

La Région
Grand Est

REGION GRAND EST

ETUDE SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE 12 SOUS-BASSINS VERSANTS DE LA MOSELLE

Rapport

N° : 23F-098-RP-2

Révision n° : B

Date : 19/12/2023

Votre contact :
Olivier BARBET
barbet@isl.fr



// Etiages de référence

ISL Ingénierie SAS – PARIS
75 boulevard Mac Donald
75019 – Paris
France
Tel : +33.1.55.26.99.99
Fax : +33.1.40.34.63.36

www.isl.fr

ISL
Ingénierie

Visa

Document verrouillé du 19/12/2023.

Révision	Date	Auteur	Chef de Projet	Superviseur	Commentaire
A	15/11/2023	NLE	OBA	OBA	Version finale suite au COPIL du 23 novembre 2023
B	19/12/2023	NLE	OBA	BSE	

BSE : SEUROT Benjamin

NLE : LEFLOCH Ninon

OBA : BARBET Olivier

Rapport ISL
23F-098-RP-2
Revision B
Etude sur le fonctionnement hydrologique de 1
<http://www.isl.fr/r.php?c=241075>



SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	CONTEXTE GENERAL	1
1.1	OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	1
1.2	PERIMETRE DE L'ETUDE	1
1.3	ORGANISATION DE L'ETUDE.....	2
2	RESUME ET SYNTHESE	4
2.1	METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE	4
2.2	SYNTHESE DES VALEURS PROPOSEES	5
2.2.1	Débits moyens interannuels – modules	5
2.2.2	Débit moyen mensuel d'étiage – QMNA	6
2.2.3	Débit d'étiage de 10 jours consécutifs – VCN10.....	7
2.2.4	Débit d'étiage de 3 jours consécutifs – VCN3.....	9
3	METHODOLOGIE.....	11
3.1	ESTIMATION DES DEBITS MOYENS ET DES DEBITS D'ETIAGE – PREAMBULE 11	
3.2	ECHANTILLONNAGE DES DEBITS MOYENS ET D'ETIAGE	11
3.2.1	Chroniques de débits observés.....	11
3.2.1.1	Constitution de l'échantillon.....	11
3.2.1.2	Limites.....	12
3.2.2	Chroniques de débits reconstitués.....	12
3.2.2.1	Constitution de l'échantillon.....	12
3.2.2.2	Limites.....	12
3.3	ANALYSE STATISTIQUE DES SERIES DES DEBITS JOURNALIERS.....	13
3.3.1	Fréquence empirique	13
3.3.2	Lois d'ajustements.....	13
3.3.2.1	Loi normale ou loi de Gauss.....	13
3.3.2.2	Loi log-normale ou loi de Galton.....	13
3.4	MODELISATION PLUIE-DEBIT	14

3.4.1	Présentation du logiciel GESRES _{ISL}	14
3.4.2	Présentation du modèle GR4J	15
3.4.3	Prise en compte de la neige – module CEMANEIGE	16
3.4.4	Critères de qualité	17
4	CALAGE DU MODELE HYDROLOGIQUE	19
4.1	CONSTRUCTION DU MODELE HYDROLOGIQUE	19
4.2	CALAGE DU MODELE HYDROLOGIQUE	20
4.2.1	Calage initial	20
4.2.1.1	Période d'analyse.....	20
4.2.1.2	Intégration des données relatives aux prélèvements	21
4.2.1.3	Résultats	21
4.3	CALAGE DU MODELE MIS A JOUR.....	23
5	ANALYSE DES CHRONIQUES DE DEBITS OBSERVES	26
5.1	MODULES INTERANNUELS	26
5.2	DEBITS CARACTERISTIQUES D'ETIAGES	26
5.2.1	QMNA.....	26
5.2.2	VCN10.....	27
5.2.3	VCN3	27
6	ANALYSE DES CHRONIQUES DE DEBITS	
	« NATURELS » RECONSTITUES.....	29
6.1	MISE EN ŒUVRE	29
6.2	DEBITS MOYENS INTERANNUELS – MODULES	29
6.3	DEBITS CARACTERISTIQUES D'ETIAGES	30
6.3.1	Débit moyen mensuel d'étiage – QMNA	30
6.3.2	Débit d'étiage de 10 jours consécutifs – VCN10.....	32
6.3.3	Débit d'étiage de 3 jours consécutifs – VCN3.....	33

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 FICHES DE CALAGE 1

TABLE DES FIGURES

Figure 1-1 : Localisation des sous-bassins versants étudiés.....	3
Figure 2-1 : Modules sur le bassin Moselle amont	5
Figure 2-2 : Modules sur le bassin Meurthe-Madon	5
Figure 2-3 : Modules sur le bassin Moselle aval.....	6
Figure 2-4 : Débits caractéristiques QMNA sur le bassin Moselle amont	6
Figure 2-5 : Débits caractéristiques QMNA sur le bassin Meurthe-Madon	6
Figure 2-6 : Débits caractéristiques QMNA sur le bassin Moselle aval.....	7
Figure 2-7 : Débits caractéristiques VCN10 sur le bassin Moselle amont.....	7
Figure 2-8 : Débits caractéristiques VCN10 sur le bassin Meurthe-Madon.....	8
Figure 2-9 : Débits caractéristiques VCN10 sur le bassin Moselle aval.....	8
Figure 2-10 : Débits caractéristiques VCN3 sur le bassin Moselle amont.....	9
Figure 2-11 : Débits caractéristiques VCN3 sur le bassin Meurthe-Madon.....	9
Figure 2-12 : Débits caractéristiques VCN3 sur le bassin Moselle aval.....	10
Figure 3-1 : schéma de base d'un modèle GESRES _{ISL}	14
Figure 3-2 : schéma du modèle hydrologique GR4J.	16
Figure 3-3 : illustration des paramètres entrés pour la modélisation de la neige.	17
Figure 4-1 : Schématisation du modèle hydrologique.....	19
Figure 4-2 : Modification du modèle sur la Moselle aval.....	20
Figure 4-3 : Modification du modèle sur la Moselle amont.....	20
Figure 6-1 : Modules sur le bassin Moselle amont	29
Figure 6-2 : Modules sur le bassin Meurthe-Madon	30
Figure 6-3 : Modules sur le bassin Moselle aval.....	30
Figure 6-4 : Débits caractéristiques QMNA sur le bassin Moselle amont	31
Figure 6-5 : Débits caractéristiques QMNA sur le bassin Meurthe-Madon	31
Figure 6-6 : Débits caractéristiques QMNA sur le bassin Moselle aval.....	31
Figure 6-7 : Débits caractéristiques VCN10 sur le bassin Moselle amont.....	32
Figure 6-8 : Débits caractéristiques VCN10 sur le bassin Meurthe-Madon.....	32
Figure 6-9 : Débits caractéristiques VCN10 sur le bassin Moselle aval.....	33
Figure 6-10 : Débits caractéristiques VCN3 sur le bassin Moselle amont.....	33
Figure 6-11 : Débits caractéristiques VCN3 sur le bassin Meurthe-Madon.....	34
Figure 6-12 : Débits caractéristiques VCN3 sur le bassin Moselle aval.....	34

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 4-1 : critères de qualité du calage du modèle hydrologique initial	22
Tableau 4-2 : critères de qualité du calage du modèle hydrologique mis à jour.....	24
Tableau 4-3 : Comparaison des indicateurs de performance avant et après la mise à jour du modèle	25
Tableau 5-1 : Stations hydrométriques disponibles	26
Tableau 5-2 : Modules aux points dotés de stations hydrométriques	26
Tableau 5-3 : QMNA aux points dotés de stations hydrométriques	27
Tableau 5-4 : VCN10 aux points dotés de stations hydrométriques	27
Tableau 5-5 : VCN3 aux points dotés de stations hydrométriques	28

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE GENERAL

Le bassin versant de la Moselle couvre une superficie d'environ 28 000 km² répartis sur les territoires français (pour sa partie amont), luxembourgeois et allemands, où elle conflue avec le Rhin à Coblenz (Koblenz).

Sa source est située dans les Vosges sur les hauteurs de Bussang.

Le bassin versant subit régulièrement des « crises hydrologiques », crues et étiages. Sur le territoire français, les crues sont susceptibles d'impacter un total d'environ 69 000 habitants et 42 000 emplois répartis sur les 5 territoires à risque important d'inondation (TRI). Les périodes d'étiages prononcées peuvent altérer la ressource en eau (quantitativement et qualitativement) et impacter les activités économiques sur le bassin.

De nombreuses démarches d'études et de programmes d'actions portées par différents maîtres d'ouvrage sont en cours sur le bassin versant. Dans un souci de cohérence, la Région Grand Est (au titre de sa compétence animation-concertation dans le domaine de la ressource en eau) et la DREAL ont initié depuis 2019 une démarche afin de mutualiser les projets et sujets à l'échelle du bassin versant de la Moselle française.

En complément des PAPI, plusieurs autres démarches d'études, animation et travaux entrant dans le champ de la compétence GEMAPI sont réalisées sur le bassin de la Moselle. La Région Grand Est a, au titre de sa compétence en animation-concertation dans le domaine de la ressource en eau (al.12 L211-7 code de l'environnement), porté sur la période 2020-2022 une étude sur le fonctionnement hydrologique global du bassin versant de la Moselle française, en partenariat avec le Syndicat Mixte Moselle Aval et l'ensemble des acteurs du territoire.

1.1 OBJECTIFS DE L'ETUDE

La Région Grand Est et ses partenaires souhaitent décliner la méthodologie appliquée pour l'étude sur le fonctionnement hydrologique global du bassin versant de la Moselle française sur 12 sous-bassins versants, et déterminer par la méthode statistique ou analytique adéquate, ou par des modélisations hydrologiques adaptées le cas échéant, les débits de référence de crues, mais également d'étiage.

1.2 PERIMETRE DE L'ETUDE

Les sous-bassins versants concernés sont les suivants. Sauf mention contraire, les résultats pour chaque sous-bassin versant sont attendus à l'exutoire du cours d'eau correspondant, soit à sa confluence avec le cours principal de la Moselle.

- Bassin versant Moselle amont
 - o Le Neuné
 - o Le Bouchot
 - o La Cleurie
 - o La Niche
- Bassin versant Meurthe-Madon
 - o Le Brénon
 - o La Mortagne à Mont-sur-Meurthe (confluence avec la Meurthe)
 - o La Fave
 - o Le Rabodeau
- Bassin versant Moselle aval

- Le Feigne
- La Mance
- Le Helpert
- Le ruisseau du Beaume-Haie (incluant son affluent le ruisseau du Moulon)

1.3 ORGANISATION DE L'ETUDE

Le présent rapport traite de la partie de l'étude pour la partie débits moyens et débits d'étiages. Il comprend les chapitres suivants :

- Chapitre 2: Résumé et synthèse ;
- Chapitre 3: Méthodologie ;
- Chapitre 4: Calage du modèle hydrologique ;
- Chapitre 5: Analyse des chroniques de débits observés ;
- Chapitre 6: Analyse des chroniques de débits « naturels » reconstitués ;

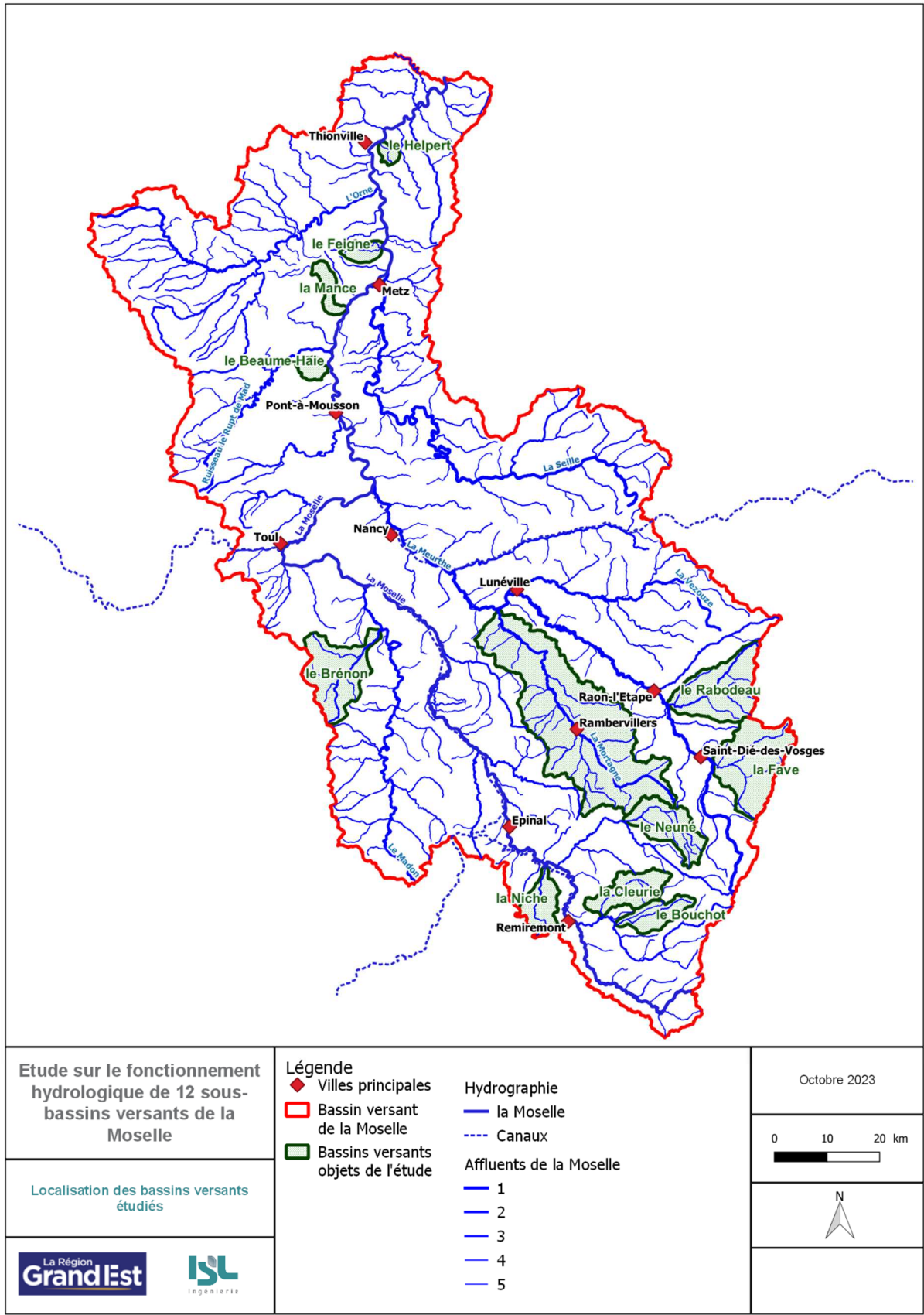


Figure 1-1 : Localisation des sous-bassins versants étudiés

2 RESUME ET SYNTHÈSE

2.1 METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

La méthodologie mise en œuvre pour l'estimation des débits moyens et d'étiages sur la Moselle est reprise de l'étude sur le fonctionnement hydrologique global du bassin versant de la Moselle, et est détaillée au chapitre 3.

L'estimation des débits moyens et d'étiages repose sur une approche statistique. Deux types d'échantillons sont constitués, chacun ayant ses avantages et inconvénients :

- **Echantillonnage à partir des observations aux stations hydrométriques** (cf. chapitre 5) : il s'agit d'utiliser les observations de débits aux stations hydrométriques. Les échantillons sont ainsi construits sur des débits « réels observés ». Pour l'étude des débits d'étiages, l'utilisation des observations présente plusieurs inconvénients. L'estimation des débits en basses eaux à partir des courbes de tarage souffre d'incertitudes assez importantes mises en évidence lors de l'analyse des courbes de tarage menée dans le cadre de l'étude globale. Les débits en basses eaux sont fortement influencés par les usages sur le bassin versant (prélèvements, soutien d'étiage, exhaure des mines) qui eux-mêmes évoluent dans le temps : sur les bassins fortement influencés, les conditions de stationnarité et/ou d'homogénéité des échantillons sont mal ou pas respectées ;
- **Echantillonnage à partir de débits reconstitués par modélisation hydrologique** (cf. chapitre 6) : la modélisation hydrologique permet de reconstituer de longues séries de débits « naturels », indépendamment de l'influence des usages (prélèvements, rejets, gestion des réservoirs, ...). Le principal avantage de cette méthode est de pouvoir disposer de données homogènes à l'échelle du bassin versant sur une période commune. Néanmoins, la modélisation reste une simplification des processus naturels et, par définition, est imparfaite. Par ailleurs, la qualité des reconstitutions dépend de la qualité et de la complétude des données utilisées pour le calage du modèle.

Les échantillons sont constitués en considérant les sous-périodes suivantes :

- Débits moyens annuels : année hydrologique, du mois de septembre de l'année N au mois d'août de l'année N+1 ;
- Débits d'étiage : année civile, du mois de janvier de l'année N au mois de décembre de l'année N.

Au regard des avantages et inconvénients des différentes méthodes, **il est proposé de retenir les chroniques reconstituées par modélisation pour la caractérisation des débits moyens et d'étiages** : le calage du modèle montre des performances plutôt bonnes dans l'ensemble. Les écarts relatifs en basses eaux peuvent être importants mais sont dans l'ordre de grandeur des incertitudes liées aux observations elles-mêmes.

Sur plusieurs sous-bassins, l'indice de confiance accordée aux reconstitutions est modéré : en particulier, les bassins situés sur la Moselle aval (Helpert, Mance, Feigne et Beaume-Haie), pour lesquels on ne dispose d'aucun bassin versant voisin de taille comparable qui soit jaugé (sur une durée suffisante).

Pour l'analyse statistique, la loi log-normale (loi de Galton) a été systématiquement retenue. Pour les débits moyens, les valeurs sont très proches de celles de la loi normale (loi de Gauss). Pour les débits d'étiages, la qualité des ajustements est globalement meilleure avec la loi log-normale.

2.2 SYNTHÈSE DES VALEURS PROPOSÉES

Les tableaux suivants récapitulent l'ensemble des débits moyens et d'étiages qu'il est proposé de retenir pour les 12 sous-bassins versants étudiés.

Les intervalles d'incertitudes correspondent aux intervalles de confiance à 70 % sur les ajustements statistiques.

L'ensemble des débits présentés dans les tableaux suivants sont exprimés en m³/s.

2.2.1 DÉBITS MOYENS INTERANNUELS – MODULES

Module (m ³ /s)	Bouchot à Vagney	Cleurie à son exutoire	Neuné à Laveline-	Niche à Arches
Bassin versant	54 km ²	77 km ²	96 km ²	61 km ²
20 ans sec	1,2 [1,1-1,2]	1,9 [1,8-2]	1,7 [1,6-1,8]	0,8 [0,7-0,8]
10 ans sec	1,3 [1,2-1,3]	2,1 [2-2,2]	1,9 [1,8-2]	0,8 [0,8-0,9]
5 ans sec	1,4 [1,3-1,5]	2,3 [2,2-2,4]	2,1 [2-2,2]	1,0 [0,9-1]
Mediane	1,7 [1,7-1,8]	2,8 [2,7-2,9]	2,6 [2,5-2,7]	1,2 [1,1-1,3]

Figure 2-1 : Modules sur le bassin Moselle amont

Module (m ³ /s)	Mortagne à son exutoire	Fave à Saint-Dié des Vosges	Brénon à Autrey	Rabodeau à Moyenmoutier
Bassin versant	584 km ²	179 km ²	144 km ²	153 km ²
20 ans sec	3,9 [3,5-4,1]	2,2 [2-2,4]	1,0 [0,9-1,1]	2,5 [2,38-2,67]
10 ans sec	4,3 [4-4,6]	2,6 [2,3-2,8]	1,1 [1-1,2]	2,7 [2,6-2,9]
5 ans sec	4,9 [4,6-5,2]	3,0 [2,8-3,1]	1,3 [1,2-1,3]	3,0 [2,9-3,2]
Mediane	6,4 [6,1-6,7]	3,8 [3,6-3,9]	1,6 [1,5-1,7]	3,7 [3,5-3,8]

Figure 2-2 : Modules sur le bassin Meurthe-Madon

Module (m3/s)	Beaume Haie à Pagny-sur-	Mance à Ars-sur-Moselle	Feigne à Argancy	Helpert à Yutz
Bassin versant	20 km ²	29 km ²	26 km ²	13 km ²
20 ans sec	0,10 [0,09-0,11]	0,12 [0,11-0,13]	0,10 [0,09-0,11]	0,06 [0,05-0,06]
10 ans sec	0,12 [0,11-0,13]	0,14 [0,12-0,15]	0,12 [0,11-0,13]	0,07 [0,06-0,07]
5 ans sec	0,14 [0,13-0,15]	0,16 [0,15-0,17]	0,14 [0,13-0,15]	0,08 [0,07-0,08]
Mediane	0,18 [0,17-0,19]	0,21 [0,2-0,22]	0,19 [0,18-0,2]	0,10 [0,09-0,11]

Figure 2-3 : Modules sur le bassin Moselle aval

2.2.2 DEBIT MOYEN MENSUEL D'ETIAGE – QMNA

QMNA (m3/s)	Bouchot à Vagney	Cleurie à son exutoire	Neuné à Laveline-	Niche à Arches
Bassin versant	54 km ²	77 km ²	96 km ²	61 km ²
20 ans sec	0,13 [0,11-0,14]	0,23 [0,2-0,26]	0,22 [0,19-0,25]	0,11 [0,1-0,12]
10 ans sec	0,15 [0,14-0,17]	0,28 [0,25-0,31]	0,26 [0,23-0,29]	0,13 [0,12-0,15]
5 ans sec	0,19 [0,17-0,21]	0,35 [0,31-0,38]	0,33 [0,3-0,36]	0,17 [0,15-0,18]
Mediane	0,30 [0,28-0,33]	0,53 [0,49-0,57]	0,50 [0,46-0,55]	0,25 [0,23-0,27]

Figure 2-4 : Débits caractéristiques QMNA sur le bassin Moselle amont

QMNA (m3/s)	Mortagne à son exutoire	Fave à Saint-Dié des Vosges	Brénon à Autrey	Rabodeau à Moyenmoutier
Bassin versant	584 km ²	179 km ²	144 km ²	153 km ²
20 ans sec	0,35 [0,31-0,4]	0,19 [0,07-0,28]	0,05 [0,04-0,05]	0,39 [0,339-0,443]
10 ans sec	0,43 [0,38-0,48]	0,34 [0,24-0,42]	0,06 [0,05-0,07]	0,47 [0,42-0,52]
5 ans sec	0,55 [0,49-0,61]	0,52 [0,44-0,6]	0,08 [0,07-0,09]	0,59 [0,53-0,64]
Mediane	0,93 [0,83-1,03]	0,87 [0,8-0,94]	0,14 [0,12-0,15]	0,86 [0,8-0,93]

Figure 2-5 : Débits caractéristiques QMNA sur le bassin Meurthe-Madon

QMNA (m3/s)	Beaume Haie à Pagny-sur-	Mance à Ars-sur- Moselle	Feigne à Argancy	Helpert à Yutz
Bassin versant	20 km ²	29 km ²	26 km ²	13 km ²
20 ans sec	0,008 [0,007-0,009]	0,010 [0,009-0,011]	0,009 [0,008-0,01]	0,005 [0,004-0,006]
10 ans sec	0,010 [0,009-0,011]	0,012 [0,011-0,014]	0,011 [0,01-0,012]	0,006 [0,005-0,007]
5 ans sec	0,012 [0,011-0,013]	0,015 [0,014-0,017]	0,014 [0,012-0,015]	0,008 [0,007-0,008]
Mediane	0,018 [0,017-0,02]	0,024 [0,022-0,026]	0,022 [0,02-0,023]	0,012 [0,011-0,013]

Figure 2-6 : Débits caractéristiques QMNA sur le bassin Moselle aval

2.2.3 DEBIT D'ETIAGE DE 10 JOURS CONSECUTIFS – VCN10

VCN10 (m3/s)	Bouchot à Vagney	Cleurie à son exutoire	Neuné à Laveline- devant- Bruyères	Niche à Arches
Bassin versant	54 km ²	77 km ²	96 km ²	61 km ²
20 ans sec	0,10 [0,09-0,11]	0,18 [0,16-0,2]	0,18 [0,16-0,2]	0,09 [0,08-0,1]
10 ans sec	0,12 [0,11-0,13]	0,21 [0,19-0,23]	0,21 [0,19-0,23]	0,11 [0,1-0,12]
5 ans sec	0,15 [0,13-0,16]	0,25 [0,23-0,28]	0,26 [0,23-0,28]	0,13 [0,12-0,15]
Mediane	0,22 [0,2-0,23]	0,37 [0,34-0,4]	0,37 [0,35-0,4]	0,20 [0,18-0,21]

Figure 2-7 : Débits caractéristiques VCN10 sur le bassin Moselle amont

VCN10 (m3/s)	Mortagne à son exutoire	Fave à Saint-Dié des Vosges	Brénon à Autrey	Rabodeau à Moyenmoutier
Bassin versant	584 km ²	179 km ²	144 km ²	153 km ²
20 ans sec	0,31 [0,28-0,35]	0,26 [0,22-0,29]	0,04 [0,03-0,05]	0,33 [0,295-0,364]
10 ans sec	0,37 [0,33-0,4]	0,31 [0,28-0,35]	0,05 [0,04-0,06]	0,38 [0,35-0,42]
5 ans sec	0,45 [0,41-0,49]	0,39 [0,35-0,42]	0,06 [0,06-0,07]	0,46 [0,42-0,5]
Mediane	0,68 [0,62-0,74]	0,57 [0,53-0,62]	0,10 [0,09-0,11]	0,65 [0,61-0,7]

Figure 2-8 : Débits caractéristiques VCN10 sur le bassin Meurthe-Madon

VCN10 (m3/s)	Beaume Haie à Pagny-sur-	Mance à Ars-sur- Moselle	Feigne à Argancy	Helpert à Yutz
Bassin versant	20 km ²	29 km ²	26 km ²	13 km ²
20 ans sec	0,007 [0,006-0,008]	0,009 [0,008-0,01]	0,008 [0,007-0,009]	0,004 [0,004-0,005]
10 ans sec	0,008 [0,007-0,009]	0,011 [0,01-0,012]	0,010 [0,009-0,011]	0,005 [0,005-0,006]
5 ans sec	0,010 [0,009-0,011]	0,013 [0,012-0,014]	0,012 [0,011-0,013]	0,006 [0,006-0,007]
Mediane	0,014 [0,013-0,015]	0,019 [0,018-0,021]	0,017 [0,016-0,019]	0,009 [0,009-0,01]

Figure 2-9 : Débits caractéristiques VCN10 sur le bassin Moselle aval

2.2.4 DEBIT D'ETIAGE DE 3 JOURS CONSECUTIFS – VCN3

VCN3 (m3/s)	Bouchot à Vagney	Cleurie à son exutoire	Neuné à Laveline- devant- Bruyères	Niche à Arches
Bassin versant	54 km ²	77 km ²	96 km ²	61 km ²
20 ans sec	0,09 [0,08-0,1]	0,17 [0,15-0,19]	0,17 [0,15-0,19]	0,09 [0,08-0,1]
10 ans sec	0,11 [0,1-0,12]	0,20 [0,18-0,21]	0,20 [0,18-0,22]	0,10 [0,09-0,11]
5 ans sec	0,14 [0,12-0,15]	0,24 [0,22-0,25]	0,24 [0,22-0,26]	0,13 [0,12-0,14]
Mediane	0,20 [0,18-0,21]	0,34 [0,31-0,36]	0,34 [0,32-0,37]	0,18 [0,17-0,19]

Figure 2-10 : Débits caractéristiques VCN3 sur le bassin Moselle amont

VCN3 (m3/s)	Mortagne à son exutoire	Fave à Saint-Dié des Vosges	Brénon à Autrey	Rabodeau à Moyenmoutier
Bassin versant	584 km ²	179 km ²	144 km ²	153 km ²
20 ans sec	0,30 [0,27-0,33]	0,25 [0,21-0,28]	0,04 [0,03-0,04]	0,31 [0,274-0,344]
10 ans sec	0,34 [0,31-0,38]	0,30 [0,26-0,33]	0,05 [0,04-0,05]	0,36 [0,33-0,4]
5 ans sec	0,42 [0,38-0,46]	0,37 [0,33-0,4]	0,06 [0,05-0,07]	0,44 [0,4-0,47]
Mediane	0,63 [0,58-0,69]	0,53 [0,5-0,57]	0,09 [0,08-0,1]	0,62 [0,58-0,66]

Figure 2-11 : Débits caractéristiques VCN3 sur le bassin Meurthe-Madon

VCN3 (m3/s)	Beaume Haie à Pagny-sur-	Mance à Ars-sur- Moselle	Feigne à Argancy	Helpert à Yutz
Bassin versant	20 km ²	29 km ²	26 km ²	13 km ²
20 ans sec	0,007 [0,006-0,008]	0,009 [0,008-0,01]	0,008 [0,007-0,009]	0,004 [0,004-0,005]
10 ans sec	0,008 [0,007-0,009]	0,011 [0,009-0,012]	0,009 [0,008-0,01]	0,005 [0,005-0,006]
5 ans sec	0,010 [0,009-0,01]	0,013 [0,012-0,014]	0,011 [0,01-0,012]	0,006 [0,006-0,007]
Mediane	0,014 [0,013-0,015]	0,019 [0,017-0,02]	0,017 [0,015-0,018]	0,009 [0,008-0,01]

Figure 2-12 : Débits caractéristiques VCN3 sur le bassin Moselle aval

3 METHODOLOGIE

3.1 ESTIMATION DES DEBITS MOYENS ET DES DEBITS D'ETIAGE – PREAMBULE

L'étude des chroniques de débits sur le bassin versant de la Moselle vise à caractériser les débits moyens et les débits d'étiages de différentes périodes de retour.

L'estimation des débits moyens et des débits d'étiages repose sur des méthodes d'analyse statistique du « processus » des débits moyens et des débits d'étiages.

Deux types d'échantillons sont utilisés :

- Les chroniques de débits journaliers observés aux stations hydrométriques ;
- Les chroniques de débits journaliers reconstitués par modélisation pluie-débit.

Les grandeurs étudiées sont les suivantes :

- **Module** : le module est la valeur du débit moyen pluriannuel atteint par un cours d'eau. Il est évalué par la moyenne des débits moyens annuels sur une période d'observations donnée. Il caractérise le débit moyen d'un cours d'eau. Dans la présente étude, le module (et les débits moyens annuels) est déterminé sur l'année hydrologique (du mois de septembre de l'année N au mois d'août de l'année N+1) ;
- **QMNA** : le QMNA (Quantité Mensuelle miNimale Annuelle) est une valeur du débit mensuel d'étiage atteint par un cours d'eau pour une année donnée. Il correspond au débit moyen mensuel le plus faible de l'année donnée. Par exemple, à Epinal sur la Moselle, en 2019, le débit mensuel le plus faible observé est celui du mois de juillet 2019 (4,3 m³/s) : le QMNA de l'année 2019 à Epinal sur la Moselle est ainsi de 4,3 m³/s. Sur le bassin de la Moselle, le QMNA est généralement observé entre juillet et octobre, très rarement en novembre. Dans la présente étude, le QMNA est déterminé sur l'année civile (janvier à décembre) ;
- **VCN3** : le VCN3 (Volume Consécutif miNimal sur 3 jours) est le débit minimal moyen sur trois jours consécutifs atteint par un cours d'eau pour une année donnée. Dans la présente étude, le VCN3 est déterminé sur l'année civile (janvier à décembre) ;
- **VCN10** : les VCN10 est le débit minimal moyen sur dix jours consécutifs atteint par un cours d'eau pour une année donnée. Dans la présente étude, le VCN10 est déterminé sur l'année civile (janvier à décembre).

Chacune de ces valeurs (débit moyen annuel, QMNA, VCN3 et VCN10) est déterminée pour chaque année à partir des chroniques de débits journaliers afin de constituer des échantillons pour l'analyse statistique. Les valeurs statistiques fournies sont : la valeur médiane, la valeur dite « 5 ans secs », la valeur dite « 10 ans secs » et la valeur dite « 20 ans secs ». Ces valeurs correspondent à des probabilités de 1/2, 1/5, 1/10 et 1/20 respectivement. En d'autres termes, chaque année, on a 1 chance sur 2 d'être en dessous de la valeur médiane, 1 chance sur 5 sous la valeur « 5 ans secs » et 1 chance sur 20 sous la valeur « 20 ans secs ». Ces valeurs statistiques permettent de caractériser la sévérité d'un étiage pour une année donnée.

3.2 ECHANTILLONNAGE DES DEBITS MOYENS ET D'ETIAGE

3.2.1 CHRONIQUES DE DEBITS OBSERVES

3.2.1.1 Constitution de l'échantillon

L'échantillonnage est constitué à partir des chroniques de débits observés.

Pour l'étude des modules, les débits moyens inter-annuels sont calculés sur l'année hydrologique, de septembre à août de l'année suivante. Seules les années complètes sont retenues pour constituer les échantillons.

Pour l'étude des débits d'étiages, les débits moyens mensuels et les débits sur 3 et 10 jours consécutifs sont calculés sur la période d'avril à octobre. Pour chaque année, la valeur minimale de chacun des débits caractéristiques est prise en compte pour constituer l'échantillon seulement si la chronique est complète entre avril et octobre (214 jours). Cette méthode permet de garder des années pour lesquelles il y a des lacunes de mesures en hiver qui n'influencent pas la caractérisation des étiages.

Les trois échantillons de débits d'étiages ont par définition la même taille. Cette taille peut être différente de la taille de l'échantillon des modules (par exemple, lorsqu'il y a des lacunes en hiver).

3.2.1.2 Limites

L'utilisation des chroniques de débits observés pour l'étude des débits moyens et d'étiages présentent plusieurs limites.

En premier lieu, il convient de rappeler comment sont établies les chroniques de débits observés : les débits observés sont reconstitués à partir des mesures de niveaux d'eau aux stations hydrométriques. La courbe de tarage permet de traduire les hauteurs d'eau mesurées en débit. Cette courbe de tarage est établie en chaque station hydrométrique sur la base de jaugeages in-situ.

Les principales limites identifiées sont :

- Incertitudes liées à la mesure elle-même : en basses eaux, la mesure de hauteur est très sensible à la présence d'élément perturbateur dans le lit de la rivière, par exemple la végétation, ou encore des modifications de la morphologie du lit de la rivière après une crue ;
- Incertitudes sur la reconstitution des débits en basses eaux à partir des courbes de tarage. Ces incertitudes sont faibles en valeurs absolues (parfois, quelques litres par seconde) mais présentent une erreur relative pouvant être très importante, mise en évidence dans l'analyse des courbes de tarage et des jaugeages réalisée lors de l'étude globale sur la Moselle. De manière générale, les erreurs relatives sont plus élevées en basses eaux qu'en crues ;
- Influence des usages de l'eau : les activités humaines ont profondément modifié les écoulements sur certains cours d'eau. Le soutien d'étiage, les prélèvements pour la navigation, les exhaures minières, sont autant d'usages qui modifient les régimes d'écoulement des cours d'eau, et particulièrement en basses eaux. Ces usages, variables dans le temps, ne permettent pas d'obtenir des échantillons répondant aux conditions d'homogénéité et/ou de stationnarité.

3.2.2 CHRONIQUES DE DEBITS RECONSTITUES

3.2.2.1 Constitution de l'échantillon

L'échantillonnage est constitué à partir des chroniques de débits reconstitués. Par construction, les échantillons sont complets sur toute la période simulée puisqu'il n'y a pas de lacunes.

3.2.2.2 Limites

L'utilisation des chroniques de débits reconstitués par modélisation pour l'étude des débits moyens et d'étiages présentent plusieurs limites, liées au principe même de la modélisation hydrologique :

- La reconstitution est par définition imparfaite : un modèle hydrologique est un outil permettant de reproduire les processus de production de l'écoulement de manière simplifiée. Il ne peut représenter l'ensemble des processus naturels (par exemple, les écoulements souterrains) et dépend des données disponibles pour reproduire les processus artificiels (usages de l'eau) ;

- La qualité des chroniques reconstituées dépend fortement de la qualité du calage qui dépend lui-même de la qualité des données utilisées.

3.3 ANALYSE STATISTIQUE DES SERIES DES DEBITS JOURNALIERS

La technique de traitement des données utilisée pour la caractérisation des débits moyens et d'étiages s'articule autour de la méthode de l'analyse fréquentielle. Cette dernière consiste à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future.

Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel qui n'est autre qu'une équation modélisant le comportement statistique du processus étudié.

Il existe plusieurs modèles qui décrivent la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée (débit, pluie...). C'est du choix du modèle fréquentiel et plus particulièrement de son type que dépendra la validité des résultats de l'analyse fréquentielle. En hydrologie, le choix s'effectue selon la situation hydrologique et la distribution de la série analysée.

3.3.1 FREQUENCE EMPIRIQUE

Pour mener à bien l'analyse statistique, les observations de débits de pointe se voient affectées une fréquence empirique. Pour la présente étude, la fréquence empirique retenue est la suivante :

$$f_i = \frac{i}{N + 1}$$

Avec f_i la fréquence empirique, i le rang (compté dans l'ordre des débits croissants) associé à chaque observation de débit de pointe, N le nombre total d'observations de débits de pointe dans l'échantillon.

3.3.2 LOIS D'AJUSTEMENTS

Deux lois sont retenues pour les ajustements statistiques des débits observés.

3.3.2.1 Loi normale ou loi de Gauss

La loi de Gauss est une loi couramment utilisée pour l'analyse statistique des débits moyens et des débits d'étiages.

La fonction de répartition de cette loi s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot u^2\right) \cdot du$$

Avec $u = \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x}$, avec \bar{x} la moyenne et σ_x l'écart-type des valeurs observées.

Il s'agit d'une loi à deux paramètres.

3.3.2.2 Loi log-normale ou loi de Galton

La loi de Galton est une loi plus adaptée pour l'analyse statistique des étiages. Elle découle de la loi de Gauss par changement de variable.

La fonction de répartition de cette loi s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \frac{1}{k \cdot \sqrt{2\pi}} \int_0^u \frac{1}{u} \exp\left(-\frac{1}{2 \cdot k} \cdot (\ln(u))^2\right) \cdot du$$

Avec $u = \frac{x - X_0}{G}$.

Il s'agit d'une loi à trois paramètres :

- X_0 est le paramètre de position ;
- G est le paramètre d'échelle, positif et différent de zéro ;
- k est le paramètre de forme, positif et différent de zéro.

3.4 MODELISATION PLUIE-DEBIT

3.4.1 PRESENTATION DU LOGICIEL GESRES_{ISL}

Le logiciel GESRES_{ISL} est un logiciel de modélisation hydrologique. Il a été développé spécifiquement par ISL dans le cadre d'études hydrologiques dans des contextes très différents (liste non exhaustive) : modèles du bassin de l'Oudon (1 500 km²), de l'Oise (15 000 km²), du Gard en France ; modèle du bassin du Niger (140 000 km²) en Guinée et Mali ; modèle de la Sanaga (130 000 km²) au Cameroun, modèles des rivières de la région de Ntoun (de 50 à 200 km², Gabon).

Le code de calcul s'articule autour de trois modules :

- Le **module hydrologique** réalise la transformation pluie-débit sur une distribution de bassins versants ;
- Le **module de propagation** assure la propagation et la combinaison des hydrogrammes résultant de la transformation pluie-débit dans le réseau hydrographique ;
- Le **module de calcul des retenues** permet d'intégrer une gestion fine des ouvrages-réservoirs disposés sur le réseau hydrographique.

Pour chaque module, plusieurs modèles théoriques sont disponibles.

Le modèle peut aussi bien être utilisé pour des simulations « événementielles » (typiquement, simulations de crues) que pour des simulations « continues » sur des périodes de plusieurs années.

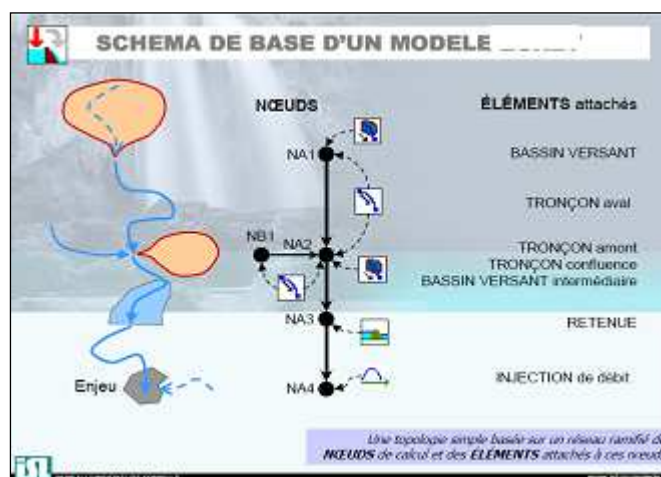


Figure 3-1 : schéma de base d'un modèle GESRES_{ISL}.

L'architecture du modèle s'appuie sur une topologie simplifiée, formée de nœuds de calcul auxquels sont rattachés les éléments producteurs et de contrôle des débits (bassin versant, hydrogramme, retenue) et reliés entre eux par les éléments du réseau hydrographique (biefs).

Le logiciel GESRES_{ISL} est par ailleurs couplé à une base de données géographiques au format QGIS qui permet d'extraire de manière automatique les caractéristiques des différents éléments structurels du modèle.

3.4.2 PRESENTATION DU MODELE GR4J

Le modèle utilisé pour reconstituer les débits sur le bassin de la Moselle française, est un modèle GR4J développé par l'INRAE (ex-IRSTEA, ex-CEMAGREF) et adapté suite à la thèse de Charles Perrin (octobre 2000). Le pas de temps journalier est adapté aux données disponibles (pluies journalières, débits journaliers aux stations hydrométriques et jaugeages ponctuels) et répond aux attentes du Maître d'Ouvrage qui souhaite garder la possibilité d'une interprétation des données à un pas de temps inférieur au mois (VCN3, VCN10).

Le modèle GR4J est un modèle à réservoirs à quatre paramètres optimisables :

- **A** : capacité du réservoir de production (mm)
- **B** : capacité à un jour du réservoir de routage (mm)
- **C** : temps de base de l'hydrogramme unitaire *HU1* (j)
- **D** : coefficient d'échanges souterrains (mm)

Un réservoir de production *S* détermine la partie de la pluie participant à l'écoulement ; une percolation du réservoir de production (réservoir sol) est introduite et l'écoulement s'ajoute à la pluie nette avant séparation des deux composantes d'écoulement. Un réservoir de transfert *R* répartit la pluie en écoulements directs et écoulements indirects. Des échanges sont intégrés entre écoulements directs et indirects.

Dans la fonction de transfert, le débit à l'exutoire est déterminé à partir de 2 hydrogrammes unitaires : le premier (90 %) introduit un décalage progressif entre la pluie brute et la pluie nette, le second (10 %) représente le débit s'écoulant directement à l'exutoire.

Signalons quelques points forts de la modélisation proposée :

- Les paramètres sont en nombre limité (4) ;
- Il existe une procédure automatique de calage développée par l'INRAE. Les paramètres sont optimisés afin de minimiser l'écart entre débits observés et débits calculés sur la base de critères d'évaluation des performances robustes (Nash, critère de bilan, critère relatif d'erreur absolu).

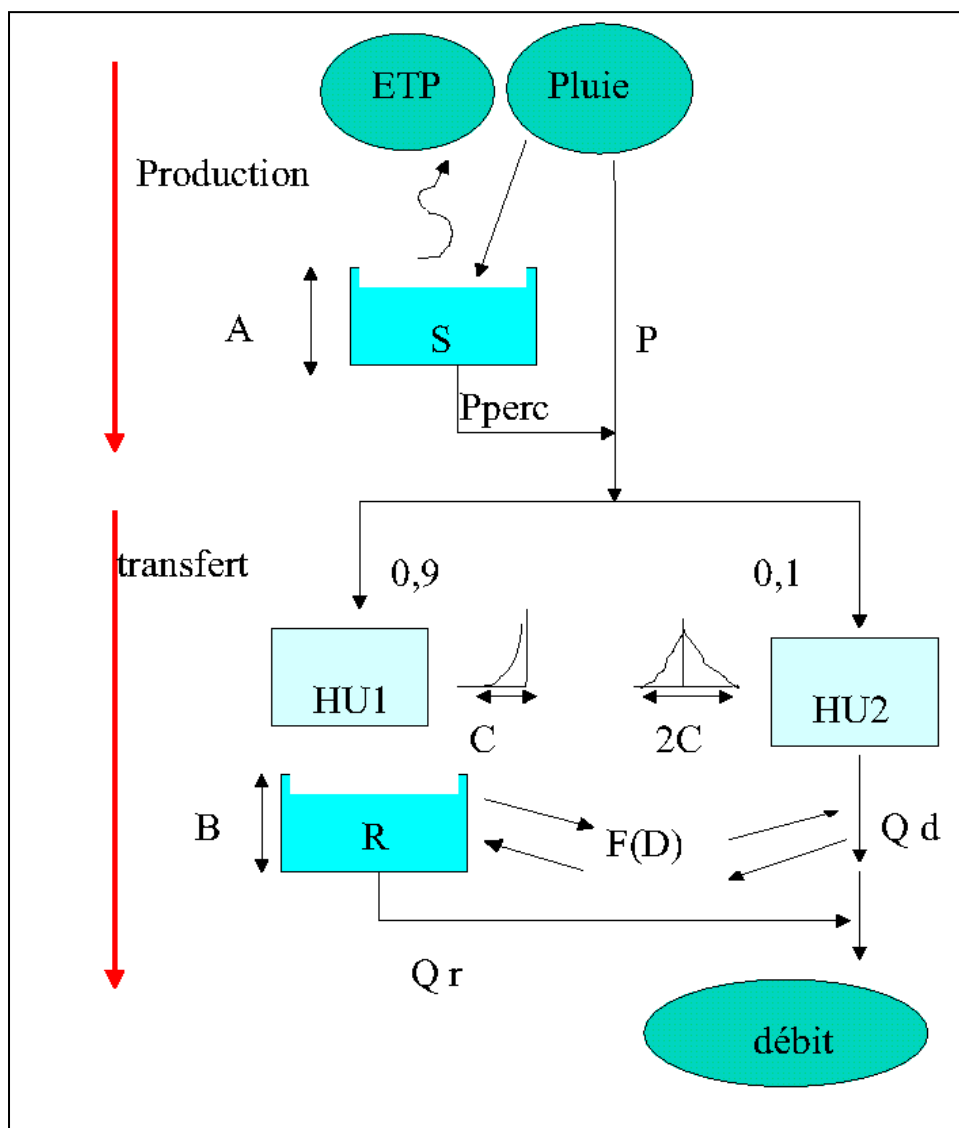


Figure 3-2 : schéma du modèle hydrologique GR4J.

ETP : évapotranspiration potentielle, Pperc : percolation du réservoir sol S, HU1 et HU2 : hydrogrammes unitaires, Q_r : débit ruisselé, Q_d : débit direct

3.4.3 PRISE EN COMPTE DE LA NEIGE – MODULE CEMANEIGE

Un module « neige » a été programmé dans GESRES_{SL} pour améliorer la modélisation des débits à l'exutoire des bassins versants influencés par la neige. Il permet de simuler l'évolution du couvert neigeux sur un bassin versant et d'en estimer la fonte.

Le module s'appuie sur le programme CEMANEIGE (cf. (VALERY, 2010)) développé par l'IRSTEA.

Une discrétisation du bassin versant en zones altitudinales est opérée en associant un pourcentage de superficie du bassin versant à une altitude moyenne par tranche altimétrique. La somme des pourcentages doit être égale à 100 %.

Le module prend en compte deux paramètres développés pour la modélisation hydrologique :

- K_f : coefficient de fonte en mm/°C/jour, généralement compris entre 2 et 6 ;
- C_{tg} : coefficient de pondération pour l'état thermique du manteau, compris entre 0 et 1

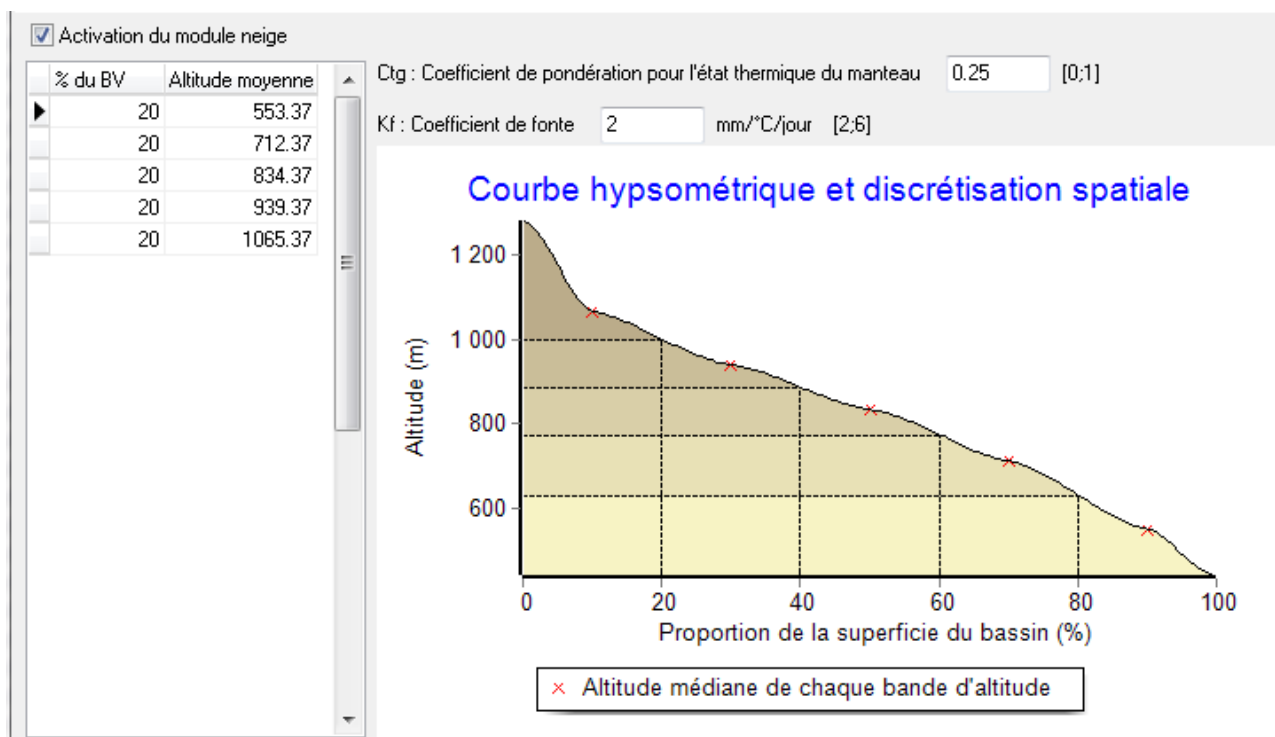


Figure 3-3 : illustration des paramètres entrés pour la modélisation de la neige.

Le module CEMANEIGE intègre les variations de températures selon l'altitude. Pour chaque tranche altimétrique du bassin versant, la température moyenne sur cette tranche (ou zone) est calculée de la manière suivante :

$$T_{zone} = T_{ref} \cdot (Z_{zone} - Z_{ref}) \cdot C_T$$

Avec T_{zone} la température moyenne par tranche altimétrique, Z_{zone} l'altitude moyenne rattachée à cette même tranche altimétrique, T_{ref} la température au poste de référence, Z_{ref} l'altitude du poste de référence et C_T un coefficient de variation de la température en fonction de l'altitude.

La valeur du coefficient C_T est issue de la bibliographie : -0,0065°C/m.

Le module CEMANEIGE prend en compte 3 températures : la température moyenne, la température minimale et la température maximale.

Le module est associé à l'ensemble des sous-bassins du modèle hydrologique, même sur les sous-bassins peu influencés (à l'échelle inter-annuelle) par la neige.

3.4.4 CRITERES DE QUALITE

Outre la comparaison visuelle des chroniques calculées et observées, le logiciel GESRES_{ISL} propose plusieurs critères permettant de juger de la qualité du calage selon les objectifs fixés. Les différents critères retenus sont décrits ci-après.

Critère de Nash:
$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{cal}(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - \overline{Q_{obs}})^2}$$
 ; ce critère doit tendre vers 1 quand les débits

calculés se rapprochent des débits observés. Un critère de Nash nul indique que le modèle ne fait pas mieux que reconstituer la moyenne des débits observés. Il existe plusieurs variantes du critère selon que l'on utilise la racine ou le logarithme du débit (poids plus important donné aux faibles débits).

Coefficient de corrélation : $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{cal}(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i))^2}$; ce critère doit tendre vers 1 quand les débits calculés se rapprochent des débits observés.

Bilan : $Bilan = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{cal}(i) - Q_{obs}(i))}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}(i)}$; au pas de temps journalier, il permet de rendre compte

de la capacité du modèle à restituer le ruissellement en période pluvieuse et l'évapotranspiration en période sèche. Il doit tendre vers 0 et est positif quand le volume est surestimé par le modèle et négatif dans le cas contraire.

Débits des crues : $CRU = 100 * \frac{\overline{Q_{Xcal}}}{\overline{Q_{Xobs}}}$; rapport entre les moyennes des débits calculés et observés supérieurs à quatre fois le module inter-annuel. Il doit tendre vers 100% quand les débits de crues sont bien restitués par le modèle.

Durée des étiages : $RDE = 100 * \frac{NN_{cal}}{NN_{obs}}$; rapport des durées d'étiages égal au nombre de jours où les débits calculés sont inférieurs au quart du module inter-annuel sur le nombre de jours où les débits observés sont inférieurs au quart du module inter-annuel sur le nombre de jours de la période choisie. Doit tendre vers 100.

4 CALAGE DU MODELE HYDROLOGIQUE

4.1 CONSTRUCTION DU MODELE HYDROLOGIQUE

Le modèle hydrologique élaboré lors de l'étude globale de l'hydrologie de la Moselle s'appuie sur une décomposition du bassin versant de la Moselle française en 110 sous-bassins. Ces sous-bassins versants réalisent la transformation pluie-débit, les débits étant injectés dans un nœud exutoire. Les différents nœuds sont reliés entre eux par des biefs qui assurent le transfert des débits d'amont en aval.

Les bassins versants initiaux sont redécoupés localement, et les biefs et les nœuds modifiés de manière à intégrer les bassins versants complémentaires étudiés. Ce redécoupage concerne les bassins versants de la Moselle aval (le Helpert, le Feigne, la Mance et le Beaume-Haie), ainsi que la Niche, le Bouchot, le Neuné et la partie aval du bassin de la Cleurie. Les bassins restants (la Mortagne, le Brénon, la Fave et le Rabodeau) étaient pris en compte directement dans le modèle d'origine.

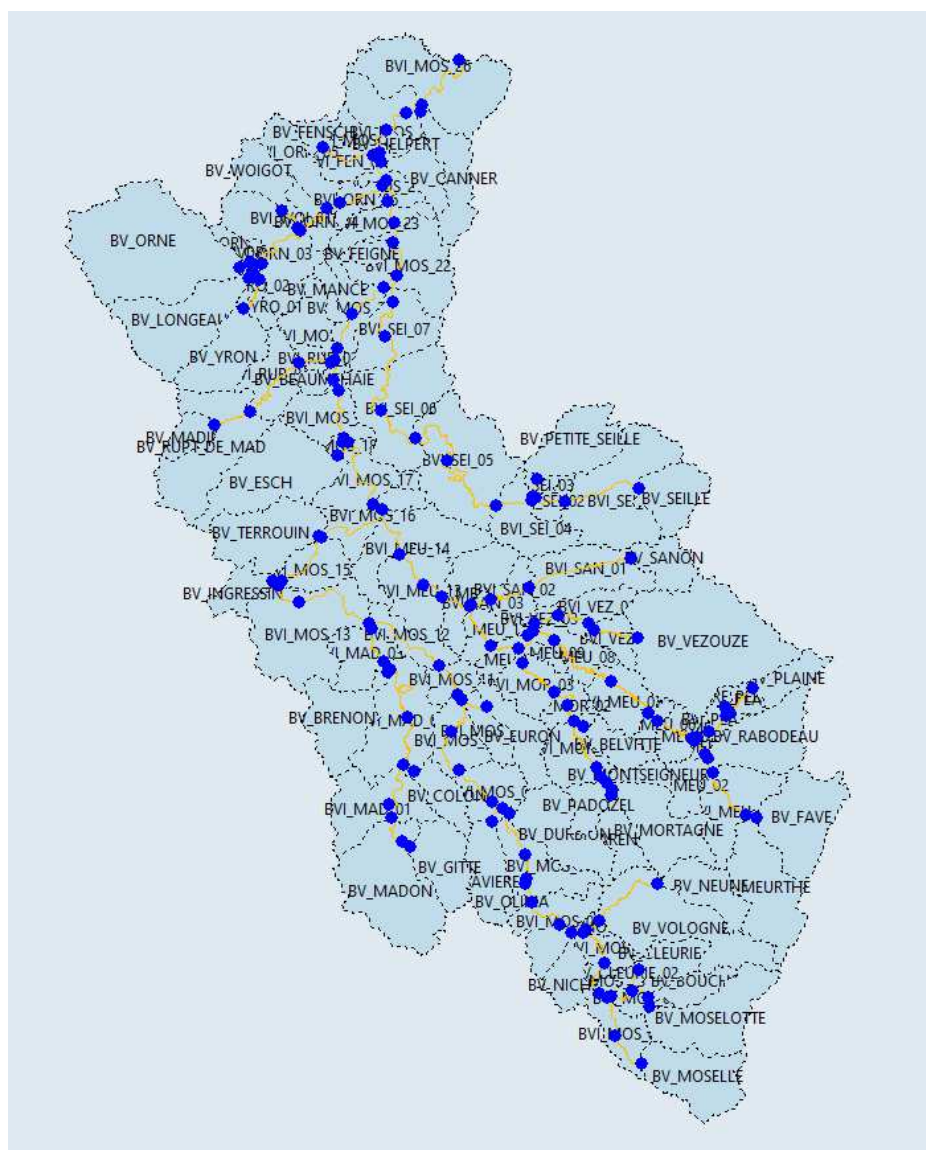


Figure 4-1 : Schématisation du modèle hydrologique

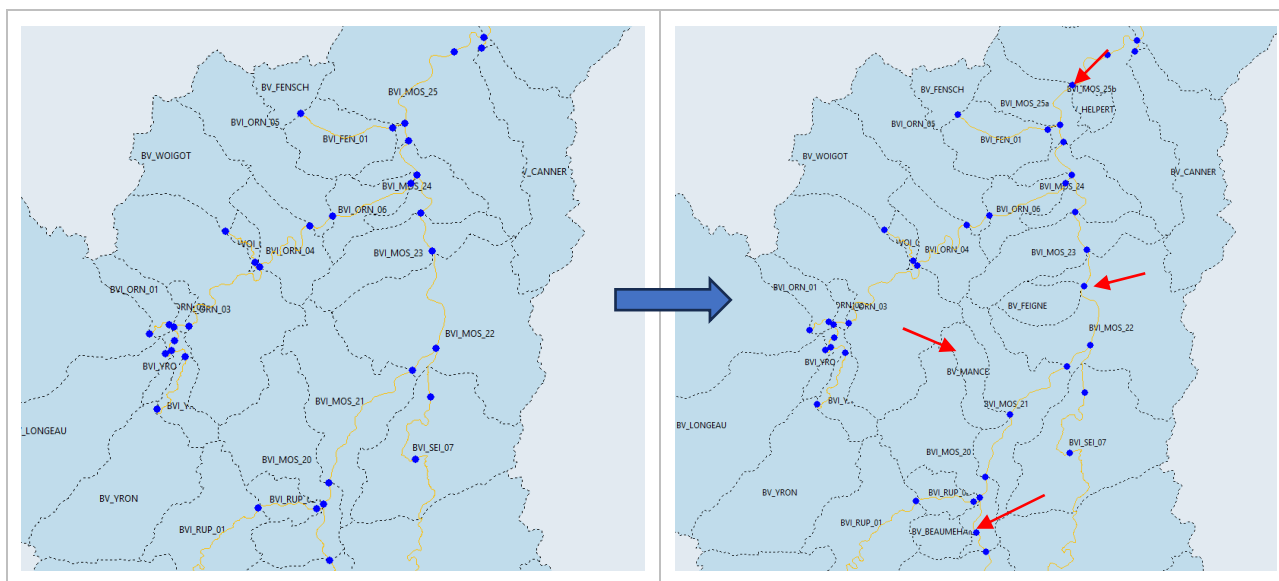


Figure 4-2 : Modification du modèle sur la Moselle aval

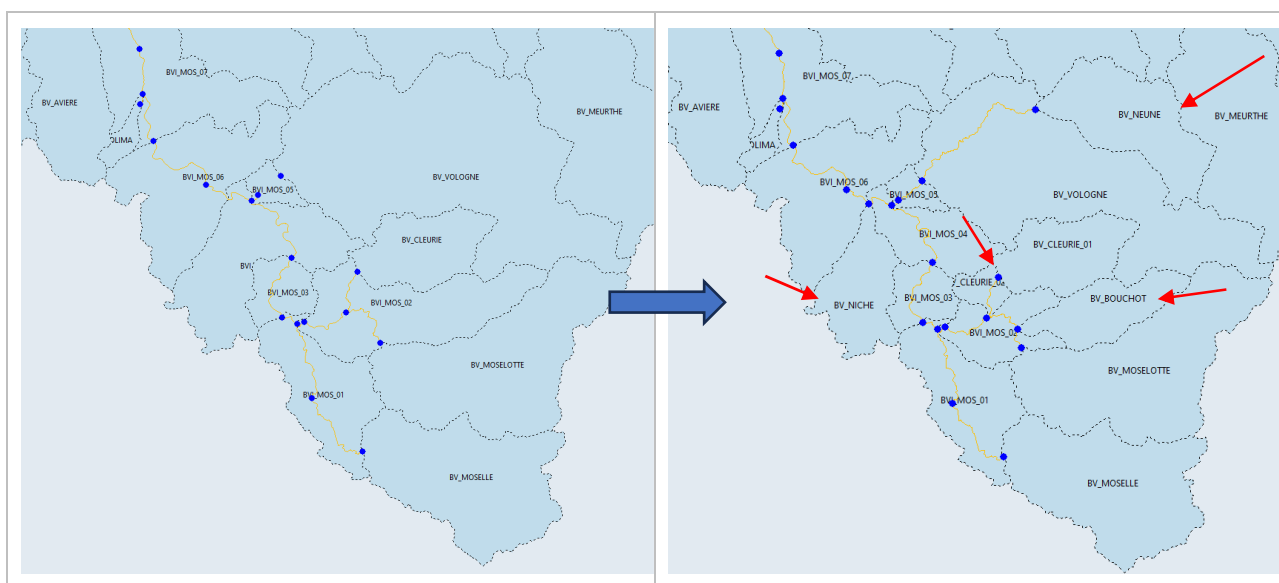


Figure 4-3 : Modification du modèle sur la Moselle amont

4.2 CALAGE DU MODELE HYDROLOGIQUE

4.2.1 CALAGE INITIAL

4.2.1.1 Période d'analyse

Le calage initial du modèle est réalisé sur une période de calcul s'étendant du 1^{er} janvier 1980 au 1^{er} septembre 2020. Elle comprend ainsi 40 années hydrologiques complètes. Les premiers mois de l'année 1980 permettent l'initialisation des modèles GR4J et ne sont pas prises en compte dans les résultats. Les données d'entrée ont été complétées pour assurer la complétude sur toute la période de calcul. Cela concerne les chroniques de pluies et celles de températures. Les chroniques incomplètes sont complétées au pas de temps journalier par corrélation avec les postes voisins.

Au total, 36 chroniques pluviométriques et 8 chroniques de températures sont utilisées en entrée du modèle.

4.2.1.2 Intégration des données relatives aux prélèvements

Les données de prélèvements sont très parcellaires, rarement au pas de temps journalier, parfois mensuel, le plus souvent annuel. Pour les besoins de l'étude, une répartition mensuelle des prélèvements est opérée. Seuls les prélèvements en eaux de surface sont intégrés dans la modélisation. Pour des raisons de simplification, les prélèvements les plus faibles ne sont pas pris en compte et les prélèvements proches peuvent être regroupés en un unique prélèvement dans le modèle.

Au total, 22 points de prélèvements sont intégrés dans la modélisation. Le volume total ainsi prélevé est d'environ 585 Mm³ en moyenne par an, soit un débit équivalent moyen annuel de 18,5 m³/s. Les prélèvements pour l'alimentation des canaux représentent près de 80 % du total.

Aucun point de rejet n'est intégré faute d'informations suffisantes sur les débits qui retournent dans les cours d'eau. Il s'agit là d'une hypothèse très défavorable qui tend à sous-estimer les débits, en particulier d'étiages (l'influence des prélèvements est faible pour les crues de manière générale), pour les points situés en aval des rejets et notamment des canaux : une part non négligeable des volumes prélevés pour les canaux retourne dans les cours d'eau.

4.2.1.3 Résultats

Le Tableau 4-1 récapitule les principaux critères de qualité du calage permettant d'en avoir une appréciation qualitative.

De manière globale, le calage est jugé bon sur toute la partie amont, Moselle et Meurthe. A Uckange, les différents critères sont bons à très bons.

Sur les affluents aval, la qualité du calage est plus contrastée. Sur la Seille, le calage à la station de Moyenvic est plutôt mauvais tandis qu'il est moyen à bon à Metz.

Sur l'Orne, le calage à la station de Boncourt, peu influencée, peut être qualifié de moyen à bon. Sur l'Yron le calage est qualifié de moyen. A l'aval de l'Orne, à Moyeuvre-Grande et Rosselange, le calage est également moyen à bon.

En revanche, sur les bassins versants du Woigot et de la Fensch, fortement influencé par les exhaures minières, le calage est globalement mauvais, avec une sous-estimation importante des débits : sur ces bassins versants, les exhaures ne sont pas précisément connues et ne sont pas intégrées dans la modélisation.

En conclusion, de manière globale, le calage est jugé satisfaisant à l'échelle du bassin versant de la Moselle française avec une prudence dans l'interprétation des résultats sur le bassin ferrifère dans son ensemble (même si le calage est correct sur plusieurs stations).

.

Point de calcul	Station associée	Cours d'eau	Bassin versant	Altitude	Nash Q	Nash racine(Q)	Nash In(Q)	Bilan
7	La Moselle à Saint-Nabord [Noirgueux]	La Moselle	626	371	86.3%	91.0%	92.2%	5.4%
8	La Moselle à Épinal	La Moselle	1217	324	88.7%	91.2%	90.1%	3.8%
29	La Moselle à Toul	La Moselle	3338	201	91.7%	91.7%	84.7%	-6.6%
11	La Meurthe à Saint-Dié	La Meurthe	374	336	84.4%	87.3%	86.8%	8.9%
15	La Vezouze à Lunéville	La Vezouze	559	220	85.5%	85.3%	77.4%	8.3%
28	La Meurthe à Damelevières	La Meurthe	2280	211	91.2%	91.8%	89.2%	3.2%
17	La Meurthe à Laneuveville-devant-Nancy	La Meurthe	2780	200	87.3%	87.7%	75.5%	2.2%
18	La Moselle à Custines	La Moselle	6830	184	91.5%	89.7%	72.5%	-8.0%
25	La Moselle à Uckange	La Moselle	10770	150	90.7%	90.8%	80.8%	-2.5%
33	La Seille à Moyenvic	La Seille	352	199	61.5%	60.1%	49.4%	15.7%
20	La Seille à Metz [pont Lothaire]	La Seille	1280	163	78.3%	81.6%	77.3%	14.0%
23	L'Orne à Boncourt	L'Orne	412	185	75.5%	82.1%	77.7%	2.5%
37	L'Yron à Jarmy [La Cartoucherie]	L'Yron	383	187	73.5%	78.8%	65.6%	-7.4%
35	Le Woigtot à Briey	Le Woigtot	75.8	204	53.0%	56.5%	45.9%	-31.0%
21	L'Orne à Moyeuvre-Grande	L'Orne	1141	170	81.9%	83.3%	75.7%	14.3%
22	L'Orne à Rosselange	L'Orne	1226	164	82.9%	85.0%	77.2%	-5.8%
38	La Fensch à Knutange	La Fensch	28.6	200	-24.0%	-45.7%	-83.6%	-62.9%

Tableau 4-1 : critères de qualité du calage du modèle hydrologique initial

4.3 CALAGE DU MODELE MIS A JOUR

Après intégration des sous-bassins versants correspondant aux points de calcul complémentaires, la qualité du calage est réévaluée en différents points correspondant aux modifications, afin d'examiner l'effet des changements réalisés sur la performance du modèle.

Le calage est ainsi évalué :

- Aux points de calcul complémentaires dotés de stations hydrométriques, afin de comparer la performance du modèle directement aux chroniques disponibles : sur le Neuné à Laveline-devant-Bruyères, sur la Cleurie à Cleurie, et sur la Mortagne à Gerbéviller
- En différents points le long de la Moselle, afin d'évaluer l'impact de ces changements sur le comportement global du modèle : à Epinal, Toul, Custines et Uckange.¹

Des fiches de calage sont fournies en ANNEXE 1. Elles donnent en détail les résultats du calage du modèle en ces différents points de calcul.

Le Tableau 4-2 récapitule les principaux critères de qualité du calage permettant d'avoir une appréciation qualitative de la performance du modèle après sa mise à jour.

Le calage du modèle est jugé bon à très bon sur la Mortagne, moyen à bon sur la Cleurie et le Neuné.

Pour les quatre points de calcul le long de la Moselle, la performance du modèle est jugée bonne à très bonne : les indicateurs restent proches des valeurs obtenues pour le modèle initial, tel que présentés dans le Tableau 4-3.

En conclusion, de manière globale, les modifications apportées au modèle ne modifient pas significativement les résultats obtenus avec le modèle initial. Le calage du modèle mis à jour est ainsi jugé satisfaisant à l'échelle du bassin versant de la Moselle française, avec les mêmes réserves que pour la version initiale du modèle.

¹ Le calage global sur la Meurthe n'est pas vérifié puisque le sous-bassin versant de la Meurthe n'a pas fait l'objet de modification par rapport au modèle initial, les sous-bassins de la Fave, du Rabodeau et de la Mortagne étant déjà intégrés.

Point de calcul	Cours d'eau	Bassin versant	Altitude	Nash Q	Nash racine(Q)	Nash ln(Q)	R ²	Bilan
Le Neuné à Laveline-devant-Bruyères	Le Neuné	96,4	440	75,4%	77,8%	74,5%	0,78	2,1%
La Mortagne à Gerbéviller	La Mortagne	493,0	233	82,2%	83,3%	74,3%	0,85	7,2%
La Cleurie à Cleurie	La Cleurie	63,0	451	72,8%	79,2%	78,0%	0,78	0,4%
La Moselle à Épinal	La Moselle	1217	324	88,1%	90,9%	89,9%	0,90	4,4%
La Moselle à Toul	La Moselle	3338	201	91,8%	91,7%	84,8%	0,92	-6,3%
La Moselle à Custines	La Moselle	6830	184	91,6%	89,7%	72,7%	0,93	-7,8%
La Moselle à Uckange	La Moselle	10770	150	90,7%	90,9%	81,1%	0,92	-2,4%

Tableau 4-2 : critères de qualité du calage du modèle hydrologique mis à jour

Point de calcul	Version du modèle	Nash Q	Nash racine(Q)	Nash ln(Q)	R ²	Bilan
La Moselle à Épinal	2023	88,1%	90,9%	89,9%	0,90	4,4%
	2020	88,7%	91,2%	90,1%	0,91	3,8%
La Moselle à Toul	2023	91,8%	91,7%	84,8%	0,92	-6,3%
	2020	91,7%	91,7%	84,7%	0,92	-6,6%
La Moselle à Custines	2023	91,6%	89,7%	72,7%	0,93	-7,8%
	2020	91,5%	89,7%	72,5%	0,92	-8,0%
La Moselle à Uckange	2023	90,7%	90,9%	81,1%	0,92	-2,4%
	2020	90,7%	90,8%	80,8%	0,92	-2,5%

Tableau 4-3 : Comparaison des indicateurs de performance avant et après la mise à jour du modèle

5 ANALYSE DES CHRONIQUES DE DEBITS OBSERVES

Au total, 3 des sous-bassins versants cibles disposent de stations hydrométriques considérées comme valides.

Numéro de station	Nom de la station	Date de début de la chronique	Date de fermeture / Date de fin de la chronique utilisée
A6731220	La Mortagne à Gerbéviller	01/01/1969	31/7/2019
A4173010	La Cleurie à Cleurie	06/08/1970	30/04/2020
A4333010	Le Neuné à Laveline-devant-Bruyères	26/06/1986	31/12/2022

Tableau 5-1 : Stations hydrométriques disponibles

5.1 MODULES INTERANNUELS

L'ensemble des années disponibles sont exploitées pour constituer les échantillons.

Les valeurs calculées aux 5 stations sont présentées dans le tableau suivant.

Module (m3/s)	Mortagne	Cleurie	Neuné
Bassin versant	584 km ²	77 km ²	96 km ²
20 ans sec	2,9	1,4	1,1
	[2,6-3,2]	[1,2-1,5]	[1-1,3]
10 ans sec	3,4	1,6	1,3
	[3,1-3,6]	[1,4-1,7]	[1,2-1,4]
5 ans sec	4,0	1,8	1,5
	[3,7-4,3]	[1,7-1,9]	[1,4-1,6]
Mediane	5,4	2,3	2,0
	[5,1-5,6]	[2,2-2,4]	[1,9-2,1]

Tableau 5-2 : Modules aux points dotés de stations hydrométriques

5.2 DEBITS CARACTERISTIQUES D'ETIAGES

L'ensemble des années disponibles sont exploitées pour constituer les échantillons.

5.2.1 QMNA

Les valeurs calculées aux quatre points de calcul sont données dans le tableau suivant.

QMNA (m3/s)	Mortagne	Cleurie	Neuné
Bassin versant	584	77 km ²	96 km ²
20 ans sec	0,81	0,20	0,25
	[0,73-0,89]	[0,13-0,26]	[0,21-0,29]
10 ans sec	0,94	0,30	0,30
	[0,86-1,02]	[0,24-0,35]	[0,26-0,34]
5 ans sec	1,13	0,42	0,37
	[1,05-1,21]	[0,37-0,46]	[0,33-0,42]
Mediane	1,60	0,65	0,57
	[1,5-1,7]	[0,61-0,69]	[0,52-0,63]

Tableau 5-3 : QMNA aux points dotés de stations hydrométriques

5.2.2 VCN10

Les valeurs calculées aux quatre points de calcul sont données dans le tableau suivant.

VCN10 (m3/s)	Mortagne	Cleurie	Neuné
Bassin versant	584	77 km ²	96 km ²
20 ans sec	0,60	0,19	0,12
	[0,5-0,69]	[0,14-0,22]	[0,05-0,17]
10 ans sec	0,76	0,25	0,19
	[0,67-0,84]	[0,21-0,28]	[0,13-0,24]
5 ans sec	0,96	0,32	0,28
	[0,88-1,04]	[0,29-0,35]	[0,23-0,33]
Mediane	1,38	0,47	0,46
	[1,31-1,46]	[0,44-0,5]	[0,42-0,51]

Tableau 5-4 : VCN10 aux points dotés de stations hydrométriques

5.2.3 VCN3

Les valeurs calculées aux quatre points de calcul sont données dans le tableau suivant.

VCN3 (m3/s)	Mortagne	Cleurie	Neuné
Bassin versant	584	77 km ²	96 km ²
20 ans sec	0,55	0,17	0,11
	[0,45-0,64]	[0,13-0,2]	[0,05-0,16]
10 ans sec	0,71	0,23	0,17
	[0,61-0,79]	[0,19-0,26]	[0,12-0,22]
5 ans sec	0,90	0,30	0,26
	[0,82-0,98]	[0,27-0,32]	[0,21-0,3]
Mediane	1,31	0,43	0,42
	[1,23-1,38]	[0,41-0,46]	[0,38-0,46]

Tableau 5-5 : VCN3 aux points dotés de stations hydrométriques

6 ANALYSE DES CHRONIQUES DE DEBITS « NATURELS » RECONSTITUES

6.1 MISE EN ŒUVRE

Le modèle hydrologique calé sur la situation observée, il est possible de reconstituer une chronique de débits « naturels » ou non influencés en désactivant l'ensemble des éléments en lien avec les usages de l'eau (prélèvements, barrages-réservoirs, ...).

Ainsi, la chronique 1980-2020 est simulée en désactivant tous les prélèvements ainsi que les retenues d'eau initialement intégrés dans le modèle hydrologique.

Les mêmes traitements statistiques sont ensuite opérés sur les chroniques de débits « naturels ».

Les échantillons comprennent toutes les valeurs annuelles de chaque grandeur étudiées (il n'y a aucune lacune par reconstitution) et les séries sont globalement homogènes (pas d'hétérogénéité dans le temps due à la création d'un ouvrage structurant).

Enfin, les points de calcul correspondant à des nœuds de calcul du modèle hydrologique, aucune loi de transposition des résultats n'est nécessaire.

6.2 DEBITS MOYENS INTERANNUELS – MODULES

Module (m3/s)	Bouchot à Vagney	Cleurie à son exutoire	Neuné à Laveline-	Niche à Arches
Bassin versant	54 km ²	77 km ²	96 km ²	61 km ²
20 ans sec	1,2 [1,1-1,2]	1,9 [1,8-2]	1,7 [1,6-1,8]	0,8 [0,7-0,8]
10 ans sec	1,3 [1,2-1,3]	2,1 [2-2,2]	1,9 [1,8-2]	0,8 [0,8-0,9]
5 ans sec	1,4 [1,3-1,5]	2,3 [2,2-2,4]	2,1 [2-2,2]	1,0 [0,9-1]
Mediane	1,7 [1,7-1,8]	2,8 [2,7-2,9]	2,6 [2,5-2,7]	1,2 [1,1-1,3]

Figure 6-1 : Modules sur le bassin Moselle amont

Module (m3/s)	Mortagne à son exutoire	Fave à Saint-Dié des Vosges	Brénon à Autrey	Rabodeau à Moyenmoutier
Bassin versant	584 km ²	179 km ²	144 km ²	153 km ²
20 ans sec	3,9 [3,5-4,1]	2,2 [2-2,4]	1,0 [0,9-1,1]	2,5 [2,38-2,67]
10 ans sec	4,3 [4-4,6]	2,6 [2,3-2,8]	1,1 [1-1,2]	2,7 [2,6-2,9]
5 ans sec	4,9 [4,6-5,2]	3,0 [2,8-3,1]	1,3 [1,2-1,3]	3,0 [2,9-3,2]
Mediane	6,4 [6,1-6,7]	3,8 [3,6-3,9]	1,6 [1,5-1,7]	3,7 [3,5-3,8]

Figure 6-2 : Modules sur le bassin Meurthe-Madon

Module (m3/s)	Beaume Haie à Pagny-sur-	Mance à Ars-sur-Moselle	Feigne à Argancy	Helpert à Yutz
Bassin versant	20 km ²	29 km ²	26 km ²	13 km ²
20 ans sec	0,10 [0,09-0,11]	0,12 [0,11-0,13]	0,10 [0,09-0,11]	0,06 [0,05-0,06]
10 ans sec	0,12 [0,11-0,13]	0,14 [0,12-0,15]	0,12 [0,11-0,13]	0,07 [0,06-0,07]
5 ans sec	0,14 [0,13-0,15]	0,16 [0,15-0,17]	0,14 [0,13-0,15]	0,08 [0,07-0,08]
Mediane	0,18 [0,17-0,19]	0,21 [0,2-0,22]	0,19 [0,18-0,2]	0,10 [0,09-0,11]

Figure 6-3 : Modules sur le bassin Moselle aval

6.3 DEBITS CARACTERISTIQUES D'ETIAGES

6.3.1 DEBIT MOYEN MENSUEL D'ETIAGE – QMNA

QMNA (m3/s)	Bouchot à Vagney	Cleurie à son exutoire	Neuné à Laveline-	Niche à Arches
Bassin versant	54 km ²	77 km ²	96 km ²	61 km ²
20 ans sec	0,13 [0,11-0,14]	0,23 [0,2-0,26]	0,22 [0,19-0,25]	0,11 [0,1-0,12]
10 ans sec	0,15 [0,14-0,17]	0,28 [0,25-0,31]	0,26 [0,23-0,29]	0,13 [0,12-0,15]
5 ans sec	0,19 [0,17-0,21]	0,35 [0,31-0,38]	0,33 [0,3-0,36]	0,17 [0,15-0,18]
Mediane	0,30 [0,28-0,33]	0,53 [0,49-0,57]	0,50 [0,46-0,55]	0,25 [0,23-0,27]

Figure 6-4 : Débits caractéristiques QMNA sur le bassin Moselle amont

QMNA (m3/s)	Mortagne à son exutoire	Fave à Saint-Dié des Vosges	Brénon à Autrey	Rabodeau à Moyenmoutier
Bassin versant	584 km ²	179 km ²	144 km ²	153 km ²
20 ans sec	0,35 [0,31-0,4]	0,19 [0,07-0,28]	0,05 [0,04-0,05]	0,39 [0,339-0,443]
10 ans sec	0,43 [0,38-0,48]	0,34 [0,24-0,42]	0,06 [0,05-0,07]	0,47 [0,42-0,52]
5 ans sec	0,55 [0,49-0,61]	0,52 [0,44-0,6]	0,08 [0,07-0,09]	0,59 [0,53-0,64]
Mediane	0,93 [0,83-1,03]	0,87 [0,8-0,94]	0,14 [0,12-0,15]	0,86 [0,8-0,93]

Figure 6-5 : Débits caractéristiques QMNA sur le bassin Meurthe-Madon

QMNA (m3/s)	Beaume Haie à Pagny-sur-	Mance à Ars-sur-Moselle	Feigne à Argancy	Helpert à Yutz
Bassin versant	20 km ²	29 km ²	26 km ²	13 km ²
20 ans sec	0,008 [0,007-0,009]	0,010 [0,009-0,011]	0,009 [0,008-0,01]	0,005 [0,004-0,006]
10 ans sec	0,010 [0,009-0,011]	0,012 [0,011-0,014]	0,011 [0,01-0,012]	0,006 [0,005-0,007]
5 ans sec	0,012 [0,011-0,013]	0,015 [0,014-0,017]	0,014 [0,012-0,015]	0,008 [0,007-0,008]
Mediane	0,018 [0,017-0,02]	0,024 [0,022-0,026]	0,022 [0,02-0,023]	0,012 [0,011-0,013]

Figure 6-6 : Débits caractéristiques QMNA sur le bassin Moselle aval

6.3.2 DEBIT D'ETIAGE DE 10 JOURS CONSECUTIFS – VCN10

VCN10 (m3/s)	Bouchot à Vagney	Cleurie à son exutoire	Neuné à Laveline- devant- Bruyères	Niche à Arches
Bassin versant	54 km ²	77 km ²	96 km ²	61 km ²
20 ans sec	0,10 [0,09-0,11]	0,18 [0,16-0,2]	0,18 [0,16-0,2]	0,09 [0,08-0,1]
10 ans sec	0,12 [0,11-0,13]	0,21 [0,19-0,23]	0,21 [0,19-0,23]	0,11 [0,1-0,12]
5 ans sec	0,15 [0,13-0,16]	0,25 [0,23-0,28]	0,26 [0,23-0,28]	0,13 [0,12-0,15]
Mediane	0,22 [0,2-0,23]	0,37 [0,34-0,4]	0,37 [0,35-0,4]	0,20 [0,18-0,21]

Figure 6-7 : Débits caractéristiques VCN10 sur le bassin Moselle amont

VCN10 (m3/s)	Mortagne à son exutoire	Fave à Saint-Dié des Vosges	Brénon à Autrey	Rabodeau à Moyenmoutier
Bassin versant	584 km ²	179 km ²	144 km ²	153 km ²
20 ans sec	0,31 [0,28-0,35]	0,26 [0,22-0,29]	0,04 [0,03-0,05]	0,33 [0,295-0,364]
10 ans sec	0,37 [0,33-0,4]	0,31 [0,28-0,35]	0,05 [0,04-0,06]	0,38 [0,35-0,42]
5 ans sec	0,45 [0,41-0,49]	0,39 [0,35-0,42]	0,06 [0,06-0,07]	0,46 [0,42-0,5]
Mediane	0,68 [0,62-0,74]	0,57 [0,53-0,62]	0,10 [0,09-0,11]	0,65 [0,61-0,7]

Figure 6-8 : Débits caractéristiques VCN10 sur le bassin Meurthe-Madon

VCN10 (m3/s)	Beaume Haie à Pagny-sur-	Mance à Ars-sur- Moselle	Feigne à Argancy	Helpert à Yutz
Bassin versant	20 km ²	29 km ²	26 km ²	13 km ²
20 ans sec	0,007 [0,006-0,008]	0,009 [0,008-0,01]	0,008 [0,007-0,009]	0,004 [0,004-0,005]
10 ans sec	0,008 [0,007-0,009]	0,011 [0,01-0,012]	0,010 [0,009-0,011]	0,005 [0,005-0,006]
5 ans sec	0,010 [0,009-0,011]	0,013 [0,012-0,014]	0,012 [0,011-0,013]	0,006 [0,006-0,007]
Mediane	0,014 [0,013-0,015]	0,019 [0,018-0,021]	0,017 [0,016-0,019]	0,009 [0,009-0,01]

Figure 6-9 : Débits caractéristiques VCN10 sur le bassin Moselle aval

6.3.3 DEBIT D'ETIAGE DE 3 JOURS CONSECUTIFS – VCN3

VCN3 (m3/s)	Bouchot à Vagney	Cleurie à son exutoire	Neuné à Laveline- devant- Bruyères	Niche à Arches
Bassin versant	54 km ²	77 km ²	96 km ²	61 km ²
20 ans sec	0,09 [0,08-0,1]	0,17 [0,15-0,19]	0,17 [0,15-0,19]	0,09 [0,08-0,1]
10 ans sec	0,11 [0,1-0,12]	0,20 [0,18-0,21]	0,20 [0,18-0,22]	0,10 [0,09-0,11]
5 ans sec	0,14 [0,12-0,15]	0,24 [0,22-0,25]	0,24 [0,22-0,26]	0,13 [0,12-0,14]
Mediane	0,20 [0,18-0,21]	0,34 [0,31-0,36]	0,34 [0,32-0,37]	0,18 [0,17-0,19]

Figure 6-10 : Débits caractéristiques VCN3 sur le bassin Moselle amont

VCN3 (m3/s)	Mortagne à son exutoire	Fave à Saint-Dié des Vosges	Brénon à Autrey	Rabodeau à Moyenmoutier
Bassin versant	584 km ²	179 km ²	144 km ²	153 km ²
20 ans sec	0,30 [0,27-0,33]	0,25 [0,21-0,28]	0,04 [0,03-0,04]	0,31 [0,274-0,344]
10 ans sec	0,34 [0,31-0,38]	0,30 [0,26-0,33]	0,05 [0,04-0,05]	0,36 [0,33-0,4]
5 ans sec	0,42 [0,38-0,46]	0,37 [0,33-0,4]	0,06 [0,05-0,07]	0,44 [0,4-0,47]
Mediane	0,63 [0,58-0,69]	0,53 [0,5-0,57]	0,09 [0,08-0,1]	0,62 [0,58-0,66]

Figure 6-11 : Débits caractéristiques VCN3 sur le bassin Meurthe-Madon

VCN3 (m3/s)	Beaume Haie à Pagny-sur-	Mance à Ars-sur- Moselle	Feigne à Argancy	Helpert à Yutz
Bassin versant	20 km ²	29 km ²	26 km ²	13 km ²
20 ans sec	0,007 [0,006-0,008]	0,009 [0,008-0,01]	0,008 [0,007-0,009]	0,004 [0,004-0,005]
10 ans sec	0,008 [0,007-0,009]	0,011 [0,009-0,012]	0,009 [0,008-0,01]	0,005 [0,005-0,006]
5 ans sec	0,010 [0,009-0,01]	0,013 [0,012-0,014]	0,011 [0,01-0,012]	0,006 [0,006-0,007]
Mediane	0,014 [0,013-0,015]	0,019 [0,017-0,02]	0,017 [0,015-0,018]	0,009 [0,008-0,01]

Figure 6-12 : Débits caractéristiques VCN3 sur le bassin Moselle aval

ANNEXE 1 FICHES DE CALAGE