

Exercice 17

RECONSTITUTION DE DEBITS PAR MODELISATION PLUIE-DEBIT

Le bassin versant du Réal Collobrier, situé au sud-est de la France est un bassin versant expérimental géré par l'équipe *Risques Hydrométéorologiques* d'Irstea, basée à Aix-en-Provence (Fig.19.1). Plusieurs stations climatiques (précipitations et températures) et hydrologiques sont disponibles sur ce bassin versant. En particulier, une station de mesure de débit est présente sur le Réal Collobrier à Pierrefeu-du-Var (Pont de Fer), bassin versant de 70.68 km² à cet exutoire. Si des séries climatiques sont disponibles pour ce bassin versant en continu depuis 1966, les débits mesurés à cette station sont disponibles de 1966 à 1973, puis de 1976 à 1980 et présentent donc une période de lacunes de trois années.

Le but de l'exercice est d'utiliser les données climatiques disponibles et un modèle pluie-débit fonctionnant au pas de temps mensuel pour reconstituer les trois années manquantes. Le modèle GR2M (Mouelhi et al., 2006) sera utilisé pour réaliser cette reconstitution, grâce au package R (2014, <http://www.r-project.org/>) de l'équipe *Hydrologie* d'Irstea Antony (Coron *et al.*, 2016, 2017), téléchargeable gratuitement sur le site de l'équipe (<http://webgr.irstea.fr/activites/airgr/>).

Ce travail sera réalisé en 4 étapes :

1. Calage manuel du modèle pluie-débit (sur la période dite de « calage »).
2. Calage automatique du modèle pluie-débit (sur la période dite de « calage »).
3. Validation des jeux de paramètres obtenus (sur la période dite de « validation »).
4. Reconstitution hydrologique par modélisation pluie-débit (sur la période dite de « simulation »).

Il sera nécessaire d'analyser et de commenter les résultats obtenus à chaque étape, et notamment de discuter des différences obtenues en terme de performances du modèle obtenues après calage manuel et calage automatique, de commenter la qualité des simulations obtenues en calage et en validation et enfin de commenter la qualité de la série de débits reconstituées.

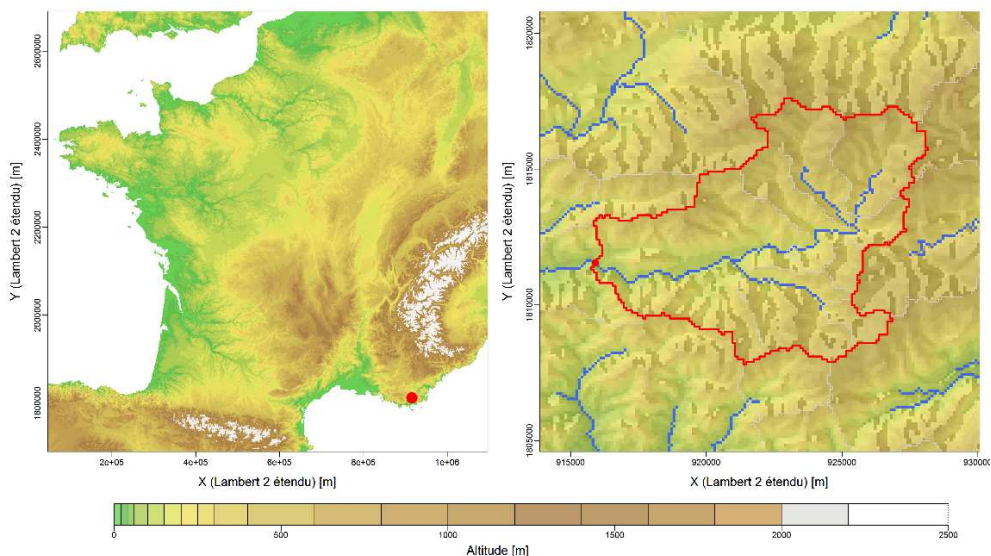


Fig.17.1. Position et contour du bassin versant du Réal Collobrier à Pierrefeu-du-Var (70.68 km²).

Consignes

Cette section vise à définir les conditions de calage et de simulation du modèle GR2M pour cet exercice (période de calage des paramètres, périodes d'initialisation des réservoirs, critère de calage, etc.).

Modèle GR2M

Le modèle GR2M est un modèle pluie-débit dit « conceptuel », i.e. qui cherche à représenter les principaux processus de la relation pluie-débit sans utiliser les lois physiques régissant les processus concernés. Il est constitué de deux réservoirs dont les niveaux augmentent et diminuent au cours du temps. Il est « global », i.e. il représente donc le bassin versant comme une seule entité spatiale homogène ; et fonctionne au pas de temps mensuel. Il nécessite en entrée des séries temporelles continues de pluies et d'évapotranspirations potentielles (ETP) mensuelles.

Les séries temporelles de pluies, ETP et débits peuvent être facilement mises en forme pour GR2M grâce à la fonction *CreateInputsModel* du package airGR. Ensuite, réaliser une simulation pluie-débit avec le modèle pluie-débit GR2M est possible grâce à la fonction *RunModel_GR2M* du package airGR.

Période de calage (et d'initialisation)

La période à considérer pour caler les paramètres de GR2M sur le bassin du Réal Collobrier débute le 01/08/1967 et s'achève le 01/07/1973. C'est donc sur ces six années que de (très) nombreux jeux de paramètres seront testés afin de trouver celui qui permet la simulation la plus proche possible des débits observés selon le critère de Nash (expression 17.1).

GR2M, comme de nombreux modèles pluie-débit conceptuels, est constitué de deux réservoirs, dont le niveau initial en début de simulation est inconnu. Cette inconnue peut induire des erreurs fortes de simulation. Pour limiter ces erreurs, une période d'initialisation (également appelée période de chauffe, de mise en route, ou de warm-up en anglais) est généralement considérée. Cette période située en amont de la période de calage, est utilisée pour réaliser une simulation pluie-débit permettant de stabiliser progressivement le niveau des réservoirs. Aucun critère n'est calculé durant cette simulation. Dans cet exercice, une période d'un an sera considérée, et débutera le 01/08/1966 et s'achèvera le 01/07/1967. Le prochain pas de temps (mois d'août 1968) constituera le premier pas de temps du calage du modèle.

De plus, des valeurs du niveau initial des réservoirs peuvent être fixées a priori. Dans cet exercice, des niveaux initiaux de 80% et de 20% seront fixés pour les deux réservoirs de GR2M. Ces niveaux initiaux peuvent être renseignés avec l'argument *IniResLevels* de la fonction *CreateRunOptions* du package airGR.

Les périodes de calage et les périodes d'initialisation sont à renseigner avant de réaliser une simulation pluie-débit grâce à la fonction *CreateRunOptions* du package airGR.

Critère de calage

Le critère de calage a considéré dans cet exercice est le critère de Nash et Sutcliffe (1970), noté NSE par la suite (expression 17.1). Ce critère est l'un des plus utilisés en modélisation hydrologique depuis plusieurs dizaines d'années.

Le critère NSE, borné entre $-\infty$ et 1, permet de quantifier la performance d'un modèle en comparant une série de débits simulés avec un modèle dit « naïf », ici la moyenne des débits observés (i.e. une série de débits constituée en chaque pas de temps par la moyenne des débits observés). Ainsi, une valeur de NSE égale à 1 signifie une concordance parfaite entre les séries de débits observés et simulés, alors qu'une valeur de NSE inférieure à 1 signifie que la simulation considérée est moins

performante que la simulation de référence. Le calcul du critère NSE est détaillé dans l'équation 17.1, dans laquelle $Q_{obs,t}$ est le débit observé au pas de temps t , $Q_{sim,t}$ est le débit simulé au pas de temps t , $\overline{Q_{obs}}$ est la moyenne des débits observés et n est le nombre d'observations :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - Q_{sim,t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (17.1)$$

Les différents éléments nécessaires pour le calcul du critère de calage (calculé grâce à la fonction *ErrorCrit_NSE*) sont à spécifier grâce à la fonction *CreateInputsCrit* du package airGR.

Estimation manuelle des deux paramètres de GR2M

Cette tâche - pouvant être fastidieuse (mais très formatrice) et nécessitant une expertise certaine - est à réaliser en testant plusieurs jeux de paramètres de GR2M et en analysant la qualité des simulations produites sur la période de calage. Dans cet exercice, un maximum de 6 jeux de paramètres du modèle sera à tester. Le premier jeu de paramètres à tester est constitué des valeurs « par défaut » de GR2M, définies par Mouelhi *et al.* (2006) après de nombreux calages du modèle sur différents bassins versants. Ces valeurs ainsi que les bornes de variations associées sont égales à :

- $X1 : 380 \text{ [mm]} (140 \text{ [mm]} \leq X1 \leq 2640 \text{ [mm]}) ;$
- $X2 : 0.92 \text{ [-]} (0.21 \text{ [-]} \leq X2 \leq 1.31 \text{ [-]}) .$

Estimation automatique des deux paramètres de GR2M

L'estimation automatique de paramètres vise à utiliser un algorithme automatique qui va générer automatiquement des jeux de paramètres, les tester, et en générer d'autres en fonction des performances de ceux d'ores et déjà testés. Si plusieurs algorithmes sont renseignés dans le package airGR, celui développé par Michel (1991) (et noté *Calibration_Michel*) sera utilisé dans cet exercice.

Période de validation

La période de validation est une période pour laquelle des débits observés sont disponibles mais qui n'est pas utilisée pour le calage des paramètres. Elle est utilisée pour tester les performances du modèle « en validation » (ou en contrôle), i.e. sur une période indépendante de la période de calage. Généralement, les performances du modèle sont évaluées sur cette période avec le critère utilisé pour le calage.

Dans cet exercice, la période de validation débutera le 01/08/1976 et s'achèvera le 01/07/1981, et sera précédée par une (longue) période d'initialisation débutant le 01/08/1966 et s'achevant le 01/07/1976.

Période de simulation

La simulation finale vise, pour cet exercice, à reconstituer les débits du Réal Collobrier pour les 3 années sans mesures. Afin d'avoir une seule simulation couvrant l'ensemble des périodes étudiées, cette dernière simulation débutera le 01/08/1967 et s'achèvera le 01/07/1981, avec une période d'initialisation d'une année débutant le 01/08/1966 et s'achevant le 01/07/1967.

Données :

L'ensemble des données disponibles pour le calage (et la validation) du modèle pluie-débit est illustré sur la figure 17.2 et est constitué :

- d'une série de cumuls de pluies (P) mensuelles, exprimée en mm.
- d'une série d'évapotranspirations potentielles (ETP) mensuelles calculées grâce à la formule d'Oudin *et al.* (2005), exprimée en mm.
- d'une série de débits (Q) mensuels, exprimée en mm.

Le fichier « *DATA_EXO_01.csv* » contient l'ensemble des données nécessaires à cet exercice téléchar.

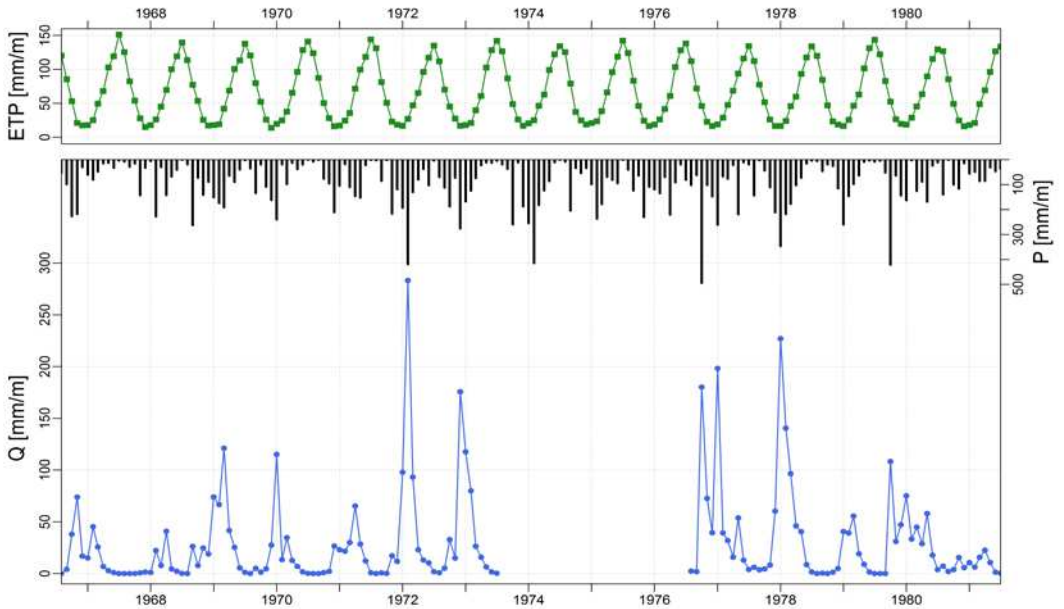


Fig.17.2. Données d'évapotranspiration potentielle (ETP), de pluie (P) et de débits (Q) disponibles (au pas de temps mensuel) sur le bassin versant du Réal Collobrier à Pierrefeu-du-Var. L'ETP a été calculée avec la formule d'Oudin *et al.* (2005).

Corrigé

Lecture et mise en forme des données

Les lignes de codes présentées ci-après permettent de lire les données nécessaires au calage du modèle pluie-débit GR2M et de définir les périodes temporelles de travail (période d'initialisation et période de calage) :

Lecture des données

```
data_BV <- read.table("../DATA\\DATA_EXO_XXI.csv", sep=";", header=TRUE)
```

Affichage des 5 premières lignes

```
head(data_BV)
```

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-calage

```
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 calage

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

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

Indices des périodes

```
ind_WarmUp_CAL <- which(data_BV$Mois >= date_deb_INI &
```

```
data_BV$Mois <= date_fin_INI)
```

```
ind_Run_CAL <- which(data_BV$Mois >= date_deb_CAL &
```

```
data_BV$Mois <= date_fin_CAL)
```

Préparation des données pour GR2M

Les lignes de codes présentées ci-après visent à préparer les données disponibles pour leur utilisation par GR2M, grâce à la fonction *CreateInputsModel* du package *airGR*.

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)
```

Calage manuel

Le calage manuel d'un modèle pluie-débit vise à faire varier manuellement la valeur des paramètres du modèle considéré jusqu'à obtenir une simulation que l'on juge optimale. Dans cet exercice, au moins 5 simulations doivent être réalisées à partir de 5 jeux de paramètres différents. Chacun de ces jeux sera évalué grâce au calcul du score NSE sur la période de calage. Cette mesure de performance permettra de guider l'évolution de la valeur des paramètres.

Les lignes présentées ci-après illustrent les étapes nécessaires pour réaliser une simulation pluie-débit à partir d'un jeu de paramètres donné (ici le jeu constitué des valeurs par défaut de GR2M) et pour calculer le critère NSE associé à cette simulation. Pour cela, les fonctions *CreateRunOptions*, *CreateInputsCrit*, *CreateInputsCrit* et *ErrorCrit_NSE* seront utilisées.

La fonction *CreateRunOptions* permet de définir les options de la simulation pluie-débit à réaliser, à savoir :

- Le modèle à utiliser (ici GR2M, avec la fonction nommée *RunModel_GR2M*),
- Les entrées à considérées (d'ores et déjà définies avec la fonction *CreateInputsModel* et stockées dans l'objet *InputsModel* ;
- Les indices des pas de temps à considérer pour l'initialisation des réservoirs du modèle (déjà définis et stockés dans l'objet *ind_WarmUp_CAL*) ;
- Les indices des pas de temps à considérer pour le calage du modèle (déjà définis et stockés dans l'objet *ind_Run_CAL* ;
Les niveaux initiaux des deux réservoirs de GR2M (ici remplis à 80% et à 20%, respectivement).

La fonction *CreateInputsCrit* permet de rassembler les données et informations nécessaires pour le calcul du critère de calage, avec notamment :

- Le nom du critère à considérer (ici GR2M, avec la fonction nommée *ErrorCrit_NSE*),
- Les débits observés qui serviront de référence lors de la comparaison avec les débits simulés (à renseigner avec l'argument *Qobs*).

Options de simulation ("run" du modèle)

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

Données pour le calcul du critère

```
InputsCrit      <- CreateInputsCrit(FUN_CRIT        = ErrorCrit_NSE,
InputsModel     = InputsModel,
RunOptions      = RunOptions,
Qobs            = data_BV$Q[ind_Run_CAL])
```

Jeu de paramètres à tester

```
J01             <- c(380, 0.92)
```

Run du modèle

```
OutputsModel_MAN <- RunModel(InputsModel           = InputsModel,
RunOptions        = RunOptions,
Param            = J01,
FUN_MOD          = RunModel_GR2M)
```



```
# Calcul du NSE associé au jeu "J01"
```

```
OutputsCrit      <- ErrorCrit_NSE(InputsCrit      = InputsCrit,  
OutputsModel     = OutputsModel_MAN)
```

```
# Affichage dans la console du score NSE obtenu
```

```
NSE_J01          <- round(OutputsCrit$CritValue, 4)  
cat(paste("Crit NSE = ", NSE_J01, "\n", sep=""))
```

Le premier jeu de paramètres testé (valeurs de GR2M par défaut) permet d'obtenir un **critère NSE de 0.7798**, ce qui est une bonne performance générale. La figure 18.3 permet quant à elle de comparer la simulation obtenue avec les débits observés et met en valeur un biais fort à la surestimation des débits par le modèle.

A vous de jouer désormais ! Le jeu consiste à tester différentes valeurs des paramètres de GR2M, de réaliser une simulation et de calculer un score de NSE pour chaque jeu testé afin d'identifier le jeu semblant être optimal... L'analyse des hydrogrammes simulés couplée avec la comparaison de valeurs de NSE permettra de "guider" la modification des valeurs des paramètres.

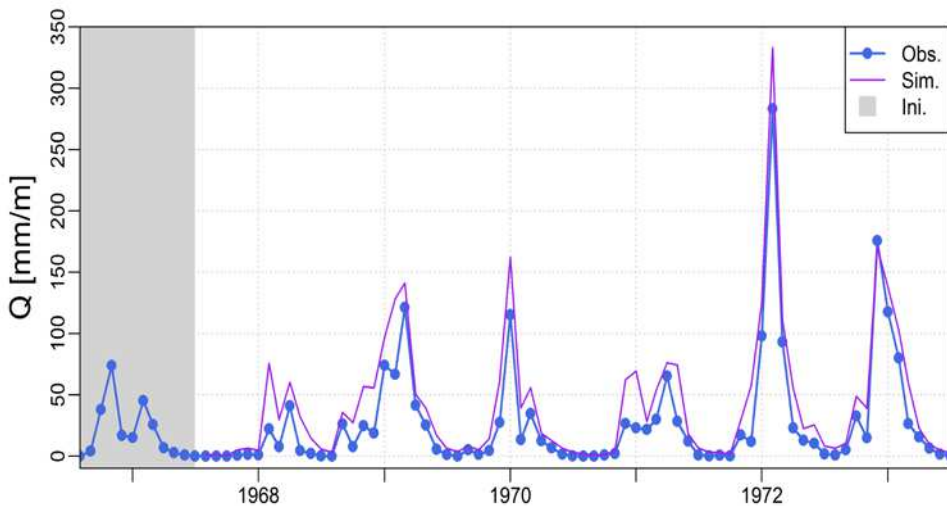


Fig.17.3. Hydrogrammes observé (en bleu) et simulé (en violet) sur la période de calage, avec les paramètres de GR2M obtenus par calage manuel.

Calage automatique

Les lignes de codes présentées ci-après permettent de caler automatiquement le modèle GR2M, en utilisant notamment les sorties des fonctions *CreateRunOptions* et *CreateInputsCrit* - d'ores et déjà utilisées dans la section 1.6 - et les fonctions *CreateCalibOptions* et *Calibration*.

La fonction *CreateCalibOptions* permet de définir les options du calage du modèle, avec notamment :

- L'algorithme de calage à utiliser (ici celui développé par Michel (1991) et noté *Calibration_Michel*),
- Les bornes de variations des paramètres, à définir avec l'argument noté *SearchRanges*.

Enfin, la fonction *Calibration* réalise le calage du modèle et affiche le résultat dans la console si l'argument *verbose* est « vrai ».

Données pour le calcul du critère

```
InputsCrit <- CreateInputsCrit(FUN_CRIT           = ErrorCrit_NSE,
InputsModel  = InputsModel,
RunOptions   = RunOptions,
Qobs         = data_BV$Q[ind_Run_CAL])
```

Options du calage

```
bornes_param <- matrix(c( 140, +0.21, 2640, +1.31), ncol=2, byrow=TRUE)
CalibOptions <- CreateCalibOptions(FUN_MOD           = RunModel_GR2M,
FUN_CALIB    = Calibration_Michel,
SearchRanges = bornes_param)
```

Calage !

```
OutputsCalib <- Calibration(InputsModel           = InputsModel,
RunOptions    = RunOptions,
InputsCrit    = InputsCrit,
CalibOptions  = CalibOptions,
FUN_MOD       = RunModel_GR2M,
FUN_CRIT      = ErrorCrit_NSE,
FUN_CALIB     = Calibration_Michel,
verbose       = TRUE)
```

Stockage de la valeur des paramètres et du critère de calage

```
Param_CAL <- OutputsCalib$ParamFinalR
NSE_CAL   <- OutputsCalib$CritFinal
```

Les deux paramètres et la valeur du critère de calage (NSE) obtenus après la procédure de calage automatique sont :

- $X1 = 436.900$ [mm].
- $X2 = 0.757$ [-].
- $NSE[Q] = 0.9346$ [-].

Les performances obtenues en calage sont très bonnes, puisque le critère NSE est supérieur à 0.9.

Comparaison des hydrogrammes observés et simulés

Les lignes de codes présentées ci-après permettent de stocker dans un même tableau (nommé ici *tab_Q*) les débits observés et les débits simulés avec le jeu de paramètres obtenu par calage automatique, afin de les comparer.

Simulation pluie-débit sur la période de calage

```
OutputsModel_CAL <- RunModel(InputsModel = InputsModel,  
RunOptions = RunOptions,  
Param = Param_CAL,  
FUN_MOD = RunModel_GR2M)
```

Stockage des chroniques de débits observés et simulés

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

La figure 17.4 représente les séries de débits observés et simulés sur la période de calage (1967-1973). La simulation obtenue après calage est de très bonne qualité, avec notamment une bonne représentation du cycle saisonnier des débits (débits faibles en été et forts en hiver).

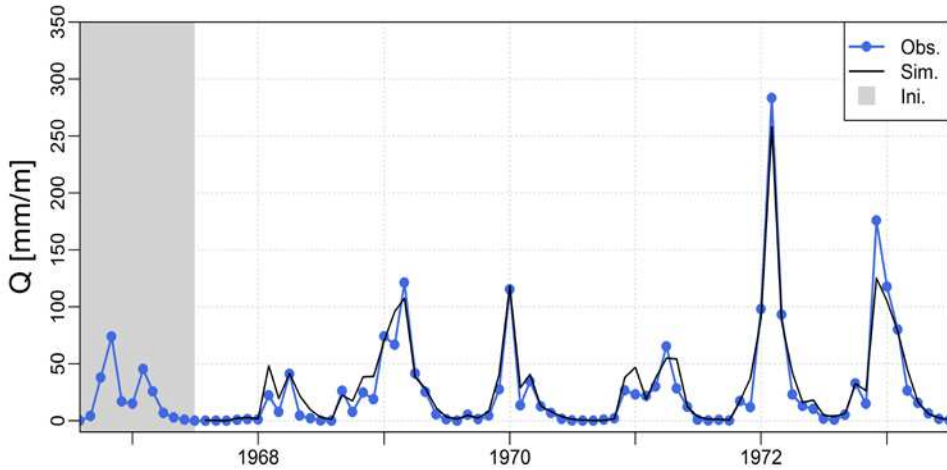


Fig.17.4. Hydrogrammes observé (en bleu) et simulé (en noir) sur la période de calage, avec les paramètres de GR2M obtenus par calage automatique.

Validation

Les lignes de codes présentées ci-après permettent d'utiliser les paramètres obtenus par calage automatique pour réaliser une simulation sur la période de validation (1976-1981) et de calculer le score NSE associé à cette nouvelle simulation. Ce score constitue la performance « en validation » du modèle et du jeu de paramètre considéré.

Re-définition de la période d'initialisation

```
date_deb_INI      <- as.Date("1966-08-01", tz="UTC", format="%Y-%m-%d")
date_fin_INI     <- as.Date("1976-07-01", tz="UTC", format="%Y-%m-%d")
ind_WarmUp_VAL   <- which(data_BV$Mois >= date_deb_INI &
data_BV$Mois <= date_fin_INI)
```

Définition de la période de simulation (ici "validation")

```
date_deb_VAL     <- as.Date("1976-08-01", tz="UTC", format="%Y-%m-%d")
date_fin_VAL     <- as.Date("1981-07-01", tz="UTC", format="%Y-%m-%d")
ind_Run_VAL      <- which(data_BV$Mois >= date_deb_VAL &
data_BV$Mois <= date_fin_VAL)
```

Options de "run" (spécification des périodes)

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

Run du modèle sur la période de validation

```
OutputsModel_VAL <- RunModel(InputsModel =  
InputsModel,  
RunOptions = RunOptions,  
Param = Param_CAL,  
FUN_MOD = RunModel_GR2M)
```

Calcul du score NSE

```
InputsCrit <- CreateInputsCrit(FUN_CRIT = ErrorCrit_NSE,  
InputsModel = InputsModel,  
RunOptions = RunOptions,  
Qobs = data_BV$Q[ind_Run_VAL])  
OutputsCrit <- ErrorCrit_NSE(InputsCrit = InputsCrit,  
OutputsModel = OutputsModel_VAL)
```

Affichage dans la console du score NSE obtenu

```
NSE_VAL <- round(OutputsCrit$CritValue, 4)  
cat(paste("Crit NSE = ", NSE_VAL, "\n", sep=""))
```

La performance obtenue par le modèle en validation est de 0.9336 [-], ce qui est une très bonne performance.

La Figure 17.5 représente les séries de débits observés et simulés sur la période de validation (1976-1981). A nouveau, le modèle représente bien les variations inter-annuelles des débits du Réal Collobrier. L'hiver 1979 semble néanmoins être moins bien simulé que les autres hivers (surestimation des débits par le modèle).

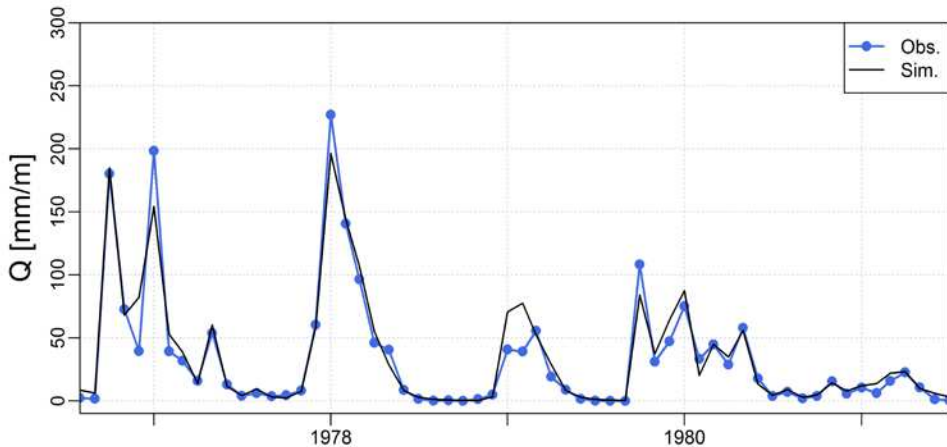


Fig.17.5. Simulation obtenue avec les paramètres obtenus par calage automatique sur la période de validation.

Reconstitution

Les lignes de codes présentées ci-après permettent d'utiliser les paramètres obtenus par calage automatique pour simuler le débit du Réal Collobrier sur l'ensemble de la période étudiée.

Re-définition de la période d'initialisation

```
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")
ind_WarmUp_SIM   <- which(data_BV$Mois >= date_deb_INI &
data_BV$Mois <= date_fin_INI)
```

Définition de la période de simulation (ici "validation")

```
date_deb_SIM     <- as.Date("1967-08-01", tz="UTC", format="%Y-%m-%d")
date_fin_SIM     <- as.Date("1981-07-01", tz="UTC", format="%Y-%m-%d")
ind_Run_SIM      <- which(data_BV$Mois >= date_deb_SIM &
data_BV$Mois <= date_fin_SIM)
```

RunOptions (périodes d'initialisation et de calage)

```
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)
```

Run du modèle

```
OutputsModel_SIM <- RunModel(InputsModel              =
InputsModel,
RunOptions       = RunOptions,
Param            = Param_CAL,
FUN_MOD         = RunModel_GR2M)
```

Les résultats de la simulation finale sont illustrés sur la Figure 17.6. Il est intéressant de noter que l'hiver 1974 est simulé comme étant très humide (le plus humide après celui de 1972), alors que les deux hivers suivants semblent avoir été plus secs.

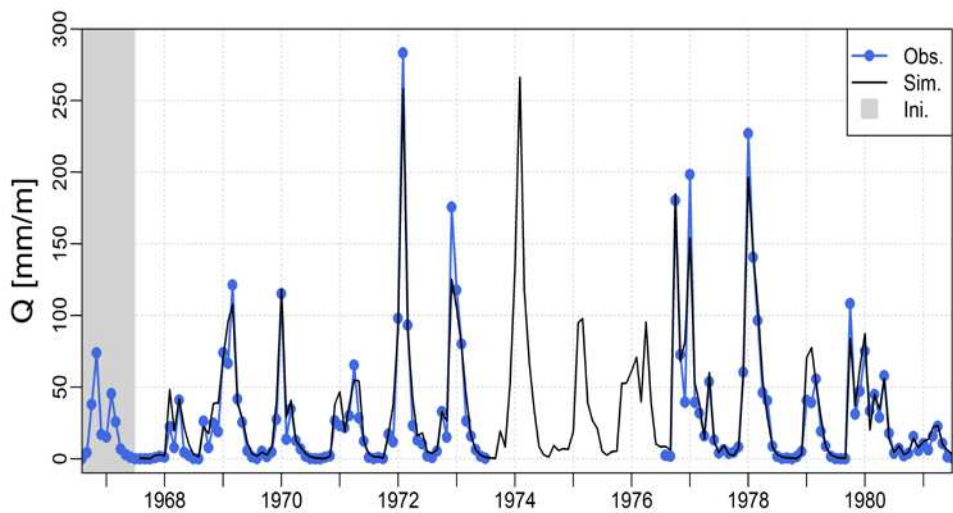


Fig.17.6. Hydrogrammes observé (en bleu) et simulé (en noir) sur la période 1966-1981, avec les paramètres de GR2M obtenus par calage automatique.

&&&&