

REGION GRAND EST

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

N° : 23F-098-RP-1

Révision n° : B

Date : 19/12/2023

Votre contact :
Olivier BARBET
barbet@isl.fr



// Crues de référence

Visa

Document verrouillé du 19/12/2023.

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

BSE : SEUROT Benjamin

NLE : LEFLOCH Ninon

OBA : BARBET Olivier

Rapport ISL
23F-098-RP-1
Revision B
Etude sur le fonctionnement hydrologique de 1
<http://www.isl.fr/r.php?c=241059>



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.....	3
2.1	METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE	3
2.1.1	Bassins versants équipés de stations hydrométriques	3
2.1.2	Bassins versants non équipés de stations hydrométriques	4
2.1.3	Cas particuliers des petits bassins versants de la Moselle aval	4
2.2	SYNTHESE DES VALEURS PROPOSEES	5
2.2.1	Moselle amont	5
2.2.2	Meurthe-Madon	6
2.2.3	Moselle aval	7
3	METHODOLOGIE	8
3.1	LA PREDETERMINATION DES DEBITS DE CRUES – PREAMBULE.....	8
3.1.1	Méthodes d'analyse statistiques	8
3.1.2	Méthodes hydro-météorologiques.....	8
3.1.3	Méthodes de simulation stochastiques	8
3.1.4	Construction des hydrogrammes de crues	9
3.2	ANALYSE STATISTIQUE DES DEBITS OBSERVES.....	9
3.2.1	Méthodes d'échantillonnage.....	9
3.2.1.1	Echantillonnage des maxima annuels de débits de pointe – MAXAN	9
3.2.1.2	Echantillonnage des débits de pointe de crues supérieurs à un seuil – SUPSEUIL.....	9
3.2.1.3	Fréquence empirique	10
3.2.2	Lois d'ajustements – échantillonnage MAXAN	10
3.2.2.1	Loi de Gumbel.....	10
3.2.2.2	Loi GEV (valeurs extrêmes)	10

3.2.3	Lois d'ajustements – échantillonnage SUPSEUIL	11
3.2.3.1	Loi exponentielle	11
3.2.3.2	Loi GPD (Pareto généralisée)	11
3.2.4	Tests sur les échantillons	11
3.2.4.1	Test d'indépendance	11
3.2.4.2	Test de stationnarité	11
3.2.4.3	Test d'homogénéité	12
3.3	METHODES HYDRO-METEOROLOGIQUES	12
3.3.1	Méthode du GRADEX	12
3.3.1.1	Formulation	12
3.3.1.2	Hypothèses	12
3.3.2	Méthode du GRADEX progressif ou AGREGEE	13
3.3.2.1	Formulation	13
3.3.2.2	Hypothèses	13
3.3.3	Limites des méthodes pluie-débit s'appuyant sur le gradex des pluies ...	14
3.4	BASE DE DONNEES SHYREG-DEBIT DE 2019	14
3.5	METHODOLOGIE GLOBALE MISE EN ŒUVRE	14
4	LA MOSELLE AMONT	16
4.1	RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES	16
4.2	TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL	17
4.2.1	La Cleurie et le Neuné	17
4.2.2	La Niche	17
4.2.3	Le Bouchot	18
4.2.4	Synthèse	18
4.3	HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE	19
5	LA MEURTHE ET LE MADON	20
5.1	RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES	20
5.2	TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL	21
5.2.1	La Mortagne	21
5.2.2	La Fave	21
5.2.3	Le Brénon	21

5.2.4	Le Rabodeau.....	23
5.2.5	Synthèse	24
5.3	HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE.....	25
6	LA MOSELLE AVAL	26
6.1	RESULTATS AUX EXUTOIRES.....	26
6.2	HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE.....	27
7	SYNTHESE ET HOMOGENEITE DES RESULTATS	29

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1	FICHES STATIONS.....	1
ANNEXE 2	DETAIL DES CALCULS DE DEBITS	2
ANNEXE 3	RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES PAR MODELISATION PLUIE-DEBIT	3
ANNEXE 4	RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES SUR LES PETITS BASSINS VERSANTS DE LA MOSELLE AVAL	14
ANNEXE 5	ESTIMATION DES INTERVALLES D'INCERTITUDE	17

TABLE DES FIGURES

Figure 4-1 : hydrogrammes des crues de références sur la Moselle amont.....	19
Figure 5-1 : hydrogrammes des crues de références sur le territoire Meurthe-Madon.....	25
Figure 6-1 : hydrogrammes des crues de références sur la Moselle aval.....	28
Figure 7-1 : homogénéité sur le sous-bassin de la Moselle amont à Remiremont pour une crue centennale.	29

Figure 7-2 : homogénéité sur les affluents de la Moselle amont entre Remiremont et Toul pour une crue centennale. 30

Figure 7-3 : homogénéité sur les affluents de la Meurthe pour une crue centennale..... 30

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Stations hydrométriques disponibles 3

Tableau 2-2 : Temps de concentration des bassins versants sur la Moselle aval..... 4

Tableau 2-3 : Paramètres pour l'application du GRADEX retenus pour les bassins sur la Moselle aval 5

Tableau 2-4 : débits de crue sur les bassins de la Moselle amont..... 6

Tableau 2-5 : débits de crue sur les bassins du territoire Meurthe-Madon. 6

Tableau 2-6 : débits de crue sur les bassins de la Moselle aval. 7

Tableau 3-1 : échantillons d'hydrogrammes de crues. 15

Tableau 4-1 : débits de crues sur la Moselle amont. 16

Tableau 4-2 : Estimation des débits caractéristiques sur la Niche par analyse régionale 17

Tableau 4-3 : débits de crues sur la Moselle amont. 18

Tableau 4-4 : débits de référence sur la Moselle amont d'après la bibliographie..... 18

Tableau 5-1 : débits de crues sur la Mortagne. 20

Tableau 5-2 : transposition des débits caractéristiques de crue au point de calcul sur la Fave. 21

Tableau 5-3 : estimation des débits caractéristiques de crue sur le Brénon par analyse régionale. 22

Tableau 5-4 : stations de référence proposées pour l'analyse régionale sur le Rabodeau. 23

Tableau 5-5 : estimation des débits caractéristiques de crue sur le Rabodeau par analyse régionale. 23

Tableau 5-6 : débits de crues sur le territoire Meurthe-Madon. 24

Tableau 5-7 : débits de référence sur le territoire Meurthe-Madon d'après la bibliographie..... 24

Tableau 6-1 : débits de crues sur la Moselle aval..... 26

Tableau 6-2 : débits de référence sur la Moselle aval d'après la bibliographie..... 27

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 Coblenze (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 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 (confluence avec la Vologne)
 - o Le Bouchot (confluence avec la Moselotte)
 - o La Cleurie (confluence avec la Moselotte)
 - o La Niche
- Bassin versant Meurthe-Madon
 - o Le Brénon (confluence avec le Madon)
 - o La Mortagne à Mont-sur-Meurthe (confluence avec la Meurthe)
 - o La Fave (confluence avec la Meurthe)
 - o Le Rabodeau (confluence avec la Meurthe)
- 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 de crues. Il comprend les chapitres suivants :

- Chapitre 3 : Méthodologie
- Chapitre 4: La Moselle Amont
- Chapitre 5 : La Meurthe et le Madon
- Chapitre 6 : La Moselle aval
- Chapitre 7 : Synthèse et homogénéité des résultats

2 RESUME ET SYNTHESE

2.1 METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

2.1.1 BASSINS VERSANTS EQUIPES DE STATIONS HYDROMETRIQUES

Au total, 5 des sous-bassins versants cibles disposent de stations hydrométriques.

Code HYDRO	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	31/07/2019
A4173010	La Cleurie à Cleurie	06/08/1970	30/04/2020
A4333010	Le Neuné à Laveline-devant-Bruyères	26/06/1986	31/12/2022
A5422010	Le Brénon à Autrey	07/08/1969	12/06/2007
A6142010	Le Rabodeau à Moyenmoutier	01/01/1971	31/12/1984

Tableau 2-1 : Stations hydrométriques disponibles

Les données aux stations d'Autrey sur le Brénon et de Moyenmoutier sur le Rabodeau ne sont pas retenues dans l'analyse :

- La période d'ouverture de la station de Moyenmoutier sur le Rabodeau est très courte et sa situation proche de la confluence avec la Meurthe laisse penser que les mesures sont influencées par le niveau de la Meurthe ;
- Les mesures à la station du Brénon à Autrey montrent un comportement non stationnaire, la période antérieure à 1994 (environ) faisant apparaître des débits significativement inférieurs à la période postérieure, alors que le secteur a connu des crues importantes avant 1994 (crue d'avril 1983 par exemple).

La méthodologie mise en œuvre pour l'estimation des débits de crues sur la Moselle est détaillée au chapitre 3.

Pour les 3 bassins versants équipés de station hydrométrique, l'estimation des débits de crues s'appuie sur les observations aux stations hydrométriques.

Dans un premier temps, des ajustements statistiques sont opérés sur les débits observés aux stations. Quatre lois d'ajustements sont utilisées, deux sur des échantillonnages de type « débits maximaux annuels » (Gumbel, GEV), et deux sur des échantillonnages de type « débits supérieurs à un seuil » (exponentielle, GPD). Ces ajustements sont utilisés pour l'estimation des débits de crues fréquentes, de périodes de retour de 2 ans à 10 ou 20 ans.

Dans un second temps, des méthodes hydro-météorologiques de type GRADEX sont mises en œuvre pour estimer les débits de crues rares à extrêmes. La méthode classique du GRADEX et la méthode AGREGEE (ou gradex progressif) sont utilisées. Ces méthodes permettent les estimations des crues de périodes de retour 10 ou 20 ans jusqu'à 1 000 ans. La période pivot correspond généralement à la crue de période de retour 10 ans. Le choix entre les deux méthodes se base sur les caractéristiques physiques des bassins versants et, en particulier, la géologie. En cohérence avec l'étude globale de la Moselle, la méthode du GRADEX est retenue pour la Cleurie (sous-bassin de la Moselotte) et la méthode AGREGEE est retenue pour la Mortagne (sous-bassin de la Meurthe) et le Neuné (sous-bassin de la Vologne).

Dans un troisième temps, les hydrogrammes de crues sont construits sur la base d'hydrogrammes de crues normés au droit des stations. Les hydrogrammes retenus sont choisis dans un échantillon d'une trentaine de crues ayant touché tout ou partie du bassin de la Moselle et ses affluents. Selon la période d'ouverture des stations, la taille de l'échantillon peut être plus ou moins réduite. Ainsi, il n'est pas fait de distinction entre les types de crues pour la construction des hydrogrammes moyens normés.

2.1.2 BASSINS VERSANTS NON EQUIPES DE STATIONS HYDROMETRIQUES

Lorsqu'il n'existe pas de données de stations hydrométriques exploitables, la méthodologie est adaptée. Il s'agit des sous-bassins suivants :

- Le Bouchot (sous-bassin de la Moselotte) ;
- La Niche ;
- Le Brénon (sous-bassin du Madon) ;
- La Fave (sous-bassin de la Meurthe) ;
- Le Rabodeau (sous-bassin de la Meurthe).

Pour ces sous-bassins, les débits de pointes sont estimés par relation de type Myers à partir des estimations aux stations hydrométriques voisines (analyse régionale).

La construction des hydrogrammes de crues repose sur la reconstitution de crues historiques par modélisation pluie-débit. Plusieurs crues de différentes intensités sont ainsi reconstituées pour pouvoir établir un hydrogramme moyen normé en chacun de ces 5 sous-bassins.

2.1.3 CAS PARTICULIERS DES PETITS BASSINS VERSANTS DE LA MOSELLE AVAL

La reconstitution des débits sur les bassins versants situés sur la Moselle aval (le Helpert, la Mance, le Feigne et le Beaume-Haie), s'appuie sur une reconstitution des débits par modélisation pluie-débit au pas de temps horaire. Le modèle GR4h est utilisé pour cette reconstitution.

Les paramètres du modèle GR4h sont estimés par analogie avec les bassins versants voisins. Les temps de montées des hydrogrammes sont calculés en fonction des temps de concentration.

Cours d'eau	Temps de concentration (h)
Le Helpert	4,9
La Mance	5,8
Le Feigne	4,5
Le Beaume-Haie	3,4

Tableau 2-2 : Temps de concentration des bassins versants sur la Moselle aval

Les chroniques de débits horaires sont simulés en tenant compte des pluies aux postes de Pagny-sur-Moselle, Augny et Metzervisse (pluies journalières). Les chroniques de pluies horaires pour ces trois postes sont construites en reprenant la répartition horaire des pluies au poste de Custines (pluies horaires) fournies par la DREAL Grand-Est. Les chroniques ainsi reconstituées s'étendent de septembre 1991 à mai 2020.

La simulation permet de reconstituer une chronique de débits horaires de ces 4 cours d'eau sur cette même période de septembre 1991 à mai 2020. La même méthodologie est ensuite appliquée sur cette chronique de débits horaires :

- Ajustements statistiques ;
- Hydrogrammes moyens normés ;

- Application de la méthode du GRADEX et de la méthode AGREGEE.

La durée caractéristique pour l'application des méthodes de type GRADEX est très variable, le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes retenues pour chacun des points de calcul.

Le gradex des pluies de durée D est calculé à partir du gradex des pluies de durée 24 heures en utilisant le coefficient de Montana à Custines ($b=0,72$). La formulation est la suivante :

$$P(D) = P(24 \text{ heures}) \cdot \left(\frac{D}{24}\right)^{1-b}$$

La mise en œuvre de la méthodologie permet de reconstituer les débits horaires de crues de différentes périodes de retour. Le passage au débit de pointe se fait par un coefficient de forme reliant le débit de pointe au débit horaire : ce coefficient est évalué à 1,3 pour tous les bassins à partir des chroniques horaires reconstituées, il est supposé constant.

Cours d'eau	Durée caractéristique D retenue (h)	Facteur de forme r retenu
Le Helpert	8	1,3
La Mance	6	1,3
Le Feigne	6	1,3
Le Beaume-Haie	8	1,3

Tableau 2-3 : Paramètres pour l'application du GRADEX retenus pour les bassins sur la Moselle aval

2.2 SYNTHÈSE DES VALEURS PROPOSÉES

Les tableaux suivants récapitulent l'ensemble des débits de crue qu'il est proposé de retenir sur les 12 sous-bassins versants objets de l'étude. Des intervalles d'incertitude sont également fournis : leur estimation est décrite en ANNEXE 5 au droit des stations. Pour la transposition aux points de calcul, la même loi de Myer utilisée pour les valeurs « centrales » est appliquée aux bornes supérieures et inférieures des intervalles d'incertitude. La méthode d'estimation de ces intervalles ne permet pas de leur attacher une probabilité.

L'ensemble des débits présentés dans les tableaux suivants sont exprimés en m^3/s .

2.2.1 MOSELLE AMONT

Les débits de crues retenus sur les affluents de la Moselle amont sont synthétisés dans le tableau suivant :

Débit (m3/s)	Le Bouchot à Vagney	La Niche à Arches	Le Neuné à Laveline-devant-	La Cleurie à son exutoire
Bassin versant	54 km ²	61 km ²	97 km ²	77 km ²
Q2	38	21	20	31
Q5	51	26	27	39
Q10	60 [53-65]	30 [28-34]	32 [28-34]	45 [42-50]
Q30	90 [82-96]	38 [36-41]	41 [38-45]	61 [55-66]
Q50	103 [93-112]	42 [40-46]	46 [43-53]	68 [60-73]
Q100	121 [106-134]	49 [47-52]	56 [51-64]	78 [66-84]
Q1000	182 [148-208]	71 [64-79]	97 [79-106]	110 [87-123]

Tableau 2-4 : débits de crue sur les bassins de la Moselle amont.

2.2.2 MEURTHE-MADON

Les débits de crues retenus sur les affluents de la Meurthe et du Madon sont synthétisés dans le tableau suivant :

Débit (m3/s)	La Mortagne à son exutoire	Le Brénon à Autrey	Le Rabodeau à Moyenmoutier	La Fave à Saint-Dié
Bassin versant	580 km ²	144 km ²	153 km ²	179 km ²
Q2	77	38	35	41
Q5	111	46	48	57
Q10	137 [124-149]	52 [48-56]	58 [53-62]	67 [62-72]
Q30	185 [172-200]	63 [59-67]	77 [72-82]	87 [82-93]
Q50	214 [201-232]	69 [65-74]	87 [82-94]	99 [93-106]
Q100	258 [232-279]	79 [75-83]	104 [94-112]	116 [105-124]
Q1000	420 [338-461]	112 [102-120]	165 [134-180]	180 [148-197]

Tableau 2-5 : débits de crue sur les bassins du territoire Meurthe-Madon.

2.2.3 MOSELLE AVAL

Les débits de crues retenus sur les affluents de la Moselle aval sont synthétisés dans le tableau suivant :

Débit (m3/s)	Le Beaume-Haie à Pagny-sur-Moselle	La Mance à Ars-sur-Moselle	Le Feigne à Argancy	Le Helpert à Yutz
Bassin versant	20 km ²	29 km ²	26 km ²	13 km ²
Q2	3	3	3	1
Q5	4	4	4	2
Q10	5 [4-8]	5 [5-10]	5 [4-9]	2 [2-4]
Q30	11 [7-14]	14 [9-19]	12 [8-17]	5 [3-7]
Q50	14 [8-17]	18 [11-22]	16 [10-20]	6 [4-8]
Q100	18 [10-21]	23 [13-28]	21 [12-25]	8 [5-10]
Q1000	30 [15-35]	40 [21-48]	36 [19-43]	14 [7-16]

Tableau 2-6 : débits de crue sur les bassins de la Moselle aval.

3 METHODOLOGIE

3.1 LA PREDETERMINATION DES DEBITS DE CRUES – PREAMBULE

L'étude des crues sur le bassin versant de la Moselle vise à caractériser le débit de pointe de crues de différentes périodes de retour ainsi que l'hydrogramme de crue associée.

L'estimation des débits de pointe de crues repose sur différentes méthodes :

- Les méthodes statistiques d'analyse du « processus » des débits de pointe de crues ;
- Les méthodes « hydrométéorologiques » prenant en compte explicitement l'information pluviométrique ;
- Les méthodes de simulation stochastiques.

3.1.1 METHODES D'ANALYSE STATISTIQUES

Les méthodes d'analyse statistiques s'appuient sur l'ajustement de lois de distribution statistiques aux séries d'observations de débits de crues. Les lois de distribution sont relativement nombreuses.

Pour la présente étude, quatre lois ont été retenues pour l'étude statistique aux stations hydrométriques. Ces lois peuvent être regroupées en deux familles :

- Analyse des maxima annuels : loi de Gumbel et loi GEV (valeurs extrêmes) ;
- Analyse des débits de pointes supérieurs à un seuil : loi exponentielle et loi GPD (Pareto généralisée).

3.1.2 METHODES HYDRO-METEOROLOGIQUES

Les méthodes hydro-météorologiques présentent l'intérêt d'analyser les événements générateurs des crues (information pluviométrique) et d'être ainsi plus proches de la physique des phénomènes. Ces méthodes sont réputées fiables et opérationnelles pour des bassins versants limités et homogènes.

La méthode la plus utilisée en France est la méthode du GRADEX. Toutefois, son domaine de prédilection concerne les événements extrêmes (typiquement, 10 000 ans de période de retour). Pour le domaine des crues rares à extrêmes (10 à 1 000 ans de période de retour), la méthode AGREGEE a été développée par l'IRSTEA.

3.1.3 METHODES DE SIMULATION STOCHASTIQUES

Ces méthodes modélisent statistiquement les processus à une échelle temporelle variable, allant du mois jusqu'à l'échelle horaire.

En pratique, ce type de méthode repose sur :

- Un modèle pluie-débit préalablement calé sur les observations de débits aux stations hydrométriques ;
- De longues chroniques de pluies générées stochastiquement selon des lois de distribution statistiques prédéfinies ;
- D'autres variables selon le modèle pluie-débit choisi (chroniques de températures, ETP, ...).

Ces modèles permettent de reconstituer de longues chroniques de débits de façon aléatoire et de réaliser des traitements statistiques sur les résultats.

Pour la présente étude, les résultats de la base de données SHYREG¹ de 2019 sont présentés.

¹ <https://shyreg.inrae.fr/accueil/>

3.1.4 CONSTRUCTION DES HYDROGRAMMES DE CRUES

La caractérisation des hydrogrammes de crues s'appuie sur les formes d'hydrogrammes enregistrées aux différentes stations hydrométriques lors des crues historiques. Dans la présente étude, le parti retenu est de déterminer un hydrogramme moyen normé estimé sur la base d'un échantillon de crues regroupant les plus fortes crues observées et des crues plus fréquentes.

Ensuite, pour chaque période de retour donnée, l'hydrogramme de la crue correspondante est construit par homothétie en multipliant l'hydrogramme normé par le débit de pointe correspondant à la période de retour donnée.

Cette méthode de construction a l'avantage de sa simplicité et s'appuie sur les observations. Les formes d'hydrogrammes ainsi reconstituées sont plus caractéristiques des crues observées. Cette méthode donne une forme d'hydrogramme vraisemblable.

Les méthodes de simulation stochastiques permettent également de reconstituer des hydrogrammes de crues par transformation pluie-débit : en particulier, il est possible de déterminer des hydrogrammes « mono-fréquences » de période de retour homogène (même période de retour pour le débit de pointe et pour le volume de crue). Néanmoins, les hydrogrammes ainsi construits présentent des formes qui peuvent notablement s'éloigner des formes d'hydrogrammes réellement observées.

3.2 ANALYSE STATISTIQUE DES DEBITS OBSERVES

La technique de traitement des données utilisée pour la caractérisation des débits de crues 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.

3.2.1 METHODES D'ECHANTILLONNAGE

3.2.1.1 Echantillonnage des maxima annuels de débits de pointe – MAXAN

Cet échantillonnage est classique : il consiste à retenir pour chaque année le débit maximal observé. L'échantillonnage contient ainsi autant d'observations que d'années de mesures, sauf en cas de lacunes.

La période des crues sur le bassin versant de la Moselle s'étend d'octobre à avril : l'échantillon est constitué des maxima de débit observés sur la sous-période d'octobre de l'année N à avril de l'année N+1.

Le principal inconvénient de cet échantillonnage est de prendre en compte des débits parfois très faibles lors des années « sans crue » et qui sont des événements de typologie très différente des grandes crues : souvent, l'hypothèse d'homogénéité de l'échantillon est mal vérifiée avec cet échantillonnage (on mélange des événements de types différents).

3.2.1.2 Echantillonnage des débits de pointe de crues supérieurs à un seuil – SUPSEUIL

Cet échantillonnage consiste à retenir toutes les observations de débits de pointe supérieures à un seuil de débit donné. Cette méthode permet d'obtenir un échantillon regroupant des événements du même type et d'améliorer l'homogénéité.

Un critère de temps entre les évènements est généralement appliqué afin d'assurer l'indépendance entre les évènements (typiquement, pour les crues à pics multiples successifs, seul le plus fort pic est retenu dans l'échantillon). Pour la présente étude, le critère de temps est de 15 à 20 jours entre deux pics.

Le choix du seuil de débit pour l'échantillonnage résulte d'un compromis : il doit être suffisamment élevé pour assurer l'homogénéité de l'échantillon et permettre de disposer d'un échantillon suffisamment grand pour la robustesse de l'ajustement. De manière générale, le seuil est choisi de manière à avoir au moins une crue par année d'observation en moyenne dans l'échantillon.

3.2.1.3 Fréquence 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.

3.2.2 LOIS D'AJUSTEMENTS – ECHANTILLONNAGE MAXAN

Quatre lois ont été retenues pour l'analyse statistique des différents échantillons de crues : deux lois adaptées à l'échantillonnage MAXAN et deux autres lois adaptées à l'échantillonnage SUPSEUIL.

3.2.2.1 Loi de Gumbel

Un modèle fréquentiel couramment utilisé en France pour décrire le comportement statistique des valeurs rares à extrêmes est la distribution statistique de Gumbel (loi double exponentielle). La fonction de répartition de cette loi s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp \left(-\exp \left(-\frac{x - X_0}{G} \right) \right)$$

IL s'agit d'une loi à deux paramètres :

- X_0 est le paramètre de position, appelé également « mode » ;
- G est le paramètre d'échelle, appelé également « gradex ».

3.2.2.2 Loi GEV (valeurs extrêmes)

La loi GEV (Generalized Extreme Value) ou loi des valeurs extrêmes généralisées, est une loi à trois paramètres :

- X_0 est le paramètre de position ;
- G est le paramètre d'échelle ;
- k est le paramètre de forme.

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

$$F(x) = \exp \left(- \left[1 - k \frac{x - X_0}{G} \right]^{\frac{1}{k}} \right)$$

La loi de Gumbel en est un cas particulier : elle correspond au cas où $k = 0$.

3.2.3 LOIS D'AJUSTEMENTS – ECHANTILLONNAGE SUPSEUIL

3.2.3.1 Loi exponentielle

La loi exponentielle est une loi à deux paramètres :

- X_0 est le paramètre de position ;
- G est le paramètre d'échelle.

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

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x - X_0}{G}\right)$$

3.2.3.2 Loi GPD (Pareto généralisée)

La loi GPD (Generalized Pareto Distribution), est une loi à trois paramètres :

- X_0 est le paramètre de position ;
- G est le paramètre d'échelle ;
- k est le paramètre de forme.

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

$$F(x) = 1 - \left[1 + k \frac{x - X_0}{G}\right]^{\frac{1}{k}}$$

La loi exponentielle en est un cas particulier : elle correspond au cas où $k = 0$.

3.2.4 TESTS SUR LES ECHANTILLONS

Plusieurs tests sont réalisés sur les échantillons afin de vérifier que les données sont bien indépendantes et identiquement distribuées : pour les ajustements statistiques, les données constituant l'échantillon des observations doivent être des « réalisations » indépendantes de la même variable aléatoire et provenir de la même distribution statistique.

Trois tests statistiques sont menés pour vérifier les hypothèses d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité.

3.2.4.1 Test d'indépendance

Le test d'indépendance permet de vérifier s'il existe une autocorrélation d'ordre 1, significative entre les observations : en d'autres termes, il permet de vérifier si l'occurrence d'une observation n'est pas affectée par les autres observations.

Pour vérifier l'indépendance de l'échantillon, le test de Wald-Wolfowitz est utilisé.

De manière générale, les échantillons de type MAXAN vérifient quasiment toujours les conditions d'indépendances. Ce test est surtout utile pour les échantillons de type SUPSEUIL (par exemple lors de plusieurs crues successives assez rapprochées dans le temps).

3.2.4.2 Test de stationnarité

Le test de stationnarité permet de vérifier s'il existe une tendance significative dans la série des observations, c'est-à-dire, si les caractéristiques de l'échantillon (moyenne, variance, ...) varient dans le temps (par exemple, changement de régime hydrologique d'un cours d'eau).

Pour vérifier la stationnarité de l'échantillon, le test de Kendall est utilisé.

3.2.4.3 Test d'homogénéité

Le test d'homogénéité permet de vérifier si la moyenne d'un premier sous-échantillon est significativement différente de celle d'un second sous-échantillon. Les principales causes d'hétérogénéité dans un échantillon sont la saisonnalité des événements considérés (crues d'hiver, de printemps, ...), le déplacement d'une station de mesure.

Pour vérifier la stationnarité de l'échantillon, le test de Wilcoxon (ou de Mann-Whitney) est utilisé.

3.3 METHODES HYDRO-METEOROLOGIQUES

3.3.1 METHODE DU GRADEX

3.3.1.1 Formulation

La méthode du gradex a été développée par EDF notamment pour l'estimation des crues de sécurité pour les barrages. La principale hypothèse de cette méthode est, qu'au-delà d'une certaine période de retour appelée « pivot », la droite d'ajustement des débits suit la droite d'ajustement des pluies. En d'autres termes, au-delà de cette période pivot, le gradex des débits (G_q) et le gradex des pluies (G_p) sont égaux. La formulation est la suivante :

$$Q_p(T) = Q_p(T_{piv}) + r_D \cdot G_p \cdot \left[\ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) - \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T_{piv}} \right) \right) \right]$$

Avec :

$Q_p(T)$: débit de pointe de la crue de période T en m³/s ;

$Q_p(T_{piv})$: débit de pointe pivot en m³/s ;

T_{piv} : période de retour pivot en années ;

T : période de retour d'estimation du débit de pointe en années ;

D : durée caractéristique de la crue en heures ;

r_D : rapport entre le débit de pointe et le débit moyen sur la durée D (adimensionnel) ;

G_p : gradex des pluies de durée D exprimé en m³/s. Il s'obtient par la formulation $G_p = \frac{g_p \cdot S}{3,6 \cdot D}$, où g_p est le gradex des pluies issu des ajustements de Gumbel (en mm/D), S la superficie du bassin versant (en km²) et D la durée caractéristique en heures.

3.3.1.2 Hypothèses

Les principales hypothèses concernent le choix de la période de retour pivot, celui de la durée D et celui du coefficient de forme r_D sur la durée D.

De manière générale, la durée D est caractérisée comme la durée pendant laquelle la moitié du débit de pointe est continûment dépassée (durée pendant laquelle $Q > Q_p/2$). Elle est évaluée par analyse des hydrogrammes de crues observés aux stations hydrométriques. Souvent, les valeurs sont dispersées, le choix se fait donc en recherchant une tendance en fonction du débit de pointe des crues. En règle générale, une durée caractéristique plus petite conduit à des débits de crues plus importants.

Par défaut, la période pivot de la méthode du GRADEX est prise à 10 ans. Cette période peut être précisée au regard de la forme des ajustements statistiques aux stations (« cassure » dans l'ajustement).

Le coefficient de forme est le rapport entre le débit de pointe sur le débit moyen calculée sur la durée caractéristique D : le choix de ce coefficient est donc lié au choix de la durée caractéristique D . Comme pour la durée caractéristique, il est évalué par analyse des hydrogrammes de crues observés aux stations hydrométriques. Par définition, sa valeur est comprise entre 1 et 2 : un coefficient proche de 1 traduit un hydrogramme « aplati » tandis qu'un coefficient proche de 2 traduit un hydrogramme « pointu ». Souvent, les valeurs sont dispersées, le choix se fait donc en recherchant une tendance en fonction du débit de pointe des crues.

3.3.2 METHODE DU GRADEX PROGRESSIF OU AGREGEE

3.3.2.1 Formulation

La méthode du « gradex progressif » a été développée par l'IRSTEA. Elle assure un passage progressif du gradex des débits pour les périodes de retour faibles au gradex des pluies pour les périodes de retour extrêmes. La formulation est la suivante :

$$Q_p(T) = Q_p(T_{piv}) + r_D \cdot G_p \cdot \ln \left(1 + \frac{G_q}{r_D \cdot G_p} \cdot \frac{(T - T_{piv})}{T_{piv}} \right)$$

Avec :

$Q_p(T)$: débit de pointe de la crue de période T en m^3/s ;

$Q_p(T_{piv})$: débit de pointe pivot en m^3/s ;

T_{piv} : période de retour pivot en années ;

T : période de retour d'estimation du débit de pointe en années ;

D : durée caractéristique de la crue en heures ;

r_D : rapport entre le débit de pointe et le débit moyen sur la durée D (adimensionnel) ;

G_p : gradex des pluies de durée D exprimé en m^3/s . Il s'obtient par la formulation $G_p = \frac{g_p \cdot S}{3,6 \cdot D}$, où g_p est le gradex des pluies issu des ajustements de Gumbel (en mm/D), S la superficie du bassin versant (en km^2) et D la durée caractéristique en heures ;

G_q : gradex des débits issus des ajustements de Gumbel en m^3/s .

3.3.2.2 Hypothèses

Les principales hypothèses concernent le choix de la période de retour pivot, celui de la durée D et celui du coefficient de forme r_D sur la durée D .

De manière générale, la durée D est caractérisée comme la durée pendant laquelle la moitié du débit de pointe est continûment dépassée (durée pendant laquelle $Q > Q_p/2$). Elle est évaluée par analyse des hydrogrammes de crues observés aux stations hydrométriques. Souvent, les valeurs sont dispersées, le choix se fait donc en recherchant une tendance en fonction du débit de pointe des crues. En règle générale, une durée caractéristique plus petite conduit à des débits de crues plus importants.

Par défaut, la période pivot de la méthode du GRADEX est prise à 10 ans. Cette période peut être précisée au regard de la forme des ajustements statistiques aux stations (« cassure » dans l'ajustement).

Le coefficient de forme est le rapport entre le débit de pointe sur le débit moyen calculée sur la durée caractéristique D : le choix de ce coefficient est donc lié au choix de la durée caractéristique D . Comme pour la durée caractéristique, il est évalué par analyse des hydrogrammes de crues observés aux stations hydrométriques. Par définition, sa valeur est comprise entre 1 et 2 : un coefficient proche de 1 traduit un hydrogramme « aplati » tandis qu'un coefficient proche de 2 traduit un hydrogramme « pointu ». Souvent, les valeurs sont dispersées, le choix se fait donc en recherchant une tendance en fonction du débit de pointe des crues.

3.3.3 LIMITES DES METHODES PLUIE-DEBIT S'APPUYANT SUR LE GRADEX DES PLUIES

Les méthodes relevant du gradex des pluies s'appliquent assez bien sur des petits bassins versants car l'hypothèse de saturation sur l'ensemble du bassin versant peut être plus facilement vérifiée.

Pour l'application aux grandes surfaces, cette hypothèse est plus difficile à vérifier : plus le bassin est grand, moins il y a de chance qu'il soit saturé partout en même temps.

3.4 BASE DE DONNEES SHYREG-DEBIT DE 2019

La base de données a été développée par l'IRSTEA.

Les valeurs de débits de Les valeurs des débits de différentes périodes de retour ont été extraites de la base SHYREG au droit des principales stations hydrométriques du bassin versant

A la date de rédaction du présent rapport, la base en ligne est la base SHYREG-2019.

3.5 METHODOLOGIE GLOBALE MISE EN ŒUVRE

Dans un premier temps, les données de débits sont extraites de la base de données Hydroportail. Plusieurs procédures permettent de récupérer les données :

- Procédure CRUCAL : permet d'extraire les maxima annuels de débit de pointe pour une sous-période donnée (octobre à avril dans le cas présent) ;
- Procédure QJM : permet d'extraire les chroniques de débits journaliers ainsi que les maxima mensuels de débit de pointe ;
- Procédure QTFIX : permet d'extraire les débits observés à un pas de temps régulier, en l'occurrence 1 heure.

La méthodologie comprend les étapes suivantes :

- **Etape 1** : récupération des hydrogrammes sur un échantillon de crues historiques par la procédure QTFIX ;

Crues d'automne fin de basses eaux	Crues d'hiver / hautes eaux		Crues de printemps fin de hautes eaux
	Avec dégel/neige crues de redoux	Sans dégel/neige dominante pluviale	
Novembre 1972 Octobre 1981 Octobre 1986 Oct/Nov. 1998 Octobre 2006	Décembre 1999 (3 pics) Décembre 2001 Décembre 2010	Février 1970 Février 1979 Décembre 1982 (2 pics) Décembre 1988 Février 1990 Décembre 1991 Décembre 1993 (2 pics) Janvier 1994 (2 pics) Janvier 1995 (3 pics) Février 1997 Février 1999 Mars 1999 (2 pics) Janvier 2004 (3 pics) Février 2016 Janvier 2018 Février 2020	Mai 1970 Avril 1983 Mai 1983 Mars 1988 Mars 2008 Mai/juin 2016

Tableau 3-1 : échantillons d'hydrogrammes de crues.

- **Etape 2 :** évaluation des caractéristiques des hydrogrammes, durée caractéristique D , coefficient de forme r_D associé à la durée caractéristique, hydrogramme normé moyen. Concernant la durée caractéristique, la formule de SOCOSE n'est pas utilisée, les résultats étant très différents des valeurs issues de l'étude des hydrogrammes ;
- **Etape 3 :** constitution des échantillons MAXAN et SUPSEUIL à partir des procédures CRUCAL et QJM. Les échantillons peuvent être complétés avec des valeurs issues des hydrogrammes (par exemple, lors d'années avec des lacunes) ;
- **Etape 4 :** traitements statistiques sur les échantillons MAXAN et SUPSEUIL. Le but est d'évaluer les débits des crues courantes jusqu' au débit pivot (en général, période de retour 10 ou 20 ans). Le choix des valeurs retenues est mené au cas par cas, en fonction de l'adéquation des lois avec les échantillons. En règle générale, pour les périodes de retour inférieures à 20 ans, les ajustements sont très proches et le choix des valeurs retenues a peu d'impact ;
- **Etape 5 :** application des méthodes du GRADEX et AGREGEE pour l'estimation des débits de crues au-delà de la période pivot jusqu'à la période de retour 1 000 ans ;
- **Etape 6 :** comparaison des résultats obtenus avec les valeurs de la base de données SHYREG-débit de 2019 et les valeurs issues de la bibliographie ;
- **Etape 7 :** estimations retenues. De manière générale, les estimations issues de la méthode du GRADEX sont proposées sur le haut-bassin vosgien de la Moselle. Sur le reste du bassin versant, la méthode AGREGEE est préférée, car décrivant mieux (en général) la distribution des observations.

Ces différentes étapes sont décrites en ANNEXE 2 pour les estimations des débits au droit de chaque station hydrométrique retenue pour l'analyse.

Le présent rapport synthétise les valeurs finalement retenues pour chaque station hydrométrique et la transposition des résultats aux points de calcul associés.

4 LA MOSELLE AMONT

Les fiches détaillant les ajustements statistiques et l'approche hydro-météorologique sur la Moselle amont sont fournies en ANNEXE 1.

Le détail des calculs et la justification des choix des paramètres retenus pour l'application des méthodes sont présentés en ANNEXE 2.

Les paragraphes suivants présentent et commentent les débits retenus au droit de chaque station hydrométrique prise en compte, ainsi que la méthode de transposition aux nœuds de calcul.

4.1 RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES

Hypothèses	Neuné à Laveline-devant-Bruyères	Cleurie à Cleurie
Bassin versant	96,4 km ²	63 km ²
Ajustement statistique	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}
Méthode retenue	AGREGEE	GRADEX
D	1 j	1 j
Gradex pluies	10,7 mm/j	10,4 mm/j
r _D	1,40	1,60
T _{piv}	10 ans	10 ans
Période de retour	Neuné à Laveline-devant-Bruyères	Cleurie à Cleurie
2 ans	18	27
5 ans	24	34
10 ans	28	39
30 ans	36	53
50 ans	41	59
100 ans	50	67
1000 ans	86	95

Tableau 4-1 : débits de crues sur la Moselle amont.

4.2 TRANSPPOSITION AUX POINTS DE CALCUL

4.2.1 LA CLEURIE ET LE NEUNE

Sur les bassins de la Cleurie et du Neuné, le point de calcul est situé à l'exutoire du bassin versant : une loi de transposition est donc recherchée pour y évaluer les débits.

L'exutoire étant situé en aval de la station hydrométrique, les débits sont calculés par une relation du type : $Q = Q_{station} \cdot \left(\frac{S_{point\ de\ calcul}}{S_{station}} \right)^b$, avec $S_{point\ de\ calcul}$ la superficie du bassin versant au point de calcul, $S_{station}$ la superficie du bassin versant au droit de la station hydrométrique et b un coefficient régional.

Les valeurs « classiques » du coefficient b sont comprises entre 0,7 et 0,8. En fait, dans les deux cas présents, l'écart de superficie de bassin versant entre le point de calcul et la station hydrométrique est faible, le choix du coefficient b a un impact très limité. La valeur $b=0,75$ est retenue pour la transposition.

4.2.2 LA NICHE

Les débits caractéristiques sur la Niche (61 km²) sont déterminés par analyse régionale, par une relation de type Myer à partir de stations voisines. Deux stations de référence sont proposées : la Vologne à Cheniménil (A4362030), dont le bassin fait 355 km² et la Combeauté à Val d'Ajol (U0455010), avec un bassin d'une surface de 63 km², située dans le sous-bassin de la Saône.

Débit (m3/s)	Transposition Vologne à Cheniménil	Transposition Combeauté à Val d'Ajol
Bassin versant	61 km ²	61 km ²
Q2	18	21
Q5	23	26
Q10	26 [24-28]	30 [28-34]
Q30	31 [29-33]	38 [36-41]
Q50	35 [33-37]	42 [40-46]
Q100	40 [38-44]	49 [47-52]
Q1000	64 [55-69]	71 [64-79]

Tableau 4-2 : Estimation des débits caractéristiques sur la Niche par analyse régionale

Les résultats obtenus sont proches. Les valeurs calculées à partir du bassin versant de la Combeauté à Val d'Ajol sont légèrement supérieures, de l'ordre de 10 à 15 %. **Compte-tenu de la surface élevée du bassin versant de la Vologne à Cheniménil, il est proposé de conserver les résultats obtenus à partir de la station de la Combeauté.**

4.2.3 LE BOUCHOT

Pour le Bouchot, les débits caractéristiques de crues sont obtenus à partir de la relation régionale établie sur la Moselle amont lors de l'étude globale, basée sur les résultats aux stations de Rupt-sur-Moselle, Remiremont et Saint-Nabord, toutes sur la Moselle. Le coefficient b de la loi de transposition varie de 0,73 pour Q1000 à 0,85 pour Q2.

4.2.4 SYNTHÈSE

Les débits de crues retenus sur les affluents de la Moselle amont sont synthétisés dans le tableau suivant :

Période de retour	Niche	Neuné	Bouchot	Cleurie
2 ans	21	18	38	31
5 ans	26	24	51	39
10 ans	30	28	60	45
30 ans	38	36	90	61
50 ans	42	41	103	68
100 ans	49	50	121	78
1000 ans	71	86	182	110

Tableau 4-3 : débits de crues sur la Moselle amont.

Période de retour	Niche	Neuné	Bouchot	Cleurie
2 ans ²	-	-	-	30
10 ans	-	-	-	44
100 ans	-	-	-	62
1000 ans	-	-	-	-

Tableau 4-4 : débits de référence sur la Moselle amont d'après la bibliographie.

Les valeurs retenues sur la Cleurie sont similaires à celles de la bibliographie pour les occurrences fréquentes. Pour la crue centennale, la valeur retenue est sensiblement plus élevée, d'environ 25 %.

² : Atlas des zones inondables de la Moselle et de la Meurthe, Ministère de l'Environnement – Navigation du Nord-Est, 2000

4.3 HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE

Les hydrogrammes pour la Cleurie et le Neuné correspondent aux hydrogrammes moyens normés établis à leurs stations hydrométriques respectives. Il est ainsi considéré qu'il n'y a pas de déformation entre la station et l'exutoire.

Les hydrogrammes moyens normés pour le Bouchot et la Niche sont élaborés à partir de la reconstitution par une modélisation pluie-débit au pas horaire de 9 crues entre 1998 et 2018. La méthode adoptée est détaillée en ANNEXE 3.

La figure suivante présente les hydrogrammes de crue élaborés pour la Moselle amont. Le temps a pour référence (t = 0) l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.

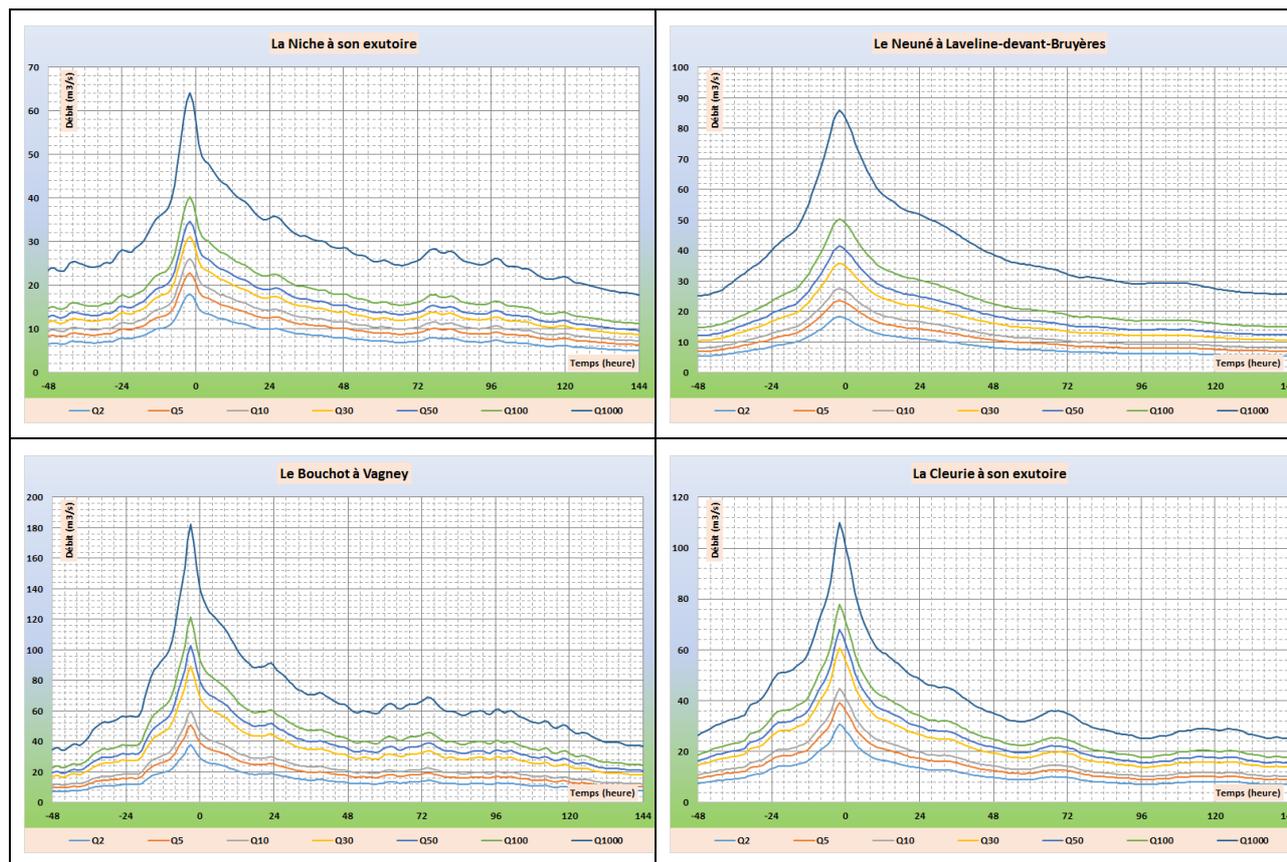


Figure 4-1 : hydrogrammes des crues de références sur la Moselle amont.

5 LA MEURTHER ET LE MADON

Les fiches détaillant les ajustements statistiques et l'approche hydro-météorologique sur le territoire Meurthe-Madon sont fournies en ANNEXE 1.

Le détail des calculs et la justification des choix des paramètres retenus pour l'application des méthodes sont présentés en ANNEXE 2.

Les paragraphes suivants présentent et commentent les débits retenus au droit de chaque station hydrométrique prise en compte, ainsi que la méthode de transposition aux nœuds de calcul.

5.1 RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES

Hypothèses	Mortagne à Gerbéviller
Bassin versant	493 km ²
Ajustement statistique	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}
Méthode retenue	AGREGEE
D	1 j
Gradex pluies	8,8 mm/j
r _D	1,30
T _{piv}	10 ans
Période de retour	Mortagne à Gerbéviller
2 ans	68
5 ans	99
10 ans	121
30 ans	164
50 ans	189
100 ans	228
1000 ans	372

Tableau 5-1 : débits de crues sur la Mortagne.

5.2 TRANPOSITION AUX POINTS DE CALCUL

5.2.1 LA MORTAGNE

Sur le bassin de la Mortagne, le point de calcul est situé à l'exutoire du bassin versant : une loi de transposition est donc recherchée pour y évaluer les débits.

L'exutoire étant situé en aval de la station hydrométrique de la Mortagne à Gerbéviller, les débits sont calculés par une relation du type : $Q = Q_{station} \cdot \left(\frac{S_{point\ de\ calcul}}{S_{station}} \right)^b$, avec $S_{point\ de\ calcul}$ la superficie du bassin versant au point de calcul, $S_{station}$ la superficie du bassin versant au droit de la station hydrométrique et b un coefficient régional.

Les valeurs « classiques » du coefficient b sont comprises entre 0,7 et 0,8. En fait, dans le cas présent, l'écart de superficie de bassin versant entre le point de calcul et la station hydrométrique est faible, le choix du coefficient b a un impact très limité. La valeur $b=0,75$ est retenue pour la transposition.

5.2.2 LA FAVE

Les débits caractéristiques sur la Fave sont déterminés par analyse régionale, par une relation de type Myer à partir de la station A6051020 sur la Meurthe à Saint-Dié-des-Vosges. Celle-ci se situe sur la Meurthe juste en aval de la confluence entre la Fave et la Meurthe. Les caractéristiques physiques du bassin versant de la Fave (géologie, occupation du sol, relief,...) sont assez proches de celles de la Meurthe amont.

Débit (m ³ /s)	La Fave à Saint-Dié
Bassin versant	179 km ²
Q2	41
Q5	57
Q10	67 [62-72]
Q30	87 [82-93]
Q50	99 [93-106]
Q100	116 [105-124]
Q1000	180 [148-197]

Tableau 5-2 : transposition des débits caractéristiques de crue au point de calcul sur la Fave.

5.2.3 LE BRENON

Les débits caractéristiques sur le Brénon sont déterminés par analyse régionale, par une relation de type Myer à partir de stations voisines. Les stations proposées comme référence pour la transposition des débits de crues sont :

- A5431010 – le Madon à Pulligny : le jaugeage maximal utilisé pour la courbe de tarage correspond à une Q2, et l'incertitude des mesures est donc relativement élevée pour l'extrapolation pour les crues plus rares ;
- A5622010 – la Bouvade à Bicqueley : affluent de la Moselle situé en amont de Toul. La station présente 25 ans de données, entre 1983 et 2008. Les données en hautes eaux sont jugées bonnes par l'exploitant (DREAL Grand-Est) ;
- A5303010 – le Colon à Xaronval : la station située sur cet affluent du Madon présente 29 ans de données, de 1979 à 2008. Les données en hautes eaux sont jugées bonnes par l'exploitant (DREAL Grand-Est) ;

Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour le Brénon à partir de chacune de ces stations de référence.

Débit (m3/s)	Transposition Madon à Pulligny	Transposition Bouvade à Bicqueley	Transposition Colon à Xaronval
Bassin versant	144 km ²	144 km ²	144 km ²
Q2	41	30	38
Q5	54	40	46
Q10	62 [57-66]	48 [42-53]	52 [48-56]
Q30	76 [70-81]	62 [57-68]	63 [59-67]
Q50	84 [79-89]	71 [65-76]	69 [65-74]
Q100	98 [92-105]	83 [74-88]	79 [75-83]
Q1000	153 [130-164]	126 [102-138]	112 [102-120]

Tableau 5-3 : estimation des débits caractéristiques de crue sur le Brénon par analyse régionale.

Compte tenu des incertitudes liées à la station de Pulligny sur le Madon et de la grande taille du bassin versant, il est proposé de ne pas prendre en compte les résultats par transposition à partir de cette station.

Les résultats de la transposition à partir de la Bouvade ou du Colon sont très proches.

Il est proposé de retenir la transposition à partir de la station du Colon à Xaronval qui se situe également sur le bassin versant de Madon. Le bassin versant du Colon présente des caractéristiques géologiques (marnes et calcaires) et d'occupation du sol proches de celles du Brénon.

5.2.4 LE RABODEAU

Les débits caractéristiques sur le Rabodeau sont déterminés par analyse régionale, par une relation de type Myer à partir de stations voisines. La géologie sur le bassin du Rabodeau, à la transition entre les hauteurs des Vosges cristallines et les formations de grès vosgiens, limite la transposabilité des mesures aux stations voisines. L'analyse est donc faite à partir de plusieurs stations de référence situées à proximité et présentées dans le tableau suivant.

Code station	Nom	Disponibilité des données	Surface de bassin versant	Commentaire
A6571110	La Vezouze à Lunéville	1969 - 2020	559	Influence de la Meurthe en hautes eaux
A6151030	La Meurthe à Raon-l'Étape	1973 - 2020	727	Le bassin est beaucoup plus grand que celui du Rabodeau.
A2730110	La Bruche à Russ [Wisches]	1956-2023	229	Situé sur l'autre versant des Vosges, le bassin est tributaire d'une pluviométrie assez différente de celle du Rabodeau.
A6541110	La Vezouze à Thiébauménil	1992 - 2022	472	Station sur la Vezouze, géologie assez différente (grès vosgien et argiles)
A6431120	La Vezouze à Blamont	1996 - 2022	114	Station sur l'amont du bassin de la Vezouze. Pluviométrie similaire, géologie assez différente (grès vosgien et argiles)

Tableau 5-4 : stations de référence proposées pour l'analyse régionale sur le Rabodeau.

Le tableau suivant présente les résultats de transposition obtenus à partir de chacune de ces stations de référence.

Débit (m ³ /s)	Transposition Vezouze à Lunéville	Transposition Bruche à Russ	Transposition Meurthe à Raon-l'Étape	Transposition Vezouze à Thiébauménil	Transposition Vezouze à Blâmont
Bassin versant	153 km ²	153 km ²	153 km ²	153 km ²	153 km ²
Q2	28	48	35	38	20
Q5	48	65	48	52	33
Q10	58 [53-62]	77 [72-83]	58 [53-62]	62 [55-69]	42 [35-49]
Q30	76 [71-84]	97 [94-105]	77 [72-82]	82 [75-90]	59 [52-66]
Q50	88 [81-98]	108 [107-120]	87 [82-94]	95 [87-105]	70 [63-77]
Q100	107 [97-119]	123 [123-140]	104 [94-112]	114 [102-126]	86 [72-95]
Q1000	181 [146-198]	174 [174-221]	165 [134-180]	188 [147-206]	147 [105-162]

Tableau 5-5 : estimation des débits caractéristiques de crue sur le Rabodeau par analyse régionale.

Les résultats obtenus sont assez dispersés, quelle que soit la période de retour concernée.

Il est proposé de retenir en synthèse les résultats obtenus à partir de la station sur la Meurthe à Raon-l'Etape : le sous-bassin correspondant se situe dans le même sous-bassin que le Rabodeau.

5.2.5 SYNTHÈSE

Les débits de crues retenus sur les affluents de la Meurthe et du Madon sont synthétisés dans le tableau suivant :

Période de retour	Mortagne	Brénon	Rabodeau	Fave
2 ans	77	38	35	41
5 ans	111	46	48	57
10 ans	137	52	58	67
30 ans	185	63	77	87
50 ans	214	69	87	99
100 ans	258	79	104	116
1000 ans	420	112	165	180

Tableau 5-6 : débits de crues sur le territoire Meurthe-Madon.

Période de retour	Mortagne ³	Brénon	Rabodeau ⁴	Fave
2 ans	69	-	-	-
10 ans	129	-	48	-
100 ans	242	-	81,6	-
1000 ans	-	-	-	-

Tableau 5-7 : débits de référence sur le territoire Meurthe-Madon d'après la bibliographie.

Les débits retenus sur la Mortagne sont assez proches des estimations de l'étude de préfiguration du PAPI Meurthe de 2008 : elles sont supérieures d'environ 6-7 %.

Sur le Rabodeau, les valeurs retenues sont significativement plus élevées que celles estimées en 1992 pour l'étude de restauration du Rabodeau, entre 20 et 25 % environ.

³ Etude de préfiguration du PAPI Meurthe, DIREN Lorraine, 2008

⁴ Etude de restauration du Rabodeau, 1992

5.3 HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE

Les hydrogrammes pour la Mortagne correspondent aux hydrogrammes moyens normés établis à la station hydrométrique de Gerbéviller. Il est ainsi considéré qu'il n'y a pas de déformation entre la station et l'exutoire.

Les hydrogrammes moyens normés pour la Fave, le Rabodeau et le Brénon sont élaborés à partir de la reconstitution par une modélisation pluie-débit au pas horaire de 9 crues entre 1998 et 2018. La méthode adoptée est détaillée en ANNEXE 3.

La figure suivante présente les hydrogrammes de crue élaborés pour la Moselle amont. Le temps a pour référence (t = 0) l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.

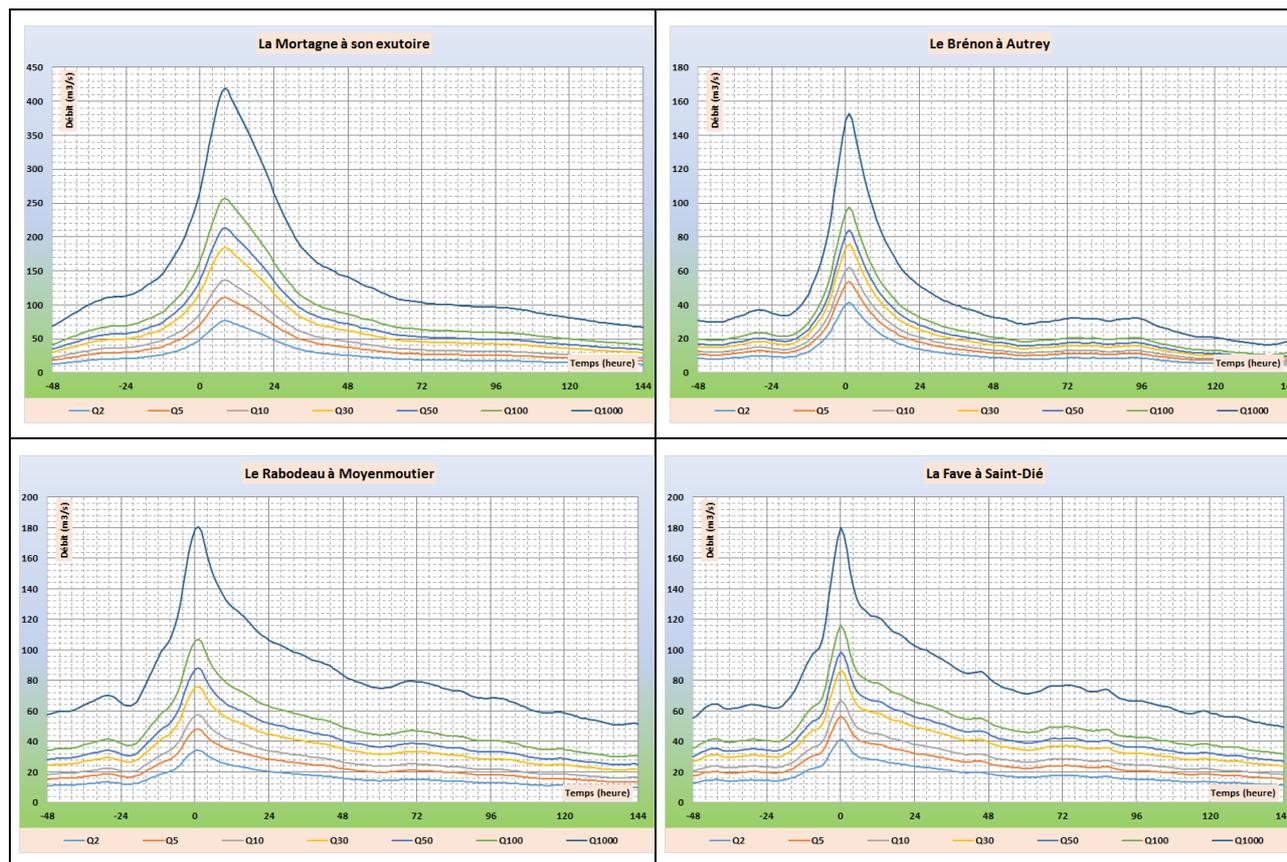


Figure 5-1 : hydrogrammes des crues de références sur le territoire Meurthe-Madon.

6 LA MOSELLE AVAL

Les fiches détaillant les ajustements statistiques et l'approche hydro-météorologique sur le territoire de la Moselle aval sont fournies en ANNEXE 1.

6.1 RESULTATS AUX EXUTOIRES

Hypothèses	Le Beaume-Haie à Pagny-sur-Moselle	La Mance à Ars-sur-Moselle	Le Feigne à Argancy	Le Helpert à Yutz
Bassin versant	19,6 km ²	28,6 km ²	25,6 km ²	12,7 km ²
Ajustement statistique	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}
Méthode retenue	GRADEX	GRADEX	GRADEX	GRADEX
D	8 h	6 h	6 h	8 h
Gradex pluies	6,2 mm/j	7,1 mm/j	7,1 mm/j	4,3 mm/j
r _D	1,3	1,3	1,3	1,3
Tpiv	10 ans	10 ans	10 ans	10 ans
Période de retour	Le Beaume-Haie à Pagny-sur-Moselle	La Mance à Ars-sur-Moselle	Le Feigne à Argancy	Le Helpert à Yutz
2 ans	3	3	3	1,4
5 ans	4	4	4	1,9
10 ans	5	5	5	2,2
30 ans	11	14	12	5,0
50 ans	14	18	16	6,3
100 ans	18	23	21	8,0
1000 ans	30	40	36	13,8

Tableau 6-1 : débits de crues sur la Moselle aval.

Période de retour	Le Beaume-Haie à Pagny-sur-Moselle ⁵	La Mance à Ars-sur-Moselle	Le Feigne à Argancy	Le Helpert à Yutz ⁶
2 ans	-	-	-	-
10 ans	11,3	-	-	4,9
30 ans	13,0	-	-	-
100 ans	16,6	-	-	-
1000 ans	-	-	-	-

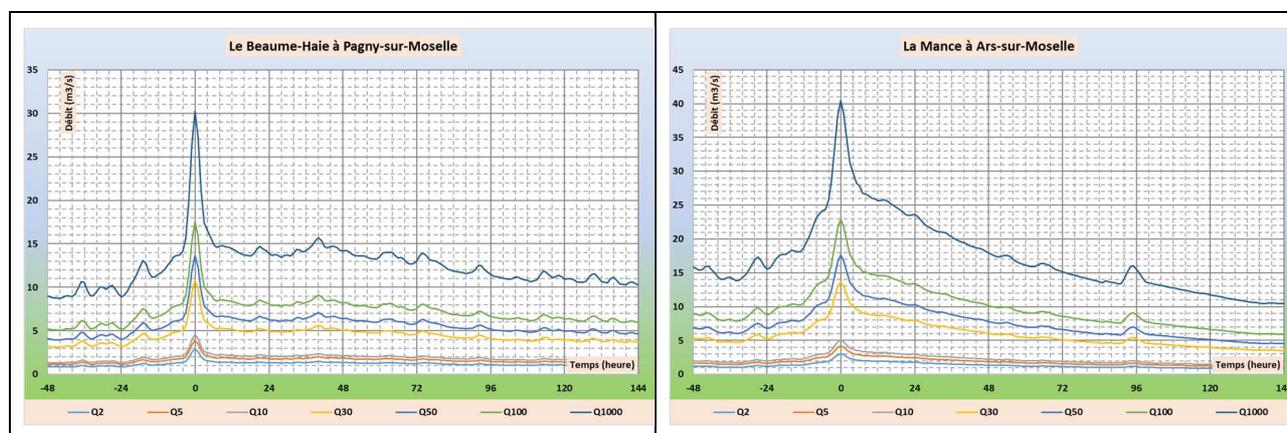
Tableau 6-2 : débits de référence sur la Moselle aval d’après la bibliographie.

Sur le ruisseau de Beaume-Haie, le débit de crue centennale retenu est légèrement supérieur à l’estimation de l’étude hydraulique de 2012. A contrario, le débit de crue décennale retenu est très inférieur.

Sur le ruisseau de Helpert, le débit décennal retenu est nettement inférieur au débit de l’étude de 2007.

6.2 HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE

Les hydrogrammes pour ces quatre bassins versants sont construits directement à partir des hydrogrammes moyens normés élaborés à partir de la chronique horaire de débits reconstitués. La méthode adoptée est détaillée en ANNEXE 4.



⁵ Etude hydraulique et de restauration sur les communes de Pagny-sur-Moselle et Prény, 2010.

⁶ Dossier d’autorisation Loi sur l’eau pour la couverture partielle de l’Helpert à Yutz, CA Portes de France – Thionville, 2007

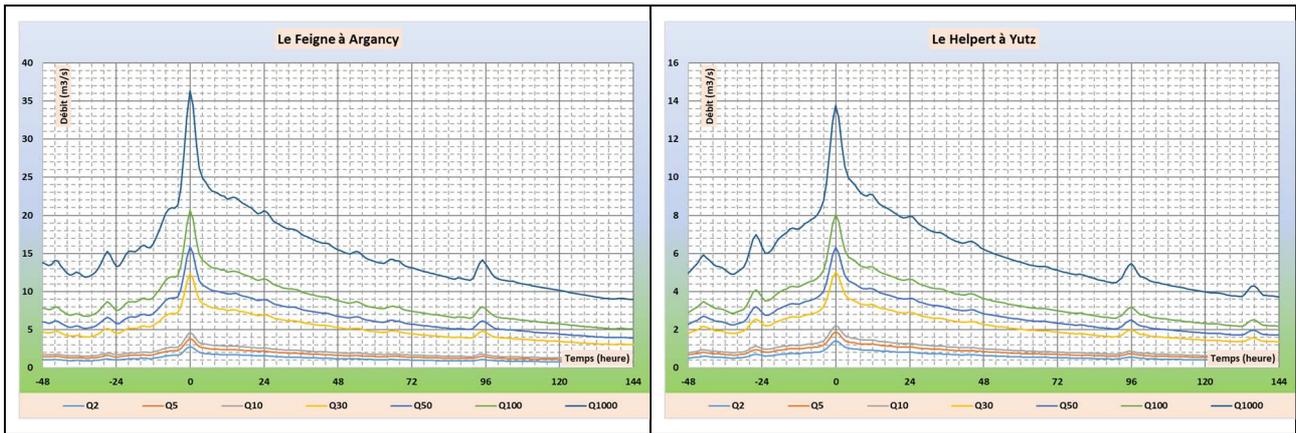


Figure 6-1 : hydrogrammes des crues de références sur la Moselle aval.

7 SYNTHÈSE ET HOMOGENEITE DES RESULTATS

L'homogénéité des débits calculés est appréciée en comparant les valeurs de débits de pointe des bassins versants objets de cette étude, exprimés en valeur brute (m^3/s), aux valeurs déterminées lors de l'étude globale aux points de calcul voisins :

- Le Bouchot, et la Cleurie sont comparés aux points du bassin de la Moselle amont à Remiremont ;
- La Niche, le Neuné et le Brénon sont comparés aux points des affluents de la Moselle amont entre Remiremont et Toul ;
- Le Rabodeau, la Fave et la Mortagne comparés aux points du bassin de la Meurthe.

La comparaison entre les bassins versants de la Moselle aval et les points de calcul voisins n'est pas pertinente, du fait du très grand écart de surface.

La figure suivante illustre l'homogénéité des débits sur la Moselle et ses affluents en amont de Remiremont (confluence avec la Moselotte). Le Bouchot s'aligne très bien par construction puisqu'il les débits sont estimés par transposition d'une loi régionale basée sur les stations de la Moselle amont (représentée par les tirets rouges).

Les estimations de débits de la Cleurie sont en-dessous de cette relation régionale. Cette estimation plus faible peut s'expliquer par la position géographique du sous-bassin de la Cleurie plus en aval, avec des cumuls de précipitations généralement plus faibles que sur les sous-bassins amont (par exemple le Bouchot).

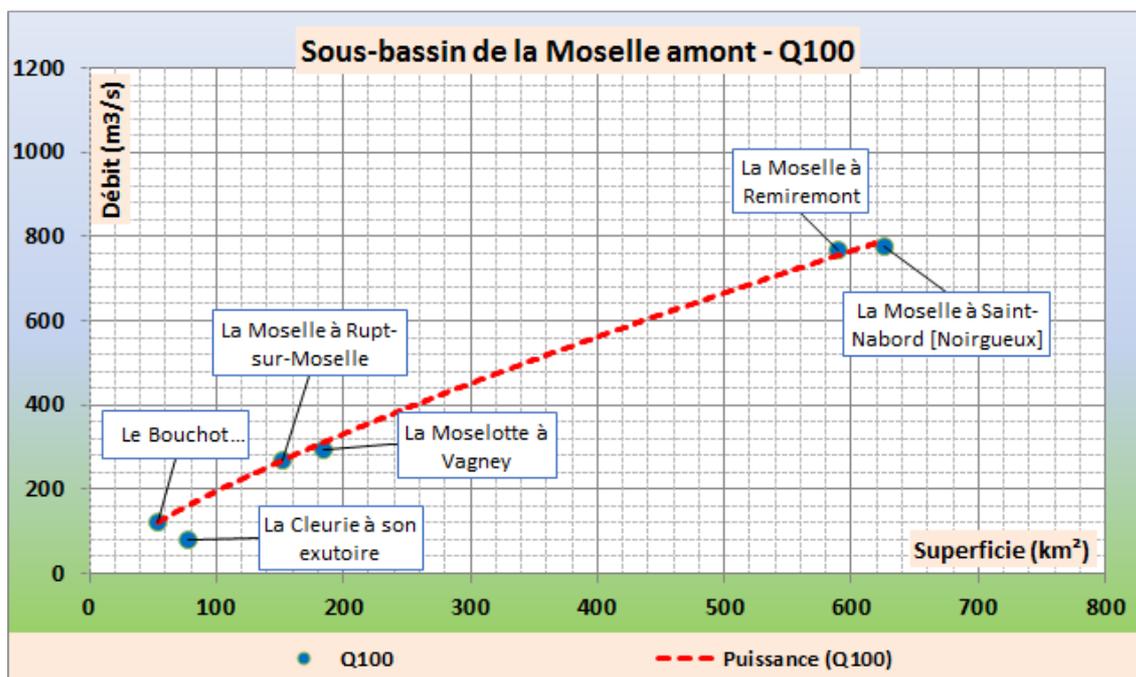


Figure 7-1 : homogénéité sur le sous-bassin de la Moselle amont à Remiremont pour une crue centennale.

La figure suivante illustre l'homogénéité des débits sur la Moselle et ses affluents entre Remiremont et Toul. Les valeurs estimées sur la Niche, le Brénon et le Neuné se rapprochent assez bien de la courbe d'ajustement. Les valeurs obtenues apparaissent plutôt cohérentes avec les autres affluents de ce secteur géographique, marqué par la transition entre le massif vosgien et le plateau lorrain.

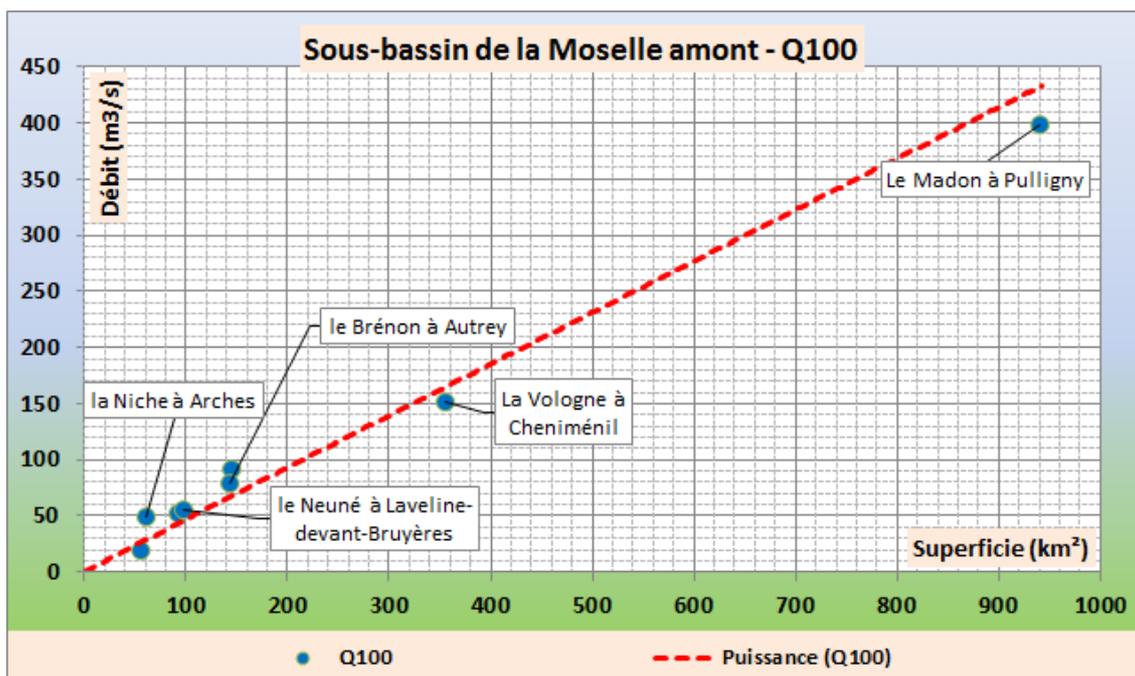


Figure 7-2 : homogénéité sur les affluents de la Moselle amont entre Remiremont et Toul pour une crue centennale.

La figure suivante illustre l’homogénéité des débits sur la Meurthe et ses affluents. Les différents points s’ajustent plutôt correctement. Les deux points les plus éloignés de la courbe d’ajustement correspondent à la Plaine et au Sânon.

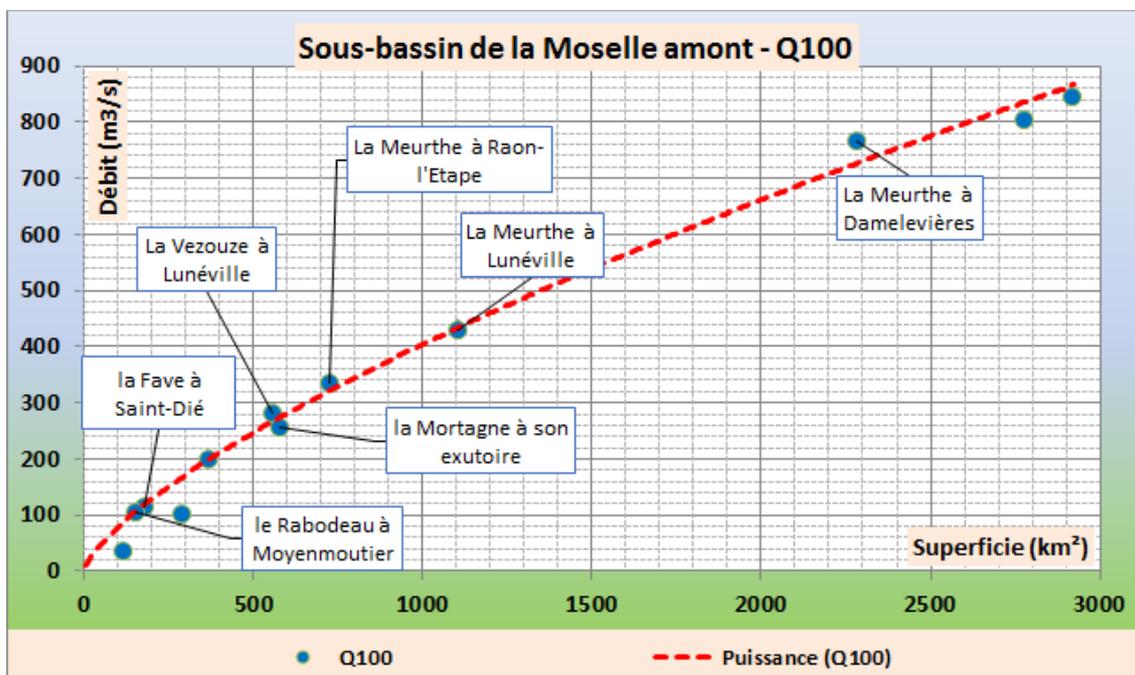


Figure 7-3 : homogénéité sur les affluents de la Meurthe pour une crue centennale.

ANNEXE 1 FICHES STATIONS

ANNEXE 2 DETAIL DES CALCULS DE DEBITS

ANNEXE 3 RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES PAR MODELISATION PLUIE-DEBIT

Pour plusieurs points de calcul, l'évaluation des hydrogrammes de crues est peu aisée compte tenu de l'absence de station à proximité.

Il s'agit en particulier des sous-bassins suivants :

- Le Bouchot (sous-bassin de la Moselotte) ;
- La Niche ;
- Le Brénon (sous-bassin du Madon) ;
- La Fave (sous-bassin de la Meurthe) ;
- Le Rabodeau (sous-bassin de la Meurthe).

Le cas des petits bassins versants aval est traité à l'ANNEXE 4.

Pour ces points de calcul, les débits de pointe sont estimés par des ajustements à des lois de type Myer.

Les hydrogrammes de crues sont quant à eux estimés à partir d'hydrogrammes de crues reconstitués par modélisation pluie-débit. Le modèle de transformation est un modèle de type GR4h au pas de temps horaire.

Les pluies horaires de bassin versant sont reconstituées à partir des chroniques journalières (données Météo-France) et des données horaires aux postes de la DREAL. En pratique, les pluies journalières des postes Météo-France sont « distribuées » à un pas de temps horaire à partir des pluies horaires du poste DREAL le plus proche. Les données horaires étant relativement récentes, les crues reconstituées le sont à partir de 1998 (très peu de postes horaires antérieurs à cette date).

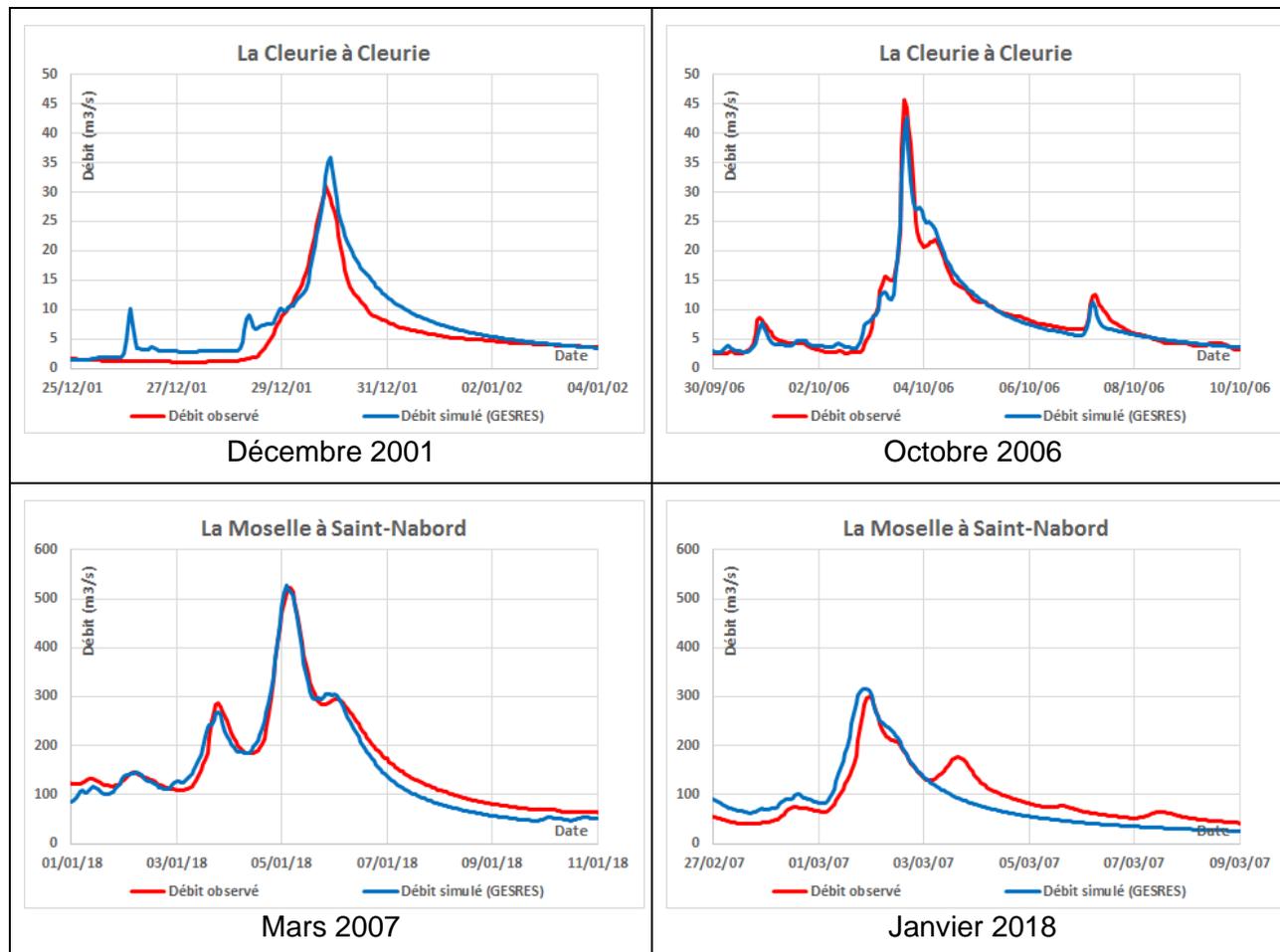
Plusieurs crues historiques sont ainsi reconstituées. A noter que plusieurs grandes crues ne peuvent être reconstituées faute de données horaires : crues d'avril et mai 1983, février 1990 par exemple. Le tableau suivant liste les crues utilisées pour chaque bassin versant.

Bouchot	Niche	Brénon	Fave	Rabodeau
Octobre 1998	Octobre 1998	Octobre 1998	Octobre 1998	Octobre 1998
Février 1999	Février 1999	Février 1999	Février 1999	Février 1999
Décembre 2001	Décembre 2001	Décembre 2001	Décembre 2001	Décembre 2001
Janvier 2004	Janvier 2004	Janvier 2004	Janvier 2004	Janvier 2004
Octobre 2006	Octobre 2006	Octobre 2006	Octobre 2006	Octobre 2006
Mars 2007	Mars 2007	Mars 2007	Mars 2007	Mars 2007
Février 2016	Février 2016	Février 2016	Février 2016	Février 2016
Janvier 2018	Janvier 2018	Juin 2016 Janvier 2018	Juin 2016 Janvier 2018	Janvier 2018

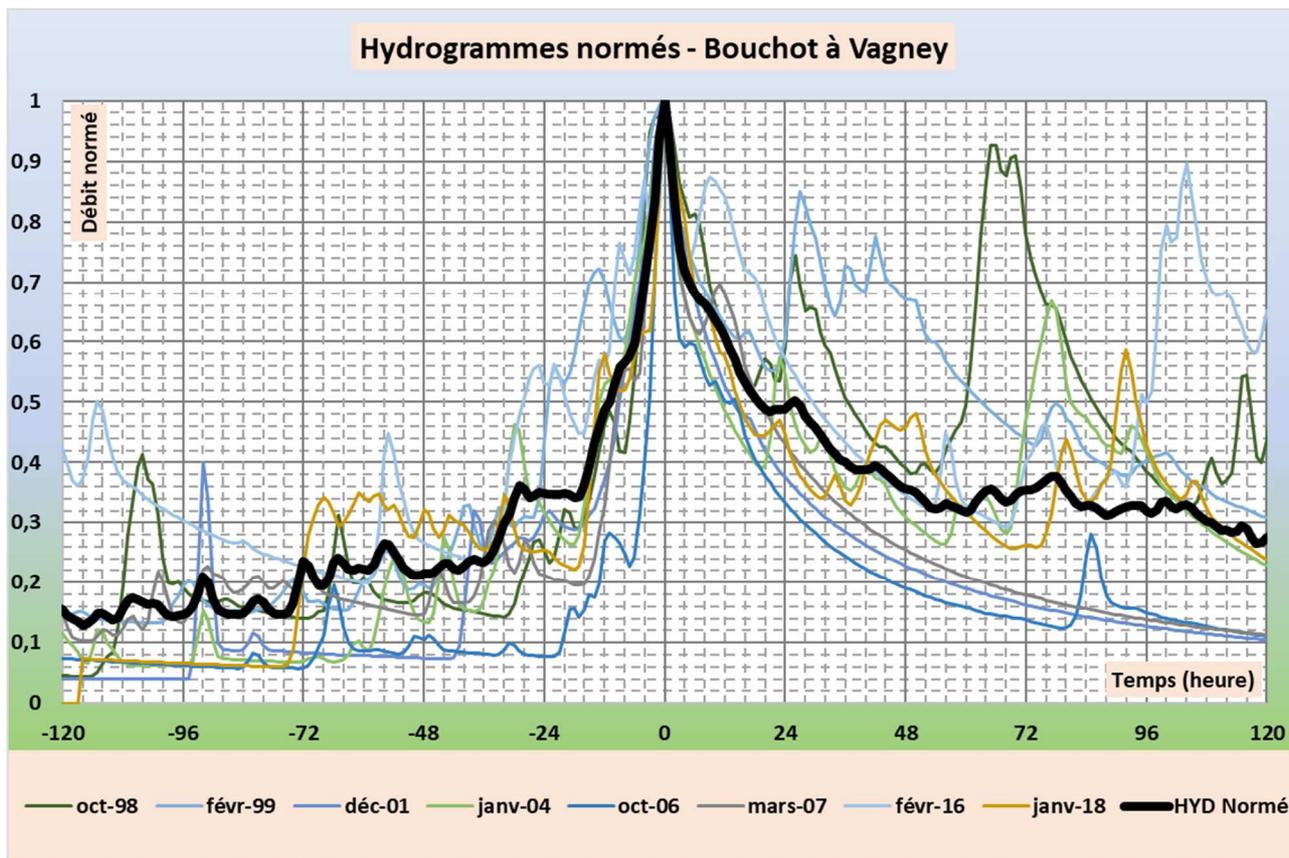
Reconstitution des hydrogrammes du Bouchot

Le calage sur le Bouchot est fait par analogie avec le bassin versant de la Cleurie à Cleurie et de la Moselle amont. Les figures suivantes présentent quelques exemples de calage à la station de Cleurie sur la Cleurie et de Saint-Nabord sur la Moselle.

Le calage est satisfaisant pour des crues de différentes intensités.



Les hydrogrammes reconstitués sur le Bouchot sont utilisés pour estimer l'hydrogramme moyen normé. Huit hydrogrammes reconstitués sont ainsi utilisés. Le temps a pour référence (t = 0) l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.

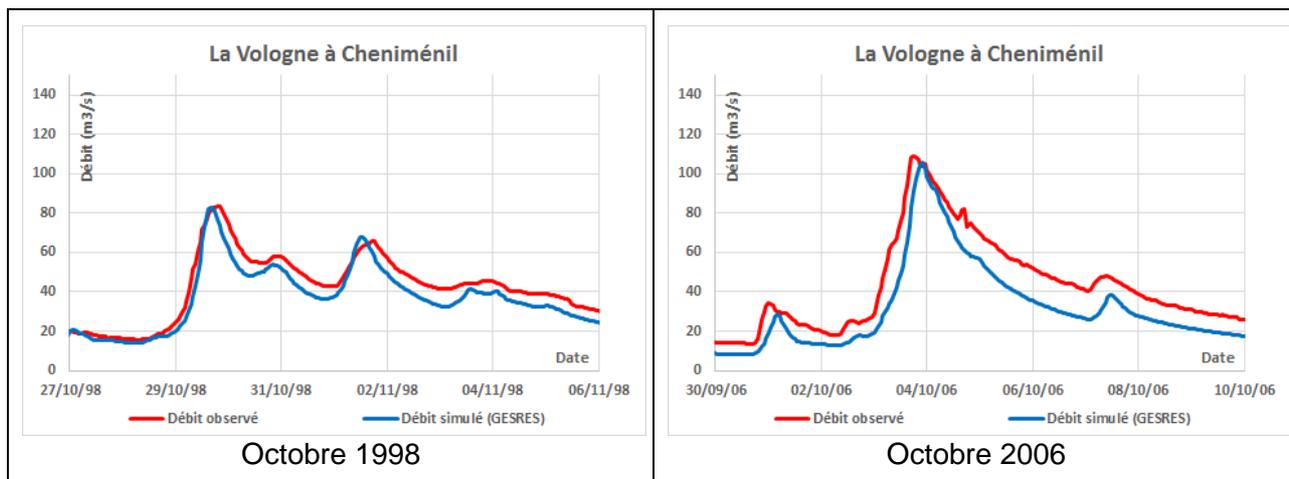


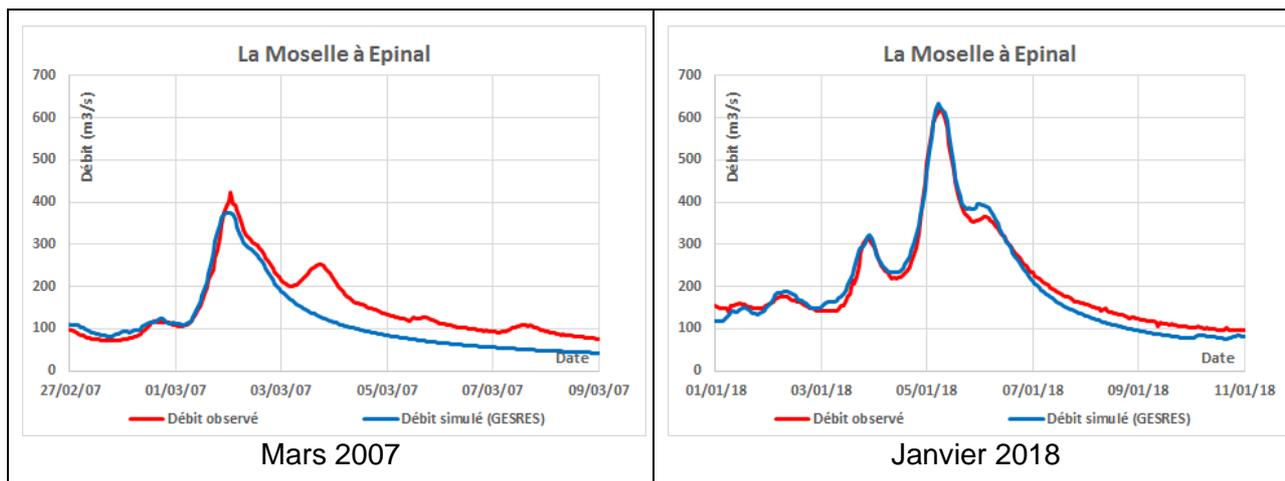
Le modèle hydrologique permet également d'estimer le décalage temporel de la pointe de la crue : il est estimé à 4 heures avant la pointe à Rupt-sur-Moselle.

Reconstitution des hydrogrammes de la Niche

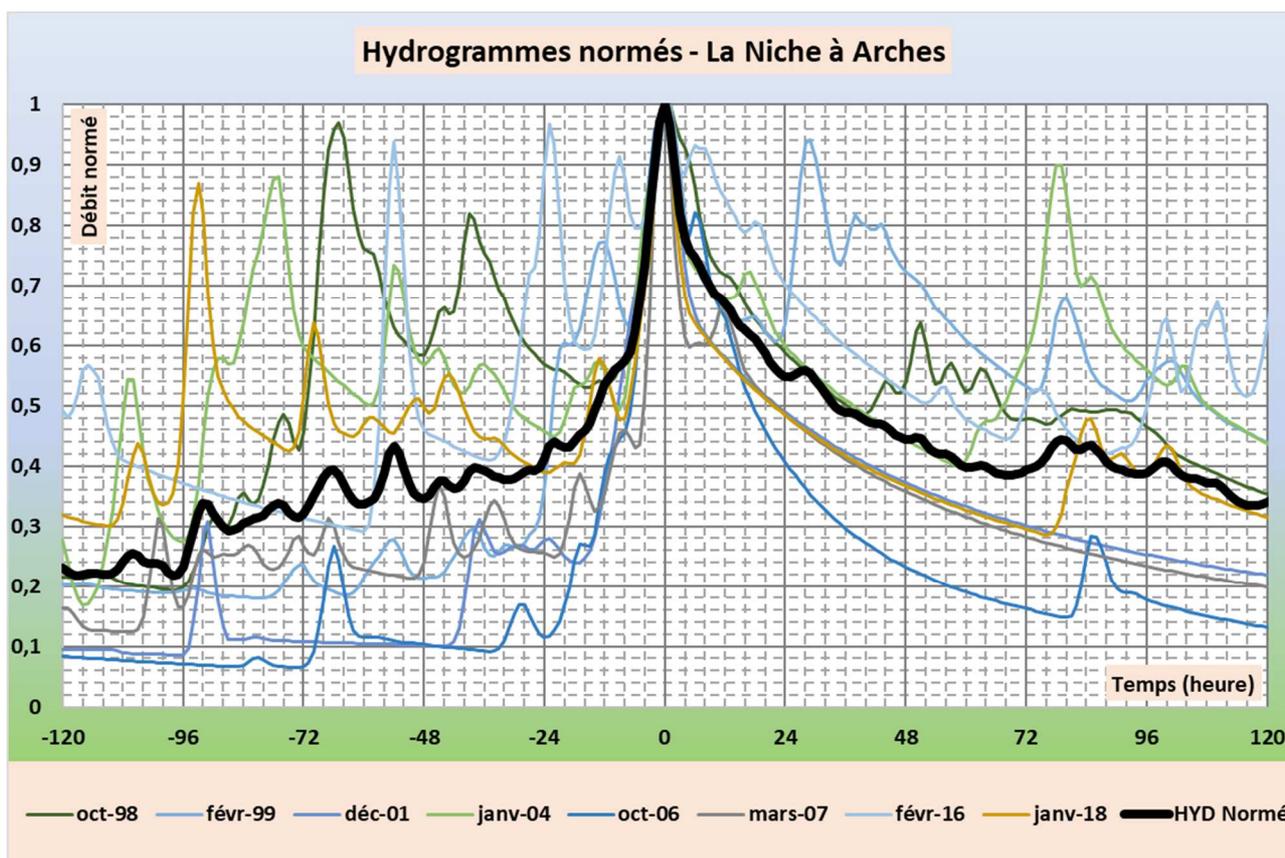
Le calage sur la Niche est fait par analogie avec les bassins versants voisins de la Moselle et la Cleurie. Les figures suivantes présentent quelques exemples de calage aux stations de Cheniménil sur la Vologne et d'Epinal sur la Moselle (à l'aval de la confluence avec la Moselotte).

Le calage est satisfaisant pour des crues de différentes intensités.





Les hydrogrammes reconstitués sur la Niche à la confluence avec la Moselle sont utilisés pour estimer l'hydrogramme moyen normé. Huit hydrogrammes reconstitués sont ainsi utilisés. Le temps a pour référence (t = 0) l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.

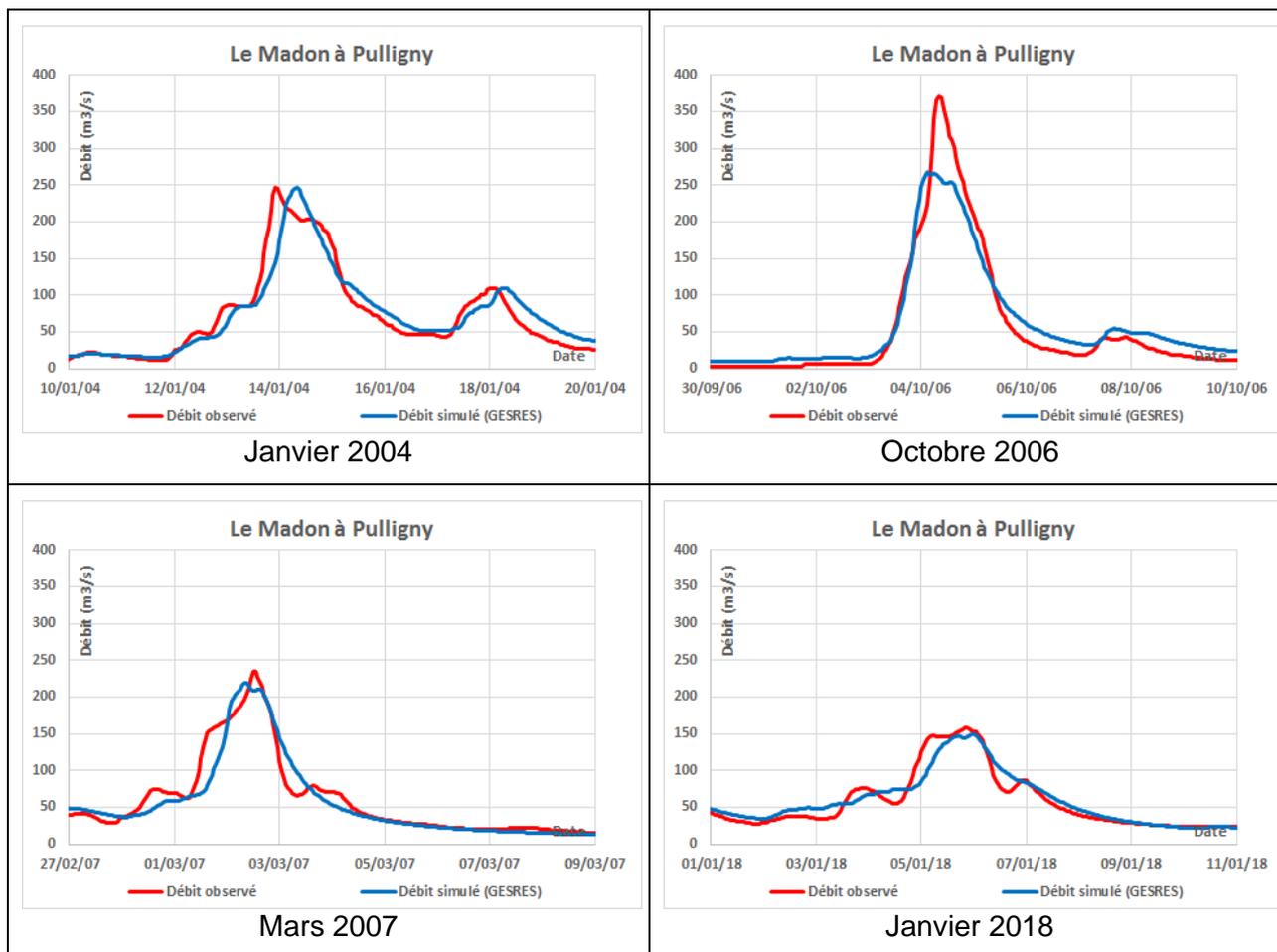


Le modèle hydrologique permet également d'estimer le décalage temporel de la pointe de la crue : il est estimé à 3 heures avant la pointe à Rupt-sur-Moselle.

Reconstitution des hydrogrammes du Brénon

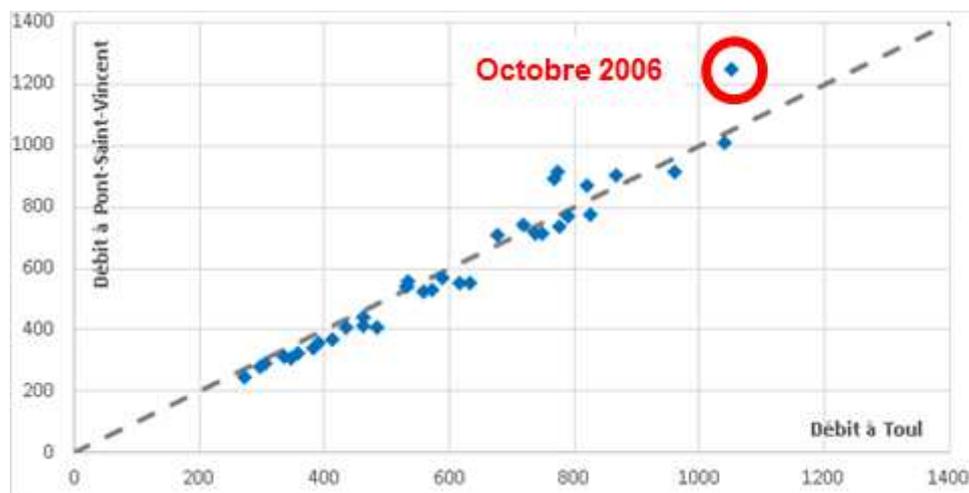
Le calage sur le Brénon est fait par analogie avec le bassin versant du Madon. Les figures suivantes présentent quelques exemples de calage à la station de Pulligny. Le calage est également réalisé sur les stations en aval pour vérifier la cohérence d'ensemble de la reconstitution pluie-débit.

Le calage est satisfaisant pour des crues de différentes intensités.



Pour la crue d'octobre 2006, un écart d'environ 30% est constaté entre le débit modélisé et le débit observé à la station de Pulligny. Ce constat s'inscrit dans le contexte du cas particulier de la Moselle amont entre Pont-Saint-Vincent et Toul, analysé lors de l'étude globale.

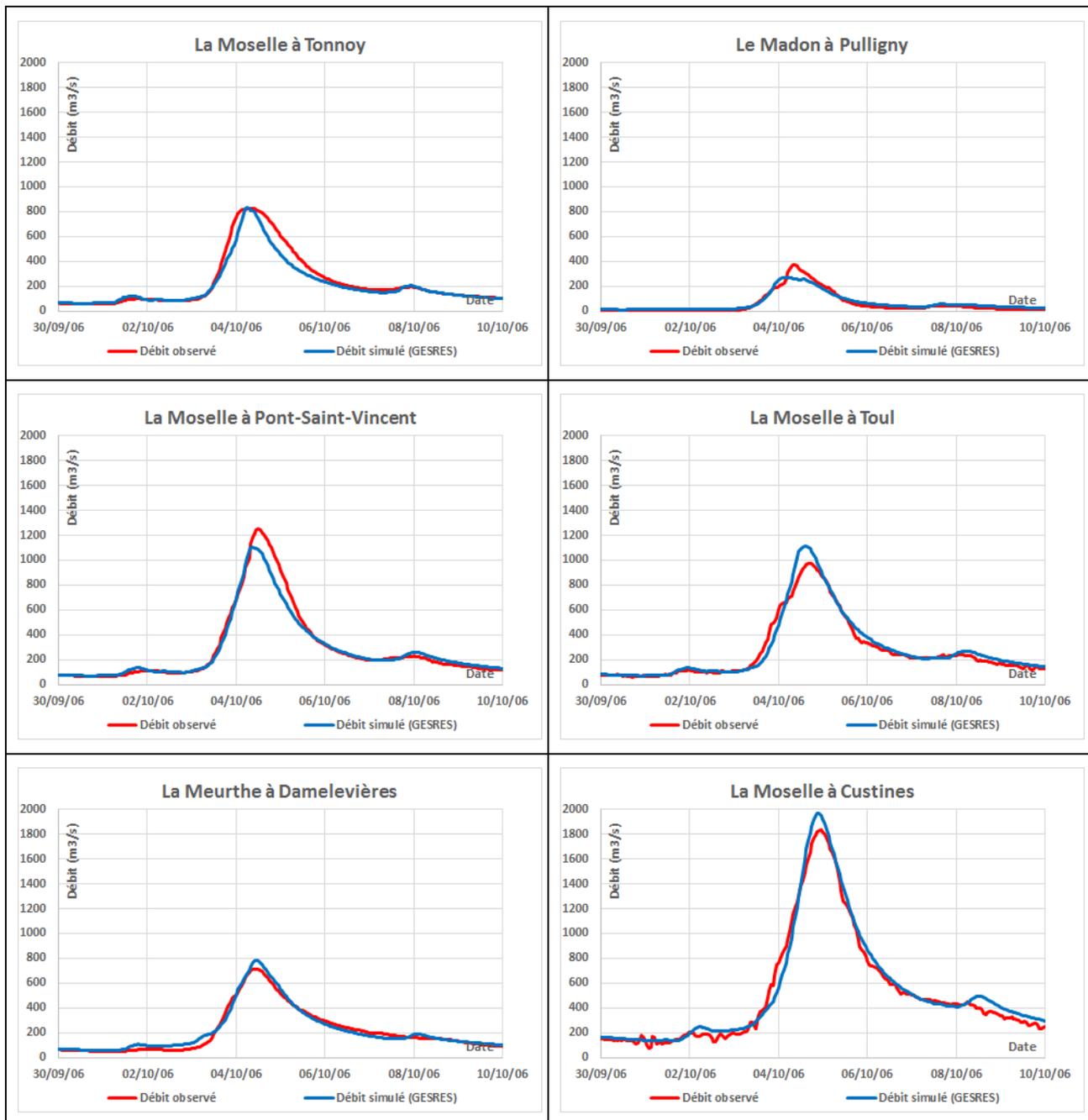
Pour rappel, l'analyse des échantillons de crues aux deux stations met en évidence plusieurs incohérences : si, pour la plupart des événements, le débit à Pont-Saint-Vincent est bien inférieur ou égal à celui à Toul, pour plusieurs événements de crue (en particulier octobre 2006) l'estimation du débit à Pont-Saint-Vincent est significativement supérieure à celle de Toul. Cette analyse ne permet pas de privilégier l'une ou l'autre des deux stations.



Débites de pointe à Pont-Saint-Vincent et Toul en crues (source : Banque Hydro).

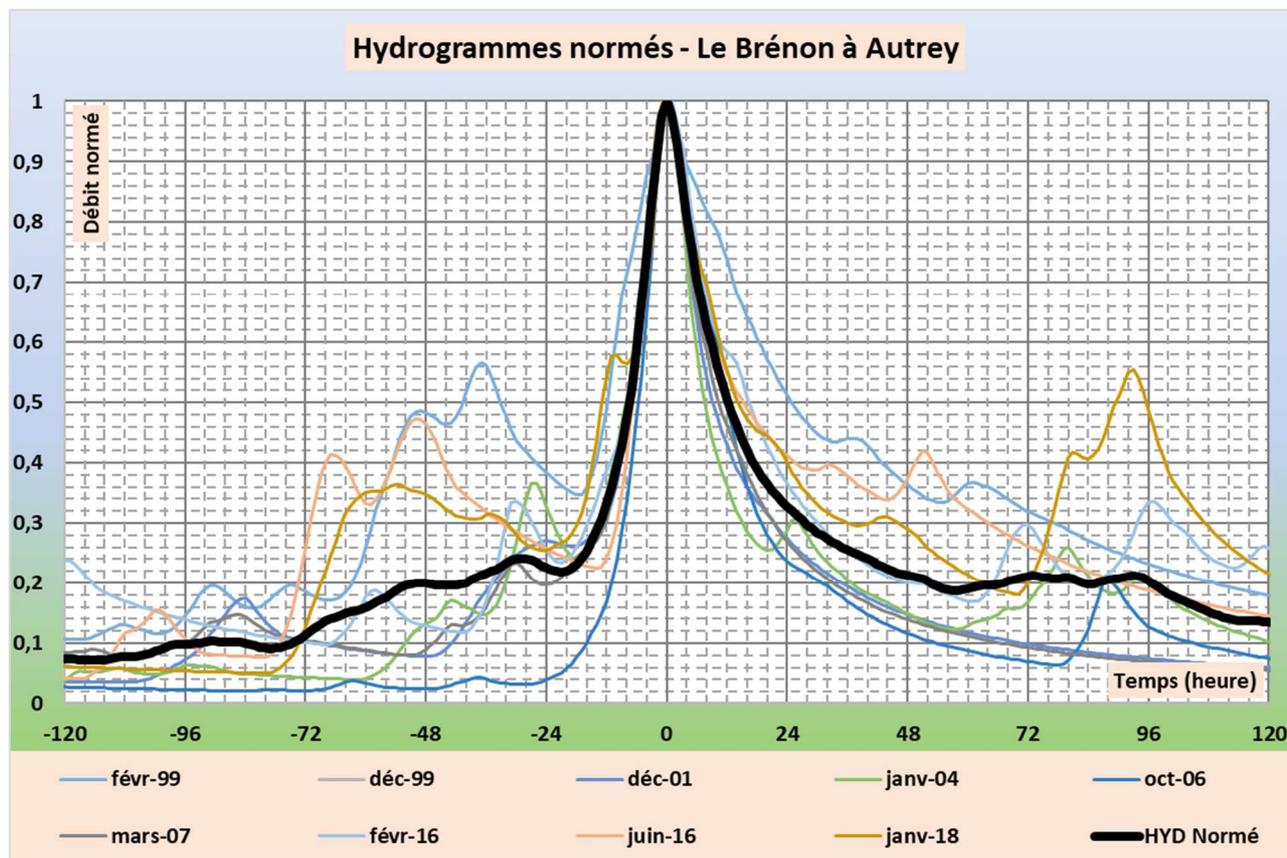
Ces incohérences se propagent ainsi au calage du modèle : le calage du modèle hydrologique sur les hydrogrammes observés est plus ou moins satisfaisant selon les stations considérées. Tantôt les résultats du modèle sont supérieurs aux observations, tantôt inférieurs. En l'occurrence, la station de Pulligny sur le Madon présente le plus fort écart relatif (un peu moins de 30 % sur le débit de pointe).

Les graphiques suivants illustrent le calage du modèle pour cette crue d'octobre 2006 entre Tonnoy et Custines sur la Moselle, en incluant le Madon et la Meurthe. L'échelle des débits est la même pour tous les graphes afin de relativiser les écarts au regard du volume de la crue de la Moselle.



Pour conclure, compte tenu de la performance satisfaisante du modèle au point de calcul de Pulligny pour les autres crues modélisées, le calage est considéré comme valide.

Les hydrogrammes reconstitués sur le Brénon sont utilisés pour estimer l'hydrogramme moyen normé. Neuf hydrogrammes reconstitués sont ainsi utilisés. Le temps a pour référence (t = 0) l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.



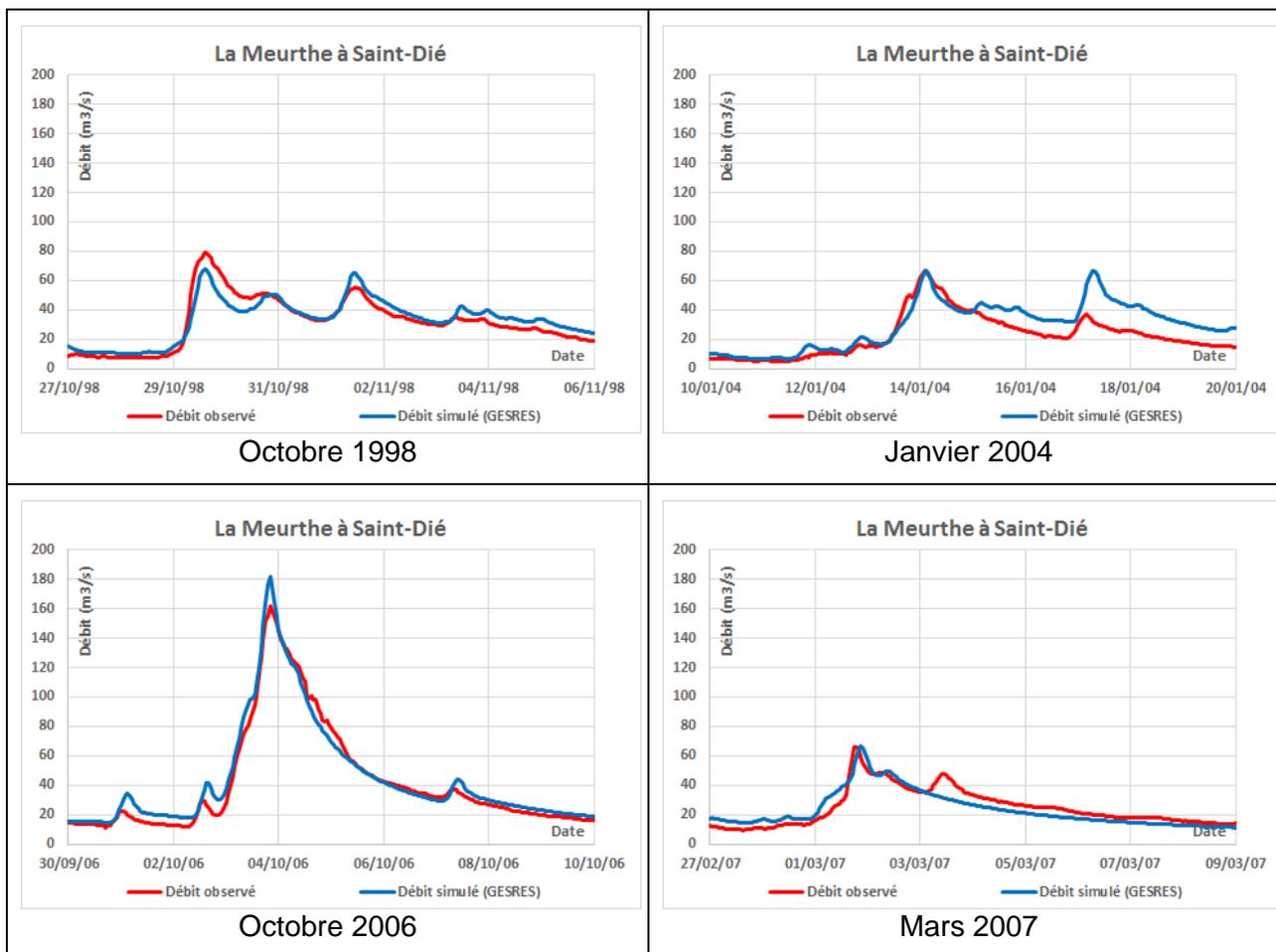
Le modèle hydrologique permet également d'estimer le décalage temporel de la pointe de la crue : il est estimé à 0 heure après la pointe à Rupt-sur-Moselle.

Reconstitution des hydrogrammes de la Fave

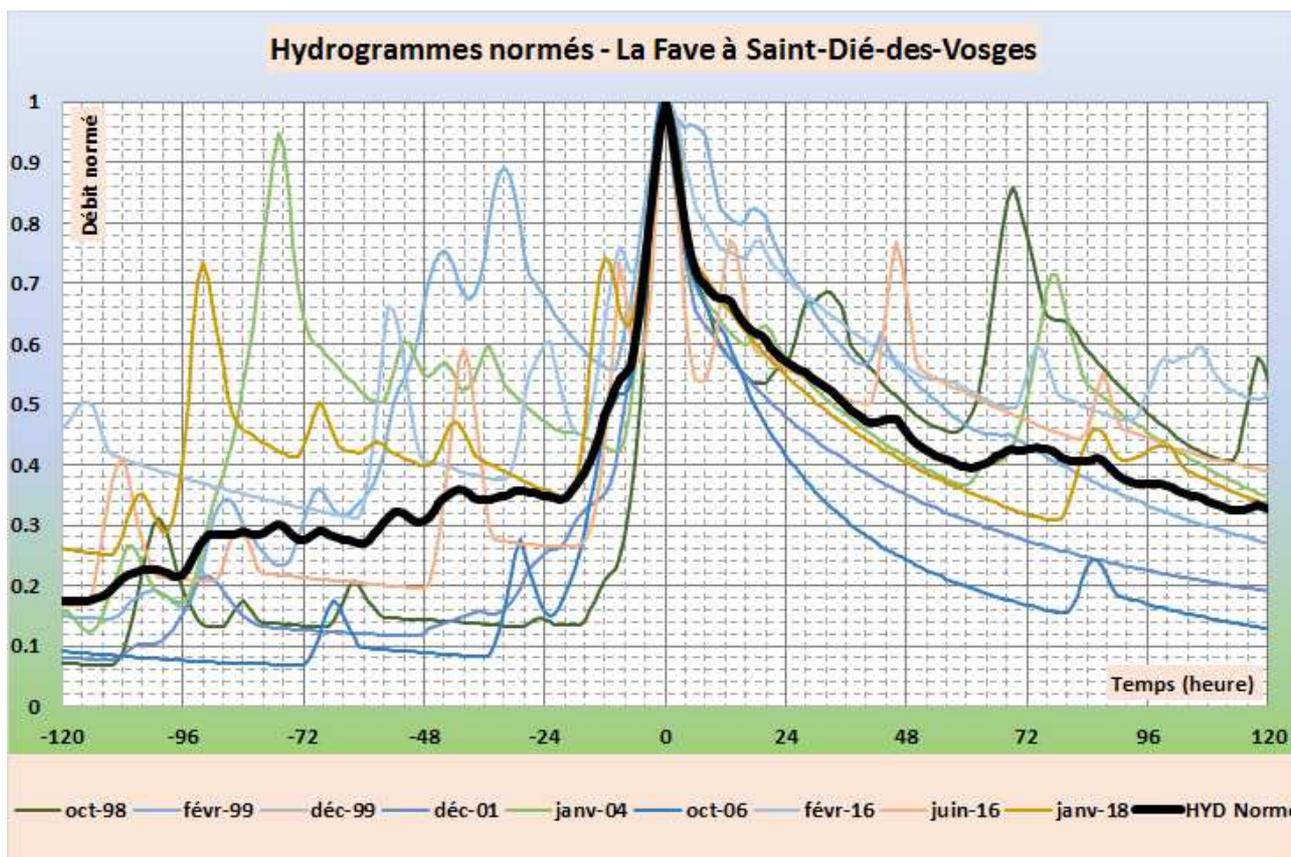
Le calage sur la Fave est fait par analogie avec le bassin versant de la Meurthe à Saint-Dié-des-Vosges.

Les figures suivantes présentent quelques exemples de calage à la station de Saint-Dié-des-Vosges sur la Meurthe.

Le calage est satisfaisant pour des crues de différentes intensités.



Les hydrogrammes reconstitués sur la Fave à la confluence avec la Meurthe à Saint-Dié-des-Vosges sont utilisés pour estimer l'hydrogramme moyen normé. Neuf hydrogrammes reconstitués sont ainsi utilisés. Le temps a pour référence (t = 0) l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.



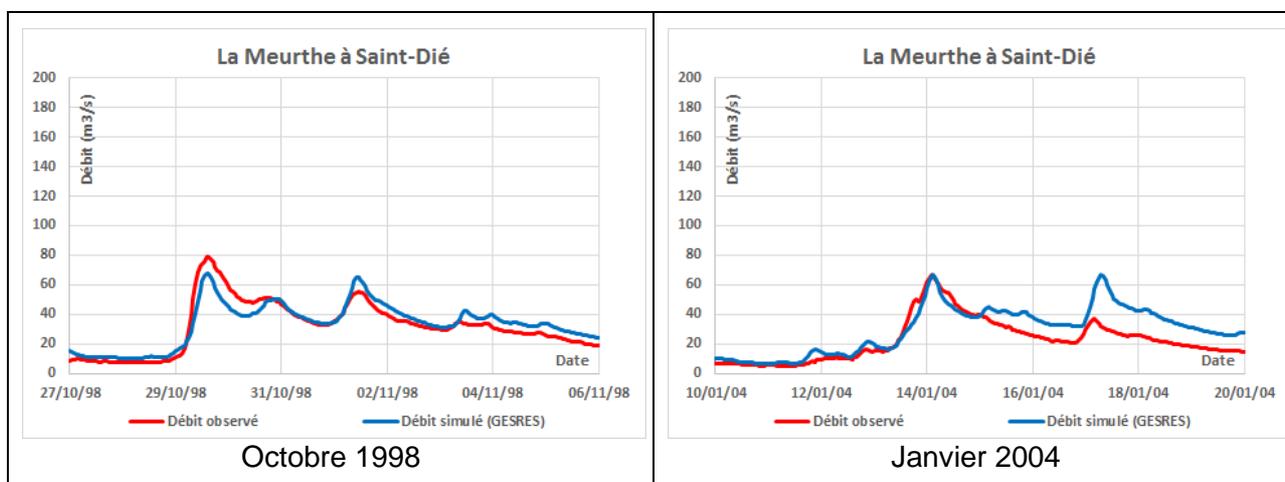
Le modèle hydrologique permet également d'estimer le décalage temporel de la pointe de la crue : il est estimé à 0 heure après la pointe à Rupt-sur-Moselle.

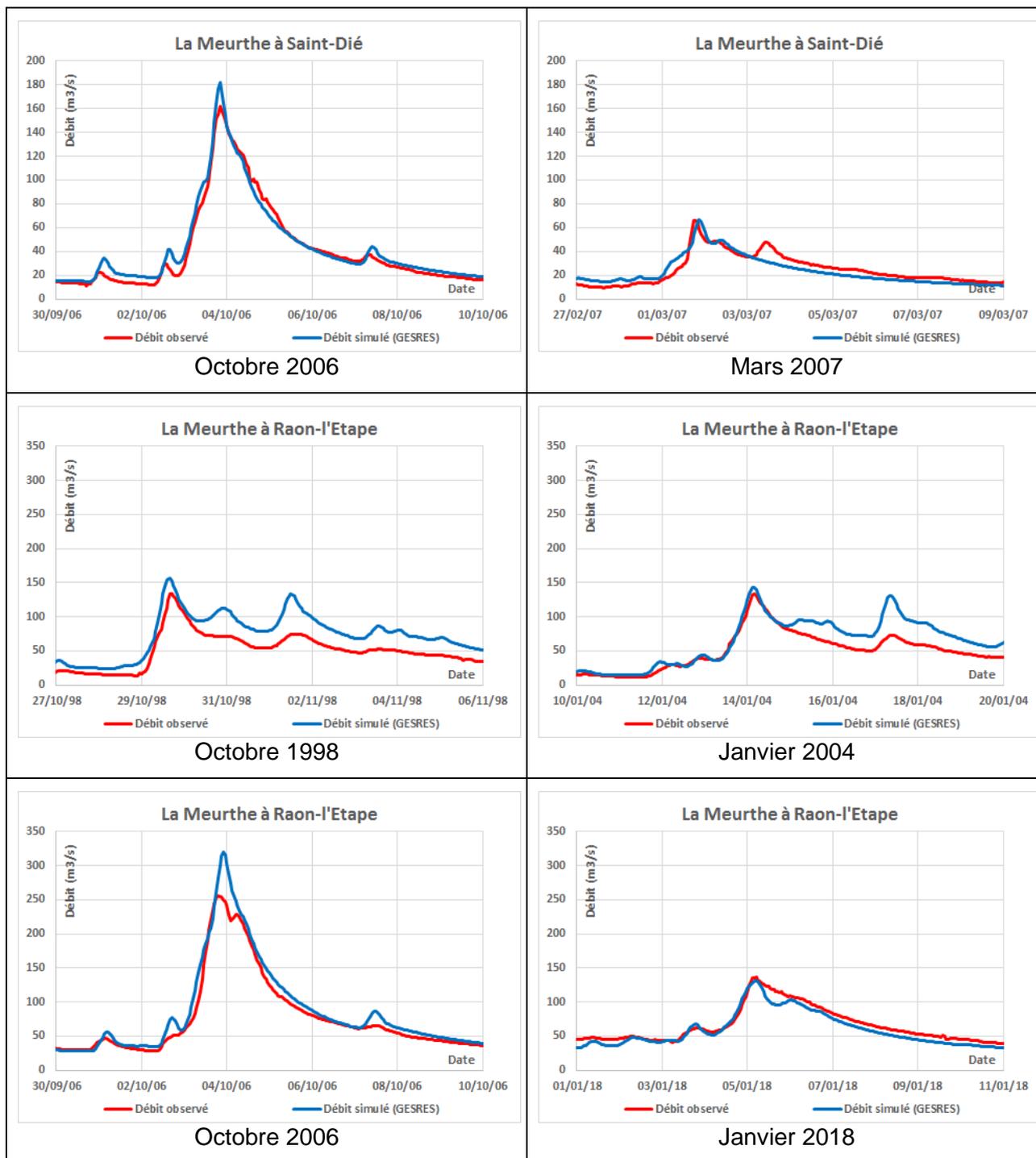
Reconstitution des hydrogrammes du Rabodeau

Le calage sur le Rabodeau, affluent de la Meurthe entre Saint-Dié-des-Vosges et Raon-l'Etape, est fait par analogie avec les bassins versants voisins de la Meurthe à Saint-Dié-des-Vosges et à Raon-l'Etape.

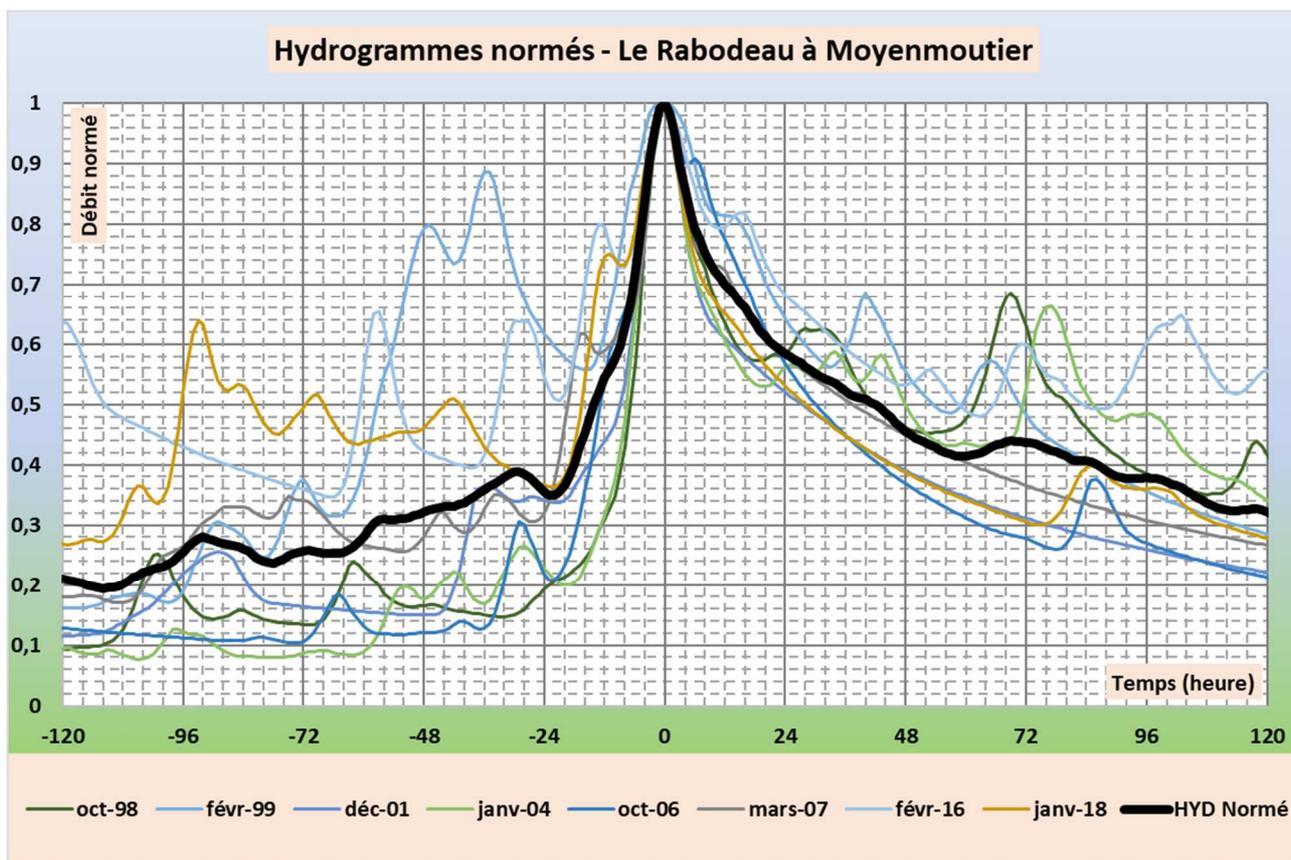
Les figures suivantes présentent quelques exemples de calage aux stations de Saint-Dié-des-Vosges et de Raon-l'Etape sur la Meurthe.

Le calage est satisfaisant pour des crues de différentes intensités.





Les hydrogrammes reconstitués sur le Rabodeau à la confluence avec la Meurthe à Moyenmoutier sont utilisés pour estimer l'hydrogramme moyen normé. Huit hydrogrammes reconstitués sont ainsi utilisés. Le temps a pour référence (t = 0) l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.



Le modèle hydrologique permet également d'estimer le décalage temporel de la pointe de la crue : il est estimé à 0 heure après la pointe à Rupt-sur-Moselle.

ANNEXE 4 RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES SUR LES PETITS BASSINS VERSANTS DE LA MOSELLE AVAL

La reconstitution des débits sur les bassins versants situés sur la Moselle aval (le Helpert, la Mance, le Feigne et le Beaume-Haie), s'appuie sur une reconstitution des débits par modélisation pluie-débit au pas de temps horaire. Le modèle GR4h est utilisé pour cette reconstitution.

Les paramètres du modèle GR4h sont estimés par analogie avec les bassins versants voisins. Les temps de montées des hydrogrammes sont calculés en fonction des temps de concentration.

Cours d'eau	Temps de concentration (h)
Le Helpert	4,9
La Mance	5,8
Le Feigne	4,5
Le Beaume-Haie	3,4

Les chroniques de débits horaires sont simulés en tenant compte des pluies aux postes de Pagny-sur-Moselle, Augny et Metzervisse (pluies journalières). Les chroniques de pluies horaires pour ces trois postes sont construites en reprenant la répartition horaire des pluies au poste de Custines (pluies horaires) fournies par la DREAL Grand-Est. Les chroniques ainsi reconstituées s'étendent de septembre 1991 à mai 2020.

La simulation permet de reconstituer une chronique de débits horaires de ces 4 cours d'eau sur cette même période de septembre 1991 à mai 2020. La même méthodologie est ensuite appliquée sur cette chronique de débits horaires :

- Ajustements statistiques ;
- Hydrogrammes moyens normés ;
- Application de la méthode du GRADEX et de la méthode AGREGEE.

La durée caractéristique pour l'application des méthodes de type GRADEX est très variable, le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes retenues pour chacun des points de calcul.

Le gradex des pluies de durée D est calculé à partir du gradex des pluies de durée 24 heures en utilisant le coefficient de Montana à Custines ($b=0,72$). La formulation est la suivante :

$$P(D) = P(24 \text{ heures}) \cdot \left(\frac{D}{24}\right)^{1-b}$$

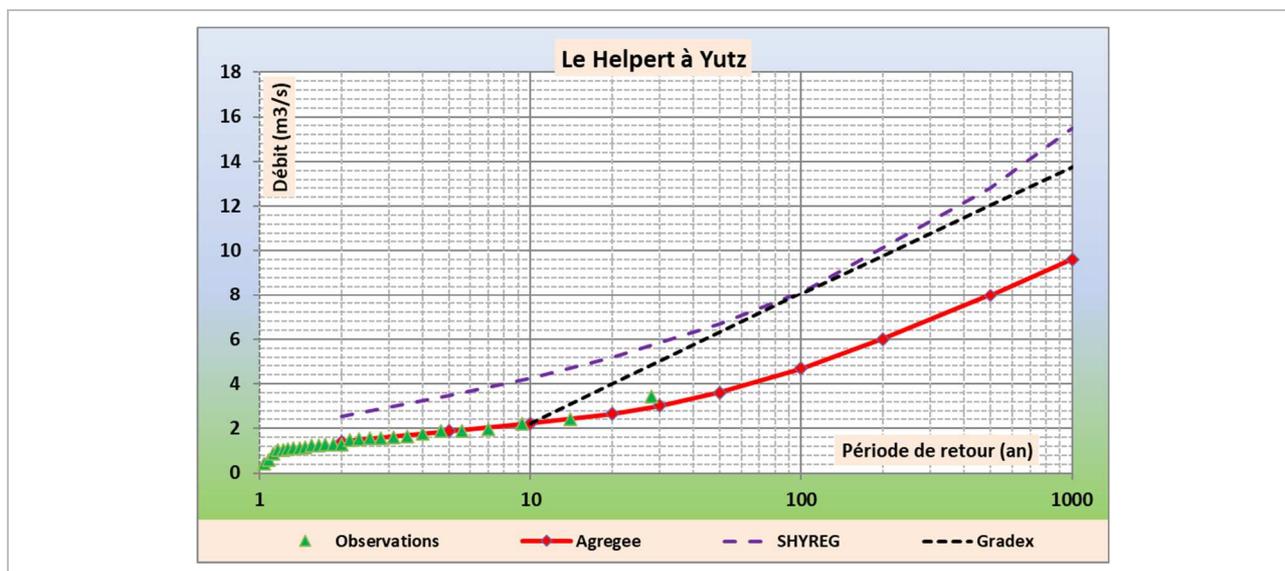
La mise en œuvre de la méthodologie permet de reconstituer les débits horaires de crues de différentes périodes de retour. Le passage au débit de pointe se fait par un coefficient de forme reliant le débit de pointe au débit horaire : ce coefficient est évalué à 1,3 pour tous les bassins à partir des chroniques horaires reconstituées, il est supposé constant.

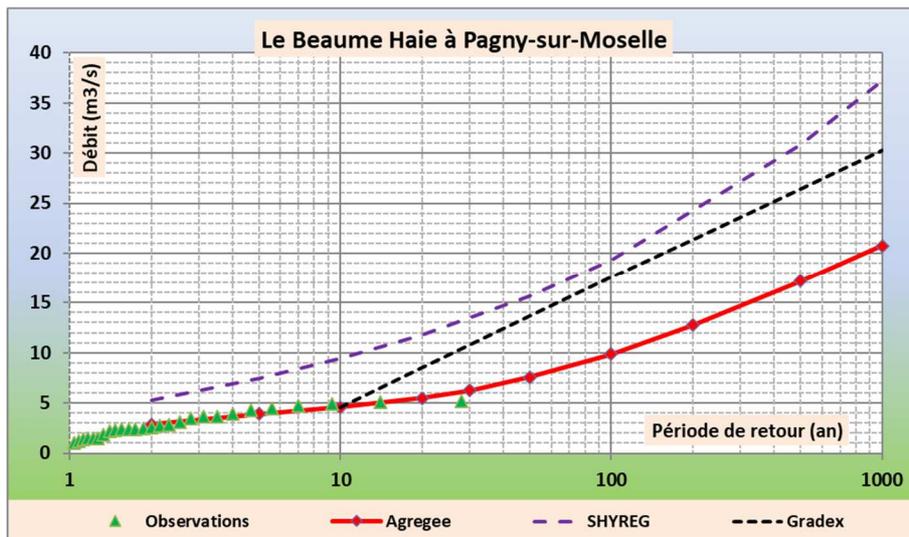
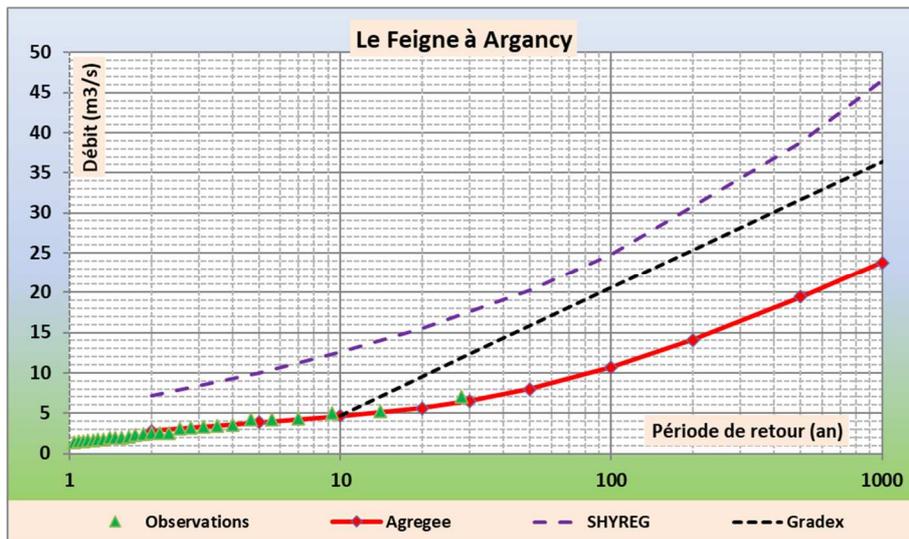
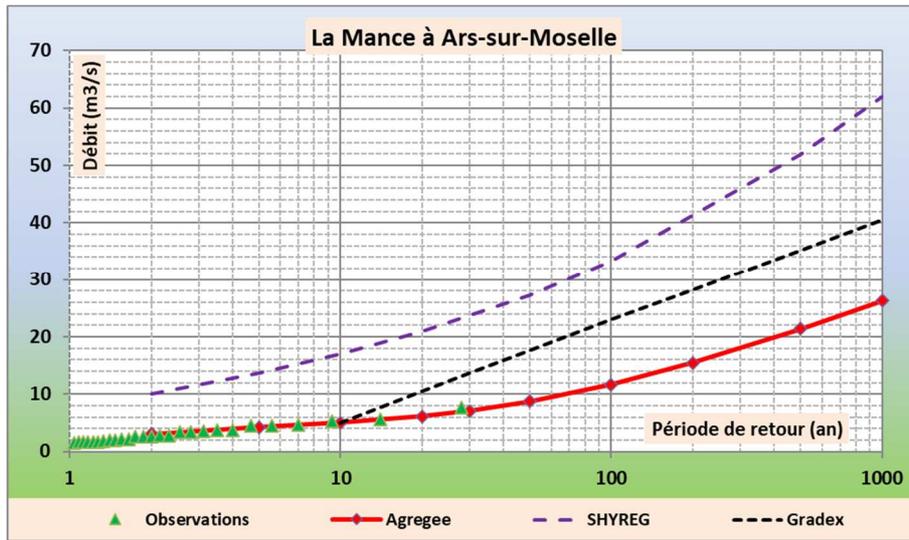
Cours d'eau	Durée caractéristique D retenue (h)	Facteur de forme r retenu
Le Helpert	8	1,3
La Mance	6	1,3
Le Feigne	6	1,3
Le Beaume-Haie	8	1,3

Compte tenu de la faible taille des bassins versants, il est proposé de retenir la méthode du GRADEX pour l'estimation des débits de crues.

Période de retour (ans)	Le Beaume-Haie à Pagny-sur-Moselle	La Mance à Ars-sur-Moselle	Le Feigne à Argancy	Le Helpert à Yutz
2	3	3	3	1,4
5	4	4	4	2,3
10	5	5	5	2,9
30	11	14	13	5,7
50	14	18	16	7,0
100	18	23	21	8,7
1 000	30	41	37	14,4

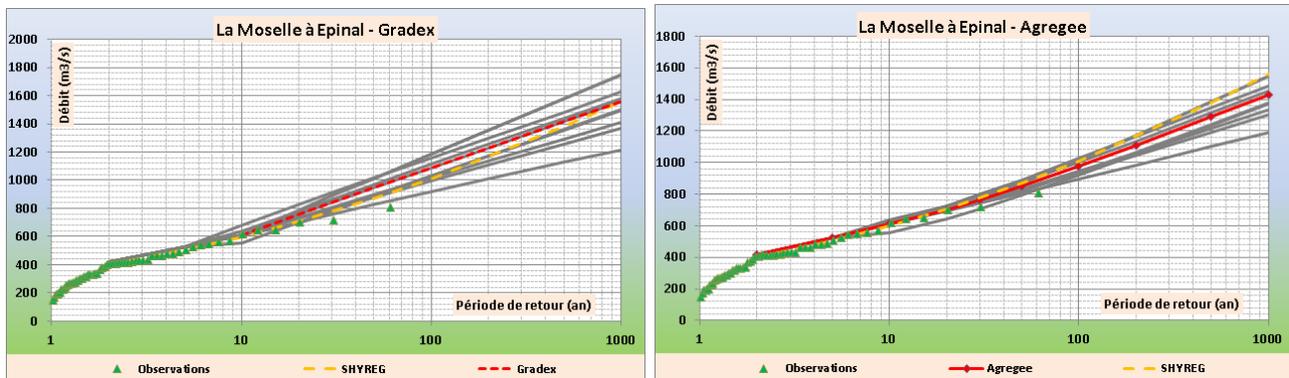
Le modèle hydrologique ne permet pas d'estimer un décalage temporel de la pointe de crue avec la Moselle : les crues sont globalement décorréées, les quatre bassins ayant des temps de réactions beaucoup plus rapides que la Moselle aval.





Concernant la méthode AGREGEE, il n'est pas réalisé de test sur le gradex des débits : la sensibilité au gradex des pluies est plus forte que la sensibilité au gradex des débits.

L'application de ces différents tests donnent un fuseau d'estimations des débits de crues de différentes périodes de retour illustré sur les deux figures suivantes dans le cas de la station d'Epinal :



Le fuseau associé à la méthode du GRADEX est plus large que celui associé à la méthode AGREGEE.

Pour les grandes périodes de retour (~1 000 ans), les bornes supérieures et inférieures correspondent systématiquement aux tests sur le gradex des pluies. En-deçà, les bornes supérieures et inférieures sont variables selon le test.

Les intervalles d'incertitudes proposés correspondent à l'enveloppe des différents tests pour chaque période de retour : la borne inférieure est la valeur minimale des différents tests effectués, la borne supérieure étant la valeur maximale.

