

UNIVERSITE PARIS-SUD
U.F.R DES SCIENCES D'ORSAY

Master 1 physique appliquée, parcours environnement

Test d'un modèle de prévision des crues sur les bassins de l'Yonne et du Loing



Baudouin SAINTYVES

Sous la direction de Pierre JAVELLE

Stage effectué du 1er Avril au 31 juillet 2008 au sein de
l'Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés
CEMAGREF, Antony

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement Pierre Javelle pour son encadrement et sa patience.

Je remercie la DIREN Île-de-France pour m'avoir fourni ses données.

Je remercie également Charles Perrin, Lionel Berthet et Florent Lobligeois pour l'aide qu'ils ont pu m'apporter.

Je remercie Vazken Andreassian pour m'avoir initié à l'apiculture.

Je remercie toute l'équipe hydrologie pour sa bonne humeur et ses démonstrations sportives.

Et enfin je remercie Patrick Soukiassian, sans qui je n'aurais pas eu vent de ce sujet de stage.

Photo en couverture : crue de la Seine à Paris, 15 Janvier 1910, rue St Dominique, fontaine de Neptune, source : www.paris-pittoresque.com

Sommaire

Table des figures et des tableaux	4
Introduction	5
1. Contexte de la prévision des crues en France	5
2. Objectif de l'étude.....	6
I. Présentation des bassins étudiés	7
1. Géographie - géologie	7
2. Présentation des bassins versant et des données disponibles	8
2.1. Localisation des bassins versants étudiés.....	8
2.2. Type de données utilisés	12
2.2.1. Données hydrométriques.....	12
2.2.2. Données de pluie	12
2.2.3. Données d'évapotranspiration potentielle (ETP)	13
3. Analyse du régime - Caractérisation hydrologique du bassin.....	14
II. Outils et méthodologie	15
1. Différence entre simulation et prévision	15
2. Modèle utilisé – GR3P	16
3. Méthodologie	19
3.1. Critère d'optimisation et de validation	19
3.1.1 Erreur quadratique moyenne (RMSE).....	19
3.1.2 Critère de persistance	19
3.1.3 Graphiques	20
3.2. Définition des périodes de calage/contrôle	21
III. Travail réalisé	22
1. Chaîne de traitement réalisée pour l'étude	22
2. Analyse de stabilité	26
2.1. Paramètres calculés	26
2.2. Persistance (C2MP) calculés en calage/validation.....	28
3. Graphiques de synthèse des performances du modèle	32
Conclusion	41
Perspectives	41
Bibliographie	42
Annexe 1: Glossaire	43
Annexe 2 : Régime hydrologique de la zone étudiée	44
Annexe 3 : présentation des données mises en formes pour l'étude :	46
Annexe 4 : Le modèle de simulation des débits GR4J	65
Annexe 5 : paramètres calculés du modèle sur GR3P (dernière version)	72
Annexe 6 : Critère de persistance calage/validation sur GR3P dernière version	91

Table des figures et des tableaux

Figure 1 : Carte de vigilance inondation (source : http://www.vigicrues.ecologie.gouv.fr/) et localisation du SPC "Seine Moyenne Yonne Loing"	6
Figure 2 : Géologie du Bassin de la Seine (modifié, d'après Moulin, 2003)	8
Figure 3 : carte des stations hydrométriques étudiées et des pluviomètres utilisés, avec leur polygone de Thiessen pour l'Yonne (D'après DHI-SAFEGE, 2007).....	10
Figure 4 : carte des stations hydrométriques étudiées et des pluviomètres utilisés, avec leur polygone de Thiessen pour le Loing (D'après DHI-SAFEGE, 2007).....	11
Figure 5 : principe de fonctionnement d'une station hydrométrique (source: http://www.centre.ecologie.gouv.fr)	12
Figure 6 : photo d'un pluviomètre a balancier (source : http://www.meteodesorres.com)	13
Figure 7 : courbe d'ETP sur 15 années.....	13
Figure 8 : forme de l'ETP sur une semaine pour le bassin de l'Yonne	14
Figure 9 : moyenne interannuelle de cumuls mensuels d'ETP, de débits et de pluie pour l'Yonne à Courlon	14
Figure 10 : structure du modèle de prévision des crues GR3P (D'après Tangara 2007).	16
Figure 11 : Exemple de graphique des prévisions (d'après CEMAGREF 2005).....	21
Figure 12 : graphique des prévisions pour le modèle naïf (d'après CEMAGREF 2005)	21
Figure 13 : Diagramme représentatif de la chaîne de traitement mise en œuvre dans cette étude jusqu'à présent	23
Figure 14 : présentation du fichier de données mis en forme : exemple de l'Armaçon à Aisy-sur-Armaçon	24
Figure 15 : présentation des graphiques des données mises en forme : exemple pour l'Armaçon à Aisy-sur-Armaçon.....	25
Figure 16 : paramètre du modèle en fonction des échéances pour les deux périodes à la station de l'Yonne à Gurgy	27
Figure 17 : paramètre du modèle en fonction des échéances pour les deux périodes à la station de l'Ouanne à Charny.....	28
Figure 18 : critère de persistance en calage et en validation pour les deux périodes à la station de l'Yonne a Gurgy	29
Figure 19 : critère de persistance en calage et en validation pour les deux périodes à la station du Loing a Montbouy.....	30
Figure 20 : données d'entrées pour le Serein à Chablis	31
Figure 21 : tableau de synthèse des critères de persistance en validation pour le sous bassin versant de l'Yonne amont sur les deux périodes	33
Figure 22 : tableau de synthèse des critères de persistance en validation pour le sous bassin versant du Serein sur les deux périodes.....	34
Figure 23 : tableau de synthèse des critères de persistance en validation pour le sous bassin versant de l'Armaçon sur les deux périodes.....	35
Figure 24 : tableau de synthèse des critères de persistance en validation pour le sous bassin versant de l'Yonne aval sur les deux périodes	36
Figure 25 : tableau de synthèse des critères de persistance en validation pour le sous bassin versant du Loing sur les deux périodes.....	37
Figure 26 : crue de Février 1999 sur l'Yonne à Gurgy, en noir, le débit observé et en bleu le débit prévu à 72h. 38	
Figure 27 : crue de Avril 1998 sur le Serein à Beaumont, en noir, le débit observé et en bleu le débit prévu à 72h	39
Figure 28 : crue de Mars 2006 sur le Serein à Chablis, en noir, le débit observé et en bleu le débit prévu à 72h. 40	
Figure 29: Structure of the rainfall-runoff model GR4J (after Perrin and al. 2003).....	65
Tableau 1 : Stations hydrométriques étudiées.....	9

Introduction

1. Contexte de la prévision des crues en France

Suite à la loi relative aux risques naturels et technologiques adoptée le 30 juillet 2003, la prévision des crues est supervisée dans toute la France par le SCHAPI (service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations) qui coordonne 22 services de prévision des crues (SPC) en remplacement des 52 services d'annonce des crues (SAC) préexistant. Le SCHAPI est un service géré par le MEDDAT, ministère de l'écologie, du développement durable et de l'aménagement du territoire (source : <http://www.ecologie.gouv.fr/-Prevision-des-crues-.html>).

L'objectif de cette réforme est de passer de "l'annonce" à la "prévision" des crues. Dans ce cadre, le développement ou l'application de modèles de prévision pour le contexte opérationnel est un sujet d'actualité.

Les bassins que nous étudierons sont gérés par le SPC "Seine moyenne Yonne Loing", dépendant de la DIREN (direction régionale de l'environnement) Île-de-France.

Le SCHAPI a d'autre part mis en place un système de cartographie du niveau de vigilance face au risque inondation actualisé deux fois par jour. Il s'agit du dispositif vigicrue (carte de vigilance "crue") dont on donne un exemple de bulletin, avec en zone grisée, la surface gérée par le SPC "Seine moyenne Yonne Loing" (disponible sur : <http://www.vigicrues.ecologie.gouv.fr/>).

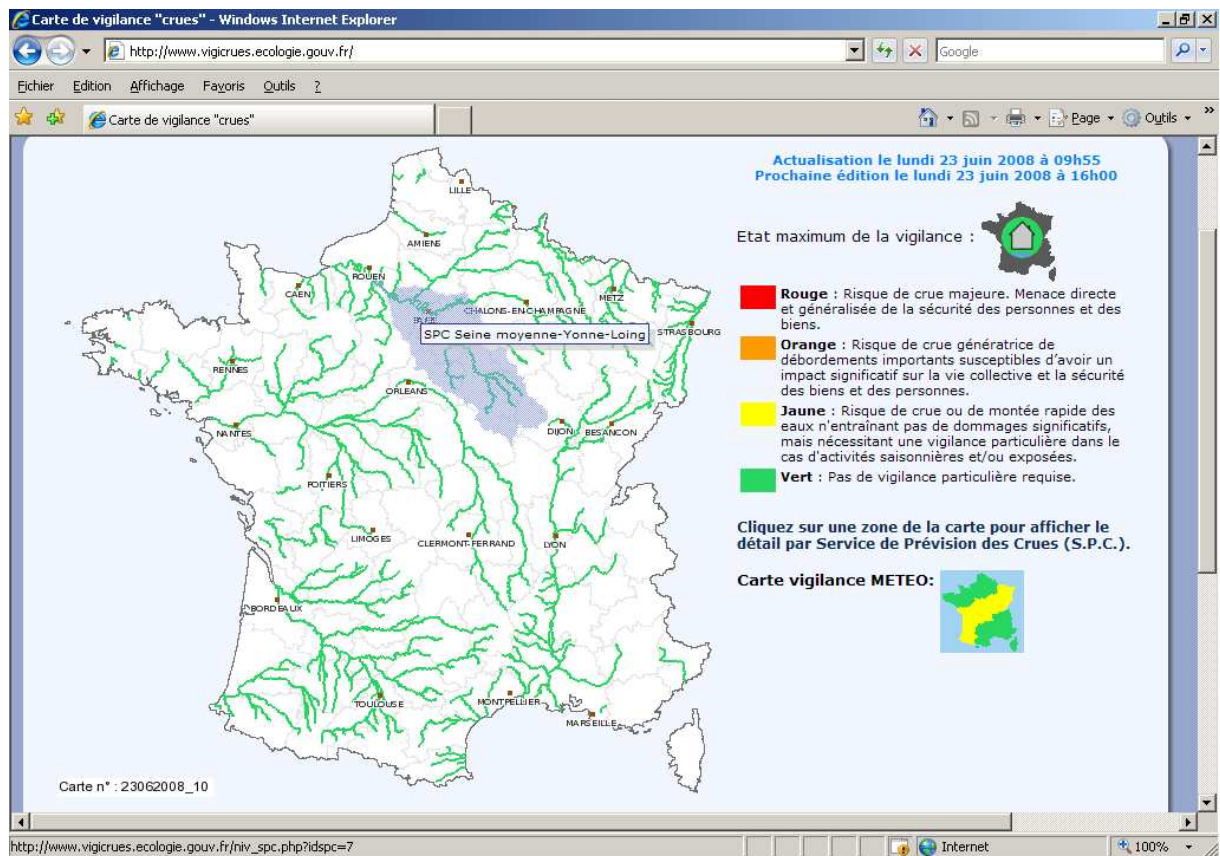


Figure 1 : Carte de vigilance inondation (source : <http://www.vigicrues.ecologie.gouv.fr/>) et localisation du SPC "Seine Moyenne Yonne Loing"

2. Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est d'appliquer le modèle de prévision GR3P, développé par le CEMAGREF à une vingtaine de points du bassin amont, dans le but de le rendre opérationnel et exploitable par le SPC "Seine moyenne Yonne Loing". Ce dernier dispose déjà d'une version de ce modèle mise au point lors d'une précédente étude (Cemagref, 2005), mais sur seulement cinq points de prévision.

I. Présentation des bassins étudiés

1. Géographie - géologie

Le bassin de la Seine en amont de Paris s'étend sur 43800 km². La Seine prend sa source sur le plateau de Langres en Côte d'Or à une altitude de 471 mètres. Elle arrose successivement la Champagne, reçoit l'Aube (rive droite) et l'Yonne (rive gauche) à Montereau, baigne Melun et traverse l'Île-de-France, grossie du Loing, de l'Essonne, de l'Orge (rive gauche) et de l'Yerres (rive droite), de la Marne et de l'Oise (rive droite), de part et d'autre de Paris. Le relief général du bassin est très peu accidenté avec des altitudes relativement faibles. La géologie du Bassin Parisien est organisée en cercles concentriques (Figure 2). Les terrains sont sédimentaires avec successivement, depuis l'extérieur de l'auréole vers l'intérieur :

- une auréole calcaire perméable
- des argiles et marnes imperméables
- une craie perméable des terrains tertiaires (argiles, calcaires et sables)

(D'après Moulin, 2003)

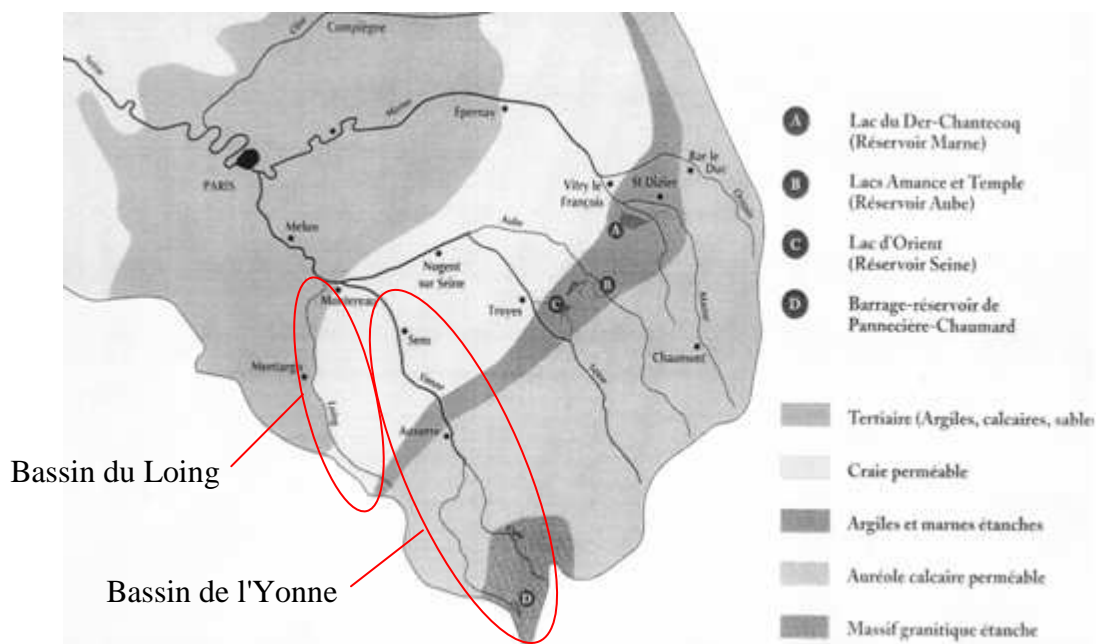


Figure 2 : Géologie du Bassin de la Seine (modifié, d'après Moulin, 2003)

Dans la présente étude, nous nous intéressons plus particulièrement au bassin versant amont de la Seine et plus précisément à deux de ses affluents : l'Yonne et le Loing, qui contribuent pour une part importante aux crues de la Seine.

2. Présentation des bassins versant et des données disponibles

2.1. Localisation des bassins versants étudiés

On a présenté les données en divisant le bassin versant de l'Yonne en 4 "sous-bassins": l'Yonne-aval, l'Yonne-amont, le Serein et l'Armançon. L'étude se fait sur une période allant de 1994 à mi-2007.

Le tableau 1 donne la liste des stations hydrométriques étudiées avec les regroupements par sous-bassins.

Les points de mesures sélectionnés (hydrométriques et pluviométriques) s'appuient sur ceux qui ont été choisis lors d'une précédente étude pour le compte du SPC, et conduite par les bureaux d'étude DHI et SAFEGE (DHI-SAFEGE, 2007).

Les figures 3 et 4 indiquent la localisation des stations hydrométriques et pluviométriques utilisées dans l'étude.

Désignation	Cours d'eau	Commune	Surface (km ²)	Bassin versant
H2051010	Yonne	Dornecy	781	Yonne-Amont
H2062010	Beuvron	Ouagne	264	Yonne-Amont
H2073110	Sauzay	Corvol-l'Orgueilleux	81	Yonne-Amont
H2182010	Cure	Arcy-sur-Cure	1180	Yonne-Amont
H2221010	Yonne	Gurgy	3820	Yonne-Amont
H2332020	Serein	Dissangis	643	Serein
H2342020	Serein	Chablis [Pont de la déviation]	1120	Serein
H2342030	Serein	Beaumont	1340	Serein
H2452020	Armançon	Aisy-sur-Armançon [aval]	1350	Armançon
H2462020	Armançon	Tronchoy	1970	Armançon
H2473010	Armance	Chessy-les-Prés	480	Armançon
H2482010	Armançon	Brienon-sur-Armançon	2990	Armançon
H2501020	Yonne	Joigny [Passerelle]	8880	Yonne-Aval
H2721010	Yonne	Courlon-sur-Yonne	10700	Yonne-Aval
H3021010	Loing	Montbouy	409	Loing
H3122010	Ouanne	Charny	562	Loing
H3122020	Ouanne	Gy-les-Nonains	883	Loing
H3201010	Loing	Châlette-sur-Loing	2300	Loing
H3621010	Loing	Épisy	3900	Loing

Tableau 1 : Stations hydrométriques étudiées

Polygone de Thiessen sur le bassin de l'Yonne

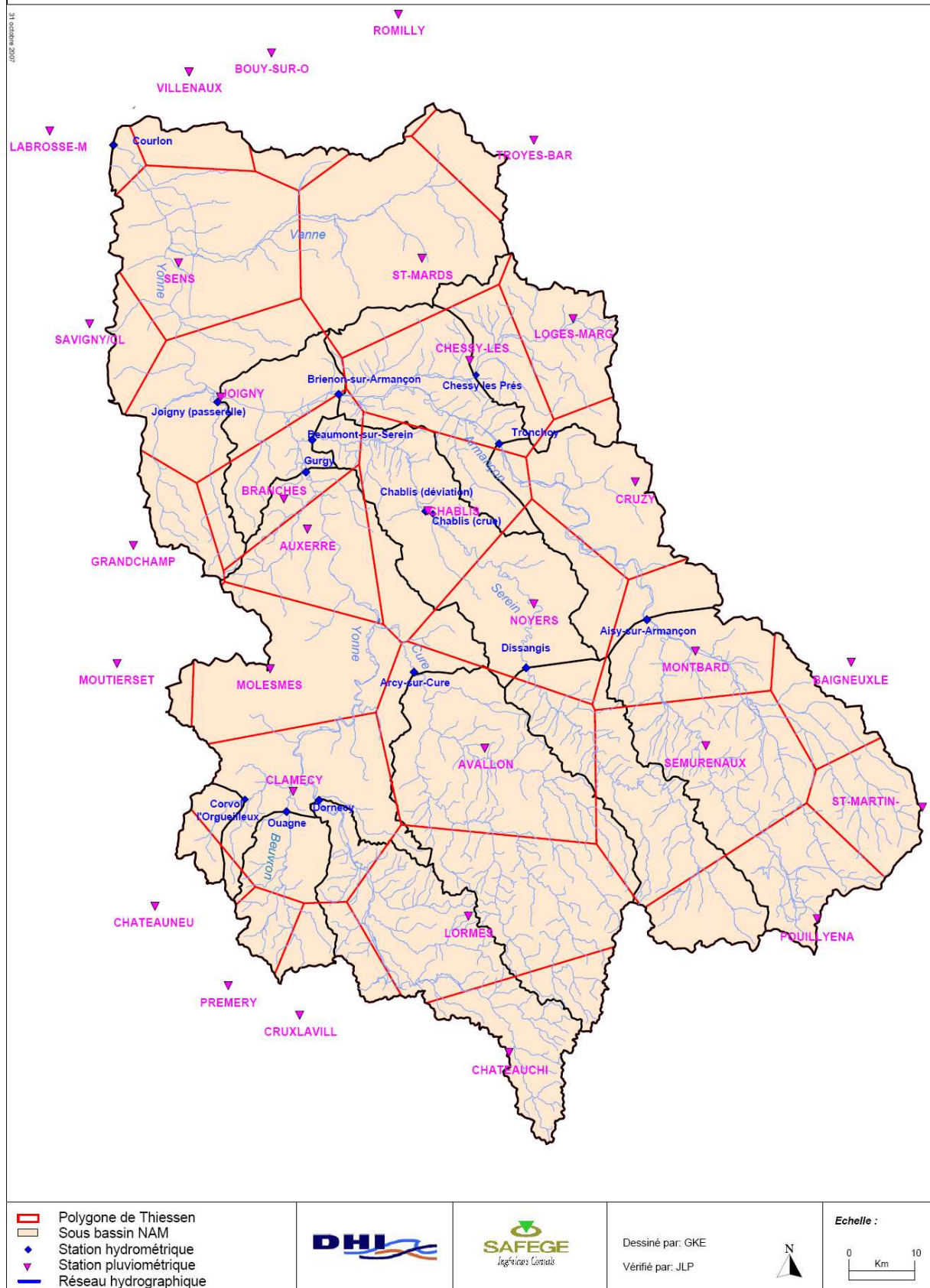
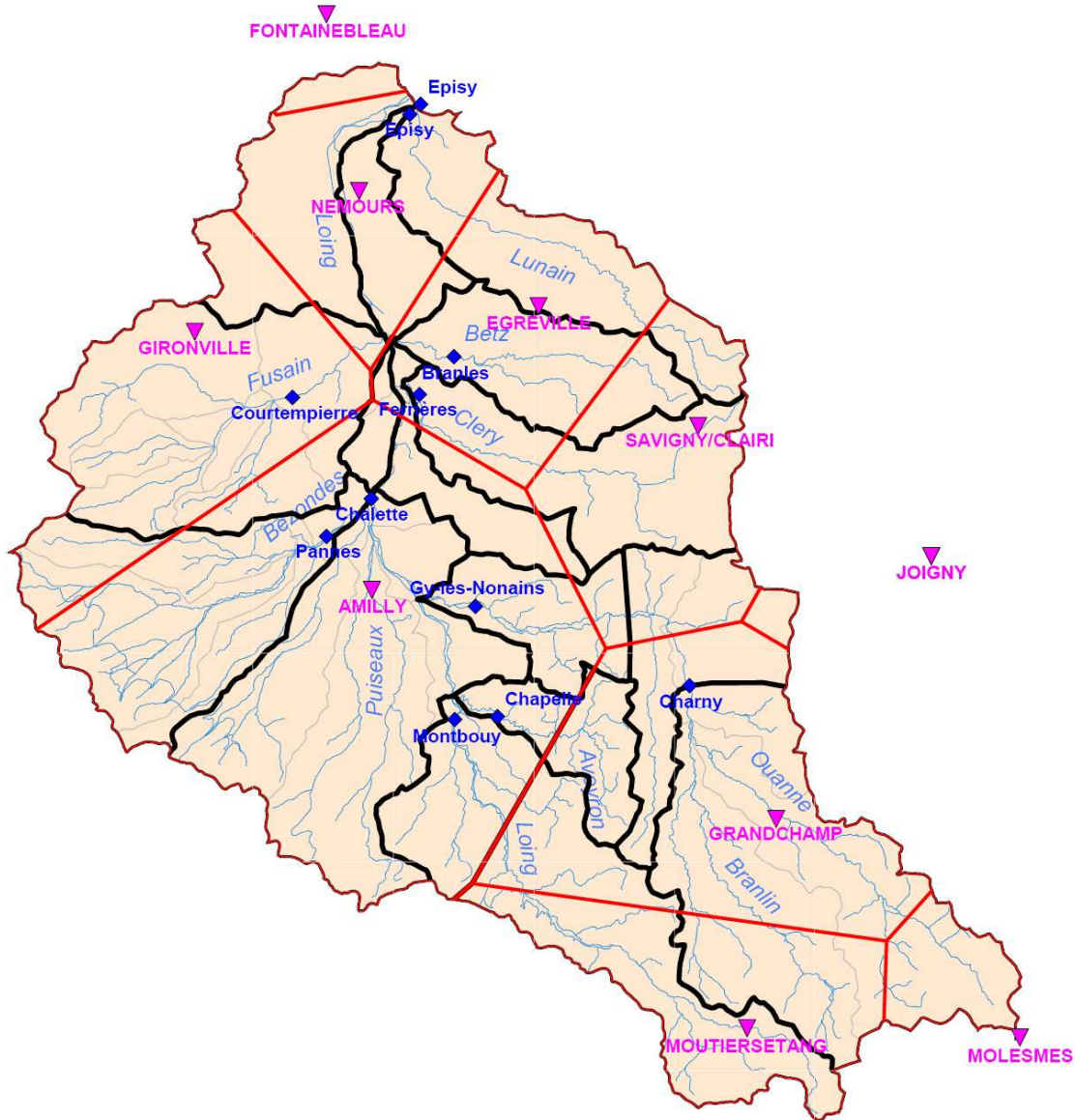


Figure 3 : carte des stations hydrométriques étudiées et des pluviomètres utilisés, avec leur polygone de Thiessen pour l'Yonne (D'après DHI-SAFEGE, 2007).

PLUVIOMETRES ET POLYGONES DE THIESSEN SUR LE BASSIN DU LOING

12 novembre 2007



- ▭ Polygone de Thiessen
- Sous bassin NAM
- ◆ Station hydrométrique
- ▼ Station pluviométrique
- Réseau hydrographique



Dessiné par: SJL

Vérifié par: PR

Echelle :

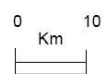


Figure 4 : carte des stations hydrométriques étudiées et des pluviomètres utilisés, avec leur polygone de Thiessen pour le Loing (D'après DHI-SAFEGE, 2007)

2.2. Type de données utilisés

2.2.1. Données hydrométriques

Les appareils de mesure de débit, donc les stations hydrométriques, sont intégralement, dans le cas de l'Île-de-France, gérés par la DIREN. C'est donc elle qui s'occupe de la collecte et de la critique des données, ce qui simplifie grandement la coordination (ce n'est pas le cas partout en France).

Les appareils ne mesurent pas directement le débit, mais une hauteur d'eau (on parle alors de limnimétrie). Cette hauteur d'eau est ensuite transformée en débit grâce à une courbe (propre à chaque station) de correspondance hauteur-débit appelée courbe de tarage. On obtient alors un débit en m^3/s . Dans cette étude, la DIREN a fourni des données déjà transformées dans cette unité.

Du point de vue pratique, les données de débits sont directement télétransmises au SPC chaque heure, ce qui lui permet d'effectuer un traitement de donnée toutes les heures, lui permettant de fournir d'éventuelles informations sur l'évolution du cours d'eau en "temps réel". En effet, en contexte opérationnelle, c'est le débit qu'on cherche à prévoir. Le débit est toujours l'unique sortie des modèles (il peut être également une entrée dans certain cas comme on va le voir dans la suite).

On donne un schéma d'une station hydrométrique :

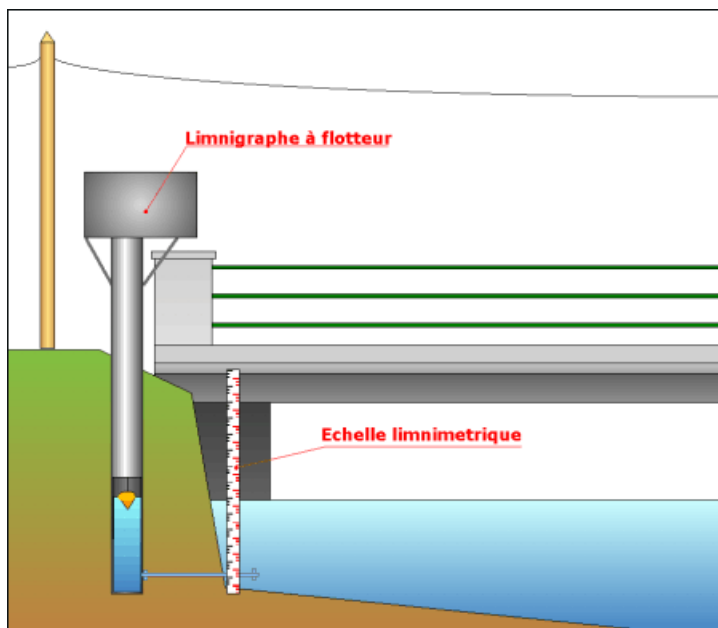


Figure 5 : principe de fonctionnement d'une station hydrométrique
(source:<http://www.centre.ecologie.gouv.fr>)

2.2.2. Données de pluie

Les données de pluies sont fournies par Météo-France, qui est l'organisme gestionnaire des pluviomètres opérationnels dans toute la France. Météo-France télétransmet cependant directement ces mesures au SPC pour une gestion optimale. Comme pour les débits, les cumuls de pluie sont donnés au pas de temps horaire. Les pluies constituent une entrée des modèles. On donne la photo d'un pluviomètre:



Figure 6 : photo d'un pluviomètre à balancier (source : <http://www.meteodesorres.com>)

2.2.3. Données d'évapotranspiration potentielle (ETP)

Des travaux récents (Oudin, 2004) ont montré que les modèles pluie-débit ne sont pas très sensibles à la variabilité temporelle fine de cette variable. Une courbe moyenne de régime d'ETP suffit à rendre compte des évaporations. Ceci signifie que, pour un jour donné, l'ETP sera la même quelle que soit l'année. Des données décennales moyennes interannuelles d'ETP Penman seront utilisées à des stations situées sur ou à proximité du bassin étudié. Pour le pas de temps horaire, une désagrégation temporelle simple sera réalisée en répartissant l'ETP journalière par une fonction en cloche entre 8h et 20h.

On présente une courbe de l'ETP utilisé dans l'étude sur plusieurs années et sur une semaine:

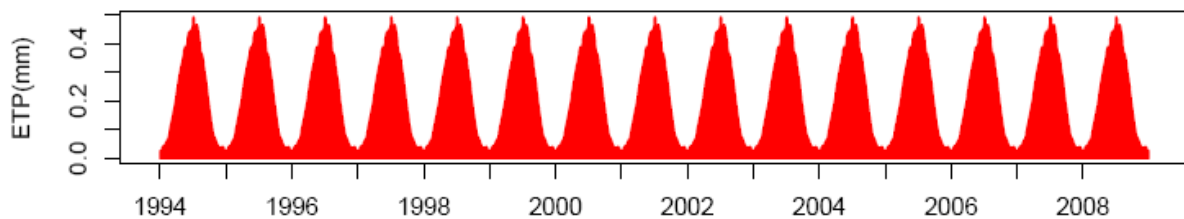


Figure 7 : courbe d'ETP sur 15 années

forme de l'ETP sur une semaine

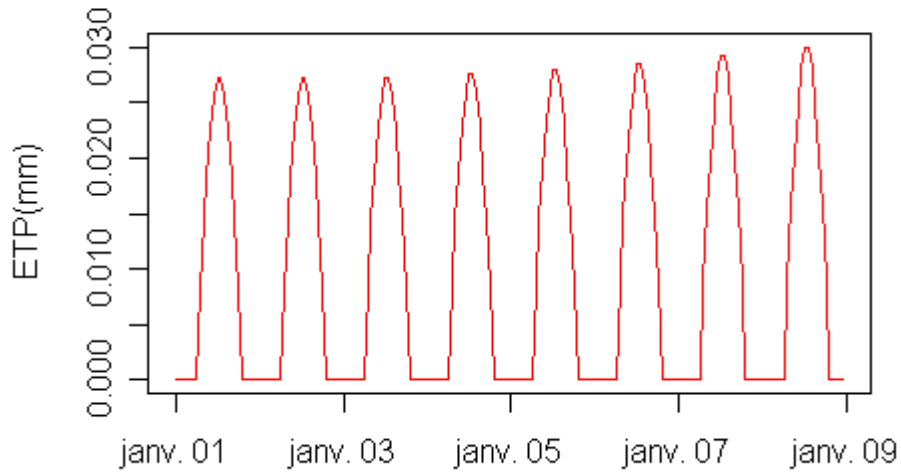


Figure 8 : forme de l'ETP sur une semaine pour le bassin de l'Yonne

3. Analyse du régime - Caractérisation hydrologique du bassin

La Seine est un fleuve régulier avec un régime océanique de plaine (basses eaux d'été, assez fortes crues d'automne au printemps), avec un débit moyen annuel à Austerlitz de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et des débits variant de $25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à $2500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

On présente un exemple de courbes représentant les moyennes interannuelles des cumuls mensuels de pluies et de débits pour l'Yonne à Courlon. Ces courbes ont été tracées pour 3 autres stations couvrant la zone étudiée et sont données en annexe. On observe les mêmes comportements pour toutes les stations.

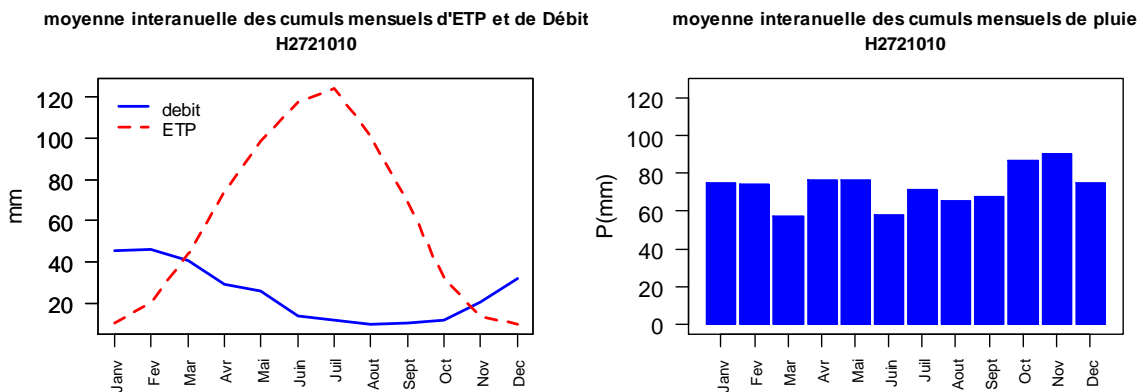


Figure 9 : moyenne interannuelle de cumuls mensuels d'ETP, de débits et de pluie pour l'Yonne à Courlon

En été, en raison de l'augmentation du rayonnement solaire, de la température ou de la baisse de l'humidité, l'évapotranspiration augmente considérablement. Or, la pluie reste en général globalement constante sur l'année (avec souvent une petite pointe en octobre-novembre). On explique donc la diminution du débit pendant l'été par l'augmentation de l'évapotranspiration. On remarque bien, sur les courbes, une certaine anti-corrélation du débit et de l'ETP (dans les courbes de synthèse 1994-2008 (I.2), les crues ont bien lieu en hiver).

II. Outils et méthodologie

Les modèles du Génie Rural sont des modèles pluie-débit, c'est-à-dire que leurs entrées sont constituées de données de pluie (et de courbe d'ETP) et les débits calculés au point d'application du modèle sont obtenus en sortie (les débits observés peuvent être, comme dans GR3P, également utilisés en entrée lorsque le modèle fonctionne en mode "prévision"). Il s'agit de modèles empiriques dans lesquels les paramètres ne peuvent pas être ramenés directement à des grandeurs ou équations physiques (par opposition aux modèles hydrauliques par exemple). La généralité de ces modèles, c'est-à-dire leur capacité à donner des résultats satisfaisants sur un grand nombre de bassins, et leur robustesse ont été étudiées dans de précédents travaux effectués par Perrin (2003) pour GR4J et TANGARA (2007) pour GR3P. Ce dernier, optimisé pour la prévision, a été confronté à d'autres modèles et il s'est avéré être l'un des plus performant sur le bassin versant de la Seine (rapport publié par le CEMAGREF pour la DIREN Île-de-France "Inventaire et diagnostic des modèles de prévision des crues déjà existants sur le bassin de la Seine" 2005).

Dans cette partie on présente le modèle GR3P, lui-même, dérivé du modèle GR4J dont la description est donnée en annexe (annexe 4) avec notamment des graphiques illustrant le rôle de chacun de ses paramètres (les fonctions des différents paramètres et leurs influences sur le débit calculé sont analogues dans les deux modèles).

1. *Différence entre simulation et prévision*

Il faut bien distinguer la simulation et la prévision. La simulation permet à partir d'un épisode pluvieux donné de calculer un débit (débit simulé) mais en aucun cas d'obtenir des débits qui iraient au delà de l'épisode entré dans le modèle. Dans la simulation, on a donc en entrée uniquement la pluie sur une période donnée, et on obtient un hydrogramme correspondant (hydrogramme des débits simulés).

Dans la prévision en revanche, on cherche à obtenir une valeur de débit futur, donc à un moment où on ne connaît par définition pas les pluies. On entre alors des données de pluie jusqu'à l'instant d'émission de la prévision (donc connues) ainsi que le débit observé à cet instant, afin d'effectuer une mise à jour directe du modèle et de minimiser les erreurs. On peut introduire différents scénarios de pluie future afin de comprendre au mieux leurs influences sur le modèle, et c'est là un des objectifs de cette étude.

2. Modèle utilisé – GR3P

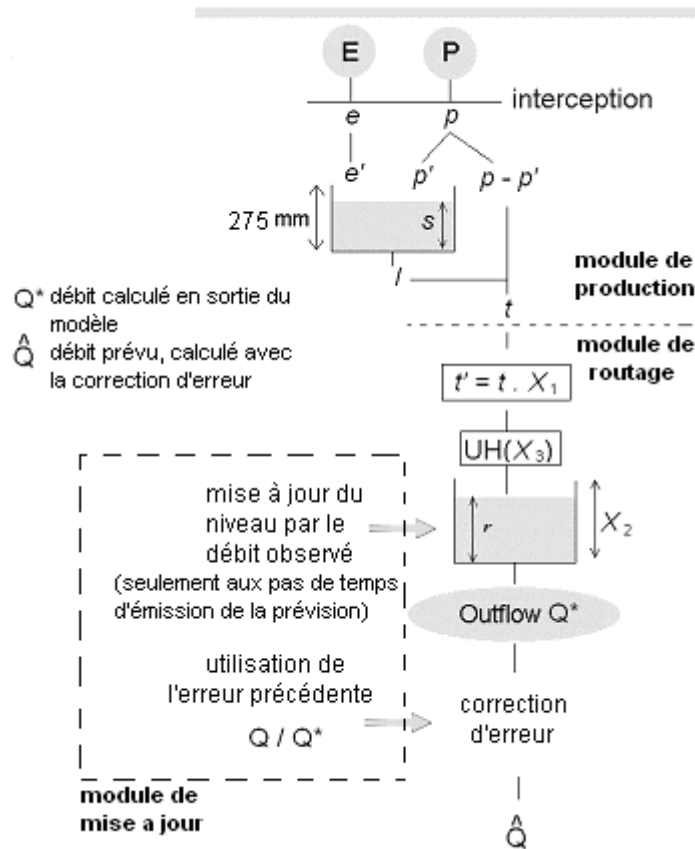


Figure 10 : structure du modèle de prévision des crues GR3P (D'après Tangara 2007).

- Signification des paramètres:
 - X_1 : coefficient d'ajustement de la pluie effective (sans unité)
 - X_2 : capacité maximum du réservoir de routage quadratique (mm)
 - X_3 : temps de base de l'hydrogramme unitaire (nombre de pas de temps)

Module de production :

Ce module permet une répartition quantitative de l'eau et permet notamment le calcul du volume d'eau effectif en transit qui entrera dans le module de routage. Il a pour effet de lisser les impulsions de pluies entrant dans la fonction de routage (module suivant).

- Neutralisation :

La hauteur de pluie mesurée subit l'effet de l'évapotranspiration à la surface du sol ou des plantes. Il s'agit d'un phénomène d'interception. On obtient ainsi une pluie nette p qui entrera dans le modèle.

On parle de la neutralisation de P par E pour déterminer une pluie nette p et une évapotranspiration nette e calculée à l'instant j par :

Si $P[j] > E[j]$, alors $p = P[j] - E[j]$ et $e[j] = 0$

Si $P[j] < E[j]$, alors $p = 0$ et $e[j] = E[j] - P[j]$

Dans ce dernier cas une évapotranspiration nette non nul entraîne une évaporation de l'eau déjà contenue dans le sol à l'instant j.

- Fonction de rendement :

Cette fonction détermine l'évolution et la répartition des volumes d'eau à l'entrée du modèle. Elle modélise les volumes en écoulement (il n'est pas encore question de débit, mais de volume à un pas de temps donnée), en fonction de l'état d'humidité du sol.

Dans le cas où la pluie nette est non nulle, une partie p' alimente un réservoir, dit de production et correspondant à l'état d'humidité du sol, selon une équation fonction du niveau intermédiaire atteint précédemment ($S[j-1]$) et de la pluie nette tombée au pas de temps présent $p[j]$ alors qu'une autre partie $p-p'$ est directement distribuée à l'entrée du module de routage (correspondant à l'écoulement, à la percolation près décrite au point suivant). Dans le cas contraire, lorsque $p = 0$ et e non nulle, une quantité d'eau e' est retirée du réservoir de production selon une équation fonction de l'évapotranspiration nette au pas de temps présent $e[j]$ mais également du niveau du réservoir au pas de temps précédent.

Le contenu du réservoir est alors mis à jour par :

$$S' = S[j-1] + p'[j] - e'[j]$$

Dans le modèle GR3P la capacité maximale du réservoir de production est une constante qui a été choisi pour cette version a 275 mm.

- Percolation I

Il y a une percolation, qui représente un faible volume d'eau qui quitte le réservoir pour rejoindre le volume entrant dans la partie routage du modèle, mais lorsqu'il pleut, ce volume de routage reste très largement composé de la pluie $p-p'$ issue de la séparation en deux parties de la pluie nette p (p' et $p-p'$). On a alors :

$$S[j] = S' - I[j]$$

Et on obtient un volume $t[j] = p[j] - p'[j] + I[j]$ entrant dans le module de routage

- La fonction d'ajustement de la pluie effective

Cette fonction joue plusieurs rôles à la fois. Elle est à la base censée modéliser les échanges souterrains, mais a également un rôle de correction des volumes. La fonction d'échange se présente sous la forme du produit du volume $t[j]$ au pas de temps j et du paramètre X1, dit coefficient d'ajustement de la pluie effective.

$$t'[j]=X1 \times t[j]$$

Module de routage :

Ce module a pour rôle de reconstituer la réponse hydrologique du bassin versant à une impulsion de pluie. Il modélise conceptuellement l'écoulement (répartition temporelle des volumes) jusqu'à la rivière.

- L'hydrogramme unitaire :

L'hydrogramme unitaire, dont l'allure dépendra du paramètre X3 (assimilable au délai de restitution du bassin versant) est la première étape qui distribue temporellement les volumes d'eau venant du module de production. Les volumes d'eau qui s'ajoute à chaque pas de temps au système sont convolués à l'hydrogramme unitaire pour leur affecter une répartition temporelle.

Plus le paramètre est grand, plus l'hydrogramme s'étendra dans le temps, et donc plus la réponse pluvieuse, restituée sous forme de débit sera lissée dans le temps (plus le volume "produit" au pas de temps j sera réparti sur les pas de temps futures).

On a donc en entrée un volume d'eau mobilisé au pas de temps considéré, et en sortie la fraction de ce volume qui s'écoule au pas de temps en question. Le volume $t[j]$ en sortie est directement routé vers le réservoir de routage.

- Le réservoir de routage

Le réservoir de routage cherche à modéliser le transit de l'eau au sein du bassin versant. Le volume d'eau restitué à la sortie de l'hydrogramme viendra l'alimenter, sa capacité maximum étant déterminée par le paramètre X2.

Ce réservoir joue un rôle de "filtre passe bas" ou les fortes variations temporel d'impulsions de pluies seront "absorbé" par le réservoir (sauf si celui-ci est plein) restituant un débit moins variable (plus X2 est grand, plus cet effet est fort, cf. annexe 4, avec le rôle de X3 analogue de X2 dans GR4J).

La fonction de routage a pour objectif de reproduire le lissage des impulsions de pluie par le bassin versant.

Mise à jour du modèle pour effectuer une prévision :

La mise a jour du modèle s'effectue à deux niveau :

1°/ D'une part, si j est le moment d'émission de la prévision, le niveau r du réservoir de routage sera directement déterminé par le débit observé à l'instant j.

Le niveau r du réservoir à la fin du pas de temps j dépend donc du débit observé à j, de X2 et du niveau du réservoir à j-1. Le débit à la sortie du réservoir est une fonction de vidange croissante du niveau r et décroissante du paramètre X2. On a alors:

$$r_{j+1} = r - Q^*_{j+1}$$

Cette procédure agit directement à l'intérieur du modèle.

2°/ D'autre part, un module de correction d'erreur agissant sur la sortie du modèle est appliqué, permettant, en calculant l'écart des prévisions calculées au pas de temps précédent avec le débit observé, de minimiser les erreurs systématique du modèle (biais).

Initialisation du modèle

Le modèle GR3P est un modèle continu, il a pour caractéristique de devoir tourner sur des données d'au moins un an avant l'instant d'émission de prévision au pas de temps de cette dernière, et ce, pour bien initialiser les niveaux des réservoirs.

3. Méthodologie

Cette partie décrit la méthodologie utilisée par la suite pour le calage et la validation des modèles de prévision sur les stations étudiées.

3.1. Critère d'optimisation et de validation

3.1.1 Erreur quadratique moyenne (RMSE¹)

Ce critère est très utilisé pour optimiser les paramètres du modèle. Il permet d'évaluer la qualité moyenne des prévisions et ainsi d'avoir une vue d'ensemble de la qualité des modèles. Il peut être calculé sur les débits ou sur les hauteurs. Il est défini par :

$$RMSE_n = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (Q_{prev,n,j} - Q_{obs,n,j})^2 \right]^{1/2}$$

où

$Q_{obs,n,j}$: débit/hauteur observé(e) à n pas de temps de l'instant de prévision

$Q_{prev,n,j}$: débit/hauteur prévu(e) à n pas de temps de l'instant de prévision

N : nombre de pas de temps où a été réalisée une prévision

n : délai de prévision

Le calcul du critère peut être réalisé pour différents délais, n allant de 1 à L , L étant le délai maximum de prévision choisi pour le bassin. Si besoin, il peut également être mis sous la forme adimensionnelle du critère de persistance.

3.1.2 Critère de persistance

Il s'agit d'un critère systématiquement utilisé dans le test de modèle prévision. Il est donné par la formule (on garde les mêmes notations que précédemment) :

¹ Root Mean Square Error

$$P(n) = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Q_{prev,n,j} - Q_{obs,n,j})^2}{\sum_{j=1}^N (Q_{obs,j} - Q_{obs,n,j})^2}$$

Où $Q_{obs,j}$ Débit observé au pas de temps j

Ce calcul correspond à un calcul d'erreur quadratique du modèle testé normé par l'erreur quadratique qu'aurait fait un modèle "naïf". Le modèle naïf consiste simplement à dire que le débit prévu à l'échéance est égale au débit observé au moment de la prévision.

Ce critère peut varier entre moins l'infini et un :

- si le critère est égal à 1, le modèle est parfait.
- s'il est inférieur à 0 le modèle naïf est en moyenne meilleur que le modèle testé. Ce dernier n'est donc d'aucune utilité.

Dans notre étude nous donnons une forme bornée (entre -1 et 1) du critère de persistance pour faciliter la visualisation.

$$C2MP = CP / (2-CP)$$

3.1.3 Graphiques

Il est d'autre part important de compléter ces critères par des graphiques donnant une information certe qualitative mais permettant de voir comment se répartit l'erreur (deux mêmes valeurs de la persistance peuvent correspondre à des erreurs plus ou moins différentes sur les montées par exemple) sur une crue.

On représentera donc les chroniques observées ainsi que les débits prévus aux différentes échéances (à 3, 6, 12, 24, 48 et 72 heures) en quelque point régulièrement choisis (tracer les courbes de débits prévus à chaque horizon pour tous les points rendrait illisible le graphique) et un graphe des débits prévus à 72 heures. On obtient alors un graphique de la forme :

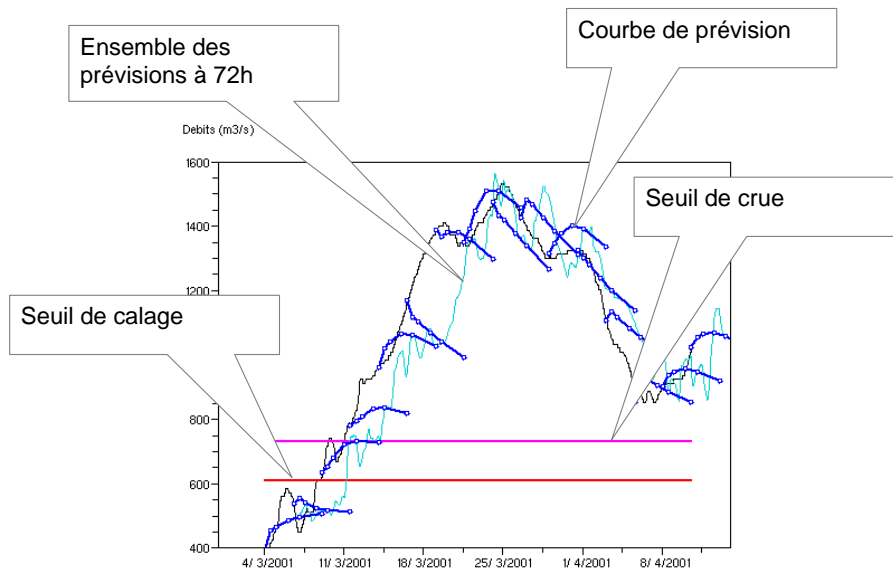


Figure 11 : Exemple de graphique des prévisions (d'après CEMAGREF 2005)

Pour le modèle naïf on obtient la courbe suivante:

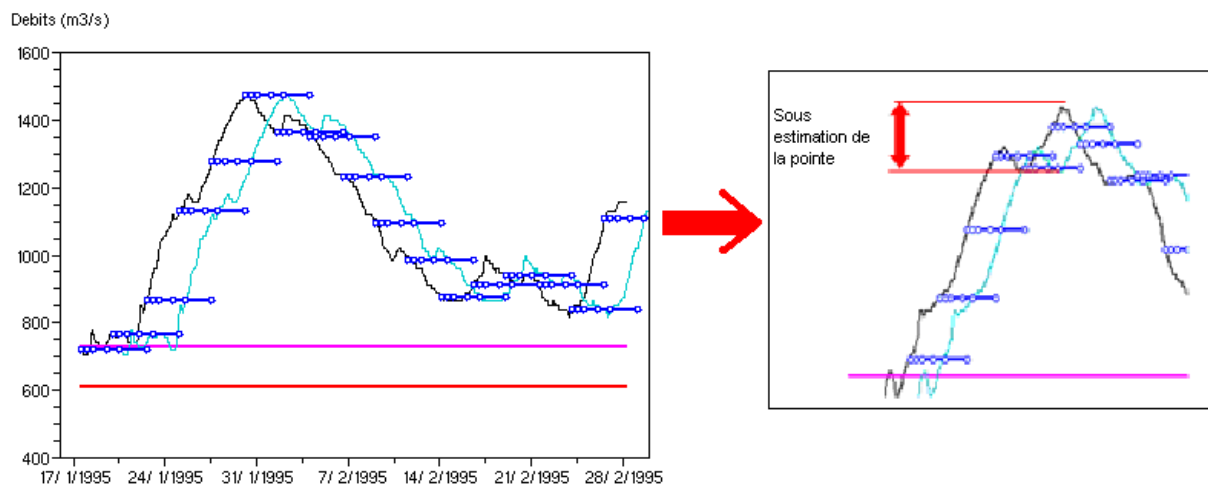


Figure 12 : graphique des prévisions pour le modèle naïf (d'après CEMAGREF 2005)

3.2. Définition des périodes de calage/contrôle

Pour que ce modèle soit le plus satisfaisant possible, il est indispensable de choisir le plus rigoureusement possible son jeu de paramètres. Cette procédure vise donc à déterminer lequel utiliser pour obtenir des résultats les plus satisfaisants possibles sur un bassin versant donné.

Pour cela, la méthode utilisée se divise en deux phases. La première consiste à reconstituer au mieux un hydrogramme sur une période donnée, dite période de calage, en choisissant des valeurs aux paramètres. Cette procédure est automatisée, avec un algorithme d'optimisation. La deuxième phase consiste en un contrôle de la qualité du modèle si on le place dans une situation différente (mais toujours dans le même bassin versant). On va alors appliquer le modèle sur une deuxième période (dite période de validation) avec les paramètres

obtenu sur la première. On choisit en général pour une bonne robustesse une période de calage d'au moins 3 ans et une période de validation distinct, et elle aussi d'au moins 3 ans. Pour un meilleur choix de paramètre, et un meilleur jugement des qualités du modèle, on recommence la procédure en inversant la période de calage et la période de validation.

Dans notre étude, nous disposons globalement d'environ 14 ans de données (1994 – 2007), ce qui est donc largement suffisant pour cette phase. Le programme de calage de GR3P va diviser les données en deux périodes égales sur lesquelles il réalisera deux calages indépendants. Dans la suite, pour chaque station, les résultats sont présentés pour chacune des deux périodes.

III. Travail réalisé

1. Chaîne de traitement réalisée pour l'étude

Dans le cadre de cette étude, une chaîne de traitement a été mise en place. On distingue deux étapes :

- Mise en forme des données d'entrées :

On utilise en entrée des données venant du cadre opérationnel, c'est-à-dire sous différentes formes selon leurs utilisations antérieures (certaines données provenaient directement des stations de mesures, d'autres ont déjà servi à des études antérieures mais à des formats différents). Le rôle de cette étape est donc de mettre en forme les données, pour qu'elle soit proprement organisées et surtout exploitable directement par les phases suivantes de la chaîne. On réalise également dans cette étape un outil de traçage de courbes pour visualiser les données et détecter d'éventuelles incohérences.

- Calage des modèles et visualisation des résultats :

La phase suivante correspond au calage du modèle et à l'exploitation des résultats. Le calage du modèle s'effectue sous SCILAB² en utilisant des fonctions déjà existantes (développé par Julien Lerat au CEMAGREF, <http://lerat.julien.free.fr>). Les graphiques de synthèses (valeurs des paramètres et des critères de performance) sont réalisés sous le logiciel R².

La figure 13 schématise la chaîne de traitement mise en place.

² Scilab et R sont des logiciels de programmation pour le calcul numérique, en accès libre aux adresses : www.scilab.org, www.r-project.org

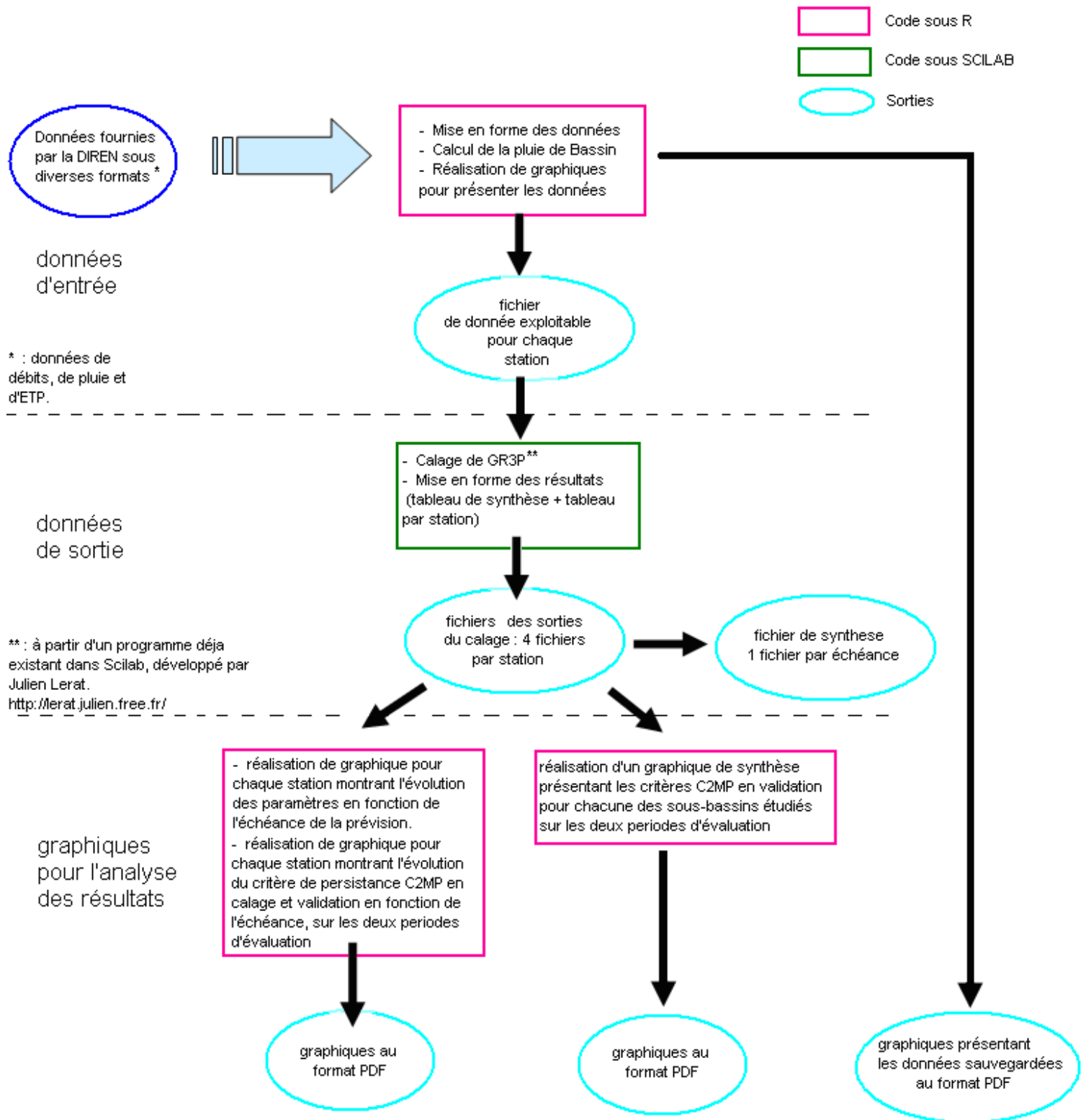


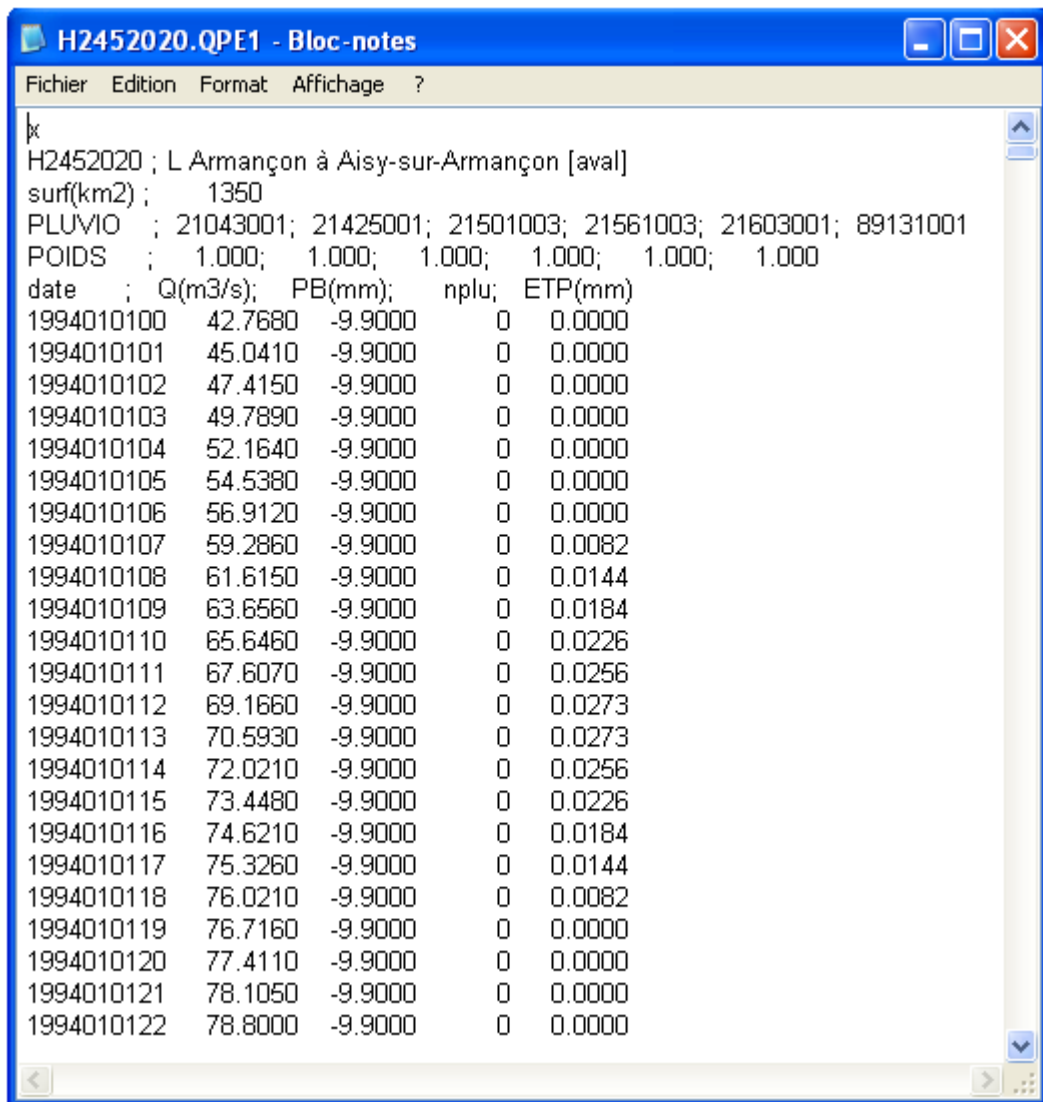
Figure 13 : Diagramme représentatif de la chaîne de traitement mise en œuvre dans cette étude jusqu'à présent

Nous détaillons ici le traitement des données effectué.

Les données de pluie entrantes dans les modèles, c'est-à-dire les pluies de bassin, sont calculées à partir des pluviomètres situés dans le bassin versant en question ou à proximité. On effectue une moyenne de tous les cumuls mesurés sur chacun des ces pluviomètres et, pour faciliter l'analyse visuelle, on donne pour chaque pas de temps le nombre de pluviomètres qui ont servi à calculer la pluie de Bassin. Il est à noter qu'on utilise des pluies observées comme entrée du modèle, et non des pluies prévues (qui correspondraient plus au contexte opérationnel). Dans cette étude, on est donc dans une hypothèse de pluie parfaite (scénario pluie parfaite).

Pour L'ETP, on a utilisé une moyenne interannuelle qui avait déjà servi à une précédente étude menée par le CEMAGREF (CEMAGREF 2005). Cette moyenne a été reportée sur chaque année, pour constituer notre donnée d'ETP.

On obtient un seul fichier de données pour chaque station, créé par la chaîne de traitement. On en donne un exemple dans le cas de l'Armançon à Aisy-sur-Armançon.



```
H2452020 ; L Armançon à Aisy-sur-Armançon [aval]
surf(km2) ; 1350
PLUVIO ; 21043001; 21425001; 21501003; 21561003; 21603001; 89131001
POIDS ; 1.000; 1.000; 1.000; 1.000; 1.000; 1.000
date ; Q(m3/s); PB(mm); nplu; ETP(mm)
1994010100 42.7680 -9.9000 0 0.0000
1994010101 45.0410 -9.9000 0 0.0000
1994010102 47.4150 -9.9000 0 0.0000
1994010103 49.7890 -9.9000 0 0.0000
1994010104 52.1640 -9.9000 0 0.0000
1994010105 54.5380 -9.9000 0 0.0000
1994010106 56.9120 -9.9000 0 0.0000
1994010107 59.2860 -9.9000 0 0.0082
1994010108 61.6150 -9.9000 0 0.0144
1994010109 63.6560 -9.9000 0 0.0184
1994010110 65.6460 -9.9000 0 0.0226
1994010111 67.6070 -9.9000 0 0.0256
1994010112 69.1660 -9.9000 0 0.0273
1994010113 70.5930 -9.9000 0 0.0273
1994010114 72.0210 -9.9000 0 0.0256
1994010115 73.4480 -9.9000 0 0.0226
1994010116 74.6210 -9.9000 0 0.0184
1994010117 75.3260 -9.9000 0 0.0144
1994010118 76.0210 -9.9000 0 0.0082
1994010119 76.7160 -9.9000 0 0.0000
1994010120 77.4110 -9.9000 0 0.0000
1994010121 78.1050 -9.9000 0 0.0000
1994010122 78.8000 -9.9000 0 0.0000
```

Figure 14 : présentation du fichier de données mis en forme : exemple de l'Armançon à Aisy-sur-Armançon

Toutes les données sont synthétisées sous forme de graphiques et fournies en annexe sous la forme suivante :

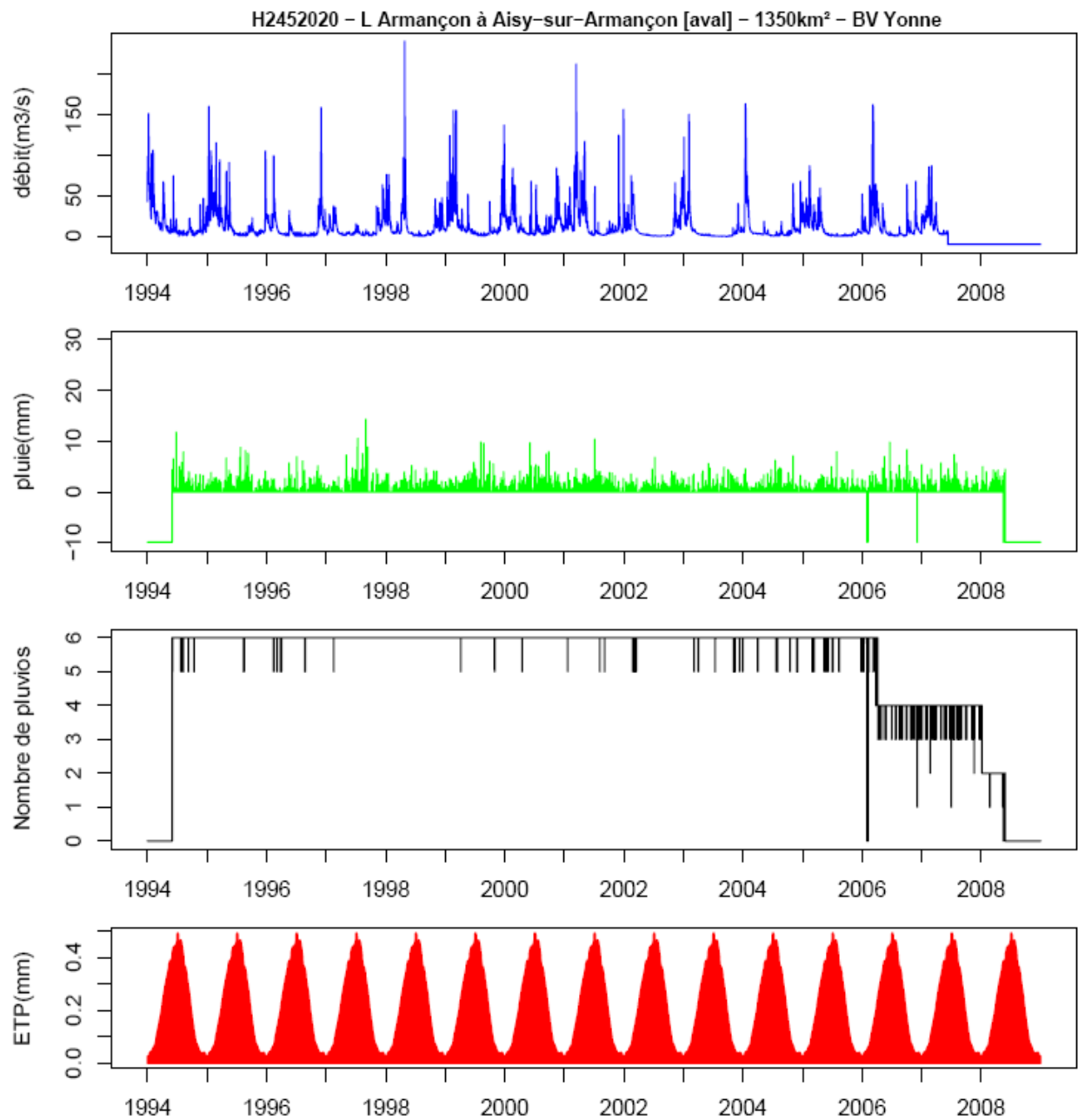


Figure 15 : présentation des graphiques des données mises en forme : exemple pour l'Armançon à Aisy-sur-Armançon

2. Analyse de stabilité

La procédure de calage est effectuée sur deux périodes distincts que l'on obtient en divisant en deux les données.

L'analyse de stabilité des paramètres sert à vérifier l'homogénéité des deux périodes de données.

Ainsi, si les paramètres sont stables d'une période à une autre, on en déduira l'homogénéité des périodes et donc le fonctionnement du modèle sur le bassin versant en question.

A l'inverse, si les paramètres ne sont pas stables, cela pourra s'expliquer par deux causes possibles :

- Un problème d'homogénéité entre les deux périodes (par exemple des changements, des travaux dans le bassin ou bien des problèmes de données).
- Un problème lié au calage sur l'une ou l'autre des périodes (problème de maximum locale)

Pour savoir laquelle de ces deux causes explique l'instabilité, on doit analyser les critères de performances, c'est-à-dire les Persistances (C2MP) calculées en calage et en validation.

L'analyse de la persistance sur le calage va permettre, en plus de mieux comprendre les problèmes de stabilité survenus, à évaluer la robustesse du modèle. En effet, puisque les paramètres de calage correspondent à un optimum de qualité des paramètres (pour donc avoir un débit prévu le plus proche de la réalité), le critère en validation est forcément, si le calage a bien été réalisé, plus bas que le critère en calage et, plus le critère en validation sera proche du critère en calage, plus le modèle sera robuste.

Dans le cas où des problèmes de stabilité des paramètres sont survenus, et que, le critère en validation est au dessus du critère en calage, on peut conclure en un problème survenu pendant le calage du modèle au niveau de la station considérée. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'algorithme d'optimisation des paramètres du modèle peut avoir calé ces derniers sur un optimum secondaire (local). Le jeu de paramètres trouvé est alors très mauvais. Ce problème pourra être réglé par la suite en examinant les données et le fonctionnement de l'algorithme. A priori il s'agirait d'un problème dans les valeurs initiales des paramètres, au départ du calage.

On donne dans la suite de cette partie quelques exemples pour des stations où le modèle fonctionne bien et pour des stations où des problèmes sont survenus. On se reportera aux annexes 5 et 6 pour l'ensemble des graphiques.

2.1. Paramètres calculés

Dans la plupart des stations, nous constatons une bonne stabilité des paramètres d'une période à l'autre. A titre d'exemple, la figure 12 présente les paramètres des modèles obtenus pour l'Yonne à Gurgy.

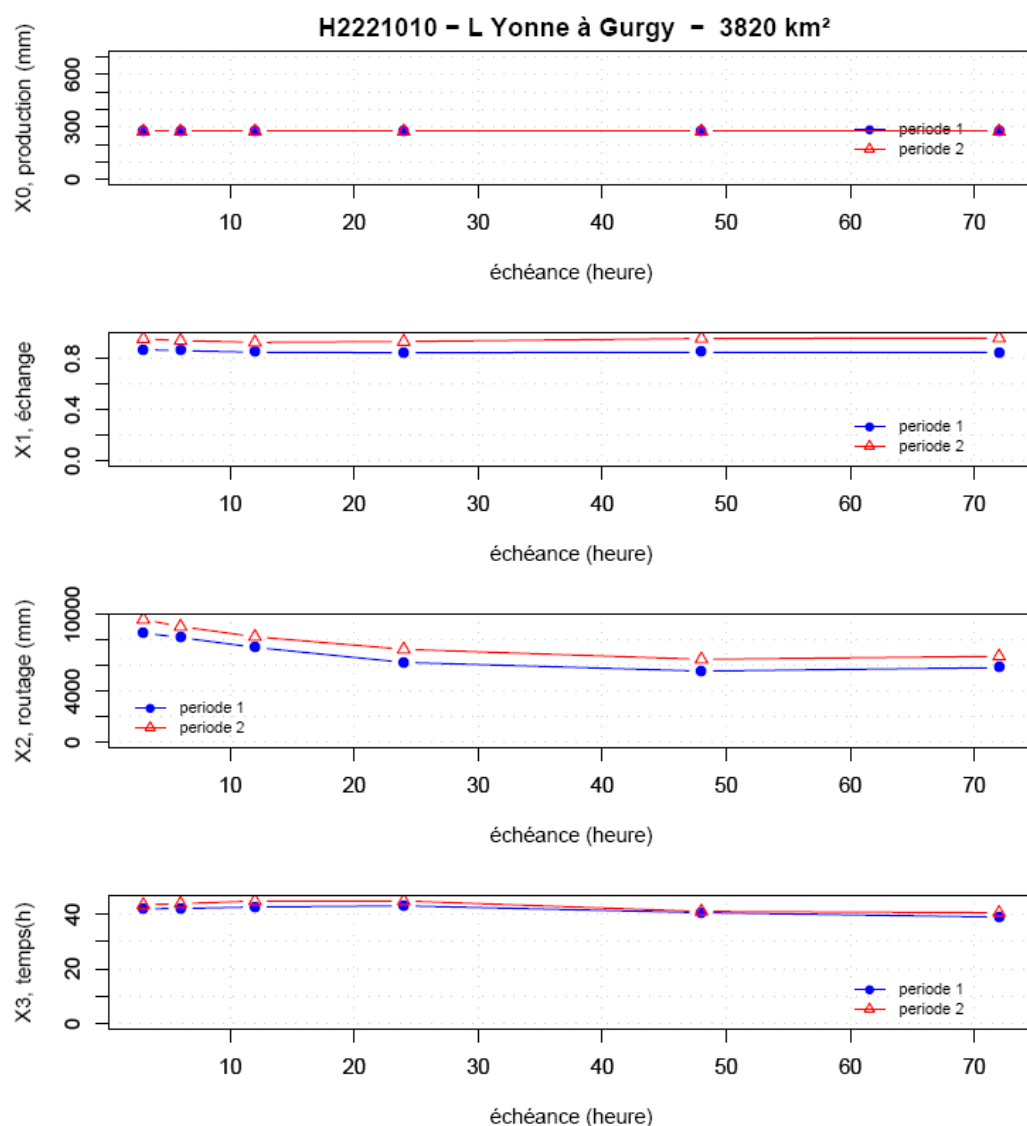


Figure 16 : paramètre du modèle en fonction des échéances pour les deux périodes à la station de l'Yonne à Gurgy

En revanche, pour quelques stations, on observe quelques problèmes de stabilité. Il s'agit des stations suivantes :

- Le Sauzay à Corvol l'Orgeuilleux
- L'Yonne à Joigny et à Courlon
- Le Serein à Chablis
- L'Ouanne à Charny
- Le Loing à Montbouy

On donne l'exemple de l'Ouanne à Charny ou les paramètres semblent peu stables d'une période à l'autre.

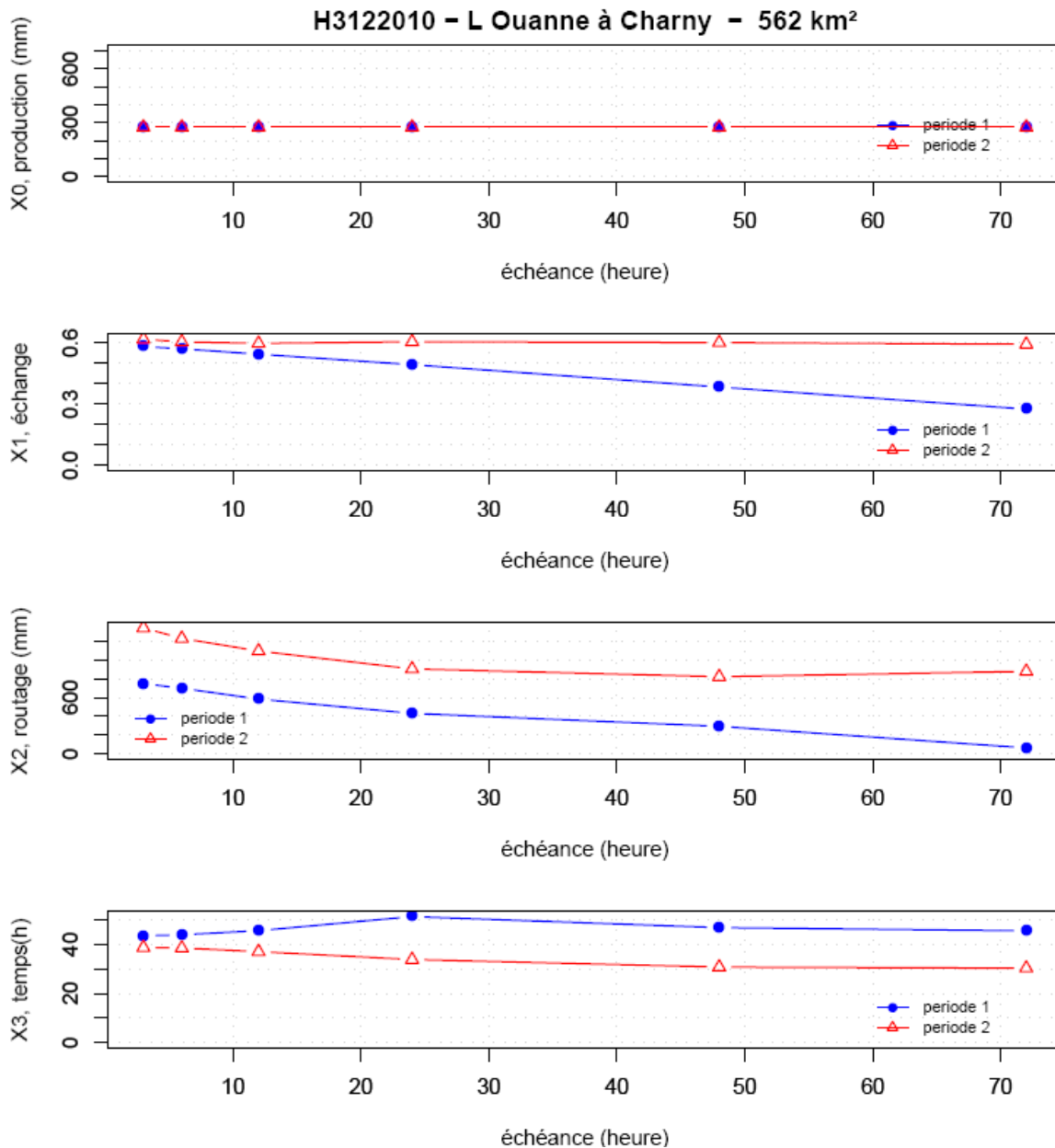


Figure 17 : paramètre du modèle en fonction des échéances pour les deux périodes à la station de l'Ouanne à Charny

2.2. Persistance (C2MP) calculés en calage/validation

Dans l'ensemble, les critères de persistance sont stables d'une période à une autre. La figure 14, montre l'exemple de l'Yonne à Gurgy.

H2221010 – Gurgy (Yonne) – 3820 km² – BV Yonne-amont

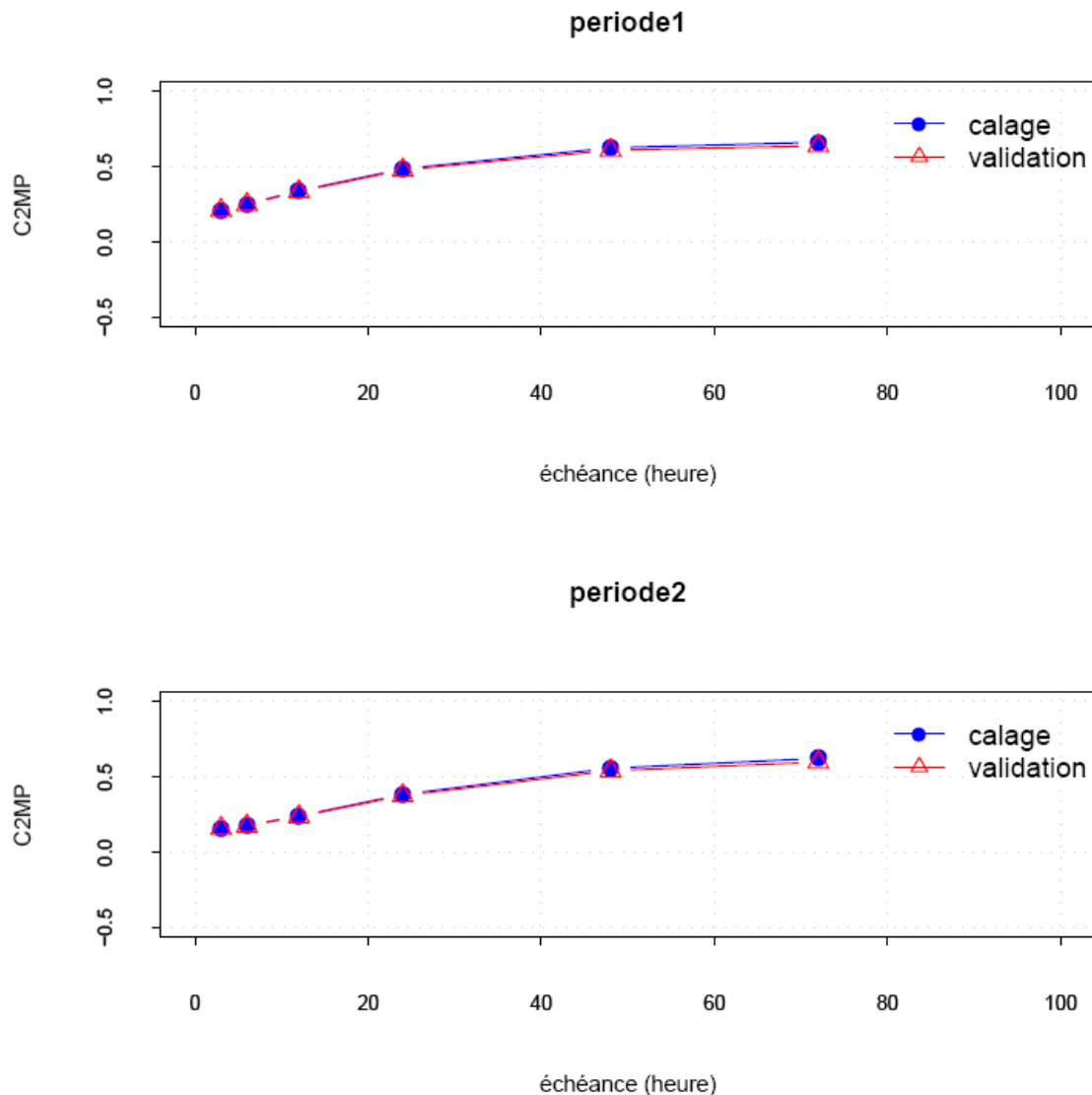


Figure 18 : critère de persistance en calage et en validation pour les deux périodes à la station de l'Yonne a Gurgy

On analyse les graphiques des critères en calage et en validation sur les 5 stations posant problème (il n'y a pas de problème pour toutes les autres stations) :

- On ne constate pas de problème sur Le Sauzay à Corvol l'Orgeuilleux, l'Yonne à Joigny et à Courlon, et le Serein à Chablis
- On constate en revanche un critère en validation plus élevé pour les deux périodes sur le Loing à Montbouy et, juste sur la première période sur l'Ouanne à Charny.

On en conclut donc, qu'il y a un problème de calage sur le Loing à Montbouy et sur l'Ouanne à Charny.

On donne un exemple de courbe des critères en calage/validation pour une station où il est survenu un problème de calage, en l'occurrence sur le Loing à Montbouy (figure 19) :

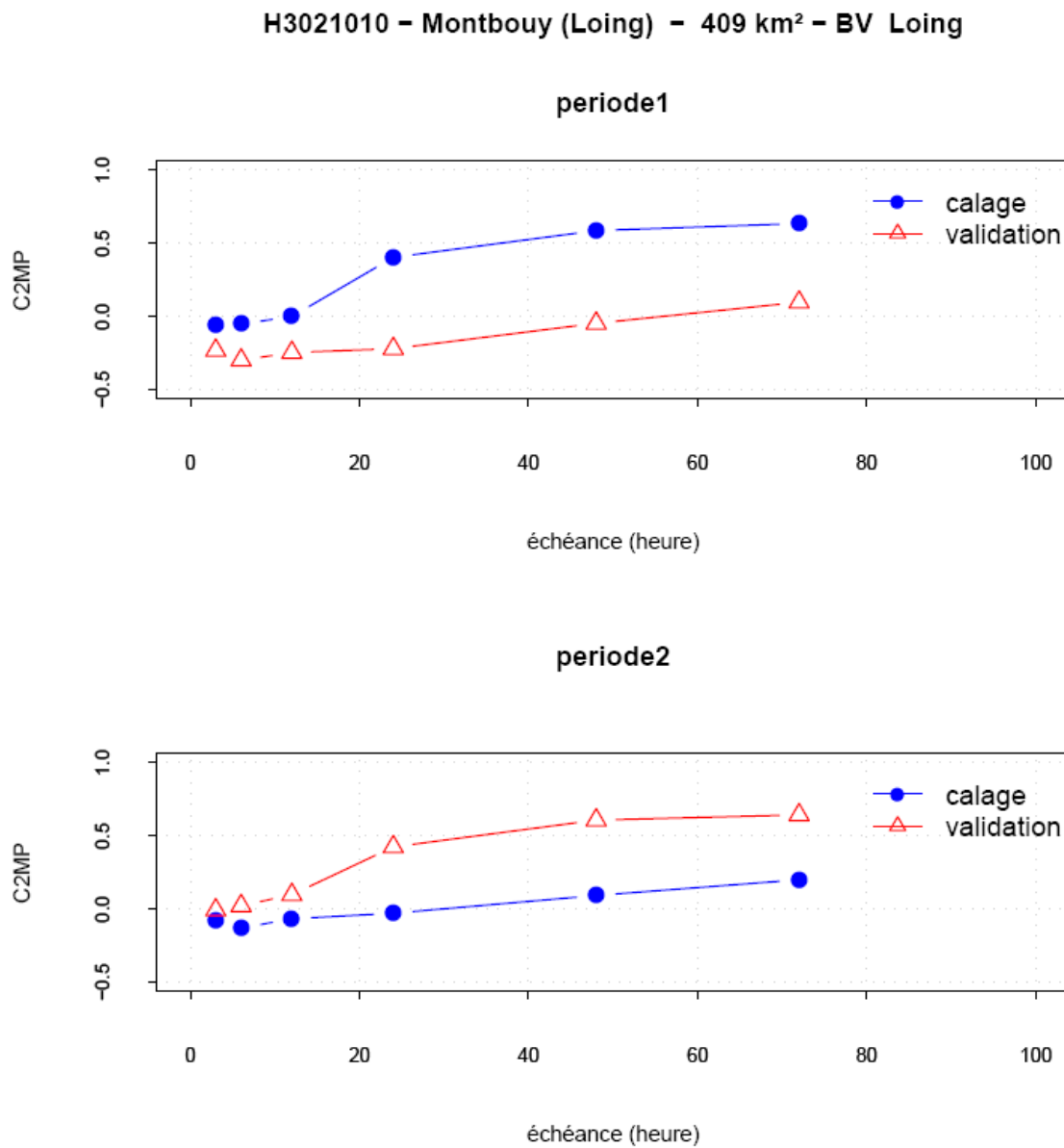


Figure 19 : critère de persistance en calage et en validation pour les deux périodes à la station du Loing à Montbouy

Dans le cas des autres stations posant problème, nous venons de montrer qu'il n'y a pas eu de problème de calage, il faut donc pour déterminer le problème, commencer par un examen des données:

- On présente les données utilisées en entrée pour le Serein à Chablis:

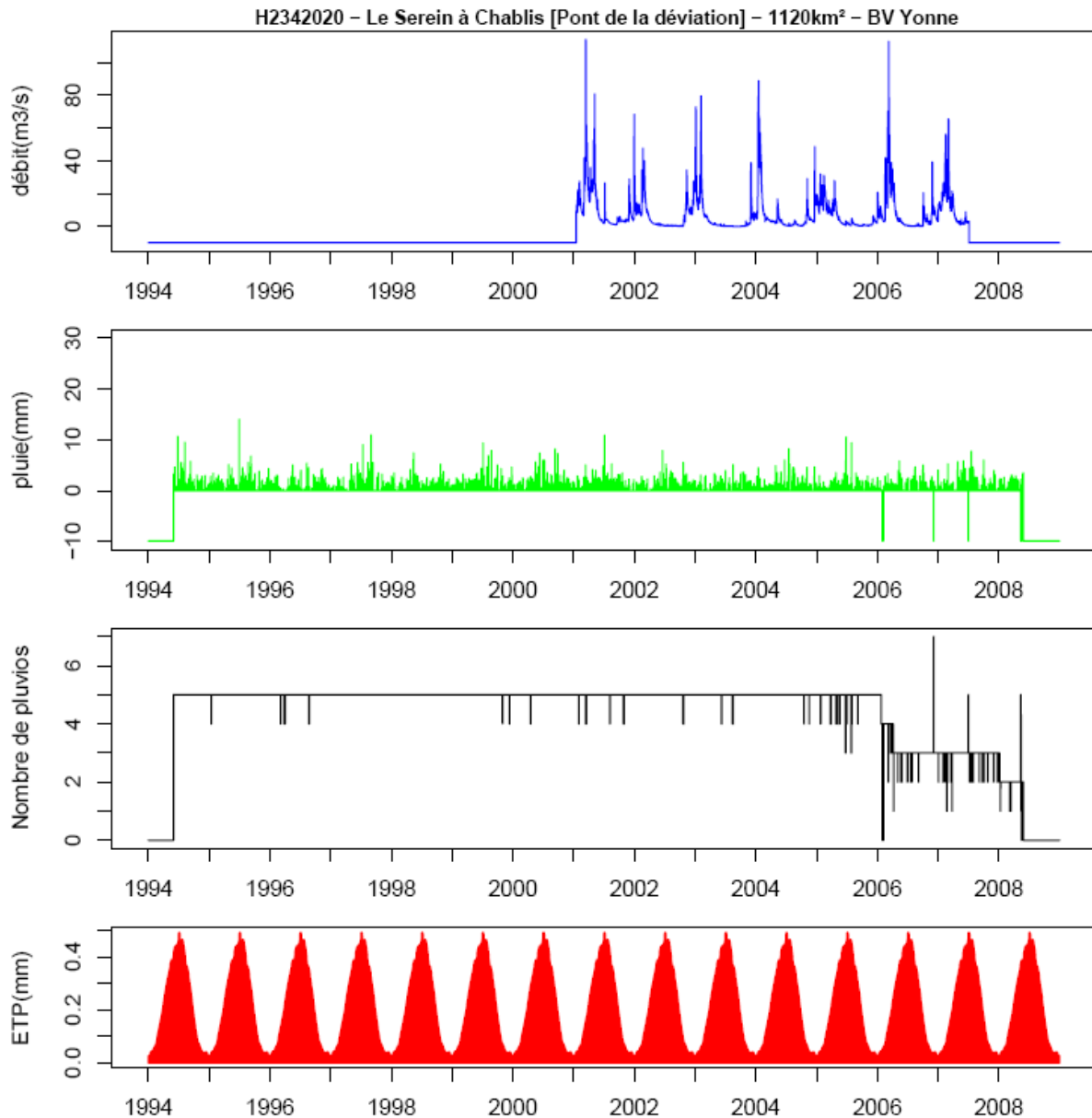


Figure 20 : données d'entrées pour le Serein à Chablis

L'examen des données révèle premièrement que la plage de donnée est beaucoup moins grande, puisque les données de débit s'étalent que de 2001 à début 2007. Mais d'autre part l'observation des pluies montre que sur la deuxième période une majorité de pluie de bassin ont été calculées avec 2 ou 3 pluviomètres, au lieu de 5 sur l'autre. Les données en entrée du modèle sont donc de nature différente sur la deuxième période, et cela explique pourquoi un problème de stabilité au niveau des paramètres survient d'une période à l'autre.

- Pour le Sauzay a Corvol-l'Orgueilleux, l'examen des données révèle également un problème au niveau du calcul des pluies de bassin. Sur toute la première période, on utilise deux pluviomètres, alors qu'on en utilise 3 sur la deuxième (cf. annexe 3).
- En revanche dans le cas de l'Yonne à Courlon et à Joigny, l'examen des données ne permet pas de conclure.

3. Graphiques de synthèse des performances du modèle

Pour pouvoir comparer les performances entre stations, celles-ci sont regroupées par sous-bassin versant selon le découpage mis en évidence dans les cartes figures 3 et 4.

On présente ici les résultats des critères de persistance sous la forme C2MP en validation, toujours pour les deux périodes. Le critère en validation nous permet d'évaluer la précision du modèle par rapport au modèle naïf, une fois que sa robustesse est évaluée.

Le premier commentaire que nous pouvons faire à la vue des ces graphiques est que globalement le modèle est meilleur que le modèle naïf pour des échéances supérieures à 3 heures, à l'exception de la station de Montbouy dont nous avons parlé plus haut et de Joigny et Courlon (juste pour l'échéance de 6 heures) sur la deuxième période, mais l'allure des courbes sur ces deux stations n'est pas suspecte.

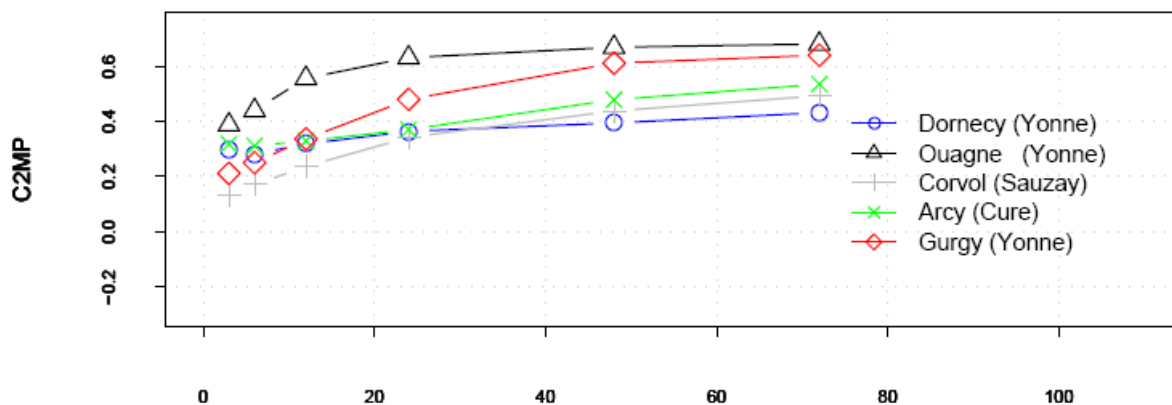
On observe globalement un accroissement du critère avec l'accroissement de l'échéance, ce qui est un résultat auquel on s'attend puisque sur les petites échéances le modèle naïf est plus difficile à battre.

On observe également une diminution du critère quand la taille des bassins versant augmente. Ceci pouvant s'expliquer par le fait que plus le bassin est grand, plus les variations de débit sont lentes. La prévision "naïve" est donc plus dure à battre.

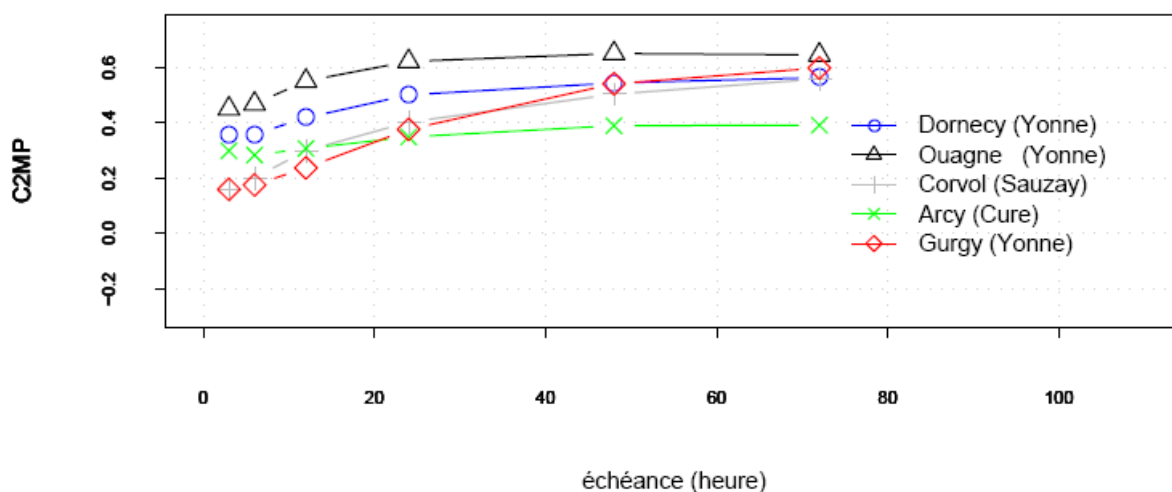
Il est donc important de noter qu'au final ces deux tendances sont liées à la nature du critère. Il est important d'insister sur le fait que le critère de persistance n'est pas un critère qui à lui seul peut renseigner de la qualité du modèle, celui-ci nous montre juste s'il est "mieux que rien" (sous-entendu le modèle naïf), en d'autres termes, s'il est pertinent.

critere C2MP- BV Yonne-amont

periode1



periode 2

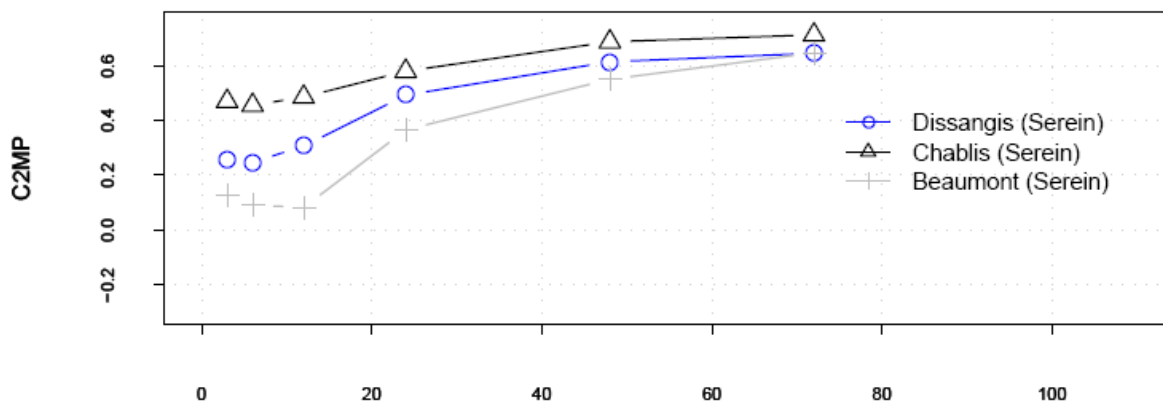


échéance (heure)

Figure 21 : tableau de synthèse des critères de persistance en validation pour le sous bassin versant de l'Yonne amont sur les deux périodes

critere C2MP- BV Serein

periode1



periode 2

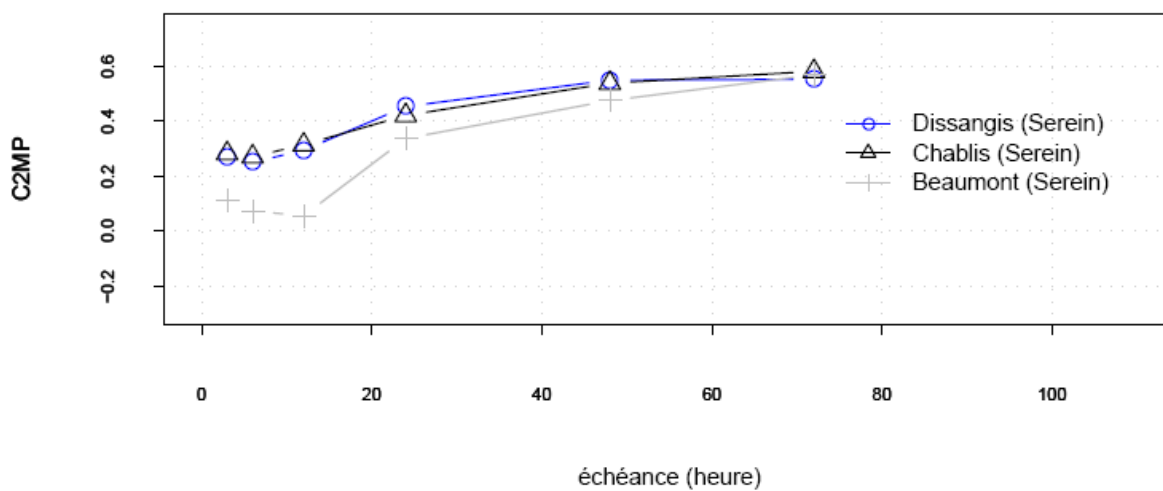
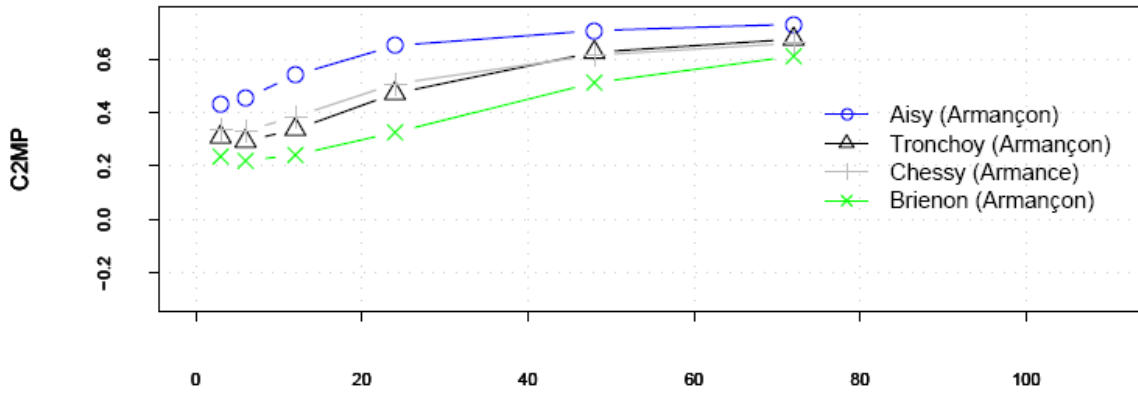


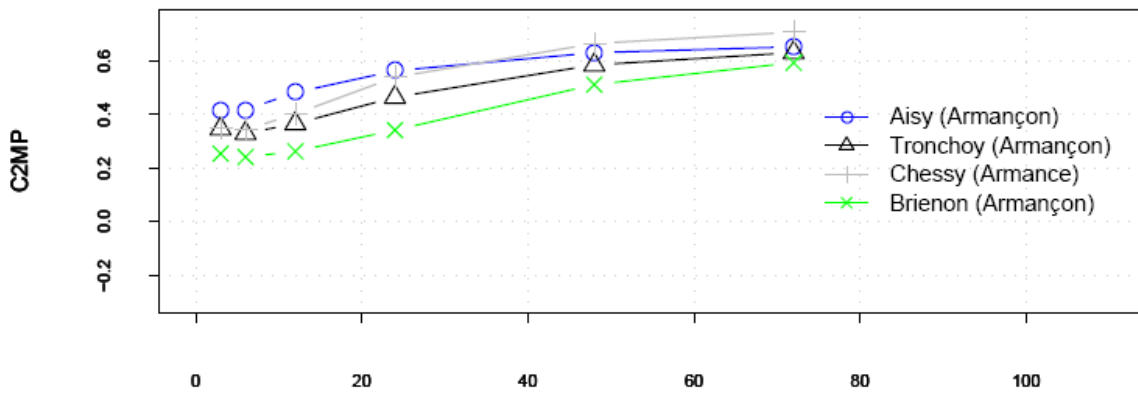
Figure 22 : tableau de synthèse des critères de persistance en validation pour le sous bassin versant du Serein sur les deux périodes

critere C2MP- BV Armançon

periode1



periode 2

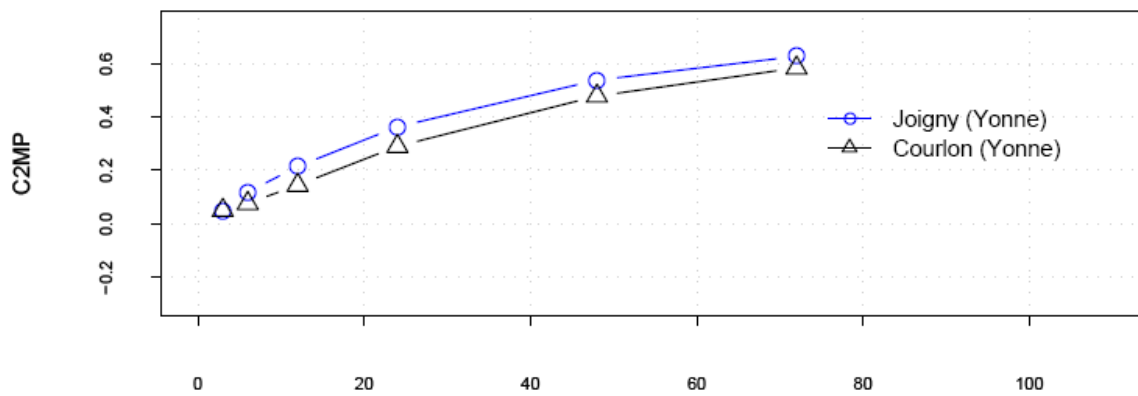


échéance (heure)

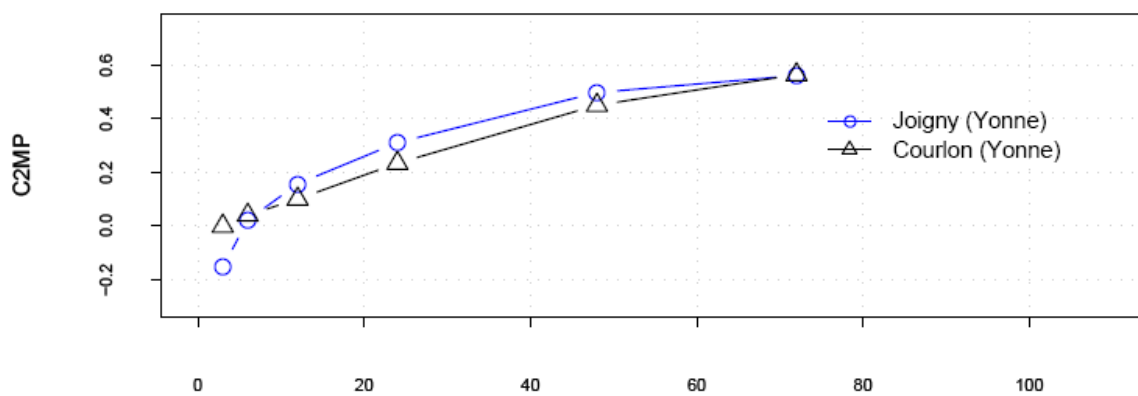
Figure 23 : tableau de synthèse des critères de persistance en validation pour le sous bassin versant de l'Armançon sur les deux périodes

critere C2MP- BV Yonne-aval

periode1



periode 2



échéance (heure)

Figure 24 : tableau de synthèse des critères de persistance en validation pour le sous bassin versant de l'Yonne aval sur les deux périodes

critere C2MP- BV Loing

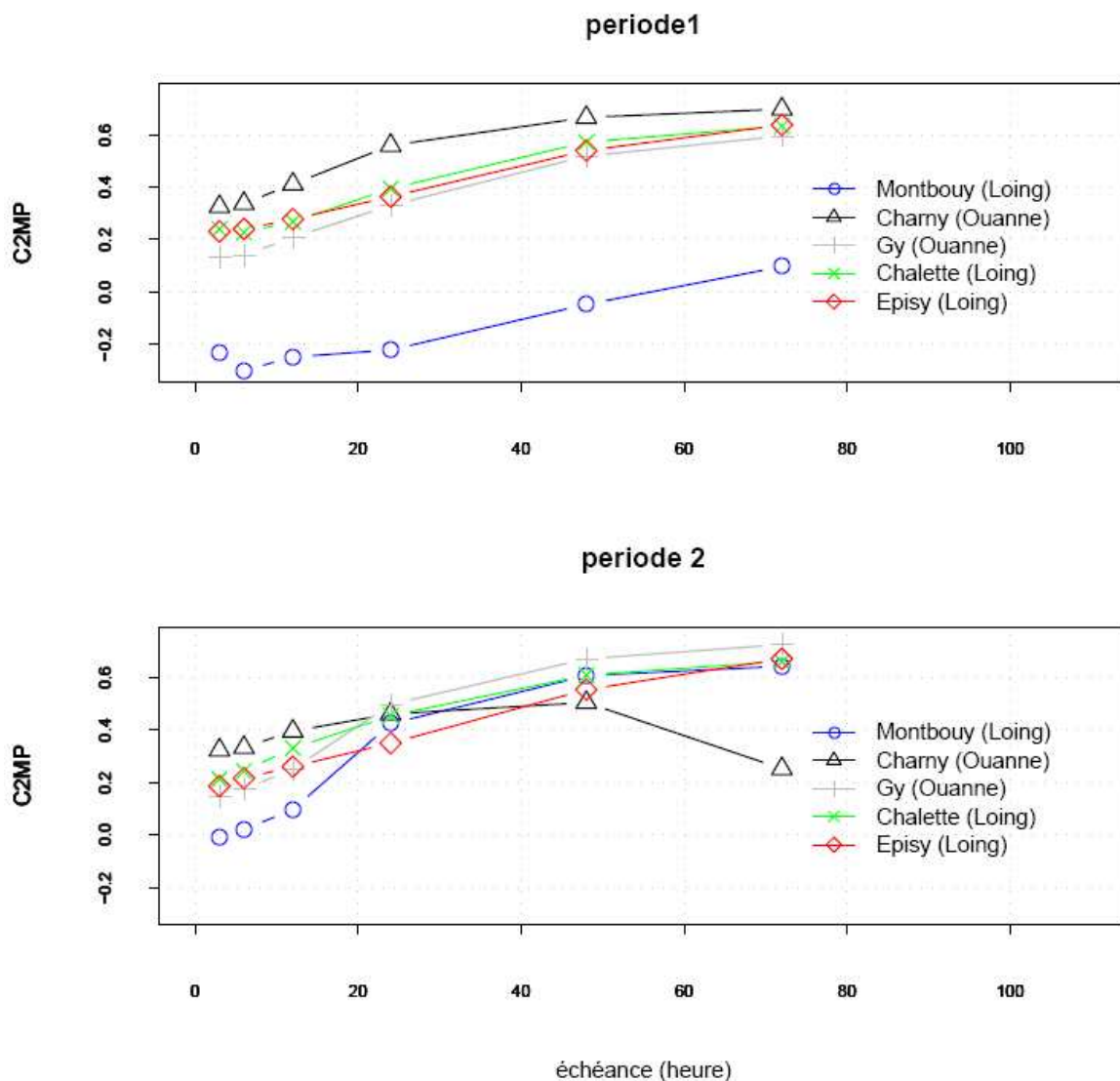


Figure 25 : tableau de synthèse des critères de persistance en validation pour le sous bassin versant du Loing sur les deux périodes

Synthèse des résultats :

Dans l'ensemble, on obtient de bons résultats, dans la mesure où en générale le modèle GR3P est meilleur que le modèle naïf (persistance supérieur à zéro).

On donne un exemple d'hydrogramme débit observé/prévu en crue pour l'Yonne à Gurgy : On a tracé en noir le débit observé et en bleu le débit prévu à 72 heures ainsi que l'ensemble des prévisions (à chaque échecance) en quelques points d'émission.

H2221010 hydrogramme observé-prévu crue2 3820km²

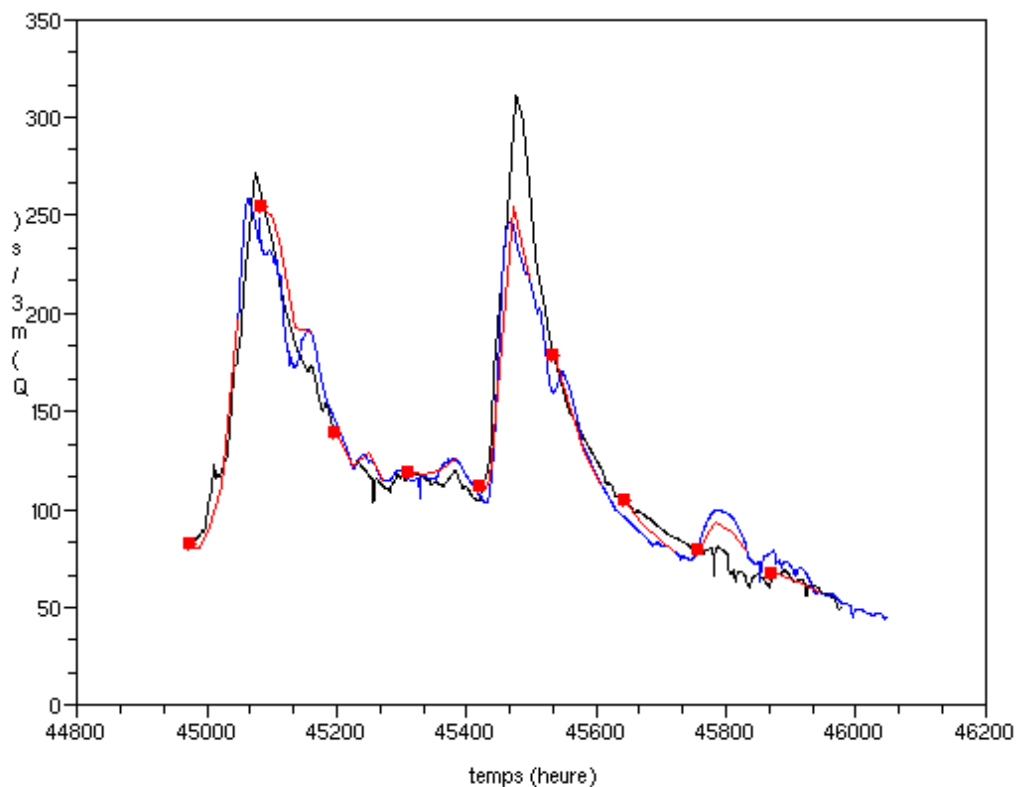


Figure 26 : crue de Février 1999 sur l'Yonne à Gurgy, en noir, le débit observé et en bleu le débit prévu à 72h

Sur cette hydrogramme, on observe que les deux pics de crue sont bien prévus par le modèle, non seulement sur toutes les petites échéances, mais également sur les grandes. La prévision à 72 heures est ici relativement précise.

En plus des problèmes à Montbouy ou à Charny, dont nous avons parlé dans les parties précédentes, on note, au regard des graphiques de synthèses un problème à la station de Beaumont sur Serein : sur les deux périodes, le critère décroît entre l'échéance à 3heures et à 12 heures, pour après reprendre des valeurs normal (croissantes).

On donne un exemple d'hydrogramme avec la même présentation que précédemment pour le Serein à Beaumont :

H2342030 hydrogramme observé-prévu crue2 1340km²

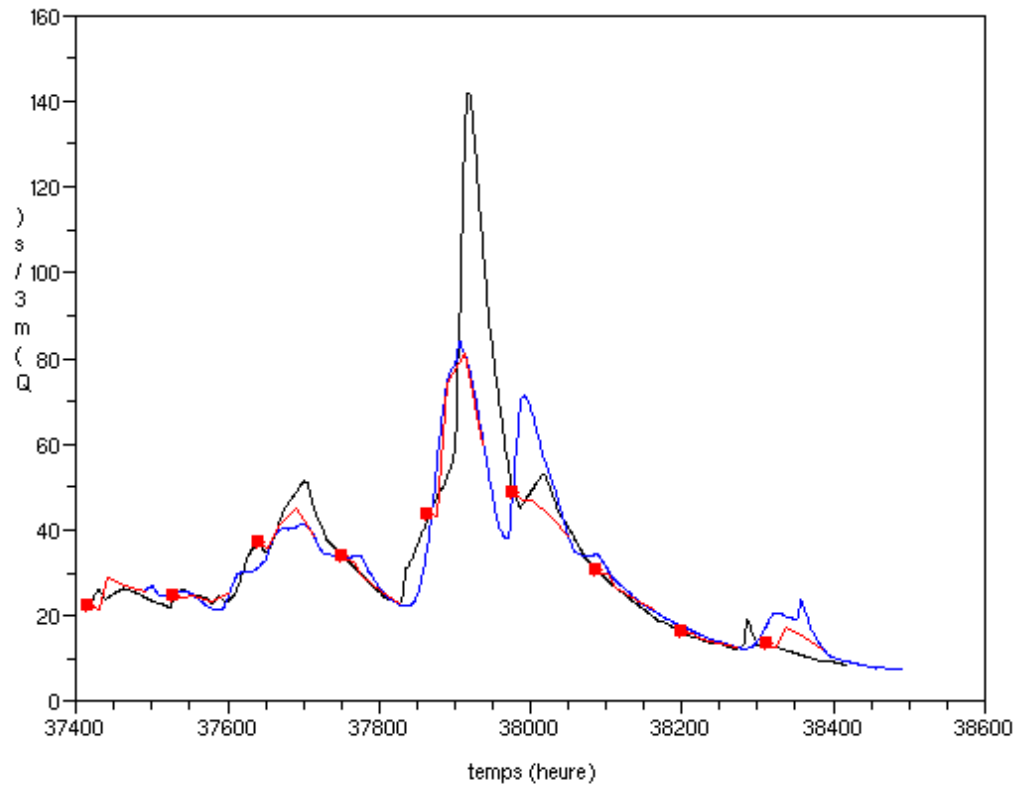


Figure 27 : crue de Avril 1998 sur le Serein à Beaumont, en noir, le débit observé et en bleu le débit prévu à 72h

Sur l'hydrogramme ci-dessus on constate une grosse erreur sur l'estimation de la pointe de crue. On constate qu'effectivement, pour les courtes échéances, une plus grosse erreur est commise. D'autre part le modèle a prévu un enchainement de deux pics beaucoup plus petits, ce qui constitue une grosse erreur, qui ne sera pas acceptable en contexte opérationnel.

On donne également l'hydrogramme de la station du Serein à Chablis qui a un problème de stabilité de paramètres (cf. III.2.) mais dont les critères ne posent pas de problème (figure 28) :

H2342020 hydrogramme observé-prévu crue2 1120km²

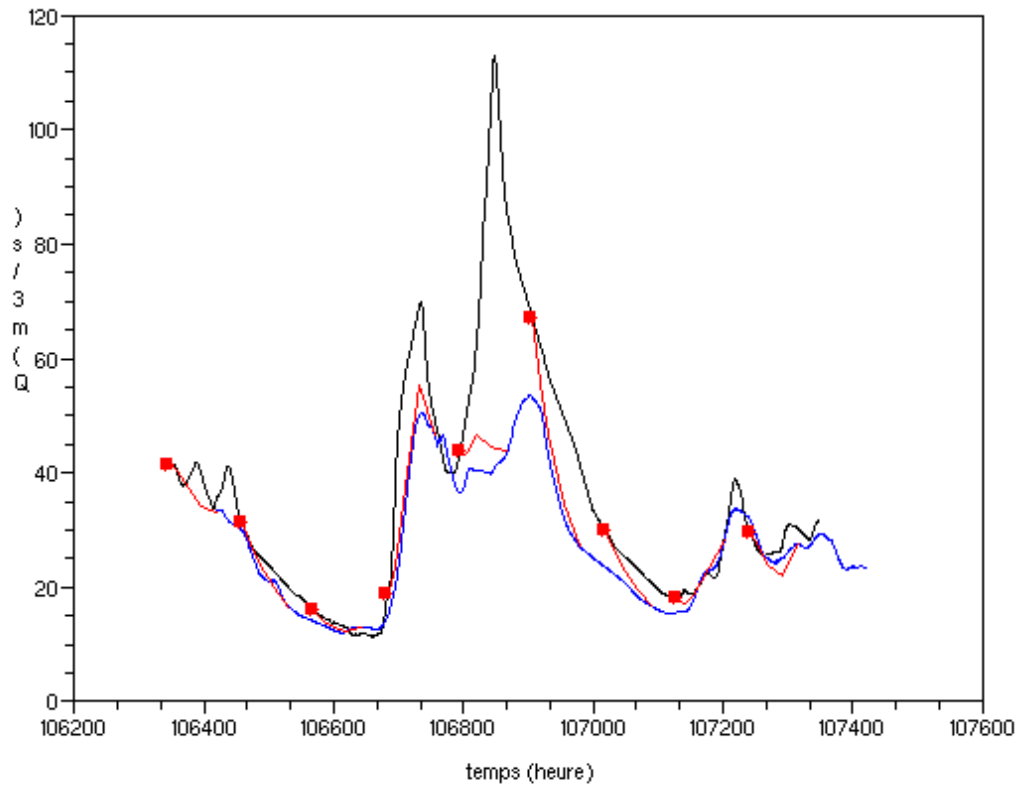


Figure 28 : crue de Mars 2006 sur le Serein à Chablis, en noir, le débit observé et en bleu le débit prévu à 72h

Cette exemple montre bien un problème dans l'application du modèle, les crues étant mal anticipées (lecture "horizontale") et mal quantifiées (lecture "verticale").

Conclusion

En conclusion, les premiers résultats de cette étude montrent que le modèle GR3P, dans l'ensemble, s'applique bien sur le bassin de la Seine-amont, les périodes sont homogènes, il est robuste et en général meilleur que le modèle "naïf". Ce constat est cependant à nuancer pour les courtes échéances de prévision (3h) où le modèle naïf est plus difficile à battre.

Des problèmes de calage sont cependant survenus sur les stations du Loing à Montbouy et de l'Ouanne à Charny. Il s'agit probablement d'une mauvaise initialisation lors de l'optimisation des paramètres. Ce problème devra être résolu par la suite.

En revanche, pour le Sauzay à Corvol et le Serein à Chablis des problèmes de données rendent le modèle mal applicable (problème du nombre de pluviomètre disponible).

Il reste à affiner l'analyse pour comprendre les problèmes de stabilité ou éventuellement de performance pour les stations de Beaumont sur Serein et l'Yonne à Joigny et Courlon

Perspectives

Ce stage se poursuit encore pour une durée de un mois. Outre les problèmes évoqués plus haut, plusieurs points restent à étudier :

- calcul d'autres critères que la persistance pour mieux se rendre compte de la qualité des prévisions (RMSE, graphique des erreurs Qobs/Qcal) ;
- calcul des critères, non pas sur toute la chronique, mais simplement sur les parties "sensibles", telles les montées de crue, qui intéressent les prévisionnistes ;
- analyse de sensibilité des pluies futures (ici toute l'étude ayant été faite en pluie futures parfaite).

Bibliographie

CEMAGREF (2005), Inventaire et diagnostic des modèles simples de prévision des crues déjà existant sur le bassin de la Seine, CEMAGREF, Antony, rapport destiné à la DIREN Île-de-France.

Tangara (2007), Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global, thèse de doctorat, école doctorale des sciences de la vie et de la terre, CEMAGREF, Antony

Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V. (2003), Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4): 275-289

Oudin (2004), Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Ph.D, Cemagref, Paris, France.

Cemagref (2007), Cours d'hydrologie appliquée. UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, Cemagref, Antony, 101 p.

DHI-SAFEGE (2007), réalisation d'un outil de prévision des crues pour le SPC "Seine moyenne, Yonne, Loing".DHI-SAFEGE.

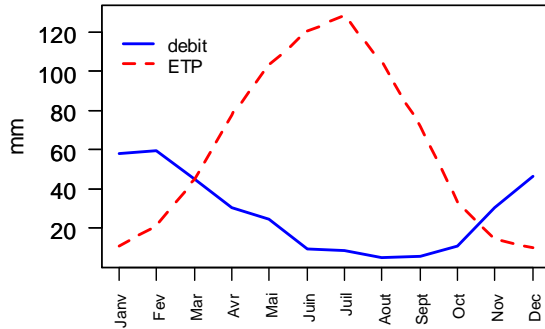
Annexe 1: Glossaire

- **Bassin versant** : Surface d'alimentation par la pluie d'un point de la rivière. Ses limites sont le plus souvent définies par la topographie: elles sont représentés par des lignes de crête (ligne de partage des eaux), et regroupent les surfaces surplombant la rivière alimentée par ce bassin.
- **Evapotranspiration**: Quantité d'eau transférée du sol vers l'atmosphère par évaporation et transpiration des plantes.
- **Evapotranspiration potentielle (ETP)** : Quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée sous un climat donné par un couvert végétal continu bien alimenté en eau. Elle comprend donc l'évaporation du sol et la transpiration de la végétation d'une région donnée pendant le temps considéré. Elle s'exprime en hauteur d'eau.
- **Evapotranspiration réelle** : Quantité totale d'eau qui s'évapore du sol et des plantes lorsque le sol est à son taux d'humidité naturel.

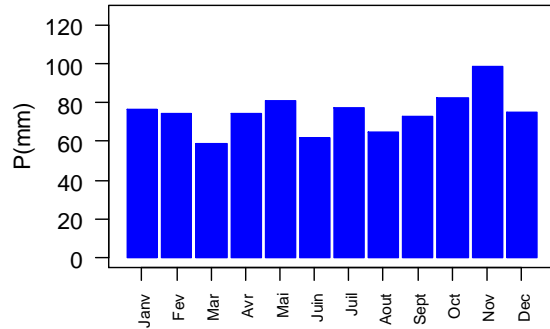
Annexe 2 : moyenne interannuelle des cumuls mensuels d'ETP, de pluie et de débit pour des bassins versants représentatifs du régime hydrologique de la zone étudié

L'Armançon à Tronchoy :

moyenne interannuelle des cumuls mensuels d'ETP et de Débit
H2462020

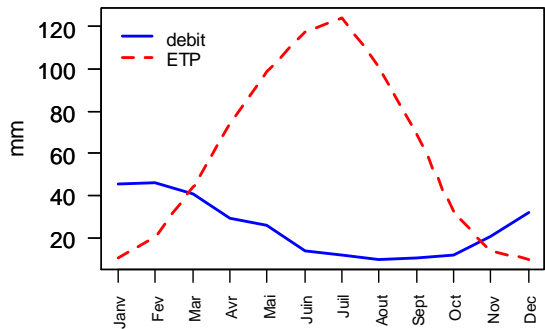


moyenne interannuelle des cumuls mensuels de pluie
H2462020

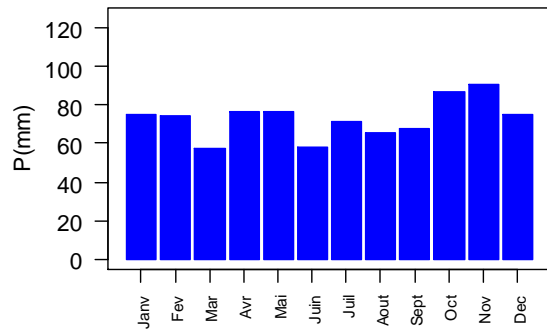


L'Yonne à Courlon :

moyenne interannuelle des cumuls mensuels d'ETP et de Débit
H2721010

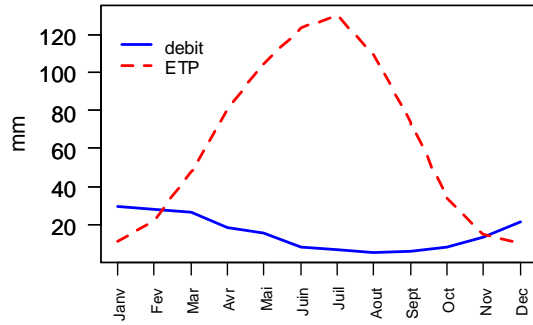


moyenne interannuelle des cumuls mensuels de pluie
H2721010

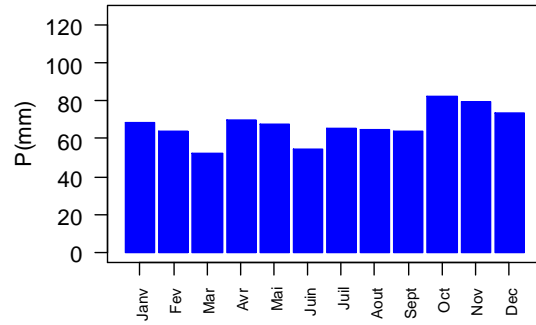


Le Loing a Episy :

moyenne interanuuelle des cumuls mensuels d'ETP et de Débit
H3621010

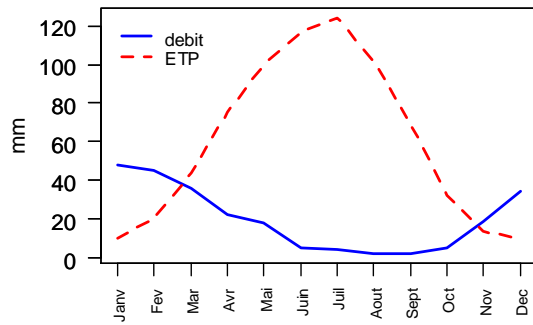


moyenne interanuuelle des cumuls mensuels de pluie
H3621010

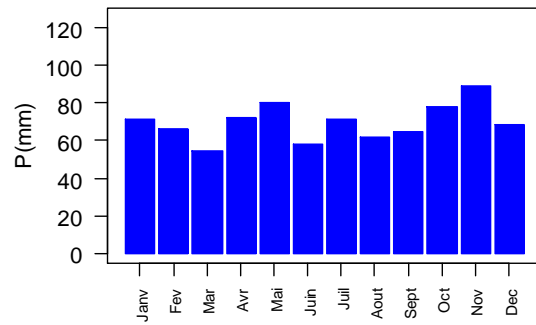


Le Serein à Chablis:

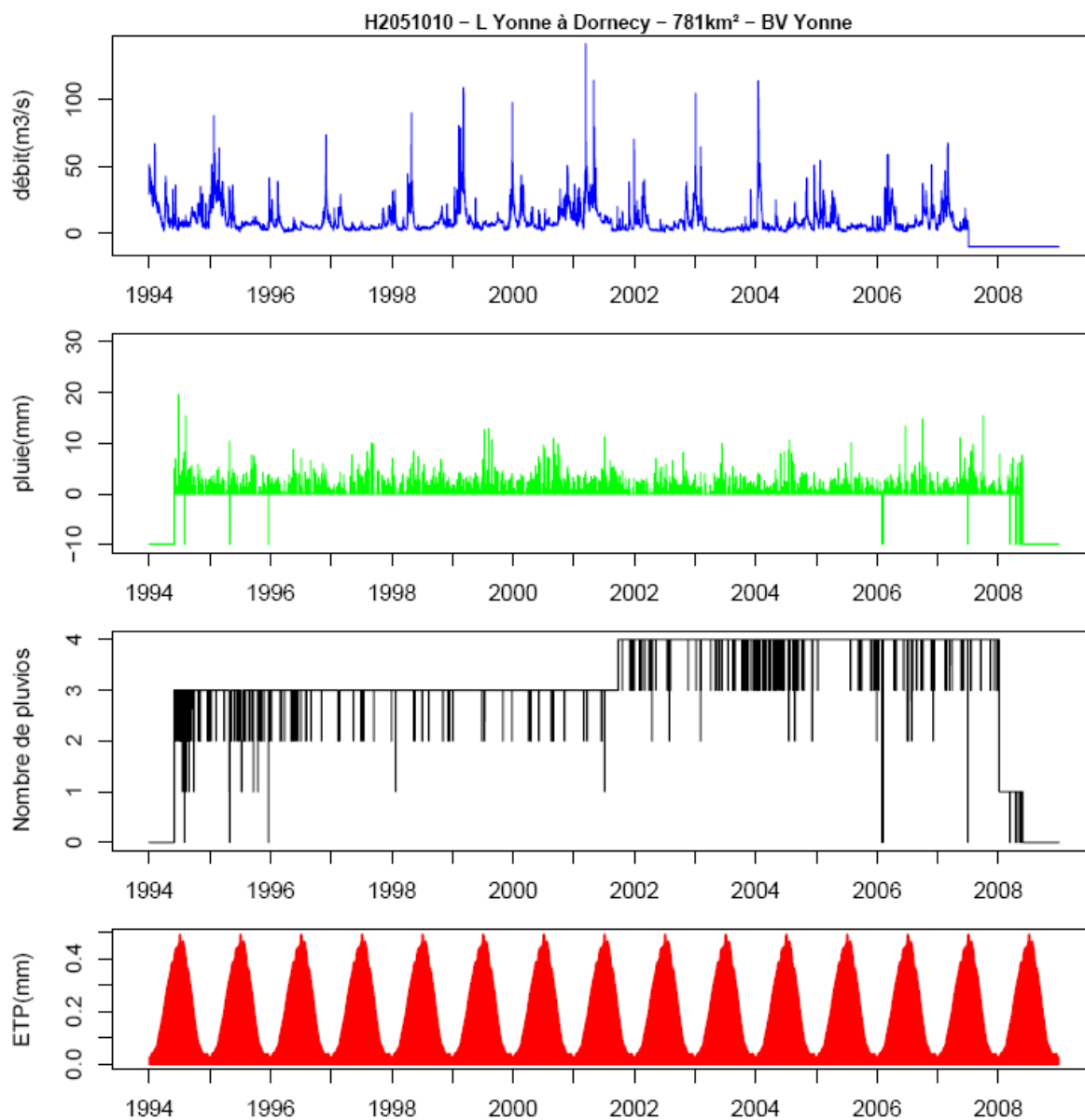
moyenne interanuuelle des cumuls mensuels d'ETP et de Débit
H2342010

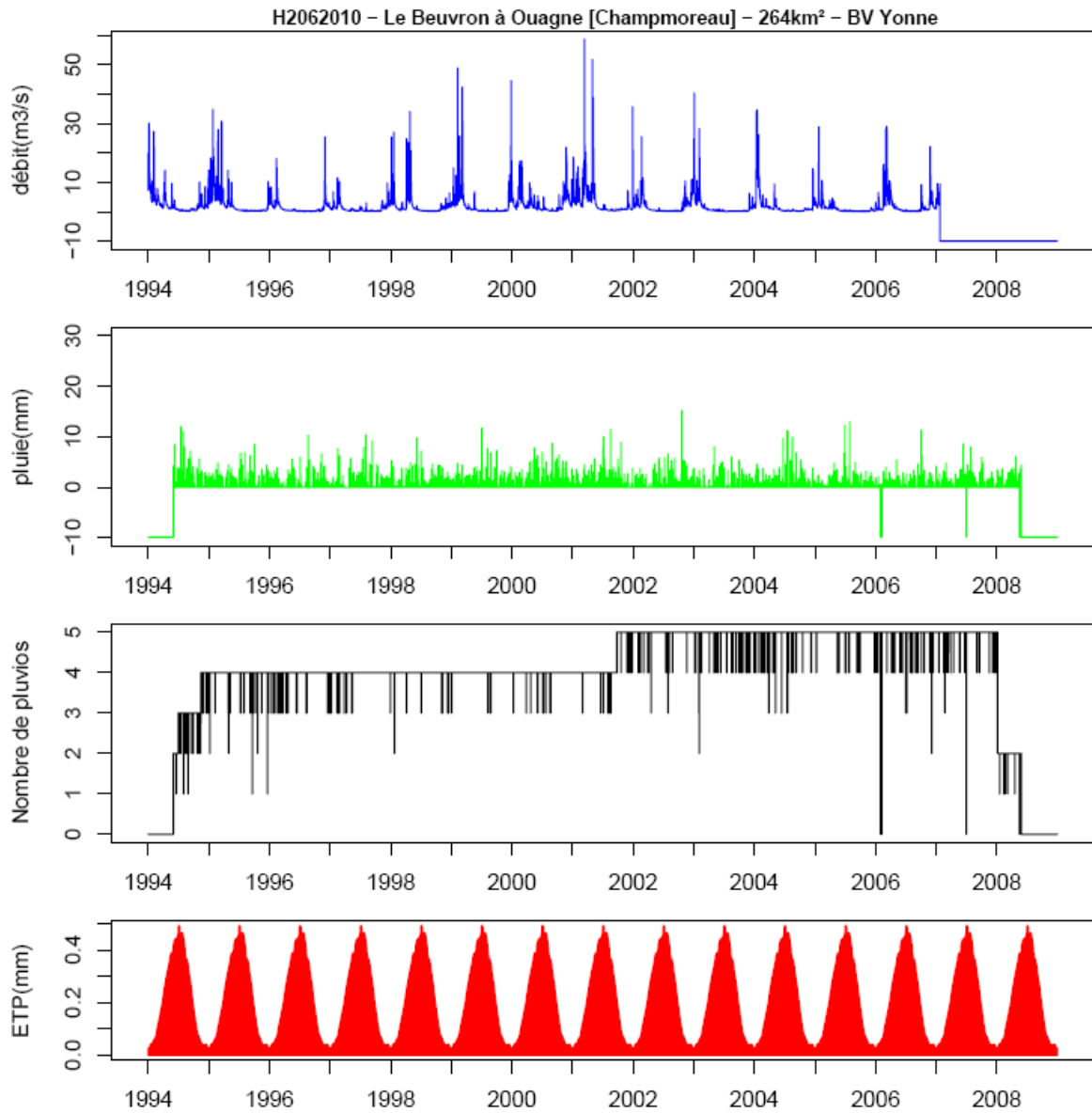


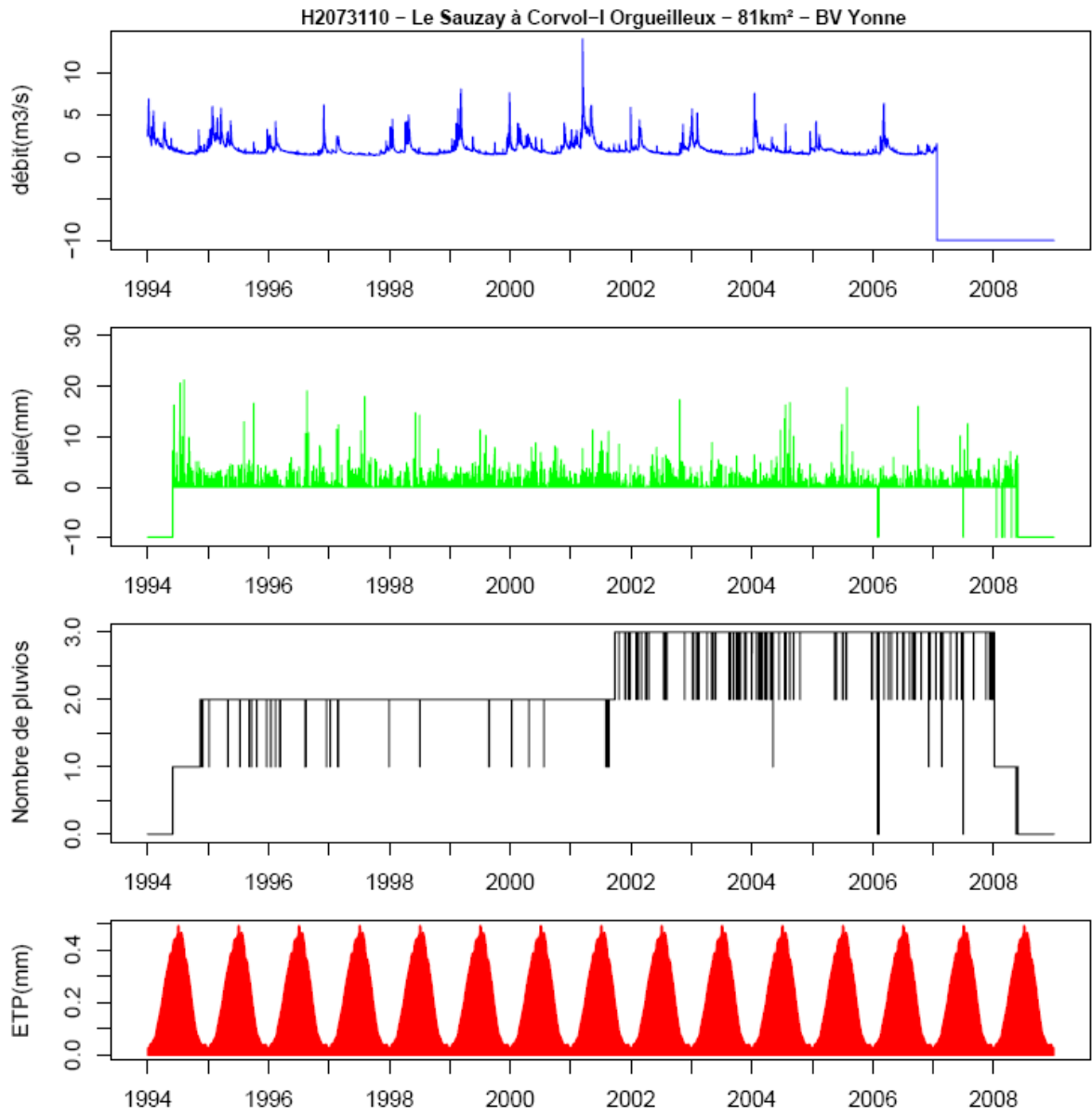
moyenne interanuuelle des cumuls mensuels de pluie
H2342010

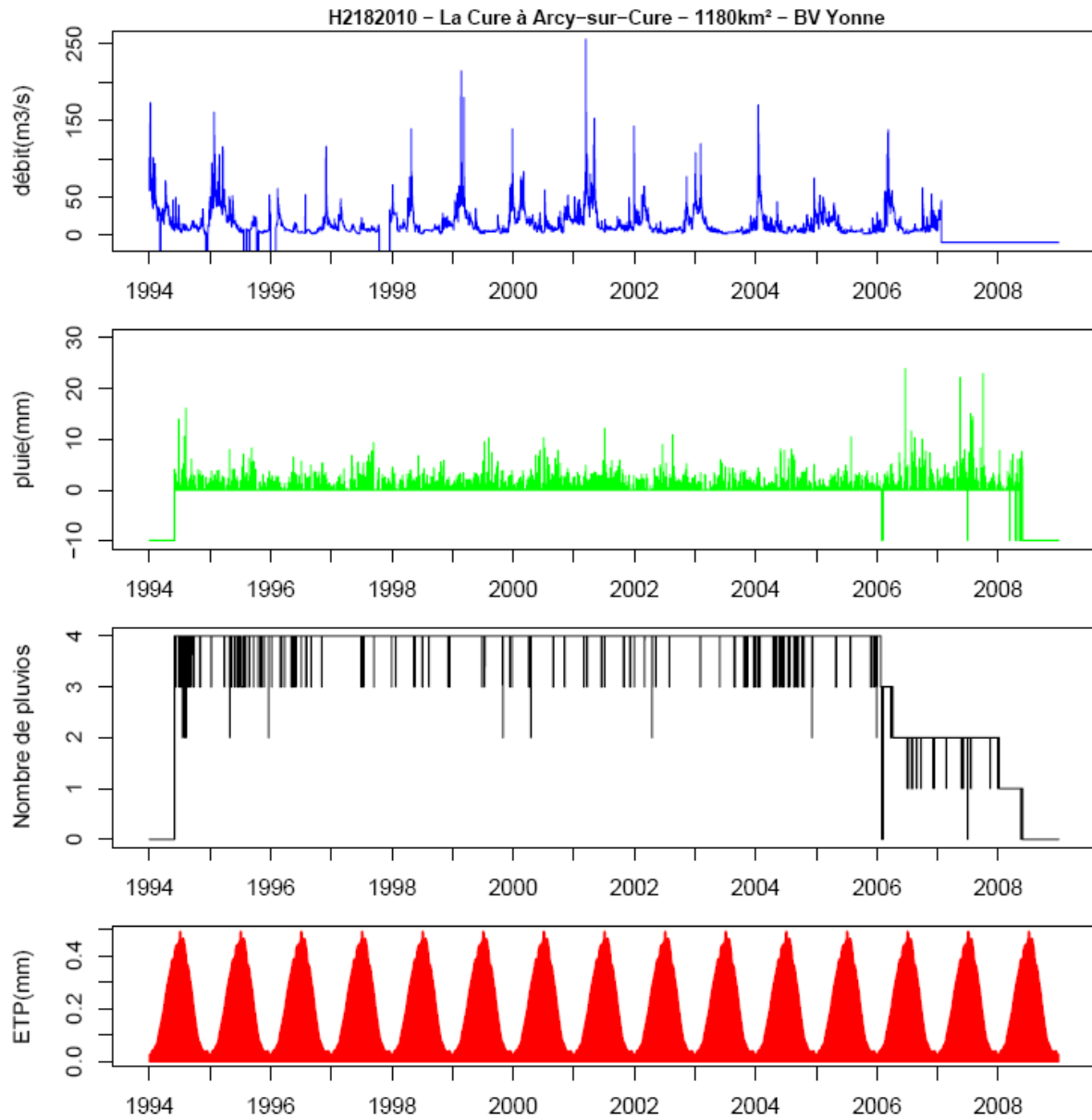


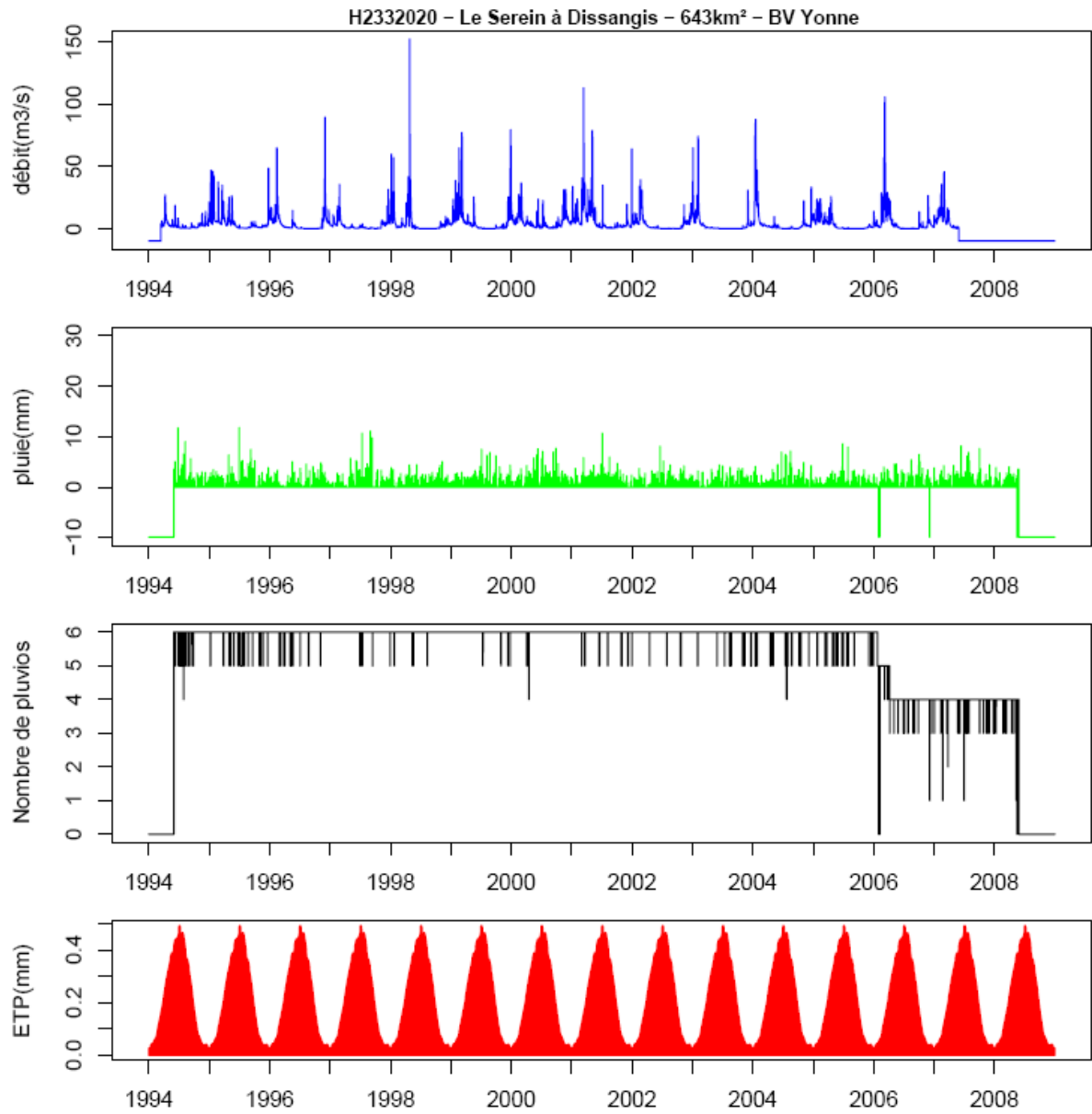
Annexe 3 : présentation des données mises en formes pour l'étude :

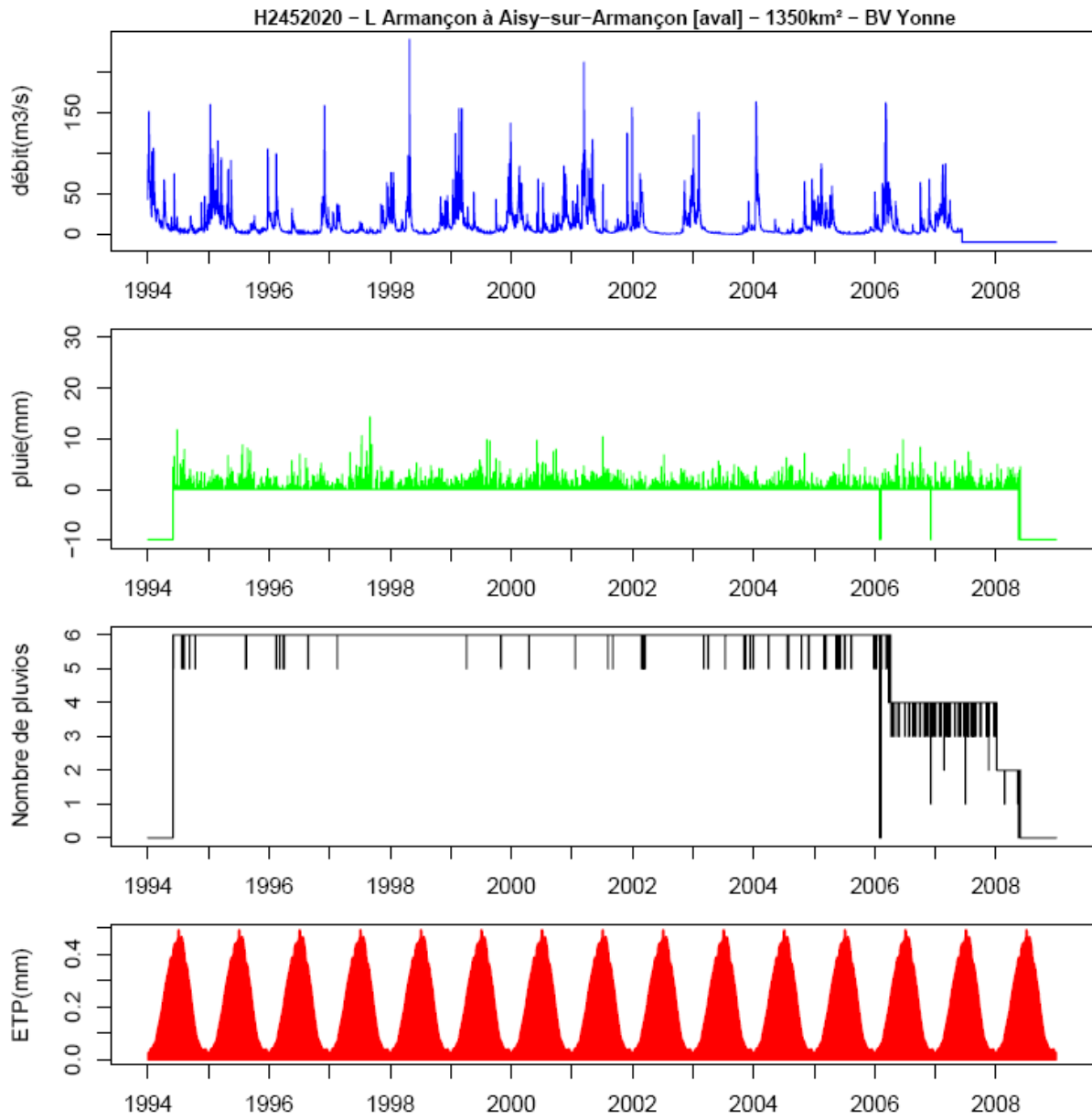


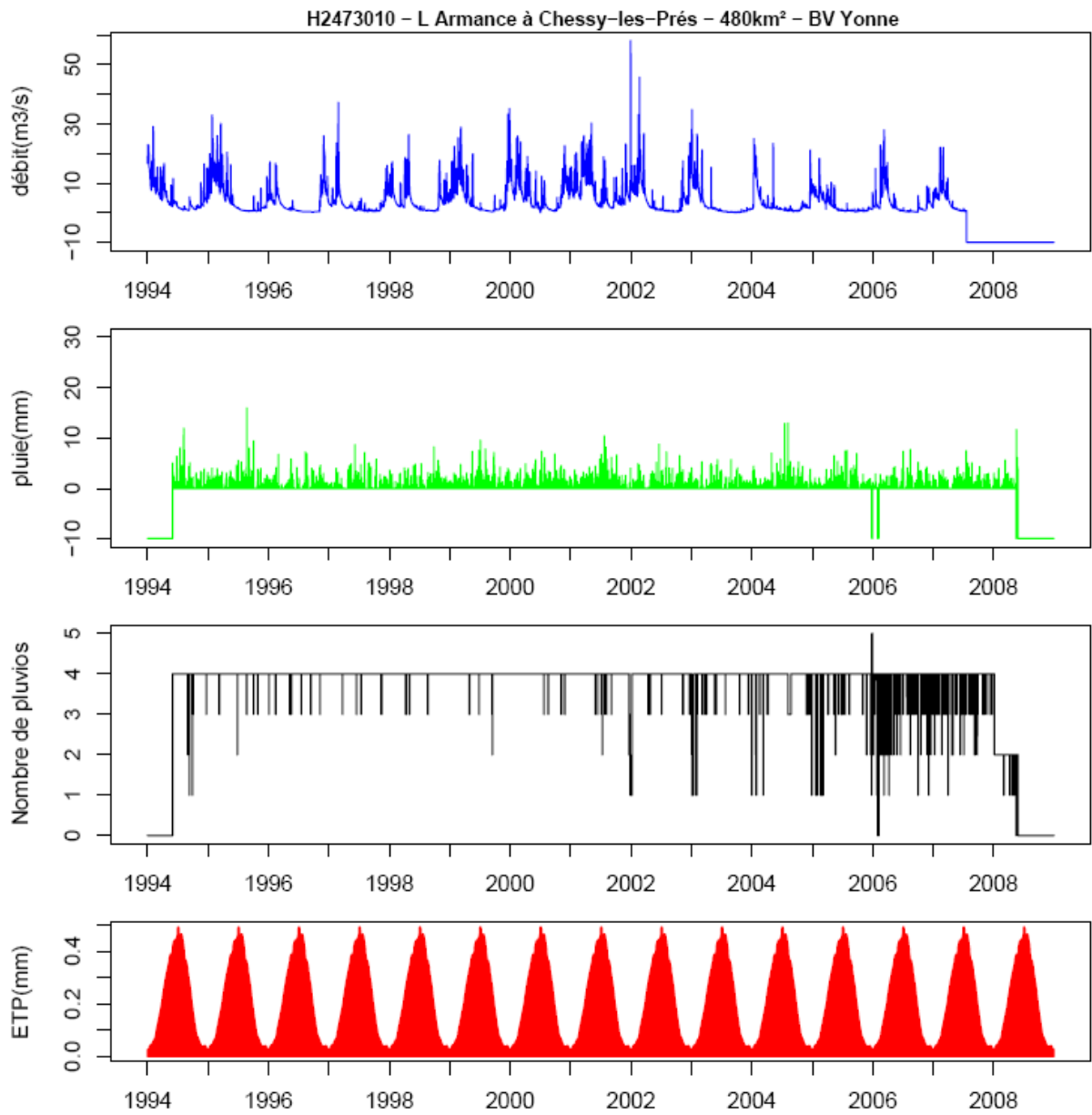


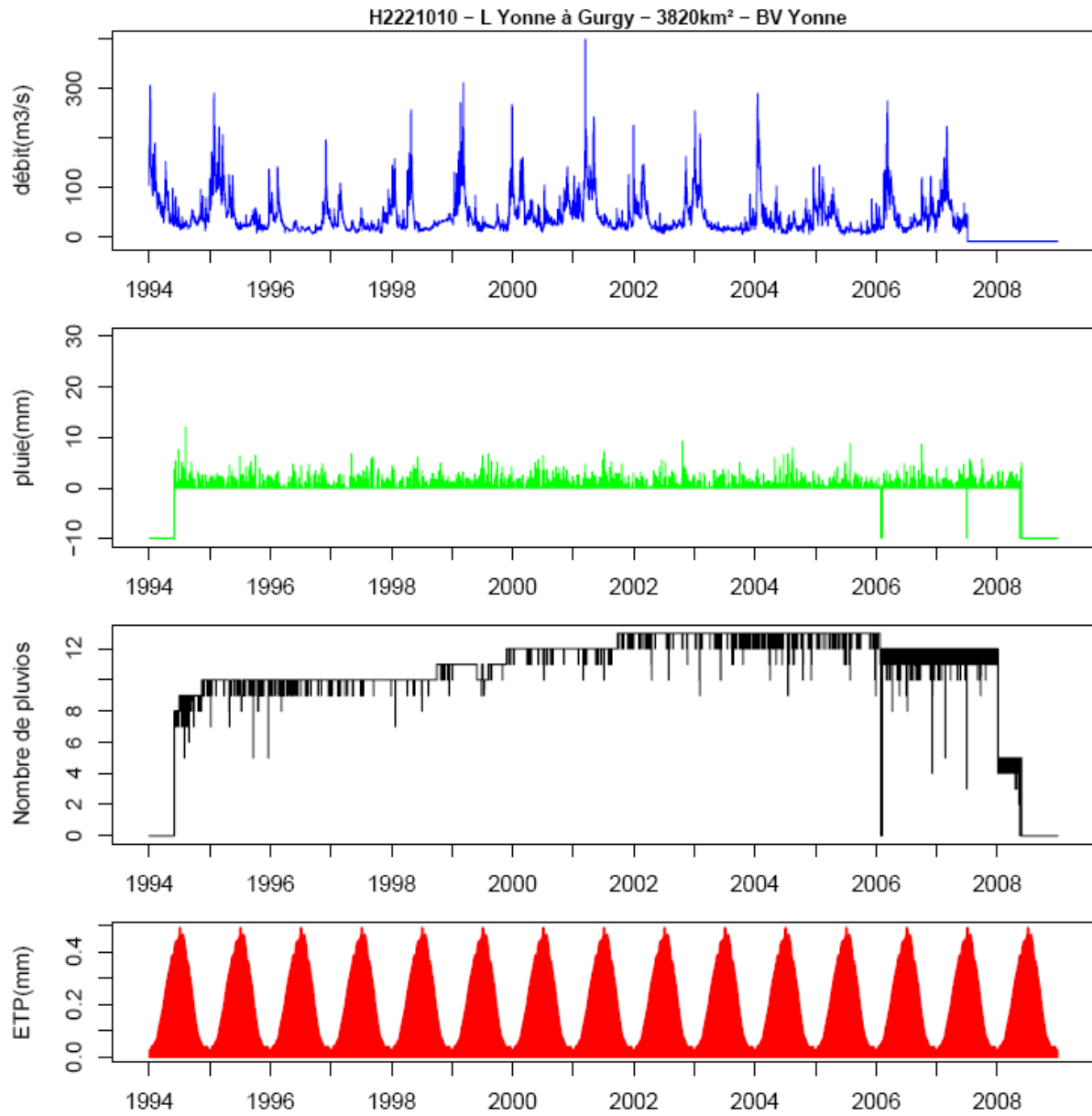


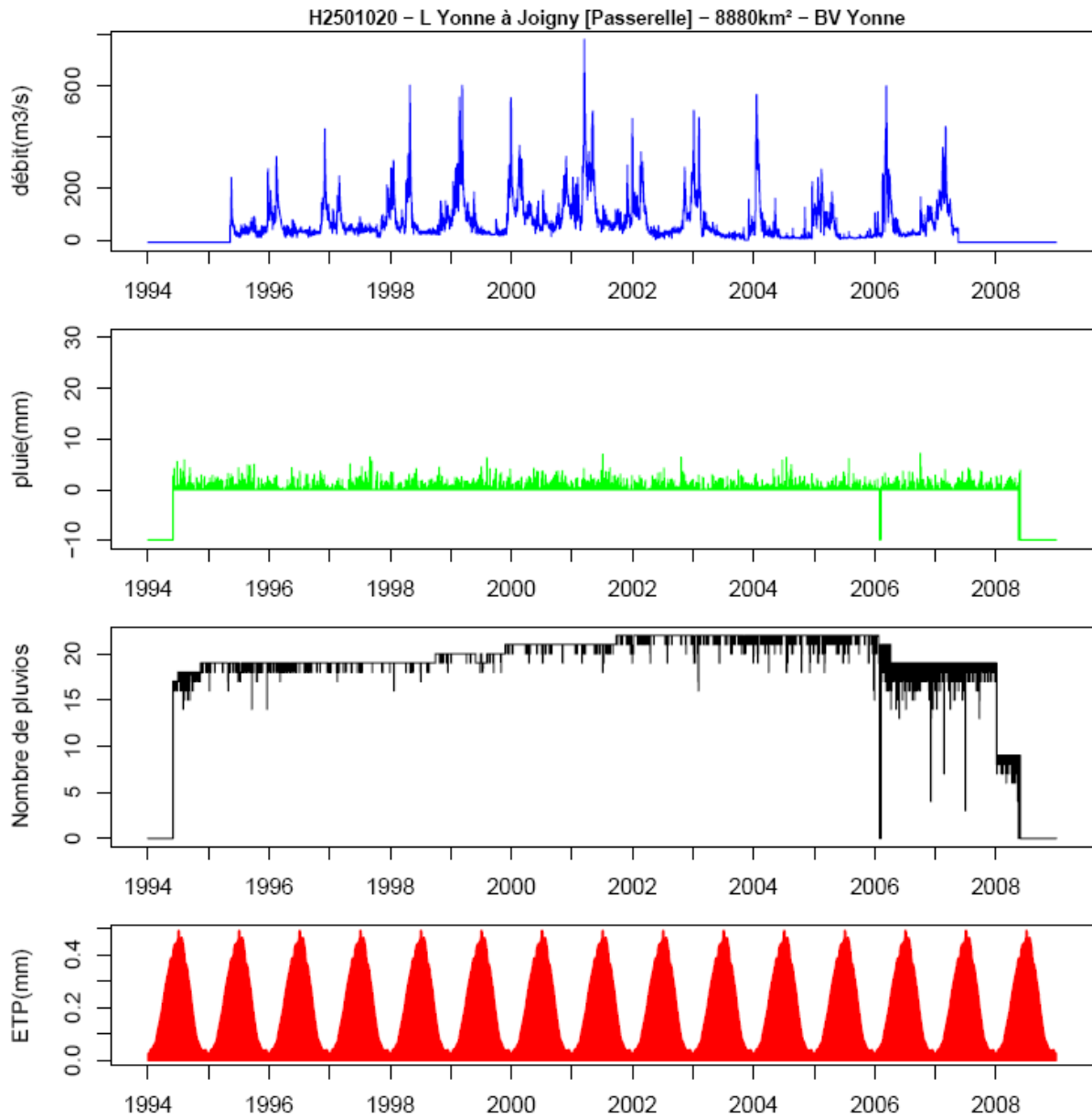


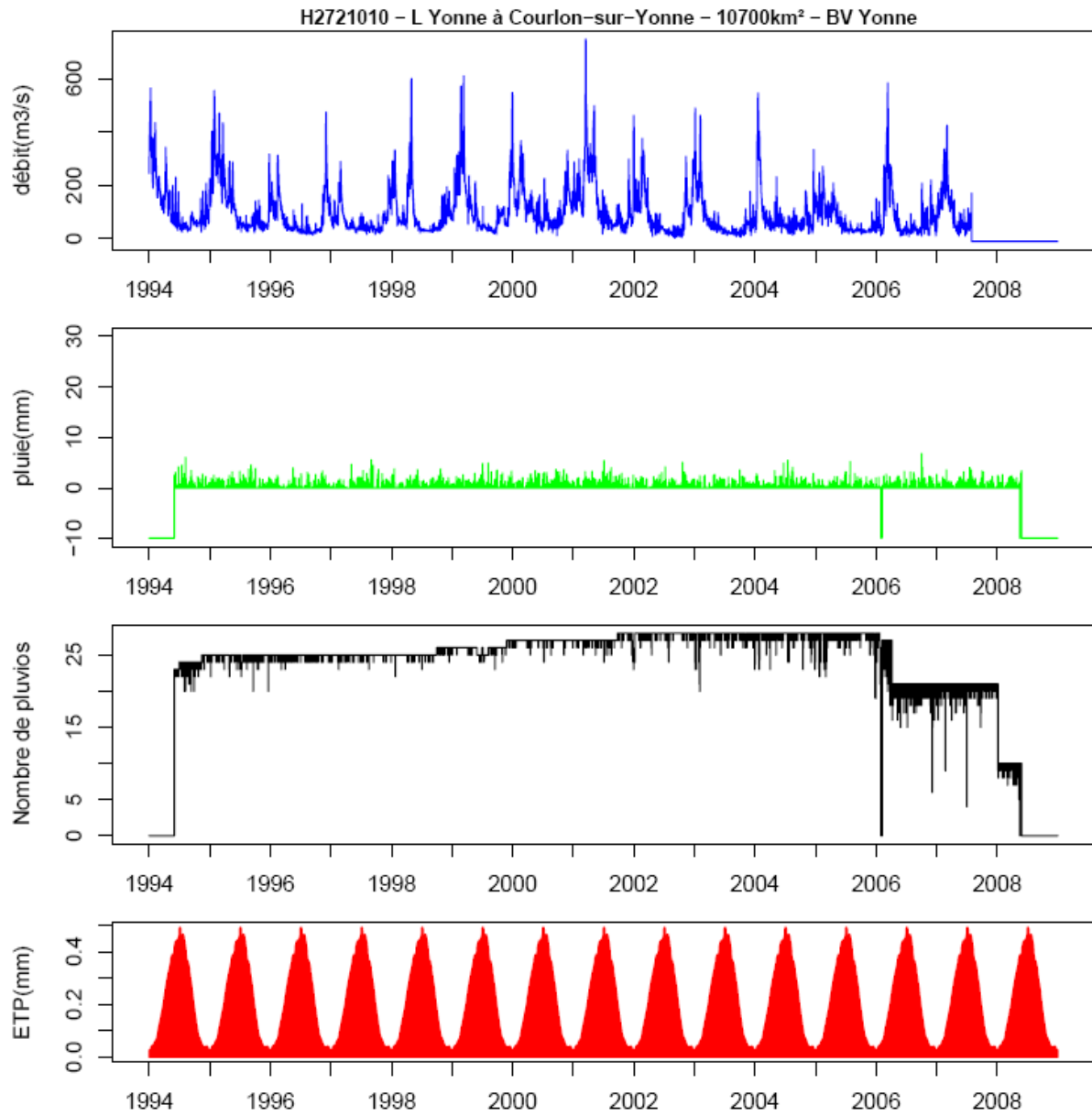


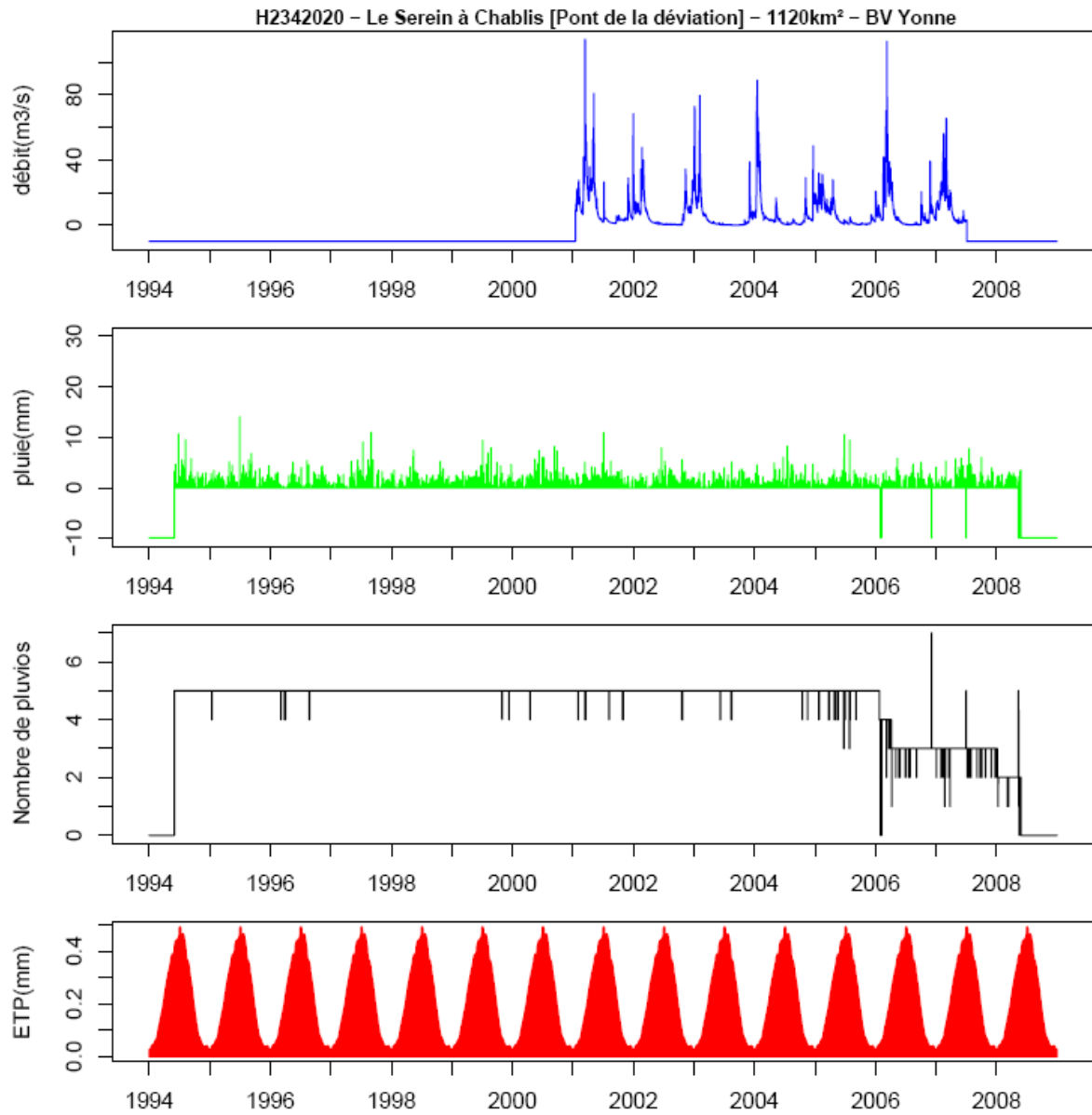


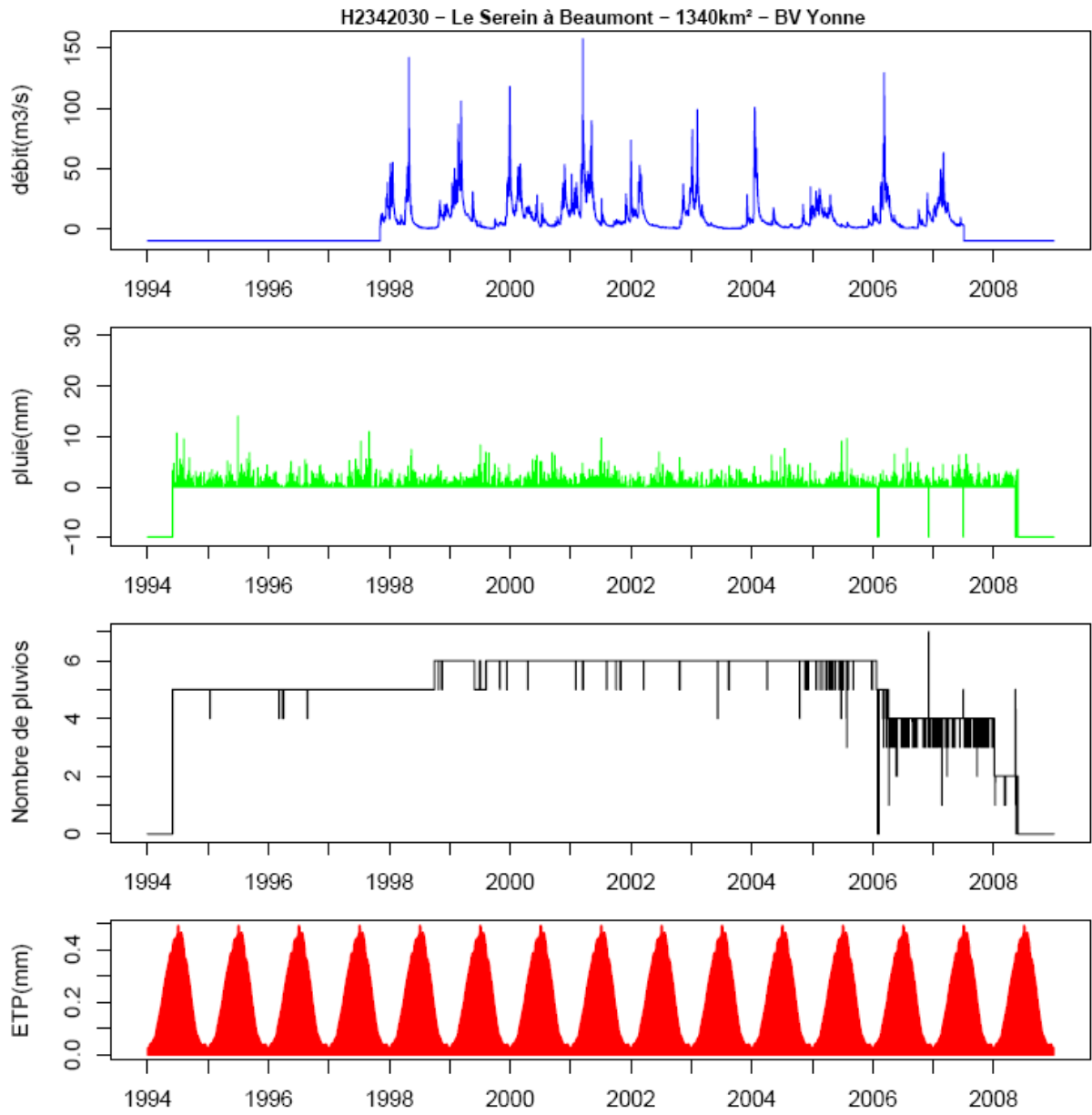


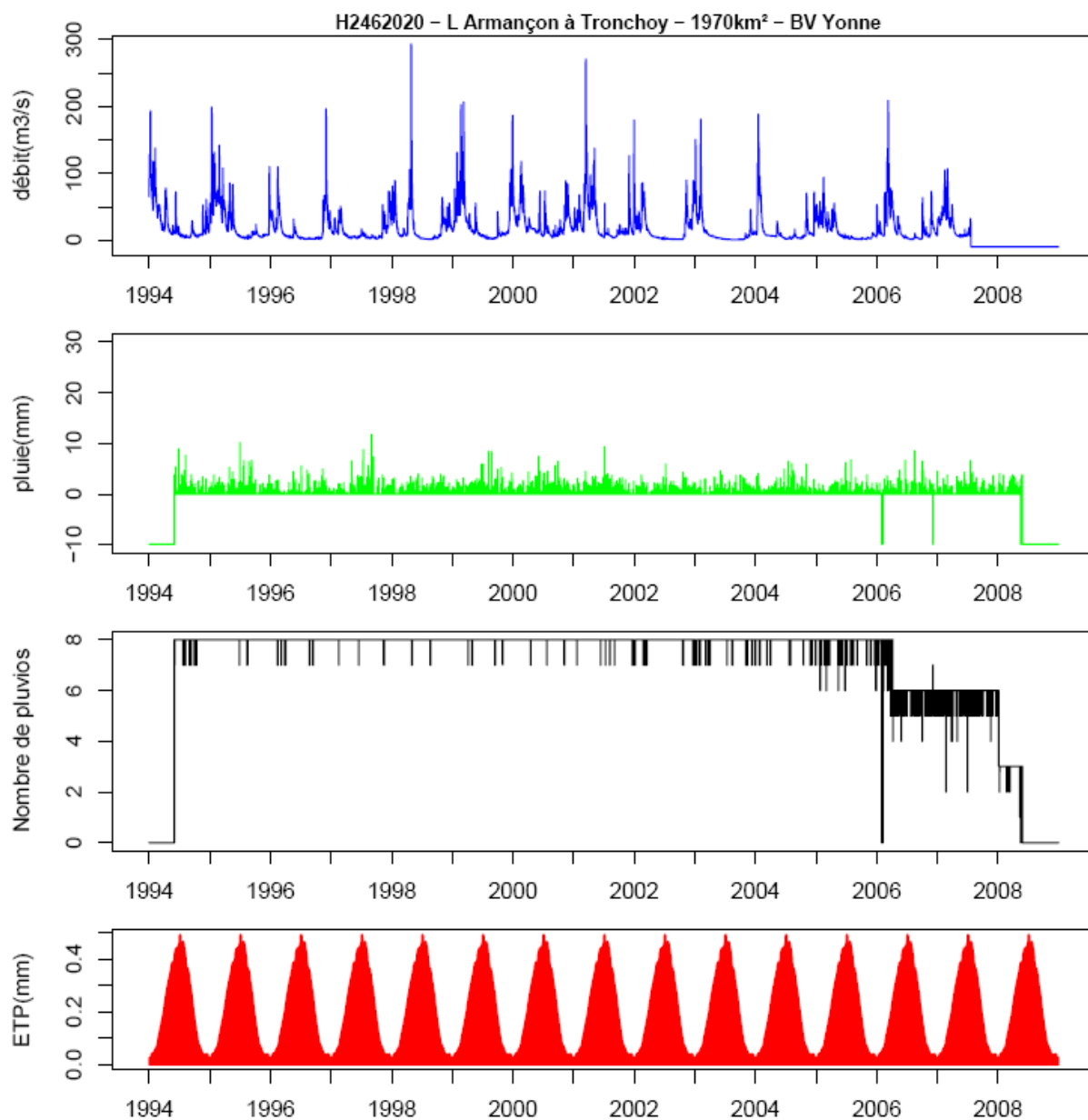


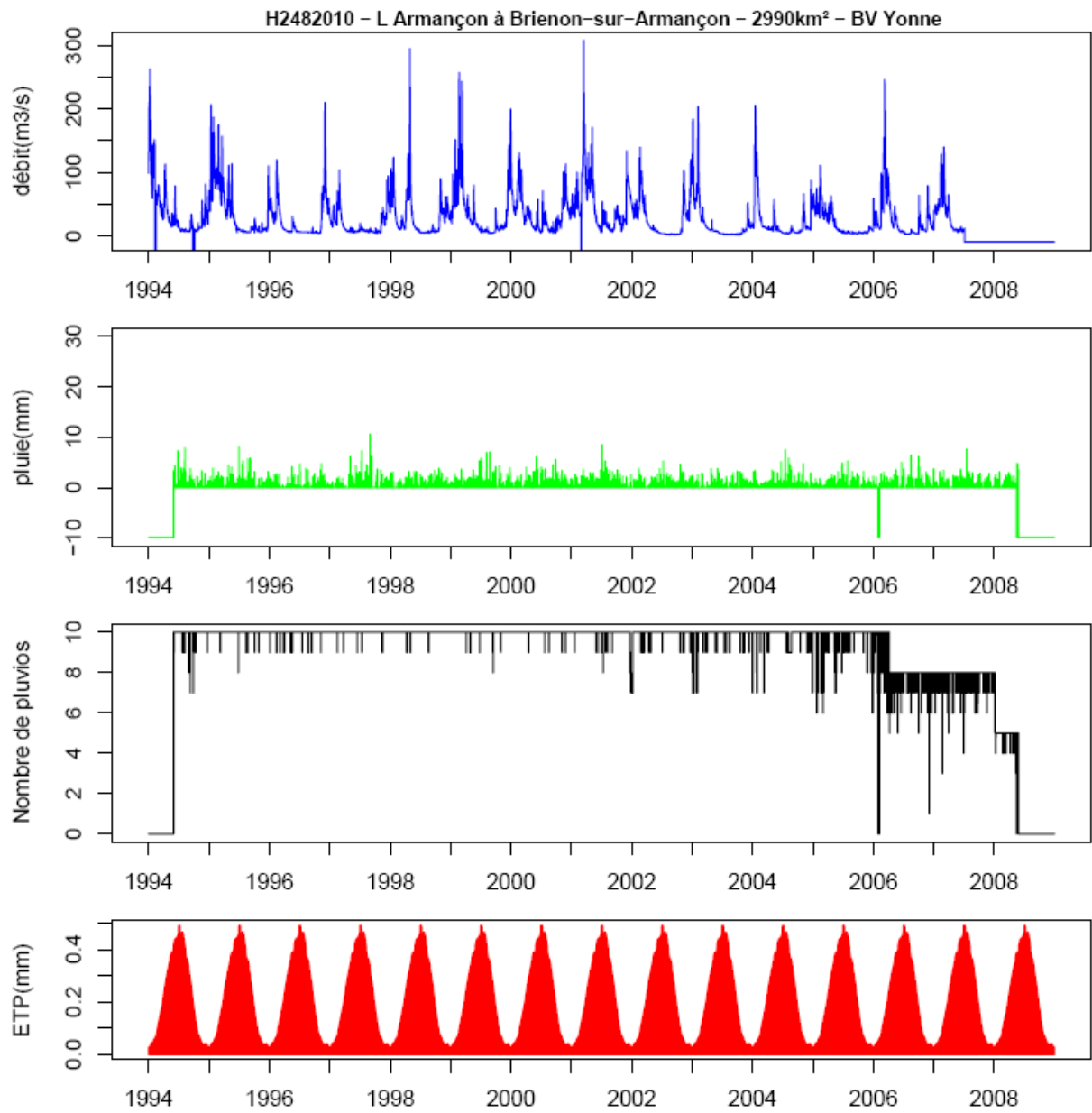


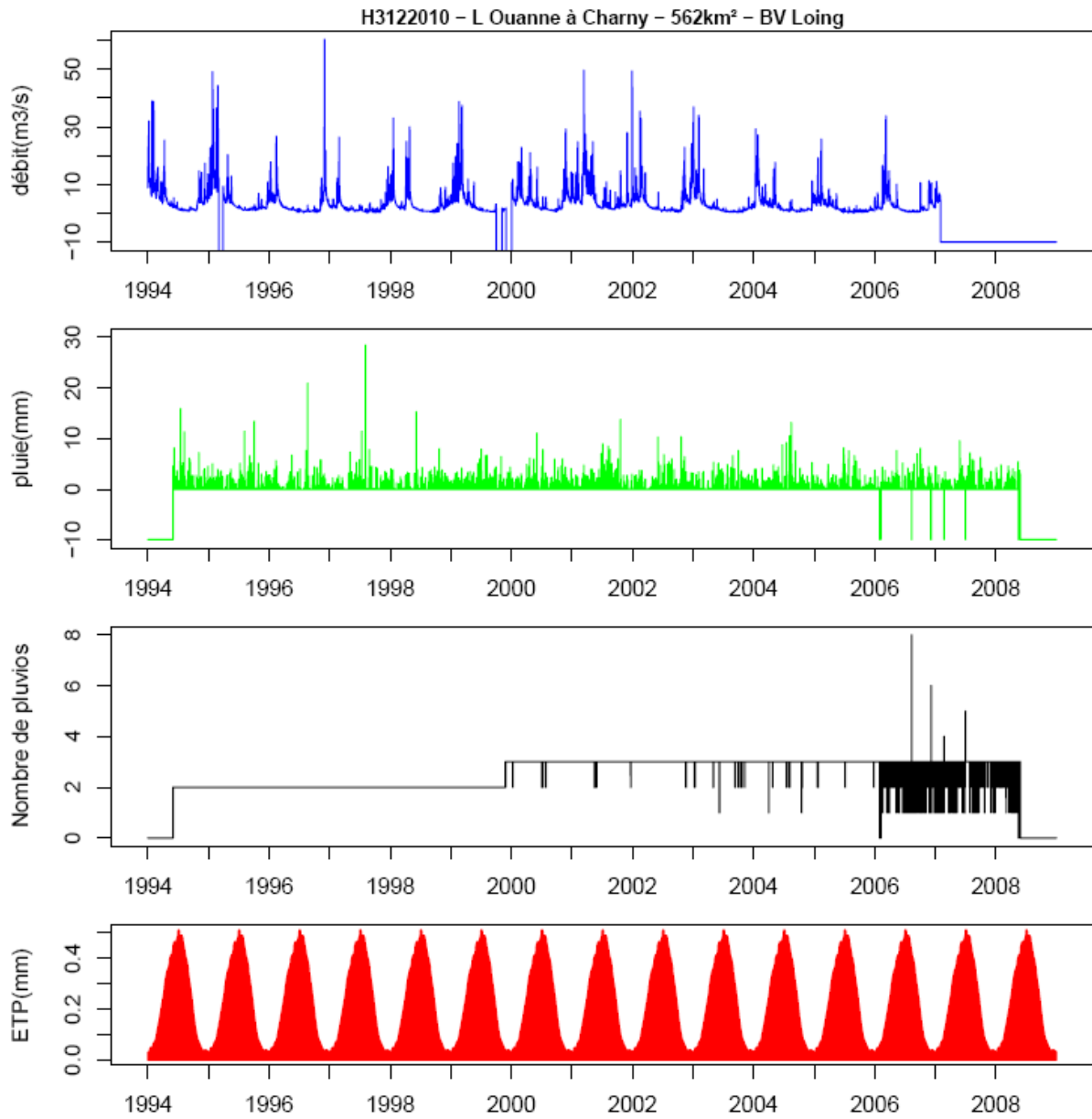


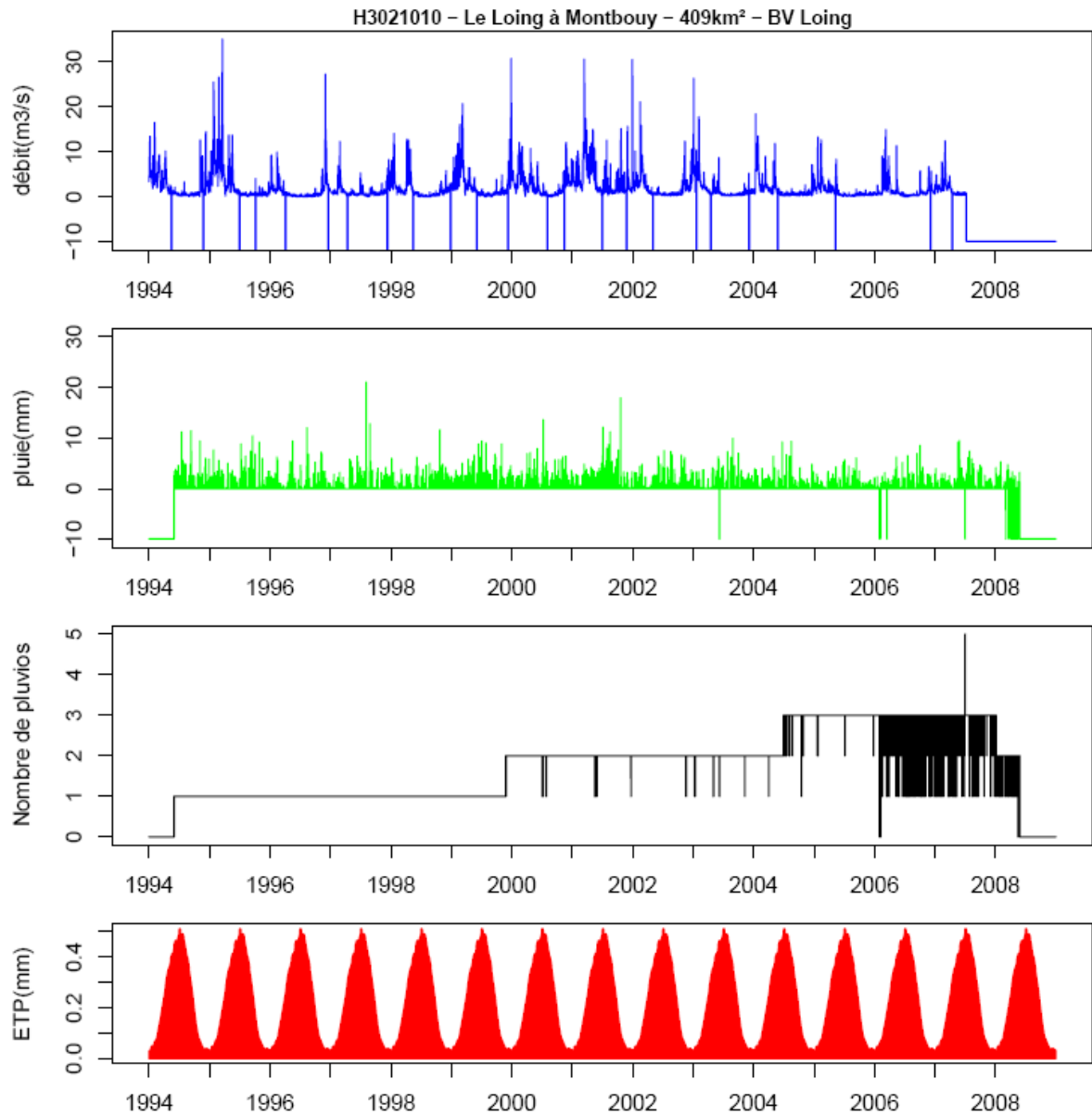


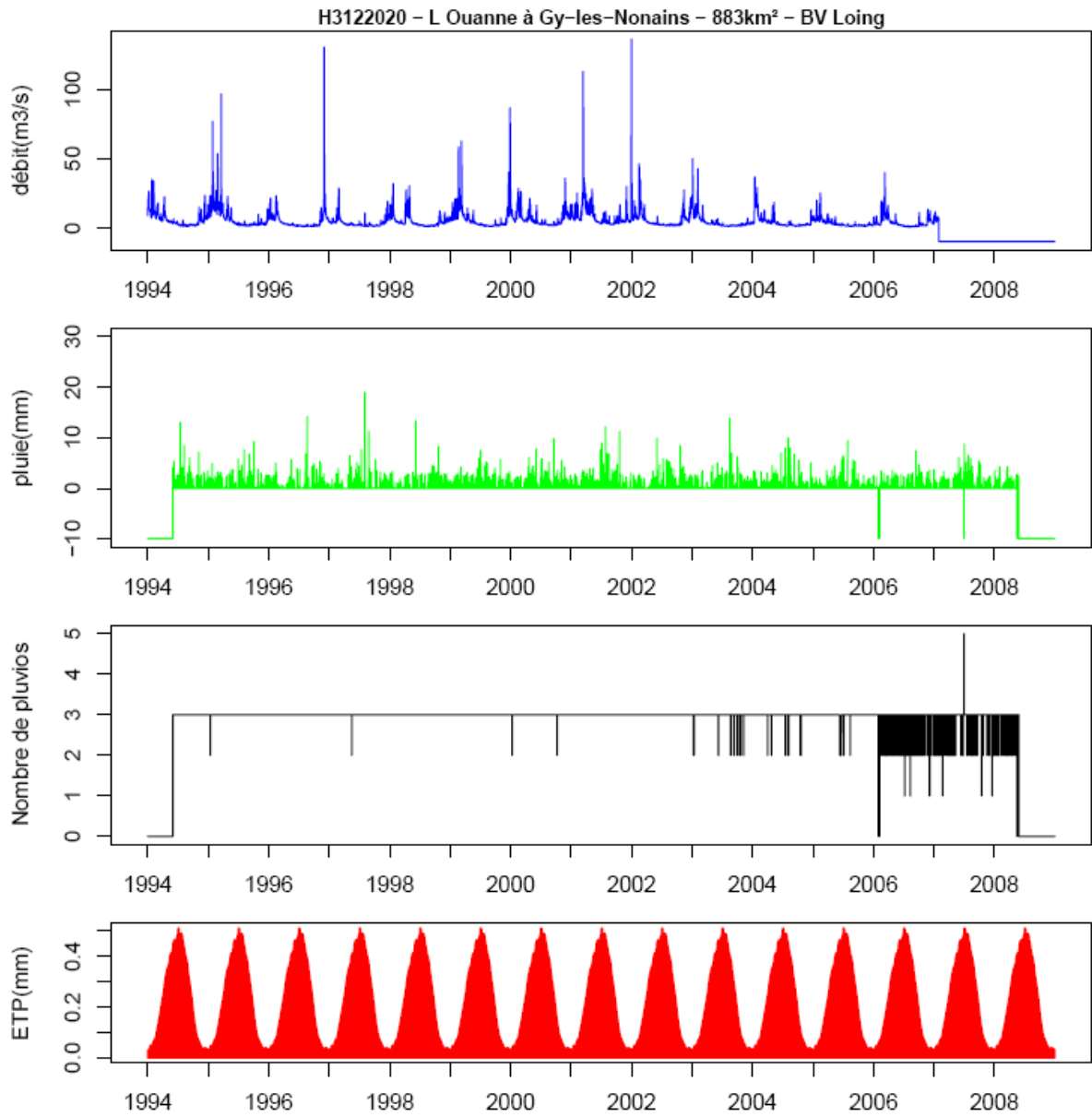


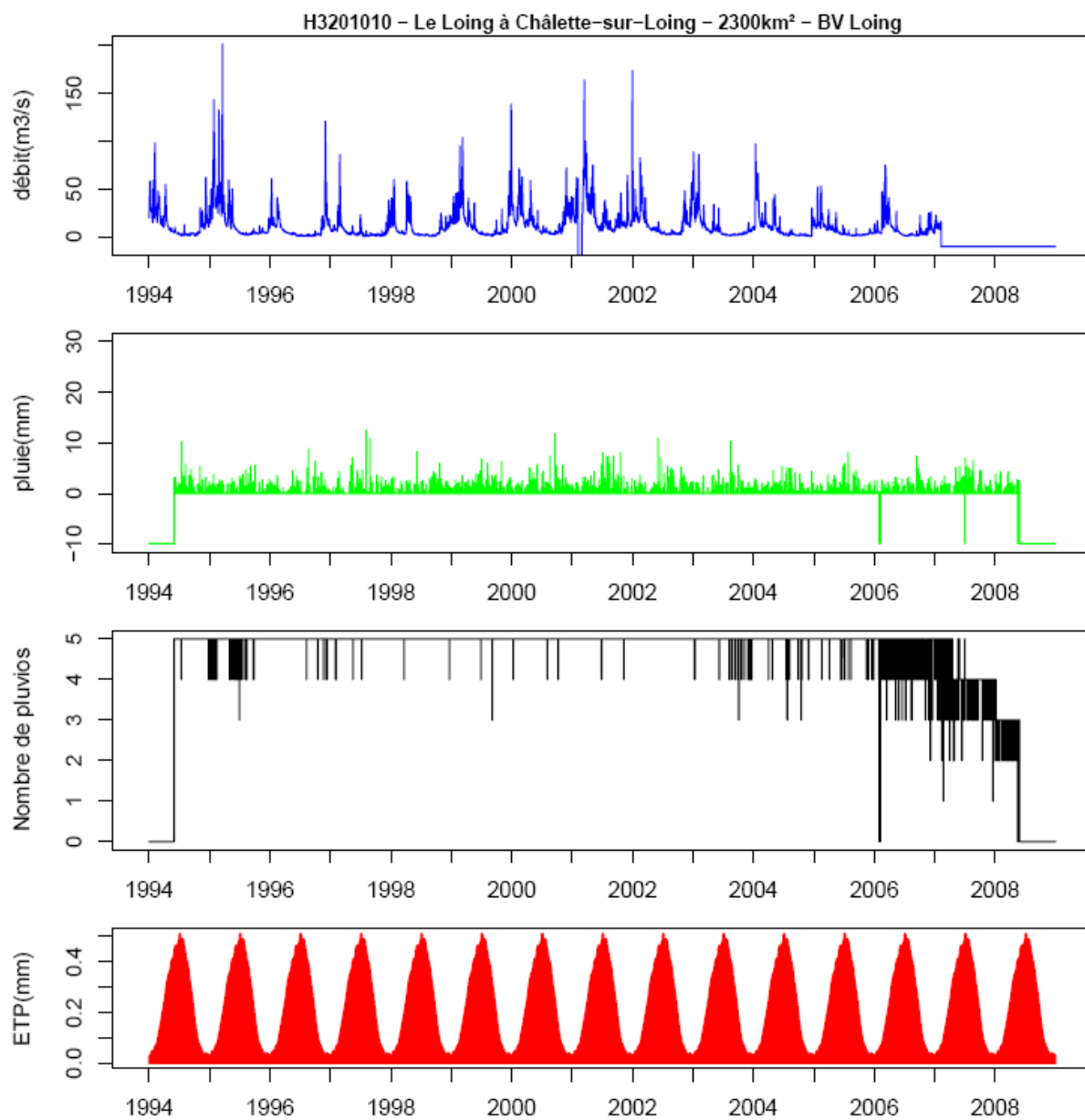


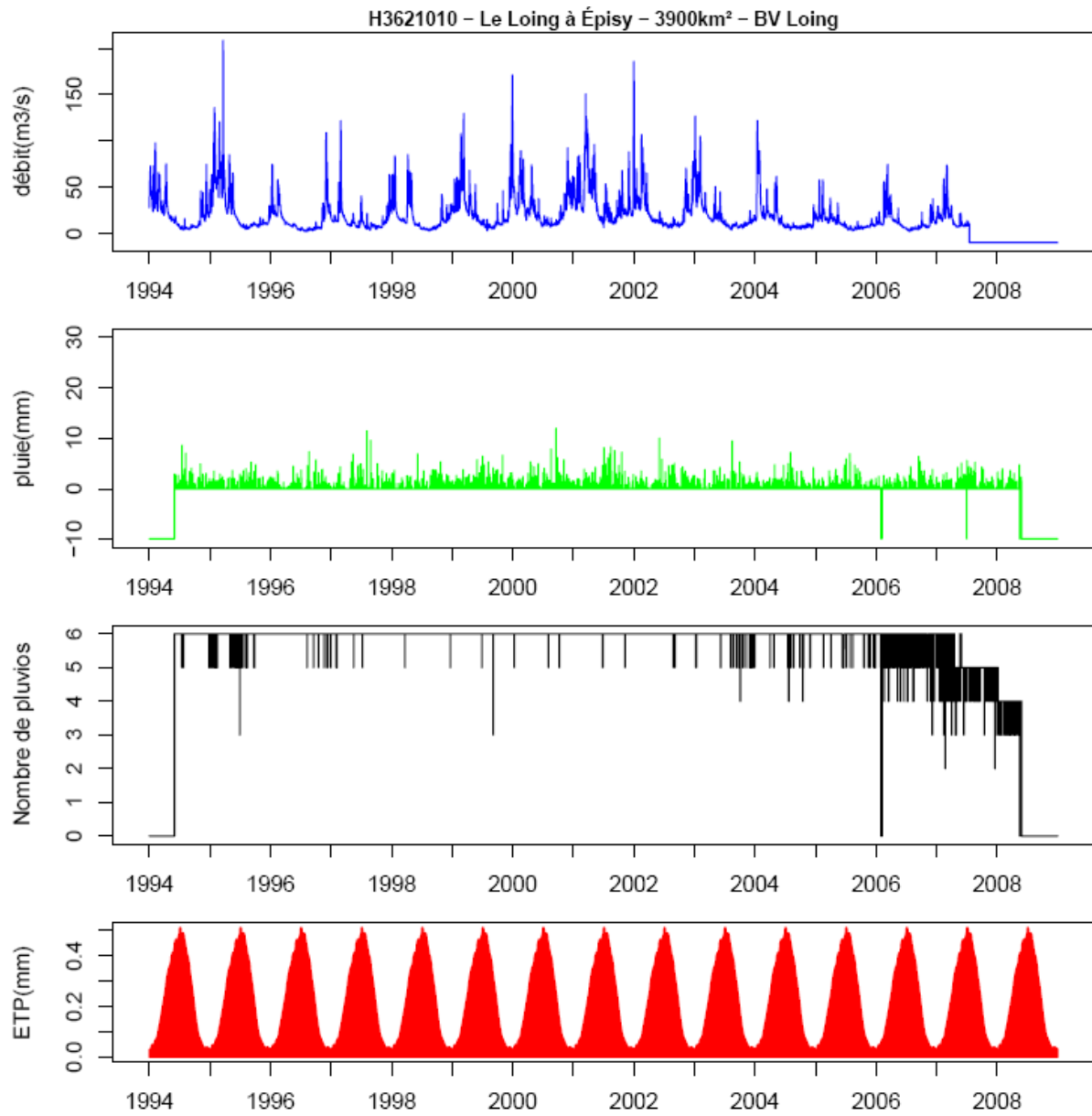












Annexe 4 : Le modèle de simulation des débits GR4J

1. Schéma explicatif, principe du modèle

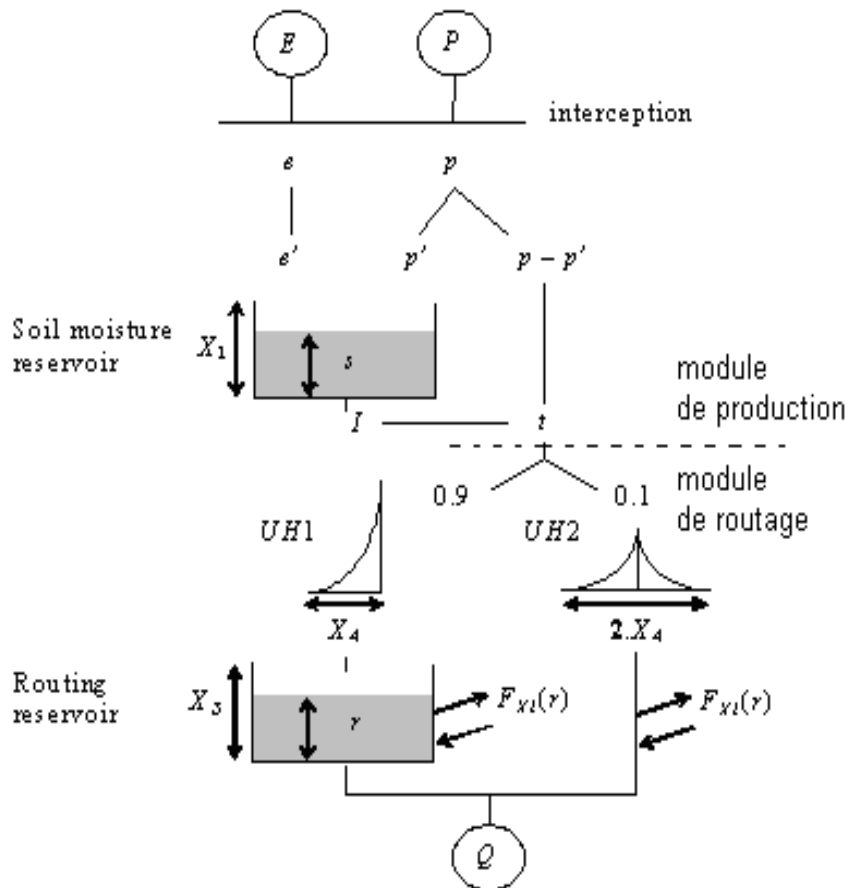


Figure 29: Structure of the rainfall-runoff model GR4J (after Perrin and al. 2003)

- Nom des paramètres:
 - X_1 : capacité maximum du réservoir de production
 - X_2 : coefficient d'échange
 - X_3 : capacité maximum du réservoir de routage quadratique
 - X_4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire

Module de production :

Ce module permet une répartition quantitative de l'eau et permet notamment le calcul du volume d'eau effectif en transit qui entrera dans le module de routage.

- Neutralisation :

La hauteur de pluie mesurée subit l'effet de l'évapotranspiration à la surface du sol ou des plantes. Il s'agit d'un phénomène d'interception. On obtient ainsi une pluie nette p qui entrera dans le modèle.

On parle de la neutralisation de P par E pour déterminer une pluie nette p et une évapotranspiration nette e calculée par :

Si $P > E$, alors $p = P - E$ et $e = 0$
 Si $P < E$, alors $p = 0$ et $e = E - P$

- Fonction de rendement :

Cette fonction détermine l'évolution et la répartition des volumes d'eau à l'entrée du modèle.

Dans le cas où la pluie nette est non nulle, une partie p' alimente un réservoir, dit de production et correspondant à l'état d'humidité du sol, selon une équation fonction du niveau intermédiaire atteint précédemment ($S[j-1]$) et de la pluie nette tombée au pas de temps présent $p[j]$ alors qu'une autre partie $p-p'$ est directement distribuée à l'entrée du module de routage (correspondant à l'écoulement, à la percolation près décrite au point suivant).

Dans le cas contraire, lorsque $p = 0$ et e non nulle, une quantité d'eau e' est retirée du réservoir de production selon une équation fonction de l'évapotranspiration nette au pas de temps présent $e[j]$ mais également du niveau du réservoir au pas de temps précédent.

Le contenu du réservoir est alors mis à jour par :

$$S' = S[j-1] + p'[j] - e'[j]$$

- Percolation I

Il y a une percolation, qui représente un faible volume très d'eau, qui quitte le réservoir pour rejoindre le volume entrant dans la partie routage du modèle, mais lorsqu'il pleut ce volume de routage reste très largement composé de la pluie $p-p'$ issue de la séparation en deux parties de la pluie nette p (p' et $p-p'$). On a alors :

$$S[j] = S' - I[j]$$

Et on obtient un volume $t[j] = p[j] - p'[j] + I[j]$ entrant dans le module de routage

Module de routage :

Ce module a pour rôle de reconstituer la réponse hydrologique du bassin versant à une impulsion de pluie. Il modélise conceptuellement l'écoulement jusqu'à la rivière.

- Hydrogramme unitaire

L'hydrogramme unitaire, dont l'allure dépendra du paramètre $X4$, assimilable au délai de restitution du bassin versant, est la première étape qui distribue temporellement les volumes d'eau venant du module de production.

Plus le paramètre est grand plus l'hydrogramme s'étendra dans le temps et donc plus la réponse pluvieuse, restituée sous forme de débit sera lissée dans le temps.

On a donc en entrée un volume d'eau et en sortie un débit. Dans le modèle GR4J, le volume $t[j]$ est à 90% routé vers un hydrogramme unitaire UH1 et un réservoir de routage et à 10% vers un unique hydrogramme unitaire UH2 (correspondant au ruissellement?).

- Réservoir de routage

Le réservoir de routage cherche à modéliser la capacité d'infiltration *{d'une partie?}* de l'eau dans le sol. Le volume d'eau restitué à la sortie de l'hydrogramme UH1 viendra alimenter le réservoir de routage, dont la capacité maximum est déterminée par le paramètre X3 de telle manière qu'une impulsion de pluie à un pas de temps k pourra encore alimenter le réservoir de routage au pas de temps $k + 1$ et encore plus longtemps jusqu'à dépasser le temps de réponse du bassin, correspondant au paramètre X4 (pas directement). Le débit Q_r en sortie du réservoir est déterminé par une fonction de vidange proportionnelle à r et décroissante de X3. Ainsi, le niveau dans le réservoir devient:

$$r = r - Q_r$$

Cette fonction joue un rôle de "filtre passe bas" où les fortes variations temporelles d'impulsions de pluies seront "absorbées" par le réservoir restituant un débit moins variable (plus X3 est grand, plus cet effet est fort, voir 2.1.2).

La fonction de routage a pour objectif de reproduire le lissage des impulsions de pluie par le bassin versant.

- fonction d'échange

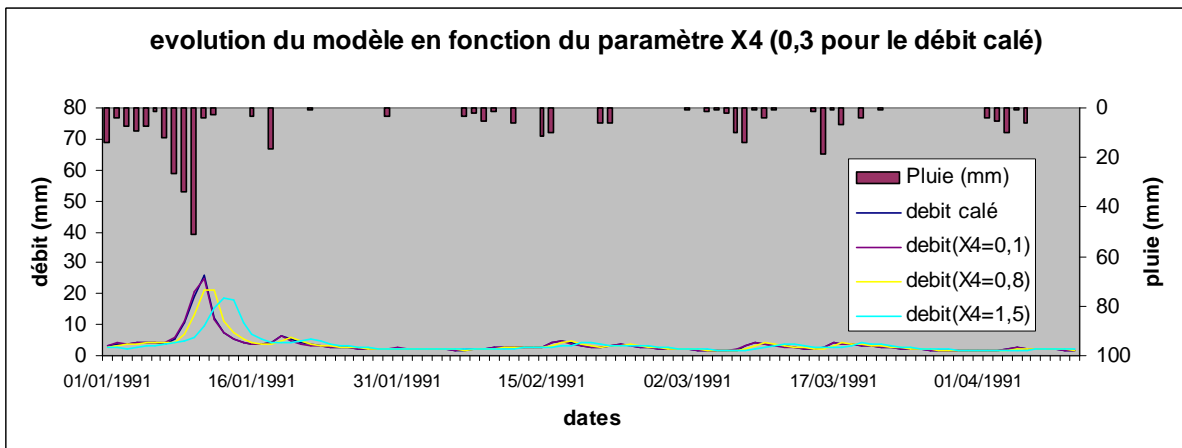
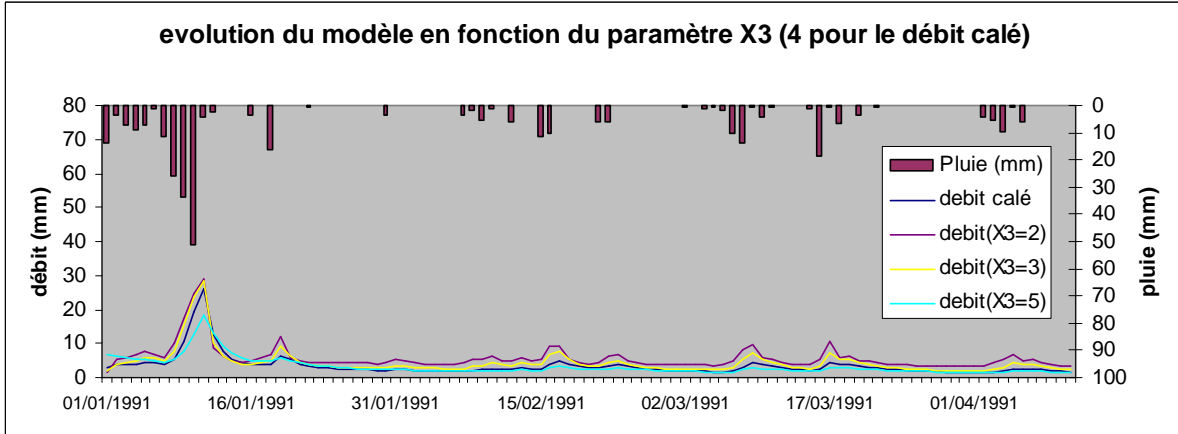
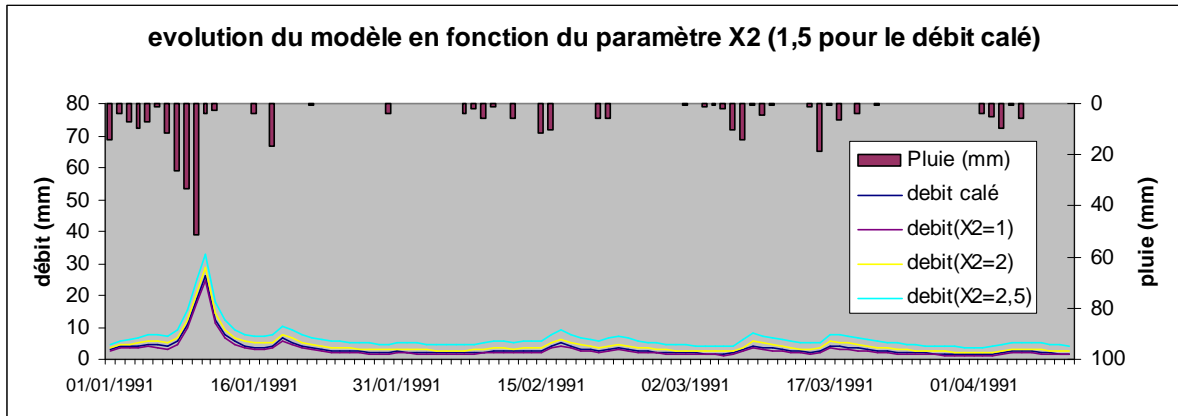
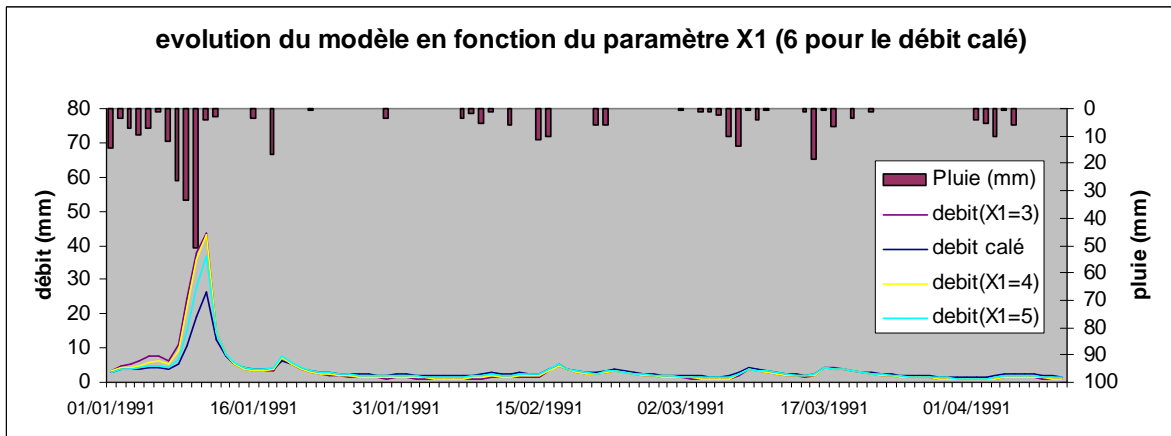
Cette fonction joue plusieurs rôles à la fois. Elle est à la base censée modéliser les échanges souterrains, mais a également un rôle de correction des volumes d'un pas de temps à l'autre ou bien prend en compte l'évapotranspiration au niveau des sols, mais dans une mesure inévaluable. La fonction d'échange est fonction du paramètre X2, dit paramètre d'échange mais également du paramètre X3, capacité maximale du réservoir de routage.

- débit en sortie: débit simulé

Le débit en sortie de la simulation sera la somme des débits obtenus à l'issue des routages par UH1 et UH2 en ayant appliqué la fonction d'échange sur chacun d'entre eux.

2. Influences des différents paramètres du modèle GR4J sur le débit en sortie

Pour bien comprendre le fonctionnement du modèle GR4J, on a tracé des courbes de débits calculés avec le modèle au pas de temps journalier en faisant varier un seul paramètre à la fois:



- Evolution du débit en fonction de X1 :

On remarque que plus le paramètre X1 correspondant au niveau max du réservoir est grand, moins le pic de crue sera grand (à ETP constante), car l'écoulement correspondant à l'eau n'allant pas dans le réservoir, sera moindre du fait de la plus grande capacité du réservoir. A l'inverse pour des valeurs du paramètre moins élevées, le réservoir ayant une capacité moindre, l'écoulement augmente. On rappelle que le réservoir de production représente en fait conceptuellement l'état d'humidité du sol.

- Evolution du débit en fonction de X2 :

On remarque qu'il n'a d'effet que sur le débit moyen, il correspond à une translation de la courbe suivant l'axe des ordonnées. Plus ce paramètre est grand, plus le système reçoit un apport de l'extérieur et donc plus le bilan globale sera grand (plus la courbe sera décalée vers le haut). A l'inverse le coefficient pourrait être négatif, le système perdrait alors en volume d'eau contribuant au débit finale, ce qui abaisserait le débit moyen. Le coefficient d'échange n'a donc pas d'influence sur l'allure de la courbe.

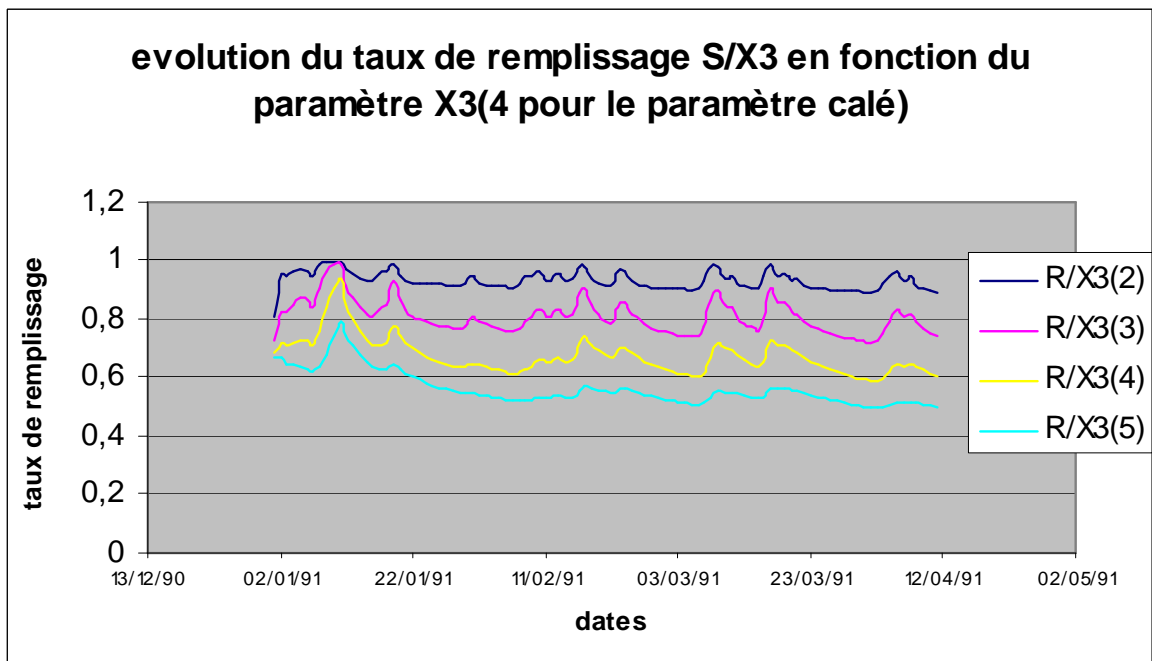
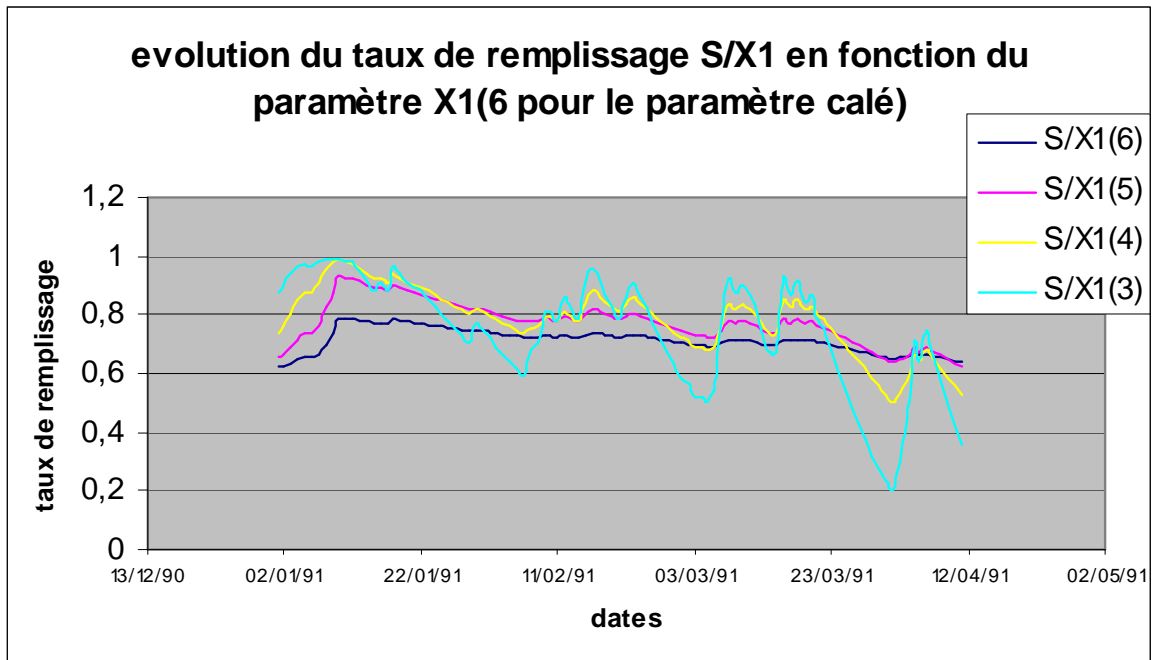
- Evolution du débit en fonction de X3 :

On remarque bien que le paramètre X3, correspondant à la capacité maximum du réservoir de routage, a une influence sur l'allure de la courbe, en jouant un rôle de "lissage" des débits de pluie entrants (idée du filtre passe bas). Donc plus le paramètre est grand, plus la capacité du réservoir est grande et plus les débits en sortie du réservoir seront distribués de manière "lissée". Plus X3 est grand, plus les pics sont atténués. Il est à noter que l'on fait varier le débit moyen en faisant varier X3, car la fonction d'échange calculée en fonction de X2 fait également intervenir le paramètre X3.

- Evolution du débit en fonction du paramètre X4:

Le paramètre X4 peut être relié au temps de réponse du bassin versant, c'est-à-dire au temps de restitution d'une impulsion de pluie dans le débit à l'exutoire. On remarque en effet qu'en augmentant ce paramètre, on décale la position des pics dans le temps.

On va maintenant essayer de voir l'influence des paramètres des réservoirs X1 et X3 sur les taux de remplissage S/X1 et R/X3 de ces derniers:



- évolution du taux de remplissage du réservoir de production en fonction de X1 :

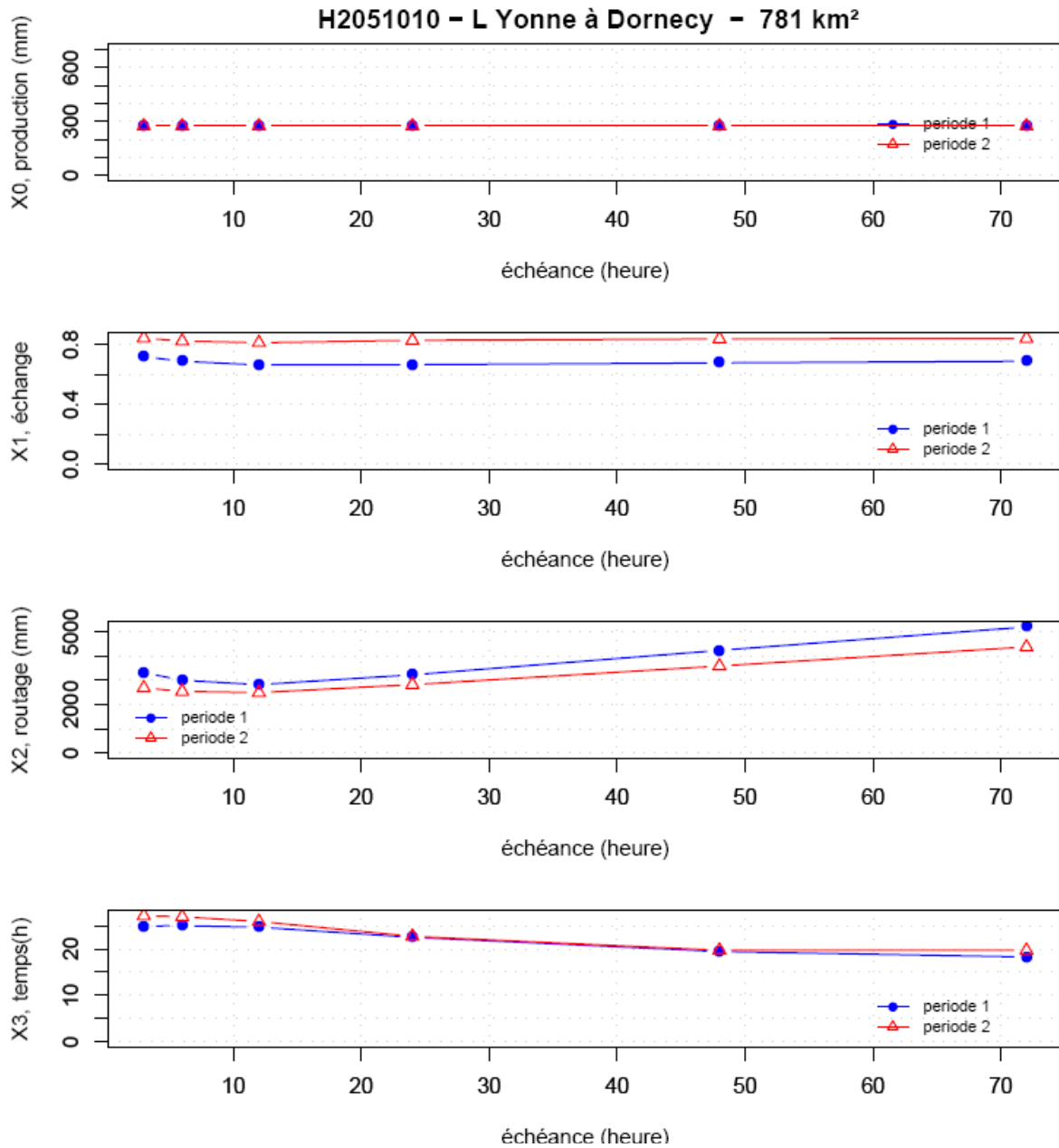
L'idée principale est que plus la capacité du réservoir de production est petite, plus la variabilité temporelle des volumes de pluie précipités est reproduite dans le taux de remplissage, et c'est bien ce que l'on voit sur cette courbe ou on observe de forte variation des taux pour un faible paramètre. Cette configuration correspondrait à un sol ayant une faible capacité de stockage d'eau, dont le taux d'humidité serait donc plus sensible à l'ETP et aux variations de pluie.

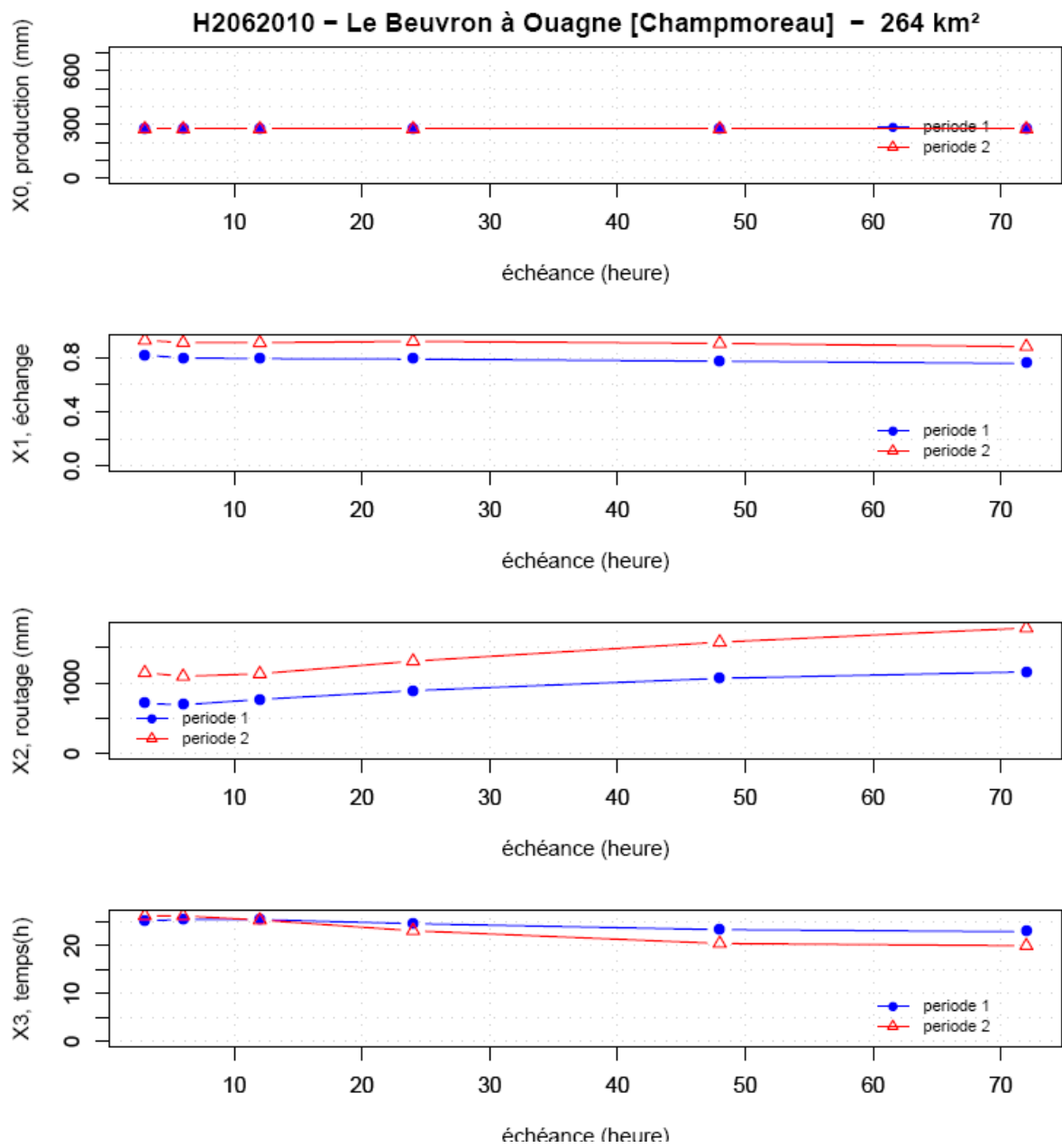
- évolution du taux de remplissage du réservoir de routage en fonction de X3:

{Le paramètre X3 est une capacité maximale du réservoir de routage après vidange!!!Les proportions 10% et 90% ne change donc jamais!!}

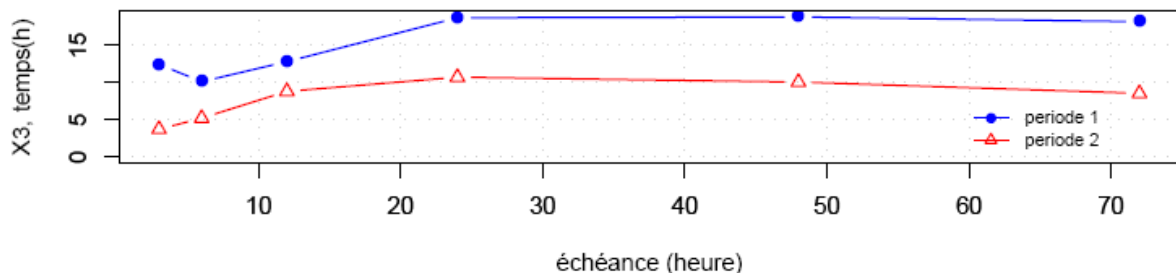
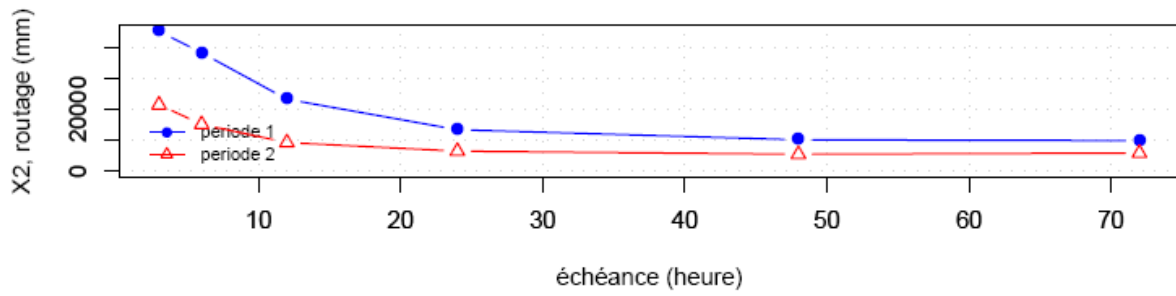
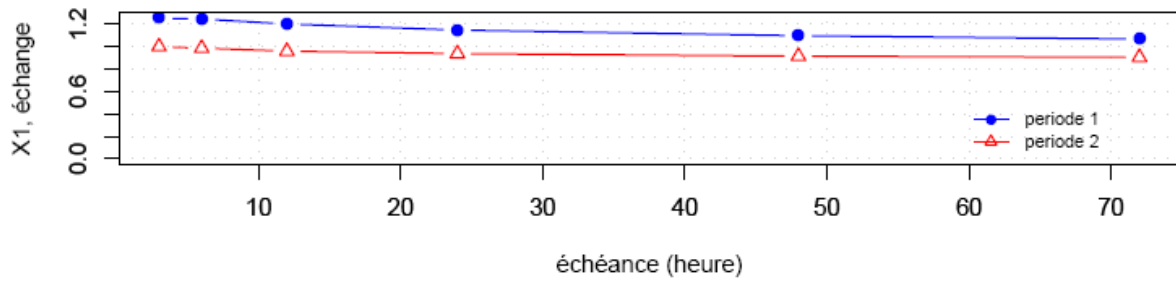
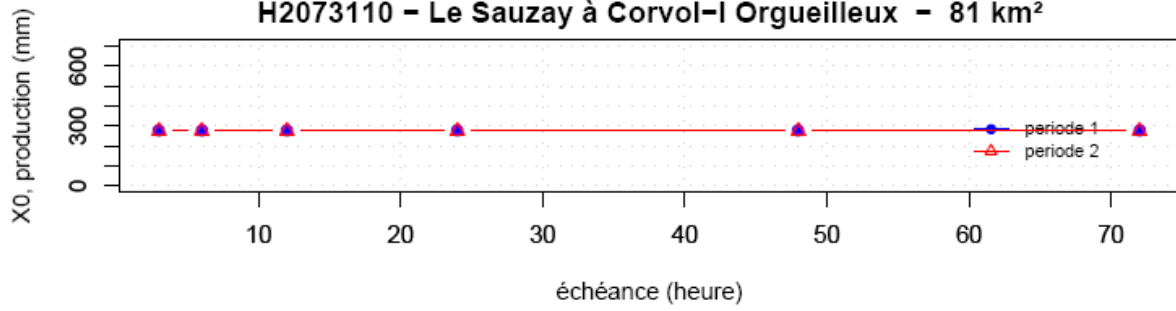
Cette courbe montre bien le rôle de filtre passe bas jouée par le réservoir de production, plus le paramètre est grand moins le taux de remplissage varie et donc plus la répartition temporelle à la sortie du réservoir se fera régulièrement. Il est également à noter que lorsque le paramètre est de 2, les pics s'atténuent; ceci est lié au fait qu'on ne peut pas dépasser un taux de 1.

Annexe 5 : paramètres calculés du modèle sur GR3P (dernière version)

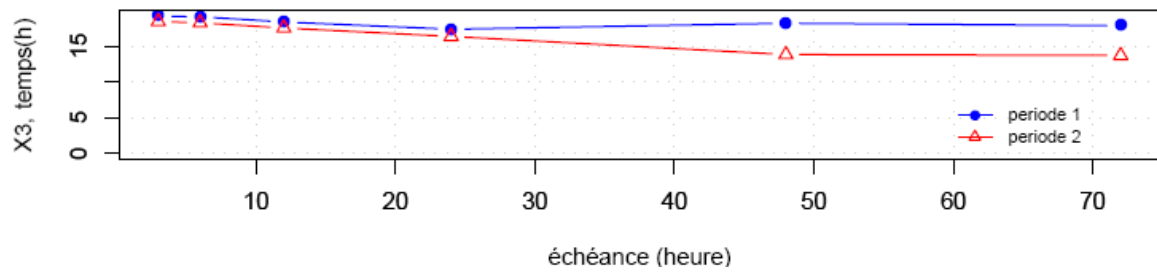
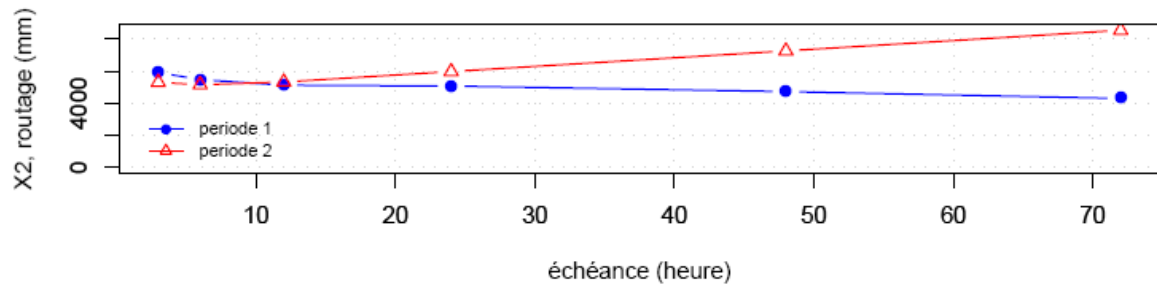
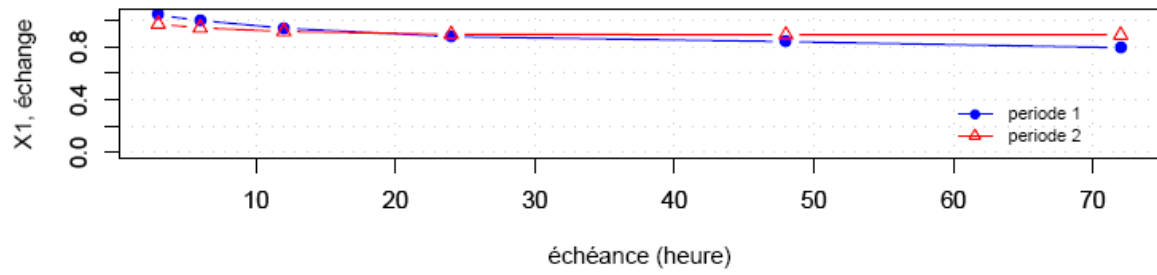
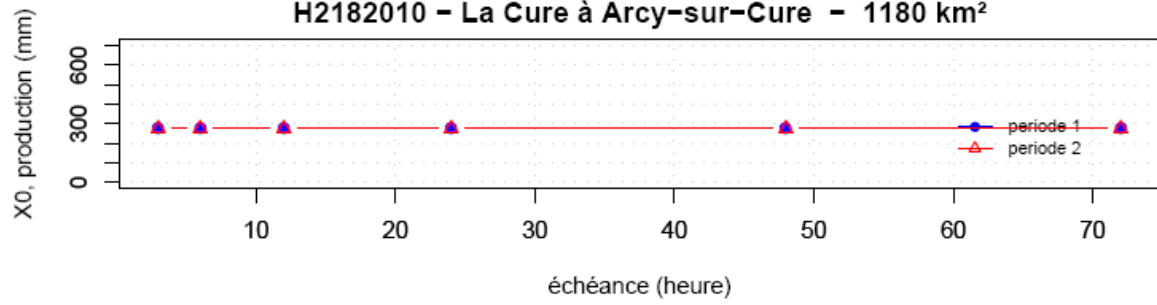




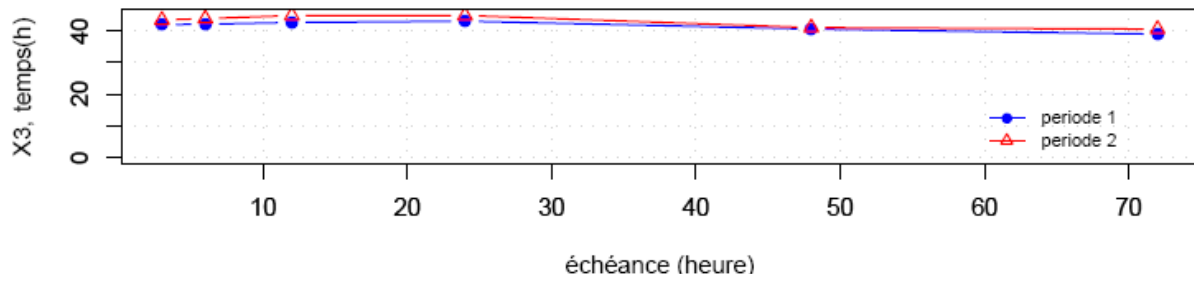
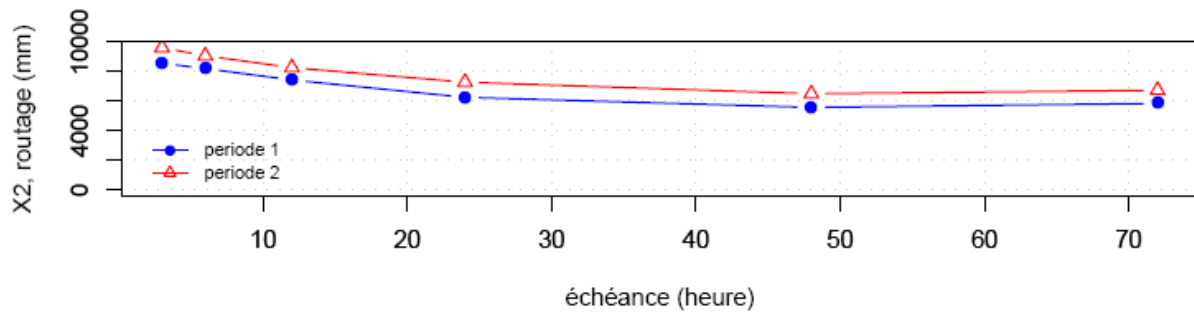
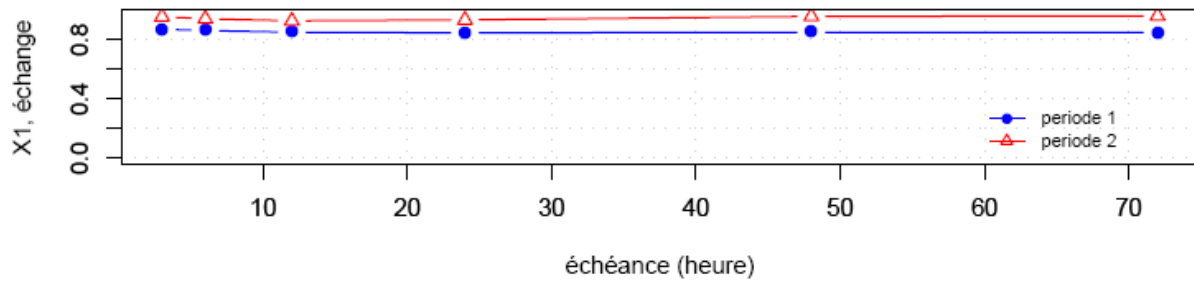
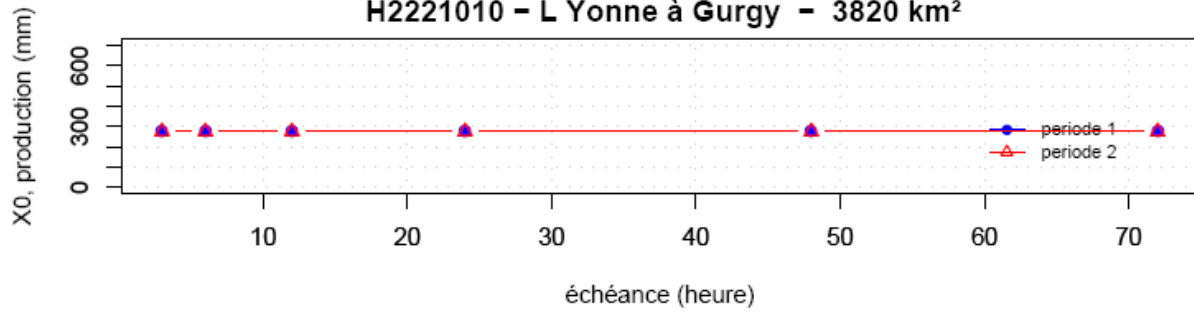
H2073110 - Le Sauzay à Corvol-l'Orgueilleux - 81 km²



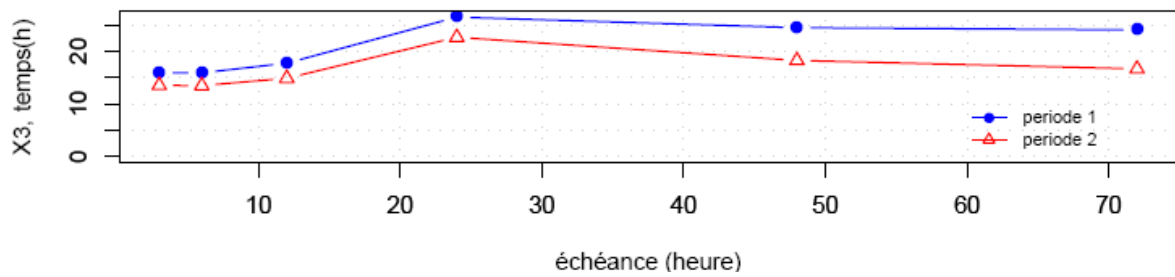
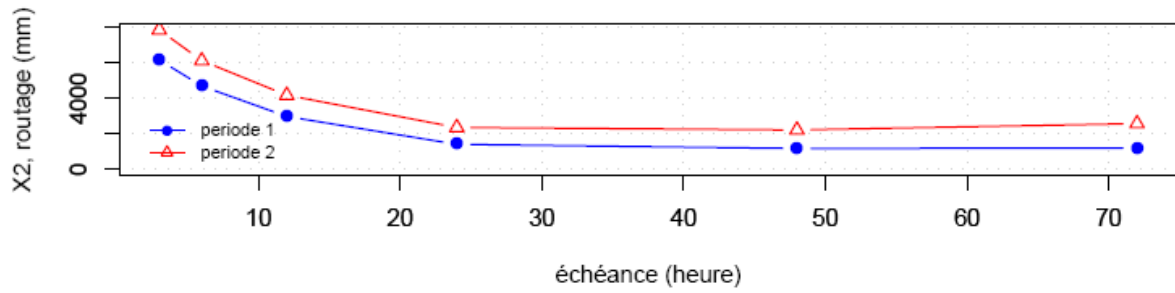
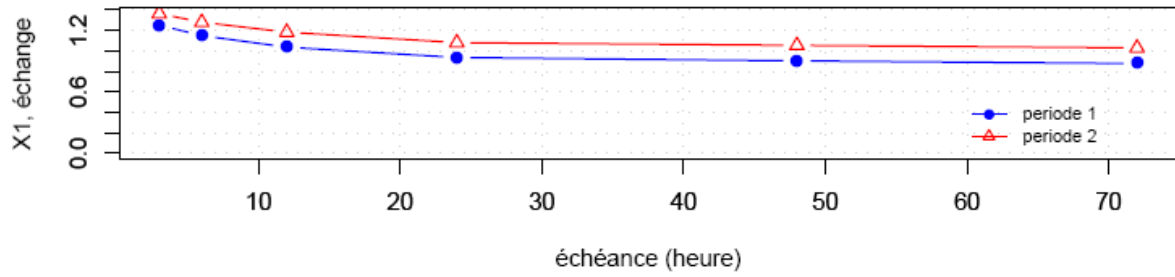
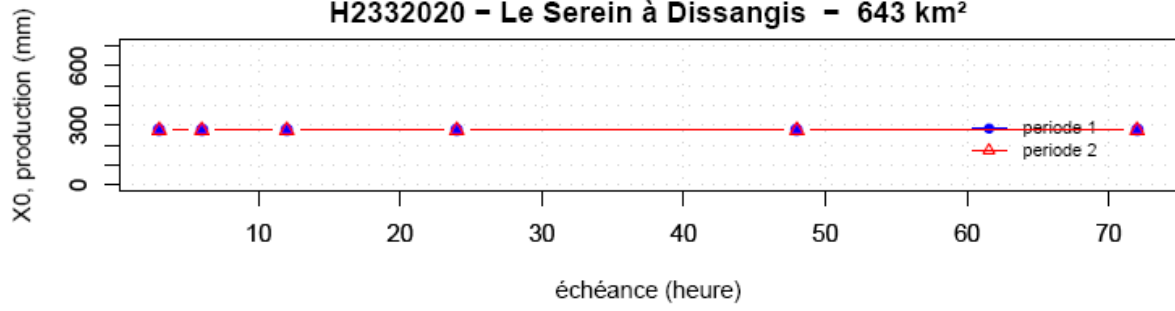
H2182010 - La Cure à Arcy-sur-Cure - 1180 km²



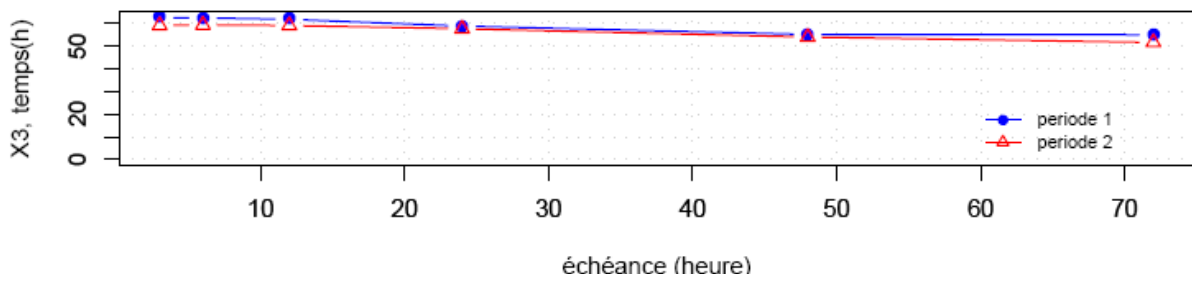
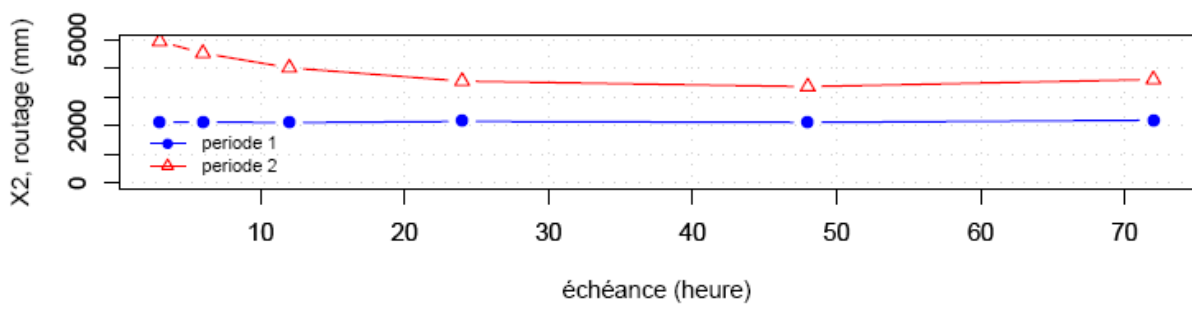
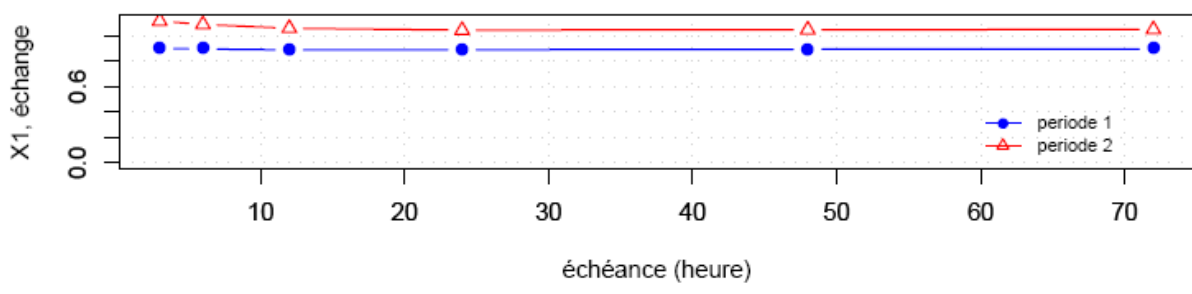
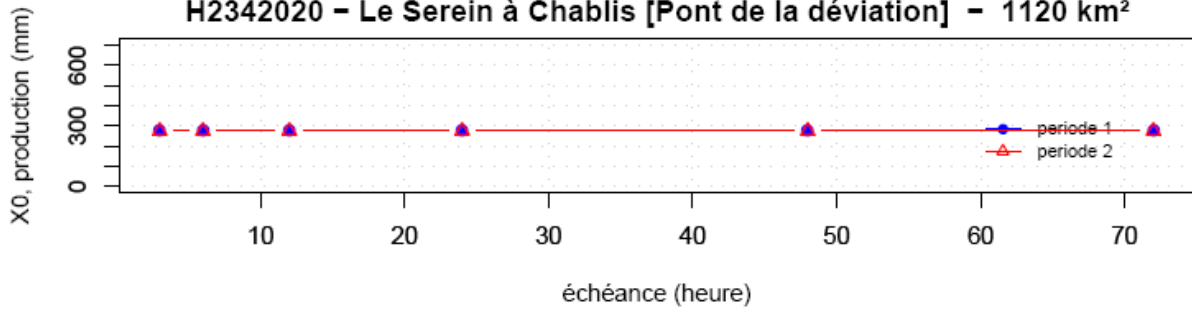
H2221010 - L Yonne à Gurgy - 3820 km²



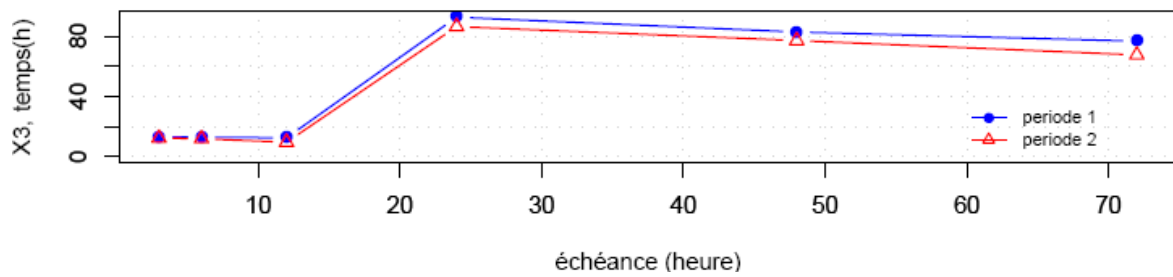
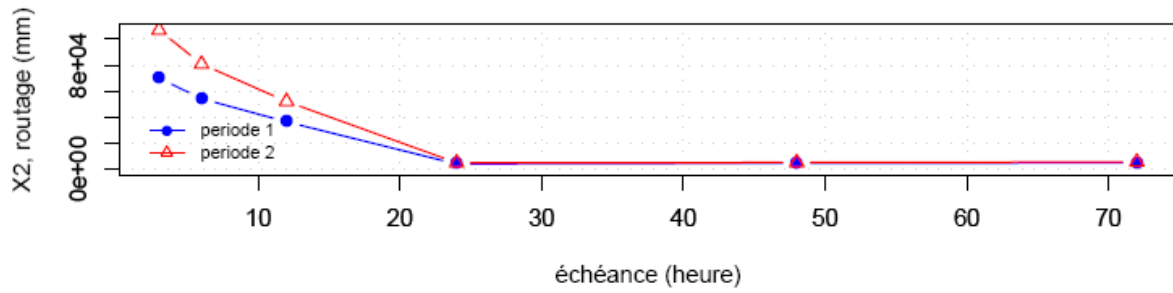
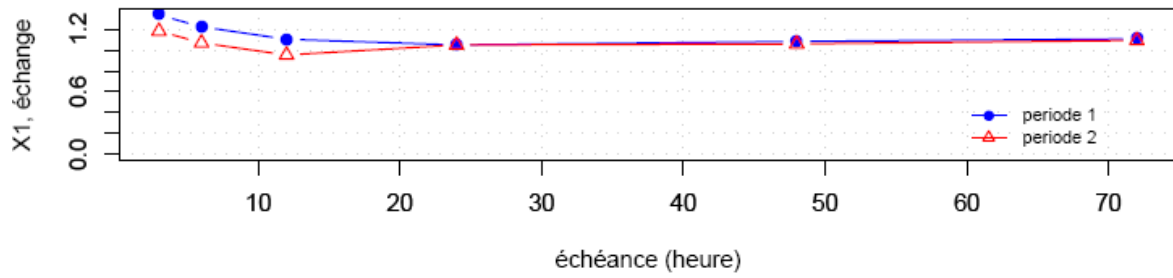
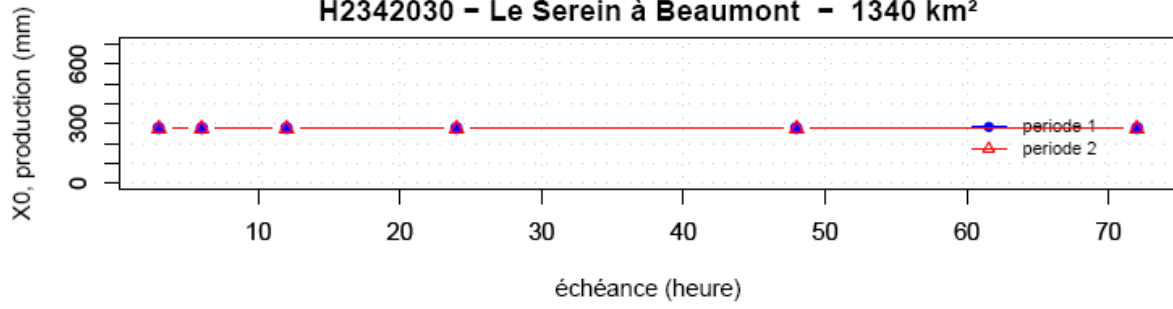
H2332020 - Le Serein à Dissangis - 643 km²

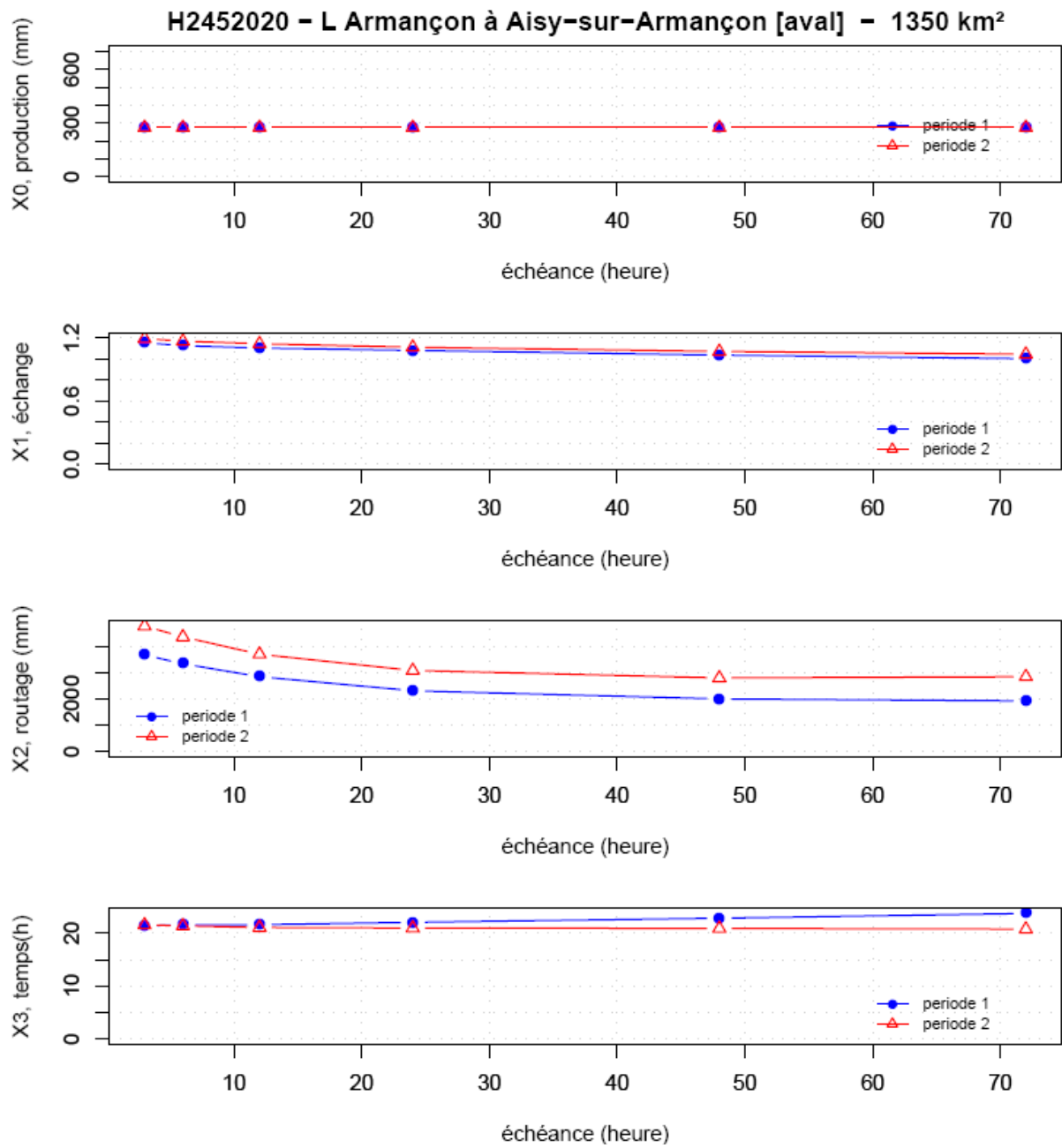


H2342020 - Le Serein à Chablis [Pont de la déviation] - 1120 km²

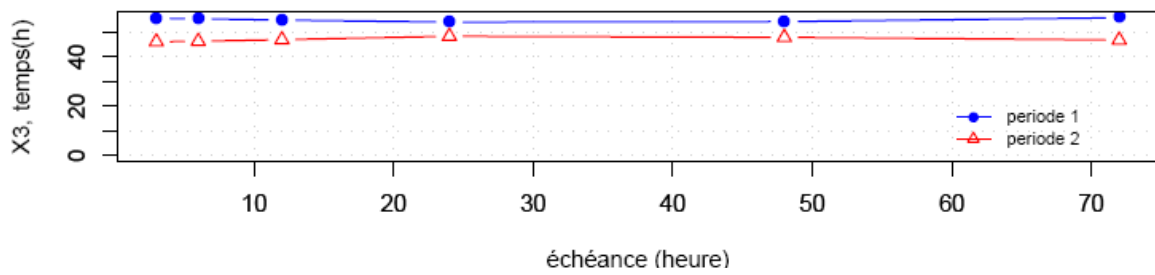
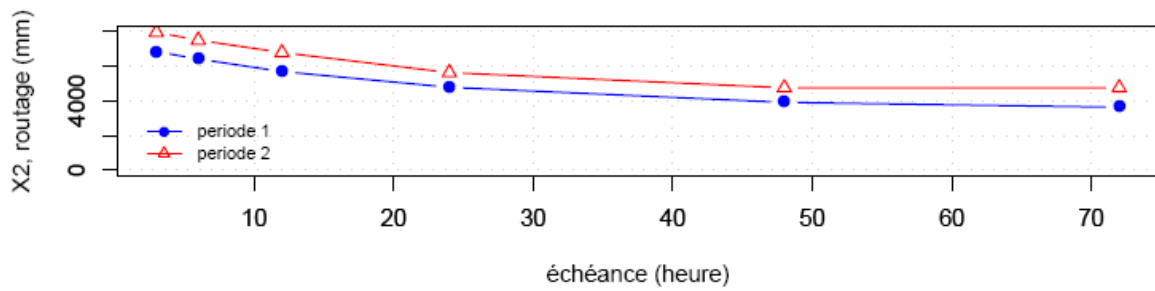
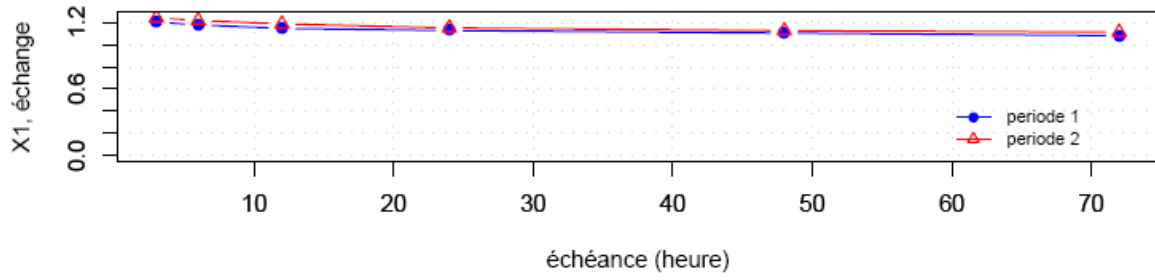
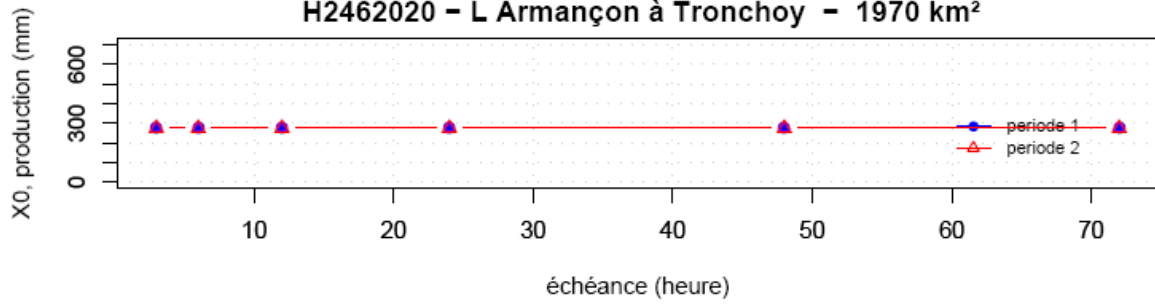


H2342030 - Le Serein à Beaumont - 1340 km²

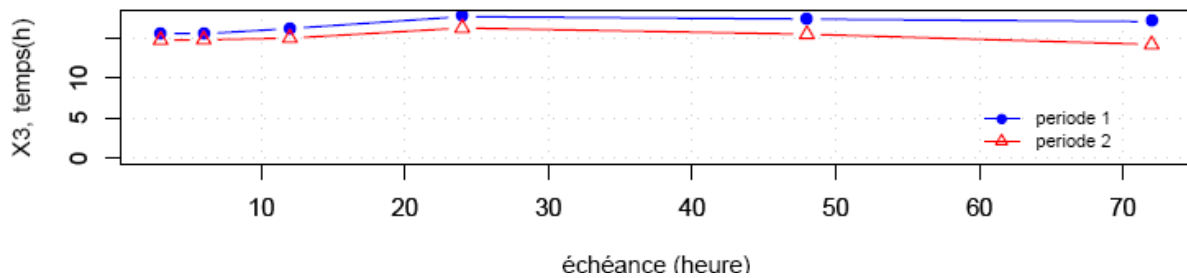
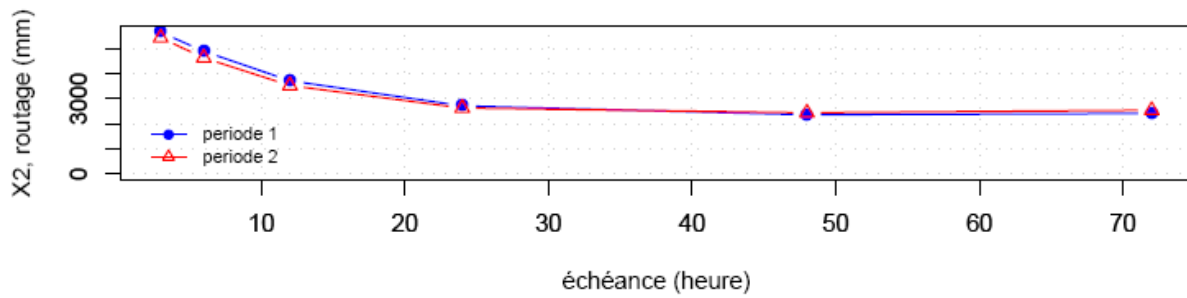
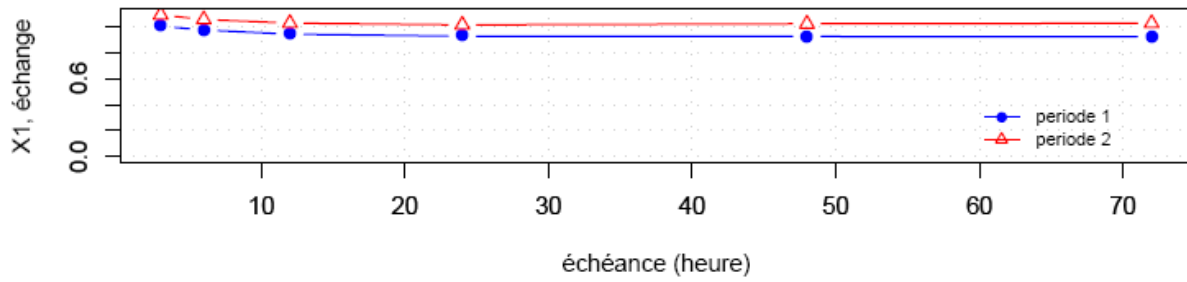
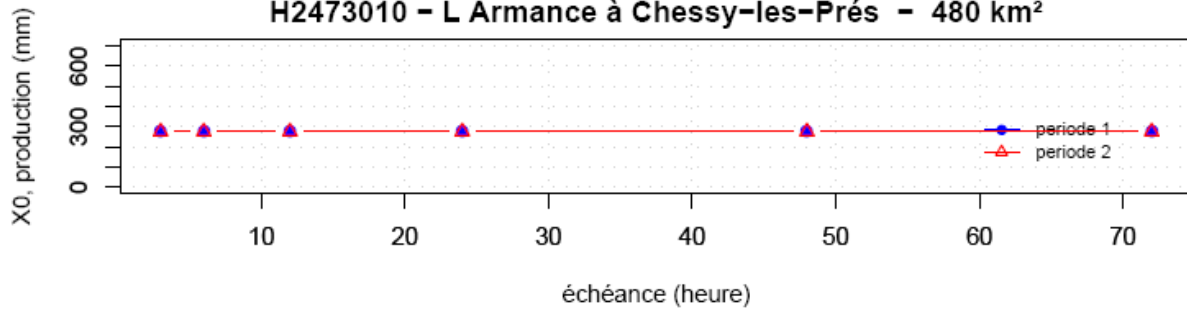




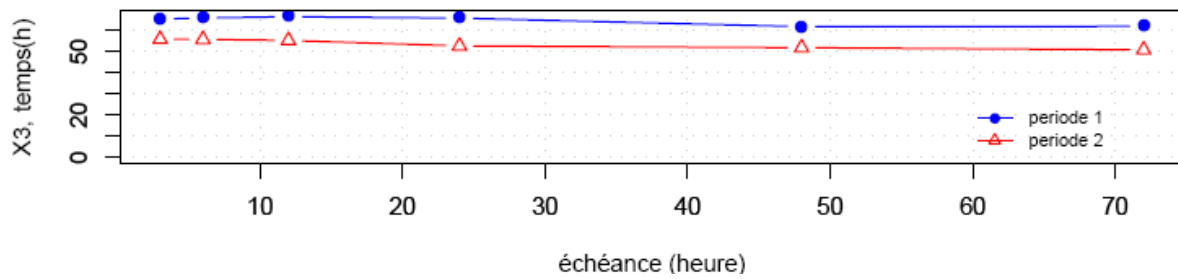
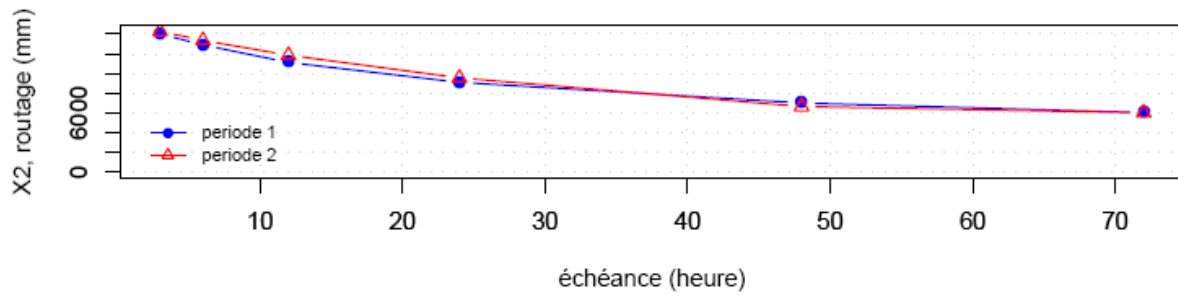
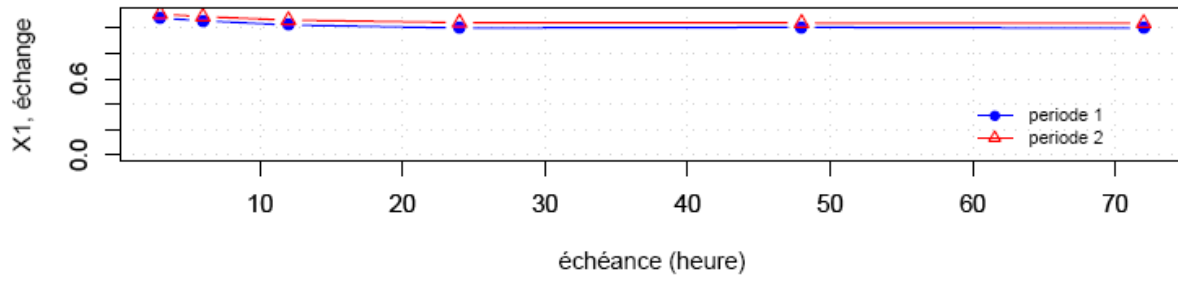
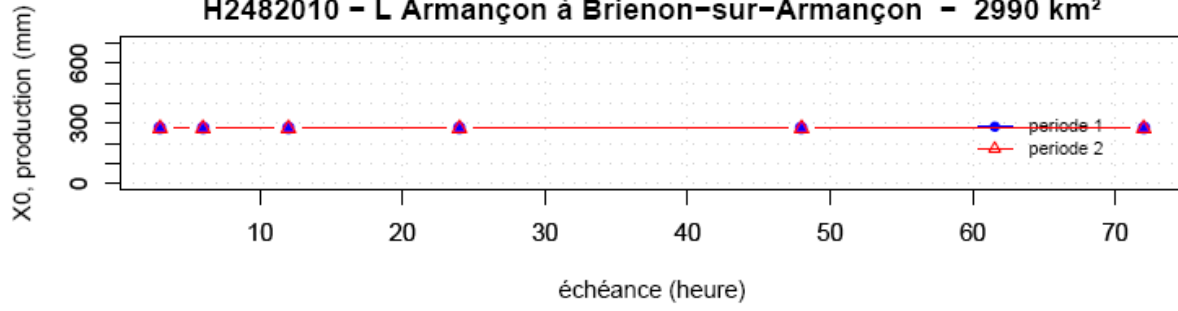
H2462020 - L Armançon à Tronchoy - 1970 km²



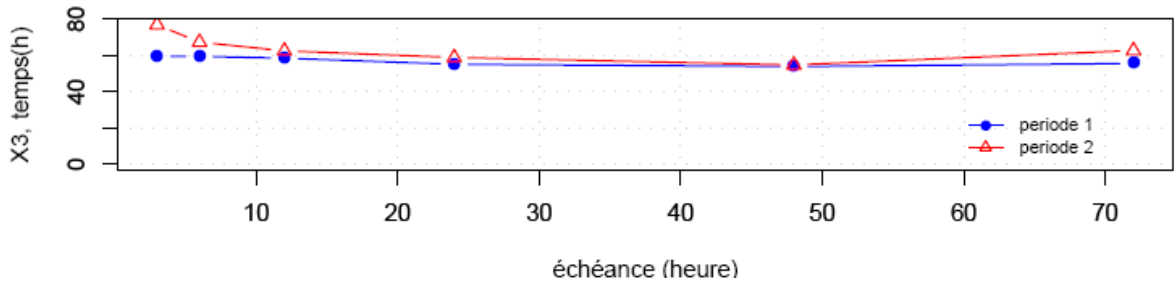
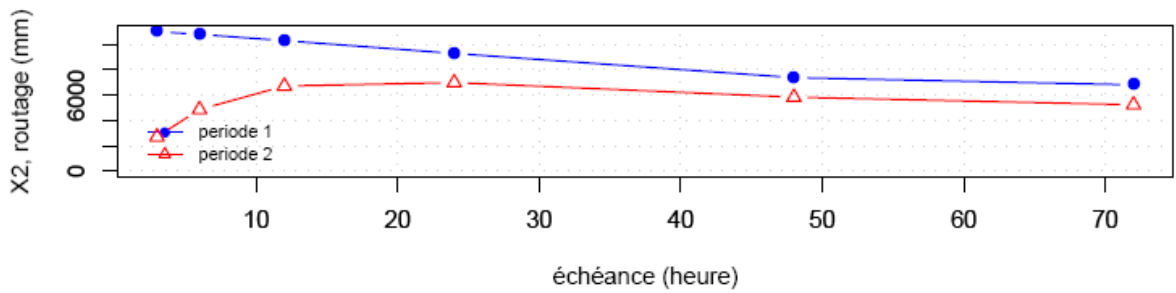
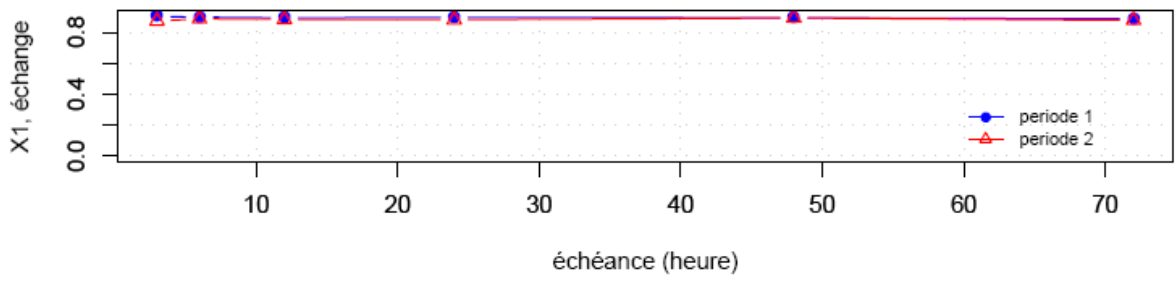
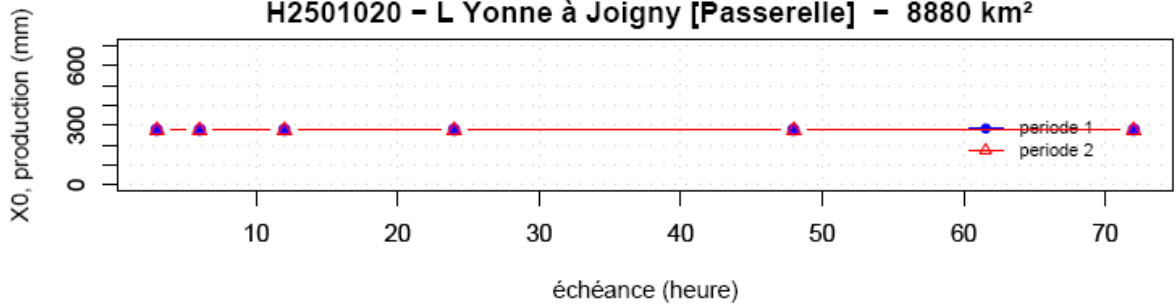
H2473010 - L Armance à Chessy-les-Prés - 480 km²



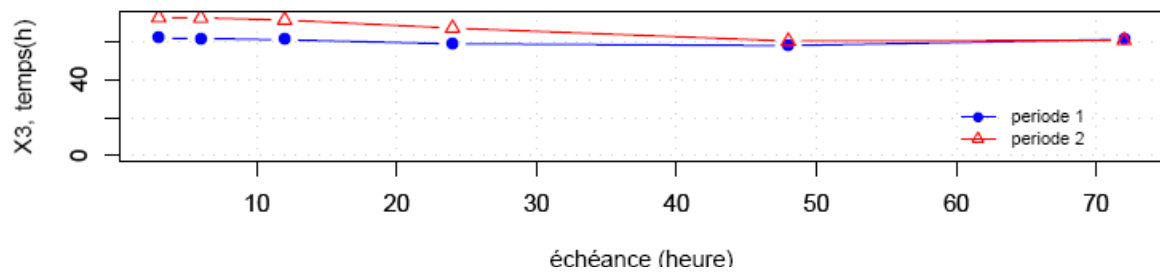
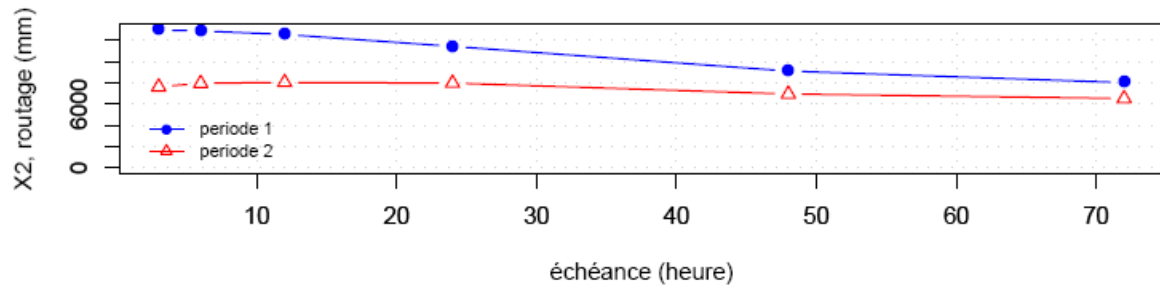
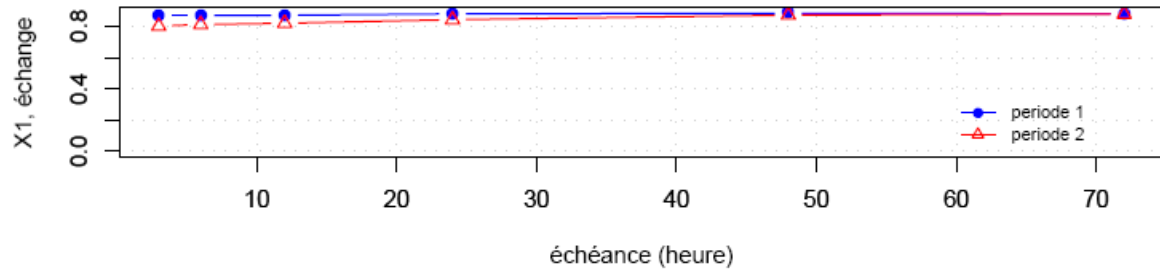
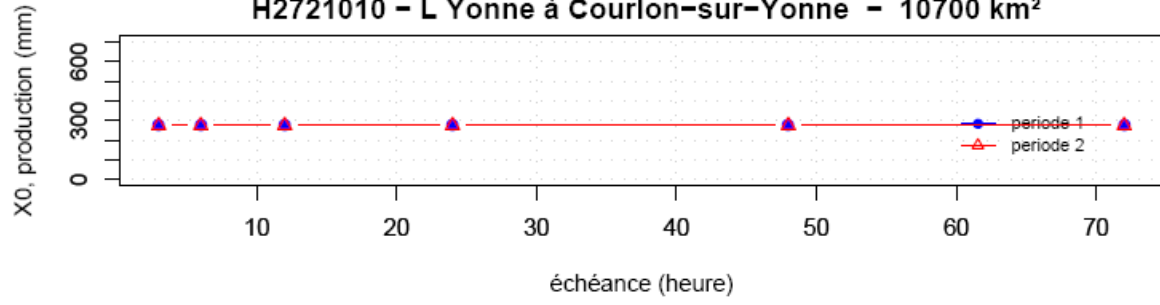
H2482010 - L Armançon à Brienon-sur-Armançon - 2990 km²



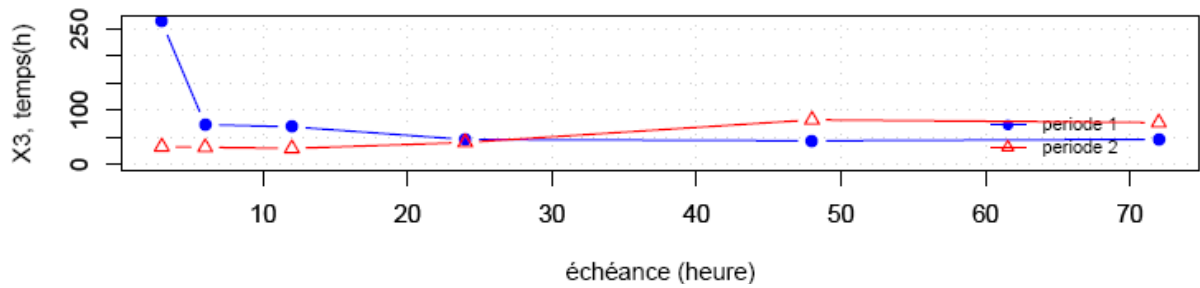
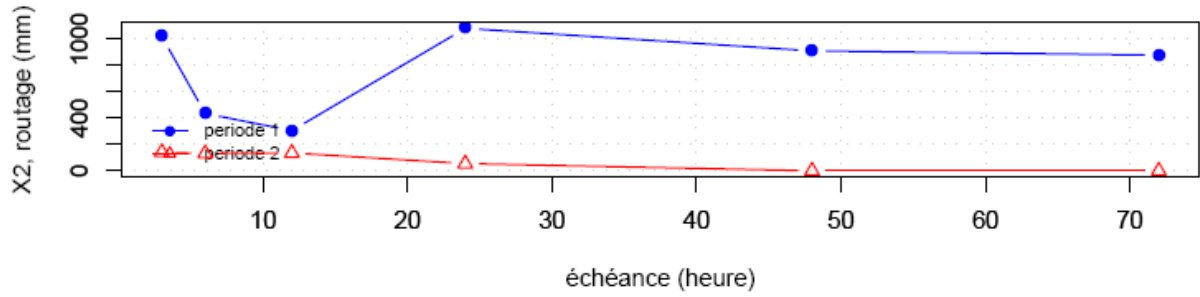
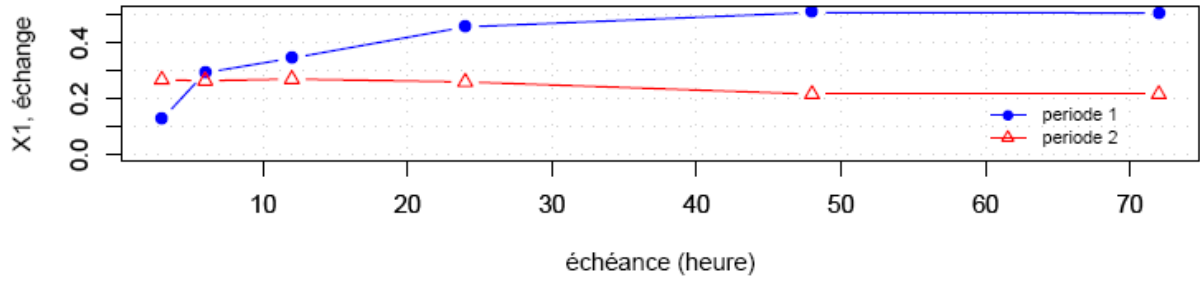
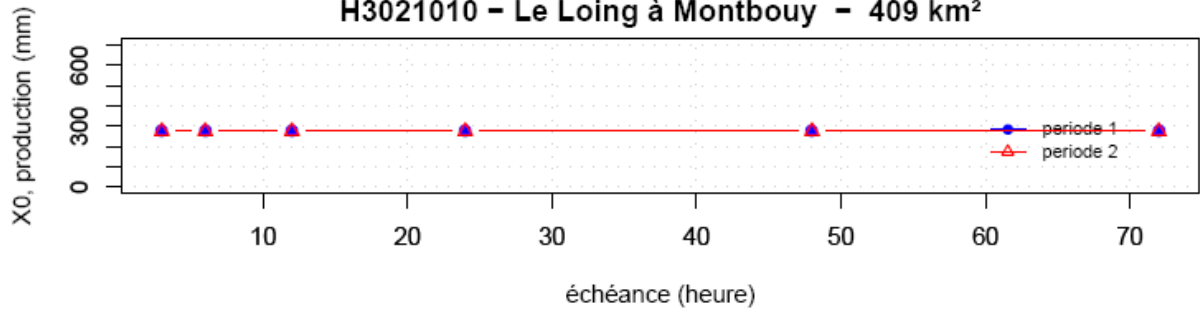
H2501020 - L Yonne à Joigny [Passerelle] - 8880 km²



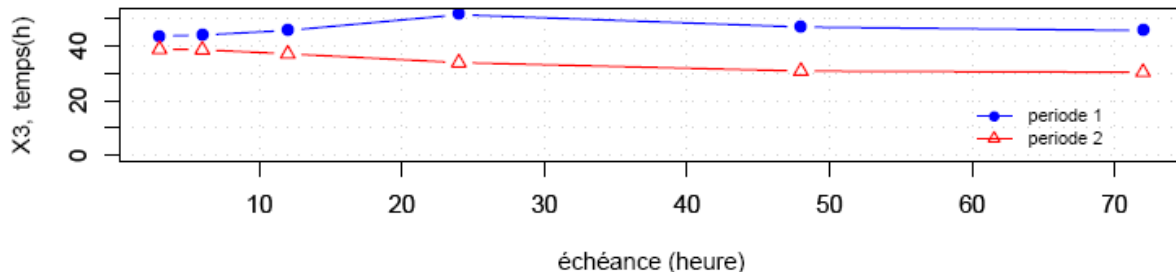
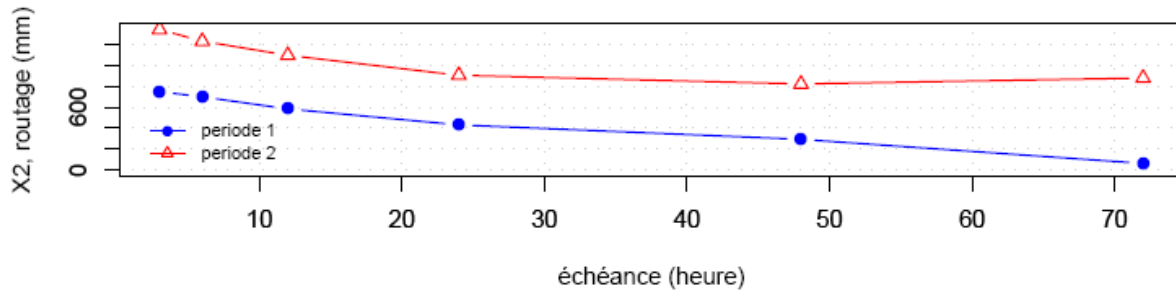
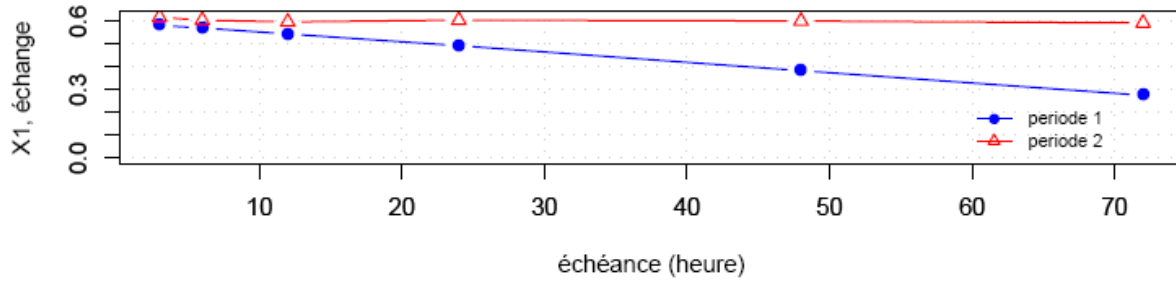
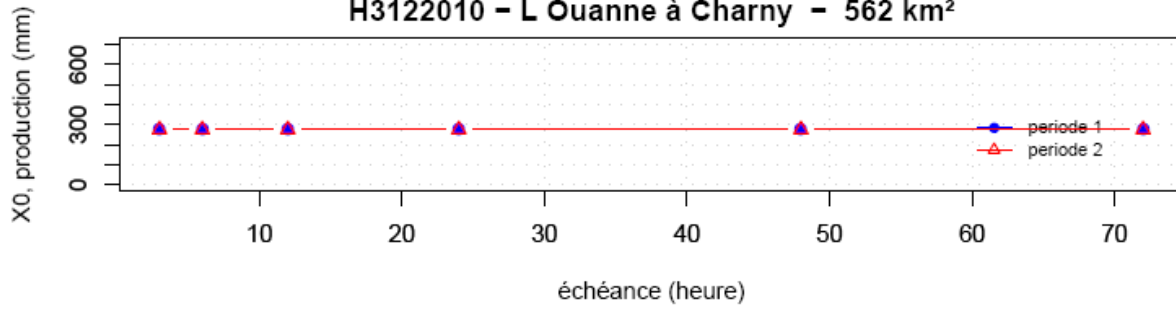
H2721010 - L Yonne à Courlon-sur-Yonne - 10700 km²



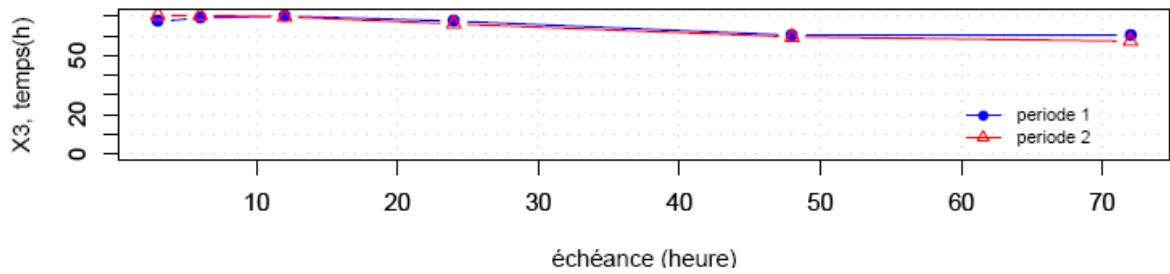
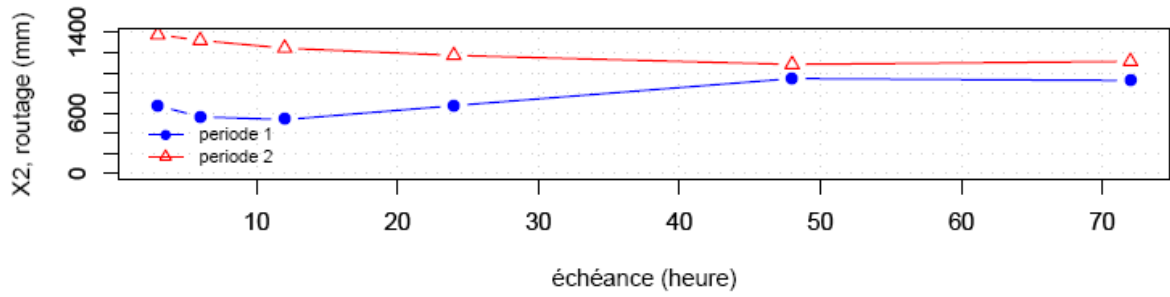
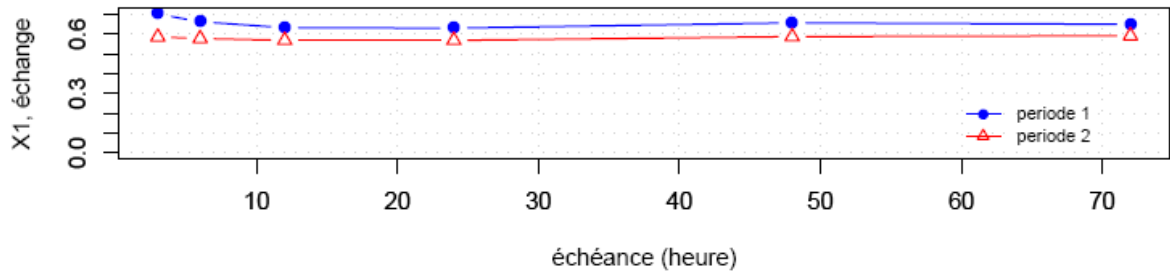
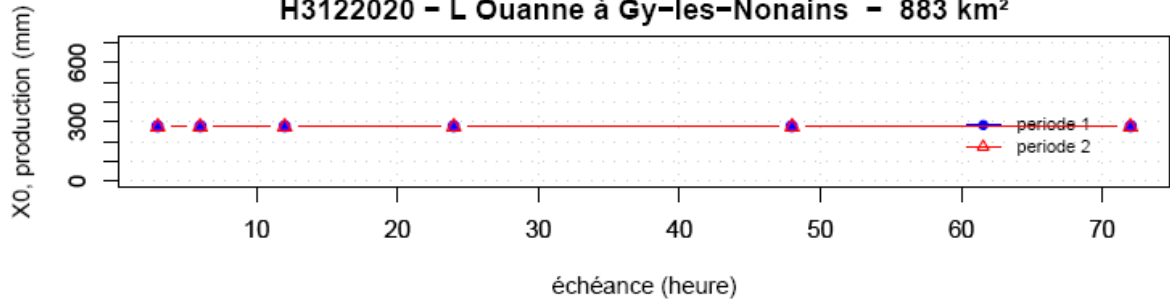
H3021010 - Le Loing à Montbouy - 409 km²



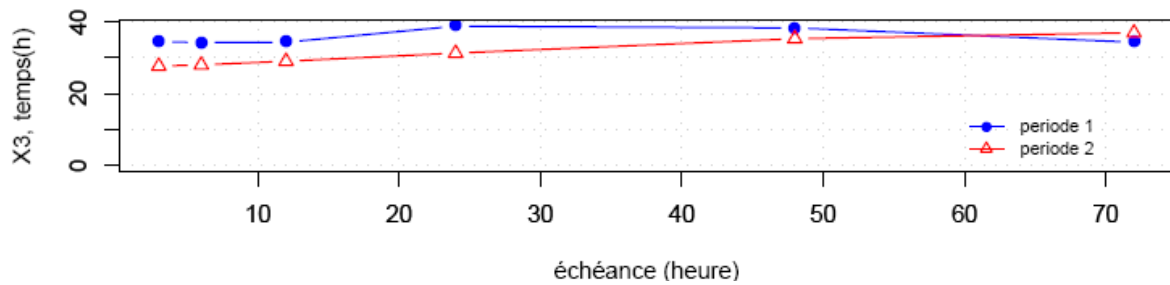
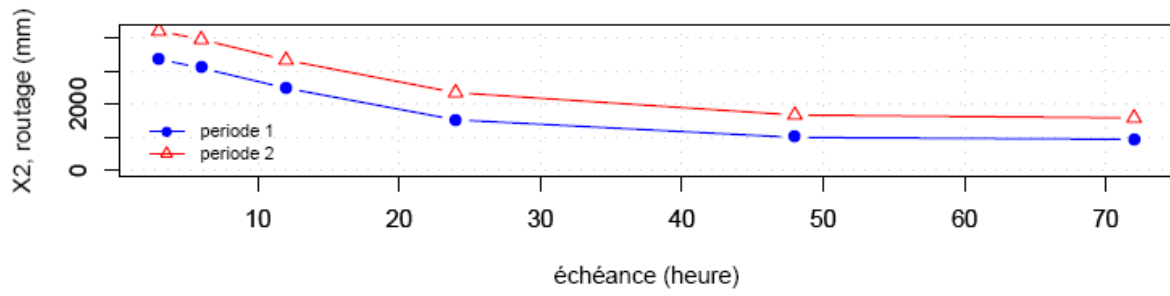
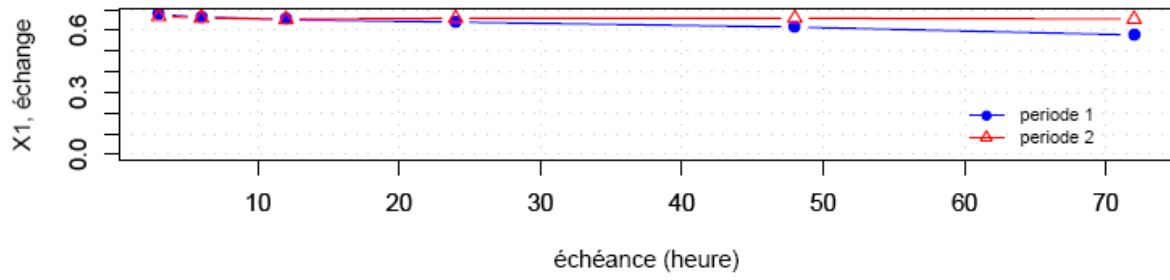
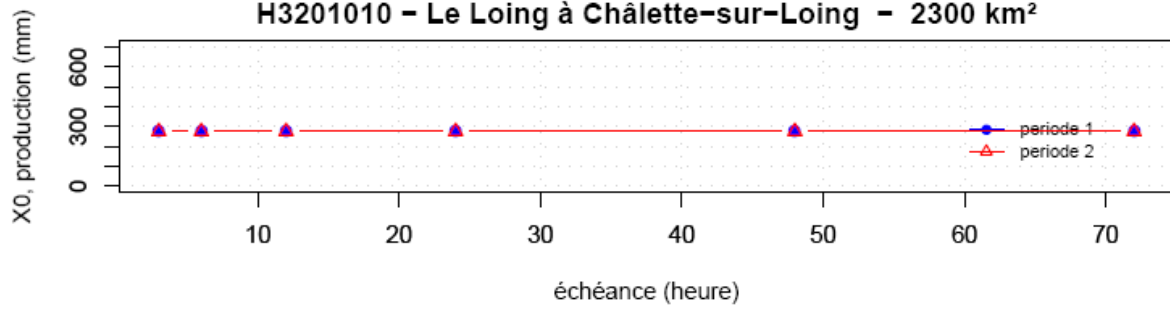
H3122010 - L Ouanne à Charny - 562 km²



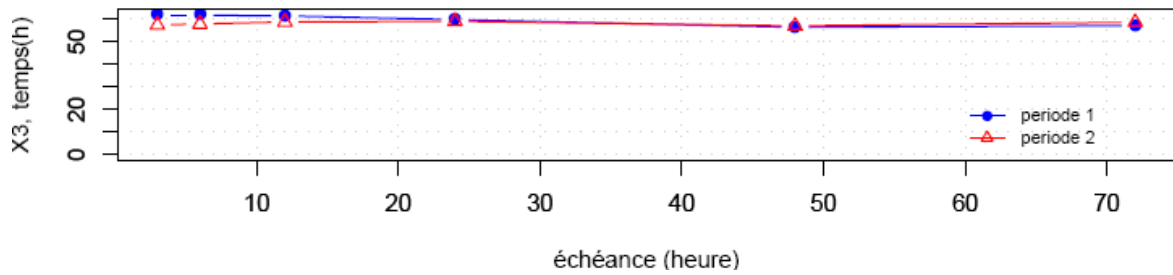
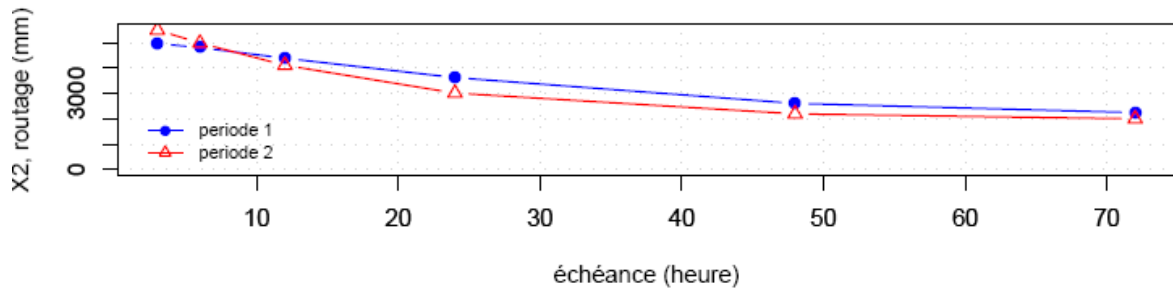
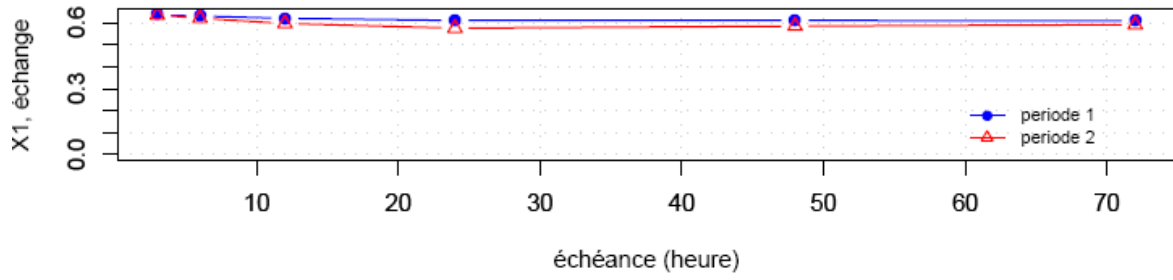
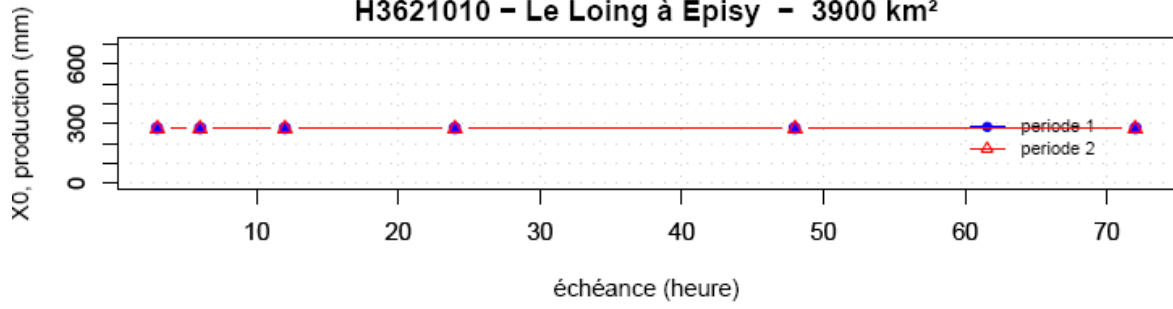
H3122020 - L Ouanne à Gy-les-Nonains - 883 km²



H3201010 - Le Loing à Châlette-sur-Loing - 2300 km²

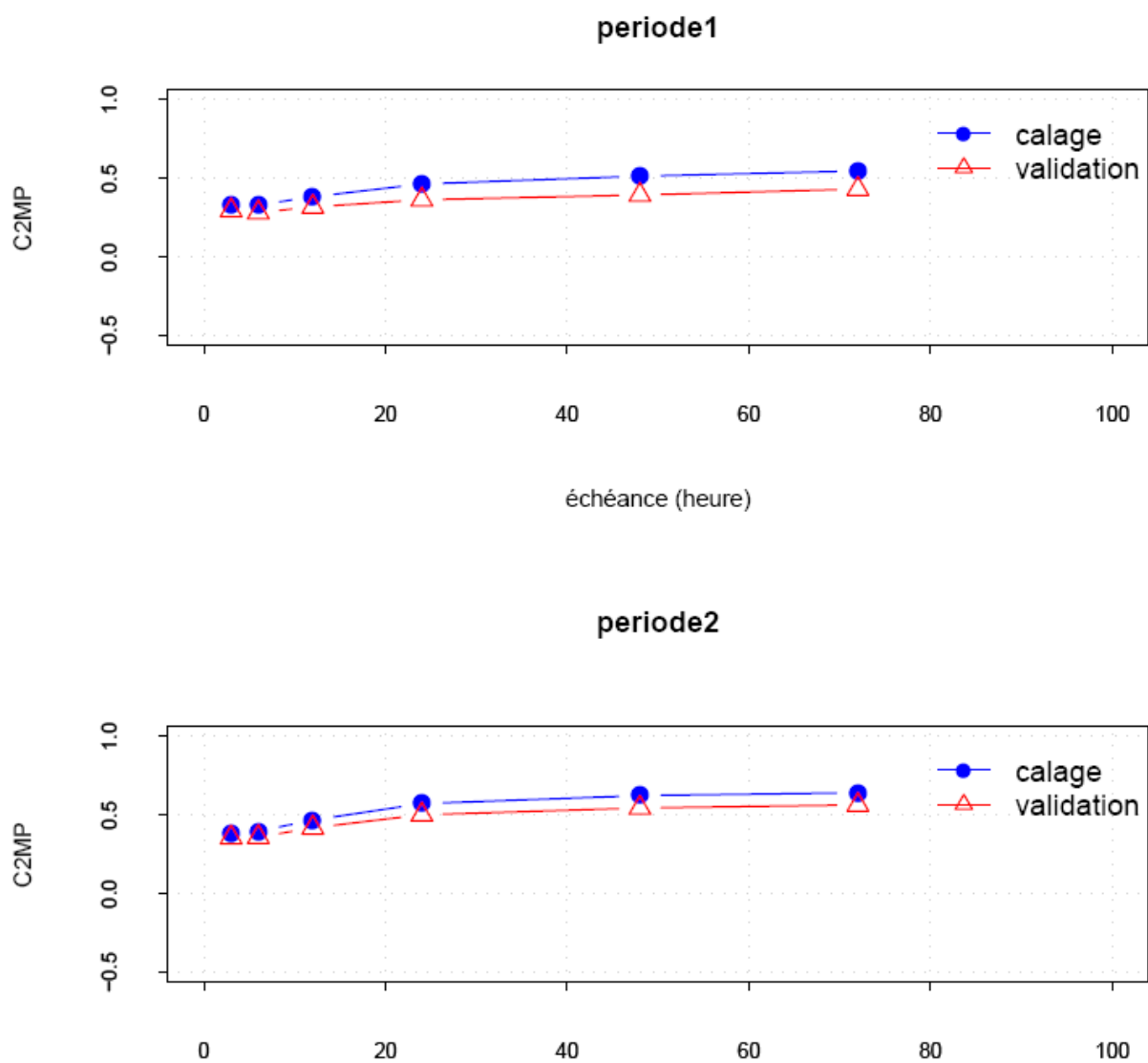


H3621010 - Le Loing à Épisy - 3900 km²



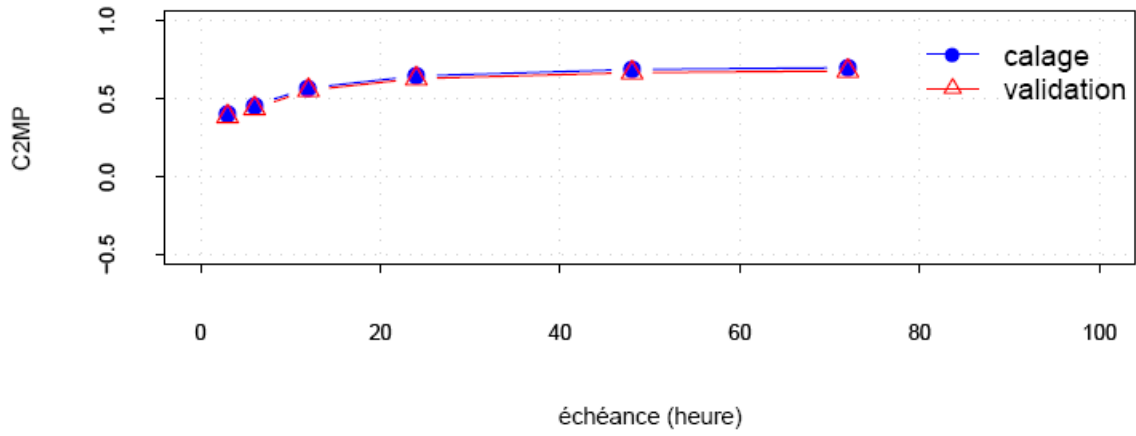
Annexe 6 : Critère de persistance calage/validation sur GR3P dernière version

H2051010 - Dornecy (Yonne) - 781 km² - BV Yonne-amont

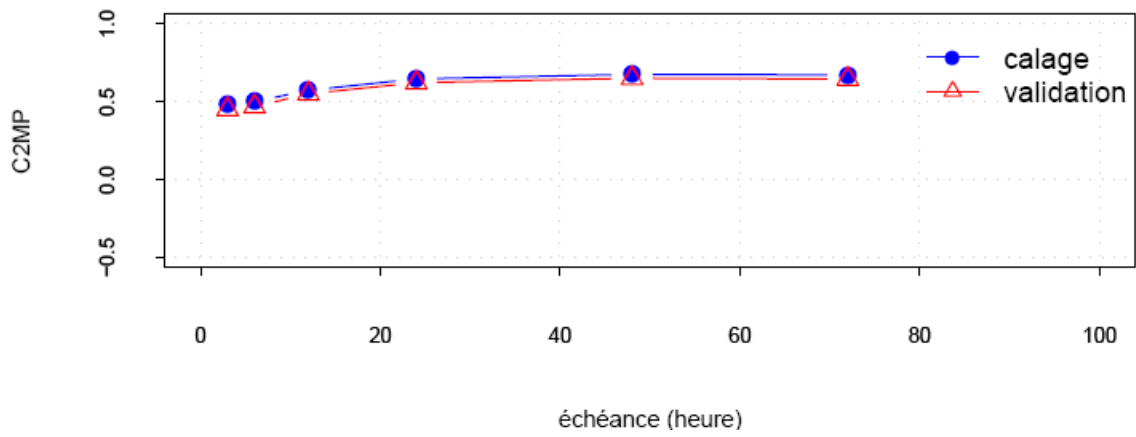


H2062010 - Ouagne (Yonne) - 264 km² - BV Yonne-amont

periode1

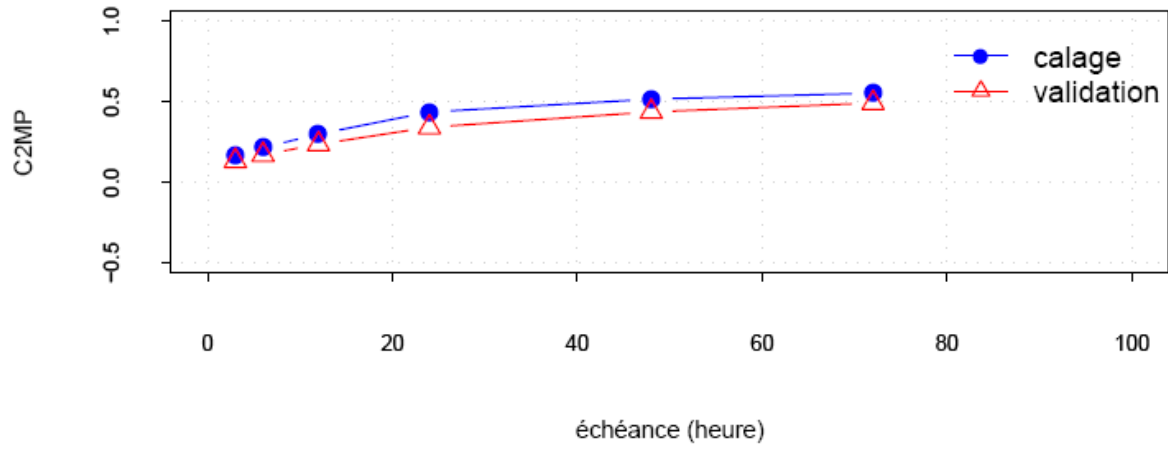


periode2

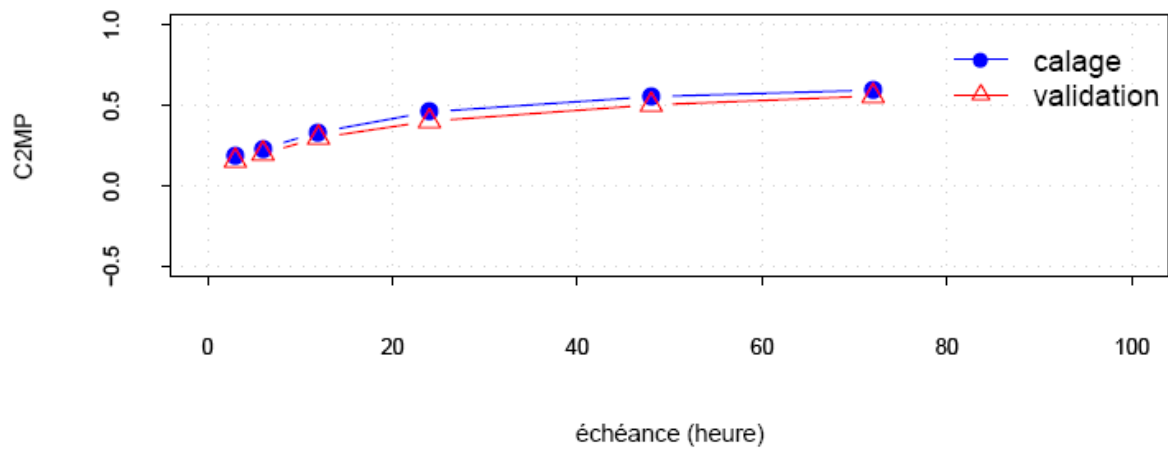


H2073110 - Corvol (Sauzay) - 81 km² - BV Yonne-amont

periode1

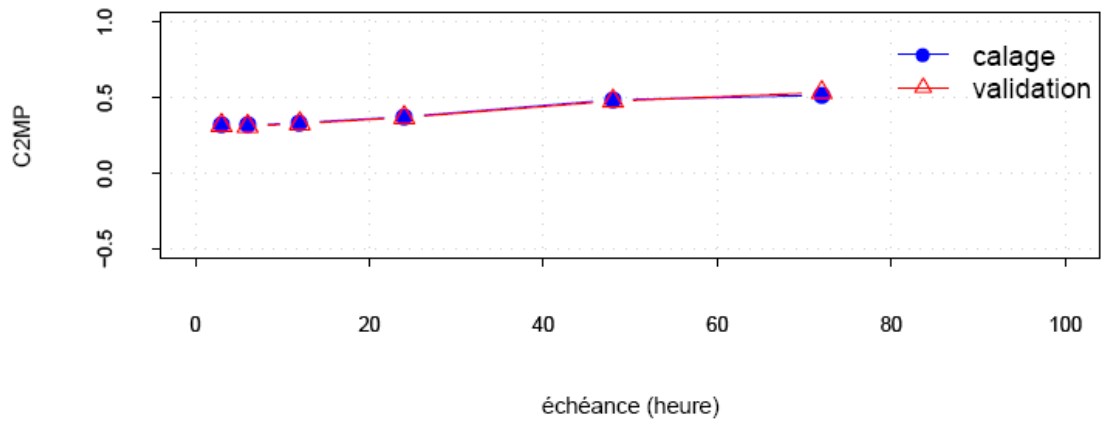


periode2

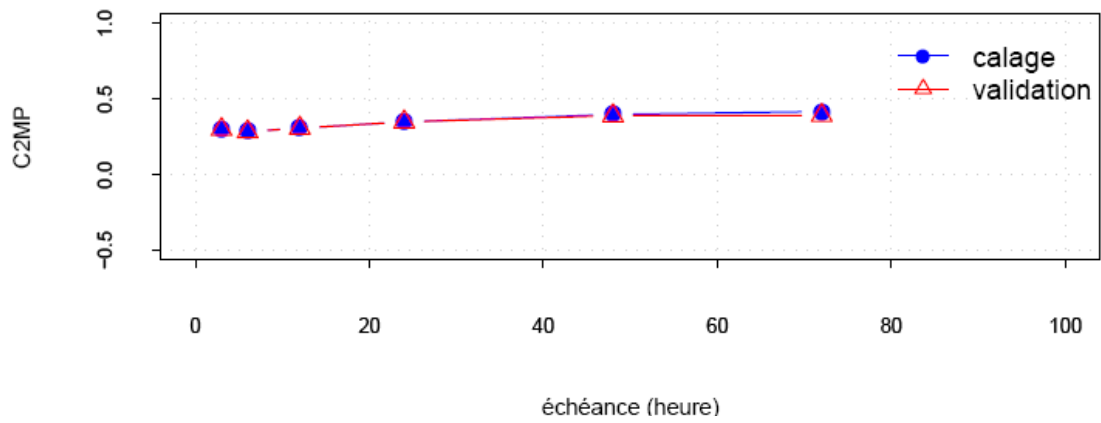


H2182010 - Arcy (Cure) - 1180 km² - BV Yonne-amont

periode1

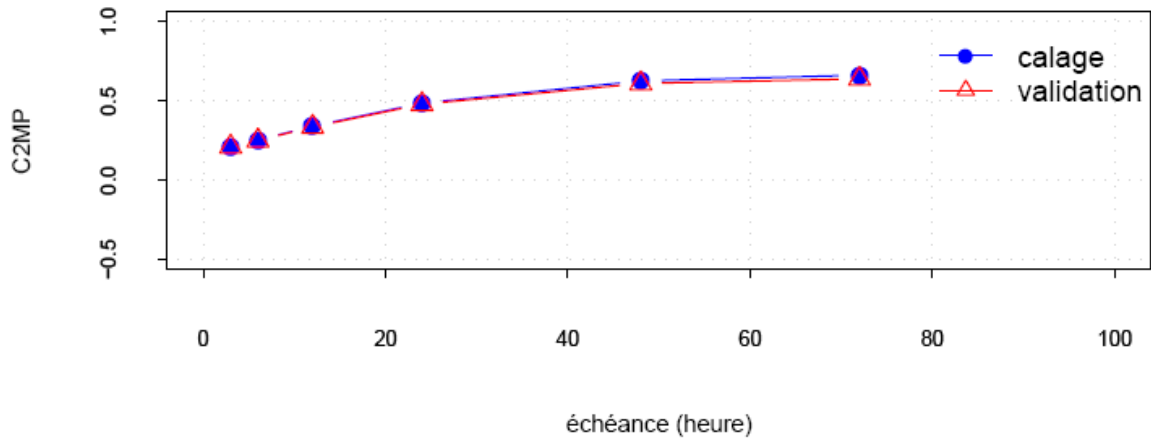


periode2

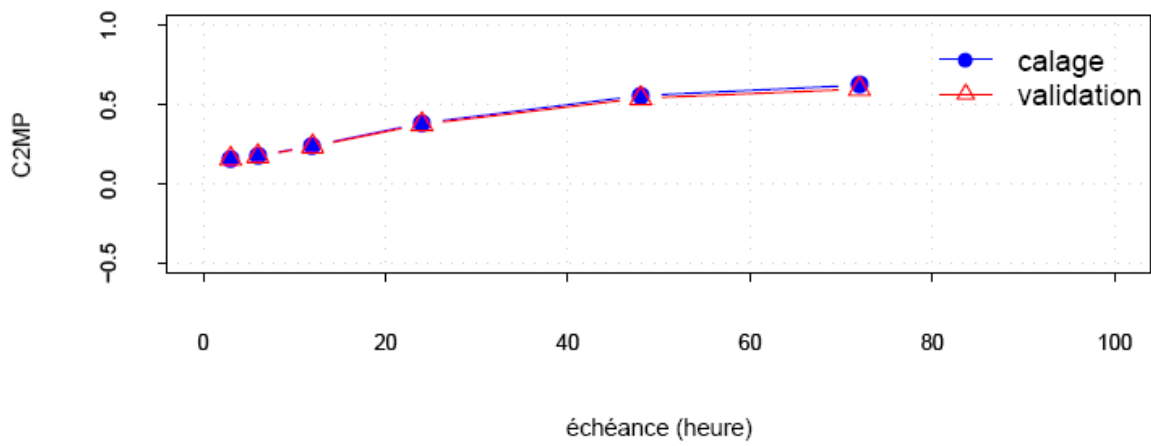


H2221010 - Gurgy (Yonne) - 3820 km² - BV Yonne-amont

periode1

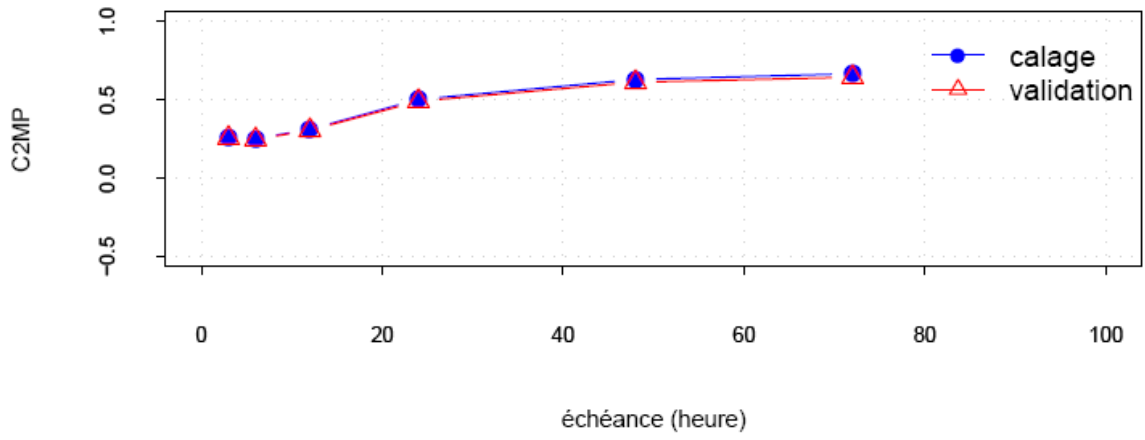


periode2

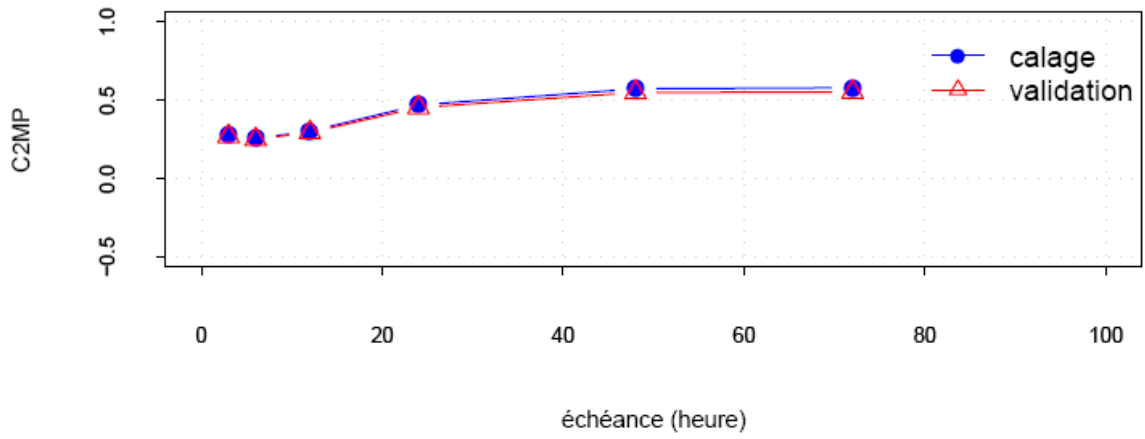


H2332020 - Dissangis (Serein) - 643 km² - BV Serein

periode1

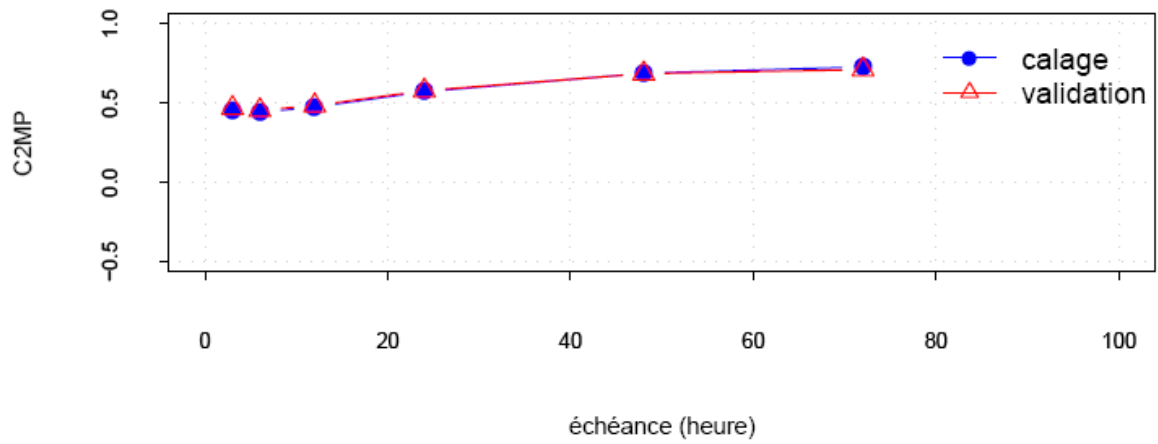


periode2

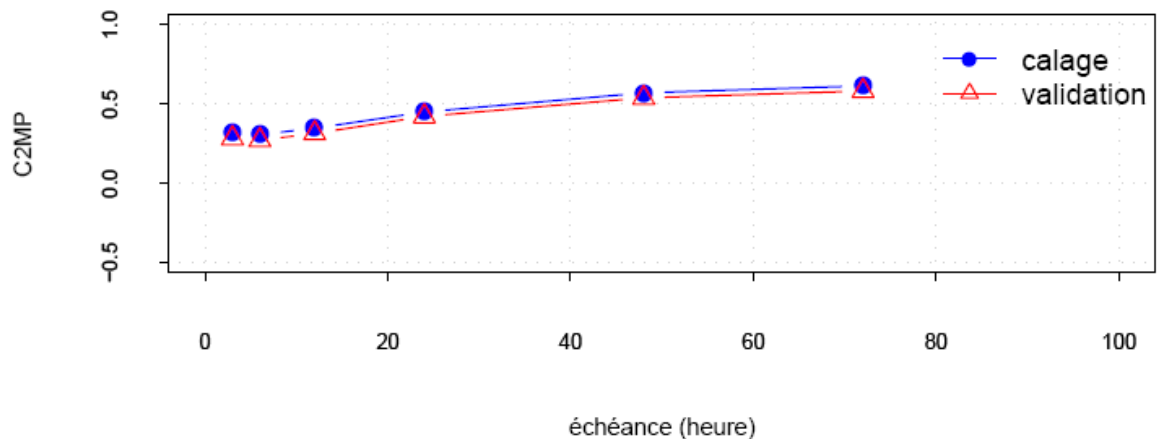


H2342020 - Chablis (Serein) - 1120 km² - BV Serein

periode1

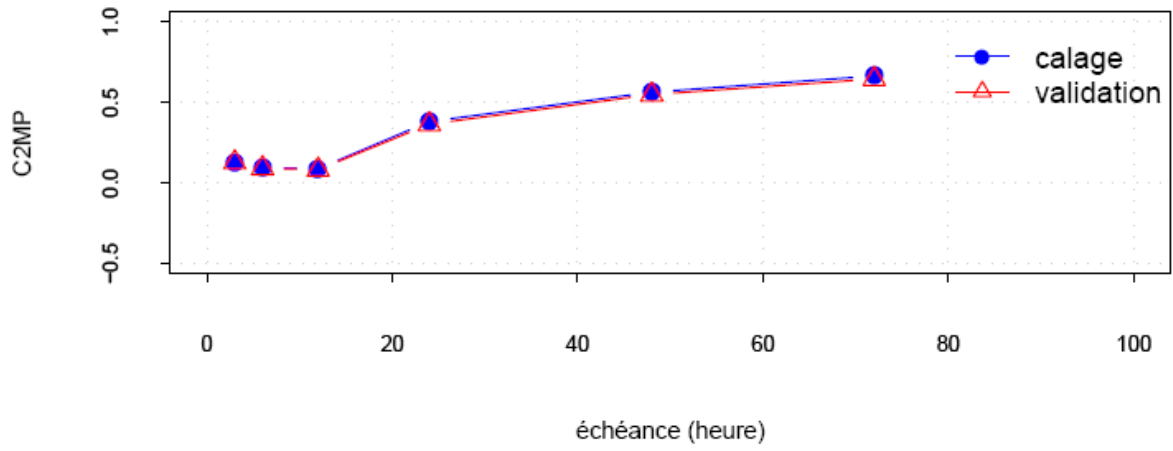


periode2

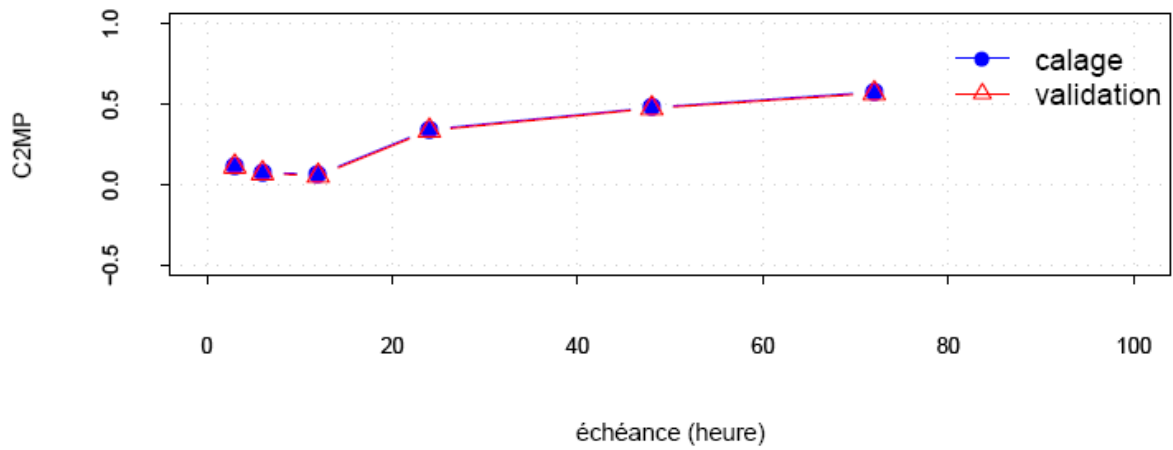


H2342030 - Beaumont (Serein) - 1340 km² - BV Serein

periode1

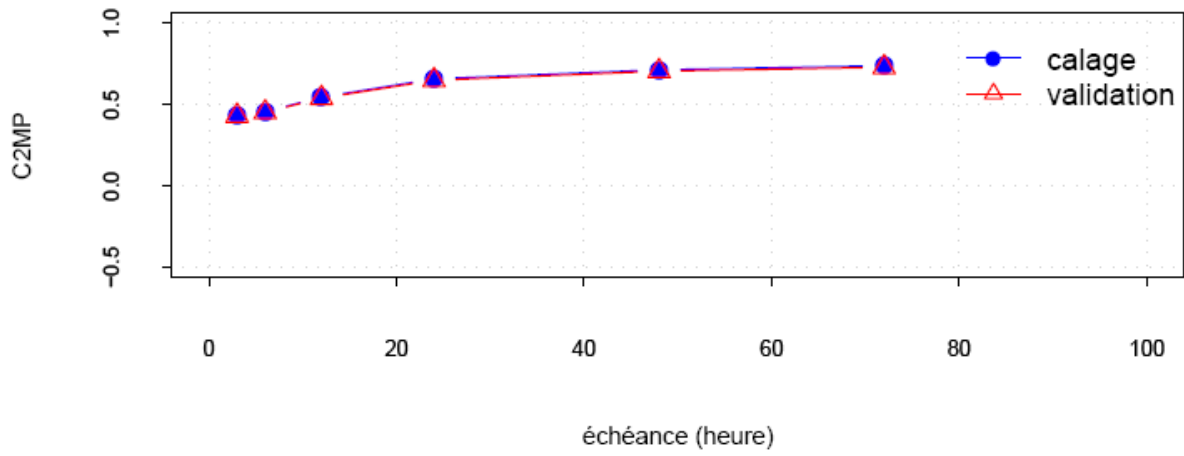


periode2

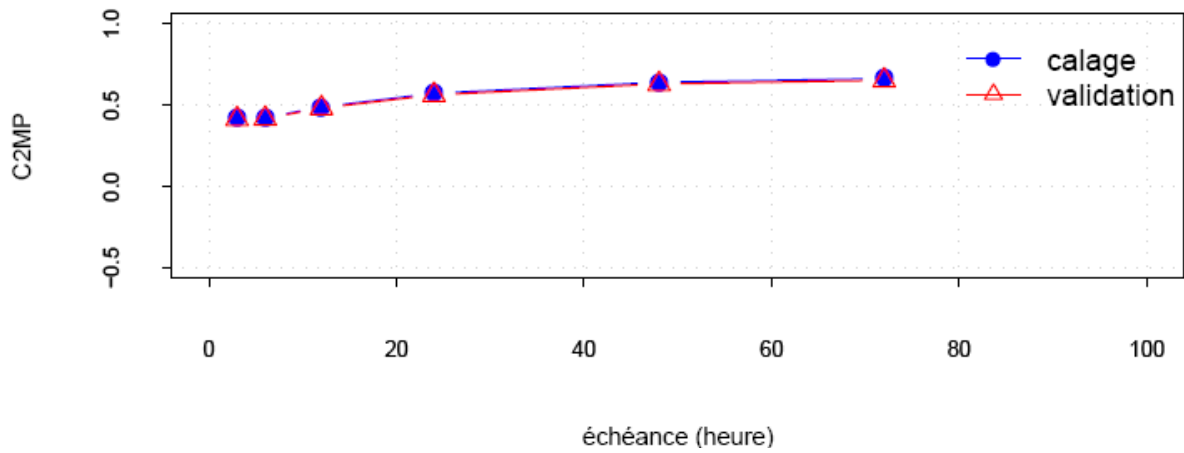


H2452020 - Aisy (Armançon) - 1350 km² - BV Armançon

periode1

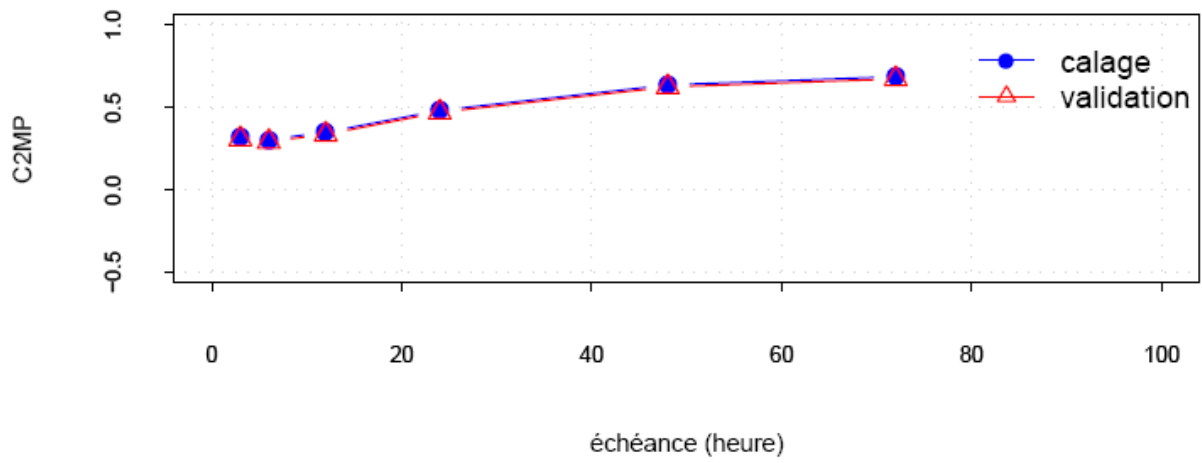


periode2

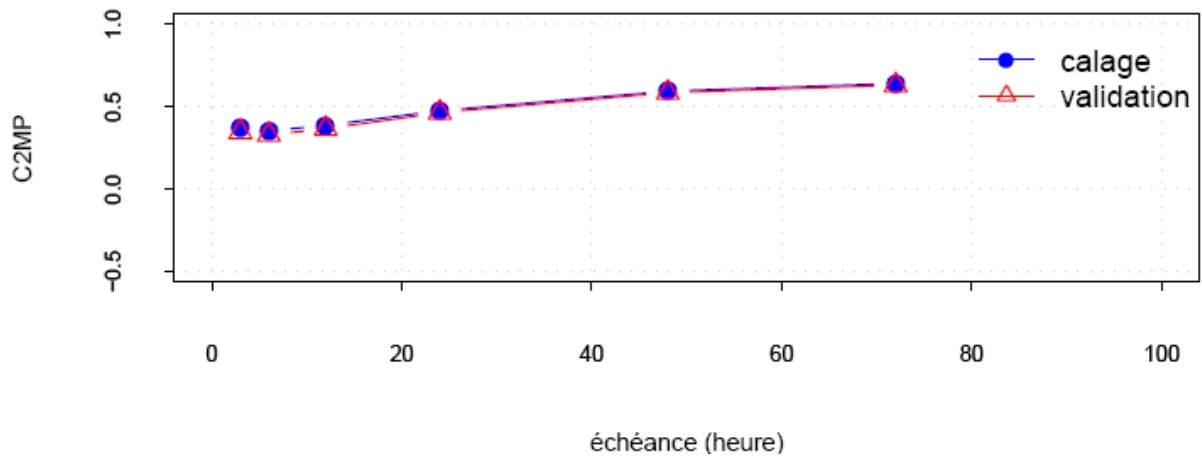


H2462020 - Tronchoy (Armançon) - 1970 km² - BV Armançon

periode1

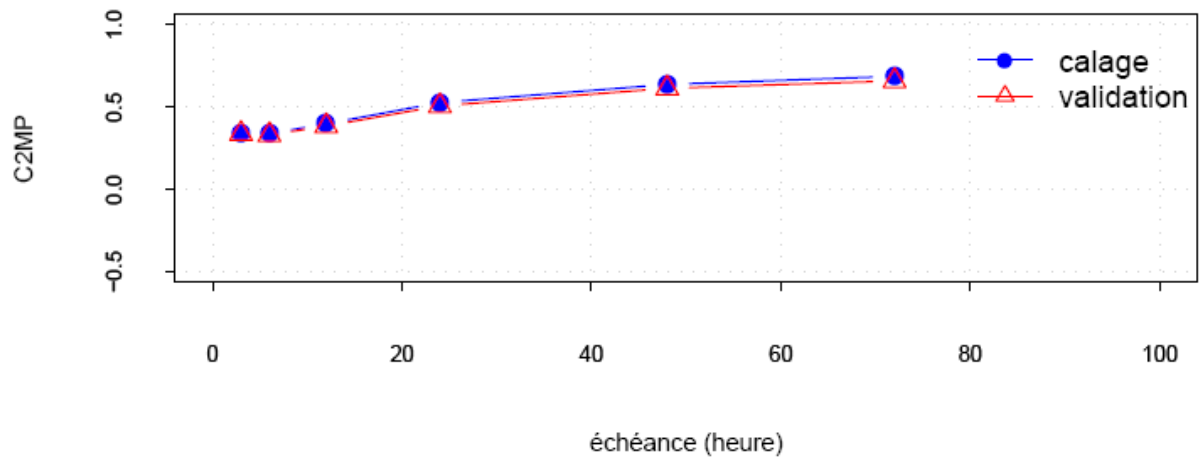


periode2

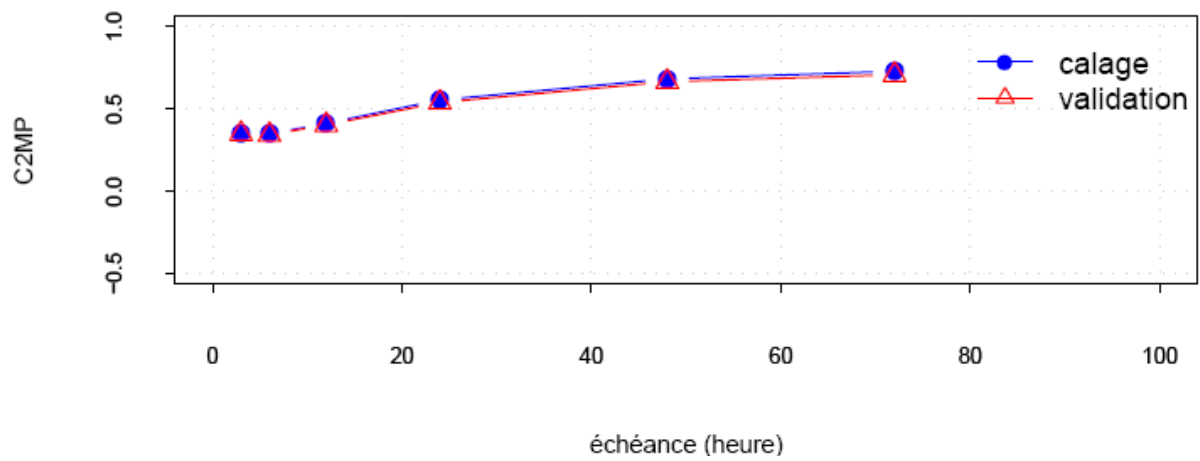


H2473010 - Chessy (Armançe) - 480 km² - BV Armançon

periode1

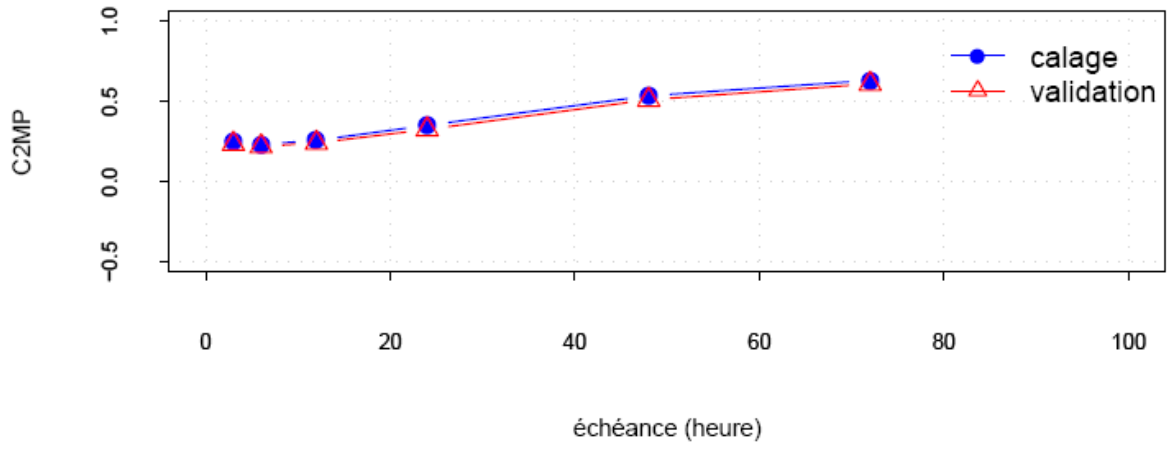


periode2

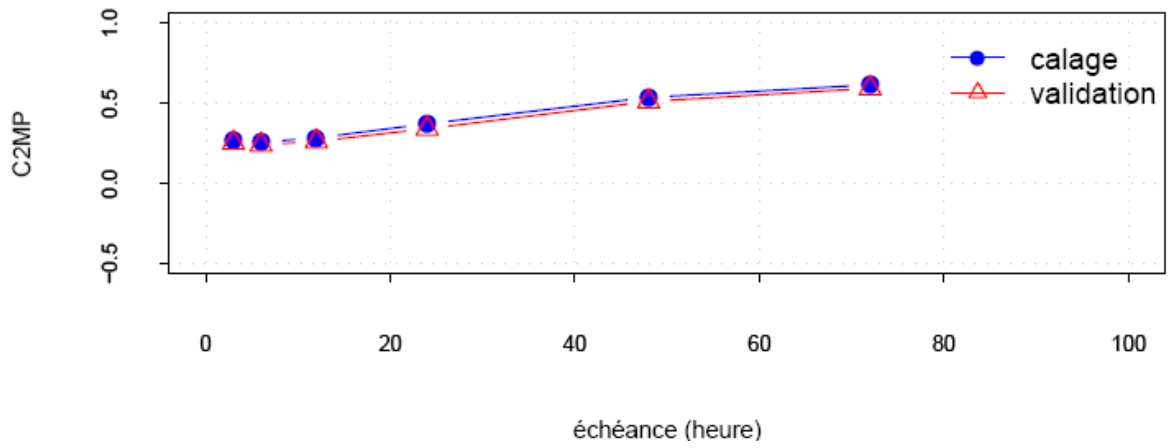


H2482010 - Briennon (Armançon) - 2990 km² - BV Armançon

periode1

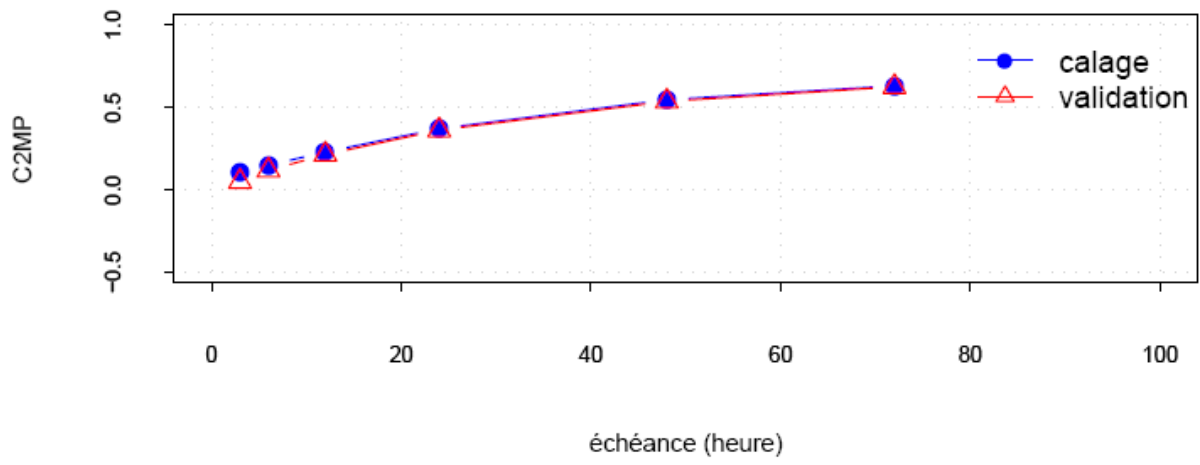


periode2

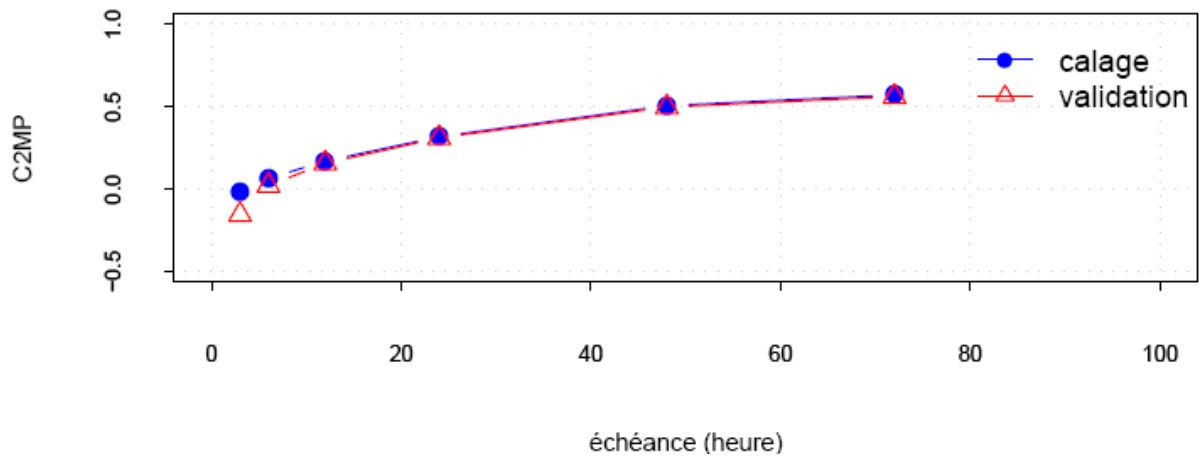


H2501020 - Joigny (Yonne) - 8880 km² - BV Yonne-aval

periode1

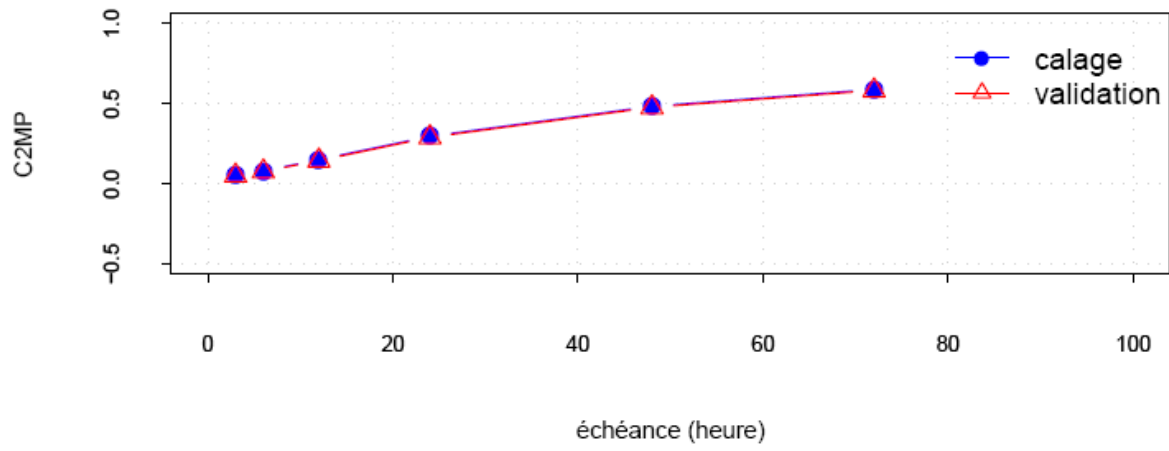


periode2

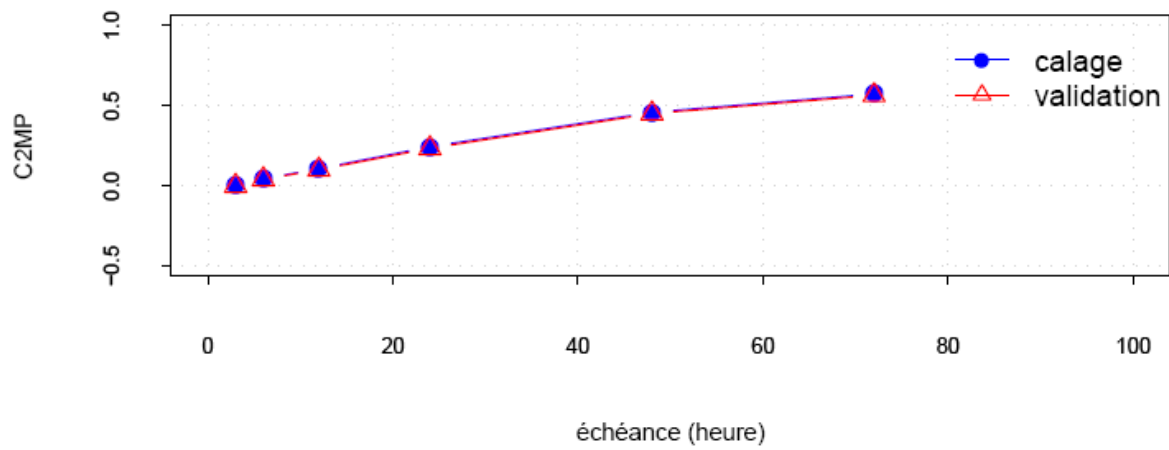


H2721010 - Courlon (Yonne) - 10700 km² - BV Yonne-aval

periode1

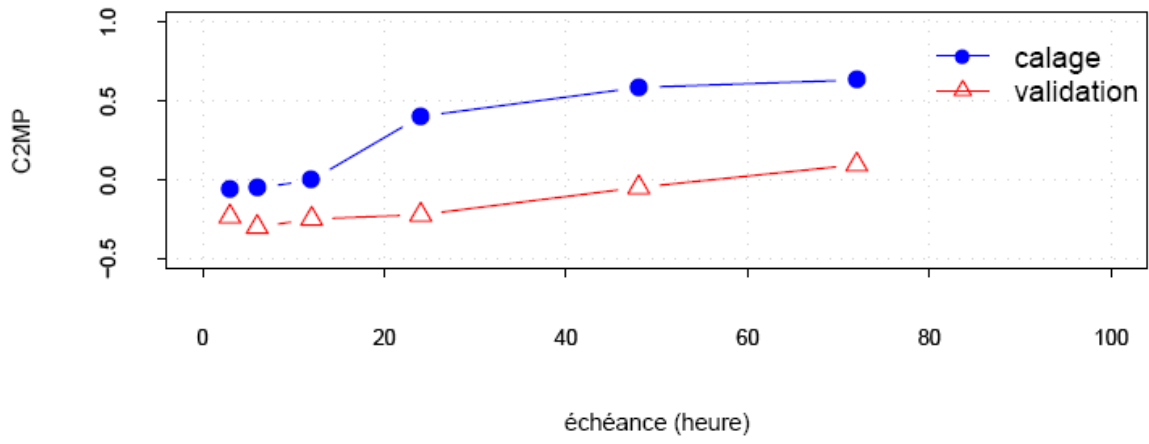


periode2

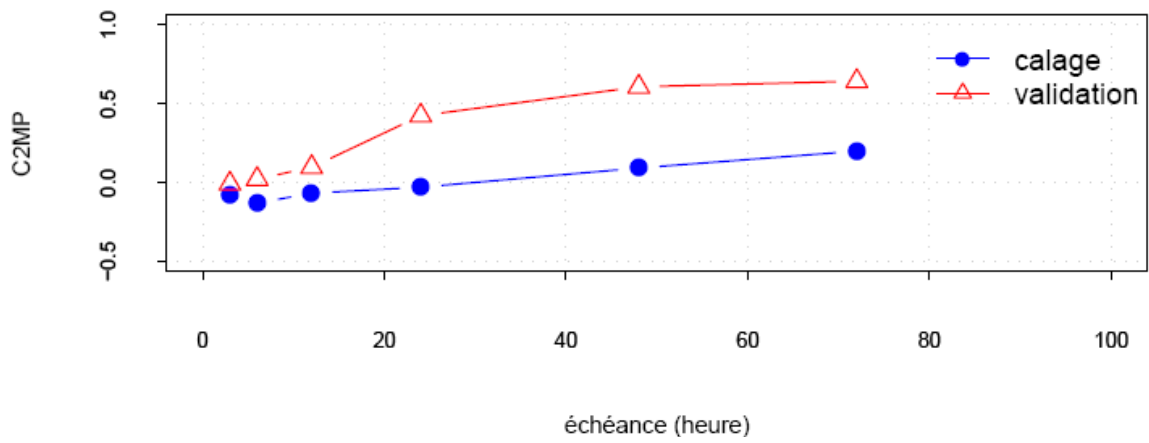


H3021010 - Montbouy (Loing) - 409 km² - BV Loing

periode1

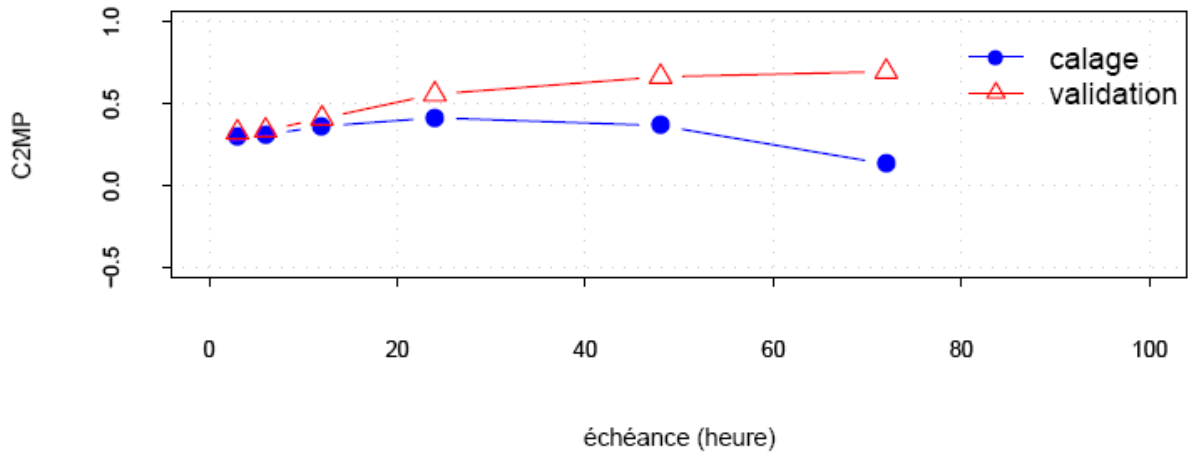


periode2

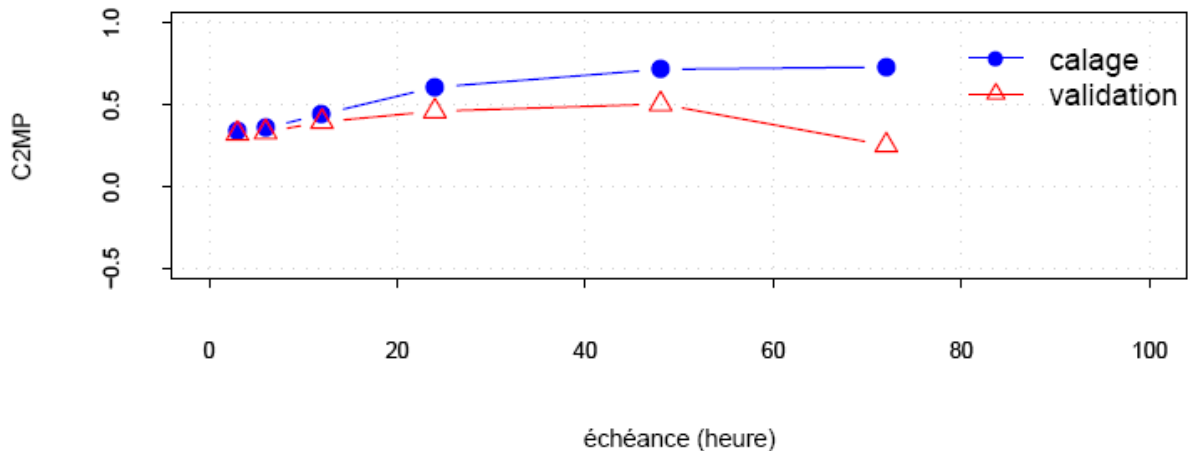


H3122010 - Charny (Ouanne) - 562 km² - BV Loing

periode1

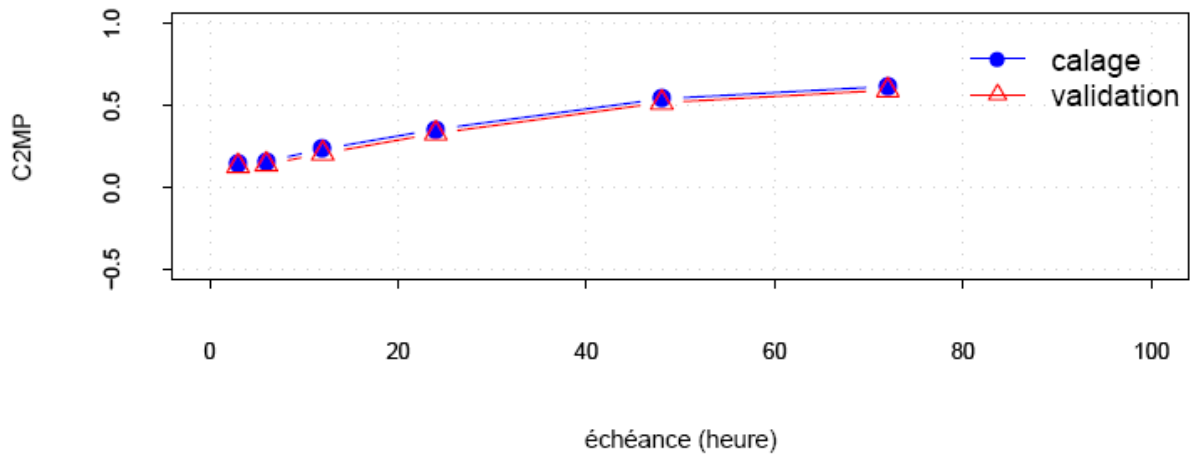


periode2

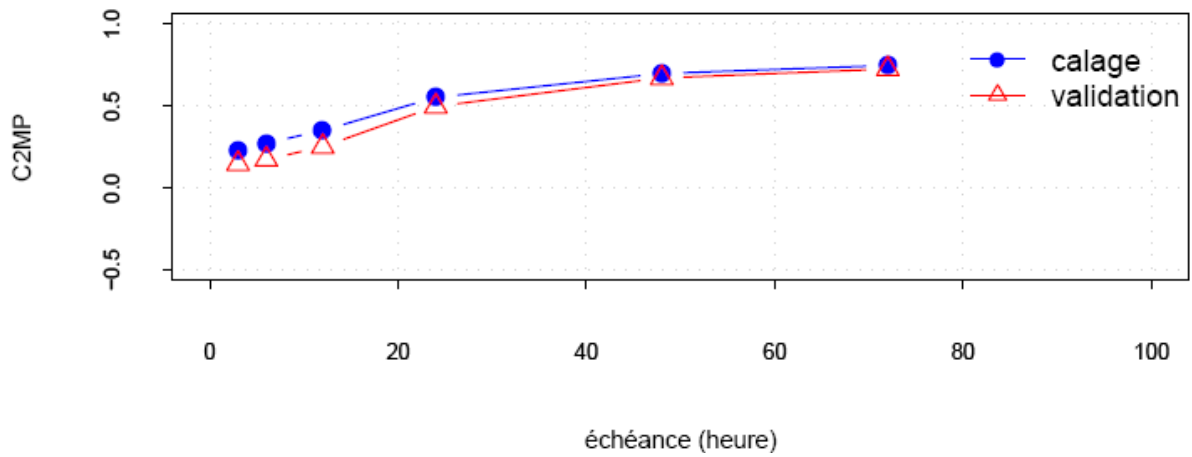


H3122020 - Gy (Ouanne) - 883 km² - BV Loing

periode1

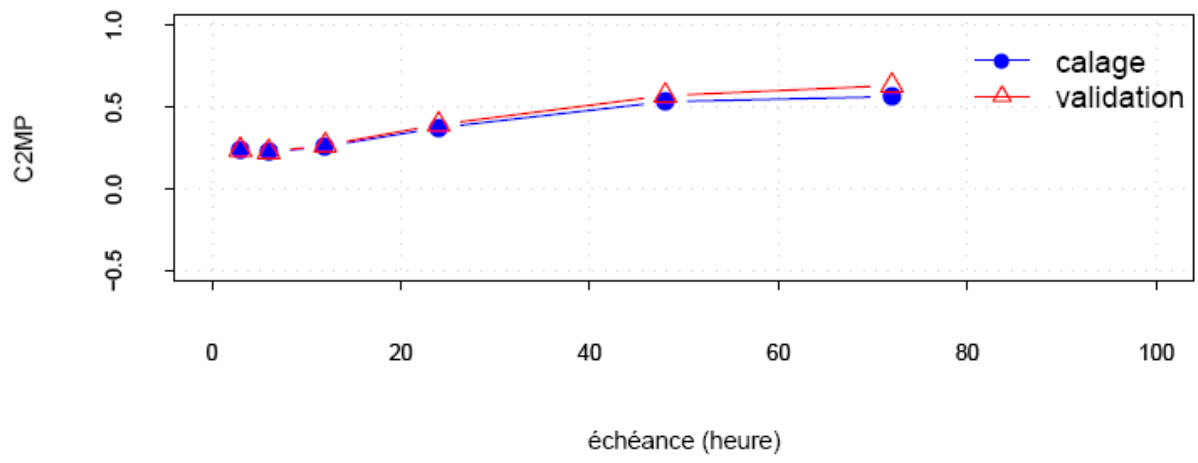


periode2

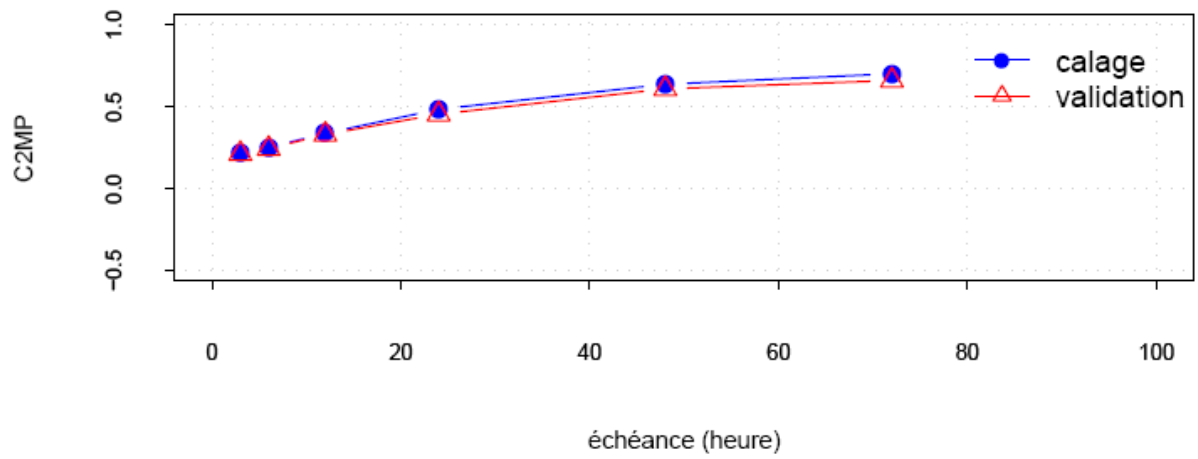


H3201010 - Chalette (Loing) - 2300 km² - BV Loing

periode1



periode2



H3621010 - Episy (Loing) - 3900 km² - BV Loing

