

Exercice 18

QUANTIFICATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES DEBITS

Le nouveau rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) vient d'être publié, annonçant les dernières tendances climatiques globales simulées par la dernière version de plusieurs modèles climatiques.

Certains climatologues ont appliqué plusieurs méthodes de descente d'échelle afin de transformer les tendances climatiques globales proposées par le GIEC à l'échelle de votre bassin versant d'étude (le Réal Collobrier à Pierrefeu-du-Var, voir exercice 17), en suivant la méthodologie développée par Sauquet *et al.* (2015) dans le cadre du projet R²D², quantifiant notamment le futur de la ressource en eau de la Durance en 2050. Le produit final proposé par vos collègues climatologues est un tableau de changements moyens (i) d'évapotranspiration moyenne mensuelle et (ii) de cumuls mensuels de précipitation, établi en comparant une période de « climat présent » (notée CP) centrée autour de l'année 1970 (01/08/1967 – 31/07/1973) à une période de « climat futur » (notée CF) centrée autour de l'année 2030 (01/08/2027 – 31/07/2033). Ces changements moyens sont présentés dans le Tableau 18.1 et révèlent une augmentation des températures de l'air (légèrement plus marquée en été) et une diminution des précipitations.

Vous êtes chargés de quantifier l'impact de tels changements climatiques sur le régime des débits du Réal Collobrier à Pierrefeu-du-Var à partir des résultats de vos collègues climatologues et grâce à une modélisation pluie-débit. Le modèle mensuel GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006), utilisé sur le même bassin versant dans l'exercice 17, sera utilisé pour ce nouvel exercice.

Tab.17.1. Changements moyens d'évapotranspiration moyenne mensuelle et de cumuls mensuels de précipitation, calculés en comparant la période de climat présent (1967-1973) à la période de climat futur (2027-2033). Bassin du Réal Collobrier à Pierrefeu-du-Var.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ΔETP_M [mm]	+1.0	+1.7	+2.9	+3.9	+5.0	+7.5	+8.1	+7.9	+7.4	+4.5	+1.8	+1.1
ΔP_M [mm]	+2.5	-0.5	-0.6	-4.2	-4.6	-3.4	-2.0	-1.3	-18.8	-2.0	-1.6	+3.5

Consignes

Cette section vise à expliciter certains termes utilisés et certaines tâches attendues.

Calcul du régime des débits

Le régime des débits correspond, dans ce contexte, à la série de 12 débits moyens inter-mensuels, estimés sur l'ensemble des années disponibles. Le débit moyen mensuel du mois de janvier est donc calculé en faisant la moyenne des débits de janvier des différentes années disponibles. L'année moyenne ainsi constituée résume le fonctionnement hydrologique du bassin étudié sur une période donnée et permet de distinguer des saisons de basses eaux et de hautes eaux. Dans un contexte de changement climatique, l'analyse de l'évolution du régime permet de quantifier d'éventuels changements saisonniers des débits.

Génération des séries climatiques futures

Ne disposant pas de séries climatiques mensuelles pour la période future, il est nécessaire de faire des hypothèses fortes pour simuler le régime futur du bassin étudié. Une approche pragmatique suggérée dans cet exercice est d'appliquer les changements mensuels de précipitations et d'évapotranspirations potentielles données par les climatologues aux séries temporelles observées sur la période de climat présent. Ainsi, l'augmentation prévue des pluies de janvier de 2.5 [mm] est considérée comme systématique pour tous les mois de janvier futurs. Une série de pluies futures peut donc être constituée en ajoutant 2.5 [mm] à l'ensemble des pluies des mois de janvier de la période de climat présent, formant ainsi une série de pluies pour la période de climat futur.

Simulation pluie-débit avec GR2M

Les paramètres obtenus dans l'exercice précédent après calage automatique de GR2M sur le bassin versant du Réal Collobrier à Pierrefeu-du-Var seront utilisés dans ce nouvel exercice pour réaliser les simulations pluie-débit des périodes de climat présent et de climat futur.

Données :

Les données climatologiques utilisées pour réaliser une simulation pluie-débit sur la période de climat présent sont les mêmes que celles utilisées dans l'exercice précédent pour caler le modèle GR2M (voir figure 17.2), et sont stockées dans le fichier « *DATA_EXO_XXI.csv* ».

Les paramètres de GR2M à utiliser pour réaliser les simulations pluie-débit (en période de « climat présent » et de « climat futur ») sont ceux obtenus après calage automatique et sont égaux à :

- X1 = 436.9 [mm].
- X2 = 0.757 [-].

Enfin, les changements mensuels moyens estimés par les climatologues présentés dans le Tableau 18.1 sont stockées dans le fichier « DATA_EXO_XX2.csv ».

Corrigé :

Simulation pluie-débit sur la période CP

Les lignes de codes présentées ci-après permettent de lire les données nécessaires à la simulation pluie-débit sur la période de climat présent (CP), en utilisant les données climatiques mensuelles disponibles sur la période CP et le jeu de paramètre de GR2M obtenu après calage automatique (Exercice 17) :

Lecture des données : P et ETP mensuelles observées

```
data_BV <- read.table(paste(DIR_OUT, "knitr\\DATA\\DATA_EXO_XX1.csv",
sep=""),
sep=";", header=TRUE)
```

Conversion des dates

```
data_BV$Mois <- as.Date(data_BV$Mois, tz="UTC", format="%Y-%m-%d")
data_BV$DatesR <- as.POSIXlt(data_BV$Mois, tz="UTC", format="%Y-%m-%d")
```

Gestion des lacunes de débits

```
ind <- data_BV$Q < 0
data_BV$Q[ind] <- NA
```

Dates de début et de fin de la période d'initialisation pré-simulation

```
date_deb_INI <- as.Date("1966-08-01", tz="UTC", format="%Y-%m-%d")
date_fin_INI <- as.Date("1967-07-01", tz="UTC", format="%Y-%m-%d")
```

Dates de début et de fin de la période de simulation

```
date_deb_SIM <- as.Date("1967-08-01", tz="UTC", format="%Y-%m-%d")
date_fin_SIM <- as.Date("1973-07-01", tz="UTC", format="%Y-%m-%d")
```

Indices des périodes

```
ind_WarmUp_SIM <- which(data_BV$Mois >= date_deb_INI &
data_BV$Mois <= date_fin_INI)
ind_Run_SIM <- which(data_BV$Mois >= date_deb_SIM &
data_BV$Mois <= date_fin_SIM)
```

Chargement du package airGR

```
library(airGR)
```

Préparation des données d'entrées de GR2M

```
InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR2M,  
                                  DatesR = data_BV$DatesR,  
Precip       = data_BV$P,  
PotEvap     = data_BV$ETP,  
verbose     = TRUE)
```

Options de simulation ("run" du modèle)

```
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR2M,  
InputsModel = InputsModel,  
IndPeriod_WarmUp = ind_WarmUp_SIM,  
IndPeriod_Run = ind_Run_SIM,  
IniResLevels = c(0.8,0.2),  
verbose = TRUE)
```

Paramètres obtenus après calage automatique (cf. exercice précédent)

```
Param_SIM <- c(436.9, 0.757)
```

Simulation pluie-débit sur la période de simulation "climat présent"

```
OutputsModel_CP <- RunModel(InputsModel = InputsModel,  
RunOptions = RunOptions,  
Param = Param_SIM,  
FUN_MOD = RunModel_GR2M)
```

Stockage des chroniques de débits observés et simulés

```
tab_Q <- data.frame(Mois = data_BV$Mois,  
Qobs_CP = data_BV$Q,  
Qsim_CP = NA)  
Ind <- match(as.Date(OutputsModel_CP$DatesR, tz="UTC", format="%Y-%m-%d"),  
tab_Q$Mois)  
tab_Q$Qsim_CP[Ind] <- OutputsModel_CP$Qsim
```

Calculs du régime observé et simulé sur la période CP

Les lignes de codes présentées ci-après permettent de calculer les régimes observés et simulés des débits mensuels :

Calcul des régimes mensuels simulés et observés

```
Ind <- which(tab_Q$Mois >= date_deb_SIM & tab_Q$Mois <=  
date_fin_SIM)  
tab_reg <- aggregate(x = tab_Q[Ind,-1],  
by = list(Mois=format(tab_Q$Mois[Ind], "%m")),  
FUN = mean)
```

Affichage des régimes calculés

tab_reg

##	Mois	Qobs_CP	Qsim_CP
##	01	71.4778333	72.062892
##	02	81.1991667	88.172536
##	03	52.1855000	56.249259
##	04	33.2106667	34.349499
##	05	14.1013333	22.580249
##	06	5.5735000	9.627171
##	07	0.7300000	2.940819
##	08	0.1588333	1.589531
##	09	6.2110000	5.952187
##	10	7.1505000	8.974837
##	11	10.7013333	15.860608
##	12	43.6186667	47.257267

Les régimes ainsi calculés peuvent être représentés graphiquement (Fig. 18.1). La comparaison des deux régimes permet d'évaluer la capacité du modèle pluie-débit (ici GR2M) à reproduire le régime du bassin étudié. Le régime du Réal Collobrier est bien représenté par GR2M sur la période CP, avec néanmoins une légère surestimation systématique des débits mensuels.

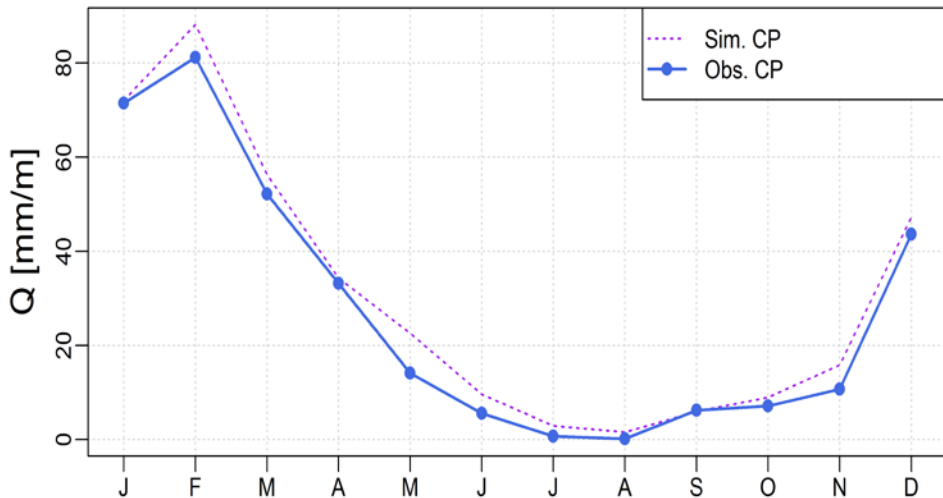


Fig.18.1. Régimes mensuels des débits observés (bleu) et simulé (violet) sur la période de climat présent (CP).

Génération des séries climatiques de la période CF

Les lignes de codes présentées ci-après permettent de générer des séries climatiques (ETP et P) sur la période de « climat futur » (CF) en utilisant les séries observées sur la période de « climat présent » (CP) et en les transformant à partir des changements climatiques estimés par les climatologues :

Lecture des données : delta mensuels de P et T

```
data_CC <- read.table(paste(DIR_OUT,
"knitr\\DATA\\\\DATA_EXO_XX2.csv",
sep=""), sep=";", header=TRUE)
```

Stockage des données du "climat présent" (CP) --> data_BV_CP

```
Ind <- which(data_BV$Mois >= date_deb_INI &
data_BV$Mois <= date_fin_SIM)
data_BV_CP <- data.frame(Date = data_BV$Mois[ind],
P = data_BV$P[ind],
ETP = data_BV$ETP[ind])
data_BV_CP$Mois <- as.integer(format(data_BV_CP$Date, "%m"))
n_mois <- length(data_BV_CP$Mois)
```

Constitution de séries du "climat futur" (CF) --> data_BV_CF

```
data_BV_CF <- data.frame(Date = data_BV_CP$Date)
data_BV_CF$Date <- as.POSIXlt(data_BV_CF$Date, tz="UTC",
format="%Y-%m-%d")
data_BV_CF$Date$year <- data_BV_CF$Date$year+60
data_BV_CF$P <- data_BV_CP$P + data_CC$delta_PM[data_BV_CP$Mois]
data_BV_CF$ETP <- data_BV_CP$ETP +
data_CC$delta_ETP[data_BV_CP$Mois]
```

Mise à 0 des pluies mensuelles négatives

```
Ind <- which(data_BV_CF$P < 0)
data_BV_CF$P[ind] <- 0
```

Affichage du résumé du tableau généré

```
summary(data_BV_CF)
```

##	Date	P	ETP
##Min.	: 2026-08-01 00:00:00	Min. : 0.00	Min. : 14.90
##1st Qu.:	: 2028-04-23 12:00:00	1st Qu.: 16.62	1st Qu.: 27.18
##Median :	: 2030-01-16 12:00:00	Median : 67.15	Median : 61.50
##Mean :	: 2030-01-15 09:25:42	Mean : 83.89	Mean : 71.73
##3rd Qu.:	: 2031-10-08 18:00:00	3rd Qu.:131.30	3rd Qu.:110.83
##Max.	: 2033-07-01 00:00:00	Max. :418.30	Max. :159.40

Les séries de précipitations (P) et d'évapotranspiration potentielle (ETP) ainsi générées sont caractérisées par des moyennes de 83.89 [mm/m] et de 71.73 [mm/m], respectivement. La comparaison de ces valeurs avec les valeurs moyennes calculées sur la période de climat présent (CP), respectivement de 86.35 [mm/m] et 67.33 [mm/m], révèle une légère diminution des pluies moyennes et une augmentation des évapotranspirations potentielles.

Simulation pluie-débit sur la période CF

Les lignes de codes présentées ci-après permettent de réaliser une simulation pluie-débit de la période de « climat futur » à partir des séries climatiques générées dans la section précédente :

Préparation des données d'entrées de GR2M

```
InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD           = RunModel_GR2M,
DatesR       = data_BV_CF$Date,
Precip       = data_BV_CF$P,
PotEvap      = data_BV_CF$ETP,
verbose      = TRUE)
```

Simulation pluie-débit sur la période de simulation "climat futur"

```
OutputsModel_CF <- RunModel(InputsModel           = InputsModel,
RunOptions      = RunOptions,
Param           = Param_SIM,
FUN_MOD         = RunModel_GR2M)
```

Stockage des chroniques de débits observés et simulés

```
tab_Q$Qsim_CF <- NA
ind           <- match(as.Date(OutputsModel_CP$DatesR, tz="UTC",
format="%Y-%m-%d"),
tab_Q$Mois)
tab_Q$Qsim_CF[ind] <- OutputsModel_CF$Qsim
```

Calculs du régime simulé sur la période CF

Les lignes de codes présentées ci-après permettent de calculer le régime des débits simulés sur la période de climat futur CF :

Calcul des régimes mensuels simulés et observés

```
Ind <- which(tab_Q$Mois >= date_deb_SIM & tab_Q$Mois <=
date_fin_SIM)
tab_reg <- aggregate(x           = tab_Q[ind,-1],
by = list(Mois=format(tab_Q$Mois[ind], "%m")),
FUN = mean)
```

Ce régime « futur » peut être comparé graphiquement avec les régimes de débits simulés sur la période de climat présent (Fig.18.2). Cette comparaison révèle une diminution des débits, diminution particulièrement marquée pour les mois d'automne (septembre, octobre et novembre).

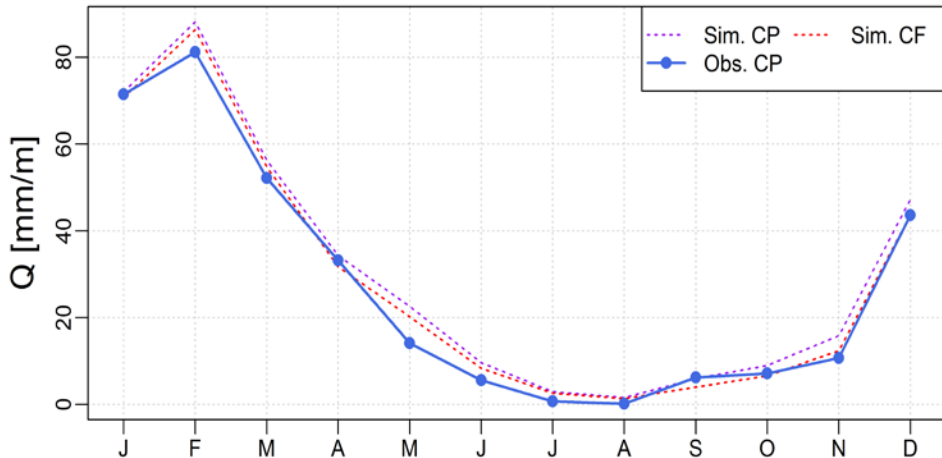


Fig.18.2. Régimes mensuels des débits observés (bleu) et simulés (violet et rouge) sur la période de climat présent (CP) et sur la période de climat futur (CF).

Prise en compte du léger biais de GR2M

La comparaison des régimes observé et simulé sur la période de climat présent (Fig.18.2) a révélé un léger biais systématique à la surestimation des débits du modèle GR2M. En faisant l'hypothèse que ce biais de modélisation hydrologique sera du même ordre de grandeur en climat futur qu'en climat présent, il est possible de s'affranchir de ce biais en reportant l'écart entre les simulations CP et CF au régime observé :

Calcul de l'écart entre les régimes CP et CF

```
delta_Q <- tab_reg$Qsim_CP - tab_reg$Qsim_CF
```

Report de l'écart entre les simulations au régime observé

```
tab_reg$Qobs_CF <- tab_reg$Qobs - delta_Q
```

Mise à 0 des débits négatifs

```
ind <- which(tab_reg$Qobs_CF < 0)
```

```
tab_reg$Qobs_CF[ind] <- 0
```


Ce dernier calcul permet d'estimer le régime futur du Réal Collobrier à Pierrefeu-du-Var autour de l'année 2030 (Fig.18.3). Les débits mensuels de cette rivière vont diminuer en comparaison au régime de 1970, avec une diminution plus marquée en automne.

Il est important de pondérer les résultats obtenus au regard des nombreuses incertitudes liées à la production de simulations d'impacts hydrologiques du changement climatique. Les incertitudes liées à l'utilisation de différents modèles climatiques et de différentes méthodes de descente d'échelle peuvent être très fortes. De plus, l'utilisation des paramètres d'un modèle hydrologique obtenu après calage sur un bassin versant sous un climat A pour simuler la réponse hydrologique à un climat B de ce même bassin versant peut également engendrer des incertitudes fortes.

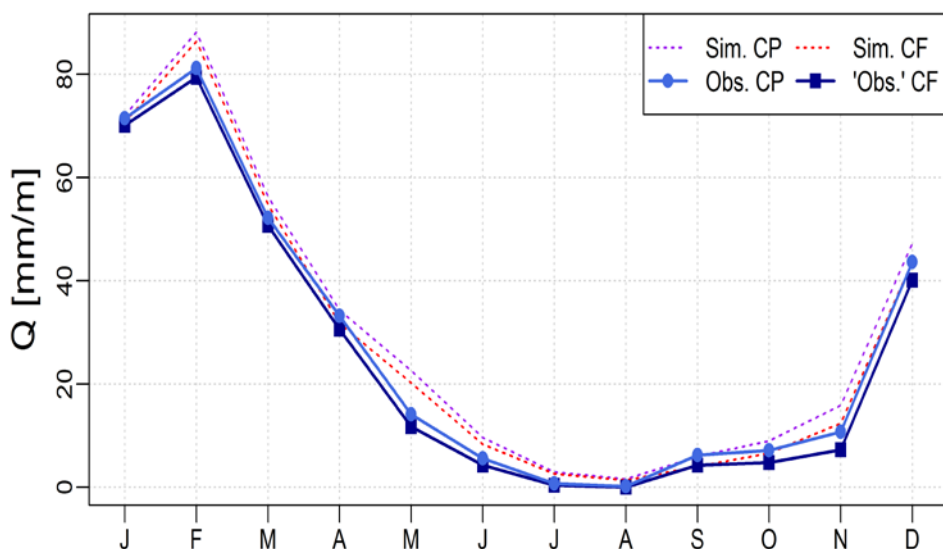


Fig.18.3. Régimes mensuels des débits observés (bleu) et simulés (violet et rouge) sur la période de climat présent (CP) et sur la période de climat futur (CF).

&&&&&