




NeWater



Faculté des Sciences d'Orsay 

Stage de Master 2^{ème} année

Sciences de la Terre spécialité Hydrologie, Hydrogéologie et Sols

Année universitaire 2005-2006

Bastien Abadie

SIMULATION DES CRUES DU RHIN PAR DES MODELES HYDROLOGIQUES METTANT EN ŒUVRE DIFFERENTES STRATEGIES D'AGREGATION

**Directeur de stage: Julien Lerat (hydrologue au Cemagref)
Vazken Andréassian (chef de l'unité HBAN)**



REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon encadrant, Julien Lerat, qui m'a donné de précieux conseils tout au long de ce stage. Sa disponibilité, sa patience et le partage de ses connaissances m'ont permis d'étudier dans des voies de recherche particulièrement intéressantes pour la modélisation hydrologique.

Je remercie cordialement Vazken Andréassian et Charles Perrin, qui ont contribué à mon intégration dans le sujet par leurs conseils et leurs apports bibliographiques. Je tiens par ailleurs à exprimer ma reconnaissance à l'ensemble de l'unité HBAN du Cemagref d'Antony, pour son enthousiasme et son accueil au sein du service.

Mes remerciements vont également à Jean-Louis Rosique, d'une grande aide dans l'utilisation des Systèmes d'Informations Géographiques.

Enfin, merci aux enseignants de la formation à l'Université Paris-Sud, particulièrement à Christelle Marlin, responsable du Master, pour leur suivi au cours de ces dernières années d'étude.

RESUME

La modélisation pluie-débit vise à reproduire la réponse en débit d'un bassin versant aux observations de pluviométrie à un pas de temps défini. Les approches semi-distribuées sont courantes en modélisation hydrologique, où le bassin est considéré comme un ensemble de sous-bassins. Le débit à l'exutoire est alors calculé par une agrégation des sorties de différentes sous-unités, augmentant la complexité le modèle. Des alternatives à ces méthodes ont été proposées au cours de ce stage, en partant d'une approche globale appliquée sur le bassin du Rhin. Le modèle GR4J considère les précipitations des 134 sous-bassins comme une moyenne, et la simulation des débits a montré des performances intéressantes avec l'ajout d'un module neige pour prendre en compte l'influence nivale sur le régime hydrologique du Rhin. Toujours en mode global, l'entrée des données pluviométriques a ensuite été limitée à 1, 5, 10 et 30 sous-bassins. Les résultats sur les débits simulés à l'exutoire s'avèrent étonnants pour un bassin d'une telle taille (160 000 km²). Un raffinement des modèles précédents a finalement tenté de les orienter vers la semi-distribution, avec deux différentes stratégies d'agrégation: une par distorsion des temps de base des hydrogrammes unitaires, et l'autre par un couplage avec un modèle de propagation. Les performances du meilleur modèle global ont ainsi été légèrement améliorées.

ABSTRACT

Rainfall-runoff models aim to simulate basin's discharges in regard to observed precipitations at a fixed time-step. Semi-distributed approaches are common in hydrological modelling, which split the basin into several homogeneous sub-basins. Runoff at the catchment outlet is calculated by an aggregation of different sub-units outputs, increasing model complexity. Alternatives to this method have been proposed during this training period, starting from a global approach applied on Rhine basin. The GR4J model considers 134 sub-basins precipitations as an average, and simulated runoff has shown interesting performances with an additional snow module to take into account snow influence on the Rhine hydrological regime. Then still in a global mode, precipitation data inputs have been limited to 1, 5, 10 and 30 sub-basins. Results on simulated discharges at the catchment outlet are surprising for such a size of basin (160 000 km²). We finally tried to refine precedents models in a way of semi-distribution, with two different strategies of aggregation: first by distorsion of time base of unit hydrograph, second by coupling with a propagation model. Thus, performances of the best lumped model have been slightly improved.

Table des matières

1	Introduction	7
1.1	Le projet NeWater (NeWater, 2004).....	7
1.2	Objectifs.....	8
2	Cadre de travail	10
2.1	La modélisation hydrologique	10
2.1.1	<i>Principes de base de la modélisation pluie-débit</i>	
2.1.2	<i>L'étape de calage</i>	
2.1.3	<i>La fonction objectif</i>	
2.1.4	<i>L'étape de validation</i>	
2.2	Le modèle GR4J	13
2.2.1	<i>Classification</i>	
2.2.2	<i>Description</i>	
2.3	Données hydrologiques et météorologiques	16
2.3.1	<i>Les débits</i>	
2.3.2	<i>Les précipitations, températures et évapotranspirations potentielles</i>	
2.4	Zone d'étude	19
2.4.1	<i>Contexte</i>	
2.4.2	<i>Morphologie du bassin</i>	
2.4.3	<i>Caractéristiques et régimes hydrologiques</i>	
2.4.4	<i>Caractéristiques et régimes climatiques</i>	
2.5	Résultats du modèle semi-distribué de RIZA/BfG	26
3	Méthode pour le calage et la validation du modèle.....	30
3.1	Périodes de calage et de validation	30
3.2	Méthode automatique d'optimisation des paramètres.....	31
3.3	Critères de qualité et d'optimisation	31
4	Approche n°1 de modélisation : mode global.....	33
4.1	Description du modèle	33
4.2	Difficultés rencontrées	34
4.3	Résultat général sur la station de jaugeage de Lobith.....	34
4.4	Résultat pour les crues	37
4.5	Commentaires sur les résultats.....	38
5	Approche n°2 de modélisation : mode global avec une information réduite sur la pluviométrie	40
5.1	Hypothèse	40
5.2	Description du modèle	41
5.3	Résultat général avec 1 sous-bassin en entrée.....	41

5.4	Résultat général avec 5, 10 et 30 sous-bassins en entrée	45
5.5	Résultat général avec deux districts HBV en entrée	47
5.6	Commentaires sur les résultats.....	49
6	Approche n°3 de modélisation : vers la semi-distribution	50
6.1	Hypothèse	50
6.2	Difficulté rencontrée	50
6.3	Description du modèle retenu	51
6.4	Résultat général sur la station de jaugeage de Lobith	53
6.5	Résultat pour les crues	55
6.6	Commentaires sur les résultats.....	57
7	Approche n°4 de modélisation : couplage de modèles globaux avec un modèle de propagation.....	58
7.1	Hypothèse	58
7.2	Description du modèle	58
7.3	Résultat général sur la station de jaugeage de Lobith	60
7.4	Résultat pour les crues	63
7.5	Commentaires sur les résultats.....	65
8	Conclusion et perspectives	66
8.1	Conclusion	66
8.2	Perspectives.....	67
9	Références.....	68
10	Table des illustrations.....	69
11	Annexes.....	72
11.1	Annexes 1 : Données hydrologiques et météorologiques	72
	<i>11.1.1 Les débits</i>	
	<i>11.1.2 Les précipitations, températures et évapotranspirations potentielles</i>	
11.2	Annexes 2 : Résultats de l'approche n°1 (mode global)	82
	<i>11.2.1 Station de Maxau</i>	
	<i>11.2.2 Station de Rockenau</i>	
	<i>11.2.3 Station de Worms</i>	
	<i>11.2.4 Station d'Obernau</i>	
	<i>11.2.5 Station de Cochem</i>	
	<i>11.2.6 Station d'Andernach</i>	
11.3	Annexes 3 : Résultats de l'approche n°2 (mode global avec une information réduite sur la pluviométrie).....	94
	<i>11.3.1 Résultat avec 1 sous-bassin en entrée</i>	
	<i>11.3.2 Résultat avec 5 sous-bassins en entrée</i>	
	<i>11.3.3 Résultat avec 10 sous-bassins en entrée</i>	
	<i>11.3.4 Résultat avec 30 sous-bassins en entrée</i>	

11.3.5	<i>Résultat avec la combinaison de 2 districts HBV</i>	
11.3.6	<i>Résultat avec trois versions supplémentaires de la correction ETP</i>	
11.4	Annexes 4 : Résultats de l'approche n°3 (vers la semi-distribution)	106
11.4.1	<i>Résultat avec 3 corrections ETP amont (Cochem, Obernau et Worms)</i>	
11.4.2	<i>Résultat avec 2 corrections ETP amont (Cochem et Worms)</i>	
11.4.3	<i>Résultat avec 1 correction ETP amont (Worms)</i>	
11.4.4	<i>Résultat avec la combinaison des meilleures 3 corrections ETP amont (Cochem, Obernau et Worms)</i>	
11.4.5	<i>Résultat avec 2 stations (Cochem et Worms) et 2 corrections ETP amont</i>	
11.4.6	<i>Résultat vers une autre semi-distribution avec 3 stations (Cochem, Rockenau et Maxau) et 3 corrections ETP amont</i>	
11.5	Annexes 5 : Résultats de l'approche n°4 (couplage de modèles globaux avec un modèle de propagation)	118
11.5.1	<i>Résultat avec un modèle de propagation à 7 paramètres</i>	
11.5.2	<i>Résultat avec un modèle de propagation à 4 paramètres</i>	
11.5.3	<i>Résultat avec un modèle de propagation à 9 et 10 paramètres</i>	



1 Introduction

Les changements globaux actuels influencent les régimes hydrologiques des bassins versants. Des programmes de recherche sont développés pour adapter les systèmes de gestion de l'eau à cette évolution, comme le projet européen NeWater lancé le 1^{er} janvier 2005. Son objectif est de mettre en place des méthodologies augmentant la réactivité des structures de gestion de l'eau, confrontées à un environnement changeant.

Dans le cadre d'un partenariat avec NeWater, l'unité « Hydrosystème et Bioprocédés » (HBAN) du Cemagref intervient sur la modélisation hydrologique en vue d'une exploitation opérationnelle (gestion de la ressource, prévision de crues et d'étiages, dimensionnement d'ouvrages d'art, détection des impacts anthropiques et des tendances, ...). Cette démarche vise à mettre à disposition des acteurs de l'eau des outils très simples de simulation hydrologique. A partir des observations de pluviométrie, on peut ainsi parvenir à reproduire la réponse en débit d'un bassin, notamment pour les crues exceptionnelles ou les basses eaux extrêmes. Afin d'appliquer les méthodologies identifiées en pratique, le projet NeWater comprend une série de bassins tests dont le bassin du Rhin fait partie dans son intégralité.

1.1 Le projet NeWater* (NeWater, 2004)

Le projet NeWater intègre 40 partenaires publiques et privés répartis dans 15 pays, principalement en Europe. Son objectif principal est de mettre au point, en 48 mois d'étude, des méthodes de transition entre les systèmes de gestion actuelle de l'eau et les nouvelles approches de la "**gestion adaptative**". Ce concept est une idée permettant de dépasser la gestion intégrée de l'eau qui rencontre quelques difficultés dans son application pratique. Une innovation scientifique majeure de NeWater consiste en le fait qu'il combine les sciences naturelles et sociales tout au long du projet.

Le centre des activités de recherche est le développement de concepts et d'outils pour appuyer un changement par étapes dans les processus de gestion de l'eau. Cette transition vise des éléments clés, pour lesquels NeWater doit proposer de nouvelles approches pertinentes. Elles concerneront entre autres les politiques de gestion (décentralisation de l'Etat, intégration et planification par secteurs, problèmes transfrontaliers, ...), le partage de l'information, la diversification des infrastructures et les stratégies financières en jeu.

Pour répondre à chacun de ses objectifs, le projet est structuré en 6 blocs de travail, dont les thèmes sont confiés à différents participants :

- WB1. Transition vers la gestion adaptative des bassins versants : régimes adaptatifs, gouvernements et institutions, régimes transfrontaliers, intégration de la planification spatiale, **meilleure gestion des stockages d'eau de surface et souterraine**, transition vers des systèmes de surveillance avancés, méthodes de transition vers la gestion adaptative.
- WB2. Vulnérabilité et gestion adaptative dans les bassins versants : vulnérabilité aux chocs et aux stress hydriques, risques et changements climatiques, conflits entre quantité, qualité de l'eau et écosystèmes, dimension sociale de la gestion intégrée, capacité adaptative de systèmes complexes, scénarios et tendances de la gestion intégrée.

* www.newater.info



- WB3. Etude méthodologique sur une sélection de bassins versants : processus de coordination, **Rhin**, Elbe, Guadiana, Tisza (Europe), Amudarya (Asie Centrale), Nil, Orange (Afrique).
- WB4. Conseils et outils pratiques : résumé des meilleurs cas d'étude, développement d'outils, conseils et diffusion de l'information.
- WB5. Plates-formes thématiques et expertises internationales : activités de gestion, d'innovation, de formation et de diffusion de l'information.
- WB6. Plate-forme interne de coordination et de gestion du projet NeWater (environ 11 membres permanents) : activités de gestion, de recherche et de formation.

La coordination et la gestion globale du projet sont assurées par l'Institut de Recherche sur les Systèmes Environnementaux (USF) à Osnabrück (Allemagne) et par le Centre de Recherche de l'Université d'Alterra-Wageningen (Pays-Bas). Les échanges entre les différents acteurs des 6 blocs de travail seront facilités par la Plate-forme Interne de Coordination du Projet (PICP) et par plusieurs rencontres au cours de l'année.

Le Cemagref est en partie impliqué dans les 4 premiers blocs définis par le projet NeWater. Les tâches sont réparties dans 3 unités de recherche différentes : G-EAU (Montpellier), TETIS (Montpellier) et **HBAN (Antony)**. Par la suite, seuls les objectifs de mon stage de fin d'étude effectué au sein de l'unité HBAN seront exposés. Dans la planification des activités confiées au Cemagref, ce travail de recherche correspond à l'activité **WP1.5** et pourra éventuellement apporter une contribution au **WP 3.2** (Cf. NeWater, 2004, p112, p127). Il s'est inscrit dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut de Gestion des Eaux Continentales et du Traitement des Eaux Usées aux Pays-Bas (RIZA), chargé entre autres de la coordination du cas d'étude du bassin du Rhin.

1.2 Objectifs

Les approches de modélisation distribuée et semi-distribuée sont courantes en hydrologie, en particulier sur de grands bassins versants comme celui du Rhin (160 000 km² à la station de jaugeage de Lobith*). Ces approches divisent le bassin en plusieurs unités homogènes, appelées "sous-bassins" pour les modèles semi-distribués ou "maille" pour les modèles distribués. La transformation de la pluie en débit est effectuée à l'échelle de ces unités, et une agrégation finale permet de calculer un débit à l'exutoire du bassin.

L'Institut de Gestion des Eaux Continentales et du Traitement des Eaux Usées (RIZA) néerlandais et l'Office Fédéral pour l'Hydrologie (BfG) allemand (RIZA, 2005) ont construit un modèle semi-distribué du bassin du Rhin basé sur 134 sous-bassins (Cf. Figure 6 p17), avec des résultats satisfaisants : les critères de Nash-Sutcliffe sont dans une gamme de 80 à 90% (Cf. Chapitre 2.5 p26).

Ces méthodologies sont intéressantes mais introduisent un important degré de complexité dans les processus de modélisation. Deux genres de problèmes ressortent quand un modèle distribué ou semi-distribué est appliqué :

- **les données ne sont en général pas valables à l'échelle du sous-bassin** (dans le cas du bassin du Rhin, 50 stations de jaugeage peuvent être utilisées pour valider les calculs de débits sur les pluies et évapotranspirations des 134 sous-bassins). Ainsi les

* Station de jaugeage située sur le Rhin à la frontière entre l'Allemagne et les Pays-Bas.



composants du modèle ne peuvent pas être validés individuellement, seul le résultat de l'agrégation finale peut l'être.

- **la méthode d'agrégation introduit des paramètres supplémentaires et augmente les incertitudes.** L'agrégation des hydrogrammes n'est pas simple et requiert des efforts supplémentaires de modélisation, ayant des effets importants sur le résultat final.

Le but cette étude est de proposer **des alternatives aux approches distribuées et semi-distribuées pour les simulations pluie-débit sur les grands bassins**. Ce travail de recherche contribue aux objectifs du projet NeWater pour les raisons suivantes :

- les modèles pluie-débit sont des outils essentiels pour les acteurs de l'eau. Simplifier leurs utilisation sur de grands bassins pourraient faciliter leur diffusion dans les diverses applications hydrologiques (prévision de crue, impact du changement climatique, dimensionnement d'ouvrage d'art, ...).
- les modèles distribués et semi-distribués requièrent d'énormes bases de données, ce qui n'est pas toujours possible à obtenir. Des approches simplifiées pourraient **diminuer les processus et accélérer les étapes de calage du modèle**.

L'objectif principal est de présenter **un modèle hydrologique simple pour simuler les débits à la station de jaugeage de Lobith**. Cette station représente le dernier point où le Rhin peut être considéré comme un unique corridor fluvial. A l'aval de Lobith, le Rhin entre aux Pays-Bas avec leur système complexe de canaux interconnectés (Cf. Chapitre 2.4.1 p20).

Une première partie du rapport sera consacrée au cadre de la recherche, à travers une présentation des outils et des données, de la zone d'étude et des résultats du modèle semi-distribué de RIZA/BfG. Après avoir défini les méthodes pour le calage et la validation, les modèles seront mis en œuvre au pas de temps journalier en partant d'une **approche globale** (le bassin à Lobith est considéré comme une seule unité de 160 000 km²). Les modèles seront ensuite raffinés par deux **approches de semi-distribution originales**. Finalement, une comparaison entre tous les résultats permettra de fournir des conclusions et perspectives quant à l'application d'approches simples en modélisation hydrologique sur un grand bassin versant.



2 Cadre de travail

La modélisation hydrologique respecte une méthodologie en plusieurs étapes. Cette partie vise à décrire en premier lieu les principes généraux de la modélisation pluie-débit, à travers les phases successives du calage, de la validation et de l'évaluation des performances.

Les aspects du modèle hydrologique GR4J et les caractéristiques du bassin versant du Rhin seront ensuite présentés, ces deux éléments complétant le cadre de l'étude. Une modélisation solidement fondée doit d'abord passer par l'analyse des données pour la compréhension globale de l'hydrologie du fleuve à grande échelle (grands ensembles hydrologiques, types de réponse en crue, ...). Elle sera également basée sur certains pré requis, correspondant aux résultats du modèle semi-distribué du bassin du Rhin développé par RIZA et BfG (RIZA, 2005).

2.1 La modélisation hydrologique

2.1.1 Principes de base de la modélisation pluie-débit

La majorité des modèles pluie-débit fonctionne selon le principe décrit dans la Figure 1. Les modèles globaux considèrent le bassin comme une unité à part entière par rapport aux pluies, aux évapotranspirations et aux débits simulés à l'exutoire (Cf. Figure 2a).

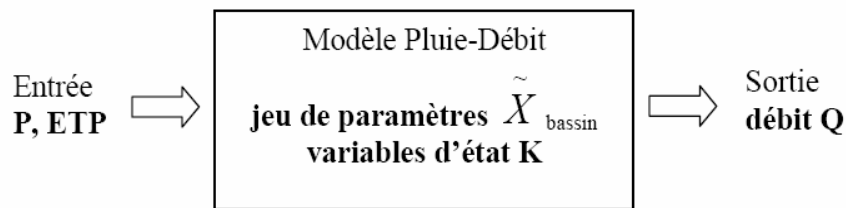


Figure 1 : Principe de fonctionnement des modèles globaux pluie-débit

Les **variables d'entrée** du modèle sont ici des séries historiques de mesures des précipitations (P) et des estimations d'évapotranspiration potentielle (ETP). Les **variables de sortie** sont les débits simulés (Q). Le **pas de temps** des données à utiliser en entrée dépend de la structure du modèle, et il est le même pour les débits simulés. Le modèle dépend de **variables d'état** (K) qui caractérisent le système modélisé (niveau de réservoir, pluie nette, interception...), et d'un jeu de **paramètres** (X) s'adaptant à la série des débits mesurés pour retranscrire une série de débits simulés. Ces paramètres peuvent ou non avoir une interprétation physique.

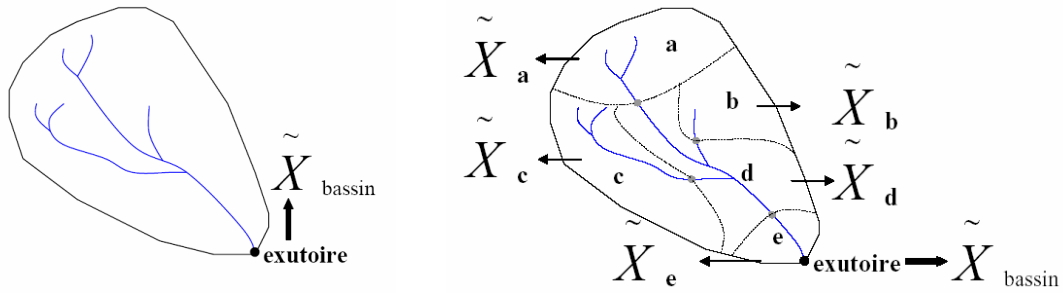


Figure 2: a) Schéma d'un modèle global
b) Schéma d'un modèle semi-distribué

La Figure 2b montre un procédé classique de **semi-distribution** d'un modèle pluie-pébit. Les variables d'entrée ne sont plus les pluies et les évapotranspirations du bassin entier, mais celles **de sous-bassins {a,b,c,d,e}** qui permettent de simuler indépendamment les débits aux différents exutoires, selon le schéma de la Figure 1. La somme de ces débits est propagée jusqu'à l'exutoire du bassin entier par différentes méthodes d'agrégation ; le jeu de paramètres \tilde{X}_{bassin} est optimisé pour caler la série simulée sur la série de débits mesurés (Cf. Figure 3). Ce procédé s'oriente vers la mise en œuvre d'un modèle semi-distribué, dont les variables de sortie sont les débits simulés à l'exutoire du bassin versant (Q).

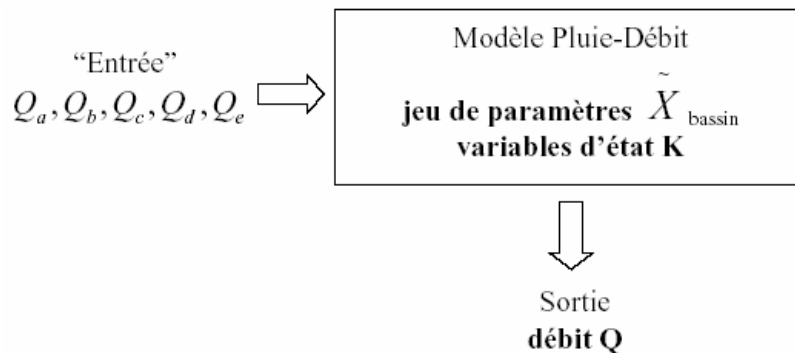


Figure 3: Principe de fonctionnement des modèles semi-distribués pluie-débit

2.1.2 L'étape de calage

Certains **paramètres** sont souvent impossibles à mesurer ou à évaluer. Cette identification incomplète oblige à estimer les paramètres manquant par **calage** : il s'agit de rechercher quelles valeurs permettent de simuler au mieux, au vu d'un critère choisi, une série de données de référence sans modifier les paramètres déjà bien calés (Cosandey, Robinson, 2000). Pour les modèles pluie-débit, les paramètres sont ajustés de manière à ce que la simulation des débits corresponde le plus étroitement possible avec la série de débits mesurés sur la période de calage.

L'étape de **calage**, encore appelée **calibration**, joue plusieurs rôles (Cosandey, Robinson, 2000):

- un premier, explicite, d'estimation de paramètres non connus.
- un second, implicite, de compensation sur ces paramètres de toutes les erreurs liées au modèle ou aux données.



- un dernier, d'évaluation de la sensibilité du modèle aux différents paramètres.

Le processus du **calage manuel** peut être une tâche très pénible et très longue, dépendant du nombre de paramètre libre du modèle et de leur degré d'interaction (Madsen et al., 2002). C'est pourquoi on leur préfère des **procédures automatiques de calage** plus objectives.

Le choix de la **période de référence** est crucial pour la qualité du calage : plus la période est contrastée, plus la gamme de fonctionnement est représentative, et plus sont nombreuses les combinaisons de processus et facteurs qu'elle permet d'activer dans le modèle (Cosandey, Robinson, 2000).

La procédure de calage utilisée dans notre modèle du Rhin est la même pour toutes les approches, et est détaillée dans le Chapitre 3 p30. Il s'agit du "**split-sample test**", schéma classique du calage présenté par Klemes (1986).

2.1.3 La fonction objectif

La qualité du calage sur la période de référence est généralement évaluée en prenant comme **critère** la valeur d'une **fonction objectif**. Pour un jeu de paramètres fixés, elle fournit une mesure globale de l'écart entre les séries des valeurs mesurées et simulées. Le calage revient à rechercher les valeurs des paramètres correspondant au minimum (ou maximum selon la formulation) de la fonction objectif.

L'application des routines de calage automatique est basée sur une mesure objective de comparaison, encore appelée critère d'ajustement (Perrin et al., 2001). Le critère le plus communément utilisé est celui de **Nash-Sutcliffe** (Nash, Sutcliffe, 1970), calculé avec la formule suivante :

$$NS = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^{Obs} - Q_i^{Sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i^{Obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \right] \times 100$$

Q_i^{Obs} débit journalier observé au jour i

Q_i^{Sim} débit journalier calculé au jour i

\bar{Q}^{obs} débit moyen observé au cours de la période de simulation

N nombre de pas de temps de simulation

NS varie entre $-\infty$ et 100 %. Si NS est égal à 100%, la simulation correspond parfaitement aux données mesurées. Ce critère accorde plus d'importance aux erreurs sur les forts débits avec un calage sur Q . En pratique, il convient de garder cette propriété à l'esprit lors de l'interprétation des performances des modèles, ou encore de transformer les variables sur lesquelles on calcule le critère. Par exemple, on accordera la même importance à toutes les classes de débits en calculant le critère sur les logarithmes des débits.



Entre autres, les transformations appliquées sur les débits ciblent les variables du Tableau 1 :

Variables	Informations
Q	Forts débits
\sqrt{Q}	Débits moyens
$\log(Q)$	Faibles débits

Tableau 1: Variables des critères d'ajustement

Les autres critères d'évaluations utilisés dans la mise en œuvre de notre modèle sont détaillés dans le Chapitre 3.3 p31.

2.1.4 L'étape de validation

Cette phase vise à valider le réalisme des résultats, en vérifiant si le modèle calé simule correctement des séries de données de référence, non utilisées lors du calage. **La performance du modèle est jugée sur une période différente de celle ayant servi à ajuster ses paramètres.** Comme le recommande Klemes (1986), cette validation (ou contrôle) devrait comporter les étapes itératives suivantes :

- calage sur une période et sur un bassin de référence, si possible pour plusieurs variables d'intérêt (Cf. Tableau 1).
- validation sur d'autres périodes pour le même bassin, sans modifier le jeu de paramètres estimés ou calés.

La qualité du modèle se mesure autant à la valeur du critère d'ajustement qu'à la différence de résultats entre la valeur prise par la fonction objectif sur la période de calage et celle prise sur une période de contrôle différente. D'une manière générale, l'objectif des modélisateurs est de chercher à améliorer les valeurs des critères d'ajustement, traduisant les performances de leurs simulations.

2.2 Le modèle GR4J

2.2.1 Classification

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit conceptuel à réservoirs. Il a été développé par le Cemagref (Makhlouf et Michel, 1992), pour des applications à l'échelle du bassin versant (mode global).

Il existe de nombreuses classifications des différents types de modèle. Chacun fournit une image plus ou moins simplifiée de la réalité, et a ses avantages et ses limites propres. Afin de suggérer quelques règles pratiques sur l'utilisation des modèles hydrologiques, De Marsily (1994) propose une classification des modèles hydrologiques en deux catégories :

- **modèles construits sur des données** (phénomènes observables) : modèles boîte noire, essentiellement empiriques.
- **modèles sans observations disponibles** (phénomènes non-observables) : modèles à base physique.



Parmi le premier groupe des phénomènes observables, l'unité spatiale de base dans le modèle peut être l'ensemble du bassin, une partie de ses points ou chacun de ses points. Cette considération permet ainsi de différencier les modèles selon leur finesse géométrique, entre les modèles “**globaux**”, “**semi-distribués**” et “**distribués**”. Le Tableau 2 résume les différents types de modèles selon leurs caractéristiques (Ambroise, 1999) :

Caractéristique	Type de modèle
Selon la nature de la variable	Modèle déterministe (variables non aléatoires)
	Modèle stochastique (variables aléatoires)
Traitement de l'espace (homogénéité du bassin)	Modèle global
	Modèle semi-distribué (ou semi-global)
	Modèle distribué
Fondement théorique et approche de développement	Modèle empirique
	Modèle conceptuel
	Modèle à base physique

Tableau 2: Exemples des caractéristiques de modèles pluie-débit

2.2.2 Description

Par la suite, nous allons donner une description sommaire du modèle GR4J (Cf. Perrin et al., 2003, pour une description complète). Le code FORTRAN correspondant est disponible sur le site web du Cemagref¹, et une version utilisée sous SCILAB au cours de ce stage est également mise à disposition sur le site personnel de Julien Lerat². Enfin, grâce à sa très simple structure et son faible nombre de paramètres, GR4J peut être utilisé dans un tableur EXCEL. Cela peut s'avérer utile pour effectuer des tests rapides.

Le modèle est réputé pour sa parcimonie en paramètres (quatre à optimiser) :

- **la capacité du réservoir de production, X1** (mm) : ce réservoir contrôle la production des pluies efficaces à partir des entrées de précipitations.
- **le coefficient d'échanges souterrains, X2** (mm) : il peut être soit positif dans le cas d'apports souterrains, soit négatif s'il y a des pertes d'eau, soit égal à zéro s'il n'y a pas d'échange.
- **la capacité à un jour du réservoir de routage, X3** (mm) : ce réservoir contrôle les phases de récession.
- **le temps de base de l'hydrogramme unitaire UH1, X4** (jour) : deux hydrogrammes unitaires (UH1 et UH2, Cf. Figure 4) sont utilisés dans le modèle. Ils répartissent dans le temps les précipitations efficaces, et simulent le délai passé entre les pluies et les pics des crues. Les deux hydrogrammes unitaires dépendent du même paramètre de temps X4, exprimé en jours.

¹ http://www.cemagref.fr/webgr/Codes/code_gr4j.htm

² <http://lerat.julien.free.fr>

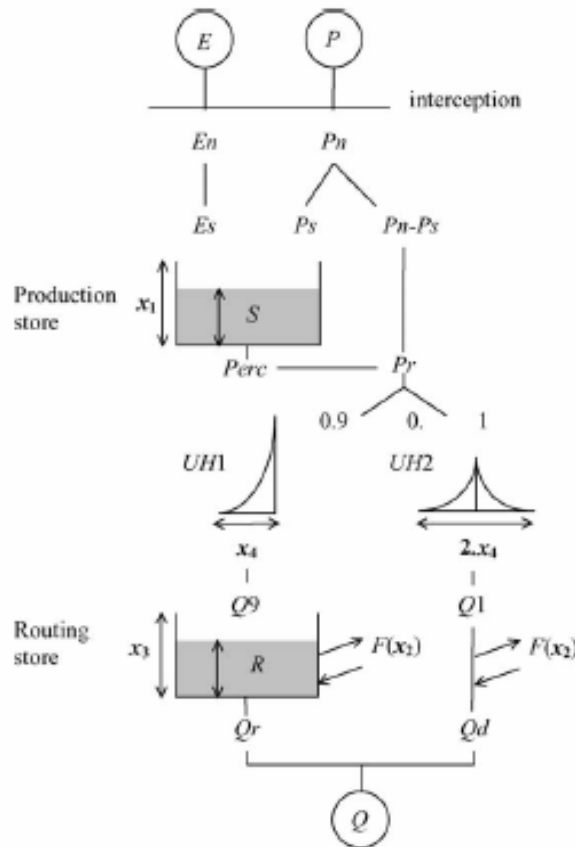


Figure 4: Diagramme du modèle pluie-débit GR4J

Le modèle a été testé sur plusieurs pays et a montré de bons résultats en comparaison d'autres modèles pluie-débit (Perrin et al., 2003). GR4J peut facilement être appliqué sur des bassins différents, dès lors que l'on dispose des données nécessaires en entrée. **Toutes les quantités d'eau** (entrée, sortie, variables internes) **sont exprimées en mm**, en divisant les volumes d'eau par la superficie du bassin versant quand il le faut. Plusieurs aspects importants du modèle sont à retenir :

- GR4J requiert en entrée les précipitations et l'évapotranspiration potentielle à chaque pas de temps (jour dans notre cas), et calcule en sortie un débit à l'exutoire du bassin versant.
- **Tous les paramètres sont déterminés par calage automatique** (Cf. Chapitre 3.2 p31). Il n'existe pas de formule pour calculer les valeurs des paramètres à partir de variables mesurées à l'échelle du bassin (taille du bassin, longueur de tronçon, ...).
- **Dans une approche globale classique, les entrées sont moyennées sur l'ensemble du bassin avec des pondérations identiques** (moyenne arithmétique). Il n'y a pas de facteur de correction pour prendre en compte la position individuelle de chaque station pluviométrique (altitude, influence, ...).
- **Ce modèle n'a pas de module pour la neige**. Pour prendre en compte les effets de l'hydrologie alpine, deux modules combinés à GR4J seront envisagés :
 - le module neige du modèle HBV (utilisé par RIZA), contrôlé par 3 paramètres :
 - le facteur de correction C_{SF} des chutes de neige (ici, il sera fixé à 1).



- la température limite TT déterminant la fonte des neiges.
- le facteur de degré-jour C_{MELT} .

Le module neige ajoute 2 paramètres libres aux 4 cités précédemment.

- o un module basé sur la modification de l'évapotranspiration potentielle utilisée en entrée : pour simuler l'impact de la fonte des neiges, les valeurs d'ETP sont retardées et diminuées. La Figure 5 montre les séries historiques originales et les séries transformées. Cette transformation est contrôlée par deux paramètres libres calés, en plus des 4 paramètres de GR4J :
 - le paramètre de retard ("lag"), exprimé en jours.
 - le facteur d'échelle, sans dimension.

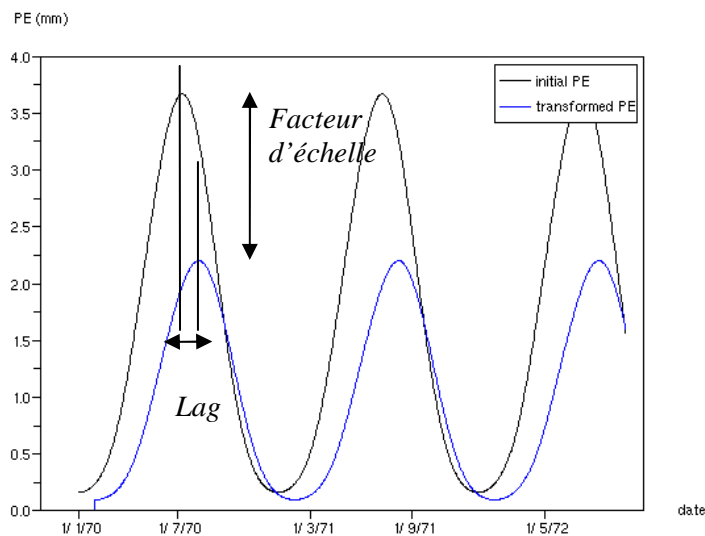


Figure 5: ETP initiale et transformée

2.3 Données hydrologiques et météorologiques

2.3.1 Les débits

Les données utilisées dans cette étude ont été fournies par l'Institut de Gestion des Eaux Continentales et du Traitement des Eaux Usées aux Pays-Bas (RIZA). Elles proviennent du projet "Hydrological Modelling in the River Rhine Basin" (RIZA, 2005). Notre correspondant néerlandais est Hendrik Buiteveld, responsable des études sur le bassin du Rhin et de la coopération avec les autres instituts.

Les débits journaliers relevés entre 1961 et 2004 concernent 34 stations de jaugeage réparties sur le Rhin et sur ses affluents. La sélection des données a été réalisée sur la base des critères suivants :

- hormis la station de **Lobith**, il était nécessaire de choisir les stations représentant le mieux les **affluents majeurs**, pour ensuite comparer l'approche globale avec des modèles semi-distribué.
- **à Lobith, les données hydrologiques sont disponibles entre 1970 et 1995.** Cette période a ensuite été choisie comme la **période de simulation**, car l'objectif clé est de fournir des résultats à Lobith (Cf. Chapitre 1.2 p8).



Station de jaugeage	Fleuve	Superficie du bassin (km ²)	Début d'observation	Fin d'observation
Lobith	Rhin inférieur	160 156	1/01/1970	31/12/1995
Andernach	Rhin moyen	141 342	1/01/1961	31/08/2004
Cochem	Moselle	28 227	1/01/1961	31/08/2004
Obernau	Main	24 831	1/01/1980	30/03/1995
Worms	Rhin supérieur	69 104	1/01/1980	31/08/2004
Rockenau	Neckar	13 231	1/11/1971	31/12/1990
Maxau	Rhin supérieur	53 452	1/01/1961	31/08/2004

Tableau 3: Validité des données de débits

Les séries temporelles des débits mensuels mesurés entre 1961 et 1995 aux 7 stations figurent dans l'annexe 11.1 p72-75.

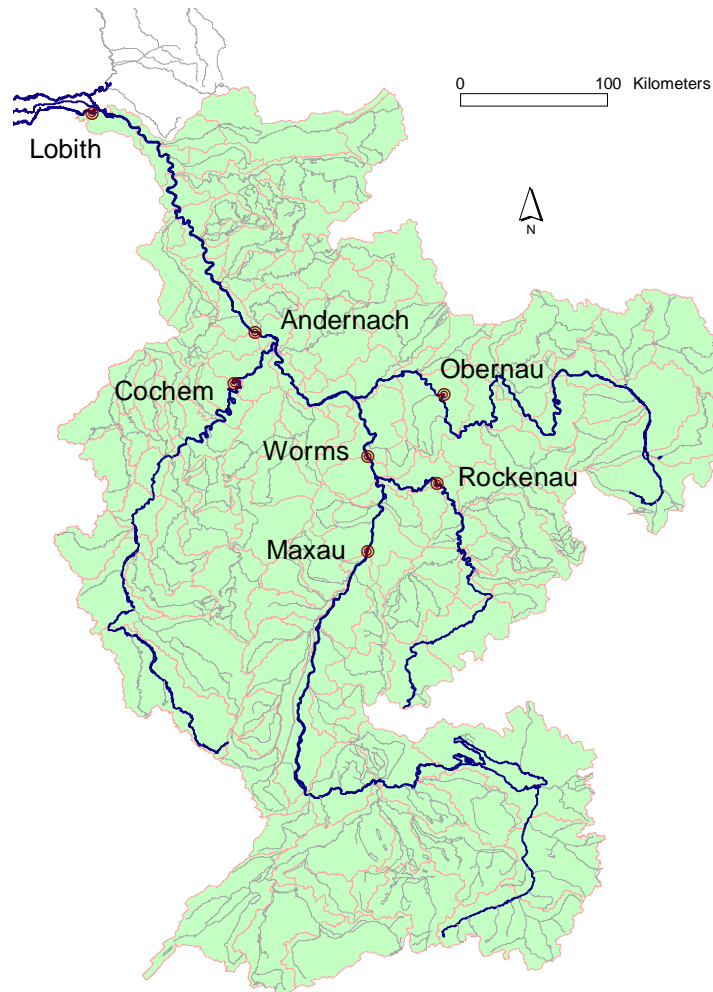


Figure 6: Fleuves, stations de jaugeage et sous-bassins HBV



2.3.2 Les précipitations, températures et évapotranspirations potentielles

Les données de précipitations et de températures sont des valeurs journalières, relevées pour chacun des 134 sous-bassins HBV (Cf. Figure 6) de façon complète entre 1961 et 1995. Dans l'approche globale de modélisation (Cf. Chapitre 4 p33), les valeurs de précipitation et d'évapotranspiration potentielle ont été agrégées à chaque pas de temps et sur chacune des 7 stations, pour ne fournir qu'une seule valeur par jour en entrée du modèle pluie-débit.

Le Tableau 4 en page suivante présente les données synthétiques sur les différents bassins :

- concernant le calcul des pluies et des ETP de bassin, l'agrégation des données est faite par une **simple moyenne arithmétique** (sans pondération). Cela signifie que pour une simulation du bassin à Lobith, toutes les pluies et ETP des sous-bassins HBV auront la même importance dans le calcul des précipitations et des évaporations journalières sur l'ensemble du bassin.
- un premier calcul de l'évapotranspiration potentielle sur chacun des 134 sous-bassins a été effectué, sur lequel ont été développées les séries décrites dans le point suivant et reportées dans le Tableau 4. Les ETP étaient calculées avec la formule proposée par Oudin (2005), mais à partir de la température journalière brute. L'analyse des séries temporelles de cette ETP datée a révélé des erreurs, liées à la formulation du paramètre R_e . Nous avons tout de même testé un modèle GR4J sur ces valeurs, qui s'est avéré acceptable. Des travaux précédents au Cemagref ayant montré que GR4J prenait mieux en compte une ETP non datée, l'idée était de retranscrire la tendance mensuelle moyenne des "fausses" ETP, montrée dans l'annexe 11.1 p81.
- l'évapotranspiration potentielle sur chacun des 134 sous-bassins est recalculée à partir de la température, en 3 étapes :
 1. 12 températures mensuelles moyennes sont calculées à partir de la chronique totale.
 2. ces 12 valeurs sont alors converties en 365 valeurs journalières par un développement de Fourier, représentées par une courbe sinusoïdale. Ces 365 valeurs sont alors appliquées pour chaque année de la simulation.
 3. les valeurs lissées de température journalière sont alors converties en évapotranspiration potentielle, avec la formule proposée par Oudin (2005) :

$$PE = R_e \times \frac{T + 5}{100}$$

(R_e correspond à la radiation extraterrestre dépendant uniquement de la latitude et du jour julien).

Les résultats des calculs d'ETP sont montrés sur la Figure 7 pour le bassin à Lobith.

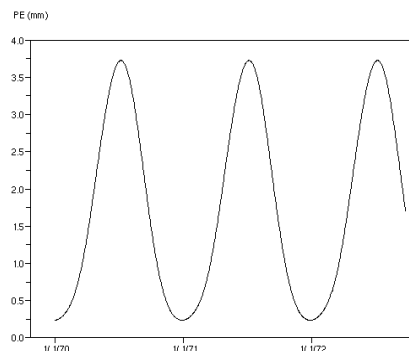


Figure 7: Série temporelle d'évapotranspiration potentielle pour le bassin à Lobith



Station de jaugeage	Fleuve	Écoulement (mm)	Précipitations annuelles moyennes (mm)	ETP annuelles moyennes (mm)	Nb de sous-bassins HBV	Secteur HBV contribuant
Maxau	Rhin	809	1275	575	33	Upper Rhine 2, Schweiz
Worms	Rhin	675	1168	587	51	UpRhine2, Schweiz, Neckar, UpRhine2 (sauf 83, 84)
Rockenau	Neckar	333	895	587	12	Neckar (sauf 13)
Obernau	Main	226	788	573	13	Main (sauf 26, 28, 29)
Cochem	Moselle	394	911	585	25	Moselle (sauf 63)
Andernach	Rhin	479	967	587	109	Tous sauf Lippe, Rhur, Lower Rhine, Erft, Sieg + 91,92,93,94
Lobith	Rhin	448	956	587	134	Tous

Tableau 4: Données synthétiques (1970-1995)

2.4 Zone d'étude

2.4.1 Contexte

L'ensemble du bassin hydrographique international du Rhin se situe sur l'arc central de l'Europe dans une zone de très forte activité économique, issue des ressources du sous-sol (fer, charbon, sel), du développement du commerce, de l'industrie et d'une agriculture intensive. Il couvre une **superficie de 185 000 km²**, ce qui est peu en comparaison du plus grand bassin européen de la Volga (~ 1 380 000 km²). Cependant, le Rhin lui est comparable du point de vue de ses débits : il est l'un des plus abondants et des plus importants fleuves d'Europe. L'amplitude des échanges commerciaux se manifeste par la présence des plus grands ports fluviaux et maritimes au monde à Duisburg (Ruhr) et à Rotterdam (exutoire aux Pays-Bas).

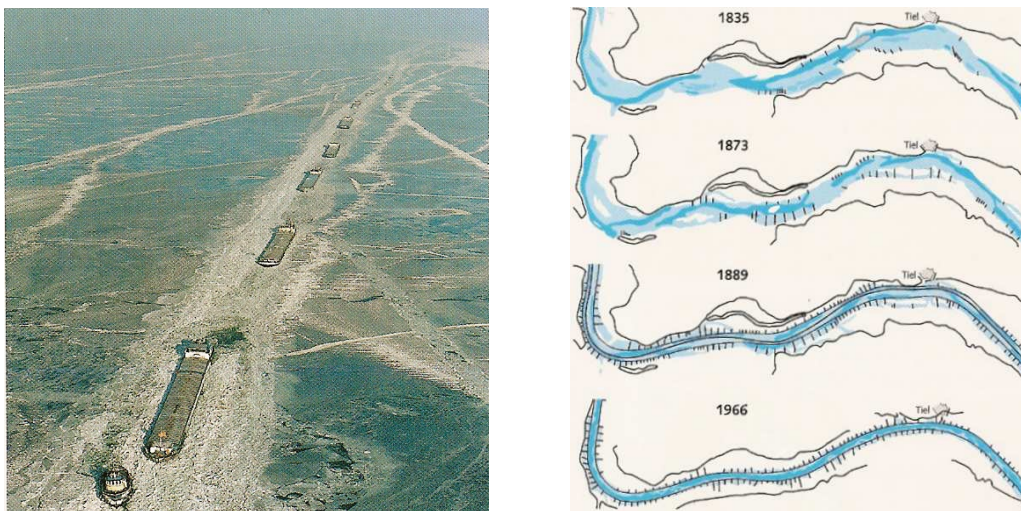


Figure 8 (Middelkoop, 1999) : a) Convoi de cargos commerciaux sur les glaces du Rhin
b) Normalisation du Waal aux Pays-Bas (bras du Rhin)



En raison de la situation exceptionnelle des Pays-Bas qui sont caractérisés par la plus faible altitude moyenne au monde (10 m), le Rhin présente dans ce pays des aspects différents de ce que l'on rencontre dans les autres pays en amont. Cette faible altitude a causé la salinisation partielle des eaux du fleuve, contre laquelle les néerlandais luttent perpétuellement. Leurs efforts se sont également concentrés sur les dispositifs et les aménagements envers les crues et les inondations, car une grande partie de la population vit à proximité du fleuve.

Les aménagements historiques effectués sur le Rhin sont résumés par Tops et al. (1959) et par Middelkoop (1999). Une première phase de **“régularisation”** a mené aux édifications de buttes, de digues et de canaux limitant les effets de l'ensablement aux embouchures (Canal de Pannerden). Ils furent ensuite améliorés et développés au cours de la période de **“normalisation des lits des rivières”** (Cf. Figure 8b). Les chenaux ont été modifiés moins larges et plus profonds, permettant une meilleure évacuation des eaux et glaces, ainsi qu'une augmentation de la navigation. L'homme a poursuivi cette lutte contre le fleuve par une **canalisation** intense, pour éviter autant que possible la salure des eaux du Rhin et assurer leur utilisation optimum. Depuis 1920 et plus récemment, des **barrages-réservoirs** et des usines ont été bâtis, destinés à la production hydro-électrique. Ceux-ci interviennent localement de façon considérable sur le régime hydrologique naturel.

2.4.2 Morphologie du bassin

L'ensemble du bassin versant du Rhin est présenté sur la Figure 9 en page suivante. La superficie occupée est répartie entre **neuf états** : la Suisse (~25 000 km²), l'Italie, le Liechtenstein, l'Autriche (~2500 km²), l'Allemagne (~100 000 km²), la France (~25 000 km²), le Luxembourg (~2500 km²), la Belgique (~2500 km²) et les Pays-Bas (~25 000 km²). La population totale sur le bassin est d'environ **50 millions d'habitants**, dont 20 millions sont approvisionnés en eau potable à partir du Rhin. Long de **1320 km**, le fleuve prend sa source dans les Alpes suisses au glacier du Rheinwaldhorn (3 353 m) et se jette dans la mer du Nord à Rotterdam.

Le bassin versant du Rhin présente une longueur de plus de 700 km, et une largeur comprise entre 70 et 300 km au Sud, supérieure à 500 km vers le centre et inférieure à 100 km vers la frontière germano-néerlandaise. L'altitude varie de quelques mètres au-dessus du niveau de la mer à l'exutoire (Rotterdam) à 4275 m au sommet du Finsteraarhorn, dans les Alpes Suisse. A part quelques exceptions situées en haute montagne où les glaciers et les pentes abruptes rendent impossible toute utilisation, les sols de l'ensemble du bassin sont soumis à l'exploitation forestière (Forêt Noire, Vosges) et agricole avec des intensités différentes.

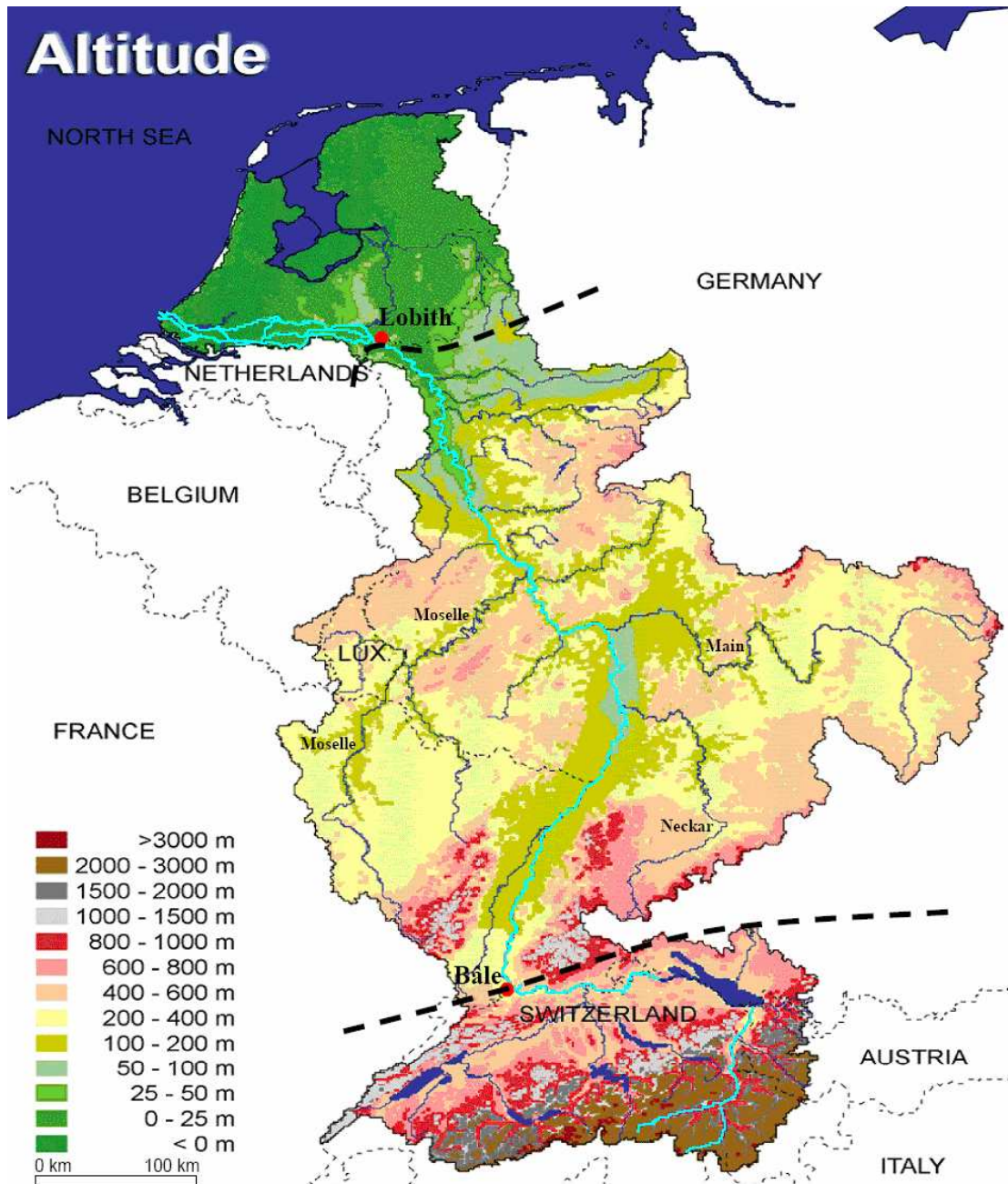


Figure 9: Morphologie du bassin versant du Rhin

Deux “goulets d’étranglements” délimitent des parties du bassin versant avec des comportements hydrologiques très distincts. Elles comportent chacune différents tronçons du Rhin, mentionnés ci-dessous :

- **la partie sous influence de la haute montagne** : Rhin Alpin et Haut Rhin. Dans cette région majoritairement suisse, les chutes de neige sont fréquentes au cours de l’année. En hiver, elles ne participent pas aux débits des cours d’eau car elles sont stockées sous forme d’une couverture persistante. Au printemps, l’écoulement retardé provoqué par la fonte du manteau neigeux alimente les rivières et maximise leurs débits.



- **la partie médiane** : Rhin supérieur, Rhin moyen et Rhin inférieur. A Bâle, la géologie et le rétrécissement de la largeur du bassin contraignent le fleuve à obliquer vers le Nord. L'influence alpine est encore marquée sur ce tronçon à travers le soutien apporté par la fonte des neiges aux débits d'été, alors maximums annuels. Elle cède la place vers l'aval aux effets de la région montagneuse centrale ("Mittelgebirge") et surtout à ceux des affluents du Rhin. Les stations de Worms et d'Andernach sont d'une grande importance pour l'analyse du régime des débits du fleuve (Cf. Figure 6 p17). Placées à l'aval des confluences avec le Neckar, le Main et la Moselle, elles contrôlent les apports de ces trois affluents majeurs qui ensemble, vont en partie masquer l'influence de la haute montagne.
- **La partie néerlandaise** : à quelques kilomètres en aval de la frontière (Lobith), le Rhin se divise en deux bras : le Canal de Pannerden et le Waal. C'est ici que commence le delta du Rhin dont la partie aval, influencée par les marées jusqu'à 100 km de la côte, est en réalité un estuaire. L'importance des travaux réalisés sur ce tronçon (Cf. Chapitre 2.4.1 p19) confère aux différents canaux des régimes d'écoulement à caractère hydraulique, où les débits amont et aval dépendent des aménagements.

2.4.3 Caractéristiques et régimes hydrologique

Cette section a été rédigée en exploitant des éléments de la monographie du Rhin de la CHR (1977) et en analysant les données hydrologiques de RIZA.

Le débit du Rhin varie peu en comparaison des autres grands fleuves d'Europe. Selon l'altitude et le climat, c'est le régime glaciaire (écoulement provenant des glaciers), nival (écoulement provenant de la fonte des neiges) ou pluvial (ruissellement des précipitations) qui prédomine. A Lobith (~ 160 000 km²), on note un écoulement annuel de 69.3 km³, soit 69 300 milliards de litres pour un **débit annuel moyen d'environ 2200 m³/s**. La violence des crues se caractérise par des pics supérieurs à 10 000 m³/s (Seine 1910 à Paris = 2600 m³/s), et des temps de propagation jusqu'à Lobith relativement courts (< 5 jours depuis la station de Maxau). Les périodes de basses eaux sont observées en hiver dans la partie alpine et en automne à l'aval du bassin (Cf. Figure 10 et annexe 11.1 p72-75), conséquence des apports neigeux réguliers.

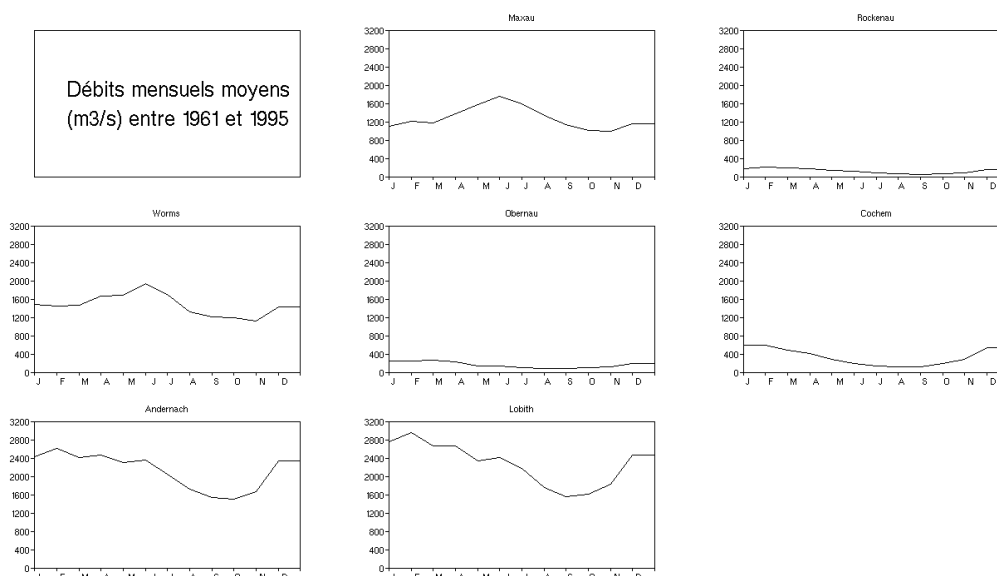


Figure 10: Débits mensuels moyens (m³/s) pour les stations sélectionnées



Les cours d'eau alpins présentent des écarts importants entre les basses eaux et les hautes eaux parce qu'ils sont influencés par les conditions climatiques d'hiver et par la fonte des neiges au printemps (à Bâle, la CHR a noté $NQ^3=202 \text{ m}^3/\text{s}$, $MQ^4=1030 \text{ m}^3/\text{s}$, $HQ^5=5700 \text{ m}^3/\text{s}$, soit des rapports de 1:5.1:28.2). Les forts débits de ces cours d'eau dépendent des variations saisonnières des températures : ils sont minimums en hiver, et deviennent maximums dès le printemps. Leurs crues sont spectaculaires à cause de fortes précipitations, de la fonte rapide des neiges et surtout des pentes abruptes. Les pics de crue peuvent toutefois être atténués par l'action régulatrice des lacs de haute montagne.

Par la suite, nous n'appliquerons pas de semi-distribution sur cette région en particulier car aucune de nos données hydrologiques n'y est localisée. Deux hypothèses définiront la considération par le modèle de l'influence de la région alpine sur l'aval du bassin :

- pas de prise en compte de l'influence neigeuse (GR4J initial).
- ajout d'un module neige (Cf. Chapitre 2.2.2 p14).

L'hydrologie locale des 7 stations de jaugeage est caractérisée par les valeurs du Tableau 5, exprimées en m^3/s et calculées lors de l'analyse des données journalières de débits (1961...1995). Les variables ont été choisies en référence à celles utilisées dans le rapport de RIZA pour décrire les régimes du Rhin simulés par le modèle HBV :

Station de jaugeage	NQ	MNQ ⁶	MQ	MHQ ⁷	HQ
Maxau	388	598	1 298	3 207	4 360
Rockenau	18	37	136	1 008	2 000
Worms	783	708	1 478	3991	5 320
Obernau	6	56	183	887	1 768
Cochem	10	57	336	2 147	4 020
Andernach	618	926	2 112	6 384	10 406
Lobith	760	1 049	2 214	6 746	11 885

Tableau 5: Récapitulatif des débits caractéristiques (m^3/s)

Le Rhin médian subit l'influence alpine, décroissante vers l'aval à cause des effets de la région montagneuse centrale ("Mittelgebirge") et des apports des affluents. Jusqu'à la station de Worms (Cf. Figure 6 p17), on observe un régime hydrologique toujours à caractère nival. A proximité de Lobith on observe des forts débits en hiver, encore maintenus au printemps par les apports alpins, et décroissants pendant l'été à cause de la forte demande évaporatoire. Sur ce tronçon du Rhin, les temps de propagation des crues jusqu'à l'exutoire (Lobith) sont inférieurs à 5 jours d'un bout à l'autre. Ils sont du même ordre de grandeur sur les affluents majeurs, le Neckar, le Main et la Moselle :

³ NQ : débit journalier minimal

⁴ MQ : débit journalier moyen au cours d'une année

⁵ HQ : débit journalier maximal

⁶ MNQ : moyenne des débits annuels minimaux (indicateur sur les bas débits)

⁷ MHQ : moyenne des débits annuels maximaux (indicateur sur les forts débits)



- **le Neckar** rejoint le Rhin en rive droite entre les stations de jaugeage de Worms et de Maxau (Cf. Figure 6 p17). Ses débits constituent des apports moyens (MQ=136 m³/s à Rockenau), et se caractérisent par leurs irrégularités (rapports de 1:7.5:111.1 à Rockenau) et des montées de crues rapides.
- **le Main** présente des valeurs caractéristiques de débits similaires à celles du Neckar. Son régime est le plus régulier, avec des rapports de 1:30.5:294.7. Les temps de propagation des crues jusqu'à Lobith sont inférieurs à 3 jours.
- **la Moselle** donne au régime général du Rhin le caractère qu'il conservera jusqu'à son embouchure, en augmentant significativement son module. Elle est très abondante à travers un régime hydrologique à caractère pluvial océanique, marqué par la faiblesse des basses eaux en été (NQ=10 m³/s à Cochem). Elle accentue surtout l'onde de crue hivernale à cause de fortes précipitations en cette saison.
- la partie médiane du Rhin reçoit également quelques affluents secondaires (la Lahn, la Sieg, l'Erf, la Ruhr, la Lippe, ...) sur son tronçon inférieur. Ils ne seront pas pris en compte dans notre modèle semi-distribué, à cause des lacunes d'observation dans les données hydrologiques sur ces cours d'eau.

Les débits de pointe des 10 crues majeures du Rhin référencées par rapport à Lobith sont reportés dans le Tableau 6, pour chacune des 7 stations de jaugeage. Le maximum à Lobith est de **11 885 m³/s** (crue n°1), et ne correspond pas forcément avec la pointe de crue maximale aux autres stations de jaugeage. Sur les hydrogrammes présentés dans l'annexe 11.1 p75-76, les temps de base sont de l'ordre de 40 jours, avec un minimum de 25 jours et un maximum de 50 jours. Les temps de propagation varient de 1 à 4 jours entre Maxau et Lobith, et le temps de concentration sur l'ensemble du bassin versant est inférieur à 5 jours. On a remarqué un délai très court entre le passage de la crue n°8 (1984) de Worms jusqu'à Lobith, inférieur à 1 jour.

Station de jaugeage	Crue n°1 1995	Crue n°2 1993	Crue n°3 1988	Crue n°4 1970	Crue n°5 4/1983	Crue n°6 6/1983	Crue n°7 1980	Crue n°8 1984	Crue n°9 1981	Crue n°10 1986
Maxau	3770	2960	3930	4310	4360	4104	4070	2861	3721	2520
Rockenau	-	-	2000	-	1512	1659	1140	1283	1384	876
Worms	4283	4511	5180	-	5320	5042	4517	3528	4094	3070
Obernau	1768	1196	1478	-	592	707	885	895	1077	880
Cochem	3410	4020	2290	2780	3415	3154	2772	2628	2959	2060
Andernach	10200	10406	9250	9990	9553	9334	8353	8180	7777	6960
Lobith	11885	10940	10274	9850	9707	9323	8811	8697	7931	7642

Tableau 6: Débits de pointe des 10 crues majeures du Rhin (m³/s), référencées par rapport à Lobith

Le régime du Rhin après la frontière entre l'Allemagne et les Pays-Bas est à caractère hydraulique, c'est-à-dire conditionné par les aménagements effectués à l'amont comme à l'aval. Cette partie du bassin versant ne rentrera pas dans notre modèle qui simulera les débits jusqu'à la station de jaugeage de Lobith.



2.4.4 Caractéristiques et régimes climatiques

Le bassin du Rhin se trouve généralement sous l'influence de vents d'Ouest, entraînant à travers les Pays-Bas et l'Allemagne du Nord des masses d'air maritime en provenance de l'Atlantique. Les régions méridionales du bassin ne sont en général que faiblement intéressées par ces dépressions, de sorte qu'il s'y établit souvent un temps à caractère plus **continental**. Ainsi, seul le climat du bassin inférieur du Rhin est bien marqué par l'influence **maritime**. Le reste est conditionné par les effets climatiques de la **montagne** et de la **haute montagne**. Une subdivision régionale climatique est présentée dans le Tableau 7 :

Région	Climat	Remarques
Plaine	<ul style="list-style-type: none"> - maritime - amplitude modérée de la T° - pluies fréquentes et courtes 	<ul style="list-style-type: none"> - Mer du Nord et Manche à proximité - hiver doux / air maritime humide - été frais, instabilité du temps
Mittelgebirge	<ul style="list-style-type: none"> - montagneux - vallée du Rhin sup. favorisée en T° - baisse des pluies W → E et N → S 	<ul style="list-style-type: none"> - Vosges et Forêt Noire à proximité - pluies solides en altitude - forte évapotranspiration en été
Préalpes & Alpes	<ul style="list-style-type: none"> - alpin - T° min et pluies max sur le bassin - pluies orographiques, solides et liquides 	<ul style="list-style-type: none"> - fonte du manteau neigeux au printemps - saison la plus humide en été - saison la plus sèche en hiver/printemps

Tableau 7: Caractéristiques climatiques régionales

Les températures et les précipitations annuelles moyennes sur chacune des 7 stations sont présentées dans le Tableau 8. Les températures moyennes se situent entre 8 et 10°C, et les pluies sont dans une gamme d'environ 750 mm/an à 1300 mm/an sur les 7 stations de jaugeage. De façon générale, elles diminuent du Nord au Sud le long du Rhin. Le minimum se situe à Obernau sur le Main, et le maximum est à Maxau sur le Rhin supérieur. On retiendra en particulier une valeur de **950 mm/an** de précipitations moyennes sur l'ensemble du bassin. La CHR (1977) indique que la valeur la plus élevée reportée sur les isohyètes est de 2500 mm. Ce seuil est dépassé en Suisse, dans les Vosges et dans la Forêt Noire où des valeurs de **3000 mm/an** sont observées. Les hauteurs de précipitations minimales se situent dans la partie nord de la plaine du Rhin supérieur, inférieures à **500 mm/an**.

Station de jaugeage	Températures annuelles moyennes (°C)	Précipitations annuelles moyennes (mm/an)
Maxau	9.8	1233
Rockenau	8.4	895
Worms	9.8	1123
Obernau	8.2	774
Cochem	8.5	903
Andernach	9.1	963
Lobith	9.7	957

Tableau 8: Récapitulatifs des données météorologiques (1961...1995)



Les séries temporelles des précipitations mensuelles mesurées entre 1961 et 1995 aux 7 stations figurent dans l'annexe 11.1.2 p77-80.

Les histogrammes des précipitations mensuelles moyennes (Cf. Figure 11) traduisent les variations saisonnières moyennes aux 7 stations. Ces dernières présentent toutes un comportement pluvieux similaire, atténué en été pour Cochem. La région reçoit de moindres hauteurs de précipitations en période d'apports, tout en maintenant un régime pluvieux hivernal commun au bassin par sa composante neigeuse.

Les quantités maximales précipitées sont observées pendant l'été, au mois de juin. Cette abondance est due aux forts contrastes thermiques entre le continent chaud et la mer relativement fraîche en cette période, entraînant sur le continent de l'air maritime humide et frais. Les hauteurs de précipitations diminuent fortement à l'automne, puis ré-augmentent en hiver quand les masses d'air d'origine maritime contiennent beaucoup de vapeur d'eau. Les faibles valeurs observées en février-mars sont dues à des circulations à composante Est qui entraînent des masses d'air continentales froides et sèches. Au printemps les vents d'Ouest apparaissent de nouveau, conduisant à des formations nuageuses convectives accompagnées d'averses.

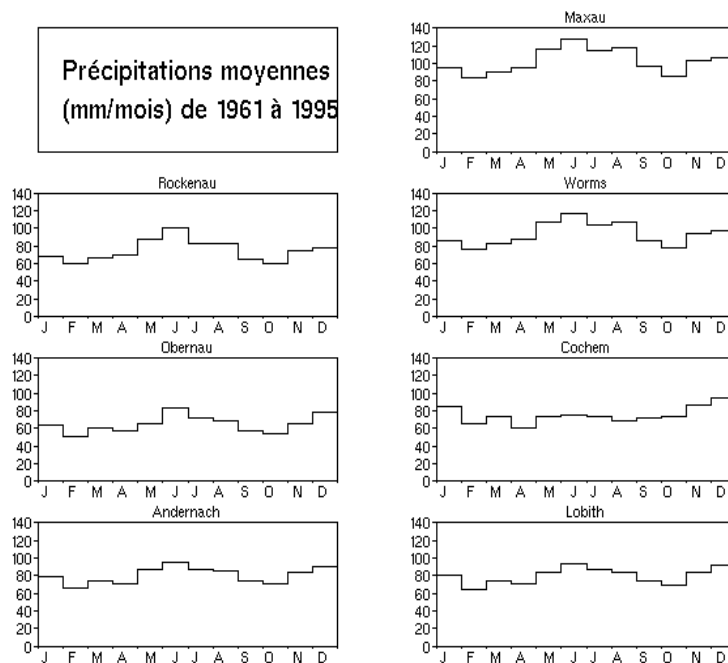


Figure 11: Précipitations mensuelles moyennes sur les 7 stations

2.5 Résultats du modèle semi-distribué de RIZA/BfG

Avant d'introduire une nouvelle approche de modélisation, il est important de résumer les découvertes et résultats principaux de l'étude déjà effectuée sur le bassin du Rhin par RIZA et BfG, mentionnée dans le Chapitre 1.2 p8.

Ce modèle couvre l'ensemble du bassin, divisé en 134 sous-bassins (Cf. Figure 6 p17) par la Commission pour l'Hydrologie du bassin du Rhin (CHR). La transformation de la pluie en débit au niveau des sous-bassins est effectuée avec le modèle semi-distribué HBV, développé à l'Institut Hydrologique et Météorologique Suédois (SMHI). Les différents



débits sont alors routés et reliés par le modèle de propagation simplifié à 2 paramètres Muskingum. Les résultats sont présentés dans le Tableau 9, uniquement pour les stations de jaugeage intéressant notre modèle.

Station de jaugeage	Fleuve	Superficie de bassin (km ²)	Critère de Nash-Sutcliffe (%) [*]	Déviaton de MNQ entre obs. et sim. (%) ^{**}	Déviaton de MHQ entre obs. et sim. (%) ^{***}
Lobith	Rhin	160 156	92	< 5 %	< 10 %
Andernach	Rhin	141 342	93	< 5 %	< 10 %
Cochem	Moselle	28 227	91	< 5 %	< 10 %
Raunheim	Main	?	88	5 – 20 %	< 10 %
Rockenau	Neckar	13 231	84	5 – 20 %	< 10 %
Maxau	Rhin	53 452	89	< 5 %	10 – 20 %

Tableau 9: Résultats du modèle HBV/Muskingum (tables 3.1 à 3.6, RIZA, 2005)

Ces performances sont très bonnes, et présentent une amélioration d'amont en aval. Les auteurs résumant les résultats en ces termes :

- « (...) au regard des stations de jaugeage sur le Rhin, les résultats de la simulation sont acceptables. La plupart des critères statistiques pour ces stations sont très bons. La comparaison visuelle montre une bonne concordance entre la simulation et les débits observés. Toutefois des écarts significatifs apparaissent, par exemple les pics de crue en 1993 et 1995 sont surestimés d'environ 10-15%. » (p 31)
- « A la station de jaugeage de Maxau (Rhin), il y a une tendance claire à la surestimation des crues. Cela est probablement dû à l'approche simpliste de routage pour le Rhin (...) » (p22) « Un élément qui pourrait probablement être amélioré est la procédure de routage des crues entre les stations de jaugeage de Bâle et de Maxau. » (p31)
- « L'analyse des simulations sur les affluents révèle quelques problèmes systématiques, spécialement concernant la simulation des bas débits. Concernant la simulation des crues, les maxima de débit annuel sont en moyenne sous-estimés, exceptés pour le Main. » (p31) « Pour le bassin de la Moselle (station de Cochem), le critère de Nash-Sutcliffe indique une meilleur performance que pour le Neckar et le Main (...) » (p25) « Certaines erreurs dans la simulation des apports des affluents semblent se compenser entre elles » (p30).
- « Les critères statistiques des débits du Rhin simulés indiquent une bonne performance [sur les stations de jaugeage majeures du Rhin], significativement meilleurs que pour les affluents. » (p27)
- « Pour la station de Lobith, la tendance de surestimation [des crues] commençant à la fin des années 1980 est plus évidente. Les 3 crues correspondantes, analysées dans

* 100% signifie que la simulation correspond parfaitement aux données observées.

** MNQ est la moyenne des débits annuels minimaux (indicateur sur les bas débits).

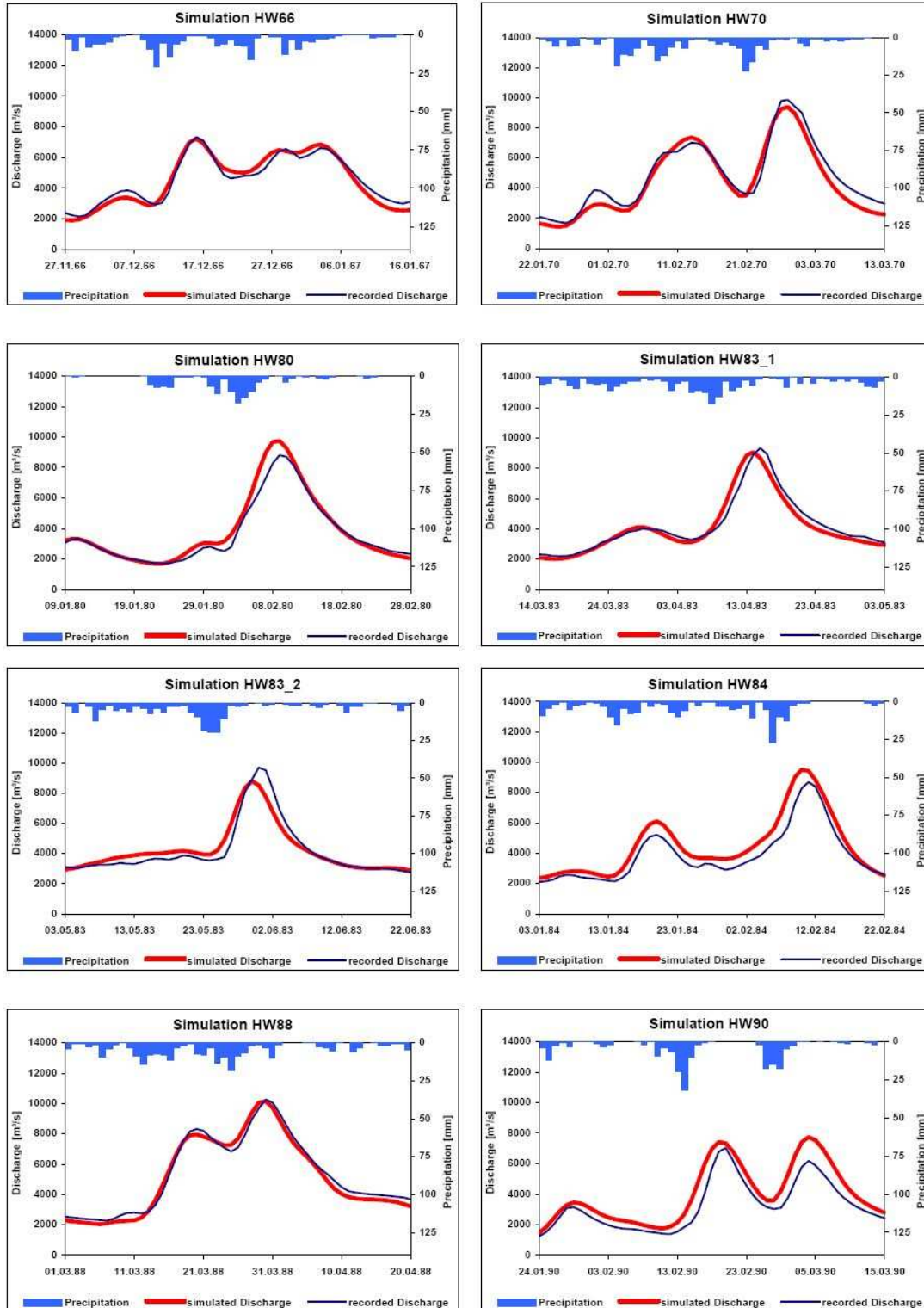
*** MHQ est la moyenne des débits annuels maximaux (indicateur sur les hauts débits).



Quelles attentes pour des approches simples en modélisation hydrologique ?

cette période sont surestimées de plus de 10%. (...) Une question ouverte est de trouver la raison de cette tendance à surestimer les débits à partir de la fin des années 1980. » (p29-30)

Les 10 crues majeures du modèle HBV sont représentées dans la Figure 12 ci-dessous. Leur année d'observation est mentionnée dans le titre de l'évènement (HW66 a eu lieu en 1966).



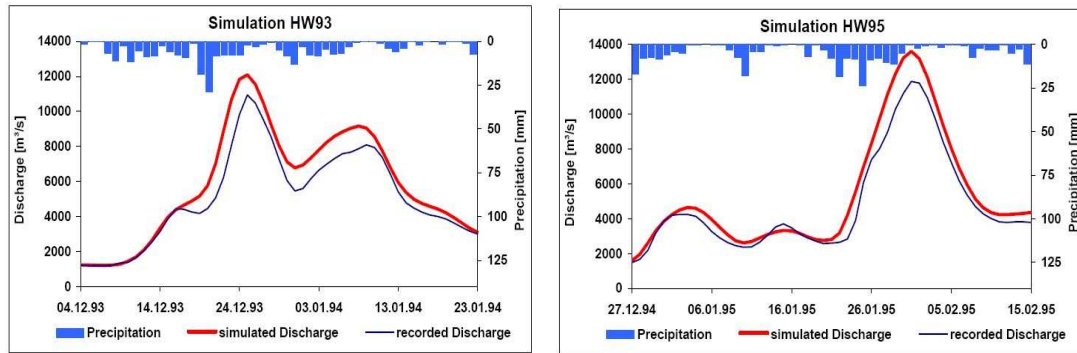


Figure 12: Crues observées et simulées du modèle HBV



3 Méthode pour le calage et la validation du modèle

L'objectif de cette étude est de proposer un modèle hydrologique simple du bassin du Rhin, et de le comparer avec des modèles plus raffinés. Pour assurer l'équité des traitements des modèles, le calage et la validation ont été menés indépendamment du type de modèle. Ce chapitre vise à décrire les procédures appliquées pour caler et valider les modèles au regard de leurs structures et de leurs entrées.

3.1 Périodes de calage et de validation

Dans le Chapitre 2.3.1 p16, la période de simulation a été choisie entre 1970 et 1995. Les valeurs des paramètres de GR4J sont fixées à l'étape de calage, puis utilisées pour simuler en validation les débits sur une période différente. Le schéma classique du "split-sample test" a été retenu pour le calage, qui est donc conduit indépendamment sur deux sous-périodes comme le recommande Klemes (1986) :

- $P_1 = 1970-1982$.
- $P_2 = 1983-1995$.
- $P_{total} = 1970-1995$.

Cela mène à 3 jeux de 4 paramètres (X_1 à X_4 , Cf. Chapitre 2.2 p13) : X_{P1} , X_{P2} et X_{total} .

La validation est effectuée sur la base d'une seule simulation recouvrant P_1 et P_2 . Cette simulation est générée sur P_1 avec les entrées de P_1 (pluies et ETP) et les paramètres X_{P2} , et sur P_2 avec les entrées de P_2 et les paramètres X_{P2} . Cette procédure assure que la simulation en validation est toujours calculée avec des paramètres optimisés sur des jeux de données différents. La Figure 13 résume cette approche :

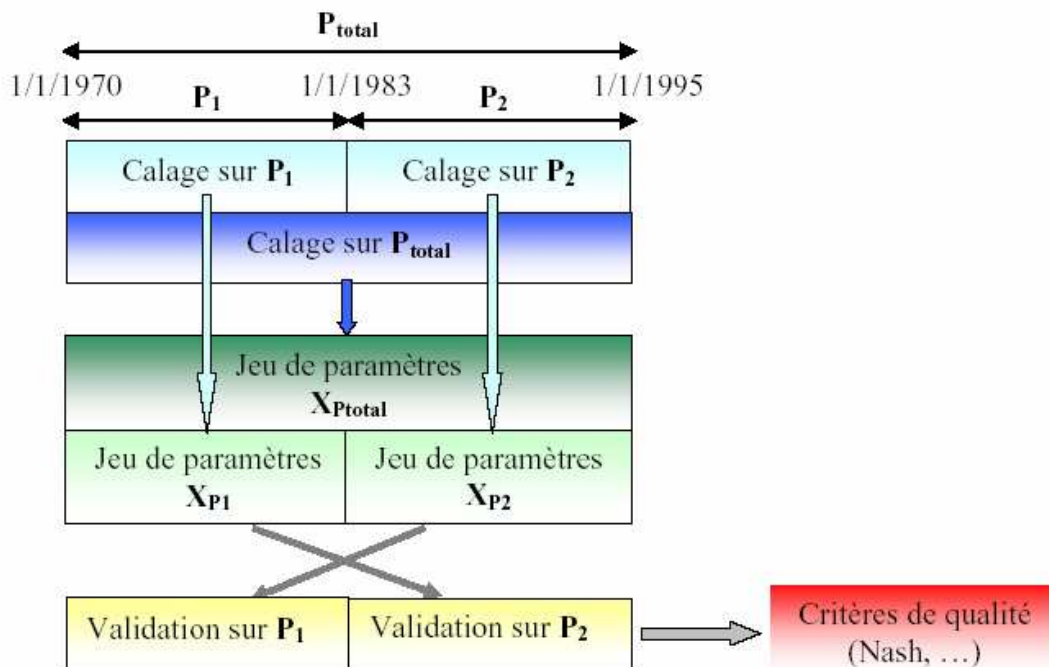


Figure 13: Procédure de calage et de validation



X_{total} est uniquement utilisé pour estimer la **robustesse** du processus de calage : les jeux de paramètres X_{p1} , X_{p2} et X_{total} sont comparés pour chacun des paramètres du modèle (X_1 à X_4). Si les écarts sont importants, cela suggère que le processus de calage n'est pas robuste : un calage sur différentes périodes mène à des valeurs de paramètres complètement différentes.

Les performances de calage reflètent uniquement la capacité du modèle à s'adapter aux données, elles ne reflètent pas sa robustesse en conditions opérationnelles.

Toutes les performances listées par la suite dans les tables de résultats sont calculées en mode de validation, sauf indication contraire.

3.2 Méthode automatique d'optimisation des paramètres

La technique d'optimisation employée est la méthode directe de recherche résumée par Edijatno et al. (1999), encore appelée méthode "Pas à Pas". Dans celle-ci, chaque itération d'optimisation commence avec un jeu de paramètres initial, identifié pour chaque modèle comme celui qui fournit les meilleurs résultats sur tous les échantillons des bassins. Ensuite l'algorithme évolue dans l'espace des paramètres, à la recherche de leurs valeurs "optimales".

La routine utilise des valeurs transformées (transformations exponentielles) des paramètres pour rééchelonner leurs gammes de variation (Cf. Tableau 10) entre -9.99 et +9.99. On rappelle que x_1 , x_2 et x_3 sont exprimés en mm, et que x_4 est en jours.

Paramètre réel	Paramètre transformé, optimisé par "Pas à Pas"
$x_1 = \log(X_1)$	$X_1 = \exp(x_1)$
$x_2 = \operatorname{asinh}(X_2)$	$X_2 = \sinh(x_2)$
$x_3 = \log(X_3)$	$X_3 = \exp(x_3)$
$x_4 = \log(X_4) - 0.5$	$X_4 = \exp(x_4) + 0.5$

Tableau 10: Transformation des paramètres pour l'optimisation

3.3 Critères de qualité et d'optimisation

Le critère de qualité le plus courant est celui de **Nash-Sutcliffe** (Nash, Sutcliffe, 1970), détaillé dans le Chapitre 2.1.3 p12. Il est utilisé à l'intérieur de la routine d'optimisation pour identifier les paramètres optimaux. Remarquons que pendant la période de validation, \bar{Q}^{obs} est calculé à partir du jeu de données de validation et non à partir de celui de calage. Cette considération produit un critère plus pessimiste par rapport à un critère utilisant un \bar{Q}^{obs} fixé et défini à partir du jeu de données de calage (et utilisé comme critère de validation).



Six critères de qualité supplémentaires sont définis en référence à ceux utilisés dans le modèle HBV (RIZA, 2005), avec :

- Q_i^{Obs} débit journalier observé au jour i
- Q_i^{Sim} débit journalier calculé au jour i
- \bar{Q}^{obs} débit moyen observé au cours de la période de simulation
- N nombre de pas de temps de simulation

- **Nash-LogQ** est équivalent au critère de Nash-Sutcliffe, mais il utilise des valeurs logarithmiques transformées à la place des débits. Ce critère estime la qualité des simulations sur les périodes de bas débits. La formule est la suivante :

$$NS \log Q = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(Q_i^{Obs}) - \log(Q_i^{Sim}))^2}{\sum_{i=1}^N (\log(Q_i^{Obs}) - \log(\bar{Q}^{obs}))^2} \right] \times 100$$

- **“Root Mean Square Error” (RMSE)** fournit une information similaire à celle du critère de Nash-Sutcliffe, mais est exprimé en m³/s. La formule est la suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i^{Obs} - Q_i^{Sim})^2}$$

- **l’erreur moyenne** fournit une information sur la balance de l’eau du modèle, bilan entre les apports et les pertes souterraines du système. La formule est la suivante :

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i^{Obs} - Q_i^{Sim})$$

- **la fraction d’erreur inférieure à 10%** donne une idée de la confiance qu’une erreur peut avoir dans les résultats du modèle. Elle indique le pourcentage de valeurs simulées à l’intérieur d’un intervalle de $\pm 10\%$ autour des valeurs observées.
- **le MNQ** est la moyenne des débits annuels minimaux. Il évalue la capacité du modèle à reproduire les bas débits. Le problème avec ce critère est sa consistance statistique, car il est basé sur seulement 26 valeurs (correspondant aux 26 années de simulations, Cf. Chapitre 2.3.1 p16).
- **le MHQ** est la moyenne des débits annuels maximaux. Il évalue la capacité du modèle à reproduire les conditions de crue. Le problème de sa consistance statistique est identique pour ce critère.

Au final, les hydrogrammes des 9 crues majeures du Rhin observées entre 1970 et 1995 seront tracés (HW1970, HW1980, HW1983_1, HW1983_2, HW1984, HW1988, HW1990, HW1993, HW1995 selon les normes de RIZA), pour inspecter visuellement les résultats du modèle et les comparer avec ceux du modèle HBV (Cf. Chapitre 2.5 p26).



4 Approche n°1 de modélisation : mode global

4.1 Description du modèle

Dans cette première approche, le bassin à la station de jaugeage étudiée est considéré comme **une seule unité**. GR4J est appliqué de façon classique avec des données de précipitation et d'évapotranspiration moyennées à chaque pas de temps sur l'ensemble du bassin aux différentes stations (simple moyenne arithmétique, Cf. Chapitre 2.3.2 p18). Par exemple, la pluie pour le bassin à Lobith est calculée par une moyenne sur les 134 valeurs de précipitation des 134 sous-bassins HBV. Un autre exemple, seulement 12 sous-bassins sont utilisés pour l'agrégation sur le bassin à Rockenau : ils correspondent au district du Neckar, excepté le sous-bassin le plus à l'aval sur cet affluent. Le Tableau 4 (Cf. p19) liste les zones contribuant aux précipitations reçues par chacune des 7 stations, et la Figure 14 ci-dessous montre les 14 districts de sous-bassins HBV :

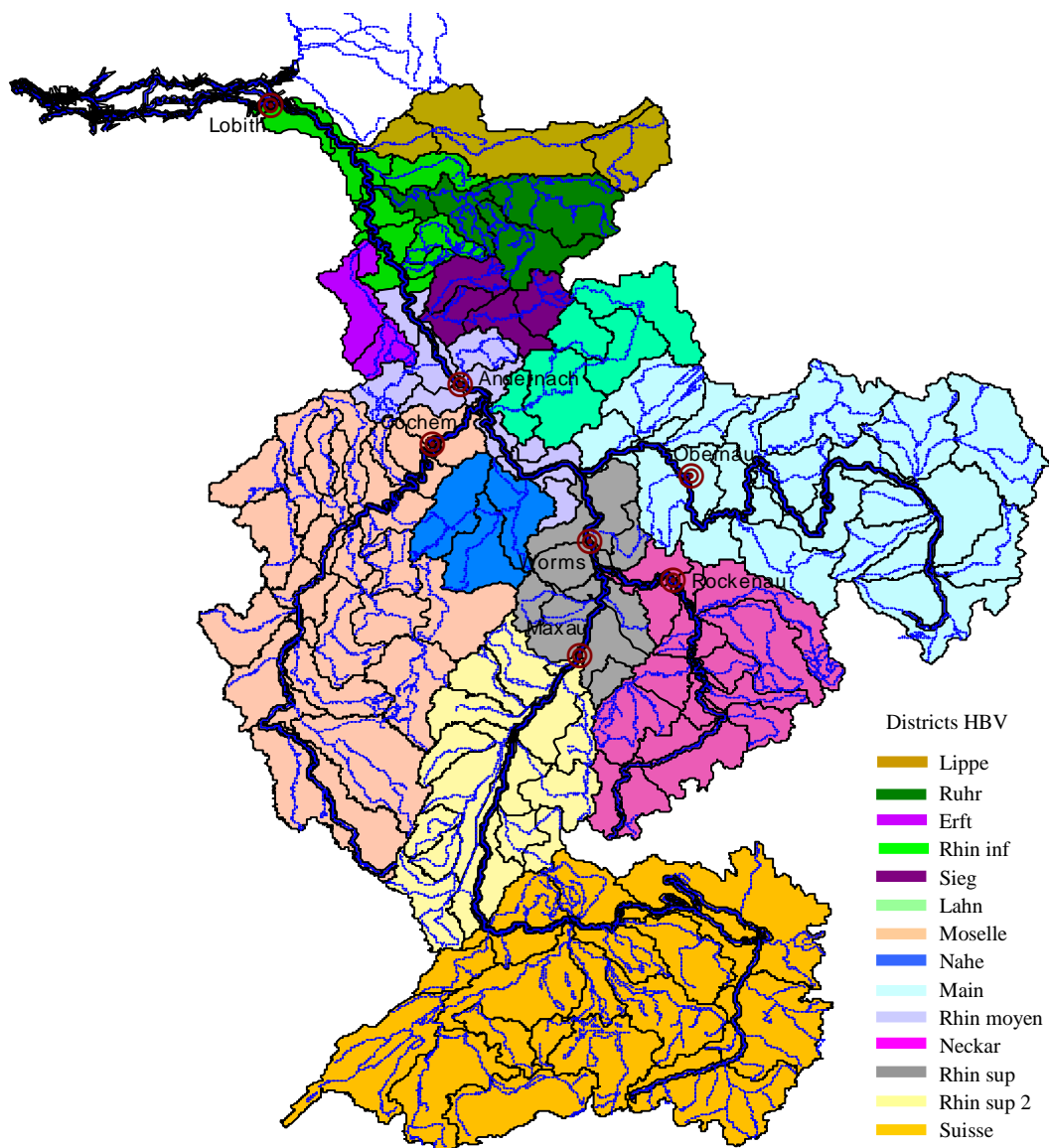


Figure 14: Fleuves, districts HBV et stations de jaugeage



4.2 Difficultés rencontrées

Une attention particulière a été portée sur le calcul des entrées moyennées du modèle. Le fait d'utiliser 134 sous-bassins dans la moyenne arithmétique des précipitations et des évapotranspirations à Lobith peut paraître inconvenant, mais c'est un concept établi pour mettre en œuvre un modèle global (Cf. Figure 15). Il sera ensuite validé ou non par les résultats du modèle.

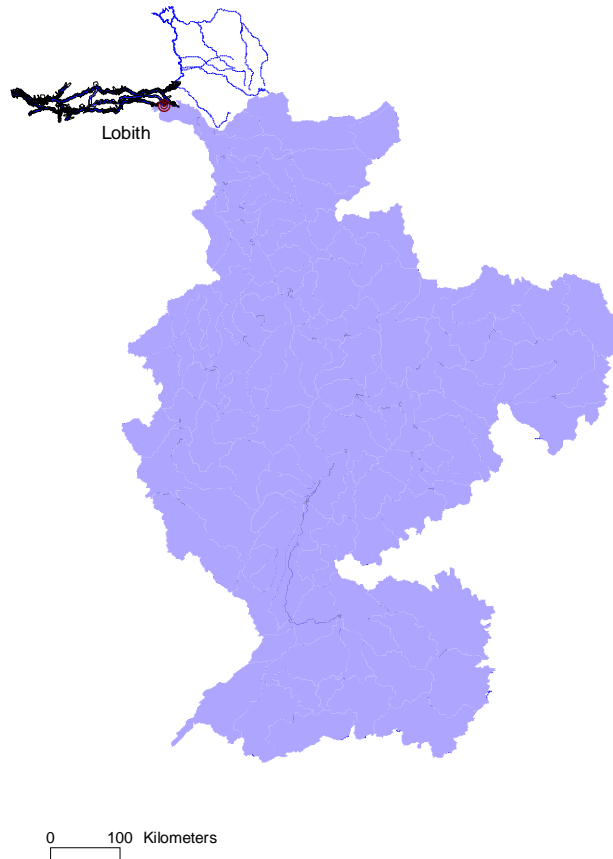


Figure 15: Sous-bassins contribuant aux entrées du modèle à Lobith

4.3 Résultat général sur la station de jaugeage de Lobith

Le Tableau 11 présente les résultats généraux du modèle GR4J appliqué sur le bassin à Lobith. Les résultats sur le bassin aux 6 autres stations sont présentés dans l'annexe 11.2 p82-93 et commentés dans le Chapitre 4.4 p37.



Critère	Observation	GR4J (validation)	GR4J + module neige HBV (validation)	GR4J + correction ETP (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	80.8	80.4	87.0
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	73.4	75.0	83.6
RMSE (m ³ /s)	- na -	515	521	424
Erreur Moyenne (m ³ /s)	- na -	-2.9	2	10.6
Frac Erreur < 10% (%)	- na -	32.6	33.2	42.4
MNQ (m ³ /s)	1 036	1 004 (- 3%)	1 036 (= =)	917 (- 11%)
MHQ (m ³ /s)	6 952	6 047 (- 13%)	6 228 (- 10%)	6465 (- 7%)

Tableau 11: Approche globale, station de Lobith

Les résultats généraux peuvent être qualifiés d’acceptables avec **un critère de Nash-Sutcliffe de plus de 80%**. Ils sont toutefois moins satisfaisants que ceux du modèle HBV, en particulier sur les bas débits avec un critère de Nash-Sutcliffe sur le logarithme des débits de 73 à 84% contre 92% pour RIZA.

Le meilleur modèle GR4J paraît presque équivalent au modèle HBV (87% contre 91% de critère de Nash-Sutcliffe), mais la faible différence numérique est trompeuse. En effet, plus le critère de Nash-Sutcliffe est élevé et plus il est difficile de gagner un point de performance. On observe également que plus du tiers des débits simulés sont dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour des débits mesurés, contre plus de la moitié pour le modèle HBV. Le modèle GR4J a la tendance générale de sous-estimer les débits en conditions de crues. Il semble être plus précis sur les périodes d’été, en particulier avec l’ajout du module neige HBV.

Les valeurs des paramètres de GR4J (ni module neige, ni correction d’ETP) et leurs gammes habituelles de variation (Perrin et al., 2003) sont indiquées dans le Tableau 12.

Paramètre	Gamme habituelle	Calage sur P ₁ *	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X ₁ (réservoir humidité du sol, mm)	100 à 1200	1767	1517	1627
X ₂ (échanges, adimensionnel)	-5 à 3	0.3	-0.1	0.1
X ₃ (capacité de routage, mm)	20 à 300	76	74	75
X ₄ (temps de l’hydrogramme unitaire, jours)	-	6.3	6.1	6.2

Tableau 12: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (sans module neige)

Le processus de calage peut être considéré comme robuste avec des paramètres ayant des valeurs similaires dans les différentes périodes de calage. Les valeurs des paramètres (ni module neige, ni correction d’ETP) révèlent que :

- X₁ atteint des valeurs fortes. Cela pourrait signifier que le modèle force le bassin à avoir une importante capacité de rétention.

* P₁ = 1970-1982, P₂ = 1983-1995, P_{total} = 1970-1995, Cf. Chapitre 3.1 p30.



- X_2 est faible. Le modèle n'a besoin d'aucun apport ou d'aucune perte souterraine pour équilibrer le bilan en eau.
- X_3 prend des valeurs moyennes.
- X_4 est étonnamment petit pour une telle taille de bassin. Ainsi, le délai de temps entre les précipitations et l'arrivée du débit à l'exutoire du bassin versant est probablement autour de 3 ou 4 jours ($X_4/2$ est une estimation du temps de concentration du bassin).

Le modèle GR4J utilisant le module neige HBV n'est pas meilleur que la version basique (80.4% contre 80.8% de critère de Nash-Sutcliffe). Cela est probablement dû à l'application du module neige dans un mode global. L'influence de la neige est prédominante seulement dans la partie alpine du bassin à Lobith, ce qui représente moins de 23% de sa superficie. Le fait d'appliquer un module neige en mode global est probablement trop simpliste.

Etonnamment, la seconde version de GR4J (avec correction d'ETP) montre de bonnes performances, à la fois en période d'étiage et de crue. Avec 87% de critère de Nash-Sutcliffe, **la correction d'ETP améliore considérablement la version basique de GR4J**. Toutefois, elle dégrade la qualité des simulations pour les basses eaux, en sous-estimant les débits de près de 10%. Cela suggère des développements futurs pour les modules neige. Comme on peut le voir dans le Tableau 13 ci-dessous, le modèle est complètement réorganisé :

- le modèle est moins robuste, car les paramètres présentent de plus grandes variations que dans la version initiale.
- le réservoir d'humidité du sol est plus petit (~800 mm contre ~1600 mm dans la version initiale).
- le réservoir de capacité de routage est plus grand (~120 mm contre ~75 mm dans la version initiale).
- les échanges souterrains sont beaucoup plus grands, avec d'importantes pertes (~3) et une erreur moyenne élevée.
- l'atténuation d'ETP est importante, avec une diminution de près de 60% du signal ETP (63.9% pour P_1 , 53.9% pour P_2 et 58.4% pour P_{total}).
- le retard d'ETP ("lag") est significatif, avec des valeurs autour de 20 jours de délai.

Paramètre	Calage sur P_1^*	Calage sur P_2	Calage sur P_{total}
X_1 (réservoir humidité du sol, mm)	911	596	733
X_2 (échanges, adimensionnel)	-2.3	-4.8	-3.6
X_3 (capacité de routage, mm)	120	135	126
X_4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	6.1	5.5	5.67
X_5 (atténuation d'ETP, adimensionnel)	0.6	0.5	0.6
X_6 (retard d'ETP, jours)	18.9	22.5	20.5

Tableau 13: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (correction d'ETP)

* $P_1 = 1970-1982$, $P_2 = 1983-1995$, $P_{total} = 1970-1995$, Cf. Chapitre 3.1 p30.



4.4 Résultat pour les crues

La Figure 16 retrace les 9 crues sur le bassin à Lobith mentionnées dans le rapport HBV, pour la période simulée de 1970-1995 en validation avec le modèle GR4J (correction d'ETP). Les hydrogrammes de crues sur le bassin aux 6 autres stations, simulés avec la version de GR4J combinée au module ETP, sont présentés dans l'annexe 11.2 p82-93.

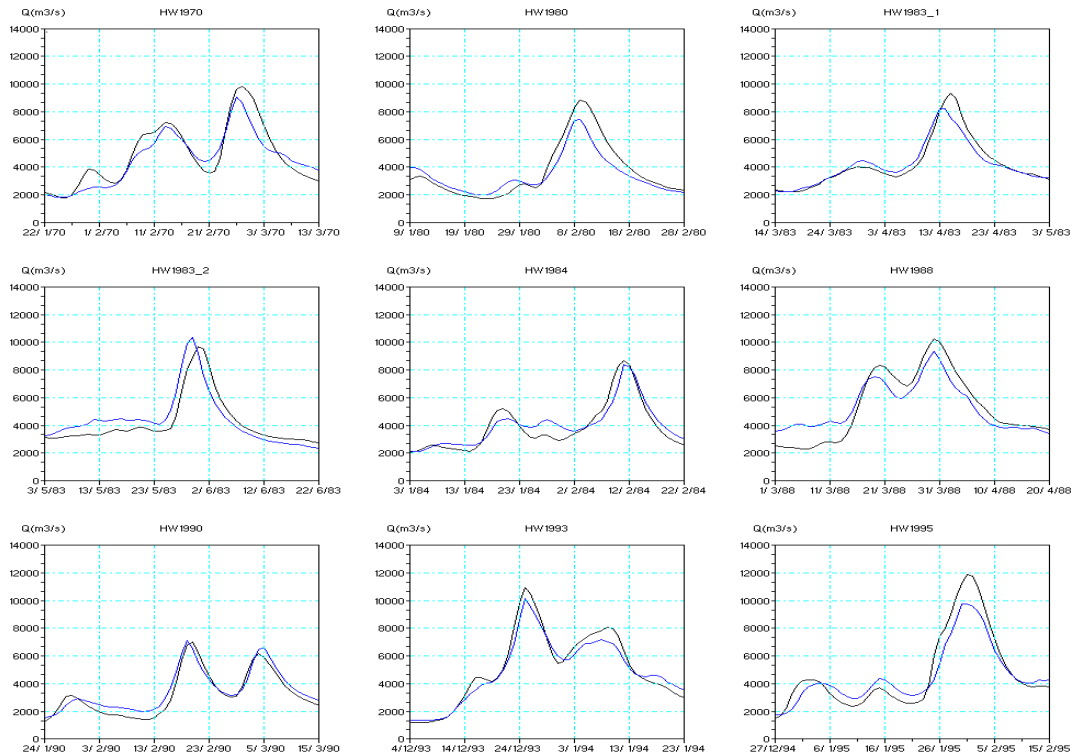


Figure 16: Crues observées et simulées à la station de Lobith (approche globale, correction d'ETP)

Le Tableau 14 propose des critères de qualité utilisés dans le rapport HBV pour les 9 crues simulées sur le bassin à Lobith, respectivement avec la version initiale de GR4J et avec l'ajout de la correction d'ETP. Dans ces mêmes versions, les tableaux similaires sur le bassin aux 6 autres stations sont présentés dans l'annexe 11.2 p82-93.



Evènement	GR4J initial			GR4J + correction ETP		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	1422	6.0	826	780	5.7	816
HW1980	1343	4.2	805	1378	6.9	795
HW1983_1	1427	-0.7	669	1091	1.0	512
HW1983_2	852	3.7	726	-627	-4.4	850
HW1984	652	-6.8	685	304	-3.0	600
HW1988	1432	-0.9	1193	946	0.7	1013
HW1990	320	-6.8	493	-100	-7.4	470
HW1993	2003	8.7	865	807	4.0	554
HW1995	2441	2.0	1069	2096	4.2	915

Tableau 14: Résultats pour les crues à la station de Lobith (approche globale, version initiale de GR4J puis correction ETP)

Les résultats sont encore inférieurs à ceux du modèle HBV. La version basique du modèle tend systématiquement à **sous-estimer les pics de crue** de plusieurs centaines de m³/s (320 m³/s au minimum pour l'évènement HW1990). Elle tend également à **décaler l'arrivée des pics des crues à Lobith**, soit en retard soit en avance. Les différences accumulées entre les débits mesurés et simulés en crue sont faibles, inférieures à 10% en valeur absolue.

La version avec la correction d'ETP améliore toujours le modèle initial, surtout en précision sur les pics de crues simulés (sauf pour l'évènement HW1980). L'écart des pics est atténué, et les débits de pointe peuvent alors être surestimé ou sous-estimé. Cette amélioration n'affecte significativement aucune des deux autres variables du Tableau 14. En revanche, elle a des effets visibles sur le décalage temporel entre les observations et la simulation.

L'évènement le "mieux" simulé provient de la version avec modification de l'ETP, il s'agit de la crue **HW1990**. On observe que le débit de pointe est très légèrement surestimé, et que son arrivée à Lobith est en avance par rapport à la réalité. Ces deux considérations sont primordiales pour les services de prévision de crues et de mise en alerte des populations. L'évènement simulé **HW1983_1** présente les mêmes caractéristiques.

4.5 Commentaires sur les résultats

Les modèles globaux appliqués sur le bassin à Lobith montrent des performances inférieures à celles du modèle semi-distribué HBV. **La différence est significative et demeure relativement importante pour le meilleur modèle global** (GR4J avec correction d'ETP).

Ces résultats sont intéressants car l'application des modèles globaux est habituellement limitée aux sous-bassins amont. Dans les performances de notre modèle sur les 6 autres stations de jaugeage (Cf. annexe 11.2 p82-93), les résultats peuvent être séparés entre les stations sur le Rhin ou sur les affluents :



- Andernach, Worms, Maxau : la meilleure version du modèle est celle avec la correction d'ETP. Elle fournit de bons résultats, avec des critères de Nash-Sutcliffe respectivement égaux à 86.5%, 82.8% et 81.1%. La version basique se trouve ainsi de plus en plus améliorée en se rapprochant de la partie alpine du bassin, avec des critères de Nash-Sutcliffe initiaux de 68.6% à Worms et de 56.9% à Maxau.
- Cochem, Obernau, Rockenau : les résultats sont du même ordre de grandeur que précédemment, mais seul le critère de Nash-Sutcliffe sur le bassin à Rockenau est significativement amélioré par l'une des deux versions de prise en compte de la neige (le module neige HBV).

Les meilleurs modèles GR4J du bassin aux 7 stations de jaugeage donnent des résultats acceptables, avec un critère de Nash-Sutcliffe minimal à 78.2% (Obernau) et maximal à 91% (Cochem). Le fait marquant est la **dégradation de ces critères d'aval en amont sur le Rhin**, particulièrement dans la version basique de GR4J (ni module neige, ni correction d'ETP). Dans tous les cas, cela est directement lié à l'influence alpine sur le régime hydrologique. Pour la prendre en compte, une simple modification de l'évapotranspiration potentielle est satisfaisante (atténuation + retard, Cf. Chapitre 2.2.2 p136). Les résultats obtenus aux stations des affluents du Rhin montrent que cette correction d'ETP n'est pas forcément nécessaire dans la mise en œuvre de modèles globaux sur les affluents du Rhin.

Cet exemple montre qu'il est possible et même valable d'appliquer des modèles globaux pluie-débit sur de très grands bassins. Le calage et le contrôle du modèle sont très simples (4 paramètres pour caler le modèle GR4J) et de telles approches fournissent des résultats intéressants.



5 Approche n°2 de modélisation : mode global avec une information réduite sur la pluviométrie

5.1 Hypothèse

Le chapitre précédent a montré que de bonnes performances pouvaient être attendues de modèles globaux appliqués sur des grands bassins. Pour ce genre de modèles, l'information clé est le signal de précipitation. L'évapotranspiration potentielle joue un rôle moins important sur la simulation des débits à l'exutoire, mais elle peut être cruciale pour les débits des bassins sous un régime nival prédominant.

Dans l'approche n°1 de modélisation, les précipitations étaient calculées avec les pluies de tous les sous-bassins compris dans le bassin étudié (ex : 134 sous-bassins pour le bassin à Lobith, symbolisés schématiquement par 134 postes pluviométriques sur la Figure 17). Que se passe-t-il si on limite cette information à seulement 1, 5, 10 ou 30 sous-bassins ?

D'abord, cette question est essentielle pour déterminer la complexité optimale du modèle, **ait-on vraiment besoin des 134 entrées de pluies dans notre modèle global ?** C'est aussi une question opérationnelle, par exemple pour les services de prévision de crues : la sensibilité des résultats des modèles à la dégradation des entrées (défaillance de plusieurs stations pluviométriques) peut être évaluée. Dans la même optique, des tirages de 2 districts parmi les 14 définis dans le modèle HBV (Cf. Figure 14 p33) permettront d'apprécier la variabilité spatiale des précipitations, ainsi que leur influence sur les performances des modèles à Lobith.

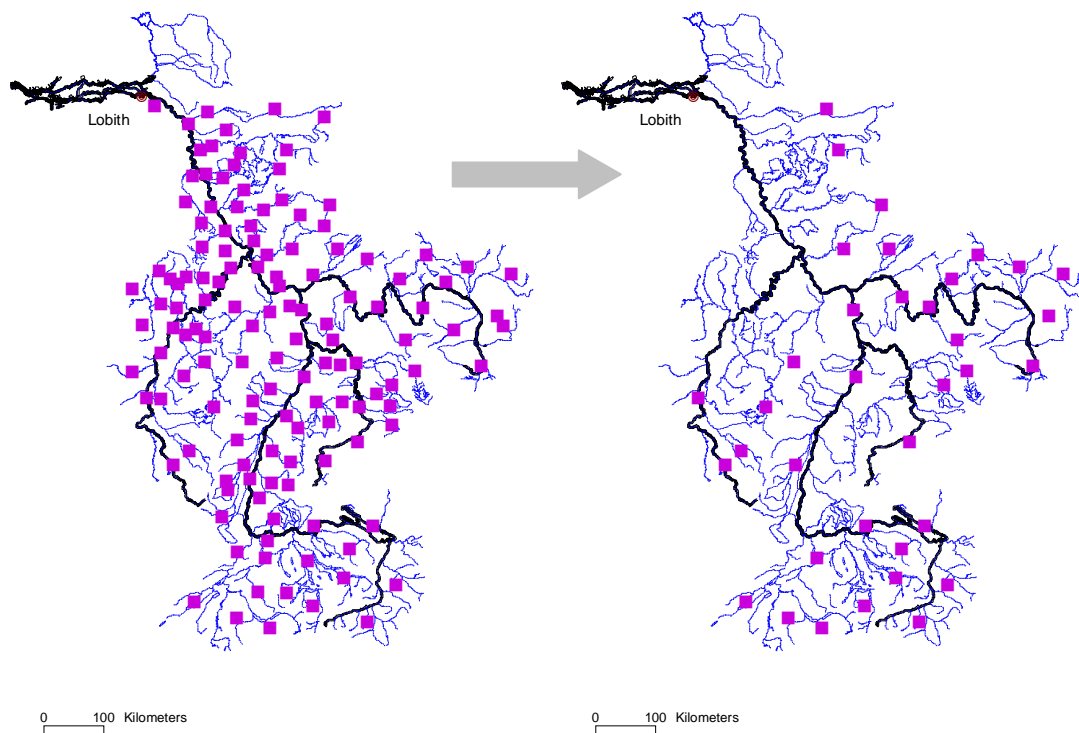


Figure 17: Réduction de l'information pluviométrique



5.2 Description du modèle

Dans tous les modèles mis en oeuvre dans cette partie, l'évapotranspiration potentielle est identique à celle utilisée dans l'approche n°1 de modélisation : elle est calculée par une moyenne arithmétique des ETP de tous les sous-bassins (134 valeurs). Les différents modèles testés sont les suivants :

- **Modèle 2.1: modèles globaux avec les précipitations d'un seul sous-bassin.** 134 modèles seront d'abord calés et validés pour la station de Lobith (1 par sous-bassin), dans la version initiale de GR4J puis dans la version combinée avec un module de correction de l'ETP. L'idée est d'identifier l'affinité des précipitations de chaque sous-bassin avec les débits à Lobith, à travers leurs critères de Nash-Sutcliffe et leurs valeurs de paramètres. Au maximum, les 30 sous-bassins les plus riches en information pluviométrique seront retenus par la suite.
- **Modèle 2.2: modèles globaux avec les précipitations de 5, 10 et 30 sous-bassins** (GR4J puis GR4J avec correction d'ETP). Le modèle 2.1 rend un classement des 134 sous-bassins HBV sur la base de leurs performances individuelles. L'idée est de comparer l'approche globale initiale (Cf. Chapitre 4 p33) avec des modèles limités en terme de contenu informatif des précipitations. 3 modèles seront donc calés et validés pour la station de Lobith, avec des entrées de précipitations moyennées sur les 5, 10 et 30 "meilleurs" sous-bassins.
- **Modèle 2.3: modèles globaux avec les précipitations de 2 districts HBV** (GR4J puis GR4J avec correction d'ETP). Les 14 séries de précipitations sur les 14 districts HBV ont été calculées en moyennant les précipitations de leurs sous-bassins respectifs. Le nombre de combinaisons possibles entre 2 séries parmi les 14 au total est de 91 (Cf. figure 14 p33). Ainsi 91 modèles seront mis en oeuvre pour la station de Lobith, utilisant chacun en entrée des pluies moyennées sur des combinaisons de 2 districts.

5.3 Résultat général avec 1 sous-bassin en entrée

Le Tableau 15 liste les résultats des performances des 10 meilleurs modèles avec une entrée de pluie limitée à un seul sous-bassin. La table indique le critère de Nash-Sutcliffe obtenu pendant le processus de calage et sur l'ensemble de la validation, et les valeurs de paramètres obtenues en calant le modèle sur la période totale 1970-1995. La Figure 18 en page suivante est une carte du bassin présentant le critère de Nash-Sutcliffe obtenu en validation sur chaque sous-bassin. Les 5 sous-bassins les plus "intéressants" sont hachurés.



Code HBV + District HBV	Nash Calib. P_{total}	Nash Valid. P_{total}	X_1 P_{total}	X_2 P_{total}	X_3 P_{total}	X_4 P_{total}
39 - Moselle	74.7	73.4	2175	-1.4	124	6.1
105 - Rhin sup 2	74.5	73.3	3477	-104.4	133	6.5
13 - Neckar	74.1	72.4	2168	-0.9	130	5.9
110 - Rhin sup 2	73.4	72.1	1716	-1.2	130	6.1
44 - Moselle	72.1	71.0	1952	0.1	107	6.1
45 - Moselle	71.6	70.9	2319	0.2	101	5.9
132 - Suisse	3.3	70.7	3	-10.8	65	1135.4
113 - Rhin sup 2	70.9	70.4	1401	1.7	75	5.7
25 - Main	73.5	70.4	1968	1.1	77	5.8
114 - Rhin sup 2	71.1	70.2	1182	1.7	76	5.8

Tableau 15: Approche globale avec la pluie d'un seul sous-bassin, station de Lobith (ni module neige ni correction d'ETP)

Quatre aspects importants peuvent être notés :

- La dégradation du critère de Nash-Sutcliffe est limitée (de 81% avec 134 sous-bassins à 73% en validation avec la pluie du sous-bassin n°39). Avec une donnée de pluie aussi pauvre, **la simulation reste encore acceptable**.
- Certains processus de calage ne sont pas satisfaisants, car les valeurs des paramètres sont en dehors de la gamme acceptable. Cela concerne les sous-bassins HBV n°105 pour X_2 , et n°132 pour X_1 et X_4 . Il est étonnant que leur critère de Nash-Sutcliffe en validation atteigne des valeurs supérieures à 70%.
- Les paramètres de GR4J sont étonnamment homogènes, en particulier le temps de base de l'hydrogramme unitaire : les valeurs sont autour de **6 jours** pour presque tous les sous-bassins HBV. Ces temps de propagation jusqu'à Lobith semblent réalistes au vu de la répartition des sous-bassins.
- Les meilleurs critères de Nash-Sutcliffe sont obtenus avec des sous-bassins situés au centre du bassin (Cf. Figure 18), approximativement le long du corridor fluvial du Rhin. Cela pourrait être dû aux perturbations orographiques de la vallée du Rhin. La partie septentrionale et la partie suisse du bassin montre de moins bonnes performances causées par l'influence de la neige.

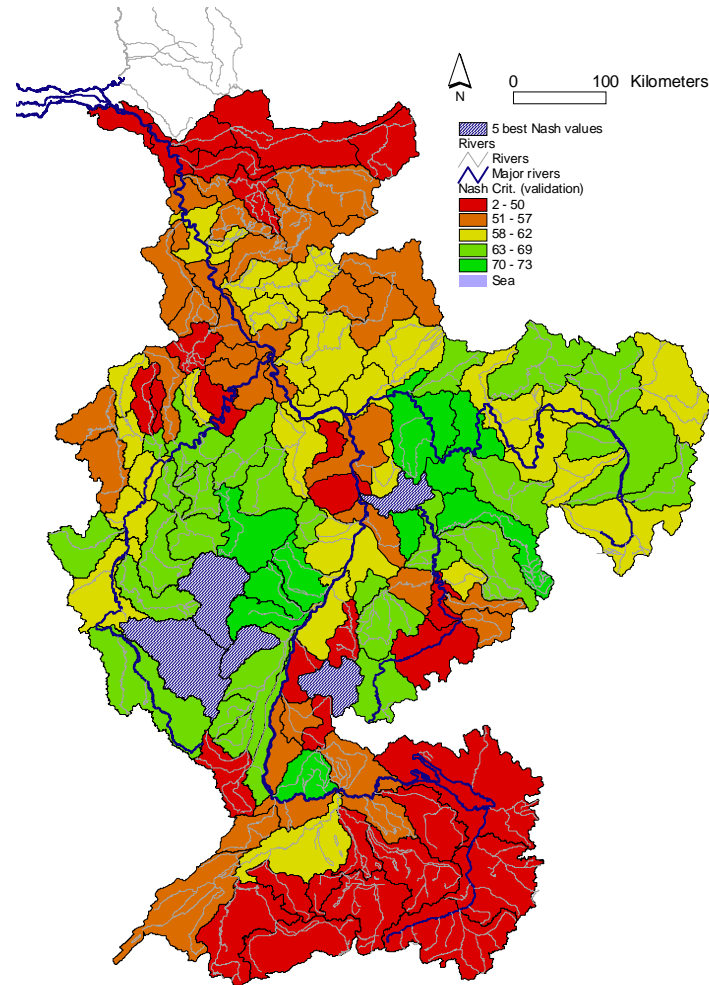


Figure 18: Critère de Nash-Sutcliffe (validation) pour les modèles globaux à Lobith avec la pluie d'un seul sous-bassin HBV (GR4J, ni module neige ni correction d'ETP)

Le Tableau 16 liste les résultats des performances des 10 meilleurs modèles avec correction de l'évapotranspiration potentielle et avec une entrée de pluie limitée à un seul sous-bassin. Comme précédemment, la table indique le critère de Nash-Sutcliffe obtenu pendant le processus de calage et sur l'ensemble de la validation, et les valeurs de paramètres obtenues en calant le modèle sur la période totale 1970-1995. On rappelle que le paramètre X5 représente le facteur d'atténuation de l'ETP, et que le paramètre X6 traduit son retard ("lag") par rapport à la série non-datée initiale.



Code HBV + District HBV	Nash Calib. P _{total}	Nash Valid. P _{total}	X ₁ P _{total}	X ₂ P _{total}	X ₃ P _{total}	X ₄ P _{total}	X ₅ P _{total}	X ₆ P _{total}
39 - Moselle	77.7	75.6	1208	-7.6	176.6	5.6	0.6	19.1
25 - Main	77.5	75.4	1086	-2.0	145.4	5.6	0.5	10.1
44 - Moselle	76.2	74.9	1030	-4.4	164	5.6	0.6	20.3
45 - Moselle	75.5	73.9	1313	-4.2	151	5.6	0.5	18.8
46 - Moselle	74.9	73.7	932	-2.2	158	5.7	0.5	20.4
40 - Moselle	74.5	73.7	792	-0.1	131	5.8	0.5	12.6
48 - Moselle	74.5	73.4	1234	-3.8	152	5.6	0.5	22.0
110 - Rhin sup2	74.8	73.2	961	-7.0	188	5.5	0.6	9.1
49 - Moselle	73.4	72.9	1562	-6.3	165	5.6	0.5	23.4
10 - Neckar	74.8	72.5	1323	-0.3	122	5.7	0.7	1.1

Tableau 16: Approche globale avec la pluie d'un seul sous-bassin, station de Lobith (correction d'ETP)

Malgré la complexification des modèles liée à l'ajout de 2 paramètres par cette correction d'ETP, les processus de calage sont satisfaisants pour chacun des 10 “meilleurs” sous-bassins. En effet, les valeurs des paramètres sur l'ensemble de la période de simulation sont dans une gamme acceptable, et les valeurs atteintes sur les sous-périodes P1 et P2 sont suffisamment homogènes pour qualifier le calage de **robuste** (Cf. annexe 11.3.1 p94-95). Les valeurs d'évapotranspiration potentielle sont atténuées de moitié, ce qui est beaucoup, et elles sont retardées d'environ 10 à 20 jours. Les paramètres de délai sont similaires à ceux calés dans la version initiale de GR4J, tous autour de 5 à 6 jours.

On remarque que le module ETP est le plus efficace sur des sous-bassins situés dans le district de la Moselle. Toutefois, cette correction n'améliore que de **quelques points** les valeurs du critère de Nash calculées en validation à Lobith : elles évoluent seulement de **73.4 % à 75.6 %** pour le sous-bassin n°39 (Moselle), contre **80.8 % à 87 %** avec une entrée moyennée sur 134 précipitations (Cf. Tableau 11 p35). Ainsi, la version initiale de GR4J n'exploite pas complètement l'information de la série des 134 pluies agrégées, tandis que le module de correction d'ETP peut en tirer une information importante et absente du jeu de donnée limité à une seule précipitation. Dans la suite de cette partie et dans la troisième approche (Cf. Chapitre 6 p50), nous mettrons en avant les différences de rendement du module ETP selon la localisation de la station considérée pour la simulation des débits.

Au maximum, le critère de Nash-Sutcliffe parmi les 10 “meilleurs” sous-bassin du Rhin est **amélioré de 3.9 %** (71 % à 74.9 % pour le sous-bassin n°40) suite à la correction d'ETP.

En comparaison, les résultats du modèle global pour la station de Maxau (approche 1) sont présentés dans l'annexe 11.2.1 p82-83. Maxau est située sur le Rhin en sortie des Alpes, dans le district “Rhin sup 2”, et les débits y sont simulés avec une pluie moyennée sur 36 séries de précipitations. On a noté une évolution de 56.9 % à 81.1 % du critère de Nash-Sutcliffe, soit une **progression de presque 25 %** suite à la combinaison de GR4J avec le module ETP.



Ces considérations permettent d'affirmer que pour la simulation globale des débits sur le bassin du Rhin, l'extraction de la richesse de l'information pluviométrique par le module ETP est fonction de la répartition et du nombre de postes pluviométriques utilisés pour calculer la pluie moyenne entrée dans le modèle.

5.4 Résultat général avec 5, 10 et 30 sous-bassins en entrée

Après avoir classé les 134 sous-bassins, nous pouvons maintenant sélectionner des groupes de sous-bassins et tester notre approche globale avec les entrées de 5, 10 et 30 sous-bassins. Les résultats sont présentés dans le Tableau 17. La dernière colonne (134 stations) utilise les résultats du modèle développé dans le Chapitre 4 (Cf. Tableau 11 p35, colonne "GR4J"). Les paramètres, les critères de qualité pour les crues et les hydrogrammes de crues des différents modèles sont présentés dans les annexes 11.3.2 à 11.3.4 p96-101.

Critère	Observation	GR4J – 1 sous-bassin (validation)	GR4J – 5 sous-bassins (validation)	GR4J – 10 sous-bassins (validation)	GR4J – 30 sous-bassins (validation)	GR4J – 134 sous-bassins (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	73.4	79.2	79.5	79.5	80.8
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	70.4	73.9	73.2	71.8	73.4
RMSE (m ³ /s)	- na -	607	536	532	533	516
Erreur Moyenne (m ³ /s)	- na -	-25.5	-12.0	-21.1	-15.1	-2.9
Frac erreur < 10% (%)	- na -	30.3	31.8	31.3	31.3	32.6
MNQ (m ³ /s)	1036	1054 (+ 2%)	1046 (+ 1%)	1028 (- 1%)	1033 (==)	1004 (- 3%)
MHQ (m ³ /s)	6952	6262 (- 10%)	6356 (- 9%)	6240 (- 10%)	6236 (- 10%)	6047 (- 13%)

Tableau 17: Approche globale avec une information pluviométrique réduite, station de Lobith (GR4J, ni module neige ni correction d'ETP)

Les résultats ci-dessus montrent que, pour les simulations sur le bassin à Lobith, les performances du modèle sont équivalentes avec **5 sous-bassins** à celles obtenues avec l'information pluviométrique des 134 sous-bassins (sans module neige et sans correction d'ETP). Ce chiffre de 5 sous-bassins est particulièrement faible et intéressant pour la collecte des hauteurs de précipitations journalières.

Les modèles 2.1 et 2.2 présentent des erreurs moyennes négatives de fortes valeurs, donnant une information sur la capacité des modèles à effectuer les équilibres entre apports et pertes souterraines. Ici, la balance penche en faveur de pertes au long du parcours entre les sous-bassins jusqu'à l'exutoire.

Similairement aux modèles mis en œuvre dans l'approche n°1 (Cf. Chapitre 4 p33), les modèles du Tableau 17 tendent à **sous-estimer les hauts débits**. En revanche, ils ont une assez bonne précision pour la simulation des périodes d'étiages, avec 3% d'écart maximum par rapport aux observations. Les débits journaliers simulés à l'intérieur d'un intervalle de $\pm 10\%$ autour des valeurs observées sont encore de l'ordre du tiers de l'ensemble des débits simulés.



Dans le Tableau 18 ci-après, il apparaît que le modèle simplifié avec les précipitations de 5 sous-bassins n'est pas moins robuste, avec des paramètres atteignant des valeurs similaires sur les différentes périodes de calage.

Paramètre	P ₁ *	P ₂	P _{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	2321	1795	2028
X2 (échanges, adimensionnel)	-1.8	-2.0	-1.9
X3 (capacité de routage, mm)	123	114	115
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	6.3	6.1	6.2

Tableau 18: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de 5 sous-bassins (ni module neige ni correction d'ETP)

Dans la même approche globale avec les entrées de 5, 10 et 30 sous-bassins, les résultats de GR4J combiné au module de correction de l'ETP sont présentés dans le Tableau 19. On rappelle qu'une seule série d'ETP a été fournie en entrée des modèles, celle calculée à Lobith ; par conséquent, la correction d'ETP n'ajoute ici que deux paramètres libres (Cf. Chapitre 2.2.2 p16). Les paramètres, les critères de qualité pour les crues et les hydrogrammes de crues des différents modèles sont présentés dans les annexes 11.3.2 à 11.3.4 p96-101..

Critère	Observation	GR4J – 1 sous-bassin (validation)	GR4J – 5 sous-bassins (validation)	GR4J – 10 sous-bassins (validation)	GR4J – 30 sous-bassins (validation)	GR4J – 134 sous-bassins (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	75.6 (+ 2.6 %)	81.9 (+ 2.9 %)	82.8 (+ 2.8 %)	84.4 (+ 4.4 %)	87.0 (+ 6 %)
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	76.2 (+ 6.2 %)	79.3 (+ 5.3 %)	80.3 (+ 7.3 %)	80.8 (+ 8.8 %)	83.6 (+ 10.6 %)
RMSE (m ³ /s)	- na -	581.5	500.2	488.7	464.6	424.3
Erreur Moyenne (m ³ /s)	- na -	14.5	14.9	13.2	4.7	10.6
Frac erreur < 10% (%)	- na -	34.4	38.6	39.9	40.3	42.4
MNQ (m ³ /s)	1036	983 (- 5 %)	953 (- 8 %)	956 (- 8 %)	958 (- 8 %)	918 (- 11 %)
MHQ (m ³ /s)	6952	6500 (- 7%)	6555 (- 6 %)	6581 (- 5 %)	6557 (- 6 %)	6466 (- 7 %)

Tableau 19: Approche globale avec une information pluviométrique réduite, station de Lobith (GR4J, correction d'ETP)

Trois aspects surprenants des résultats peuvent être remarqués suite à la correction d'ETP :

- le modèle avec une entrée de pluie moyenne sur 5 sous-bassins est suffisant pour fournir des premiers résultats satisfaisants. Etonnamment, ils sont meilleurs que ceux du modèle global avec une entrée de 134 sous-bassins et sans correction d'ETP (81.9 % contre 80.8 %).
- les erreurs moyennes sont toutes passées de négatives en positives.

* P₁ = 1970-1982, P₂ = 1983-1995, P_{tot} = 1970-1995, Cf. Chapitre 3.1 p30.



- la bonne précision sur les débits minimums annuels moyens du Tableau 17 a été dégradée, alors celle sur les débits maximums annuels moyens a été améliorée.

Les conclusions de la partie précédente quant à l'ajout du module ETP se retrouvent dans les résultats ci-dessus, en particulier dans les évolutions du critère de Nash-Sutcliffe. L'efficacité du module ETP est globalement croissante avec le **nombre de sous-bassins** utilisés pour calculer la pluie moyenne entrée dans le modèle, mais le facteur principal demeure la **localisation des sous-bassins par rapport à la partie alpine**.

En général, tous les critères de performances sont améliorés par la correction d'ETP. Les modèles calés pour simuler les classes de faibles débits y sont visiblement très sensibles, tout comme la fraction des débits simulés se trouvant dans un intervalle de 10 % autour des valeurs observées (évolution de 31.3 % à 40.3 % avec 30 sous-bassins et correction ETP).

Le Tableau 20 ci-après montre la réorganisation du modèle avec une entrée de 5 sous-bassins, suite à l'ajout de 2 paramètres libres par la correction d'ETP :

Paramètre	P ₁ *	P ₂	P _{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	1082	779	951
X2 (échanges, adimensionnel)	-3.3	-4.8	-3.7
X3 (capacité de routage, mm)	148	150	143
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	5.8	5.5	5.6
X5 (atténuation d'ETP, adimensionnel)	0.6	0.5	0.5
X6 (retard d'ETP, jours)	24.6	25.7	24.1

Tableau 20: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de 5 sous-bassins (correction d'ETP)

Malgré la complexification du modèle, il semble être aussi robuste que son équivalent à 4 paramètres (Cf. Tableau 18). Seuls la capacité de rétention du sol X1 et le coefficient d'échanges souterrains X2 subissent des changements significatifs ; les délais X4 sont diminués d'environ une demi-journée, probablement en relation avec les fortes valeurs de presque 25 jours de retard de l'évapotranspiration potentielle.

5.5 Résultat général avec deux districts HBV en entrée

Les résultats des modèles utilisant les 10 paires de districts les plus intéressantes pour la simulation des débits à Lobith sont présentés dans le Tableau 21, uniquement dans la version de GR4J combinée au module de correction de l'ETP.

* P₁ = 1970-1982, P₂ = 1983-1995, P_{tot} = 1970-1995, Cf. Chapitre 3.1 p30.



Districts HBV	Nash Calib. P_{total}	Nash Valid. P_{total}	X_1 (P_{total})	X_2 (P_{total})	X_3 (P_{total})	X_4 (P_{total})	X_5 (P_{total})	X_6 (P_{total})
Lahn + Rhin sup 2	86.0	84.1	840.9	-4.9	142.9	5.6	0.5	20.4
Moselle + Rhin sup 2	85.3	84.1	906.5	-7.2	163.8	5.6	0.5	26.3
Main + Rhin sup 2	86.1	84.0	810.8	-3.4	134.9	5.7	0.6	16.1
Neckar + Moselle	85.5	84.0	749.9	-3.5	137.6	5.7	0.5	20.1
Rhin moy + Rhin sup 2	85.4	83.9	722.3	-3.0	138.0	5.6	0.6	15.4
Erft + Rhin sup 2	85.2	83.9	709.2	-2.5	131.3	5.7	0.6	14.5
Sieg + Rhin sup 2	85.0	83.1	1066.8	-9.5	162.4	5.6	0.5	28.7
Rhin inf + Rhin sup 2	84.8	82.8	896.7	-5.5	137.6	5.7	0.6	23.6
Main + Moselle	83.9	82.7	791.9	-2.1	129.0	5.8	0.5	24.3
Nahe + Rhin sup 2	83.8	82.4	822.6	-4.1	146.4	5.6	0.5	18.0

Tableau 21: Approche globale avec la pluie de 2 districts HBV, station de Lobith (correction d’ETP)

On remarque que les précipitations du **district “Rhin sup 2”** en sortie de la partie alpine (Cf. Figure 14 p33), sont les plus intéressantes pour les performances de nos modèles. Combinées à celles du district de la Lahn ou de la Moselle, elles permettent d’atteindre un critère de Nash-Sutcliffe satisfaisant, égal à 84.1 %. La moyenne des pluies entrée dans ces 2 modèles intègre suffisamment de séries de précipitations observées, respectivement au nombre de 20 et de 33, pour que le module ETP extrait efficacement la richesse de l’information pluviométrique. Il est surprenant de noter que le paramètre du coefficient d’atténuation de l’évapotranspiration atteigne systématiquement des valeurs autour de 0.5, plutôt fortes.

Ainsi, comme montré dans le Tableau 22, le “meilleur” modèle par paire de districts est presque équivalent au modèle des 30 “meilleurs” sous-bassins, avec un critère de Nash-Sutcliffe de 84.1 % contre 84.4 %.

Critère	Observation	GR4J initial 2 districts (validation)	GR4J+ETP 2 districts (validation)	GR4J+ETP 30 sous-by (validation)	GR4J+ETP 134 sous-by (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	79.4	84.1	84.4	87.0
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	72.4	79.8	80.8	83.6
RMSE (m ³ /s)	- na -	534.7	469.5	464.6	424.3
Erreur Moyenne (m ³ /s)	- na -	7.7	-5.9	4.7	10.6
Frac erreur < 10% (%)	- na -	31.2	37.8	40.3	42.4
MNQ (m ³ /s)	1036	1019 (- 2 %)	943 (- 9 %)	958 (- 8 %)	918 (- 11 %)
MHQ (m ³ /s)	6952	6113 (- 12 %)	6480 (- 7 %)	6557 (- 6 %)	6466 (- 7 %)

Tableau 22: Approche globale avec une information pluviométrique réduite, station de Lobith



5.6 Commentaires sur les résultats

Les modèles globaux simplifiés appliqués sur le bassin à Lobith présentent encore des performances inférieures à celles du modèle semi-distribué HBV. Elles se rapprochent des performances du modèle global à 134 sous-bassins **en utilisant au minimum 5 sous-bassins** (critère Nash-Sutcliffe de 79% contre 81%). Avec 10 ou 30 sous-bassins, les résultats ne sont pas significativement améliorés (seulement +1% de critère Nash-Sutcliffe).

Par ajout d'un module de correction de l'ETP, l'amélioration des résultats de ces modèles est généralement croissante avec le nombre de sous-bassins utilisés en entrée. Des progressions de +2.6%, +2.9% et +4.4% ont respectivement été enregistrées pour les modèles avec 1, 5 ou 30 sous-bassins. Finalement, un critère de Nash-Sutcliffe de **81.9 %** a été obtenu avec 5 sous-bassins en entrée, dépassant les **81 %** du modèle global avec la moyenne des 134 sous-bassins en entrée (sans correction ETP).

L'efficacité du module ETP semble également dépendre, au-delà d'un certain nombre de sous-bassins, des localisations de ces derniers par rapport à la **partie alpine**. Les modèles utilisant en entrée toutes les combinaisons possibles de paire de districts HBV ont montré que les sous-bassins du **district "Rhin sup 2"**, en sortie des Alpes, étaient les plus intéressants pour la simulation des débits à Lobith avec prise en compte de l'influence nivale. Nous reviendrons sur ce point important pour la semi-distribution dans le chapitre suivant.

En résumé, le module ETP aura une grande probabilité d'améliorer la précision des simulations des débits du Rhin, si la pluie moyenne entrée dans le modèle intègre un nombre suffisant de postes pluviométriques situés à proximité de la partie alpine du bassin.

Différentes versions du module ont été testées dans chaque modèle mis en œuvre dans ce chapitre, par rapport à la version définie sur la Figure 5 p16 :

- (a) une version avec un seul paramètre à caler, le "lag". L'évapotranspiration n'y est donc pas atténuée, et la capacité du réservoir de routage de l'ETP est fixée à 0.
- (b) une autre version avec un seul paramètre à caler, le coefficient d'atténuation. Le retard et la capacité du réservoir de routage de l'ETP sont fixés à 0.
- (c) une dernière version avec 2 paramètres à caler, le coefficient d'atténuation et la capacité du réservoir de routage. Le retard est fixé à 0.

Les résultats sont présentés dans l'annexe 11.3.6 p104-105. Ces trois différentes versions du module ETP peuvent légèrement dégrader les critères de Nash-Sutcliffe de nos modèles, et nous n'avons pas noté d'améliorations significatives par rapport à la version définie dans le Chapitre 2.2.2 p16. **C'est donc la version initiale du module ETP qui a été retenue.**

La comparaison des modèles 2.1, 2.2 et 2.3 indique qu'il est valable d'appliquer sur de grands bassins des modèles globaux pluie-débit avec une information réduite sur la pluviométrie. Ces approches simples et rapides peuvent permettre de s'affranchir d'éventuelles lacunes d'observations dans une base de donnée.

Les résultats des modèles avec correction d'ETP sont surprenants, et soulignent l'importance du **contenu informatif des précipitations** pour la modélisation hydrologique. Il sera possible d'estimer la richesse de l'information pluviométrique d'un groupe de sous-bassins, en comparant les améliorations obtenues par la combinaison de GR4J avec un module de traitement de l'influence nivale (correction d'ETP dans notre cas).



6 Approche n°3 de modélisation : vers la semi-distribution

6.1 Hypothèse

Dans les approches n°1 et n°2, les débits à Lobith étaient simulés avec des modèles utilisant la pluie tombée sur le bassin à Lobith (pluie totale ou partielle) et calculant les débits à Lobith. Les deux approches sont globales dans le sens où elles ne divisent pas le bassin en plusieurs morceaux.

Cette partie propose d'effectuer un premier pas vers des modèles semi-distribués. Le bassin est divisé en trois unités équivalentes à des ensembles de sous-bassins, et dont les débits sont respectivement mesurés par les stations de jaugeage de **Worms, Obernau et Cochem**. A elles trois, elles contrôlent les débits du Rhin depuis la source jusqu'à l'aval du confluent avec le Neckar, les débits de la Moselle et les débits du Main. Le bassin intermédiaire compris entre les 3 sous-bassins et Lobith n'est pas directement intégré dans la semi-distribution : les débits d'affluents tels que la Lahn, la Ruhr ou la Lippe seront ajustés à l'étape de calage du modèle.

6.2 Difficulté rencontrée

La semi-distribution complexifie le modèle par l'augmentation du nombre de paramètres. En théorie, un jeu est défini pour chaque sous-bassin et un dernier paramètre supplémentaire est utilisé pour prendre en compte le bassin intermédiaire. Avant toute réflexion sur leur **calage dans l'agrégation des différents débits calculés**, une première méthodologie a été essayée en respectant les points suivants :

1. 3 modèles globaux GR4J sont calés sur les stations de jaugeage de Worms, Obernau et Cochem suivant l'approche n°1 décrite dans le Chapitre 4 (Cf. p33).
2. les débits sont calculés avec les 3 modèles, exprimés en mm par GR4J. Ces débits sont sommés après une conversion en m^3/s .
3. cette somme, nommée $Q_{w,o,c}$, constitue un débit que l'on cherche à transférer jusqu'à Lobith, pour ensuite effectuer un contrôle par rapport aux débits mesurés. Une méthode originale a été proposée : il s'agit d'utiliser $Q_{w,o,c}$ en entrée de GR4J à la place des précipitations journalières, en fixant le jeu de paramètres dans GR4J de la façon suivante (Cf. Chapitre 2.2.2 p14):
 - $X_1 = 0$: $Q_{w,o,c}$ a la même valeur en entrée et en sortie du réservoir de production.
 - $X_2 = 0$: il n'y a pas d'échanges souterrains.
 - $X_3 = 0, X_1 = 0, X_2 = 0$: $Q_{w,o,c}$ est directement réparti entre les 2 hydrogrammes unitaires $UH1$ et $UH2$.
 - X_4 est calé sur les débits à Lobith.

Les performances de ce modèle ne se sont pas avérées satisfaisantes malgré des temps de base (X_4) acceptables, avec un critère de Nash-Sutcliffe inférieur à 60%. L'utilisation de sommation de débits à la place de précipitation en entrée de GR4J ne constitue pas une approche de semi-distribution valable au vu de la structure du modèle.



6.3 Description du modèle retenu

La méthodologie retenue respecte les étapes suivantes:

1. 3 modèles globaux GR4J sont calés sur les stations de jaugeage de Worms, Obernau et Cochem suivant l'approche n°1 décrite dans le Chapitre 4 (Cf. p33).
2. les débits sont calculés avec les 3 modèles, exprimés en mm par GR4J. Ces débits sont sommés après une conversion en m³/s. Cette somme constitue un nouveau modèle pour les débits à Lobith, qui a potentiellement 12 paramètres libres (1 jeu de 4 paramètres X₁ à X₄ pour chacun des 3 sous-bassins). Il utilise 3 entrées, la pluie sur Worms, Obernau et Cochem.
3. Ce modèle est ensuite calé. Pour limiter la complexité du calage, **9 paramètres sur les 12 sont fixés** aux valeurs trouvées dans la première étape (calage sur les données des sous-bassins), et le calage ajuste seulement les 3 paramètres restants. Ces paramètres libres sont les **3 temps de base de l'hydrogramme unitaire** (paramètre X₄, Cf. Chapitre 2.2.2 p14). Un dernier paramètre supplémentaire est calé, le **coefficient multiplicateur C** utilisé pour simuler les flux latéraux entrant entre les 3 stations et Lobith.

Cette construction est présentée dans la Figure 19. En d'autres termes, notre modèle reproduit les débits à Lobith en ajustant une constante de temps dans les 3 modèles amont. Schématiquement, le modèle utilisé lors de ce dernier calage est le suivant :

$$Q_{Lobith} = C \times \sum_{i=1}^3 \left[\frac{S_{sta(i)}}{S_{Lobith}} \times GR4J \left(P_{sta(i)}, ETP_{sta(i)}, \begin{Bmatrix} X_1^{sta(i)} \\ X_2^{sta(i)} \\ X_3^{sta(i)} \\ X_{4semiD}^{sta(i)} \end{Bmatrix} \right) \right]$$

où Q est le débit, S la superficie du bassin, P les précipitations, ETP les évapotranspirations potentielles et sta la station considérée (Worms, Obernau, Cochem).

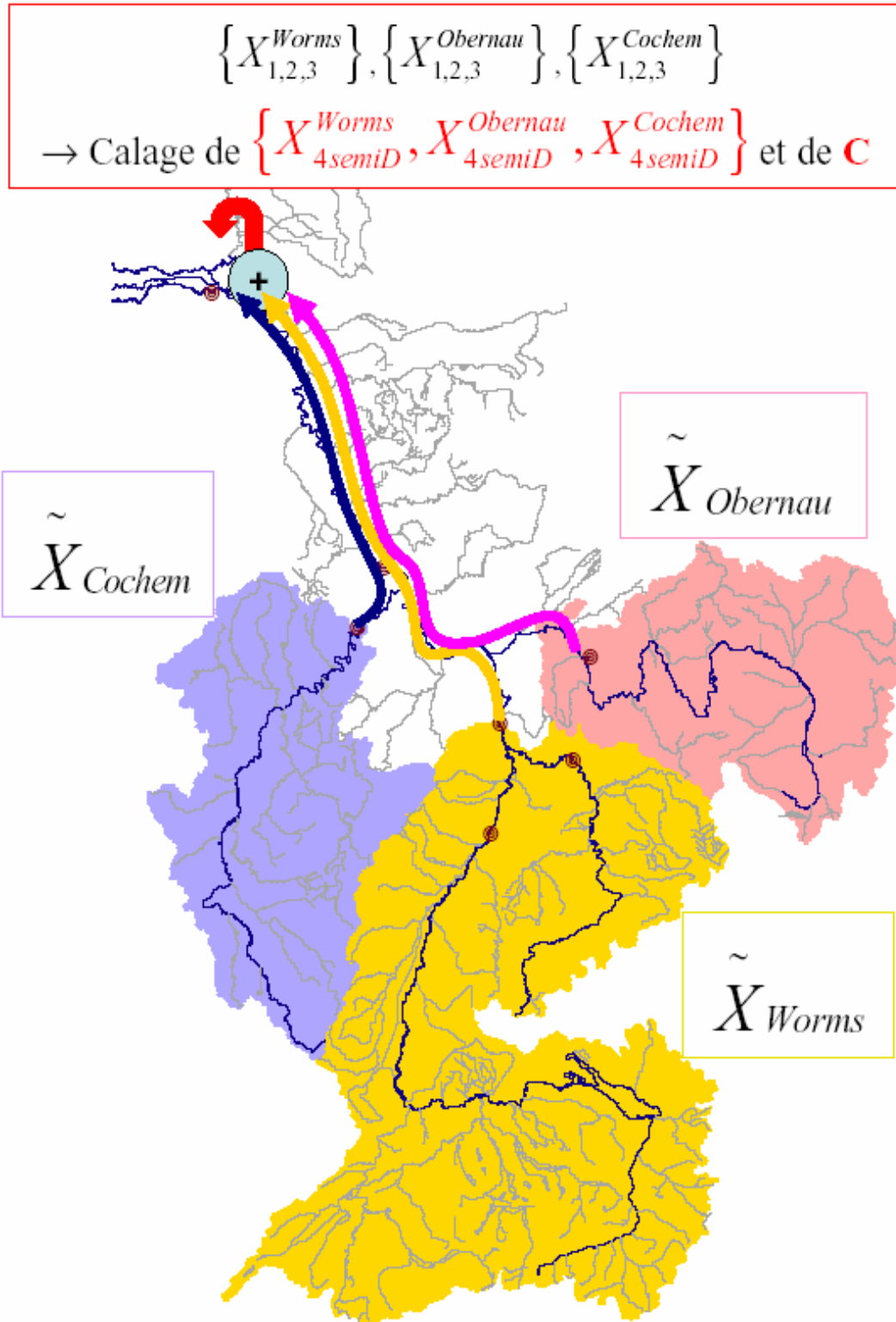


Figure 19: Distorsion du temps de base de l'hydrogramme unitaire, diagramme schématique



6.4 Résultat général sur la station de jaugeage de Lobith

Les valeurs obtenues avec le modèle global décrit dans l'approche n°1 ne sont pas identiques à celles du Tableau 11 (Cf. p35), car le jeu de données est plus court. En fait, nous avons besoin sur une même période des valeurs de débit sur les 3 stations amont (Worms, Obernau, Cochem) pour caler notre nouveau modèle. Ainsi, la validité des débits mesurés (Cf. Tableau 3 p17) limite le jeu de données à la **période 1980-1995** où tous les débits amont sont disponibles.

En comparaison du meilleur modèle global mis en œuvre dans l'approche 1, le Tableau 23 présente ci-dessous les critères de performance des 2 modèles vers la semi-distribution sans correction d'ETP. Le premier utilise un jeu de 3 paramètres libres, les 3 temps de base des hydrogrammes unitaires de GR4J (paramètre X_4 , Cf. Chapitre 2.2.2 p14) pour Cochem, Obernau et Worms. Le second modèle du tableau utilise un quatrième paramètre libre, le coefficient correcteur C (Cf. Chapitre 6.3 p51) pour simuler les apports latéraux entrant.

Critère	Observation	GR4J+ETP 134 sous-bv (validation)	Distorsion X4 3 param. (validation)	Distorsion X4 4 param. (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	85.3	72.6	84.8
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	80.7	70.6	82.1
RMSE (m ³ /s)	- na -	48	660	492
Erreur Moy. (m ³ /s)	- na -	22.9	394.1	-7.7
Frac erreur < 10% (%)	- na -	39.7	33.8	36.6
MNQ (m ³ /s)	1036	1034 (==)	1086 (+5 %)	1311 (+27 %)
MHQ (m ³ /s)	6952	6853 (-1 %)	5608 (-19 %)	6701 (-4 %)

Tableau 23: Vers la semi-distribution, station de Lobith (ni module neige ni correction d'ETP)

Un fait important dans ce premier pas vers la semi-distribution est le bénéfice réalisé suite à l'ajout d'un seul paramètre, le coefficient correcteur C. En effet, le modèle de distorsion des temps de délai à 4 paramètres libres et sans prise en compte de l'influence nivale montre de bonnes performances, contrairement à celui à 3 paramètres libres. Étonnamment, le critère de Nash-Sutcliffe est équivalent à celui du modèle global de l'approche 1 avec correction d'ETP (84.8% contre 85.3%). Pour la simulation des classes de faibles débits (calage sur logQ), ce critère atteint une valeur de 82.1%, contre 80.7% pour le modèle global. Toutefois, on note une grande perte de précision sur le débit maximum annuel moyen (MNQ), avec un écart de +27% par rapport aux mesures.

Le coefficient correcteur C est donc indispensable dans la mise en œuvre des modèles de cette troisième approche. Les valeurs atteintes par les paramètres des deux précédents modèles sont indiquées dans les Tableaux 24 et 25 ci-après.



Paramètre	P ₁ *	P ₂	P _{total}
X1 (temps de délai à Cochem, jours)	6.5	6.1	6.3
X2 (temps de délai à Obernau, jours)	5.0	5.5	5.1
X3 (temps de délai à Worms, jours)	6.5	6.9	6.7

Tableau 24: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms et 3 paramètres libres (ni module neige ni correction d’ETP)

Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (temps de délai à Cochem, jours)	6.2	5.8	6.1
X2 (temps de délai à Obernau, jours)	5.0	6.2	5.2
X3 (temps de délai à Worms, jours)	7.1	7.2	7.2
X4 (coefficient correcteur C)	1.2	1.2	1.2

Tableau 25: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms et 4 paramètres libres (ni module neige ni correction d’ETP)

Entre les 2 modèles ci-dessus, les temps de délai atteignent des valeurs homogènes sur les sous-périodes P₁ et P₂, et des valeurs similaires sur la période totale 1980-1995. Les écarts globaux entre les temps de délai des 3 stations sont liés à la taille des sous-bassins du Rhin à Worms (69 104 km²), de la Moselle à Cochem (28 227 km²) et du Main à Obernau (24 831 km²).

Le coefficient correcteur C du second modèle **augmente de près de 20% les débits** simulés à Lobith par le premier modèle. L'agrégation des débits à Worms, Obernau et Cochem par distorsion des temps de délai nécessite donc un dernier ajustement pour fournir une bonne précision dans la simulation des débits à Lobith. L'annexe 11.4 p106-117 montrent que le coefficient correcteur atteint systématiquement la même valeur pour une même semi-distribution.

Les résultats des modèles vers la semi-distribution à 4 paramètres et avec différentes corrections d'ETP sont présentés dans le Tableau 27: **Vers la semi-distribution, station de Lobith (correction d’ETP)** en page suivante. Cette approche utilise les 3 modèles globaux 1980-1995 à Worms, Obernau et Cochem, ainsi que leurs paramètres de correction d’ETP. Quant à la suite de l'examen du rendement du module ETP, il est intéressant de résumer les changements des résultats des modèles globaux aux 3 stations par ajout de la correction d'ETP :

Approche 1 (mode global)	Critère	Worms	Obernau	Cochem
GR4J initial	Nash-Sutcliffe Q (%)	68.6	78.2	87.4
GR4J + correction ETP	Nash-Sutcliffe Q (%)	82.8	76.9	88.6

Tableau 26: rendement de la correction ETP sur les modèles globaux à Worms, Obernau et Cochem

* P₁ = 1980-1987, P₂ = 1988-1995, P_{tot} = 1980-1995, Cf. Chapitre 6.4 p53.



Le module ETP est particulièrement efficace pour le modèle global à Worms, et dégrade légèrement les résultats à Obernau. Nous avons choisi de l'utiliser de la façon décrite ci-dessous dans notre approche vers la semi-distribution, où les deux paramètres ajoutés sont récupérés dans l'approche 1 (Cf. Chapitre 6.3 p51) :

- **3 modèles globaux avec correction d'ETP** à Worms, Obernau et Cochem.
- **2 modèles globaux avec correction d'ETP** à Worms et Cochem, plus 1 modèle global initial à Obernau.
- **1 modèle global avec correction d'ETP** à Worms, plus 2 modèles globaux initiaux à Cochem et Obernau.

Critère	Observation	GR4J+ETP 134 sous-bv (validation)	Distorsion X4 4 param. 3 mod. ETP (validation)	Distorsion X4 4 param. 2 mod. ETP (validation)	Distorsion X4 4 param. 1 mod. ETP (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	85.3	85.6	85.8	85.7
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	80.7	84.2	84.5	84.4
RMSE (m ³ /s)	- na -	483.9	479	474	476
Erreur Moy. (m ³ /s)	- na -	22.9	-13.0	-16.2	-6.0
Frac erreur < 10% (%)	- na -	39.7	40.5	40.7	40.7
MNQ (m ³ /s)	1036	1034 (=)	1171 (+13 %)	1172 (+13 %)	1157 (+12 %)
MHQ (m ³ /s)	6952	6853 (-1 %)	6776 (-3 %)	6762 (-3%)	6740 (-3 %)

Tableau 27: Vers la semi-distribution, station de Lobith (correction d'ETP)

Il apparaît que la correction d'ETP n'est pas d'un grand intérêt pour la semi-distribution, puisqu'elle n'améliore au maximum que de 1% les résultats précédents (85.8% contre 84.8% pour le modèle de distorsion des X4 à 4 paramètres et sans correction ETP). Les résultats restent équivalents au modèle global à Lobith avec correction d'ETP, sauf sur les classes de faibles débits où les critères de Nash-Sutcliffe sont améliorés de +3.5 à +4%.

L'application d'une correction ETP par modèle global amont est inutile. L'ajout d'un seul module ETP à Worms parmi les 3 modèles globaux initiaux est suffisant pour améliorer les performances. Cela peut représenter un certain gain en rapidité lors de la mise en œuvre des modèles amont.

6.5 Résultat pour les crues

La Figure 20 retrace les 8 crues sur le bassin à Lobith mentionnées dans le rapport HBV, pour la période simulée de 1980-1995 en validation avec le modèle GR4J utilisant le 4^{ème} paramètre (coefficient correcteur C, ni module neige ni correction d'ETP). Les hydrogrammes de crues sur le bassin à Lobith simulés avec les versions de GR4J combinées aux modules ETP sont présentés dans l'annexe 11.4 p106-117.

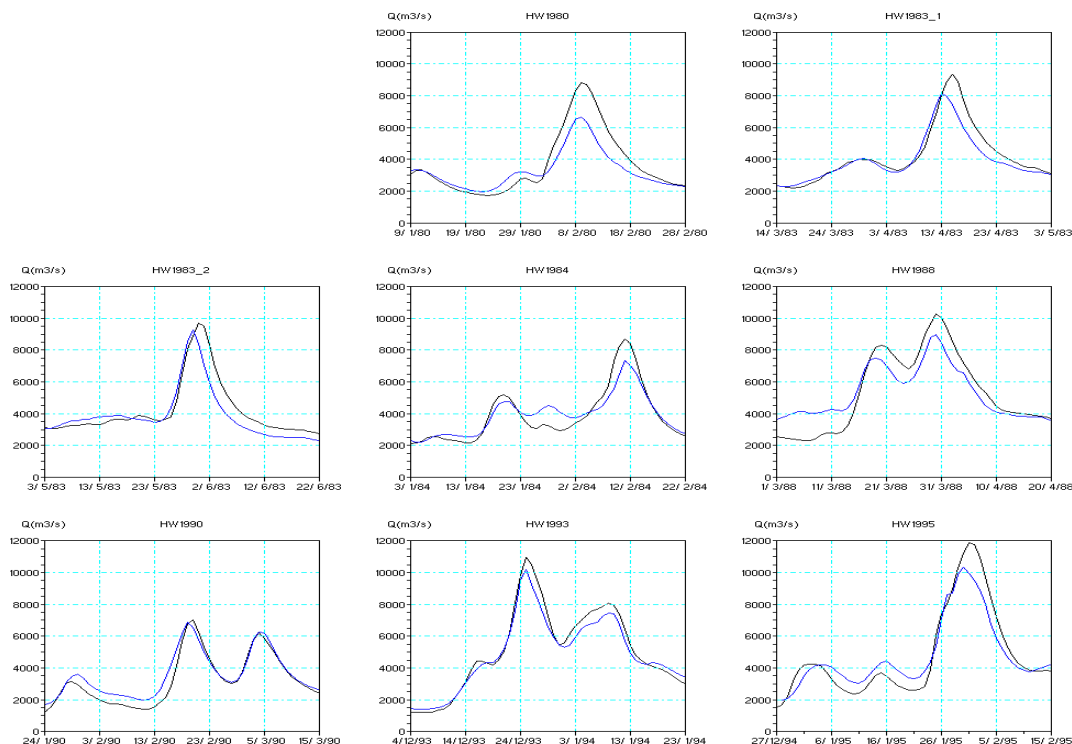


Figure 20: Crues observées et simulées à la station de Lobith (vers la semi-distribution avec coefficient correcteur C, ni module neige ni correction ETP)

Le Tableau 28 propose des critères de qualité utilisés dans le rapport HBV pour les 8 crues simulées sur le bassin à Lobith, par la version initiale de GR4J avec ou sans coefficient correcteur C. Les statistiques sur les crues simulées par les modèles de l'approche 3 combinés à la correction ETP sont présentés dans l'annexe 11.4 p106-117.

Evènement	Sans coeff. C			Avec coeff. C		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-	-	-	-
HW1980	3054	24.4	1367	2169	10.5	955
HW1983_1	2313	20.6	1133	1172	6.1	645
HW1983_2	1783	21.7	1209	439	7.3	777
HW1984	2347	14.9	958	1341	-0.6	662
HW1988	2920	19.1	1636	1314	0.8	1059
HW1990	1171	10.7	642	160	-9.5	500
HW1993	2604	22.0	1386	766	4.4	501
HW1995	3502	19.2	1466	1529	0.9	867



Tableau 28: Résultats pour les crues à la station de Lobith (vers la semi-distribution, version initiale de GR4J avec puis sans coefficient correcteur C)

On constate encore la nécessité d'utiliser un coefficient correcteur C pour obtenir de bonnes performances dans la simulation des crues du Rhin. En effet, les écarts entre les pics observés et simulés, les différences accumulées et les "RMSE" sont nettement diminués par ajout de ce 4^{ème} paramètre libre.

Il est intéressant de remarquer que les crues simulées HW1990 et HW1993 sont particulièrement proches des observations. Toutefois, les deux versions du modèle sous-estiment systématiquement les débits de pointe des 8 évènements.

6.6 Commentaires sur les résultats

Cette approche vers la semi-distribution par distorsion des temps de délai fournit des premiers résultats satisfaisants sans utilisation d'un module de correction de l'évapotranspiration. **Un coefficient de correction C est obligatoire** pour simuler les apports latéraux entrant depuis les 3 stations (Worms, Obernau, Cochem) jusqu'à Lobith. Après une **augmentation de près de 20%** des 3 débits agrégés, il a permis au modèle d'atteindre un critère de Nash-Sutcliffe de 84.8%, pratiquement équivalent à celui du modèle global à Lobith avec correction d'ETP (85.3%).

Les temps de délai sont acceptables au vu de la taille des sous-bassins amont, autour de 6 jours à Cochem, entre 5 et 6 jours à Obernau et de 6 à 7 jours à Worms.

Les modèles globaux avec correction d'ETP mis en oeuvre aux 3 stations ont ouvert différentes voies d'utilisation de ce module pour la semi-distribution. En effet, il s'est avéré que 2 modèles amont de GR4J initial (Cochem, Obernau) plus **1 seul modèle amont de GR4J combiné à la correction d'ETP** (Worms) suffisait pour améliorer les résultats initiaux. Toutefois cette amélioration est faible (85.7% contre 84.8% sans correction ETP) et la correction d'ETP présente finalement peu d'intérêt pour la semi-distribution, excepté pour les classes de faibles débits (calage sur logQ).

Des tests supplémentaires ont été effectués pour essayer d'améliorer les critères de Nash-Sutcliffe calculés dans cette approche n°3. Les résultats sont détaillés dans les annexes 11.4.4 à 11.4.6 p112-117, et les essais sont décrits ci-dessous :

1. Semi-distribution à 4 paramètres libres, avec la combinaison des 3 meilleurs modules ETP pour chaque sous-bassin amont (Cf. Chapitre 5.6 p49).

Conclusion: le critère de Nash-Sutcliffe est inchangé (85.8%), malgré la complexification des 3 modèles globaux amont.

2. Semi-distribution à 3 paramètres libres (X_4^{Worms} , X_4^{Cochem} , coeff. C) avec 2 sous-bassins (Worms et Cochem) et une correction ETP par sous-bassin amont.

Conclusion: la dégradation du critère de Nash-Sutcliffe est limitée (83.8%). Toutefois, le sous-bassin du Main à Obernau est nécessaire à la semi-distribution.

3. Autre semi-distribution à 4 paramètres libres (X_4^{Maxau} , $X_4^{Rockenau}$, X_4^{Cochem} , coeff. C), avec 3 sous-bassins (Maxau, Rockenau, Cochem) et une correction ETP par sous-bassin amont.

Conclusion: ce modèle est moins bon que précédemment, avec un critère de Nash-Sutcliffe de 81.6%.



7 Approche n°4 de modélisation : couplage de modèles globaux avec un modèle de propagation

7.1 Hypothèse

L'approche précédente a permis de mettre en œuvre des modèles se rapprochant de la semi-distribution. Le débit était simulé à Lobith par des modèles effectuant différentes agrégations de 3 modèles globaux amont, aux stations de jaugeage de Worms, Obernau et Cochem. Étonnamment, les performances atteintes n'ont été que légèrement améliorées par rapport à celles du meilleur modèle de l'approche 1.

Cette approche n°4 propose de coupler les 3 modèles globaux amont utilisés dans l'approche n°3 avec un modèle de propagation. En effet, la subdivision du bassin du Rhin définie dans le chapitre précédent a montré qu'elle était valable pour la simulation des débits à Lobith, à une condition : les apports du bassin intermédiaire entre les 3 stations et Lobith doivent être pris en compte dans le modèle par un paramètre de correction. En se basant sur ces mêmes sous-unités et en utilisant ce même coefficient correcteur, les modèles de couplage avec un modèle de propagation seront supposés raffiner les performances du meilleur modèle à Lobith.

7.2 Description du modèle

Nous proposons de coupler GR4J avec un modèle de propagation simple respectant une méthodologie classique pour la modélisation hydrologique semi-distribuée :

1. 3 modèles globaux GR4J sont calés sur les stations de jaugeage de Worms, Obernau et Cochem suivant l'approche n°1 décrite dans le Chapitre 4 (Cf. p33).
2. un modèle de propagation, utilisant en entrée la **somme des 3 séries de débits mesurés** à Worms, Obernau et Cochem, est calé sur les débits à Lobith. La version initiale a 7 paramètres libres : 3 "lags", 3 capacités du réservoir de routage et un coefficient correcteur C utilisé pour simuler les flux latéraux entrant entre les 3 stations et Lobith.
3. le couplage des modèles globaux et du modèle de propagation se fait au niveau de l'étape de validation. Dans celle-ci, les paramètres de chaque modèle global amont sont récupérés (Cf. approche 1) et combinés avec ceux du modèle de propagation précédemment calés. Après une dernière correction effectuée par le 7^{ème} paramètre calé, la somme des 3 sorties en m³/s constitue la série de débits simulés à Lobith.

Schématiquement, les modèles utilisés lors des étapes de calage et de validation sont respectivement les suivants :

$$\bullet \quad Q_{Lobith} = C \times \sum_{i=1}^3 \left[\frac{S_{sta(i)}}{S_{Lobith}} \times PROPAG \left(Q_{sta(i)}^{obs}, \left\{ \begin{array}{l} X_{1P}^{sta(i)} \\ X_{2P}^{sta(i)} \end{array} \right\} \right) \right]$$



$$\bullet \quad Q_{Lobith} = C \times \sum_{i=1}^3 \frac{S_{sta(i)}}{S_{Lobith}} \times PROPAG \left(GR4J \left(P_{sta(i)}, ETP_{sta(i)}, \begin{Bmatrix} X_1^{sta(i)} \\ X_2^{sta(i)} \\ X_3^{sta(i)} \\ X_4^{sta(i)} \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} X_{1P}^{sta(i)} \\ X_{2P}^{sta(i)} \end{Bmatrix} \right) \right)$$

où Q est le débit, S la superficie du bassin, P les précipitations, ETP les évapotranspirations potentielles et sta la station considérée (Worms, Obernau, Cochem).

Le modèle de propagation est un simple modèle de décalage temporel (“lag”) suivi d’un réservoir linéaire. Il a 2 paramètres libres dans sa version initiale, le “lag” exprimé en jours et le réservoir de routage exprimé en millimètres. Dans notre cas, 3 modèles “lag & route” sont sommés pour propager les 3 hydrogrammes amont (Worms, Obernau et Cochem). La Figure 21 montre un exemple d’entrées et de sorties d’un modèle “lag & route” :

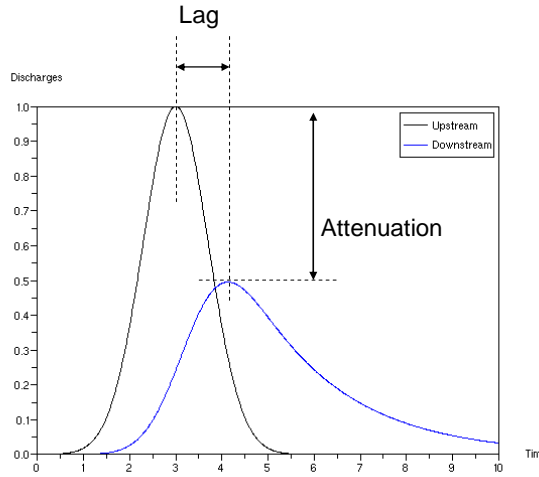


Figure 21: Entrée et sortie d’un modèle “lag & route”



Le diagramme présenté sur la Figure **Erreur ! Source du renvoi introuvable.22** fournit une vue synthétique de la construction du modèle.

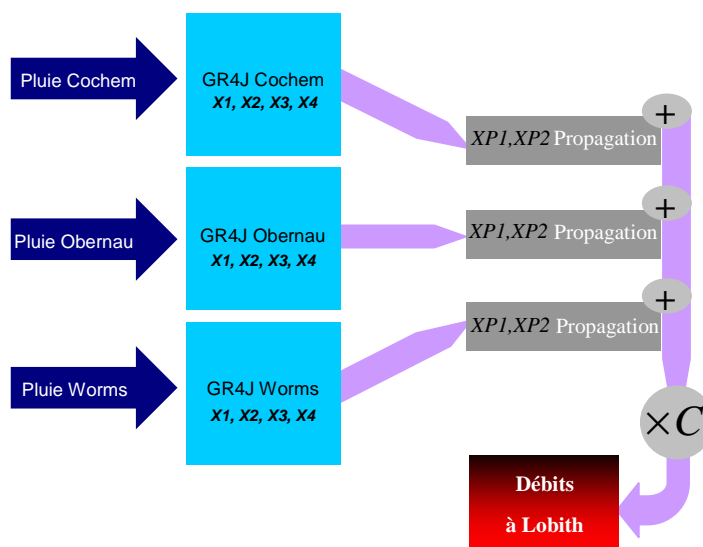


Figure 22: Diagramme du couplage des modèles GR4J avec un modèle de propagation

7.3 Résultat général sur la station de jaugeage de Lobith

La partie précédente précise que le modèle de propagation comporte **7 paramètres libres** dans sa version initiale. Les résultats des modèles à Lobith exploitant cette version de la propagation sont présentés dans le Tableau 29. Nous avons utilisé des combinaisons de GR4J avec 3 puis avec 2 corrections ETP sur les modèles globaux amont, similairement aux modèles de l'approche n°3 (Cf. Chapitre 6.4 p55).

Critère	Observation	GR4J+ETP 134 sous-bv (validation)	GR4J initial + propag. (validation)	GR4J + 3 mod. ETP + propag. (validation)	GR4J + 2 mod. ETP + propag. (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	85.3	85	85.9	86.2
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	80.7	82.4	84.7	85.1
RMSE (m ³ /s)	- na -	484	489	474	469
Erreur Moy. (m ³ /s)	- na -	22.9	-11.8	-14.2	-19.3
Frac erreur < 10% (%)	- na -	39.7	37.4	41.2	41.7
MNQ (m ³ /s)	1036	1034 (==)	1301 (+26 %)	1165 (+12 %)	1166 (+13 %)
MHQ (m ³ /s)	6952	6853 (-1 %)	6658 (-4 %)	6690 (-4 %)	6690 (-4 %)

Tableau 29: Couplage de modèles globaux avec un modèle de propagation à 7 paramètres libres



La version basique de GR4J couplée avec un modèle de propagation à 7 paramètres libres présente des résultats satisfaisants, pratiquement équivalents à ceux du modèle global à 134 sous-bassins (critère de Nash-Sutcliffe de 85% contre 85.3%). Il est intéressant de noter que pour la simulation des classes de faibles débits, les performances dépassent celles du modèle global malgré un MNQ surestimé de +26%.

Un fait déjà observé dans le chapitre précédent (Cf. Chapitre 6.4 p55) apparaît à nouveau à travers ces tests: l'utilisation de 2 corrections d'ETP parmi les modèles globaux amont (Worms, Cochem) est suffisante et préférable pour prendre en compte l'influence nivale dans notre semi-distribution. Ainsi le modèle mis en œuvre a atteint un critère de Nash-Sutcliffe de 86.2%, présentant également de bonnes performances sur les classes de faibles débits. La fraction des débits simulés se trouvant dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour des mesures est supérieure à 40%.

Ces résultats sont satisfaisants, car ils sont meilleurs que ceux de tous les modèles précédents. Il peut être intéressant d'examiner les valeurs des paramètres du modèle de propagation, présentés dans le Tableau 30 ci-dessous et dans l'annexe 11.5.1 p118-120.

Paramètre	P_1^*	P_2	P_{total}
X1 (lag à Cochem, jours)	5.5	4.8	8.2
X2 (réservoir de routage pour Cochem, mm)	4.6	3.3	3.8
X3 (lag à Obernau, jours)	1.2	3.1	1.6
X4 (réservoir de routage pour Obernau, mm)	1.1	3.4	3.1
X5 (lag à Worms, jours)	5.3	5.7	2.4
X6 (réservoir de routage pour Worms, mm)	7.6	9.9	18.3
X7 (coefficient correcteur C)	3.4	3.3	3.3

Tableau 30: Valeurs des 7 paramètres de la propagation, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (2 corrections ETP amont)

Les temps de propagation (paramètres X_1 , X_3 et X_5) sont acceptables, mais ils présentent tout de même des écarts non-négligeables entre les différentes périodes. Les valeurs depuis Obernau sont autour de 1 à 3 jours, ce qui paraît plutôt rapide. Les 3 paramètres de réservoir de routage montrent également cette légère instabilité entre P_1 , P_2 et P_{total} . Cela pourrait mener à remettre en question la robustesse du processus de calage.

Le coefficient correcteur C augmente de près de 230% la somme des modèles de couplage entre Lobith et les stations de Worms, Obernau et Cochem. Une nouvelle fois, cela confirme que les apports du bassin intermédiaire sont essentiels pour la simulation des débits à Lobith en mode semi-distribué. En outre, ce 7^{ème} paramètre de correction présente une stabilité surprenante.

Dans la suite de cette approche, nous avons réduit la complexité des modèles. Le modèle de propagation est utilisé dans une version à **4 paramètres libres** (au lieu de 7): 3 "lags" sont calés, les réservoirs de routage sont fixés à 0, et le coefficient correcteur C est également calé. Les résultats sont indiqués dans le Tableau 31.

* $P_1 = 1980-1987$, $P_2 = 1988-1995$, $P_{tot} = 1980-1995$, Cf. Chapitre 6.4 p53.



Critère	Observation	GR4J+ETP 134 sous-bv (validation)	GR4J initial + propag. (validation)	GR4J + 3 mod. ETP + propag. (validation)	GR4J + 2 mod. ETP + propag. (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	85.3	84.9	85.8	86.1
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	80.7	82.4	84.8	85.2
RMSE (m ³ /s)	- na -	484	489	475	470
Erreur Moy. (m ³ /s)	- na -	22.9	-4.2	-4.8	-9.9
Frac erreur < 10% (%)	- na -	39.7	37.1	41.8	42.4
MNQ (m ³ /s)	1036	1034 (==)	1294 (+25 %)	1157 (+12 %)	1158 (+12 %)
MHQ (m ³ /s)	6952	6853 (-1 %)	6757 (-3 %)	6851 (-1 %)	6852 (-1 %)

Tableau 31: Couplage de modèles globaux avec un modèle de propagation à 4 paramètres libres

Les performances sont très similaires à celles des modèles précédents à 7 paramètres libres. Une correction ETP sur 2 modèles globaux amont (Worms et Cochem) est encore une fois préférable à l'ajout d'une troisième correction ETP à Obernau. Les étapes de calage du modèle sont accélérées par la diminution du nombre de paramètres, ce qui peut représenter un certain intérêt pour l'utilisateur. Ces derniers sont présentés dans le Tableau 32 et dans l'annexe 11.5.2 p121-122.

Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (lag à Cochem, jours)	5.7	4.5	5.3
X2 (lag à Obernau, jours)	1.1	4.6	1.6
X3 (lag à Worms, jours)	15.1	14.7	15.1
X4 (coefficient correcteur C)	3.4	3.3	3.3

Tableau 32: Valeurs des 4 paramètres de la propagation, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (2 corrections ETP amont)

Le processus de calage peut être qualifié de robuste. Les temps de propagation depuis Cochem et Obernau sont semblables aux valeurs du modèle à 7 paramètres, ce qui leur confère une certaine validité. Les valeurs depuis Worms ont été triplées, suite à la suppression du réservoir de routage. Cela montre que la partie alpine du bassin est la plus sensible à l'étape de calage, mais également que ce modèle de couplage réagit bien à l'influence nivale subie par le Rhin.

Enfin, nous avons augmenté la complexité des modèles de couplage. Le modèle de propagation est utilisé dans deux versions, **avec 10 et avec 9 paramètres libres** :

- 3 “lags”, 3 réservoirs de routage, 3 atténuations et 1 coefficient correcteur.
- 3 “lags”, 3 réservoirs de routage et 3 atténuations.



Les résultats sont présentés ci-dessous, dans le Tableau 33 :

Critère	Observation	GR4J+ETP 134 sous-by	GR4J + 2 mod. ETP + propag.	GR4J + 2 mod. ETP + propag.
			10 param	9 param
Nash-Sutcliffe Q (%) <u>calage</u>	- na -	88.8	97.3	97.5
Nash-Sutcliffe Q (%) <u>validation</u>	- na -	85.3	80.3	87.0
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	80.7	74.4	85.3
RMSE (m ³ /s)	- na -	484	559	455
Erreur Moy. (m3/s)	- na -	22.9	-48.0	17.4
Frac erreur < 10% (%)	- na -	39.7	31.8	42.3
MNQ (m ³ /s)	1036	1034 (==)	1272 (+23 %)	1105 (+7 %)
MHQ (m ³ /s)	6952	6853 (-1 %)	7440 (+7 %)	6940 (==)

Tableau 33: Couplage de modèles globaux avec un modèle de propagation à 10 ou 9 paramètres libres

Les paramètres du modèle de propagation à 9 paramètres libres atteignent parfois des valeurs hors de la gamme acceptable (Cf. annexe 11.5.3 p123). Sur la sous-période 1980-1987, les réservoirs de routage à Obernau et à Worms sont surévalués, le lag pour Worms est trop haut et l'atténuation à Obernau est encore trop instable. Il est surprenant que le processus de calage sur la période totale atteigne un critère de Nash-Sutcliffe de 97.3%, avec une valeur de 82.3% sur la sous-période 1980-1987. Les résultats de la phase de contrôle seront donc considérés comme valides.

Le modèle avec 10 paramètres libres a significativement dégradé les résultats précédents, avec un critère de Nash-Sutcliffe de 80.3%. L'utilisation de 3 paramètres d'atténuation au sein des modèles de propagation semble biaiser l'efficacité du coefficient correcteur simulant les apports latéraux. Malgré un paramètre d'atténuation instable dans la propagation à Obernau (Cf. annexe 11.5.3 p123), le Tableau 33 indique que le processus de calage est satisfaisant.

En revanche, l'utilisation seule de 3 atténuations dans un modèle de propagation sans coefficient correcteur semble valable pour simuler les flux latéraux entrant. Le modèle à 9 paramètres libres a en effet atteint un critère de Nash-Sutcliffe de 87% (contre 86.2% pour le modèle à 7 paramètres libres). Plus de 40% des débits simulés sont dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour des mesures, et les précisions sur le MNQ et le MHQ sont bonnes.

7.4 Résultat pour les crues

La Figure 23 retrace les 8 crues sur le bassin à Lobith mentionnées dans le rapport HBV, pour la période simulée de 1980-1995 en validation avec le couplage de modèles à 9 paramètres (2 corrections d'ETP). Les hydrogrammes de crues sur le bassin à Lobith simulés avec les autres versions du modèle sont présentés dans l'annexe 11.5 p118-124.

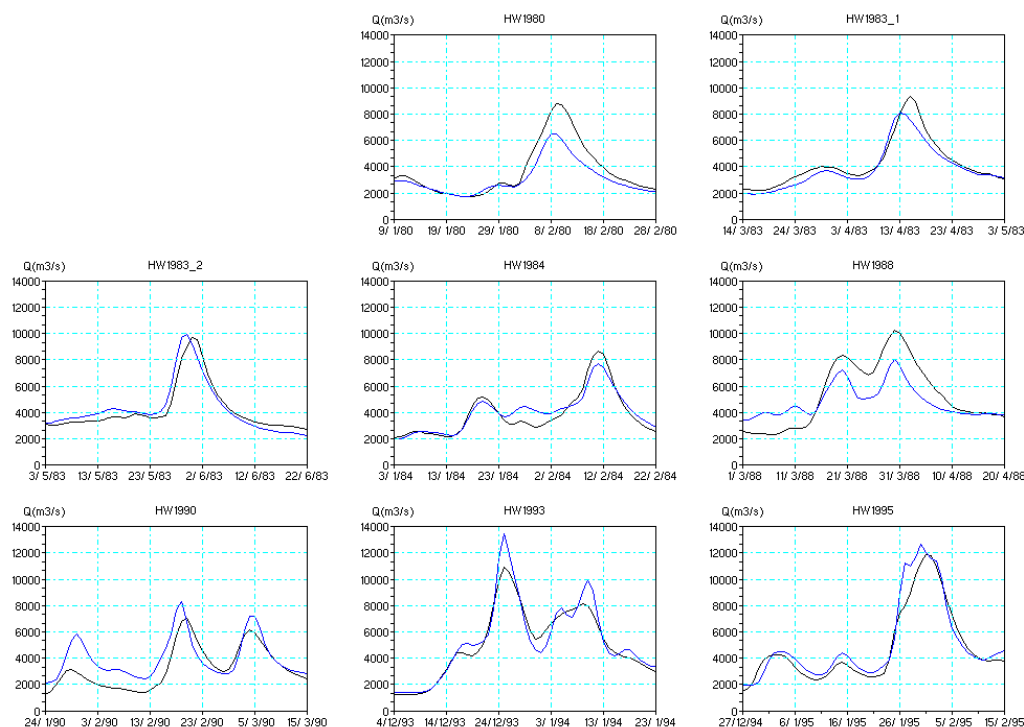


Figure 23: Crues observées et simulées à la station de Lobith (propagation à 9 paramètres, 2 corrections ETP amont)

Le Tableau 34 propose des critères de qualité utilisés dans le rapport HBV pour les 8 crues simulées sur le bassin à Lobith, avec les versions de modèles couplés à 10 ou à 9 paramètres. On rappelle que seul la première des deux utilise le coefficient correcteur C. Les statistiques sur les crues simulées par les autres modèles de l'approche 4 sont présentés dans l'annexe 11.5 p118-124.

Evènement	GR4J + propag. 10 param.			GR4J + propag. 9 param.		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-	-	-	-
HW1980	2316	15.4	953	2329	15.8	965
HW1983_1	1157	7.4	549	1213	7.9	561
HW1983_2	-334	-1.6	629	-235	-1.8	610
HW1984	984	-1.8	560	947	-2.3	555
HW1988	527	-6.1	851	2252	9.7	1499
HW1990	256	-9.7	512	-1240	-22.6	1207
HW1993	119	4.0	436	-2487	-4.2	760
HW1995	472	1.8	644	-741	-6.5	788

Tableau 34: Résultats sur les crues à la station de Lobith (2 corrections ETP amont), propagation à 10 puis à 9 paramètres



Alors que le modèle avec 9 paramètres est bien plus performant que celui à 10 paramètres, aucun des deux n'est significativement meilleur pour la simulation des 8 grandes crues du Rhin entre 1980 et 1995. Les écarts entre les pics observés et simulés, les différences accumulées et les "RMSE" atteignent en moyenne des valeurs comparables avec une propagation à 10 ou à 9 paramètres. On remarque que le modèle avec 9 paramètres présente une mauvaise précision sur les pics des crues HW1980, HW1988 et HW1993, les écarts par rapport aux observations étant de plus de 2000 m³/s.

7.5 Commentaires sur les résultats

Cette approche de couplage de modèles globaux avec un modèle de propagation a fourni des premiers résultats satisfaisants sans utilisation d'un module de correction de l'évapotranspiration. Il a une nouvelle fois été montré que la meilleure utilisation de la correction ETP passait par sa combinaison avec seulement 2 modèles globaux amont, à Worms et à Cochem. L'utilisation d'une 3^{ème} correction d'ETP à Obernau dégrade les résultats.

L'ajout d'un **coefficient de correction C** dépend de la complexité des modèles mis en œuvre. Nous sommes partis d'une propagation avec 7 paramètres libres (3 "lags", 3 réservoirs de routage et C), pour obtenir un critère de Nash-Sutcliffe de 86.2% sur la simulation des débits à Lobith. Une simplification à 4 paramètres libres (3 "lags" et C) augmente la vitesse du processus de calage, et est suffisante pour atteindre des résultats équivalents. Dans ces 2 cas, **le coefficient de correction est obligatoire** pour simuler les apports latéraux entrant depuis les 3 stations (Worms, Obernau, Cochem) jusqu'à Lobith. Ce dernier atteint des valeurs très fortes, augmentant la propagation de la somme des 3 débits agrégés de plus de +200%.

Dans un troisième cas, nous avons complexifié les couplages de modèles, en utilisant une propagation à 10 puis à 9 paramètres libres (3 "lags", 3 réservoirs de routage et 3 atténuations). Il s'est avéré que pendant l'étape de calage, l'interaction entre les 3 paramètres d'atténuation et le coefficient correcteur C diminuait le rendement du modèle de propagation. Au-delà de 9 paramètres, les modèles de cette approche semblent mal réagir au point de significativement diminuer les performances précédentes.

En revanche, le modèle avec 9 paramètres simule correctement les flux latéraux entrant grâce à une atténuation adaptée pour chaque station amont (Worms, Obernau et Cochem) dans le modèle de propagation. Il est le plus performant de tous les modèles mis en œuvre dans les quatre approches, avec un critère de Nash-Sutcliffe de 87%. Cependant, il demeure inférieur au modèle HBV qui présente un critère de 91%, et les valeurs atteintes par certains paramètres suscitent des questions malgré un calage satisfaisant.



8 Conclusion et perspectives

8.1 Conclusion

Les modèles pluie-débit présentés dans ce rapport sont basés sur des concepts peu courants pour un bassin versant d'une telle taille (160 000 km² à la station de jaugeage de Lobith), mais les résultats obtenus montrent que de telles approches globales ne sont pas insignifiantes. Leurs performances sont inférieures aux résultats du modèle semi-distribué de RIZA/BfG (2005), mais la différence est faible pour certaines. Les raffinements vers la semi-distribution n'ont permis que de faiblement améliorer ces performances. L'avantage présenté par nos meilleurs modèles globaux réside dans la bonne qualité des simulations par rapport au coût de mise en œuvre et au temps de calcul amoindris, en particulier à l'étape de calage.

Les simulations des débits journaliers sur le bassin du Rhin à la frontière germano-néerlandaise (station de Lobith) montrent des performances acceptables pour les modèles globaux. Ceux-ci considèrent l'évaporation et les précipitations sur le bassin entier comme la simple moyenne arithmétique de ces données sur l'ensemble des sous-bassins (134 au total). Leur application sur de très grands bassins est possible, et valable pour notre cas d'étude. La version initiale de GR4J avec 4 paramètres libres réagit assez bien à l'influence nivale sur le régime hydrologique du Rhin, surtout dans la partie inférieure du bassin. Les critères de qualité et la précision sur les pics de crue sont significativement améliorés par la combinaison d'un module neige (87% de NashQ contre 81% sans le module), effectuant une modification de l'évapotranspiration potentielle : il simule les apports printaniers causés par la fonte des neiges, en atténuant les valeurs d'ETP en saison chaude et en les décalant vers l'été (2 paramètres libres). Un second module neige (HBV) testé avec GR4J n'a pas amené d'amélioration significative. Ce type d'outil purement dédié à GR4J reste donc encore à développer.

Une approche simplifiée des modèles globaux a montré qu'une simulation de qualité équivalente à ces derniers pouvait être obtenue avec les précipitations moyennées sur une sélection de 5 sous-bassins au minimum (82% de NashQ avec correction ETP). L'élaboration de cette sélection passe par l'identification des affinités entre les données pluviométriques de chaque sous-bassin et les débits à Lobith. Une fois ce tri effectué, les débits du Rhin pourront toujours être simulés de façon acceptable en cas de défaillance sur plusieurs stations pluviométriques. Cela peut représenter un certain avantage en vue d'une exploitation opérationnelle. En outre, les processus du calage se retrouvent encore accélérés par l'utilisation de données moins nombreuses.

La combinaison d'une correction d'ETP aux premiers modèles globaux et aux seconds limités en données pluviométrique a permis de tirer une information importante quant à l'efficacité de ce module. Elle dépend, au-delà d'un certain nombre de sous-bassins utilisés en entrée, de leurs localisations par rapport à la partie alpine du bassin du Rhin. Cette correction n'est pas très influente pour les modèles globaux des affluents du Rhin.

Au passage vers la semi-distribution, l'agrégation des hydrogrammes n'est pas une tâche simple. Notre premier modèle basé sur 3 sous-unités l'a effectué par distorsion des temps de base des différents hydrogrammes. Un coefficient correcteur intervenant après cette agrégation s'est révélé indispensable, pour prendre en compte les flux latéraux entrant du bassin intermédiaire. Les performances du modèle sont satisfaisantes avec un temps de calcul rapide et un critère de Nash de 86%, mais elles n'améliorent que faiblement celles des modèles globaux sur la même période de simulation (NashQ de 85%). Étonnamment, les corrections ETP utilisées en amont n'ont pas été d'un grand intérêt pour la semi-distribution. Dans cette méthode d'agrégation des hydrogrammes, un raffinement efficace des modèles globaux aurait nécessité une base de données plus importante, la notre étant déjà impressionnante. Le problème concerne la validité des données, qui doit être concordante sur



l'ensemble des sous-bassins et des stations de jaugeage, pour permettre une subdivision du bassin en un maximum de sous-unités.

Avec le même découpage, le couplage des modèles globaux amont avec un modèle de propagation a permis d'atteindre un critère de Nash-Sutcliffe de 87%, gagnant deux points de performance par rapport au modèle global à Lobith. Dans cette approche, il est intéressant de remarquer que deux corrections ETP en amont sont avantageuses. Deux versions satisfaisantes de la propagation ont été retenues: trois modèles de simple "lag" combinés à un coefficient correcteur sont suffisants, et une complexification vers 9 paramètres libres sans coefficient correcteur a permis d'atteindre le meilleur critère de Nash-Sutcliffe parmi toutes nos approches. Ce modèle fonctionne en "lag & route" sur les 3 modèles globaux amont, et 3 paramètres supplémentaires d'atténuation agissent directement sur les débits amont pour que la propagation tienne compte des flux latéraux entrant. Cependant, ce modèle se rapprochant le plus des performances du modèle HBV suscite des questions quant au calage et aux valeurs atteintes par certains paramètres.

La mise en œuvre des modèles de raffinement du modèle global est complexe. Les différentes possibilités testées ont montré que l'amélioration des performances reste faible. Il est probable qu'avec une subdivision du bassin du Rhin en un maximum de sous-unités, les résultats soient encore améliorés, mais le coût de mise en œuvre des modèles semi-distribués augmente avec leur nombre de sous-bassins. Les bases de données devront alors être suffisamment complètes, et dans notre contexte ce ne sera qu'à la suite de nombreux essais sur la correction ETP et sur l'interaction entre les paramètres que le meilleur modèle sera bâti pour tenir compte de l'influence nivale sur le régime hydrologique du Rhin.

L'application des modèles globaux sur un grand bassin est donc conseillée pour la simulation de débits, si possible sur plusieurs stations de jaugeage avant de s'orienter vers la semi-distribution. Cela pourra fournir de précieuses informations quant au découpage du bassin et quant à la prise en compte de diverses influences par les éléments du modèle semi-distribué. Des résultats satisfaisants peuvent être attendus en mode global, et leurs issues sont intéressantes pour l'élaboration d'un modèle semi-distribué performant.

8.2 Perspectives

Nos différents modèles hydrologiques ayant convenablement simulés les débits du Rhin, il est maintenant possible d'appliquer cette étude au domaine de la prévision d'évènements sur le fleuve. En l'occurrence, il s'agira des périodes d'étiages.

Les modèles les plus intéressants de ce rapport pourraient également être testés avec des scénarios de changements climatiques déjà établis sur le bassin du Rhin, pour éventuellement observer une tendance récente de variation dans les régimes hydrologiques actuels.

Enfin, les résultats du rapport de RIZA n'ont pas été égalés par nos modèles. Cela suggère le développement et la combinaison de modèles de propagation, en particulier pour la partie néerlandaise du bassin où un modèle hydraulique s'avèrerait utile. Une base de donnée encore plus complète sera nécessaire à la définition d'un maximum de sous-bassins pour la semi-distribution.



9 Références

- Ambroise, B. (1999). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles. *H*G*A* (éd.), Bucarest : 200 p.
- Commission Internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin (CHR/KHR) (1977). "Le bassin du Rhin - Das Rheingebiet." **volume A**: 279 p.
- Cosandey, C. et M. Robinson (2000). Hydrologie continentale. Armand Colin (éd.) : 368 p.
- Edijatno, N. D. De Oliveira Nascimento, et al. (1999). "GR3J: A daily watershed model with three free parameters." Hydrological Sciences Journal **44**(2): 263-277.
- Klemes, V. (1986). "Operational testing of hydrological simulation models." Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques **31**(1): 13-24.
- Madsen, H., G. Wilson, et al. (2002). "Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models." Journal of Hydrology **261**(1-4): 48-59.
- De Marsily, G. (1994). "Quelques réflexions sur l'utilisation des modèles en hydrologie." Revue des Sciences de l'Eau **7**(3): 219-234.
- Middelkoop, H. (1999). "Twice a River. Rhine and Meuse in the Netherlands." RIZA report n°99.003.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970). "River flow forecasting through conceptual models-Pt 1." Journal of Hydrology **10**(3): 282-290.
- NeWater (2004). "Annex I - "Description of Work". New approaches to adaptive water management under uncertainty." Sixth framework programme priority 6.3, Global Change and Ecosystems: 203 p.
- Oudin, L., F. Hervieu, et al. (2005). "Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling." Journal of Hydrology **303**(1-4): 290-306.
- Perrin, C., C. Michel, et al. (2001). "Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments." Journal of Hydrology **242**(3-4): 275-301.
- Perrin, C., C. Michel, et al. (2003). "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation." Journal of Hydrology **279**(1-4): 275-289.
- RIZA (Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment and Federal) and BfG (Institute of Hydrology) (2005). "Hydrological modelling in the river Rhine basin, Part III - Daily HBV model for the Rhine basin." BfG-JAP report n° 2555: 227 p.
- Tops, J. W., P. J. Wemelsfelder, et al. (1959). "Le Rhin en Hollande." La Houille Blanche **2**: 249-269.



10 Table des illustrations

Figure 1 : Principe de fonctionnement des modèles globaux pluie-débit	10	
Figure 2: a) Schéma d'un modèle global	b) Schéma d'un modèle semi-distribué.....	11
Figure 3: Principe de fonctionnement des modèles semi-distribués pluie-débit.....		11
Figure 4: Diagramme du modèle pluie-débit GR4J		15
Figure 5: ETP initiale et transformée		16
Figure 6: Fleuves, stations de jaugeage et sous-bassins HBV		17
Figure 7: Série temporelle d'évapotranspiration potentielle pour le bassin à Lobith		18
Figure 8 (Middelkoop, 1999) : a) Convoi de cargos commerciaux sur les glaces du Rhin	b) Normalisation du Waal aux Pays-Bas (bras du Rhin).....	19
Figure 9: Morphologie du bassin versant du Rhin		21
Figure 10: Débits mensuels moyens (m^3/s) pour les stations sélectionnées.....		22
Figure 11: Précipitations mensuelles moyennes sur les 7 stations.....		26
Figure 12: Crues observées et simulées du modèle HBV		29
Figure 13: Procédure de calage et de validation		30
Figure 14: Fleuves, districts HBV et stations de jaugeage.....		33
Figure 15: Sous-bassins contribuant aux entrées du modèle à Lobith		34
Figure 16: Crues observées et simulées à la station de Lobith (approche globale, correction d'ETP).....		37
Figure 17: Réduction de l'information pluviométrique		40
Figure 18: Critère de Nash-Sutcliffe (validation) pour les modèles globaux à Lobith avec la pluie d'un seul sous-bassin HBV (GR4J, ni module neige ni correction d'ETP).....		43
Figure 19: Distorsion du temps de base de l'hydrogramme unitaire, diagramme schématique		52
Figure 20: Crues observées et simulées à la station de Lobith (vers la semi-distribution avec coefficient correcteur C, ni module neige ni correction ETP)		56
Figure 21: Entrée et sortie d'un modèle "lag & route"		59
Figure 22: Diagramme du couplage des modèles GR4J avec un modèle de propagation		60
Tableau 1: Variables des critères d'ajustement.....		13
Tableau 2: Exemples des caractéristiques de modèles pluie-débit.....		14
Tableau 3: Validité des données de débits		17
Tableau 4: Données synthétiques (1970-1995).....		19
Tableau 5: Récapitulatif des débits caractéristiques (m^3/s).....		23
Tableau 6: Débits de pointe des 10 crues majeures du Rhin (m^3/s), référencées par rapport à Lobith.....		24
Tableau 7: Caractéristiques climatiques régionales		25



Tableau 8: Récapitulatifs des données météorologiques (1961...1995).....	25
Tableau 9: Résultats du modèle HBV/Muskingum (tables 3.1 à 3.6, RIZA, 2005).....	27
Tableau 10: Transformation des paramètres pour l'optimisation	31
Tableau 11: Approche globale, station de Lobith	35
Tableau 12: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (sans module neige).....	35
Tableau 13: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (correction d'ETP)	36
Tableau 14: Résultats pour les crues à la station de Lobith (approche globale, version initiale de GR4J puis correction ETP).....	38
Tableau 15: Approche globale avec la pluie d'un seul sous-bassin, station de Lobith (ni module neige ni correction d'ETP)	42
Tableau 16: Approche globale avec la pluie d'un seul sous-bassin, station de Lobith (correction d'ETP)	44
Tableau 17: Approche globale avec une information pluviométrique réduite, station de Lobith (GR4J, ni module neige ni correction d'ETP)	45
Tableau 18: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de 5 sous-bassins (ni module neige ni correction d'ETP).....	46
Tableau 19: Approche globale avec une information pluviométrique réduite, station de Lobith (GR4J, correction d'ETP).....	46
Tableau 20: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de 5 sous-bassins (correction d'ETP)	47
Tableau 21: Approche globale avec la pluie de 2 districts de sous-bassins, station de Lobith (correction d'ETP)	48
Tableau 22: Approche globale avec une information pluviométrique réduite, station de Lobith	48
Tableau 23: Vers la semi-distribution, station de Lobith (ni module neige ni correction d'ETP).....	53
Tableau 24: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms et 3 paramètres libres (ni module neige ni correction d'ETP).....	54
Tableau 25: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms et 4 paramètres libres (ni module neige ni correction d'ETP).....	54
Tableau 26: rendement de la correction ETP sur les modèles globaux à Worms, Obernau et Cochem	54
Tableau 27: Vers la semi-distribution, station de Lobith (correction d'ETP).....	55
Tableau 28: Résultats pour les crues à la station de Lobith (vers la semi-distribution, version initiale de GR4J avec puis sans coefficient correcteur C).....	57
Tableau 29: Couplage de modèles globaux avec un modèle de propagation à 7 paramètres libres.....	60
Tableau 30: Valeurs des 7 paramètres de la propagation, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (2 corrections ETP amont)	61
Tableau 31: Couplage de modèles globaux avec un modèle de propagation à 4 paramètres libres.....	62



Quelles attentes pour des approches simples en modélisation hydrologique ?

Tableau 32: Valeurs des 4 paramètres de la propagation, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (2 corrections ETP amont)	62
Tableau 33: Couplage de modèles globaux avec un modèle de propagation à 10 ou 9 paramètres libres.....	63
Tableau 34: Résultats sur les crues à la station de Lobith (2 corrections ETP amont), propagation à 10 puis à 9 paramètres.....	64

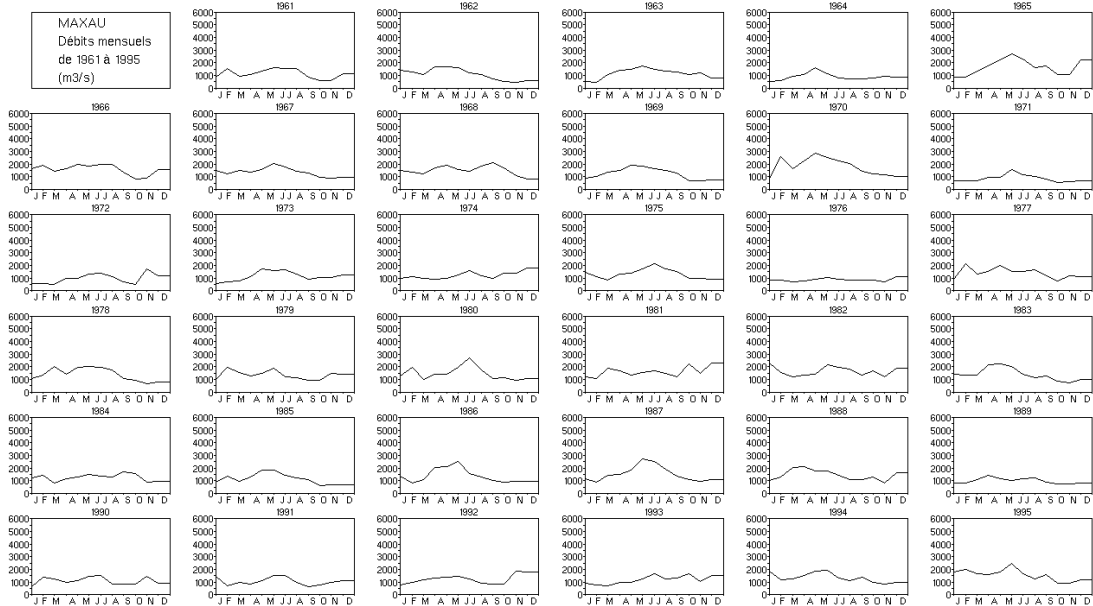


11 Annexes

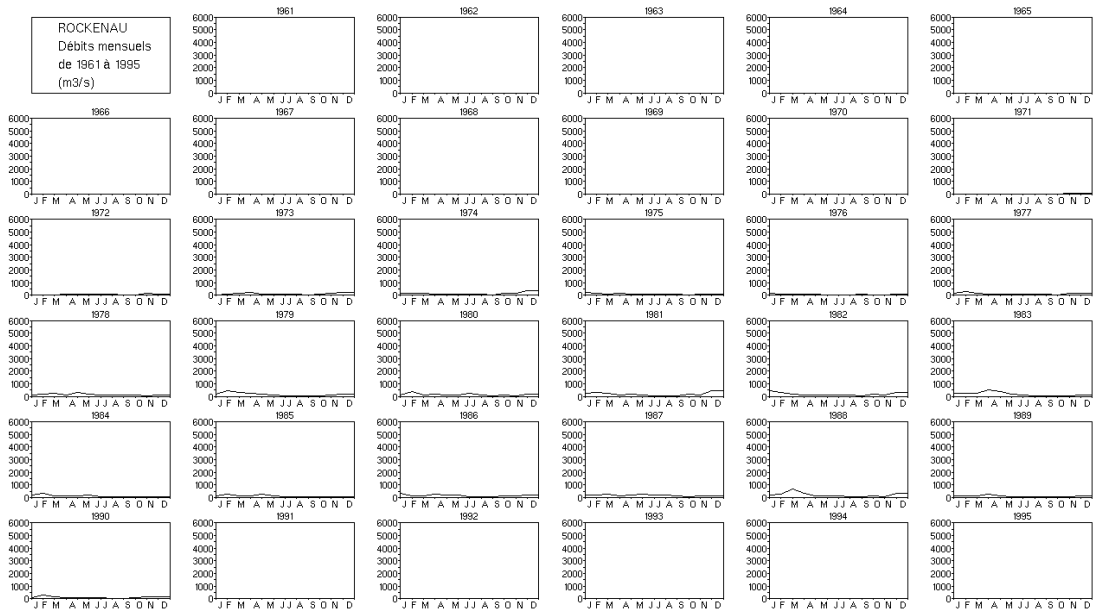
11.1 Annexes 1 : Données hydrologiques et météorologiques

11.1.1 Les débits

Annexe 1: Débits mensuels observés à Maxau

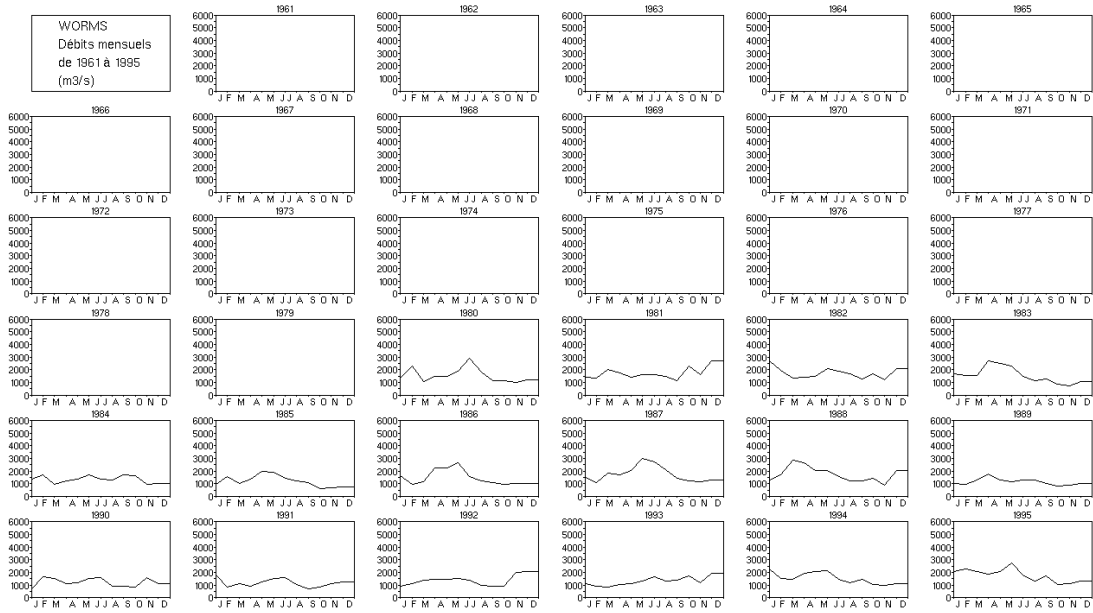


Annexe 2: Débits mensuels observés à Rockenau

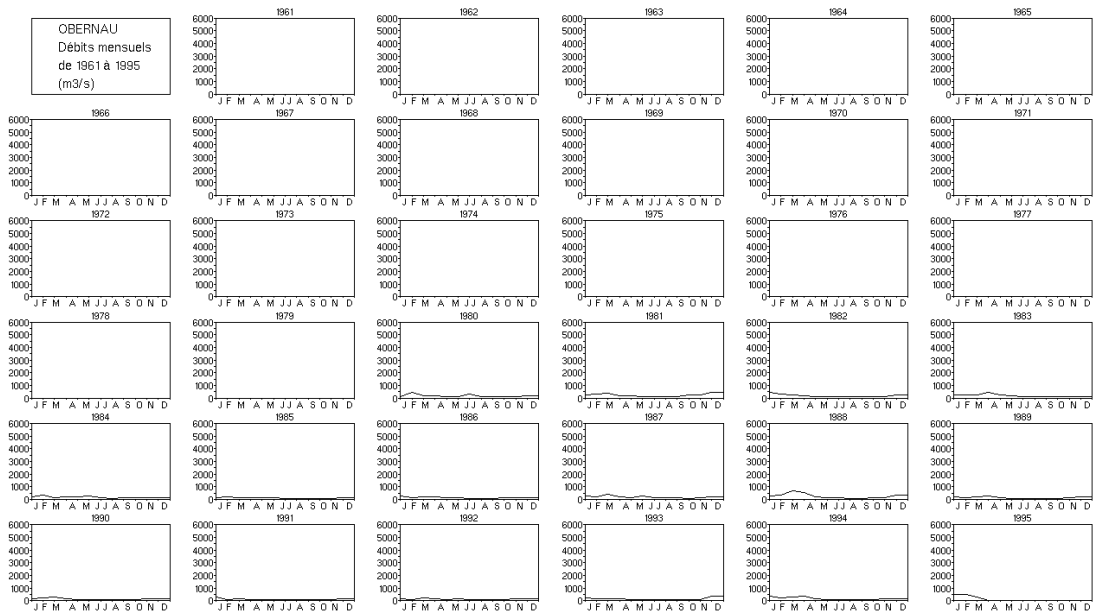




Annexe 3: Débits mensuels observés à Worms

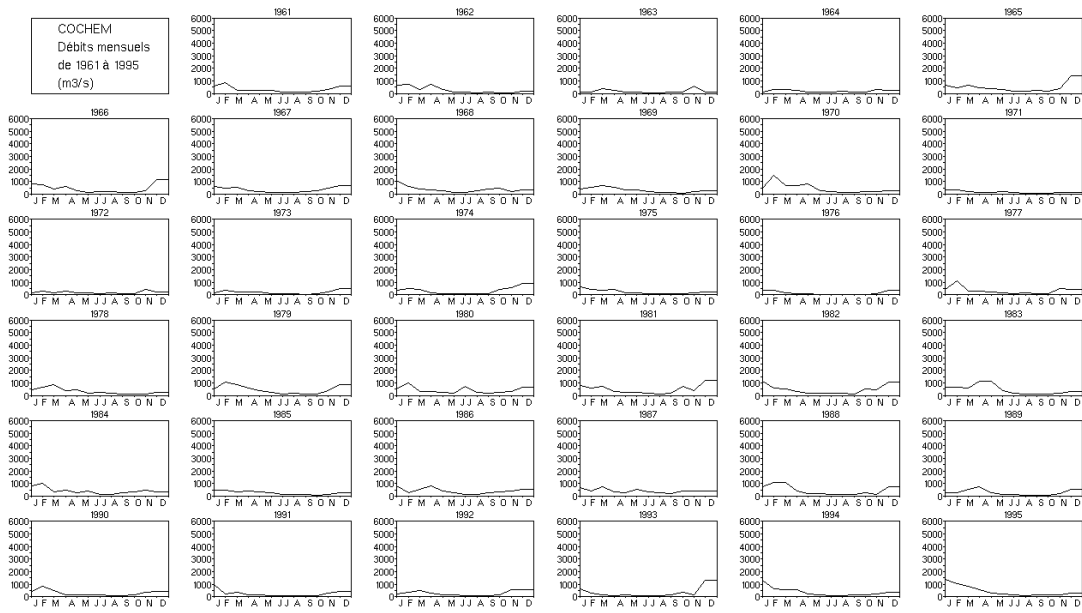


Annexe 4: Débits mensuels observés à Obernai

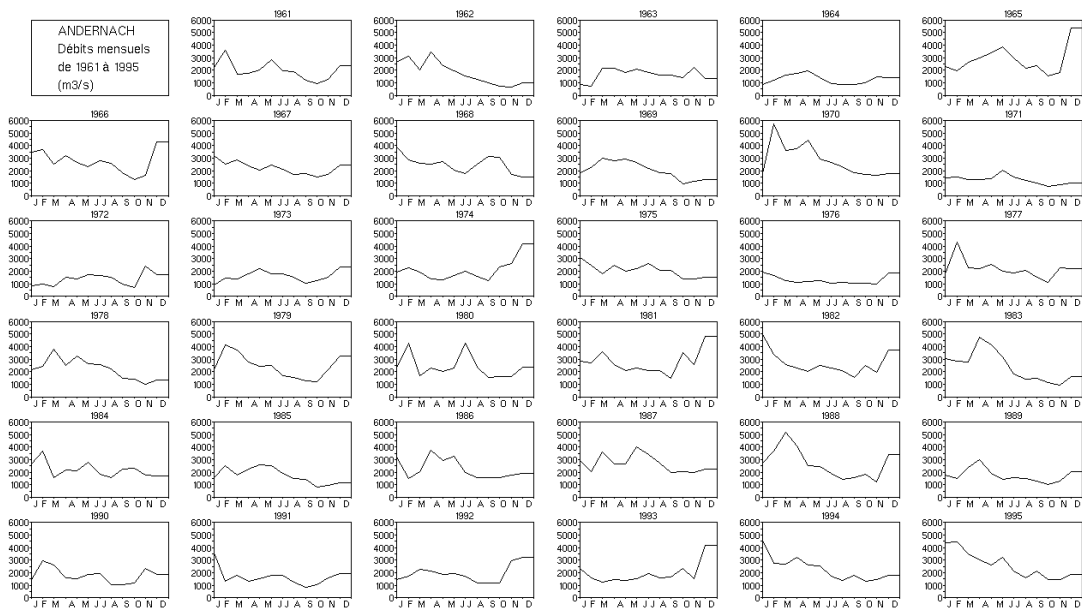




Annexe 5: Débits mensuels observés à Cochem

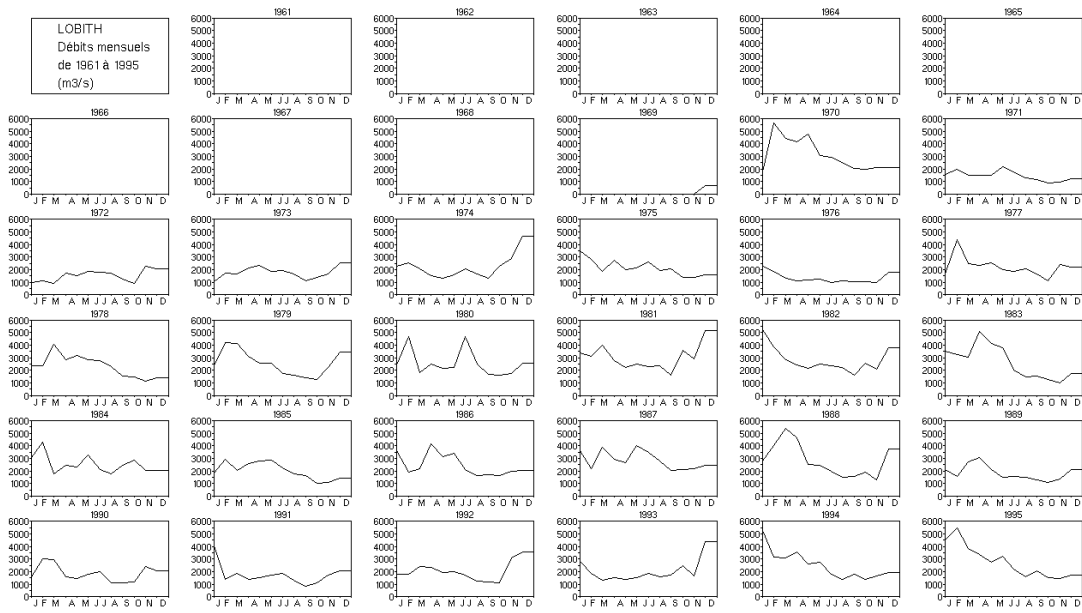


Annexe 6: Débits mensuels observés à Andernach

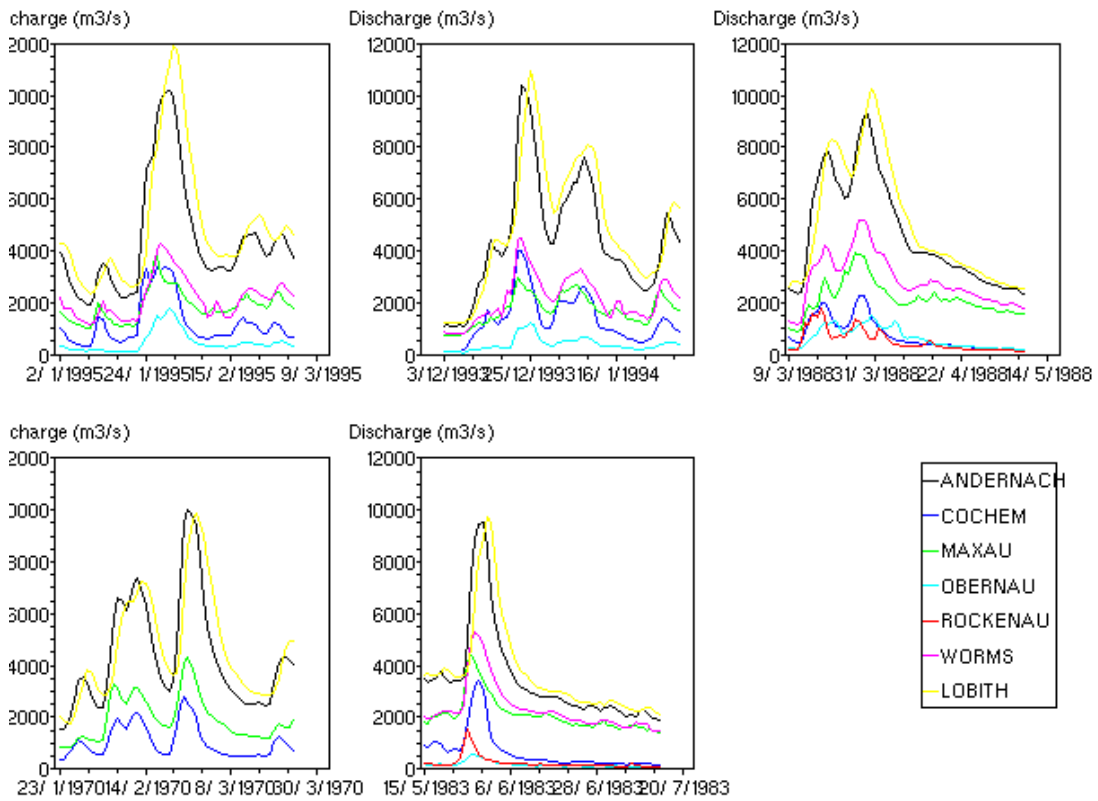




Annexe 7: Débits mensuels observés à Lobith

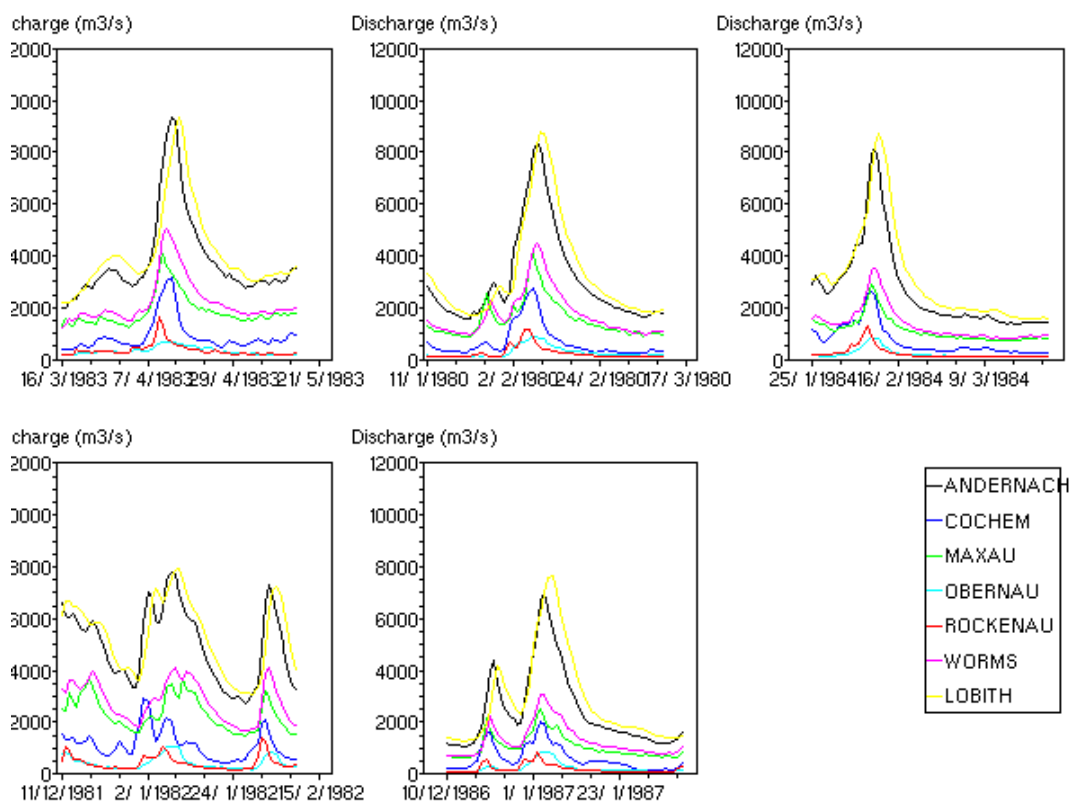


Annexe 8: Crues majeures n°1 à 5, référencées par rapport au débit du Rhin à Lobith





Annexe 9: Crues majeures n°6 à 10, référencées par rapport au débit du Rhin à Lobith



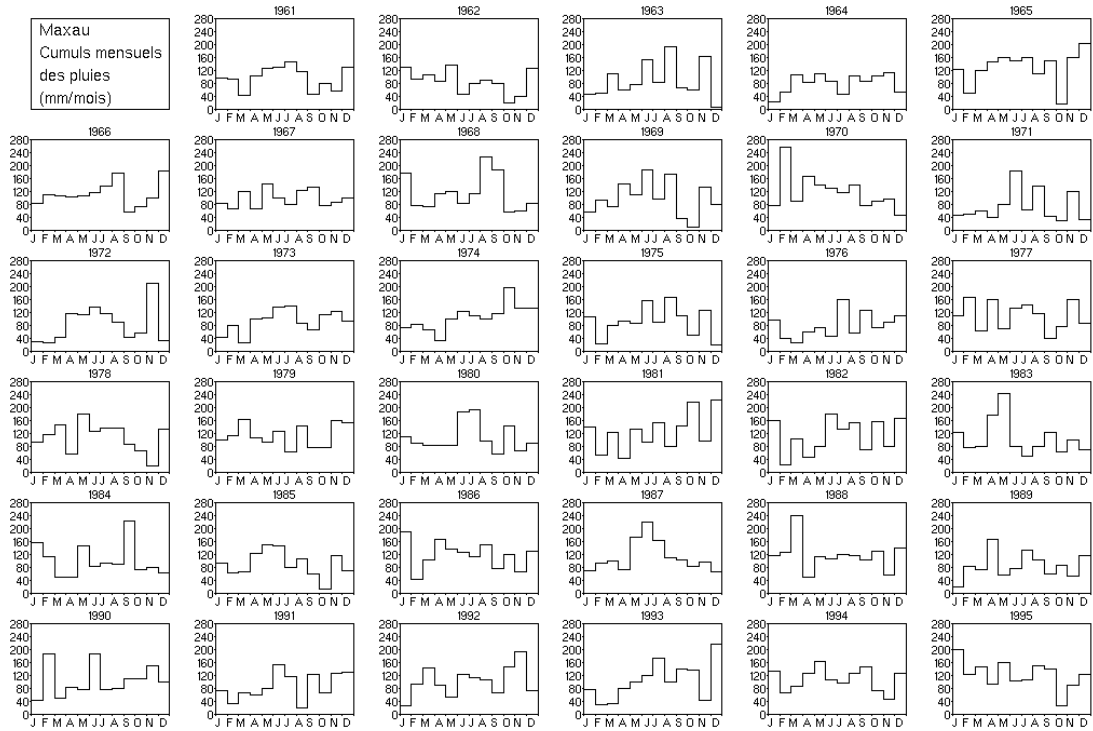
Annexe 10: Débits mensuels moyens observés aux 7 stations de jaugeage

	Maxau	Rockenau	Worms	Obernau	Cochem	Andernach	Lobith
Janvier	1 114	182	1 490	260	597	2 431	2 753
Février	1 221	227	1 462	254	601	2 621	2 965
Mars	1 188	201	1 465	268	484	2 407	2 675
Avril	1 393	181	1 669	235	410	2 472	2 674
Mai	1 582	150	1 684	140	282	2 299	2 336
Juin	1 762	128	1 941	139	204	2 350	2 421
Juillet	1 601	98	1 714	115	153	2 053	2 177
Août	1 350	78	1 327	94	123	1 713	1 755
Septembre	1 160	68	1 212	95	133	1 535	1 557
Octobre	1 019	86	1 198	107	206	1 499	1 620
Novembre	1 010	104	1 131	128	300	1 659	1 833
Décembre	1 167	177	1 435	207	537	2 342	2 472

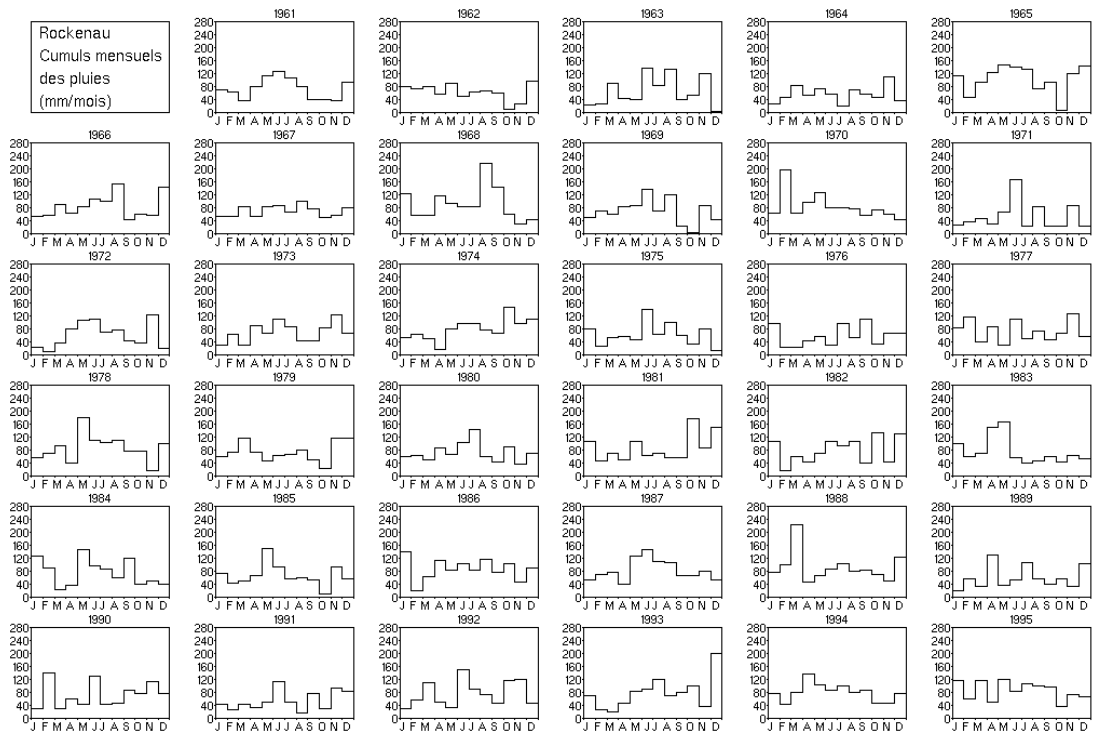


11.1.2 Les précipitations, températures et évapotranspirations potentielles

Annexe 11: Précipitations mensuelles observées à Maxau

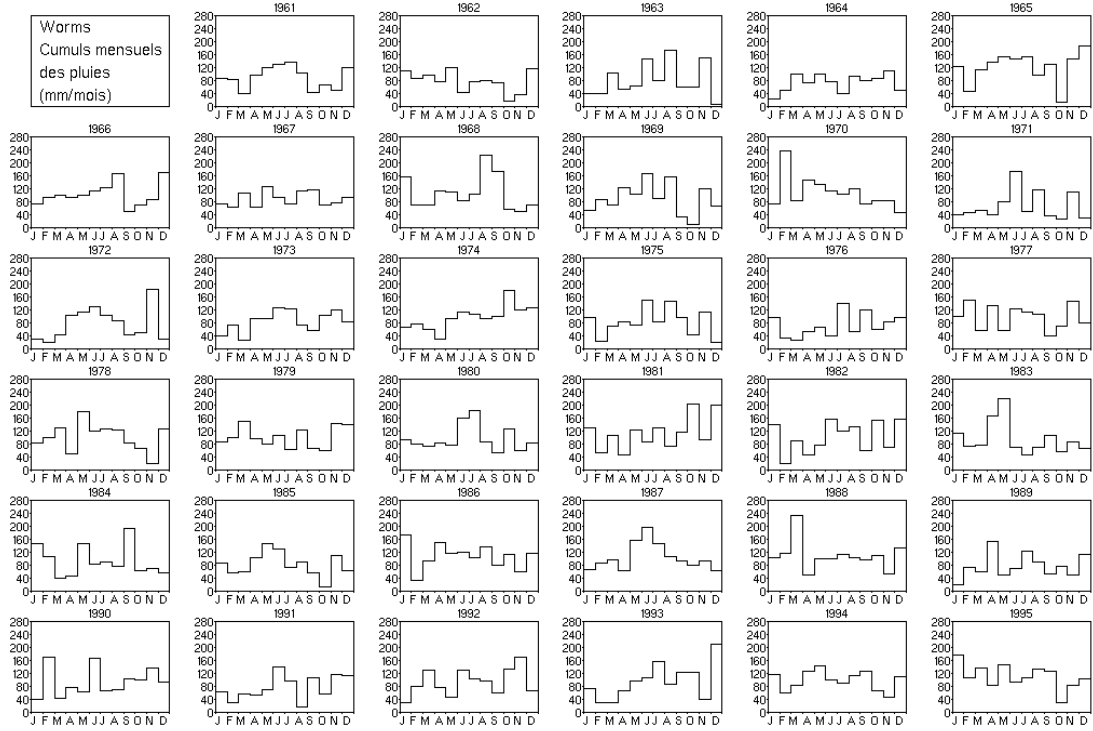


Annexe 12: Précipitations mensuelles observées à Rockenau

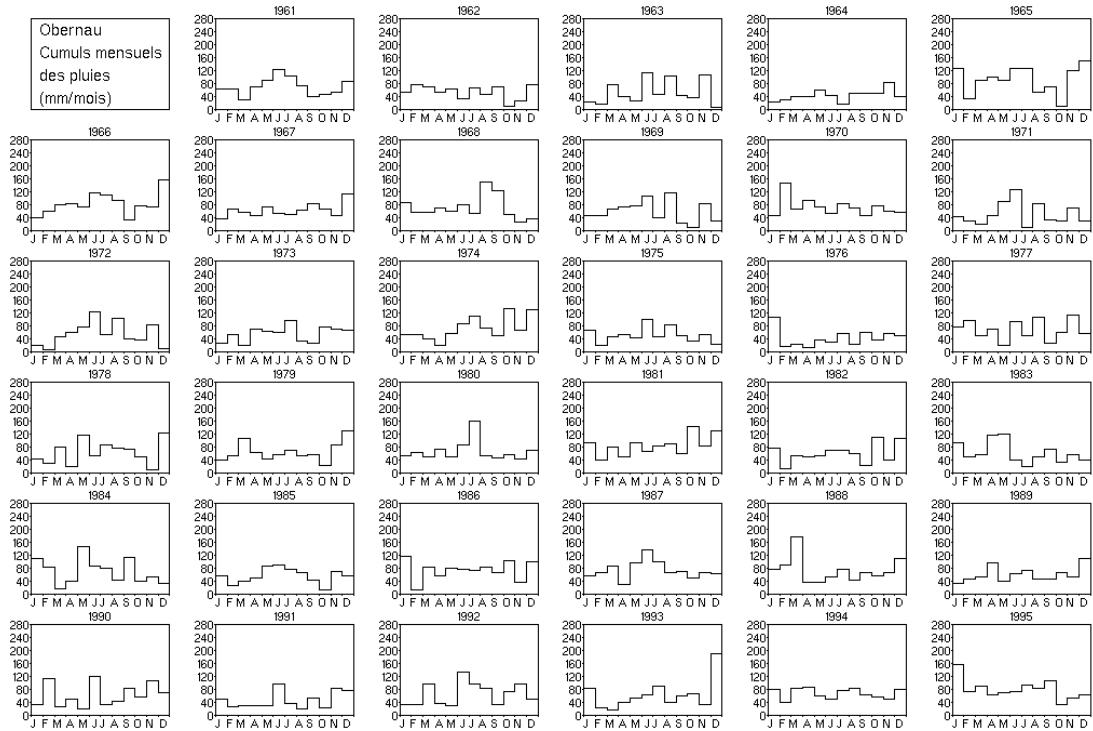




Annexe 13: Précipitations mensuelles observées à Worms

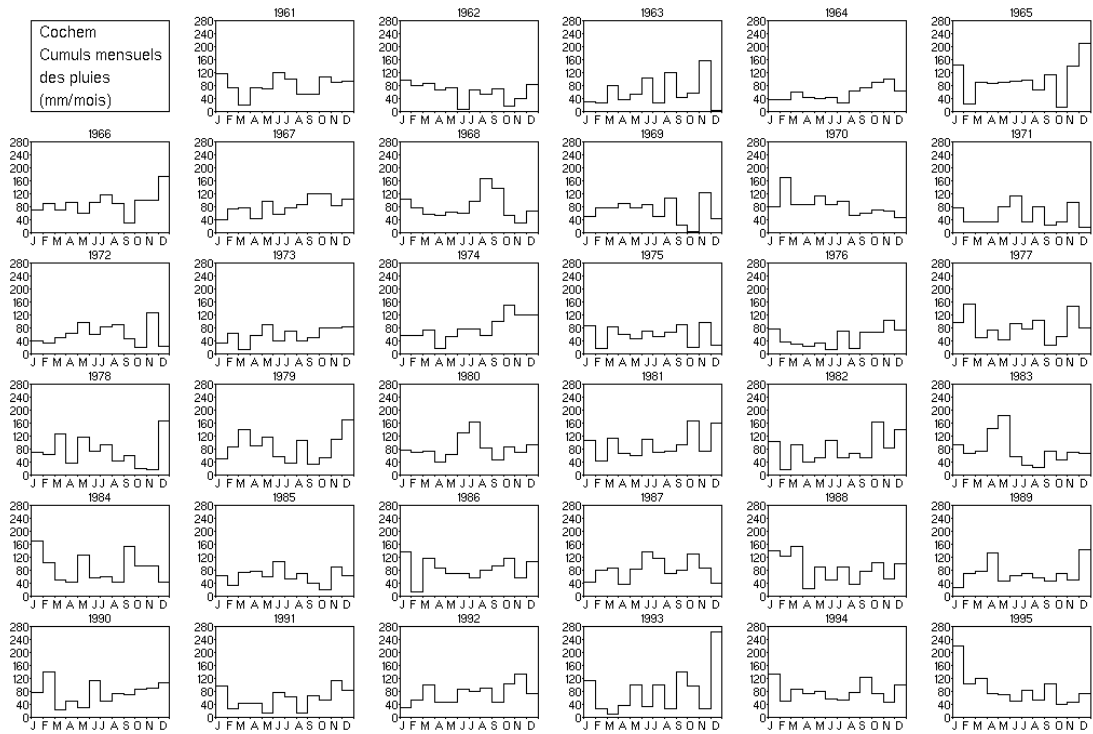


Annexe 14: Précipitations mensuelles observées à Obernai

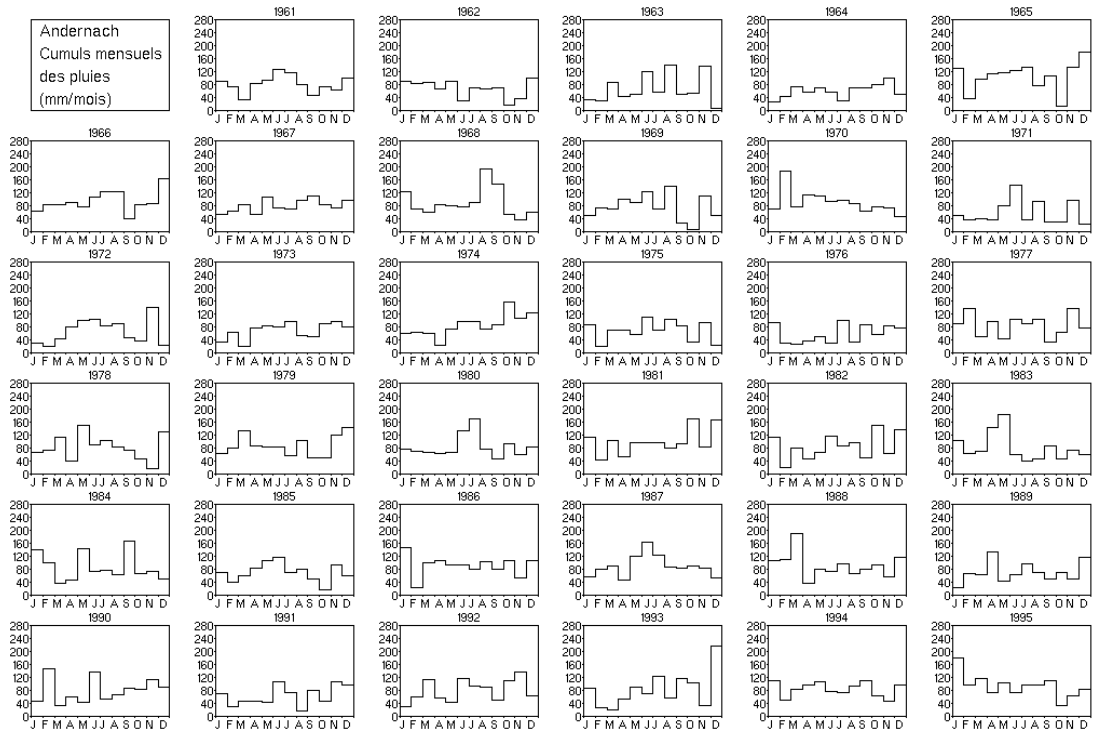




Annexe 15: Précipitations mensuelles observées à Cochem

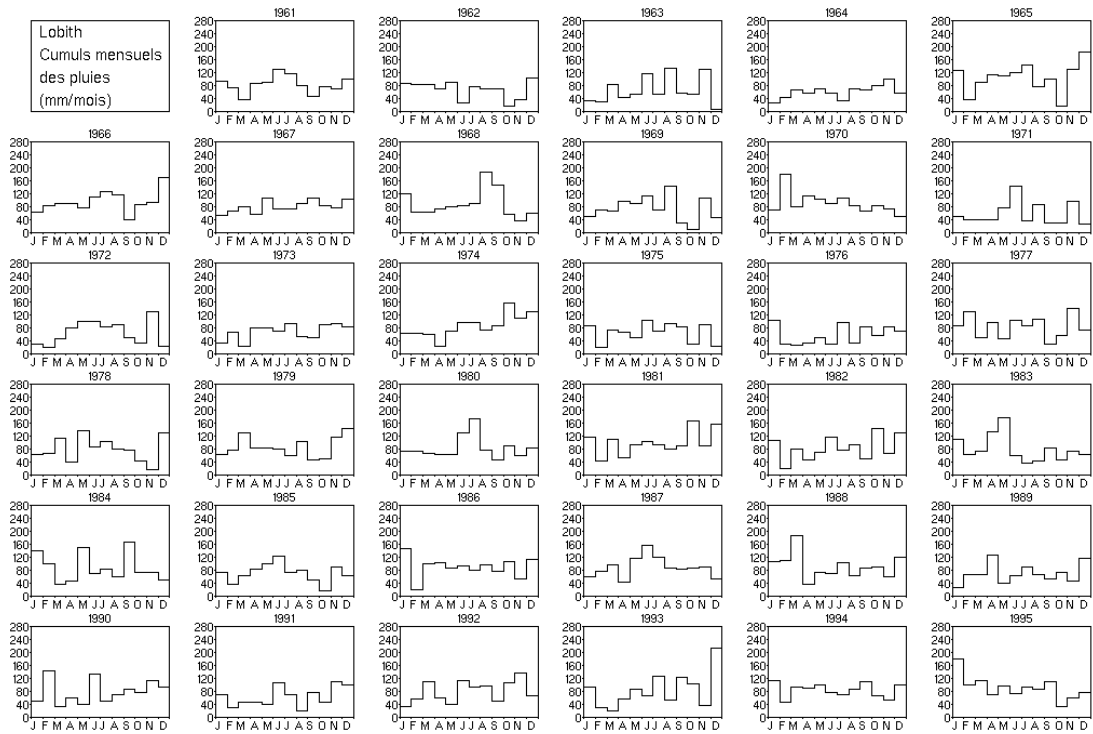


Annexe 16: Précipitations mensuelles observées à Andernach





Annexe 17: Précipitations mensuelles observées à Lobith

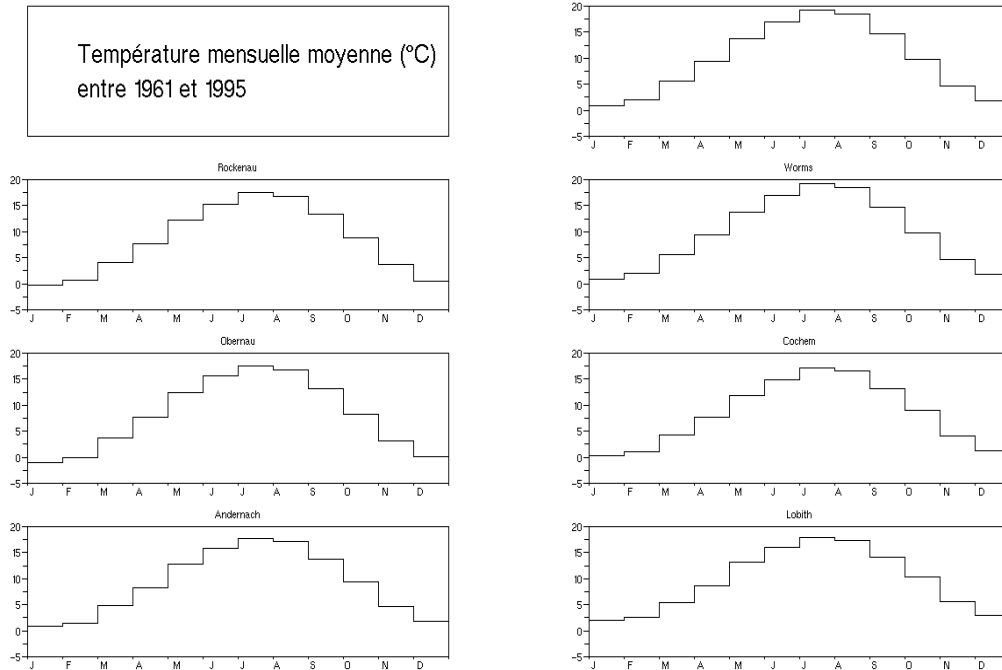


Annexe 18: Précipitations annuelles moyennes sur les 7 stations entre 1961 et 1995

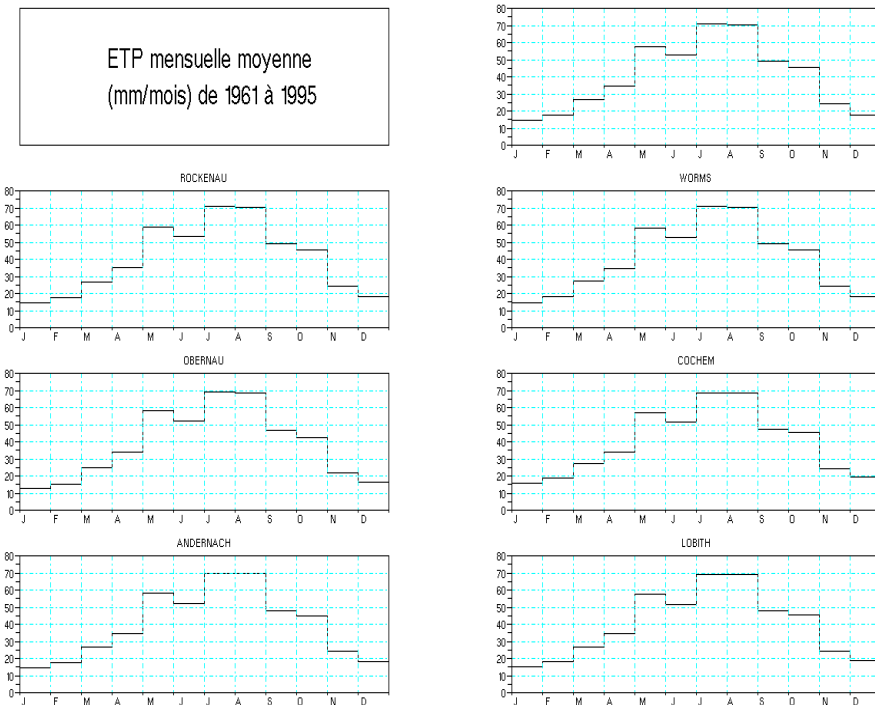
Maxau	Rockenau	Worms	Obernau	Cochem	Andernach	Lobith
885	905	885	870	900	740	960



Annexe 19: Température mensuelle moyenne observée entre 1961 et 1995 aux 7 stations



Annexe 20: Première série d'évapotranspiration potentielle calculée pour chaque station





11.2 Annexes 2 : Résultats de l'approche n°1 (mode global)

11.2.1 Station de Maxau

Tableau 35: Approche globale, station de Maxau

Critère	Observation	GR4J (validation)	GR4J + module neige HBV (validation)	GR4J + correction ETP (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	56.9	63.2	81.1
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	54.3	62.3	82.2
RMSE (m ³ /s)	- na -	351	324	233
Erreur Moyenne (m ³ /s)	- na -	3.8	-3.0	-1.2
Frac Erreur < 10% (%)	- na -	23.4	30.3	47.7
MNQ (m ³ /s)	610	787 (+23 %)	690 (+13 %)	620 (+2 %)
MHQ (m ³ /s)	3360	2793 (-17 %)	3090 (-8 %)	3120 (-7 %)

Tableau 36: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Maxau (ni module neige ni correction ETP)

Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	3722	2928	3328
X2 (échanges, adimensionnel)	0.8	0.3	0.6
X3 (réservoir de routage, mm)	139	167	152
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	3.2	3.0	3.1

Tableau 37: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Maxau (correction ETP)

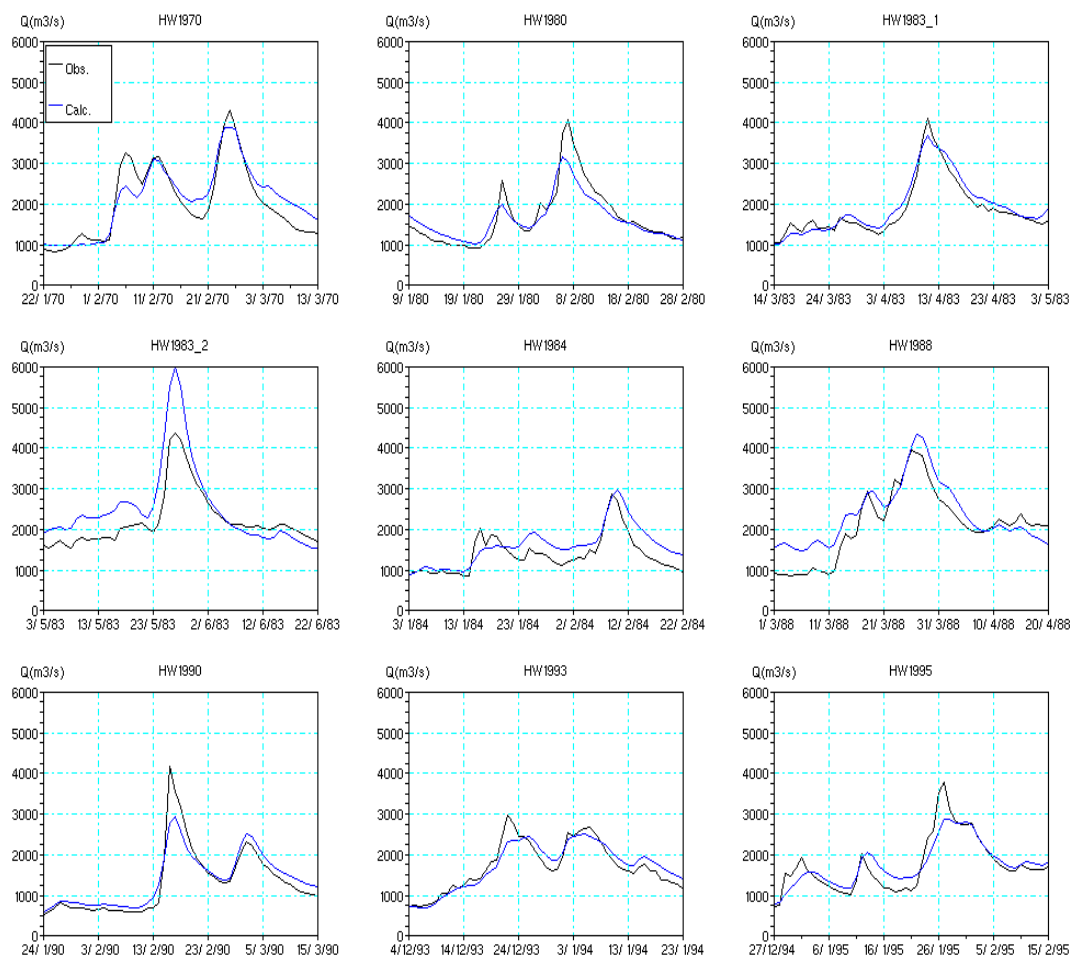
Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X ₁ (réservoir humidité du sol, mm)	1140	1153	1138
X ₂ (échanges, adimensionnel)	-3.0	-3.8	-3.5
X ₃ (capacité de routage, mm)	269	254	263
X ₄ (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	3.2	2.9	3.0
X ₅ (atténuation d'ETP, adimensionnel)	0.5	0.5	0.5
X ₆ (retard d'ETP, jours)	72.0	65.5	68.8



Tableau 38: Résultats sur les crues à la station de Maxau (GR4J initial, puis correction ETP)

Evènement	GR4J initial			GR4J + correction ETP		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	585	-10.3	351	427	-4.4	352
HW1980	841	-6.1	339	913	2.9	299
HW1983_1	625	-6.6	250	422	-4.0	178
HW1983_2	-141	4.9	326	-1648	-14.0	565
HW1984	-205	-34.7	515	-116	-14.9	328
HW1988	119	-8.7	514	-413	-12.0	439
HW1990	942	-16.0	346	1235	-4.3	280
HW1993	288	-11.3	258	460	-0.9	205
HW1995	723	-15.7	436	889	-1.1	299

Figure 24: Crues observées et simulées à la station de Maxau (approche globale, correction ETP)





11.2.2 Station de Rockenau

Tableau 39: Approche globale, station de Rockenau

Critère	Observation	GR4J	GR4J +	GR4J +
		(validation)	module neige	correction
			HBV	ETP
			(validation)	(validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	82.2	88.4	82.1
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	77.9	82.0	78.6
RMSE (m ³ /s)	- na -	59	47	59
Erreur Moyenne (m ³ /s)	- na -	-1.3	-2.1	0.5
Frac Erreur < 10% (%)	- na -	29.7	33.3	29.2
MNQ (m ³ /s)	38	33 (-13 %)	31 (-18 %)	34 (-11 %)
MHQ (m ³ /s)	1008	845 (-16 %)	889 (-12 %)	862 (-14 %)

Tableau 40: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Rockenau (ni module neige ni correction ETP)

Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	593	505	536
X2 (échanges, adimensionnel)	-0.5	-0.5	-0.5
X3 (réservoir de routage, mm)	51	51	52
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	2.2	2.2	2.1

Tableau 41: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Rockenau (correction ETP)

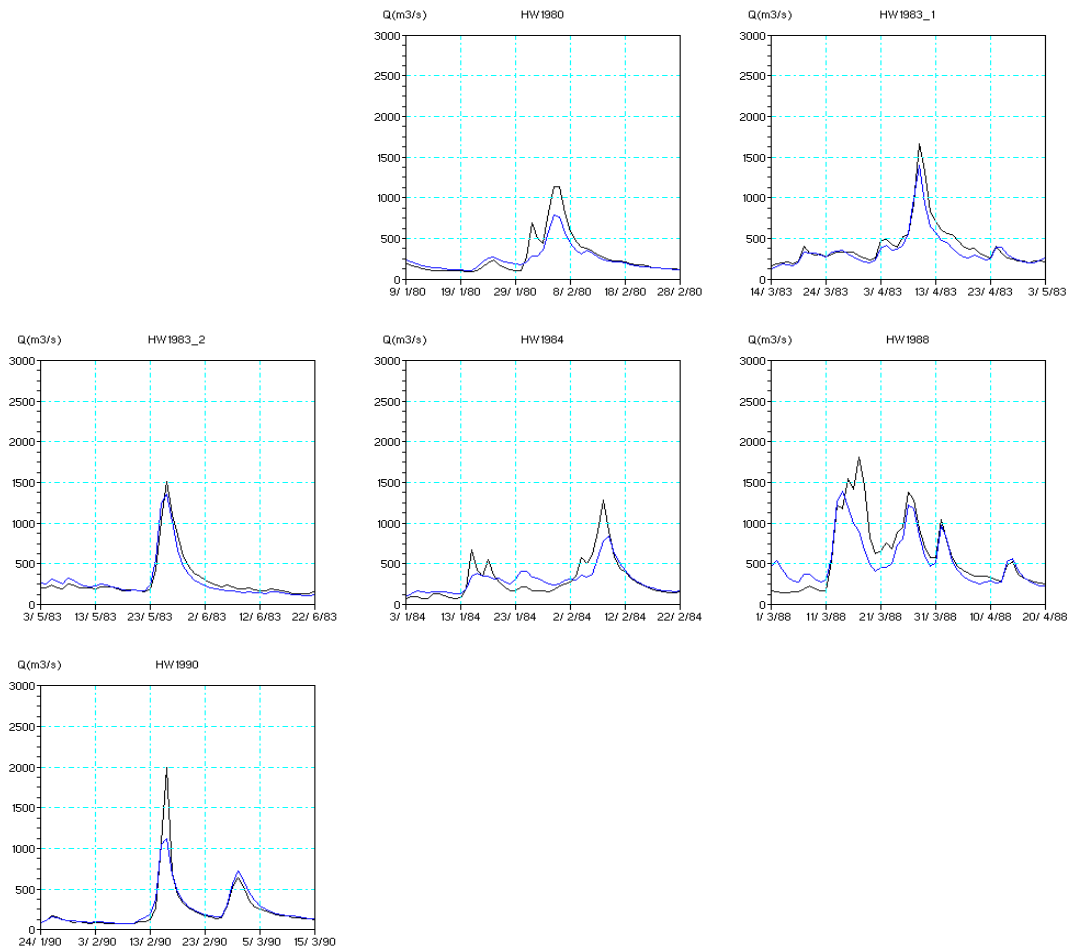
Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X ₁ (réservoir humidité du sol, mm)	537	408	467
X ₂ (échanges, adimensionnel)	-1.0	-1.3	-1.0
X ₃ (réservoir de routage, mm)	56	60	58
X ₄ (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	2.1	2.1	2.2
X ₅ (atténuation d'ETP, adimensionnel)	0.9	0.9	0.9
X ₆ (retard d'ETP, jours)	0.8	6.1	2.7



Tableau 42: Résultats sur les crues à la station de Rockenau (GR4J initial, puis correction ETP)

Evènement	GR4J initial			GR4J + correction ETP		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-	-	-	-
HW1980	359	12.3	116	358	12.0	117
HW1983_1	246	9.6	92	263	12.3	96
HW1983_2	144	3.0	72	153	4.0	69
HW1984	458	1.0	132	446	-0.5	131
HW1988	407	7.6	233	423	9.4	234
HW1990	916	2.5	132	881	-0.5	128
HW1993	-	-	-	-	-	-
HW1995	-	-	-	-	-	-

Figure 25: Crues observées et simulées à la station de Rockenau (approche globale, correction ETP)





11.2.3 Station de Worms

Tableau 43: Approche globale, station de Worms

Critère	Observation	GR4J (validation)	GR4J + module neige HBV (validation)	GR4J + correction ETP (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	68.6	64.3	82.8
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	65.1	63.2	83.6
RMSE (m ³ /s)	- na -	350	374	259
Erreur Moyenne (m ³ /s)	- na -	0.5	-55.6	-0.4
Frac Erreur < 10% (%)	- na -	28.9	27.5	49.5
MNQ (m ³ /s)	708	901 (+27 %)	825 (+17 %)	759 (+7 %)
MHQ (m ³ /s)	3992	3393 (-15 %)	3379 (-15 %)	3586 (-10 %)

Tableau 44: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Worms (ni module neige ni correction ETP)

Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	2563	2849	2683
X2 (échanges, adimensionnel)	0.4	0.3	0.3
X3 (réservoir de routage, mm)	135	109	124
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	4.0	4.1	4.0

Tableau 45: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Worms (correction ETP)

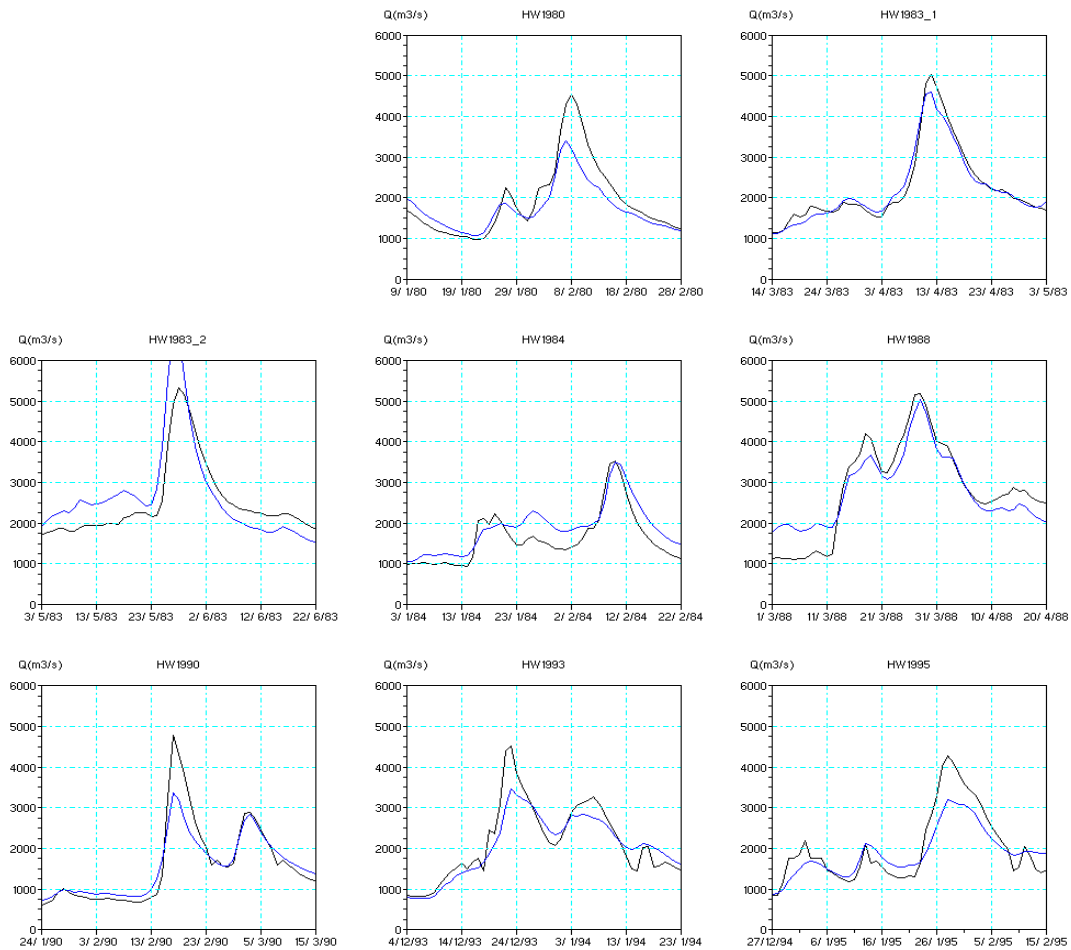
Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X ₁ (réservoir humidité du sol, mm)	1197	1032	1150
X ₂ (échanges, adimensionnel)	-3.1	-4.2	-3.5
X ₃ (réservoir de routage, mm)	212	183	193
X ₄ (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	3.8	3.7	3.8
X ₅ (atténuation d'ETP, adimensionnel)	0.6	0.5	0.5
X ₆ (retard d'ETP, jours)	55.1	42.9	49.5



Tableau 46: Résultats sur les crues à la station de Worms (GR4J initial, puis correction ETP)

Evènement	GR4J initial			GR4J + correction ETP		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-	-	-	-
HW1980	862	-2.5	423	1120	9.1	435
HW1983_1	630	-1.3	320	439	1.2	182
HW1983_2	-47	6.7	454	-1519	-6.7	607
HW1984	13	-26.2	492	35	-15.0	357
HW1988	508	1.8	588	134	1.4	446
HW1990	1254	-5.2	370	1406	2.2	362
HW1993	835	-2.4	331	1054	4.3	367
HW1995	796	-8.8	455	1090	5.9	423

Figure 26: Crues observées et simulées à la station de Worms (approche globale, correction ETP)





11.2.4 Station d'Obernau

Tableau 47: Approche globale, station d'Obernau

Critère	Observation	GR4J (validation)	GR4J + module neige HBV (validation)	GR4J + correction ETP (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	78.2	77.9	77.0
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	54.4	57.3	52.7
RMSE (m ³ /s)	- na -	63	63	65
Erreur Moyenne (m ³ /s)	- na -	-0.3	1.0	-4.9
Frac Erreur < 10% (%)	- na -	26.5	26.8	25.8
MNQ (m ³ /s)	56	60 (+6 %)	61 (+9 %)	58 (+4 %)
MHQ (m ³ /s)	887	790 (-11 %)	866 (-2 %)	762 (-14 %)

Tableau 48: Valeurs des paramètres de GR4J, station d'Obernau (ni module neige ni correction ETP)

Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	867	875	849
X2 (échanges, adimensionnel)	-1.5	-1.0	-1.3
X3 (réservoir de routage, mm)	51	59	56
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	3.6	3.7	3.6

Tableau 49: Valeurs des paramètres de GR4J, station d'Obernau (correction ETP)

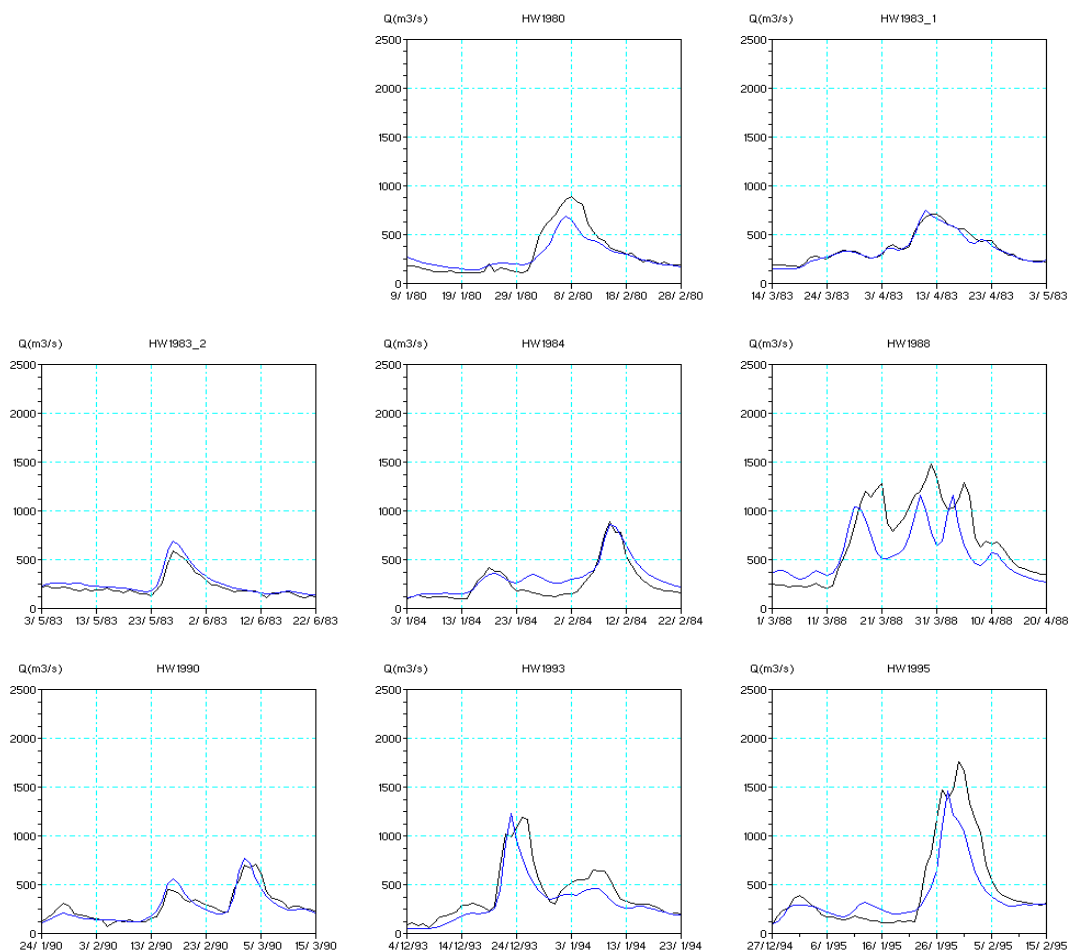
Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X ₁ (réservoir humidité du sol, mm)	844	502	685
X ₂ (échanges, adimensionnel)	-1.9	-6.5	-3.5
X ₃ (réservoir de routage, mm)	53	99	69
X ₄ (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	3.6	3.4	3.5
X ₅ (atténuation d'ETP, adimensionnel)	1.0	0.7	0.8
X ₆ (retard d'ETP, jours)	0.6	0.5	0.7



Tableau 50: Résultats sur les crues à la station d'Obernau (GR4J initial, puis correction ETP)

Evènement	GR4J initial			GR4J + correction ETP		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-	-	-	-
HW1980	103	-2.3	92	198	8.0	107
HW1983_1	-144	-6.3	47	-37	3.3	31
HW1983_2	-219	-27.0	76	-99	-16.6	46
HW1984	41	-16.6	77	35	-21.9	88
HW1988	302	19.0	292	321	19.9	294
HW1990	-73	3.6	60	-57	3.9	59
HW1993	-26	22.4	147	-35	21.4	143
HW1995	285	17.5	228	306	17.6	228

Figure 27: Crues observées et simulées à la station d'Obernau (approche globale, correction ETP)





11.2.5 Station de Cochem

Tableau 51: Approche globale, station de Cochem

Critère	Observation	GR4J (validation)	GR4J + module neige HBV (validation)	GR4J + correction ETP (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	89.8	90.0	91.0
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	84.5	84.5	88.1
RMSE (m ³ /s)	- na -	116	115	109
Erreur Moyenne (m ³ /s)	- na -	-8.7	-8.9	2.3
Frac Erreur < 10% (%)	- na -	28.9	29.4	30.4
MNQ (m ³ /s)	56	43 (-23 %)	43 (-23 %)	53 (-6 %)
MHQ (m ³ /s)	2191	2135 (-3 %)	2162 (-1 %)	2148 (-2 %)

Tableau 52: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Cochem (ni module neige ni correction ETP)

Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	418	461	448
X2 (échanges, adimensionnel)	-0.2	-0.3	-0.3
X3 (réservoir de routage, mm)	45	47	46
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	3.4	3.4	3.4

Tableau 53: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Cochem (correction ETP)

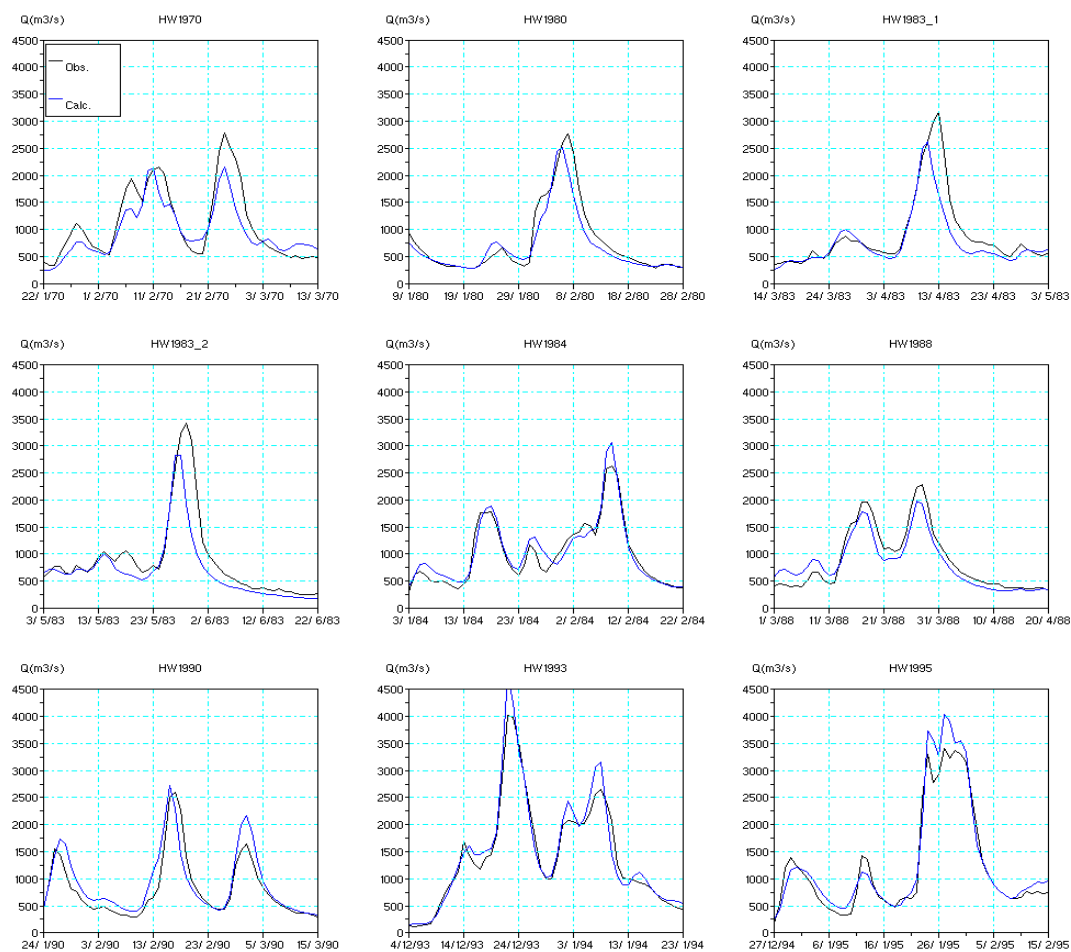
Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X ₁ (réservoir humidité du sol, mm)	359	342	374
X ₂ (échanges, adimensionnel)	-1.0	-1.6	-1.2
X ₃ (réservoir de routage, mm)	60	65	62
X ₄ (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	3.4	3.3	3.3
X ₅ (atténuation d'ETP, adimensionnel)	0.8	0.8	0.8
X ₆ (retard d'ETP, jours)	0.8	5.9	0.8



Tableau 54: Résultats sur les crues à la station de Cochem (GR4J initial, puis correction ETP)

Evènement	GR4J initial			GR4J + correction ETP		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	579	12.1	325	633	12.5	325
HW1980	143	4.3	214	267	10.3	221
HW1983_1	404	9.1	336	527	14.4	332
HW1983_2	541	20.9	403	597	21.2	395
HW1984	-490	-2.7	157	-426	-4.2	156
HW1988	134	-1.5	187	303	6.8	190
HW1990	-231	-15.8	293	-141	-13.0	261
HW1993	-528	-4.1	223	-738	-4.5	216
HW1995	-596	-7.8	251	-636	-6.5	243

Figure 28: Crues observées et simulées à la station de Cochem (approche globale, correction ETP)





11.2.6 Station d'Andernach

Tableau 55: Approche globale, station d'Andernach

Critère	Observation	GR4J	GR4J +	GR4J +
		(validation)	module neige	correction
			HBV	ETP
			(validation)	(validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	80.0	80.3	86.5
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	73.4	75.5	84.2
RMSE (m ³ /s)	- na -	490	486	402
Erreur Moyenne (m ³ /s)	- na -	-3.1	-0.4	7.6
Frac Erreur < 10% (%)	- na -	31.8	31.9	43.6
MNQ (m ³ /s)	932	947 (+2 %)	975 (+5 %)	859 (-8 %)
MHQ (m ³ /s)	6638	5850 (-12 %)	6001 (-10 %)	6275 (-5 %)

Tableau 56: Valeurs des paramètres de GR4J, station d'Andernach (ni module neige ni correction ETP)

Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	1798	1549	1660
X2 (échanges, adimensionnel)	0.5	0.2	0.3
X3 (réservoir de routage, mm)	78	73	74
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	4.3	4.3	4.3

Tableau 57: Valeurs des paramètres de GR4J, station d'Andernach (correction ETP)

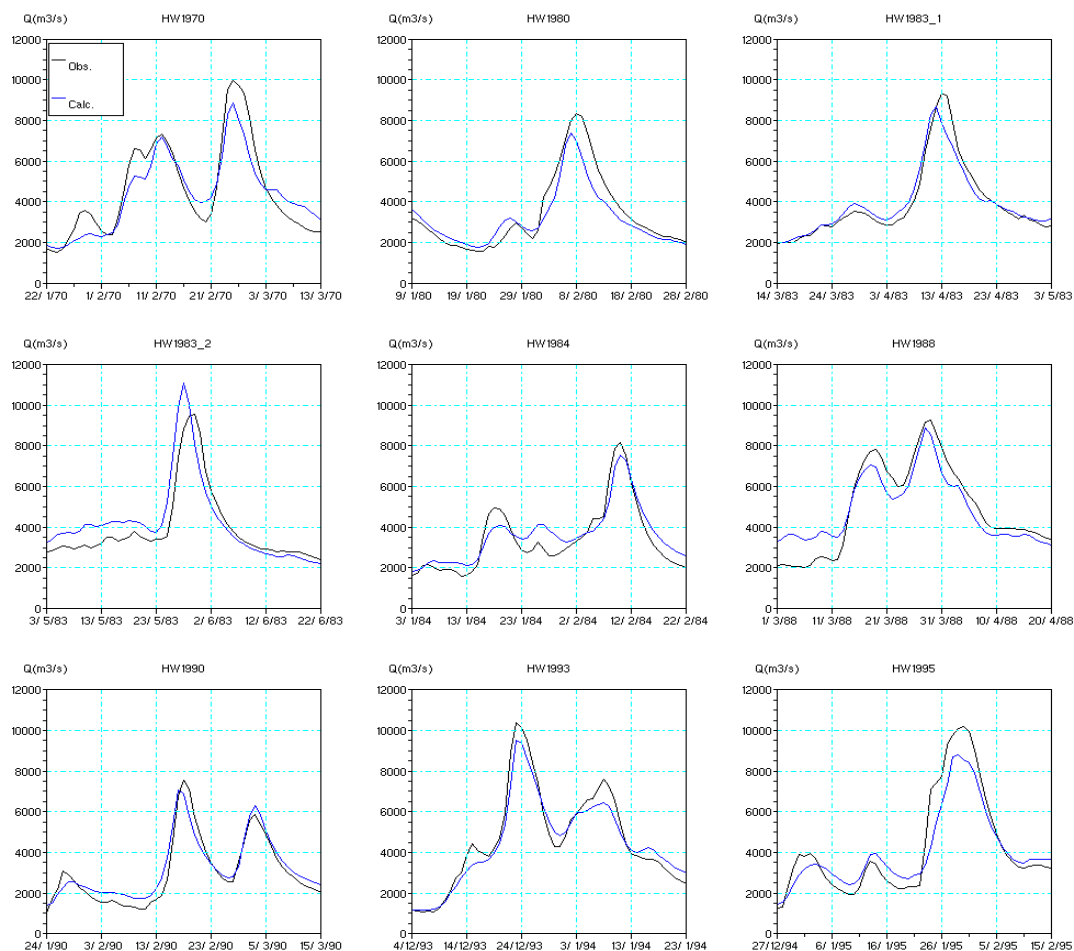
Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X ₁ (réservoir humidité du sol, mm)	900	681	790
X ₂ (échanges, adimensionnel)	-2.3	-3.3	-2.6
X ₃ (réservoir de routage, mm)	129	119	121
X ₄ (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	4.2	4.1	4.1
X ₅ (atténuation d'ETP, adimensionnel)	0.6	0.6	0.6
X ₆ (retard d'ETP, jours)	22.0	23.3	22.2



Tableau 58: Résultats sur les crues à la station d'Andernach (GR4J initial, puis correction ETP)

Evènement	GR4J initial			GR4J + correction ETP		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	1454	3.3	851	1122	4.3	856
HW1980	991	3.1	746	990	6.8	708
HW1983_1	1010	-2.3	676	653	-0.6	486
HW1983_2	162	1.6	757	-1538	-7.6	900
HW1984	794	-11.2	711	629	-6.0	612
HW1988	860	0.1	1014	386	1.6	832
HW1990	730	-5.3	504	488	-5.9	472
HW1993	1811	8.6	806	877	3.5	563
HW1995	1568	1.1	967	1376	4.2	860

Figure 29: Crues observées et simulées à la station d'Andernach (approche globale, correction ETP)





11.3 Annexes 3 : Résultats de l'approche n°2 (mode global avec une information réduite sur la pluviométrie)

11.3.1 Résultat avec 1 sous-bassin en entrée

Tableau 59: Approche globale, station de Lobith (GR4J initial, puis correction ETP)

Critère	Observation	GR4J (validation)	GR4J + corr. ETP (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	73.4	75.6
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	70.4	76.2
RMSE (m3/s)	- na -	607	581
Erreur moyenne (m3/s)	- na -	-25.5	14.5
Frac erreur < 10% (%)	- na -	30.3	34.4
MNQ (m3/s)	1036	1054 (+2 %)	983 (-5 %)
MHQ (m3/s)	6952	6261 (-10 %)	6500 (-7 %)

Tableau 60: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (ni module neige ni correction ETP)

Paramètre	Calage sur P_1	Calage sur P_2	Calage sur P_{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	2545	1853	2175
X2 (échanges, adimensionnel)	-1.3	-1.5	-1.4
X3 (réservoir de routage, mm)	125	126	124
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	6.4	5.8	6.1

Tableau 61: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (correction ETP)

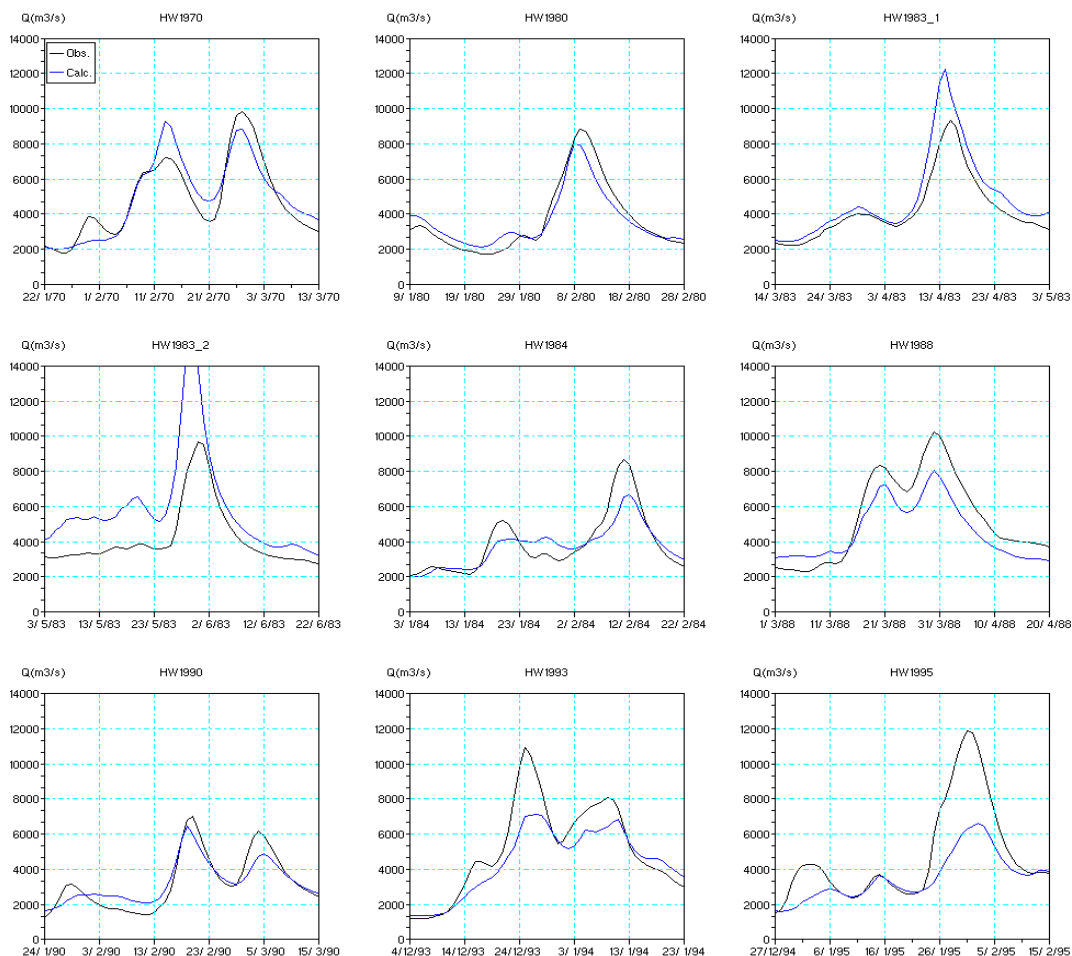
Paramètre	Calage sur P_1	Calage sur P_2	Calage sur P_{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	1490	925	1208
X2 (échanges, adimensionnel)	-6.6	-9.0	-7.6
X3 (réservoir de routage, mm)	167	191	177
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	6.1	5.4	5.6
X5 (atténuation d'ETP, adimensionnel)	0.6	0.5	0.6
X6 (retard d'ETP, jours)	23.3	15.8	19.1



Tableau 62: Résultats sur les crues à la station de Lobith (GR4J initial, puis correction ETP)

Evènement	GR4J initial			GR4J + correction ETP		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	752	-2.6	821	590	-2.2	855
HW1980	592	-2.0	632	807	1.3	603
HW1983_1	-2631	-20.6	1056	-2895	-16.3	1002
HW1983_2	-4847	-35.4	1839	-6421	-42.1	2299
HW1984	1612	-6.8	855	2007	4.1	832
HW1988	2542	13.0	1311	2189	14.1	1232
HW1990	650	-0.6	654	543	0.6	610
HW1993	4202	17.6	1508	3804	13.4	1304
HW1995	5151	21.0	1966	5237	26.2	2107

Figure 30: Crues observées et simulées à la station de Lobith (correction ETP)





11.3.2 Résultat avec 5 sous-bassins en entrée

Tableau 63: Approche globale, station de Lobith (GR4J initial, puis correction ETP)

Critère	Observation	GR4J (validation)	GR4J + corr. ETP (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	79.2	81.9
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	73.9	79.3
RMSE (m3/s)	- na -	536	500
Erreur moyenne (m3/s)	- na -	-12.0	14.9
Frac erreur < 10% (%)	- na -	31.8	38.6
MNQ (m3/s)	1036	1046 (+1 %)	953 (-8 %)
MHQ (m3/s)	6952	6356 (-9 %)	6555 (-6 %)

Tableau 64: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (ni module neige ni correction ETP)

Paramètre	Calage sur P_1	Calage sur P_2	Calage sur P_{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	2321	1795	2028
X2 (échanges, adimensionnel)	-1.8	-2.0	-1.9
X3 (réservoir de routage, mm)	123	114	115
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	6.2	6.1	6.2

Tableau 65: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (correction ETP)

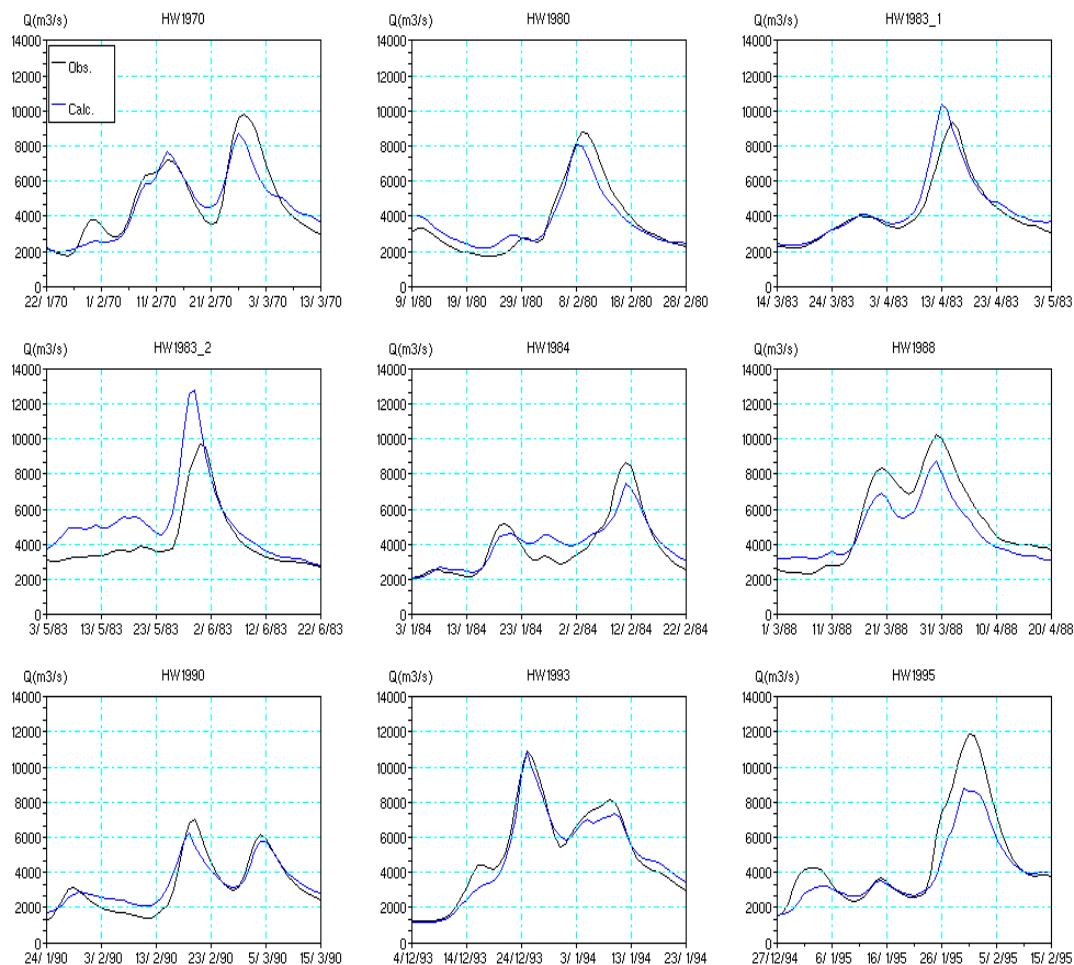
Paramètre	Calage sur P_1	Calage sur P_2	Calage sur P_{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	1082	779	951
X2 (échanges, adimensionnel)	-3.3	-4.8	-3.7
X3 (réservoir de routage, mm)	148	150	143
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	5.8	5.5	5.6
X5 (atténuation d'ETP, adimensionnel)	0.6	0.5	0.5
X6 (retard d'ETP, jours)	24.6	25.7	24.1



Tableau 66: Résultats sur les crues à la station de Lobith (GR4J initial, puis correction ETP)

Evènement	GR4J initial			GR4J + correction ETP		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-535	-5.7	684	1143	3.7	806
HW1980	1013	0.0	698	724	0.3	619
HW1983_1	-2091	-17.6	904	-1048	-6.5	640
HW1983_2	-3035	-19.7	1184	-3115	-25.8	1518
HW1984	1870	-2.2	812	1237	-2.7	688
HW1988	946	-3.0	1034	1525	11.4	1119
HW1990	287	0.8	505	820	-4.5	567
HW1993	2572	15.6	1179	97	4.2	544
HW1995	4804	20.8	1882	3151	15.3	1279

Figure 31: Crues observées et simulées à la station de Lobith (correction ETP)





11.3.3 Résultat avec 10 sous-bassins en entrée

Tableau 67: Approche globale, station de Lobith (GR4J initial, puis correction ETP)

Critère	Observation	GR4J (validation)	GR4J + corr. ETP (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	79.5	82.8
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	73.2	80.3
RMSE (m3/s)	- na -	532	489
Erreur moyenne (m3/s)	- na -	-21.1	13.2
Frac erreur < 10% (%)	- na -	31.3	39.9
MNQ (m3/s)	1036	1028 (-1 %)	956 (-8 %)
MHQ (m3/s)	6952	6240 (-10 %)	6582 (-5 %)

Tableau 68: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (ni module neige ni correction ETP)

Paramètre	Calage sur P₁	Calage sur P₂	Calage sur P_{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	2289	1816	2030
X2 (échanges, adimensionnel)	-0.8	-1.0	-0.9
X3 (réservoir de routage, mm)	112	104	107
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	6.3	6.1	6.2

Tableau 69: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (correction ETP)

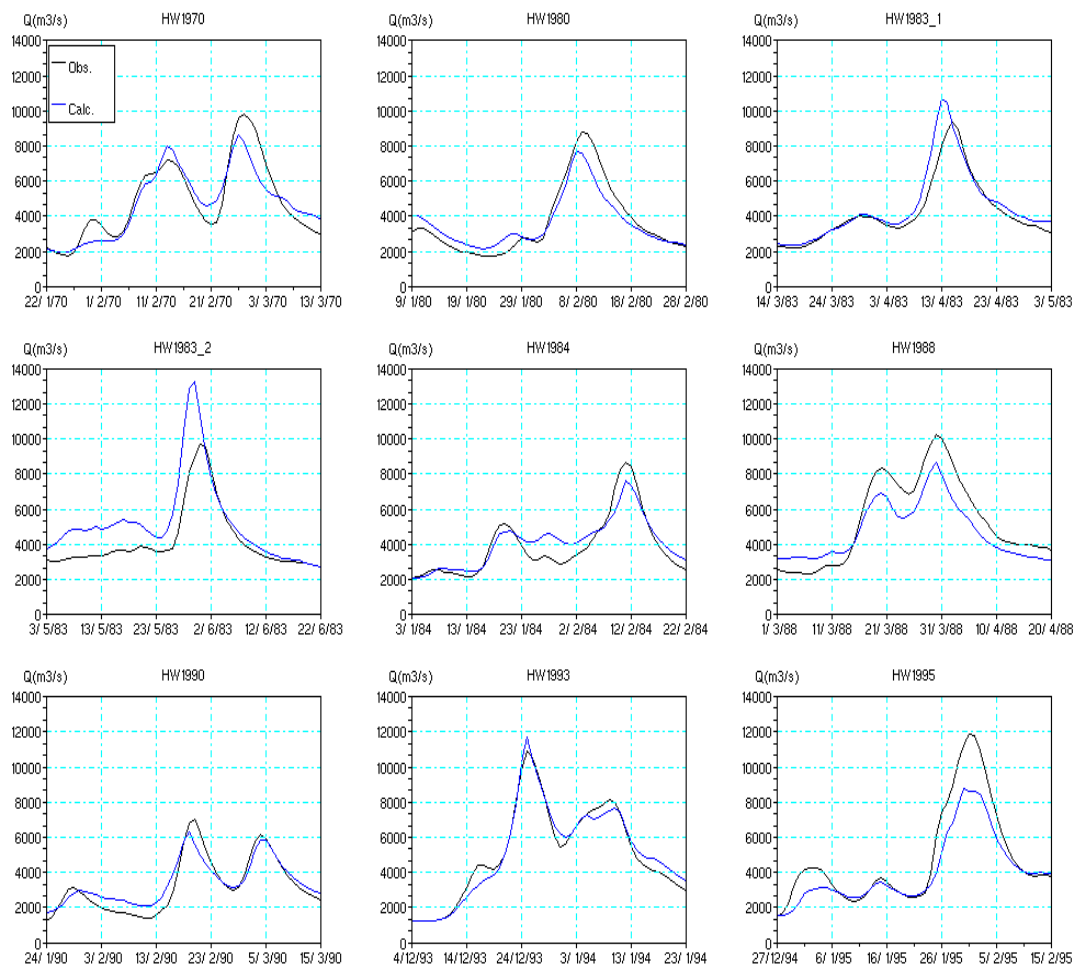
Paramètre	Calage sur P₁	Calage sur P₂	Calage sur P_{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	1018	758	904
X2 (échanges, adimensionnel)	-3.2	-4.5	-3.5
X3 (réservoir de routage, mm)	145	148	141
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	5.8	5.5	5.7
X5 (atténuation d'ETP, adimensionnel)	0.5	0.5	0.5
X6 (retard d'ETP, jours)	23.7	24.9	23.4



Tableau 70: Résultats sur les crues à la station de Lobith (GR4J initial, puis correction ETP)

Evènement	GR4J initial			GR4J + correction ETP		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-179	-4.3	631	1175	2.4	855
HW1980	912	-1.4	695	1098	1.9	682
HW1983_1	-1501	-14.3	758	-1367	-7.4	691
HW1983_2	-1848	-15.7	973	-3597	-24.7	1509
HW1984	1644	-5.3	823	1073	-4.4	684
HW1988	1208	-0.4	1029	1648	11.6	1138
HW1990	703	0.6	475	676	-5.1	555
HW1993	2309	15.5	1128	-732	-0.3	455
HW1995	4139	16.2	1643	3081	15.4	1234

Figure 32: Crues observées et simulées à la station de Lobith (correction ETP)





11.3.4 Résultat avec 30 sous-bassins en entrée

Tableau 71: Approche globale, station de Lobith (GR4J initial, puis correction ETP)

Critère	Observation	GR4J (validation)	GR4J + corr. ETP (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	79.5	84.4
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	71.8	80.8
RMSE (m3/s)	- na -	533	465
Erreur moyenne (m3/s)	- na -	-15.1	4.7
Frac erreur < 10% (%)	- na -	31.2	40.3
MNQ (m3/s)	1036	1033 (==)	958 (-8 %)
MHQ (m3/s)	6952	6235 (-10 %)	6557 (-6 %)

Tableau 72: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (ni module neige ni correction ETP)

Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	2058	1745	1872
X2 (échanges, adimensionnel)	0.4	0.1	0.2
X3 (réservoir de routage, mm)	85	81	83
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	6.3	6.1	6.2

Tableau 73: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (correction ETP)

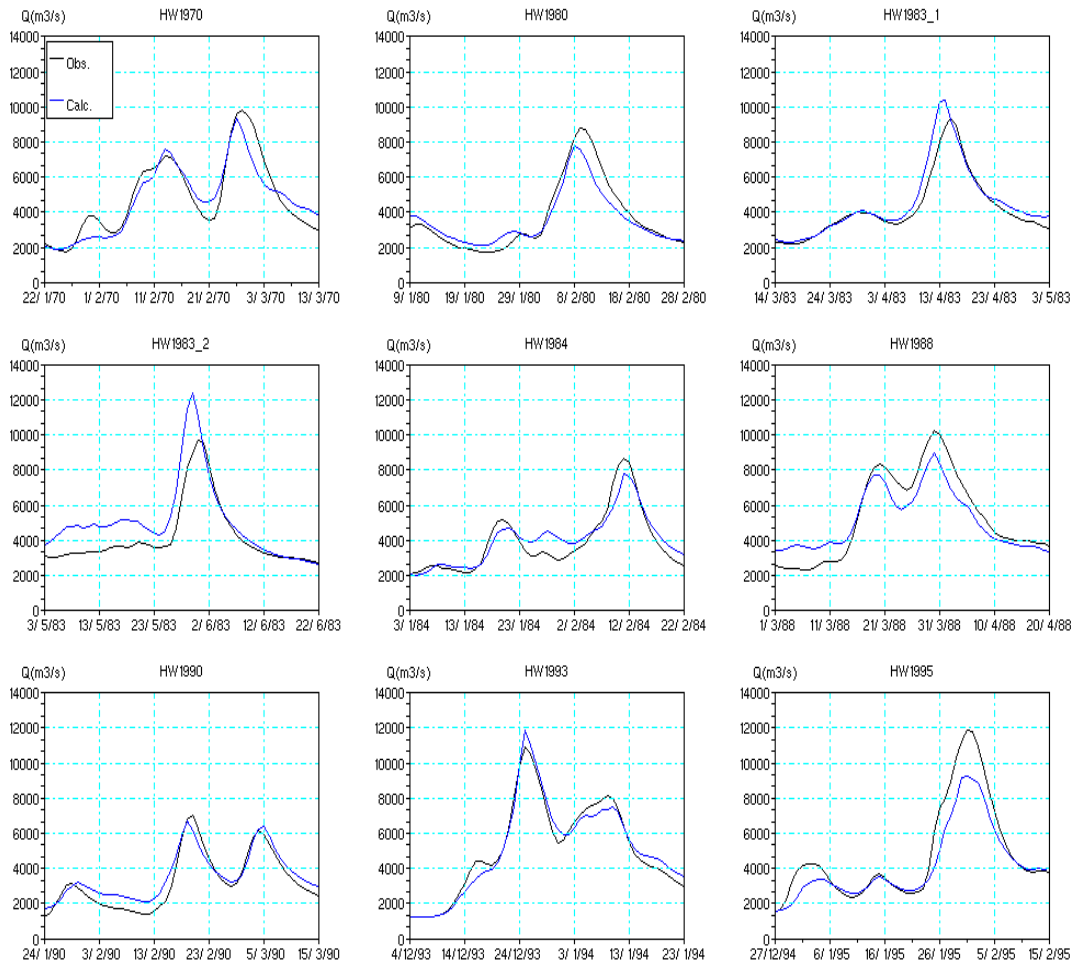
Paramètre	Calage sur P ₁	Calage sur P ₂	Calage sur P _{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	938	706	830
X2 (échanges, adimensionnel)	-2.0	-2.8	-2.2
X3 (réservoir de routage, mm)	140	134	134
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	6.1	5.6	5.8
X5 (atténuation d'ETP, adimensionnel)	0.5	0.5	0.5
X6 (retard d'ETP, jours)	18.9	21.2	19.4



Tableau 74: Résultats sur les crues à la station de Lobith (GR4J initial, puis correction ETP)

Evènement	GR4J initial			GR4J + correction ETP		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	442	-2.1	678	502	2.5	794
HW1980	932	0.7	658	1021	3.4	658
HW1983_1	-1779	-13.9	858	-1086	-7.0	616
HW1983_2	-1622	-13.4	945	-2673	-20.2	1238
HW1984	1022	-11.1	820	892	-3.3	633
HW1988	1350	-0.3	1049	1303	4.1	951
HW1990	345	-5.5	488	329	-9.4	537
HW1993	1468	11.6	884	-939	0.0	460
HW1995	2995	9.2	1191	2677	12.9	1093

Figure 33: Crues observées et simulées à la station de Lobith (correction ETP)





11.3.5 Résultat avec la combinaison de 2 districts HBV

Tableau 75: Approche globale, station de Lobith (GR4J initial, puis correction ETP)

Critère	Observation	GR4J (validation)	GR4J + corr. ETP (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	- na -	79.4	84.1
Nash-Sutcliffe logQ (%)	- na -	72.4	79.8
RMSE (m3/s)	- na -	535	469
Erreur moyenne (m3/s)	- na -	7.7	-5.9
Frac erreur < 10% (%)	- na -	31.2	37.8
MNQ (m3/s)	1036	1019 (-2 %)	943 (-9 %)
MHQ (m3/s)	6952	6271 (-10 %)	6480 (-7 %)

Tableau 76: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (ni module neige ni correction ETP)

Paramètre	Calage sur P_1	Calage sur P_2	Calage sur P_{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	1824	1549	1677
X2 (échanges, adimensionnel)	0.5	0.1	0.3
X3 (réservoir de routage, mm)	81	79	80
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	6.3	6.1	6.1

Tableau 77: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (correction ETP)

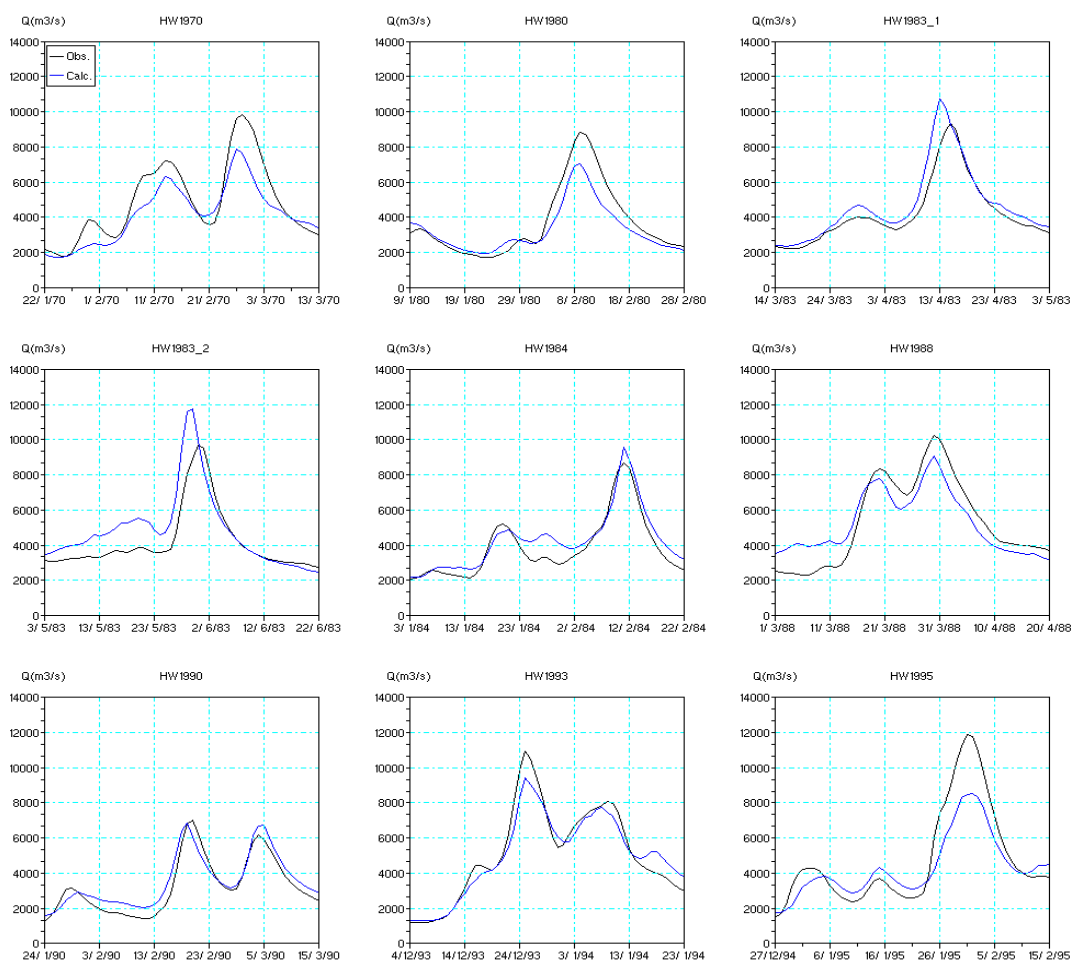
Paramètre	Calage sur P_1	Calage sur P_2	Calage sur P_{total}
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	1016	717	841
X2 (échanges, adimensionnel)	-3.3	-6.1	-4.9
X3 (réservoir de routage, mm)	136	149	143
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	5.8	5.5	5.6
X5 (atténuation d'ETP, adimensionnel)	0.6	0.5	0.5
X6 (retard d'ETP, jours)	18.5	21.9	20.4



Tableau 78: Résultats sur les crues à la station de Lobith (GR4J initial, puis correction ETP)

Evènement	GR4J initial			GR4J + correction ETP		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	258	-0.1	629	1973	14.4	1094
HW1980	1339	5.1	714	1783	10.8	853
HW1983_1	-1330	-14.6	802	-1384	-10.7	731
HW1983_2	-1710	-10.5	923	-2029	-15.4	1192
HW1984	1062	-5.4	708	-878	-10.2	635
HW1988	885	-8.5	1065	1200	1.8	1049
HW1990	509	-2.9	456	193	-9.0	551
HW1993	2321	16.3	1196	1487	2.2	667
HW1995	2694	8.1	1203	3328	9.6	1293

Figure 34: Crues observées et simulées à la station de Lobith (correction ETP)





11.3.6 Résultat avec trois versions supplémentaires de la correction ETP

Tableau 79: Approche globale, station de Lobith (différentes versions de la correction ETP)

Critère	GR4J – 1 sous-bassin (validation)	GR4J – 5 sous-bassins (validation)	GR4J – 10 sous-bassins (validation)	GR4J – 30 sous-bassins (validation)	GR4J – 2 districts (validation)
Nash-Sutcliffe Q (%)	75.6	81.9	82.8	84.4	84.1
Nash-Sutcliffe logQ(%)	76.2	79.3	80.3	80.8	79.8
Frac erreur < 10% (%)	34.4	38.6	39.9	40.3	37.8
(a) Nash-Sutcliffe Q (%)	73.8	77.2	77.9	78.6	77.6
(a) Nash-Sutcliffe logQ(%)	72.3	71.8	72.2	72.2	69.5
(a) Frac erreur < 10% (%)	31.1	31.4	31.7	32.1	29.6
(b) Nash-Sutcliffe Q (%)	74.3	79.6	80.5	82.6	74.3
(b) Nash-Sutcliffe logQ(%)	73.1	75.7	76.4	77.6	73.1
(b) Frac erreur < 10% (%)	32.8	34.9	35.2	37.3	32.8
(c) Nash-Sutcliffe Q (%)	75.5	81.8	82.6	84.4	84.3
(c) Nash-Sutcliffe logQ(%)	75.8	79.2	79.9	80.8	80.2
(c) Frac erreur < 10% (%)	34.3	38.6	39.1	40.0	37.7



Tableau 80: Valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith (4 versions de la correction ETP)

Critère	GR4J – 1	GR4J – 5	GR4J – 10	GR4J – 30	GR4J – 2
	sous-bassin	sous-bassins	sous-bassins	sous-bassins	districts
	(P_{total})	(P_{total})	(P_{total})	(P_{total})	(P_{total})
X1 (réservoir humidité du sol, mm)	1208 (a) 2117.5 (b) 1476.3 (c) 1265.5	951 (a) 1909.5 (b) 1124.0 (c) 943.2	904 (a) 1846.7 (b) 1079.1 (c) 884.1	830 (a) 1682.1 (b) 996.9 (c) 816.2	841 (a) 1811.8 (b) 970.8 (c) 808.0
X2 (échanges, adimensionnel)	-7.6 (a) -1.4 (b) -6.4 (c) -6.8	-3.7 (a) 0.4 (b) -4.0 (c) -3.5	-3.5 (a) 0.5 (b) -3.7 (c) -3.3	-2.2 (a) 0.9 (b) -2.0 (c) -2.1	-4.9 (a) 0.0 (b) -5.0 (c) -4.8
X3 (réservoir de routage, mm)	177 (a) 117.9 (b) 167.3 (c) 167.6	143 (a) 78.9 (b) 148.2 (c) 144.0	141 (a) 74.9 (b) 143.0 (c) 142.4	134 (a) 66.7 (b) 134.1 (c) 135.4	143 (a) 79.4 (b) 147.3 (c) 146.7
X4 (temps de l'hydrogramme unitaire, jours)	5.6 (a) 6.2 (b) 5.7 (c) 5.6	5.6 (a) 6.2 (b) 5.7 (c) 5.6	5.7 (a) 6.2 (b) 5.7 (c) 5.7	5.8 (a) 6.2 (b) 5.8 (c) 5.8	5.6 (a) 6.2 (b) 5.6 (c) 5.6
X5 (atténuation d'ETP, adimensionnel)	0.6 (a) - (b) 0.6 (c) 0.6	0.5 (a) - (b) 0.5 (c) 0.5	0.5 (a) - (b) 0.5 (c) 0.5	0.5 (a) - (b) 0.6 (c) 0.6	0.5 (a) - (b) 0.5 (c) 0.5
X6 (retard d'ETP, jours)	19.1 (a) 10.2 (b) - (c) -	24.1 (a) 13.0 (b) - (c) -	23.4 (a) 12.3 (b) - (c) -	19.4 (a) 9.6 (b) - (c) -	20.4 (a) 9.5 (b) - (c) -
X7 (réservoir de routage de l'ETP, mm)	- (a) - (b) - (c) 18.2	- (a) - (b) - (c) 24.5	- (a) - (b) - (c) 24.0	- (a) - (b) - (c) 20.7	- (a) - (b) - (c) 21.9



11.4 Annexes 4 : Résultats de l'approche n°3 (vers la semi-distribution)

11.4.1 Résultat avec 3 corrections ETP amont (Cochem, Obernau et Worms)

Tableau 81: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (3 corrections ETP amont)

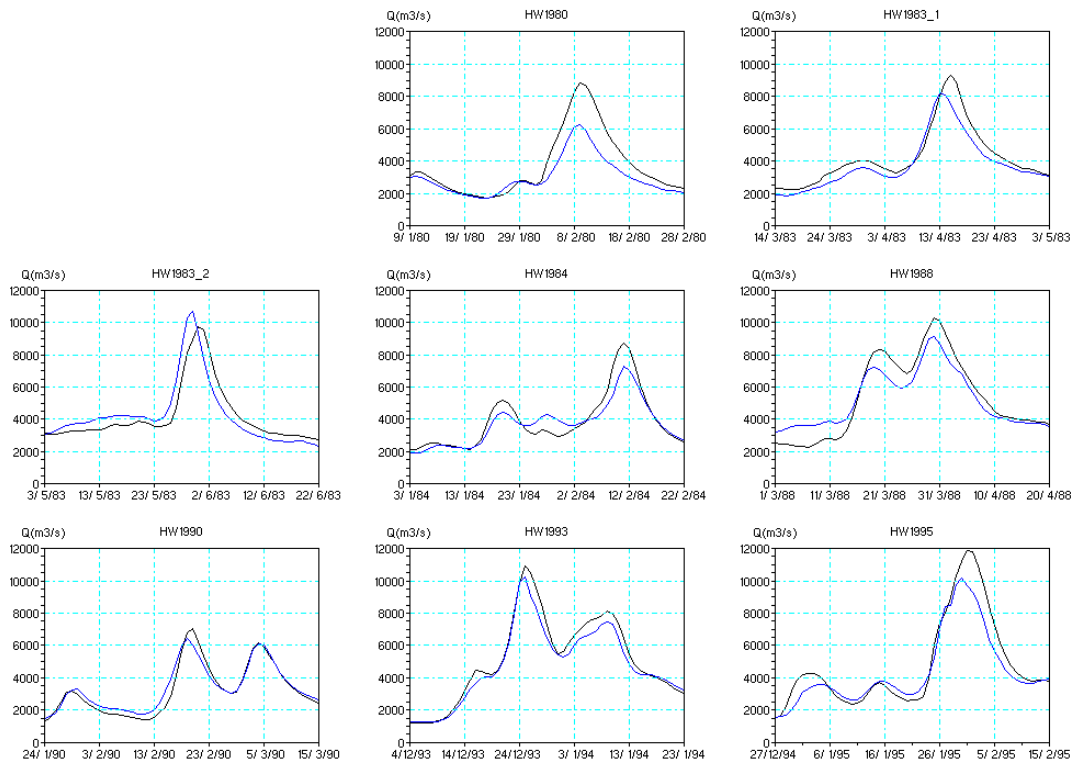
Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (temps de délai à Cochem, jours)	5.8	5.6	5.8
X2 (temps de délai à Obernau, jours)	4.8	6.1	5.0
X3 (temps de délai à Worms, jours)	7.2	6.6	7.0
X4 (coefficient correcteur C)	1.2	1.2	1.2

Tableau 82: Résultats sur les crues à la station de Lobith (3 corrections ETP amont)

Evènement	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-
HW1980	2565	18.7	1111
HW1983_1	1077	9.9	638
HW1983_2	-952	-1.5	841
HW1984	1386	4.4	654
HW1988	1115	2.6	857
HW1990	575	-3.7	390
HW1993	718	6.8	536
HW1995	1687	8.4	902



Figure 35: Crues observées et simulées à la station de Lobith (3 corrections ETP amont)





11.4.2 Résultat avec 2 corrections ETP amont (Cochem et Worms)

Tableau 83: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (2 corrections ETP amont)

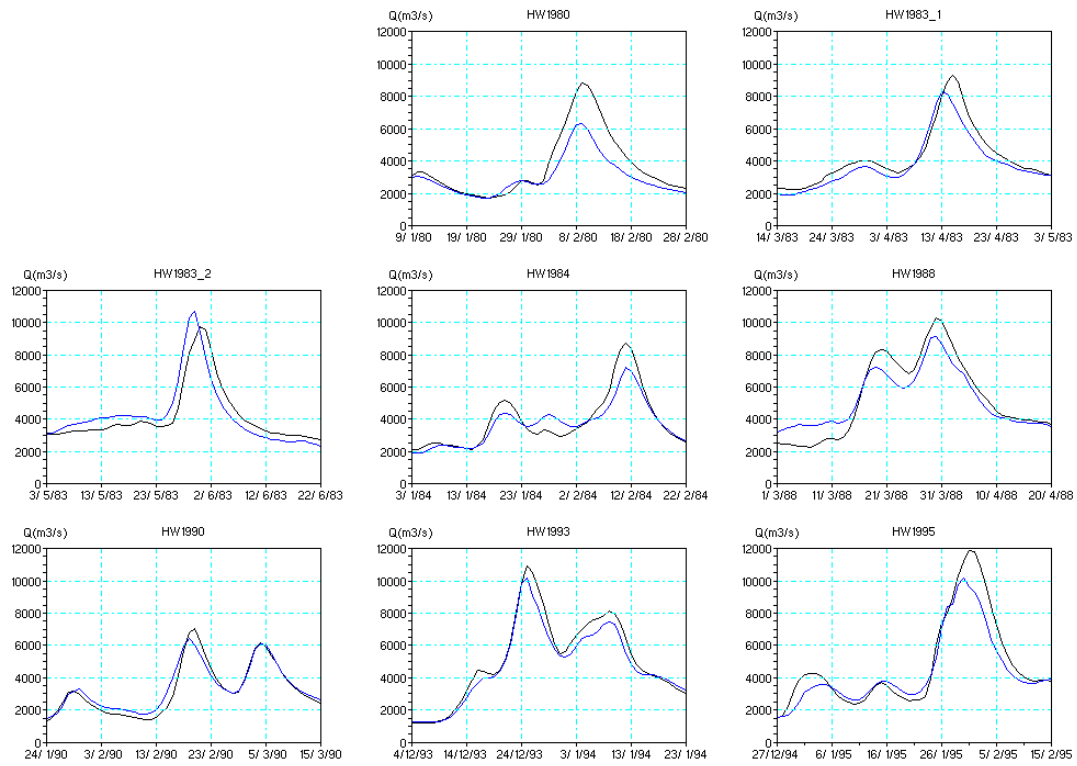
Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (temps de délai à Cochem, jours)	5.8	5.6	5.8
X2 (temps de délai à Obernau, jours)	4.7	6.1	5.0
X3 (temps de délai à Worms, jours)	7.2	6.7	7.0
X4 (coefficient correcteur C)	1.2	1.2	1.2

Tableau 84: Résultats sur les crues à la station de Lobith (2 corrections ETP amont)

Evènement	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-
HW1980	2483	17.9	1082
HW1983_1	1028	9.1	618
HW1983_2	-1013	-2.0	843
HW1984	1481	5.0	667
HW1988	1115	2.4	856
HW1990	583	-3.7	393
HW1993	765	6.9	544
HW1995	1706	8.4	905



Figure 36: Crues observées et simulées à la station de Lobith (2 corrections ETP amont)





11.4.3 Résultat avec 1 correction ETP amont (Worms)

Tableau 85: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (1 correction ETP amont)

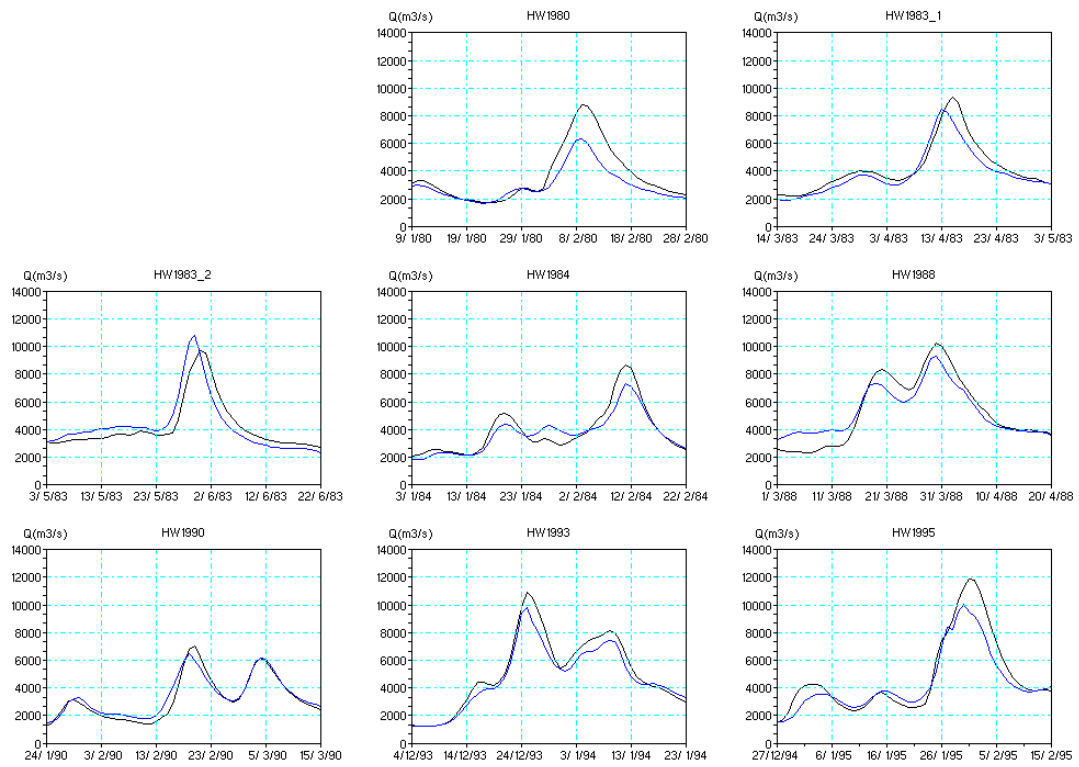
Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (temps de délai à Cochem, jours)	5.9	5.6	6.0
X2 (temps de délai à Obernau, jours)	4.8	6.2	5.0
X3 (temps de délai à Worms, jours)	7.2	6.7	6.9
X4 (coefficient correcteur C)	1.2	1.2	1.2

Tableau 86: Résultats sur les crues à la station de Lobith (1 correction ETP amont)

Evènement	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-
HW1980	2444	18.3	1086
HW1983_1	872	8.2	609
HW1983_2	-1073	-1.8	851
HW1984	1345	5.3	654
HW1988	983	0.8	869
HW1990	539	-4.2	402
HW1993	1112	7.9	618
HW1995	1850	8.7	939



Figure 37: Crues observées et simulées à la station de Lobith (1 correction ETP amont)





11.4.4 Résultat avec la combinaison des meilleures 3 corrections ETP amont (Cochem, Obernau et Worms)

Tableau 87: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (combinaison de 3 corrections ETP amont)

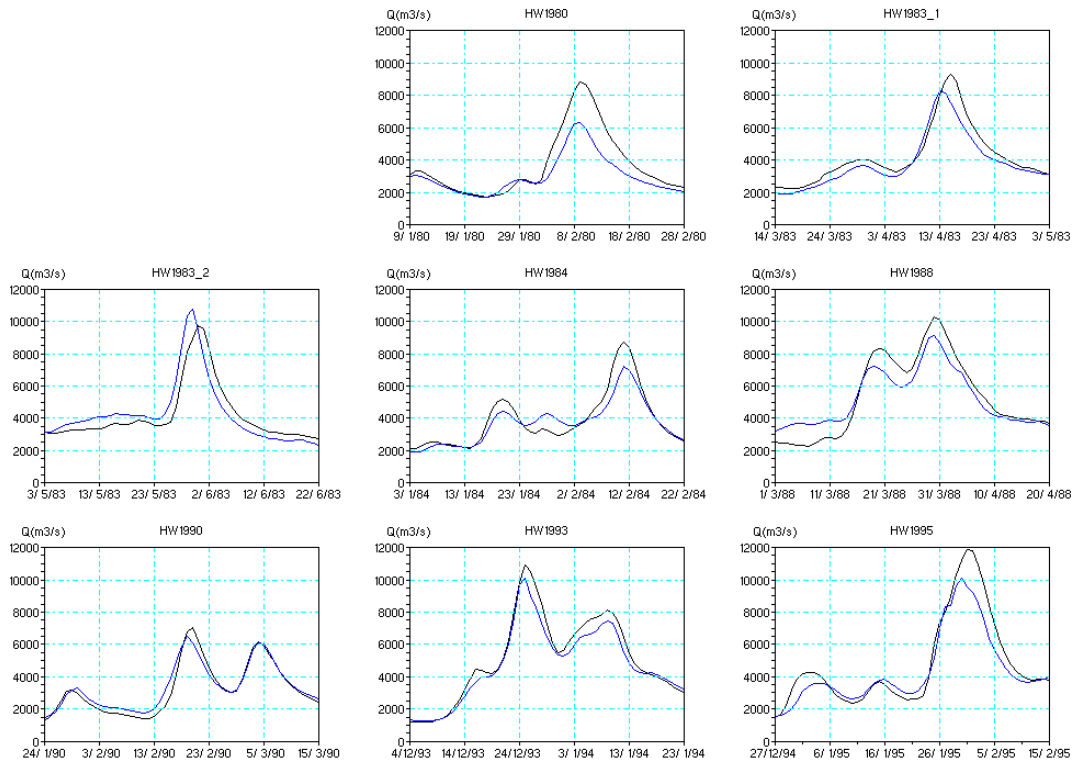
Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (temps de délai à Cochem, jours)	5.9	5.6	5.9
X2 (temps de délai à Obernau, jours)	4.8	6.2	5.0
X3 (temps de délai à Worms, jours)	7.1	6.7	6.9
X4 (coefficient correcteur C)	1.2	1.2	1.2

Tableau 88: Résultats sur les crues à la station de Lobith (combinaison de 3 corrections ETP différentes)

Evènement	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-
HW1980	2475	17.9	1081
HW1983_1	1018	9.1	618
HW1983_2	-1031	-2.1	848
HW1984	1470	4.9	667
HW1988	1118	2.3	868
HW1990	552	-3.6	387
HW1993	834	7.0	558
HW1995	1790	8.6	920



Figure 38: Crues observées et simulées à la station de Lobith (combinaison de 3 corrections ETP amont)





11.4.5 Résultat avec 2 stations (Cochem et Worms) et 2 corrections ETP amont

Tableau 89: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de Cochem et Worms (2 corrections ETP amont)

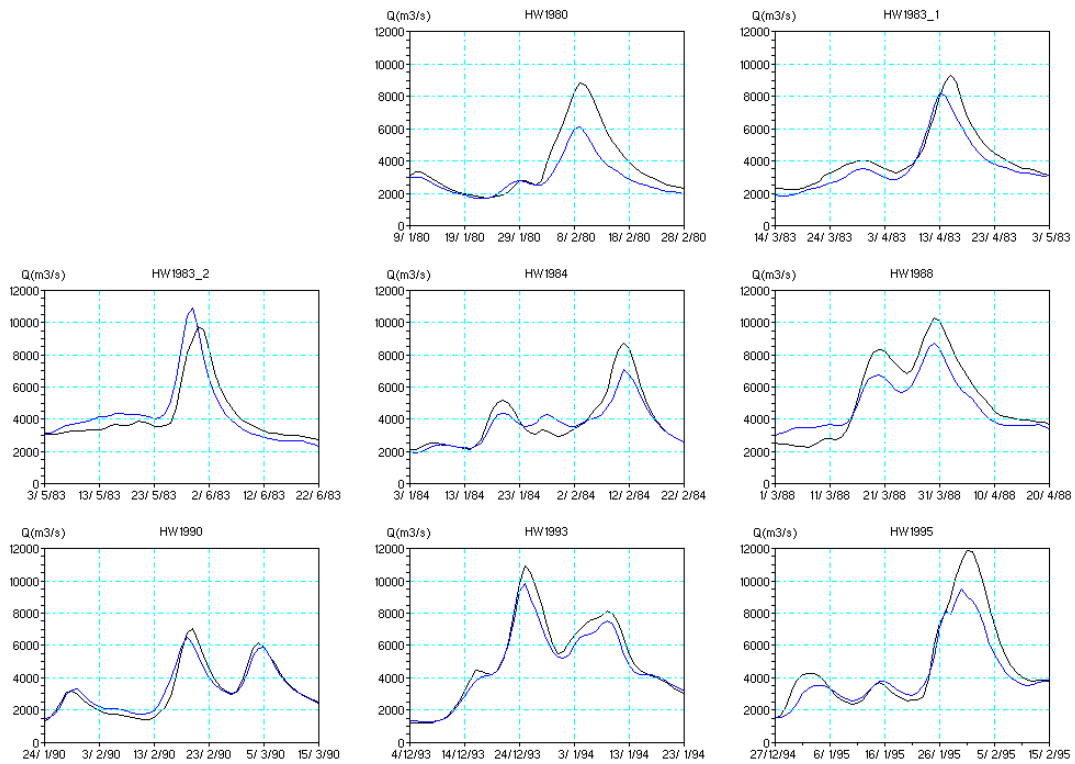
Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (temps de délai à Cochem, jours)	5.7	5.8	5.8
X2 (temps de délai à Worms, jours)	6.8	6.5	6.7
X3 (coefficient correcteur C)	1.3	1.3	1.3

Tableau 90: Résultats sur les crues à la station de Lobith (2 corrections ETP amont)

Evènement	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-
HW1980	2719	20.6	1200
HW1983_1	1132	11.9	715
HW1983_2	-1215	-3.0	880
HW1984	1620	5.9	722
HW1988	1580	8.5	1045
HW1990	541	-1.4	405
HW1993	1078	7.3	586
HW1995	2423	11.3	1076



Figure 39: Crues observées et simulées à la station de Lobith (2 corrections ETP amont)





11.4.6 Résultat vers une autre semi-distribution avec 3 stations (Cochem, Rockenau et Maxau) et 3 corrections ETP amont

Tableau 91: valeurs des paramètres de GR4J, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Rockenau et Maxau (3 corrections ETP amont)

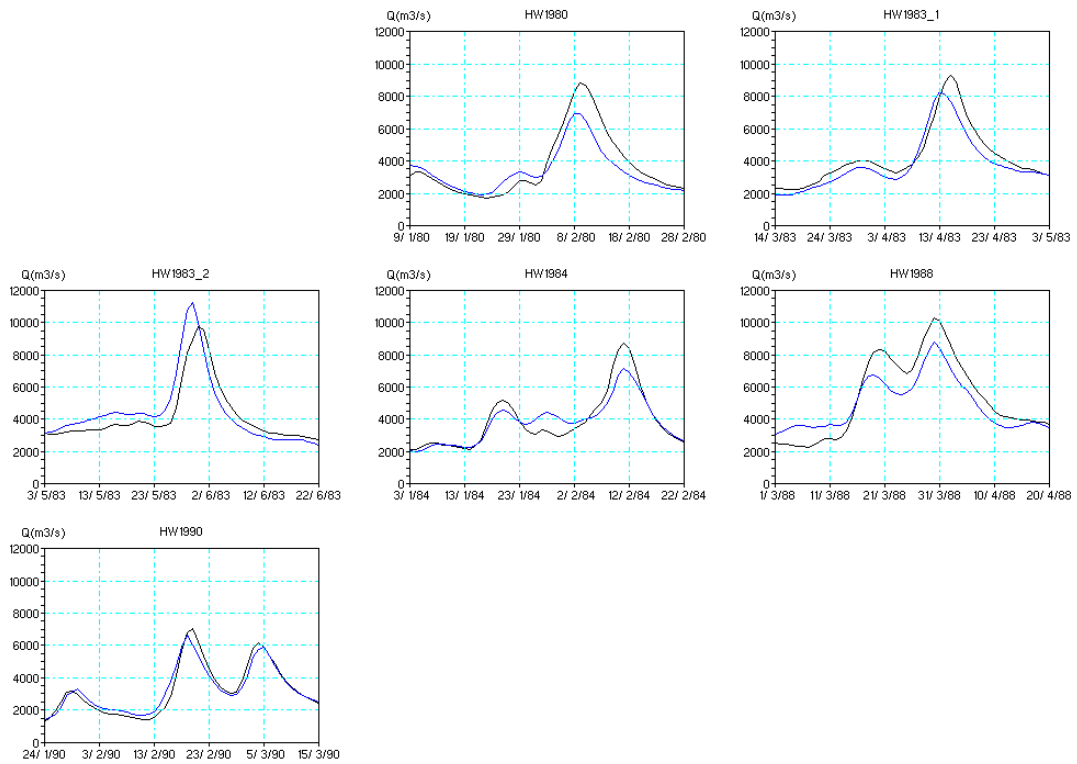
Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (temps de délai à Cochem, jours)	5.9	5.4	5.8
X2 (temps de délai à Obernau, jours)	6.4	8.3	6.6
X3 (temps de délai à Worms, jours)	7.8	6.7	7.5
X4 (coefficient correcteur C)	1.3	1.4	1.3

Tableau 92: Résultats sur les crues à la station de Lobith (3 corrections ETP amont)

Evènement	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-
HW1980	1888	8.3	885
HW1983_1	1064	9.6	657
HW1983_2	-1562	-5.4	927
HW1984	1553	2.0	653
HW1988	1515	8.1	1079
HW1990	399	-0.2	383
HW1993	-	-	-
HW1995	-	-	-



Figure 40: Crues observées et simulées à la station de Lobith (3 corrections ETP amont)





11.5 Annexes 5 : Résultats de l'approche n°4 (couplage de modèles globaux avec un modèle de propagation)

11.5.1 Résultat avec un modèle de propagation à 7 paramètres

Tableau 93: valeurs des paramètres de la propagation, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (ni module neige ni correction ETP)

Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (lag à Cochem, jours)	5.5	5.3	5.3
X2 (réservoir de routage pour Cochem, mm)	4.6	1.1	3.9
X3 (lag à Obernau, jours)	1.2	3.4	1.6
X4 (réservoir de routage pour Obernau, mm)	1.9	3.5	2.8
X5 (lag à Worms, jours)	5.2	5.9	5.5
X6 (réservoir de routage pour Worms, mm)	8.0	9.9	8.6
X7 (coefficient correcteur C)	3.4	3.3	3.3

Tableau 94: valeurs des paramètres de la propagation, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (3 corrections ETP amont)

Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (lag à Cochem, jours)	5.5	4.8	8.2
X2 (réservoir de routage pour Cochem, mm)	4.6	3.3	3.8
X3 (lag à Obernau, jours)	1.2	3.1	1.6
X4 (réservoir de routage pour Obernau, mm)	1.1	3.4	3.1
X5 (lag à Worms, jours)	5.3	5.7	2.4
X6 (réservoir de routage pour Worms, mm)	7.6	9.9	18.3
X7 (coefficient correcteur C)	3.4	3.3	3.3



Tableau 95: Résultats sur les crues à la station de Lobith (ni module neige ni correction ETP)

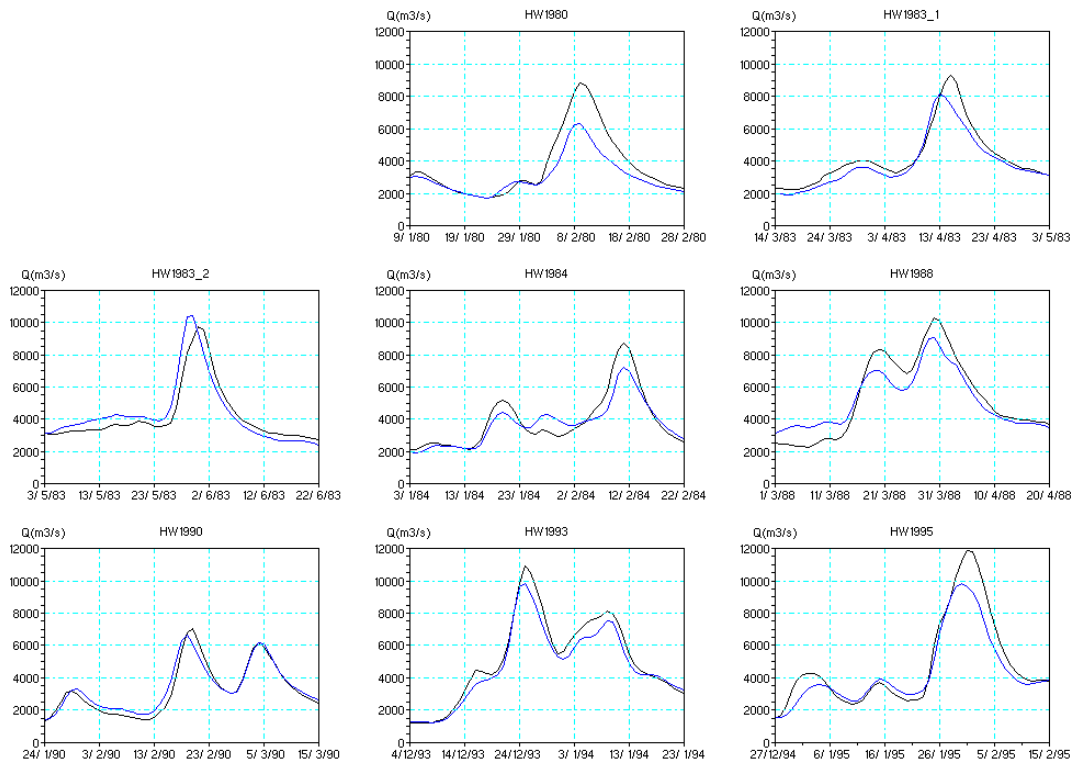
Evènement	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-
HW1980	2198	9.8	953
HW1983_1	1219	5.8	649
HW1983_2	646	6.9	763
HW1984	1279	-1.1	652
HW1988	1466	1.0	1064
HW1990	182	-9.2	505
HW1993	1210	4.7	523
HW1995	1862	1.2	861

Tableau 96: Résultats sur les crues à la station de Lobith (3 puis 2 corrections ETP amont)

Evènement	GR4J+3 corrections ETP amont			GR4J+2 corrections ETP amont		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-	-	-	-
HW1980	2612	17.8	1093	2506	16.8	1060
HW1983_1	1266	9.6	600	1162	8.6	581
HW1983_2	-683	-2.5	707	-736	-3.2	730
HW1984	1410	3.9	662	1450	4.3	669
HW1988	1225	3.4	878	1215	3.2	876
HW1990	389	-3.5	384	391	-3.6	385
HW1993	1085	7.6	562	1114	7.8	570
HW1995	2054	9.0	901	2070	9.0	901



Figure 41: Crues observées et simulées à la station de Lobith (2 corrections ETP amont)





11.5.2 Résultat avec un modèle de propagation à 4 paramètres

Tableau 97: valeurs des paramètres de la propagation, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (ni module neige ni correction ETP)

Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (lag à Cochem, jours)	5.6	4.6	5.3
X2 (lag à Obernau, jours)	1.0	4.5	1.6
X3 (lag à Worms, jours)	15.1	14.5	14.9
X4 (coefficient correcteur C)	3.4	3.3	3.3

Tableau 98: valeurs des paramètres de la propagation, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (3 corrections ETP amont)

Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (lag à Cochem, jours)	5.7	4.5	5.3
X2 (lag à Obernau, jours)	1.1	4.6	1.6
X3 (lag à Worms, jours)	15.1	14.7	15.1
X4 (coefficient correcteur C)	3.4	3.3	3.3

Tableau 99: Résultats sur les crues à la station de Lobith (ni module neige ni correction ETP)

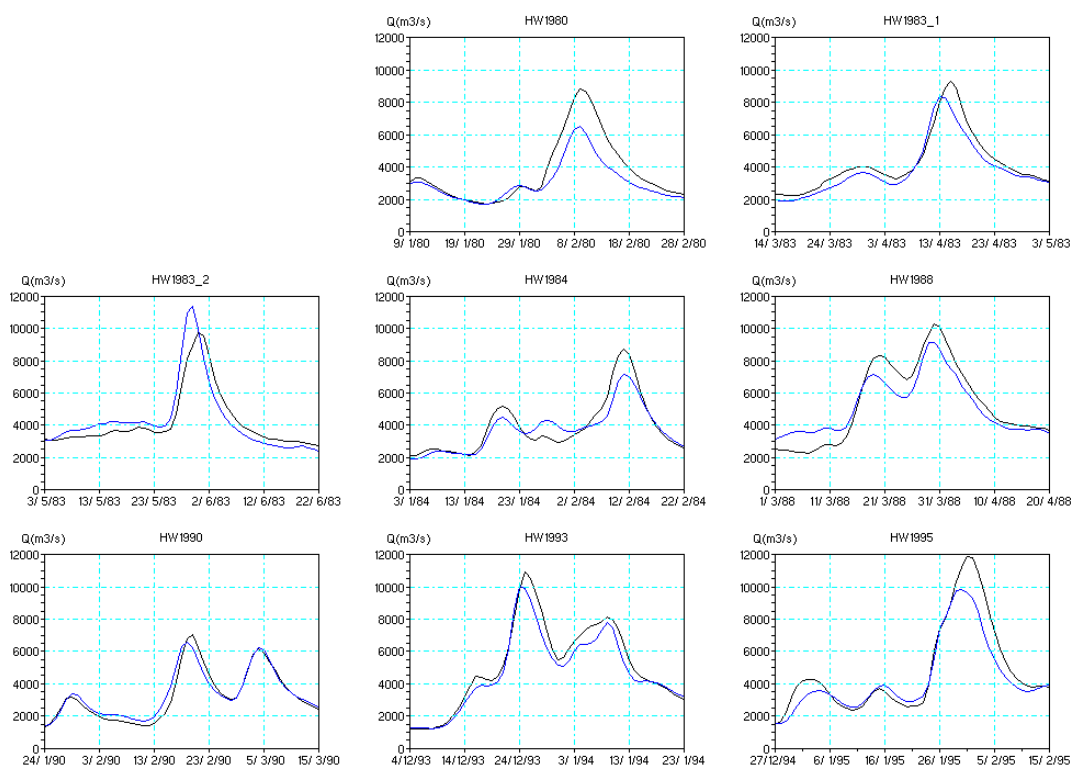
Evènement	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-
HW1980	2001	10.2	944
HW1983_1	1115	6.0	655
HW1983_2	80	7.2	807
HW1984	1388	-0.8	634
HW1988	1324	1.3	1078
HW1990	318	-8.9	508
HW1993	1042	4.9	571
HW1995	1830	1.4	907



Tableau 100: Résultats sur les crues à la station de Lobith (3 puis 2 corrections ETP amont)

Evènement	GR4J+3 corrections ETP amont			GR4J+2 corrections ETP amont		
	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)	Ecart des pics (m ³ /s)	Diff Acc (%)	RMSE (m ³ /s)
HW1970	-	-	-	-	-	-
HW1980	2397	18.1	1083	2290	17.1	1050
HW1983_1	1070	9.8	602	956	8.8	583
HW1983_2	-1620	-2.1	829	-1691	-2.8	852
HW1984	1504	4.1	647	1530	4.5	654
HW1988	1125	3.8	887	1115	3.6	885
HW1990	466	-3.1	381	468	-3.2	383
HW1993	862	7.9	617	900	8.1	623
HW1995	2033	9.3	948	2049	9.3	949

Figure 42: Crues observées et simulées à la station de Lobith (2 corrections ETP amont)





11.5.3 Résultat avec un modèle de propagation à 9 et 10 paramètres

Tableau 101: valeurs des 10 paramètres de la propagation, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (2 corrections ETP amont)

Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (atténuation à Cochem, adimensionnel)	12.4	27.2	15.8
X2 (lag à Cochem, jours)	5.8	3.9	6.3
X3 (réservoir de routage pour Cochem, mm)	3.9	5.2	2.1
X4 (atténuation à Obernau, adimensionnel)	592.7	17.4	92.2
X5 (lag à Obernau, jours)	1.1	1.0	1.9
X6 (réservoir de routage pour Obernau, mm)	5.4	34.7	2.1
X7 (atténuation à Worms, adimensionnel)	7.4	6.8	7.4
X8 (lag à Worms, jours)	9.9	6.4	12.7
X9 (réservoir de routage pour Worms, mm)	10.3	17.4	9.5
X10 (coefficient correcteur C)	1.6	1.7	1.7

Tableau 102: valeurs des 9 paramètres de la propagation, station de Lobith avec les précipitations de Cochem, Obernau et Worms (2 corrections ETP amont)

Paramètre	P ₁	P ₂	P _{total}
X1 (atténuation à Cochem, adimensionnel)	13.3	6.1	4.8
X2 (lag à Cochem, jours)	12.7	3.8	4.7
X3 (réservoir de routage pour Cochem, mm)	1.2	6.0	5.7
X4 (atténuation à Obernau, adimensionnel)	488.7	3.4	7.4
X5 (lag à Obernau, jours)	1.0	1.2	1.8
X6 (réservoir de routage pour Obernau, mm)	1.2E+143	11.1	1.9
X7 (atténuation à Worms, adimensionnel)	1.7	2.7	2.7
X8 (lag à Worms, jours)	3.4E+39	6.2	6.8
X9 (réservoir de routage pour Worms, mm)	+ inf.	23.9	17.4



Figure 43: Crues observées et simulées à la station de Lobith (2 corrections ETP amont), propagation à 10 paramètres

