDIN, LE THEME ROUGE AUX BASSINS AYANT DE MEILLEURES PERFORMANCES EN CRITERE D'EVALUATION AVEC EN A) $L'ET_{0\text{FAO56}}$ ET EN B) $L'ET_{0\text{ESSAI}}$. LES COURBES CORRESPONDENT AUX DENSITES DE PROBABILITE REPRESENTENT P/ETP_{OUDIN}	31
FIGURE 27 CORRELATION ENTRE LA MESURE <i>IN SITU</i> AU COL DE PORTE ET REANALYSE SAFRAN DE LA MAILLE N°6913.....	32
FIGURE 28 A) CARTE ET B) REPRESENTATION ADIMENSIONNELLE DES 600 BASSINS VERSANTS. LES BASSINS VERSANTS SONT TEINTES AVEC UNE COULEUR CORRESPONDANT A LA VALEUR D'ALBEDO AYANT EU LES MEILLEURES PERFORMANCES EN C2M (MEDIANE). LES POINTS DU GRAPHIQUE ADIMENSIONNEL CORRESPONDENT AUX MOYENNES DES SERIES TEMPORELLES DE P_{SAFRAN} , Q ET ETP_{OUDIN} (1958-2013).	33
FIGURE 29 CARTES DES 600 BV. LE THEME BLEU CORRESPOND AUX BASSINS AYANT DE MEILLEURES PERFORMANCES EN CRITERE D'EVALUATION AVEC L'ETP D'OUDIN, LE THEME ROUGE AUX BASSINS AYANT DE MEILLEURES PERFORMANCES EN CRITERE D'EVALUATION AVEC A) $L'ET_{0\text{FAO5}}$ (77 BV CONTRE 523 BV), B) $L'ET_{0\text{ESSAI}}$ (209 BV CONTRE 391 BV)	34
FIGURE 30 COMPARAISON DE BOITES A MOUSTACHE DE $L'ETP_{\text{OUDIN}}$, DE $L'ET_{0\text{FAO56}}$ ET A $L'ET_0 \text{ESSAI} A_{(\text{NEIGE}, 0,06)}$ EN C2M ET KGE, EN CALAGE/VALIDATION. LA LIGNE BLEUE POINTILLEE CORRESPOND A LA MEDIANE C2M ET KGE DE L'ETP D'OUDIN, A) POUR 600 BV, B) POUR 60 BV EN MONTAGNE	34
FIGURE 31 MAILLE SAFRAN N°6758 A) COURBES DE REGIME EN MOYENNE INTERANNUELLE (1958-2013) AVEC RS FIXE FAO ET RS POUR $L'ET_0$ PENMAN MONTEITH EN MM/J B) CORRELATION ENTRE RS FIXE EN ROUGE ET $RS_{(\text{PLUIE})}$ EN BLEU POUR $L'ET_0$ PENMAN MONTEITH EN MM/J.....	37
FIGURE 32 COMPARAISON DE BOITES A MOUSTACHE DE $L'ETP_{\text{OUDIN}}$, DE $L'ET_{0\text{FAO56}}$ A $L'ET_0 RS_{(\text{PLUIE})}$ ET A $L'ET_0 \text{ESSAI} RS_{(\text{PLUIE})} A_{(\text{NEIGE}, 0,06)}$ POUR 600 BV EN C2M, EN CALAGE/VALIDATION. LA LIGNE BLEUE POINTILLEE CORRESPOND A LA MEDIANE DE L'ETP D'OUDIN.	38
FIGURE 33 COMPARAISON DE BOITES A MOUSTACHE DE $L'ETP_{\text{OUDIN}}$, DE $L'ET_{0\text{FAO56}}$ A $L'ET_0 RS_{(\text{PLUIE})}$ ET A $L'ET_0 \text{ESSAI} RS_{(\text{PLUIE})} A_{(\text{NEIGE}, 0,06)}$ POUR 60 BV EN C2M, EN CALAGE/VALIDATION. LA LIGNE BLEUE POINTILLEE CORRESPOND A LA MEDIANE DE L'ETP D'OUDIN.	38
FIGURE 34 COMPARAISON BOITES A MOUSTACHE DE $L'ET_0 RS_{(0)}$ A $L'ET_0 RS_{(500)}$, LA BOITE A MOUSTACHE COULEUR ROUGE BRIQUE EST LA VALEUR $ET_{0\text{FAO}} 56 RS_{(70)}$, LA LIGNE BLEUE POINTILLEE CORRESPOND A LA MEDIANE MAXIMUM DE $L'ET_0 RS_{(20)}$	39
FIGURE 35 COMPARAISON DE BOITES A MOUSTACHE DE $L'ETP_{\text{OUDIN}}$, DE $L'ET_{0\text{FAO56}}$ ET A $L'ET_0 \text{ESSAI} RS_{(\text{PLUIE})}$, $A_{(\text{NEIGE}, 0,06)}$ EN C2M ET KGE, EN CALAGE/VALIDATION. LA LIGNE BLEUE POINTILLEE CORRESPOND A LA MEDIANE C2M ET KGE DE L'ETP D'OUDIN, A) POUR 600 BV, B) POUR 60 BV EN MONTAGNE	40
FIGURE 36 CODE BANQUE HYDRO K2064010, FICHE BASSIN IRSTEA LOBLIGEOIS F. ; BOURGIN P.Y, 2012.....	41
FIGURE 37 K2064010 LE LANGOUYROU A LANGOGNE, COMPARAISON DE CUMUL ANNUEL EN MM ENTRE GR4J ET MORDOR.....	42
FIGURE 38 CODE BANQUE HYDRO L0010620, FICHE BASSIN IRSTEA LOBLIGEOIS F. ; BOURGIN P.Y, 2012.....	43
FIGURE 39 L0010620 LA VIENNE A PEYRELEVADE [LA RIGOLE DU DIABLE], COMPARAISON DE CUMUL ANNUEL ENTRE GR4J ET MORDOR.....	43

RÉSUMÉ

Dans le bilan en eau d'un bassin versant, l'évapotranspiration représente de 30% des précipitations pour les bassins les plus humides ou plus froids, à jusqu'à 90% des précipitations pour les plus arides. L'évapotranspiration est le seul forçage calculé en entrée des modèles pluie-débit, les deux autres, la température et les précipitations sont mesurés. Pour simuler des débits futurs, il est nécessaire d'extrapoler ces forçages et l'évapotranspiration est au centre de la problématique de l'exercice du fait de la méconnaissance de ce phénomène à grande échelle.

L'objectif de cette recherche est d'améliorer les performances des modèles pluie débit en validation avec une formule plus adaptée pour répondre aux multiples effets du changement climatique sur l'évapotranspiration.

La formule de Penman Monteith (1965) est considérée par la communauté scientifique comme la plus réaliste physiquement. En 1998, la FAO opta pour cette formule et fixa certains paramètres aux besoins de l'agronomie. Notre travail consiste à obtenir une nouvelle ET_0 adaptée à l'étude hydrologique avec des performances aussi bonnes que l'ETP d'Oudin en calage. Cette amélioration nous permettrait d'avoir une base physique solide dans le but de se projeter avec une gamme de paramètres climatiques plus large.

Nous réaliserons une analyse de sensibilité de la formule d' ET_0 de Penman Monteith FAO 56 en questionnant le paramètre bioclimatique ($r_s = 70 \text{ s/m}$) et physique (albédo = 0,23) calibrés pour une parcelle standard, une herbe verte de 12cm, en cherchant quelles en sont les meilleures valeurs au vu des critères d'évaluations de GR4J pour 600 bassins versants répartis dans toute la France. Cette ET_0 , est utilisée telle quelle dans GR4J et transformée en ET_m dans MORDOR.

Puis nous étudions comment GR4J et MORDOR assimilent cette nouvelle information en calage et validation par rapport à l'ETP d'Oudin et l' ET_0 Penman Monteith FAO56, avec comme banc d'essai : 222 bassins versants issus de la base Coron avec de nouvelles données de pluie et de nouveaux critères d'évaluation adaptés à l'étude de l'évapotranspiration.

Nous avons trouvé qu'un albédo variable en fonction de la neige et en moyenne plus faible (0.06) améliore les performances en calage et validation des modèles hydrologiques, cependant une étude avec des mesures *in situ* de rayonnement plus large devra être menée pour confirmer cet albédo peu crédible. D'autre part une résistance de surface s'annulant de la pluie offre de meilleures performances en calage mais reste perfectible en validation.