

Eau
Environnement

Grand Est
ALSACE CHAMPAGNE-ARDENNE LORRAINE



⊕
REGION GRAND EST

ETUDE HYDROLOGIQUE GLOBALE DU BASSIN VERSANT DE LA MOSELLE

Rapport de mission 1-2 : crues de référence

Rapport n° : 20F-085-RP-2
Révision n° : C
Date : 20/06/2022

Votre contact :
Olivier BARBET
barbet@isl.fr

Rapport

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 20/06/2022.

Révision	Date	Auteur	Chef de Projet	Superviseur	Commentaire
A	24/02/2022	OBA	OBA	OBA	
B	17/06/2022	OBA	OBA	BSE	Intégration remarques suite COPIL du 13 janvier 2022 Version finale Version finale
C	20/06/2022	OBA	OBA	BSE	Version finale Modification des résultats sur l'Yron et le Longeau

BSE : SEUROT Benjamin

OBA : BARBET Olivier



SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	1
1.1	CONTEXTE GENERAL	1
1.2	OBJECTIFS DE L'ETUDE	1
1.3	PERIMETRE DE L'ETUDE	1
1.4	ORGANISATION DE L'ETUDE	3
1.5	PILOTAGE ET ETAPES DE VALIDATION	3
2	RESUME – SYNTHÈSE	5
2.1	METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE	5
2.2	ANALYSE DES RESULTATS – POINTS DISCUTES	6
2.2.1	COHERENCE AVEC LES ESTIMATIONS DES ETUDES ANTERIEURES	6
2.2.2	POINTS PARTICULIERS	6
2.2.2.1	Estimations à Pont-Saint-Vincent et Toul sur la Moselle	7
2.2.2.2	Choix de la méthode d'extrapolation pour l'estimation des débits de la Meurthe à Saint-Dié-des-Vosges	7
2.2.2.3	Cas de la station hydrométrique de Metz Pont-des-Morts	8
2.3	SYNTHÈSE DES VALEURS PROPOSEES	9
2.3.1	AXE MOSELLE	9
2.3.2	AFFLUENTS DE LA MOSELLE AMONT	10
2.3.3	AXE MEURTHE	11
2.3.4	AFFLUENTS DE LA MEURTHE	12
2.3.5	AFFLUENTS DE LA MOSELLE AVAL	12
2.3.6	SEILLE ET SES AFFLUENTS	13
2.3.7	ORNE ET SES AFFLUENTS	13
3	METHODOLOGIE	15
3.1	LA PREDETERMINATION DES DEBITS DE CRUES – PREAMBULE	15
3.1.1	METHODES D'ANALYSE STATISTIQUES	15
3.1.2	METHODES HYDRO-METEOROLOGIQUES	15
3.1.3	METHODES DE SIMULATION STOCHASTIQUES	15
3.1.4	CONSTRUCTION DES HYDROGRAMMES DE CRUES	16
3.2	ANALYSE STATISTIQUE DES DEBITS OBSERVES	16

3.2.1	METHODES D'ECHANTILLONNAGE	16
3.2.1.1	Echantillonnage des maxima annuels de débits de pointe – MAXAN	16
3.2.1.2	Echantillonnage des débits de pointe de crues supérieurs à un seuil – SUPSEUIL	16
3.2.1.3	Fréquence empirique	17
3.2.2	LOIS D'AJUSTEMENTS – ECHANTILLONNAGE MAXAN	17
3.2.2.1	Loi de Gumbel	17
3.2.2.2	Loi GEV (valeurs extrêmes)	17
3.2.3	LOIS D'AJUSTEMENTS – ECHANTILLONNAGE SUPSEUIL	18
3.2.3.1	Loi exponentielle	18
3.2.3.2	Loi GPD (Pareto généralisée)	18
3.2.4	TESTS SUR LES ECHANTILLONS	18
3.2.4.1	Test d'indépendance	18
3.2.4.2	Test de stationnarité	18
3.2.4.3	Test d'homogénéité	19
3.3	METHODES HYDRO-METEOROLOGIQUES	19
3.3.1	METHODE DU GRADEX	19
3.3.1.1	Formulation	19
3.3.1.2	Hypothèses	19
3.3.2	METHODE DU GRADEX PROGRESSIF OU AGREGEE	20
3.3.2.1	Formulation	20
3.3.2.2	Hypothèses	21
3.3.3	LIMITES DES METHODES PLUIE-DEBIT S'APPUYANT SUR LE GRADEX DES PLUIES	21
3.3.4	CHOIX ENTRE LA METHODE GRADEX ET LA METHODE AGREGEE	21
3.4	BASE DE DONNEES SHYREG-DEBIT DE 2019	21
3.5	METHODOLOGIE GLOBALE MISE EN ŒUVRE	22
4	LA MOSELLE AMONT	24
4.1	POINTS DE CALCUL	24
4.2	RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES	24
4.3	TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL	27
4.4	HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE	29
5	AFFLUENTS DE LA MOSELLE AMONT	31
5.1	POINTS DE CALCUL	31
5.2	RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES	32
5.3	BASSINS NON-JAUGES	35

5.4	TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL _____	35
5.5	HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE _____	37
6	LA MEURTHE ET SES AFFLUENTS _____	39
6.1	POINTS DE CALCUL _____	39
6.2	RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES _____	40
6.3	TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL _____	43
6.4	HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE _____	44
7	LA MOSELLE AVAL _____	46
7.1	POINTS DE CALCUL _____	46
7.2	RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES _____	47
7.3	TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL _____	49
7.4	HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE _____	50
8	LA SEILLE ET SES AFFLUENTS _____	52
8.1	POINTS DE CALCUL _____	52
8.2	RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES _____	52
8.3	TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL _____	54
8.4	HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE _____	54
9	L'ORNE ET SES AFFLUENTS _____	56
9.1	POINTS DE CALCUL _____	56
9.2	RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES _____	56
9.3	CAS DE L'YRON A JARNY _____	58
9.4	TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL _____	60
9.5	HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE _____	61
10	AFFLUENTS DE LA MOSELLE AVAL _____	63
10.1	POINTS DE CALCUL _____	63
10.2	RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES _____	63
10.3	TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL _____	65
10.4	HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE _____	65
11	SYNTHESE ET HOMOGENEITE DES RESULTATS _____	67

11.1	MOSELLE AMONT ET AFFLUENTS	67
11.1.1	AFFLUENTS DE LA MOSELLE	67
11.1.1.1	Comparaison avec les valeurs issues de la bibliographie	67
11.1.1.2	Homogénéité des résultats	68
11.1.2	L'AXE MOSELLE AMONT	68
11.1.2.1	Comparaison avec les valeurs issues de la bibliographie	68
11.1.2.2	Homogénéité des résultats	70
11.2	MEURTHE ET SES AFFLUENTS	71
11.2.1	COMPARAISON AVEC LES VALEURS ISSUES DE LA BIBLIOGRAPHIE	71
11.2.2	HOMOGENEITE DES RESULTATS	72
11.3	MOSELLE AVAL	72
11.3.1	AFFLUENTS DE LA MOSELLE AVAL	72
11.3.1.1	Comparaison avec les valeurs issues de la bibliographie	72
11.3.1.2	Homogénéité des résultats	73
11.3.2	L'AXE MOSELLE AVAL	74
11.3.2.1	Comparaison avec les valeurs issues de la bibliographie	74
11.3.2.2	Homogénéité des résultats	74
11.4	COHERENCE D'ENSEMBLE DES RESULTATS	75
11.4.1	COHERENCE DES DEBITS DE POINTE	75
11.4.2	COHERENCE DES VOLUMES DE CRUES	76
12	BIBLIOGRAPHIE	78

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 FICHES STATIONS – MOSELLE AMONT

ANNEXE 2 FICHES STATIONS – AFFLUENTS DE LA MOSELLE AMONT

ANNEXE 3 FICHES STATIONS – MEURTHE ET SES AFFLUENTS

ANNEXE 4 FICHES STATIONS – MOSELLE AVAL

ANNEXE 5 FICHES STATIONS – SEILLE ET SES AFFLUENTS

ANNEXE 6 FICHES STATIONS – ORNE ET SES AFFLUENTS**ANNEXE 7 FICHES STATIONS – AFFLUENTS DE LA MOSELLE AVAL****ANNEXE 8 DETAIL DES CALCULS DE DEBITS****ANNEXE 9 RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES PAR
MODELISATION PLUIE-DEBIT****ANNEXE 10 RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES SUR LE
BASSIN VERSANT DU RUISSEAU D'OLIMA****ANNEXE 11 ESTIMATION DES INTERVALLES D'INCERTITUDE****TABLE DES FIGURES**

Figure 2-1 : géologie de la Moselle amont. _____	7
Figure 3-1 : illustration de l'influence du coefficient de forme sur la forme des hydrogrammes. _	20
Figure 4-1 : incohérence mise en évidence entre les estimations à Pont-Saint-Vincent et Toul. _	27
Figure 4-2 : débits de pointe à Pont-Saint-Vincent et Toul en crues (source : Banque Hydro). _	28
Figure 4-3 : jaugeages et courbes de tarage aux stations de Pont-Saint-Vincent et Toul (source des données : DREAL Grand-Est) _____	28
Figure 4-4 : hydrogrammes des crues de références sur la Moselle amont. _____	30
Figure 5-1 : hydrogrammes des crues de références sur les affluents de la Moselle amont. _____	38
Figure 6-1 : hydrogrammes des crues de références sur le bassin versant de la Meurthe. _____	45
Figure 7-1 : débits de crues sur l'axe Moselle aval pour Q10, Q100 et Q1000. _____	49
Figure 7-2 : hydrogrammes des crues de références sur la Moselle aval. _____	51
Figure 8-1 : hydrogrammes des crues de références sur la Seille et la Petite Seille. _____	55
Figure 9-1 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Orne et ses affluents. _____	58
Figure 9-2 : échantillons des débits journaliers maximaux annuels calculés et observés (durée caractéristique D = 1 jour) à la station de Boncourt sur l'Orne. _____	59
Figure 9-3 : hydrogrammes des crues de références sur l'Orne et ses affluents. _____	62
Figure 10-1 : hydrogrammes des crues de références sur les affluents de la Moselle aval. _____	66
Figure 11-1 : appréciation des écarts entre les méthodologies d'estimation des crues. _____	67
Figure 11-2 : comparaison des estimations de crue centennale – affluents de la Moselle amont. _____	67
Figure 11-3 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Affluents de la Moselle amont. _____	68
Figure 11-4 : comparaison des estimations de crue centennale – axe Moselle amont. _____	69

Figure 11-5 : loi de tarage à Toul d'après données de l'étude AZI de 2000. _____	69
Figure 11-6 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Moselle amont. _____	70
Figure 11-7 : homogénéité sur les volumes de crue Q100 – Moselle amont. _____	70
Figure 11-8 : comparaison des estimations de crue centennale – Meurthe et affluents. _____	71
Figure 11-9 : appréciation des écarts entre les méthodologies d'estimation des crues sur le Sânon. _____	71
Figure 11-10 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Meurthe. _____	72
Figure 11-11 : homogénéité sur les volumes de crue Q100 – Meurthe. _____	72
Figure 11-12 : comparaison des estimations de crue centennale – affluents de la Moselle aval. _____	73
Figure 11-13 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Affluents de la Moselle aval. _____	73
Figure 11-14 : homogénéité sur les volumes de crue Q100 – Affluents de la Moselle aval. _____	74
Figure 11-15 : comparaison des estimations de crue centennale – axe Moselle aval. _____	74
Figure 11-16 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Moselle amont. _____	75
Figure 11-17 : homogénéité sur les volumes de crue Q100 – Moselle aval. _____	75
Figure 11-18 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Moselle et Meurthe. _____	76
Figure 11-19 : homogénéité sur les volumes de crue Q100 – Moselle et Meurthe. _____	76

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : liste des points de calcul des débits.	2
Tableau 2-1 : débits de crues estimés à Saint-Dié sur la Meurthe et Cheniménil sur la Vologne.....	8
Tableau 2-2 : débits de crues sur l'axe Moselle amont.....	9
Tableau 2-3 : débits de crues sur l'axe Moselle aval.	10
Tableau 2-4 : débits de crues sur les affluents de la Moselle amont.....	10
Tableau 2-5 : débits de crues sur les affluents de la Moselle amont.....	11
Tableau 2-6 : débits de crues sur le cours de l'axe Meurthe.	11
Tableau 2-7 : débits de crues sur les affluents de la Meurthe.....	12
Tableau 2-8 : débits de crues sur les affluents de la Moselle aval.....	12
Tableau 2-9 : débits de crues sur la Seille et la Petite Seille.	13
Tableau 2-10 : débits de crues sur l'Orne.....	13
Tableau 2-11 : débits de crues sur les affluents de l'Orne.....	14
Tableau 3-1 : échantillons d'hydrogrammes de crues.	22
Tableau 4-1 : points de calcul des débits de crues sur la Moselle amont.	24
Tableau 4-2 : stations hydrométriques sur le cours principal de la Moselle amont.	24
Tableau 4-3 : débits de crues sur la Moselle amont.	25

Tableau 4-4 : débits de référence sur la Moselle amont d'après la bibliographie.....	25
Tableau 4-5 : débits de crues sur la Moselle amont.	26
Tableau 4-6 : débits de référence sur la Moselle amont d'après la bibliographie.....	26
Tableau 4-7 : débits de crues à Pont-Saint-Vincent et Toul sur la Moselle.....	29
Tableau 4-8 : débits de crues sur la Moselle amont – points de calcul.....	29
Tableau 5-1 : points de calcul des débits de crues sur les affluents de la Moselle amont.....	31
Tableau 5-2 : stations hydrométriques sur les affluents de la Moselle amont.....	31
Tableau 5-3 : débits de crues sur les affluents de la Moselle amont.....	33
Tableau 5-4 : débits de référence sur les affluents de la Moselle amont d'après la bibliographie. .	33
Tableau 5-5 : débits de crues sur les affluents de la Moselle amont.....	34
Tableau 5-6 : débits de référence sur les affluents de la Moselle amont d'après la bibliographie. .	34
Tableau 5-7 : débits de crues sur les affluents de la Moselle amont – points de calcul.	36
Tableau 5-8 : débits de crues sur les affluents de la Moselle amont – points de calcul.	36
Tableau 6-1 : points de calcul des débits de crues sur le bassin versant de la Meurthe.....	39
Tableau 6-2 : stations hydrométriques sur la Meurthe et ses affluents.....	39
Tableau 6-3 : débits de crues sur la Meurthe amont.	41
Tableau 6-4 : débits de référence sur la Meurthe amont d'après la bibliographie.....	41
Tableau 6-5 : débits de crues sur la Meurthe aval.....	42
Tableau 6-6 : débits de référence sur la Meurthe aval d'après la bibliographie.	42
Tableau 6-7 : débits de crues sur le cours de la Meurthe – points de calcul.....	43
Tableau 6-8 : débits de crues sur les affluents de la Meurthe – points de calcul.	44
Tableau 7-1 : points de calcul des débits de crues sur la Moselle aval.....	46
Tableau 7-2 : stations hydrométriques sur la Moselle aval.	46
Tableau 7-3 : débits de crues sur la Moselle aval.....	48
Tableau 7-4 : débits de référence sur la Moselle aval d'après la bibliographie.	48
Tableau 7-5 : débits de crues sur la Moselle aval – points de calcul.	50
Tableau 8-1 : points de calcul des débits de crues sur le bassin versant de la Seille.	52
Tableau 8-2 : stations hydrométriques sur le bassin versant de la Seille.....	52
Tableau 8-3 : débits de crues sur la Seille et la Petite Seille.	53
Tableau 8-4 : débits de référence sur la Seille d'après la bibliographie.....	53
Tableau 8-5 : débits de crues sur la Seille et la Petite Seille – points de calcul.	54
Tableau 9-1 : points de calcul des débits de crues sur le bassin versant de l'Orne.	56
Tableau 9-2 : stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Orne.....	56
Tableau 9-3 : débits de crues sur l'Orne et ses affluents.....	57
Tableau 9-4 : débits de référence sur l'Orne d'après la bibliographie.....	57
Tableau 9-5 : comparaison des débits de pointe de l'Orne à Boncourt à partir des données BANQUE HYDRO et à partir des données reconstituées par modélisation hydrologique.....	59

Tableau 9-6 : débits de crues sur l'Orne – points de calcul.	60
Tableau 9-7 : débits de crues sur les affluents de l'Orne – points de calcul.....	61
Tableau 10-1 : points de calcul des débits de crues sur les affluents de la Moselle aval.....	63
Tableau 10-2 : stations hydrométriques sur les affluents de la Moselle aval.	63
Tableau 10-3 : débits de crues sur les affluents de la Moselle aval.....	64
Tableau 10-4 : débits de référence sur les affluents de la Moselle aval d'après la bibliographie. ...	64
Tableau 10-5 : débits de crues sur les affluents de la Moselle aval – points de calcul.....	65
Tableau 11-1 : volumes des hydrogrammes à la confluence Meurthe et Moselle.....	76
Tableau 11-2 : volumes des hydrogrammes à la confluence Meurthe et Moselle.....	77

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE GENERAL

Le bassin versant de la Moselle couvre un bassin versant d'environ 28 000 km² réparti 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. 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.

Le premier sujet mis en commun fait l'objet de la présente consultation : il s'agit de l'étude du fonctionnement hydrologique global du bassin versant de la Moselle. Cette étude constitue l'action 1.5 du PAPI d'intention du bassin versant de la Moselle aval porté par le Syndicat Mixte Moselle Aval.

1.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE

La présente étude a pour objet de préciser le fonctionnement hydrologique global du bassin versant de la Moselle française.

Il s'agit :

- De synthétiser les données hydrologiques existantes en période de crue et en période d'étiage, sur les événements historiques ;
- D'actualiser et/ou déterminer un ensemble de débits caractéristiques en période de crue et en période d'étiage, actuelles et futures.

La présente étude a vocation à fournir les débits de référence, aussi bien en crues et en étiages, à l'échelle du bassin français de la Moselle pour alimenter de futures études (études hydrauliques, locales, globales, disponibilité des ressources en eau, ...).

1.3 PERIMETRE DE L'ETUDE

Le périmètre d'étude se limite au bassin versant français de la Moselle, couvrant une superficie d'environ 11 500 km². Le bassin versant français de la Sarre, principal affluent de la Moselle, ne fait pas partie du périmètre de l'étude.

La détermination des débits de référence est menée en 38 points de calcul répertoriés dans le Tableau 1-1 :

N°	Point hydrologique	Sous-bassin	Débits de crues	Débits d'étéages
1	L'Ingressin à Toul	Moselle amont	X	
2	L'Euron à Lorey	Moselle amont	X	
3	Le Terrouin à Villey-Saint-Etienne	Moselle amont	X	
4	Le Durbion à Châtel-sur-Moselle	Moselle amont	X	
5	La Vologne à Jarménil	Moselle amont	X	
6	La Moselotte à Saint-Etienne-lès-Remiremont	Moselle amont	X	
7	La Moselle à Remiremont	Moselle amont	X	X
8	La Moselle à Epinal	Moselle amont	X	X
9	La Moselle à Pont-Saint-Vincent	Moselle amont	X	
10	Le Madon à Pont-Saint-Vincent	Moselle amont	X	
11	La Meurthe à Saint-Dié-des-Vosges	Meurthe	X	X
12	La Meurthe à Raon-l'Etape	Meurthe	X	
13	La Plaine à Raon-l'Etape	Meurthe	X	
14	La Meurthe à Lunéville	Meurthe	X	
15	La Vezouze à Lunéville	Meurthe	X	X
16	Le Sânon à Dombasle-sur-Meurthe	Meurthe	X	
17	La Meurthe à Laneuveville-devant-Nancy	Meurthe	X	X
18	La Moselle à Custines	Moselle amont	X	X
19	Le Rupt de Mad à Arnaville	Moselle aval	X	
20	La Seille à Metz	Moselle aval	X	X
21	L'Orne à Moyeuvre-Grande	Moselle aval	X	X
22	L'Orne à son exutoire	Moselle aval	X	X
23	L'Orne à Jarny (amont confluence Yron)	Moselle aval	X	X
24	La Moselle à Metz	Moselle aval	X	
25	La Moselle à Uckange	Moselle aval	X	X
26	La Moselle à Apach	Moselle aval	X	
27	Le ruisseau d'Olima (ruisseau de Gandrupt)	Moselle amont	X	
28	La Meurthe à Damelevières	Meurthe	X	X
29	La Moselle à Toul	Moselle amont	X	X
30	Le ruisseau d'Esch à Pont-à-Mousson	Moselle aval	X	
31	La Moselle en amont de Pont-à-Mousson	Moselle aval	X	X
32	La Petite Seille	Moselle aval	X	
33	La Seille à Salonnnes (amont Petite Seille)	Moselle aval	X	X
34	La Seille à Nomeny	Moselle aval	X	
35	Le Woigot	Moselle aval	X	X
36	Le Longeau	Moselle aval	X	X
37	L'Yron	Moselle aval	X	X
38	La Fensch à Knutange	Moselle aval	X	X

Tableau 1-1 : liste des points de calcul des débits.

1.4 ORGANISATION DE L'ETUDE

L'étude comporte 3 missions. La mission 1 est organisée en deux étapes :

- Mission 1-1 : Synthèse des études et données existantes ;
- Mission 1-2 : Détermination des débits de références.

Le présent rapport traite de la mission 1-2 de l'étude pour la partie débits de crues. Il comprend les chapitres suivants :

- Chapitre 2 : Résumé – Synthèse ;
- Chapitre 3 : Méthodologie
- Chapitre 4 : La Moselle Amont ;
- Chapitre 5 : Affluents de la Moselle amont ;
- Chapitre 6 : La Meurthe et ses affluents ;
- Chapitre 7 : La Moselle Aval ;
- Chapitre 8 : La Seille et ses affluents ;
- Chapitre 9 : L'Orne et ses affluents ;
- Chapitre 10 : Affluents de la Moselle aval ;
- Chapitre 11 : Synthèse et homogénéité des résultats.

1.5 PILOTAGE ET ETAPES DE VALIDATION

L'étude hydrologique du bassin versant de la Moselle a été suivie par un comité de pilotage (COPIL) en charge de valider les grandes étapes de la mission, ainsi que par un comité technique (COTECH) en charge du suivi de l'étude et de la préparation des réunions du COPIL.

Le COPIL, co-présidé par le Président de la Région Grand-Est ou son représentant et par le Président du Syndicat Mixte Moselle Aval ou son représentant, est constitué par :

- Le Service Eaux et Biodiversité de la Région Grand-Est ;
- Le Syndicat Mixte Moselle Aval ;
- L'EPTB Meurthe-Madon ;
- Le Service Prévention des Risques Naturels et Hydrauliques de la DREAL Grand-Est ;
- Le Service de Prévision des Crues Meuse-Moselle de la DREAL Grand-Est ;
- Les Directions Départementales des Territoires de Meurthe-et-Moselle, Moselle et Vosges ;
- L'Agence de l'eau Rhin-Meuse ;
- La Communauté d'Agglomération d'Epinal, représentant les collectivités du bassin amont de la Moselle.

Le COTECH, co-présidé par le Service Eaux et Biodiversité de la Région Grand-Est et par le Syndicat Mixte Moselle Aval, est constitué par au moins un agent :

- Du Service Eaux et Biodiversité de la Région Grand-Est ;
- Du Syndicat Mixte Moselle Aval ;
- De l'EPTB Meurthe-Madon ;
- Du Service Prévention des Risques Naturels et Hydrauliques de la DREAL Grand-Est ;
- Du Service de Prévision des Crues Meuse-Moselle de la DREAL Grand-Est ;
- Des Directions Départementales des Territoires de Meurthe-et-Moselle, Moselle et Vosges ;

- De l'Agence de l'eau Rhin-Meuse.

Le CEREMA et le LOTERR (Université de Lorraine) ont également participé à plusieurs COPIL et/ou COTECH afin d'apporter leur expertise de l'hydrologie du bassin versant de la Moselle.

Le COPIL s'est réuni à 3 reprises au cours de l'étude.

Le COTECH s'est réuni à 4 reprises au cours de l'étude.

La figure suivante illustre les différentes étapes de validation ayant jalonné l'étude :



2 RESUME – SYNTHÈSE

2.1 METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

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

De manière générale, l'estimation des débits de crues s'appuie sur les observations aux stations hydrométriques qui couvrent le bassin versant de la Moselle et ses affluents. Au total, 45 stations sont utilisées pour l'analyse.

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 et, dans certains cas, la période de retour 20 ans est retenue. Le choix entre les deux méthodes se base sur les caractéristiques physiques des bassins versants et, en particulier, la géologie : sur la Moselle en amont de Remiremont, la méthode du GRADEX est utilisée compte tenu du socle cristallin et du caractère montagneux des bassins versants. Les bassins versants de la Meurthe à Saint-Dié et de la Vologne marquent la transition entre le socle cristallin des Vosges et les grès vosgiens, le caractère montagneux est moins marqué hormis sur l'amont des deux bassins : pour ces deux bassins versants, il est proposé de retenir la méthode AGREGEE. Enfin, sur le reste du territoire, la méthode AGREGEE est retenue à deux exceptions près :

- Le ruisseau d'Olima : bassin de petite taille (~10 km²) ;
- La Fensch à Knutange : bassin de petite taille (~30 km²) et urbanisation relativement importante.

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.

Pour plusieurs points de calculs, la méthodologie est adaptée, en particulier lorsqu'il n'existe pas de données de stations hydrométriques exploitables. Il s'agit des points de calcul suivants :

- 3 – Terrouin à son exutoire (170 km²) : station ancienne, courte chronique avec peu de crues significatives ;
- 6 – Moselotte à son exutoire (357 km²) : station amont à Vagney (184 km²) et sur la Cleurie (63 km²), doutes sur la validité des débits de crues à la station de Vagney ;
- 13 – Plaine à son exutoire (110 km²) : station située à Raon-l'Etape influencée par l'aménagement de Vieux-Pré ;
- 27 – ruisseau d'Olima à son exutoire (10 km²) : absence de station sur le bassin versant ;
- 36 – Longeau à son exutoire (213 km²) : absence de station sur le bassin versant.

Pour ces 6 points particuliers, une modélisation pluie-débit a été mise en œuvre pour construire les hydrogrammes de crues (cf. ANNEXE 9) et/ou reconstituer des chroniques complètes pour ensuite dérouler la méthodologie sur les chroniques reconstituées (cas du ruisseau d'Olima, cf. ANNEXE 10).

Enfin, dans le cadre des études de modélisations hydrauliques sur le bassin versant de l'Orne et ses affluents, le Syndicat Mixte Moselle Aval a alerté sur une possible sur-estimation des débits de crues observés à la station de Jarny (La Cartoucherie) sur l'Yron liée à l'influence de l'Orne dont la confluence se situe à proximité en aval de la station. Pour cette station, les résultats de la modélisation hydrologique développée pour l'étude des étiages ont été utilisés (cf. chapitre 9.3). **En conséquence, les débits retenus pour l'Yron à Jarny et le Longeau sont différents dans le présent rapport des débits présentés dans les versions A et B du rapport.**

L'approche est menée station par station : les détails des calculs sont donnés en ANNEXE 8. La cohérence d'ensemble, sur les débits de pointe et les volumes, est vérifiée a posteriori.

Les résultats obtenus au droit de chaque station sont comparés avec les estimations issues de la base de données SHYREG-débit de 2019 et avec les estimations des études antérieures.

2.2 ANALYSE DES RESULTATS – POINTS DISCUTES

2.2.1 COHERENCE AVEC LES ESTIMATIONS DES ETUDES ANTERIEURES

Deux études font référence sur le territoire pour l'estimation des débits de crues :

- L'étude d'Atlas des Zones Inondables de la Moselle et de la Meurthe (cf. [1]) ;
- L'étude de préfiguration du PAPI Meurthe (cf. [2]).

La première étude, datant de 2000, couvre l'ensemble du bassin de la Moselle et ses affluents y compris la Meurthe. La seconde couvre uniquement le bassin de la Meurthe et ses affluents : elle est considérée comme étude de référence car plus récente (2008).

Les estimations de la présente étude ont été comparées avec les estimations des études de référence, il en ressort :

- Les estimations de la présente étude sont significativement supérieures aux estimations de la bibliographie (cf. [1]) sur les affluents de la Moselle amont et sur l'axe Moselle entre Tonnoy et Toul. Pour la crue centennale, les écarts relatifs peuvent atteindre 15 à 20 % selon les stations considérées. Le cas du Madon est particulier : les estimations proposées dans la présente étude sont supérieures à celles de l'étude de 2000 (cf. [1]), mais significativement inférieures à celles de l'étude de diagnostic portée par l'EPTB Meurthe-Madon en 2016 (cf. [3]). Ces points sont discutés au 11.1 ;
- Les estimations de la présente étude sont très proches des estimations de la bibliographie (cf. [2]) sur le bassin de la Meurthe. Seule l'estimation sur le Sânon à Dombasle-sur-Meurthe est significativement supérieure (+20 % en crue centennale). Ce point est discuté au 11.2 ;
- Les estimations de la présente étude sont très proches des estimations de la bibliographie (cf. [1]) sur les affluents de la Moselle aval et sur l'axe Moselle aval.

2.2.2 POINTS PARTICULIERS

Plusieurs points particuliers ont fait l'objet de discussion lors des différents Comité Techniques. Les paragraphes suivants reprennent les principaux points discutés.

2.2.2.1 Estimations à Pont-Saint-Vincent et Toul sur la Moselle

Le déroulé de la méthodologie détaillée dans le chapitre 3 conduit à des estimations des débits de crues à Pont-Saint-Vincent et Toul incohérents dans la mesure où les estimations à Pont-Saint-Vincent sont supérieures à Toul alors que la station de Pont-Saint-Vincent se situe en amont de Toul : pour la crue centennale, les débits à Pont-Saint-Vincent sont plus de 10% supérieurs à ceux de Toul alors que le bassin versant croît d'environ 10 % entre les deux stations.

L'analyse des données aux stations (cf. 4.3) ne permet pas de privilégier l'une ou l'autre des deux stations. A défaut, **il est donc retenu d'estimer les débits de crues aux deux stations par l'ajustement à une loi de type Myer sur l'axe Moselle amont entre Remiremont et Custines.**

2.2.2.2 Choix de la méthode d'extrapolation pour l'estimation des débits de la Meurthe à Saint-Dié-des-Vosges

Sur la Moselle amont, la méthode du Gradex a été retenue pour l'extrapolation des débits aux grandes périodes de retour. Ce choix est motivé par le caractère montagneux et la géologie de la Moselle amont. Il concerne la Moselle et ses affluents en amont de Remiremont/Saint-Nabord :

- Moselle à Rupt-sur-Moselle ;
- Moselotte ;
- Cleurie ;
- Moselle à Remiremont ;
- Moselle à Saint-Nabord.

L'ensemble de ces bassins versants reposent sur des socles cristallins, majoritairement de granite.

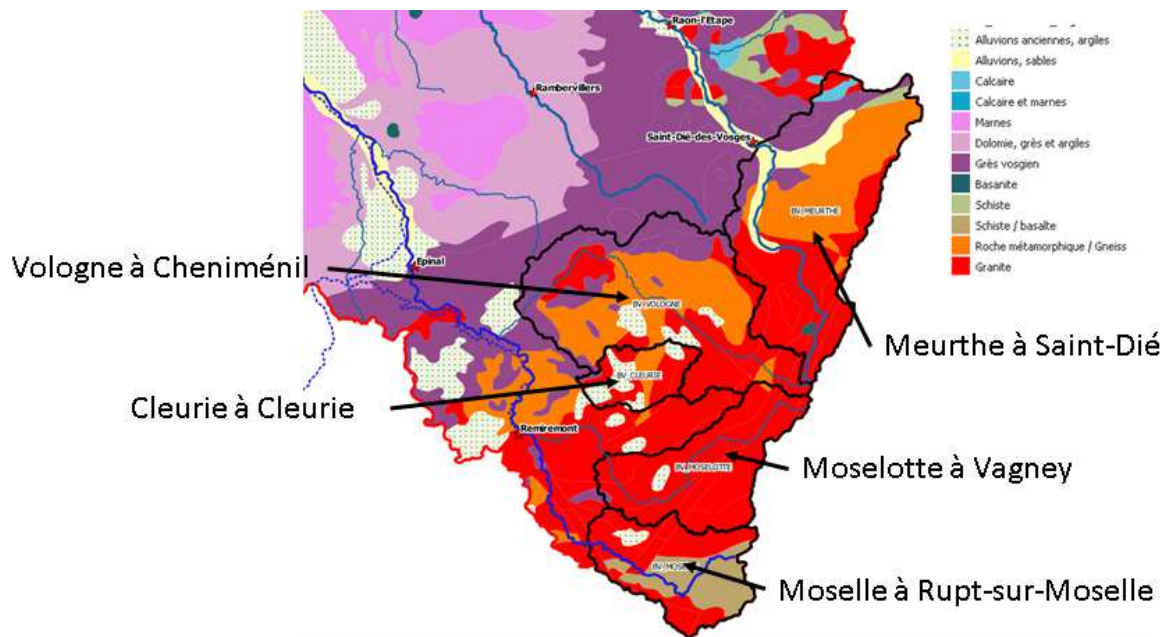


Figure 2-1 : géologie de la Moselle amont.

Les bassins versants de la Meurthe à Saint-Dié et de la Vologne à Cheniménil reposent quant à eux sur des formations cristallines (granite et gneiss) et sur les grès des Vosges. Ces deux bassins versants, de tailles voisines (374 km² pour la Meurthe et 355 km² pour la Vologne), marquent la transition entre le massif cristallin et les grès des Vosges. Ainsi, pour ce qui concerne les estimations de débits sur la Meurthe à Saint-Dié, plus que la cohérence avec la Moselle amont, c'est la cohérence avec la Vologne qui est recherchée.

Pour rappel, les estimations des deux méthodes sur les deux bassins versants sont rappelées dans les tableaux suivants :

Vologne à Cheniménil			Meurthe à Saint-Dié		
Période de retour	GRADEX	AGREGEE	Période de retour	GRADEX	AGREGEE
10 ans	98	98	10 ans	115	115
30 ans	127 [116-146]	117 [110-125]	30 ans	172 [152-191]	150 [141-160]
50 ans	149 [135-168]	130 [122-140]	50 ans	198 [168-217]	170 [160-182]
100 ans	179 [154-198]	151 [144-164]	100 ans	232 [190-256]	200 [182-215]
1000 ans	278 [217-311]	240 [205-258]	1000 ans	347 [264-394]	311 [254-339]

Tableau 2-1 : débits de crues estimés à Saint-Dié sur la Meurthe et Cheniménil sur la Vologne.

Les valeurs données par les deux méthodes sont assez proches aux deux stations. Pour la crue centennale, l'écart relatif est d'environ 15 %. Les valeurs du GRADEX sont proches de la borne supérieure de l'intervalle d'incertitude des valeurs AGREGEE et, réciproquement, les valeurs AGREGEE sont proches de la borne inférieure de l'intervalle d'incertitude des valeurs du GRADEX.

Le rapport a été modifié afin d'harmoniser le choix de la méthode d'extrapolation entre la Meurthe à Saint-Dié et la Vologne à Cheniménil.

La méthode AGREGEE est retenue pour ces deux stations dans la mesure où leurs bassins versants respectifs marquent une transition géologique entre le massif cristallin amont et les grès des Vosges.

2.2.2.3 Cas de la station hydrométrique de Metz Pont-des-Morts

La station hydrométrique de Metz Pont-des-Morts est située sur le bras principal de la Moselle, en aval rive droite du pont des Morts.

En crue, une partie du débit transite par le bras mort dans Metz. Ce débit est variable et dépend de manœuvres d'ouvrages mobiles. Ainsi, la relation entre les niveaux mesurés à la station et le débit total de la Moselle (courbe de tarage) n'est a priori pas univoque.

En conséquence, les données de la station de Metz Pont-des-Morts sur la Moselle ne sont pas exploitées dans le cadre de la présente étude.

L'estimation des débits de crues se base sur les estimations aux stations de Custines et Hagondange/Hauconcourt (cf. 7.3).

Les estimations basées sur les observations à la station sont toutefois présentées en annexes afin de garder l'historique de ces calculs.

2.3 SYNTHÈSE DES VALEURS PROPOSÉES

Les tableaux suivants récapitulent l'ensemble des débits de crues qu'il est proposé de retenir sur le bassin versant de la Moselle. Des intervalles d'incertitude sont également fournis : leur estimation est décrite à l'ANNEXE 11 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 m³/s.

2.3.1 AXE MOSELLE

Période de retour	Moselle à Remiremont	Moselle à Epinal	Moselle à Pont-Saint-Vincent	Moselle à Toul	Moselle à Custines
2 ans	292	418	618	641	970
5 ans	382	526	806	837	1 257
10 ans	455 [393-488]	611 [566-655]	971 [903-1 039]	1 010 [939-1 081]	1 453 [1 302-1 544]
30 ans	607 [545-639]	763 [719-808]	1 179 [1 163-1 300]	1 222 [1 175-1 318]	1 762 [1 619-1 905]
50 ans	676 [596-720]	849 [805-894]	1 312 [1 290-1 446]	1 359 [1 314-1 456]	1 940 [1 798-2 083]
100 ans	769 [656-832]	976 [895-1 023]	1 511 [1 451-1 659]	1 566 [1 467-1 664]	2 217 [2 074-2 360]
1000 ans	1 077 [853-1 201]	1 430 [1 192-1 550]	2 235 [1 949-2 553]	2 322 [1 968-2 552]	3 276 [2 822-3 548]

Tableau 2-2 : débits de crues sur l'axe Moselle amont.

Période de retour	Moselle à Custines	Moselle à Metz	Moselle à Uckange	Moselle à Apach	Moselle à Pont-à-Mousson
2 ans	970	966	1 084	1 098	970
5 ans	1 257	1 249	1 378	1 396	1 256
10 ans	1 453 [1 302-1 544]	1 443 [1 353-1 497]	1 588 [1 420-1 679]	1 609 [1 439-1 701]	1 452 [1 307-1 540]
30 ans	1 762 [1 619-1 905]	1 749 [1 615-1 882]	1 926 [1 763-2 088]	1 951 [1 786-2 116]	1 761 [1 619-1 903]
50 ans	1 940 [1 798-2 083]	1 929 [1 795-2 062]	2 128 [1 965-2 290]	2 156 [1 991-2 321]	1 939 [1 797-2 081]
100 ans	2 217 [2 074-2 360]	2 208 [2 082-2 366]	2 464 [2 301-2 645]	2 497 [2 332-2 680]	2 216 [2 075-2 360]
1000 ans	3 276 [2 822-3 548]	3 344 [2 872-3 605]	3 862 [3 302-4 136]	3 913 [3 345-4 191]	3 282 [2 827-3 553]

Tableau 2-3 : débits de crues sur l'axe Moselle aval.

2.3.2 AFFLUENTS DE LA MOSELLE AMONT

Période de retour	Ingressin à Toul	Euron à Lorey	Durbion à Châtel-sur-Moselle	Vologne à Jarménil	Madon à Pont-Saint-Vincent
2 ans	5	31	39	70	182
5 ans	8	39	51	88	235
10 ans	9 [8-11]	45 [42-49]	60 [52-68]	100 [93-107]	272 [249-289]
30 ans	13 [11-15]	57 [53-60]	74 [66-82]	120 [113-129]	332 [308-354]
50 ans	15 [13-18]	64 [60-68]	81 [73-89]	134 [126-143]	368 [344-392]
100 ans	19 [16-23]	74 [68-79]	92 [84-100]	155 [148-169]	428 [408-459]
1000 ans	38 [30-43]	113 [94-123]	130 [110-141]	247 [210-265]	670 [570-717]

Tableau 2-4 : débits de crues sur les affluents de la Moselle amont.

Période de retour	Moselotte à Saint-Etienne-lès-Remiremont	Ruisseau d'Olima	Terrouin à Villey-Saint-Etienne
2 ans	191	1,6	13
5 ans	251	2,4	17
10 ans	295 [258-320]	2,9 [2,5-4,6]	20 [18-21]
30 ans	401 [366-430]	6,3 [4,7-8,0]	26 [23-28]
50 ans	450 [404-487]	7,8 [5,7-9,6]	29 [27-33]
100 ans	515 [448-567]	9,9 [6,9-11,6]	36 [34-42]
1000 ans	730 [591-832]	16,8 [10,8-19,6]	69 [58-78]

Tableau 2-5 : débits de crues sur les affluents de la Moselle amont.

2.3.3 AXE MEURTHE

Période de retour	Meurthe à Saint-Dié	Meurthe à Raon-l'Etape	Meurthe à Lunéville	Meurthe à Damelevières	Meurthe à Laneuveville
2 ans	72	111	134	276	303
5 ans	98	155	203	380	410
10 ans	115 [106-124]	187 [172-201]	255 [223-287]	454 [408-487]	486 [432-532]
30 ans	150 [141-160]	246 [231-263]	329 [297-361]	574 [538-610]	608 [564-653]
50 ans	170 [160-182]	281 [265-303]	370 [338-402]	646 [609-691]	681 [637-729]
100 ans	200 [182-215]	335 [303-360]	430 [390-462]	765 [726-830]	804 [759-871]
1000 ans	311 [254-339]	530 [431-580]	643 [530-720]	1 266 [1 066-1 363]	1 317 [1 113-1 417]

Tableau 2-6 : débits de crues sur le cours de l'axe Meurthe.

2.3.4 AFFLUENTS DE LA MEURTHE

Période de retour	Plaine à Raon-l'Étape	Vezouze à Lunéville	Sânon à Dombasle-sur-Meurthe
2 ans	12	92	34
5 ans	16	128	48
10 ans	19 [17-20]	153 [140-165]	58 [52-64]
30 ans	24 [23-27]	202 [189-222]	76 [71-83]
50 ans	28 [26-32]	234 [215-260]	87 [82-96]
100 ans	35 [31-40]	285 [257-316]	105 [96-115]
1000 ans	63 [51-80]	481 [387-526]	170 [139-192]

Tableau 2-7 : débits de crues sur les affluents de la Meurthe.

2.3.5 AFFLUENTS DE LA MOSELLE AVAL

Période de retour	Rupt de Mad à Arnaville	Esch à Pont-à-Mousson	Fensch à Knutange
2 ans	43	16	4,2
5 ans	61	22	5,1
10 ans	73 [64-76]	26 [22-27]	5,6 [5,2-7,1]
30 ans	92 [84-99]	32 [29-35]	8,7 [7,2-10,2]
50 ans	103 [97-114]	36 [34-41]	10,1 [8,5-11,7]
100 ans	125 [117-139]	44 [42-51]	12,1 [9,7-13,6]
1000 ans	218 [182-238]	84 [70-95]	18,4 [13,8-20,9]

Tableau 2-8 : débits de crues sur les affluents de la Moselle aval.

2.3.6 SEILLE ET SES AFFLUENTS

Période de retour	Petite Seille	Seille à Salonnnes	Seille à Nomény	Seille à Metz
2 ans	16	26	68	77
5 ans	24	35	89	106
10 ans	30 [27-33]	41 [38-44]	101 [94-109]	127 [139-159]
30 ans	40 [37-43]	54 [51-60]	129 [120-138]	165 [155-176]
50 ans	46 [43-49]	63 [58-70]	144 [133-155]	188 [177-201]
100 ans	55 [49-58]	77 [69-86]	167 [152-178]	222 [201-238]
1000 ans	87 [70-95]	131 [106-149]	247 [205-269]	349 [285-381]

Tableau 2-9 : débits de crues sur la Seille et la Petite Seille.

2.3.7 ORNE ET SES AFFLUENTS

Période de retour	Orne à Moyeuvre-Grande	Orne à l'exutoire	Orne à Jarny
2 ans	144	157	60
5 ans	197	214	82
10 ans	231 [216-257]	253 [235-280]	95 [87-101]
30 ans	299 [281-322]	326 [305-350]	122 [114-130]
50 ans	334 [319-360]	364 [347-392]	137 [130-149]
100 ans	382 [362-418]	416 [394-456]	157 [148-175]
1000 ans	551 [501-662]	601 [546-721]	231 [208-278]

Tableau 2-10 : débits de crues sur l'Orne.

Période de retour	Woigot	Longeau	Yron
2 ans	18	30	48
5 ans	26	43	68
10 ans	31 [29-34]	51 [43-61]	81 [67-96]
30 ans	40 [38-43]	67 [59-77]	107 [93-122]
50 ans	44 [43-48]	77 [69-87]	123 [109-137]
100 ans	51 [48-55]	92 [84-102]	147 [133-161]
1000 ans	71 [63-83]	148 [121-163]	237 [192-259]

Tableau 2-11 : débits de crues sur les affluents de l'Orne.

Pour rappel, les débits retenus pour l'Yron à Jarny et le Longeau sont différents dans le présent rapport des débits présentés dans les versions A et B du rapport.

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 associé.

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 débits 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 (des événements de types différents sont mélangés).

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 événements est généralement appliqué afin d'assurer l'indépendance entre les événements (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 l'homogénéité 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_d) et le gradex des pluies (G_p) sont égaux. La formulation est la suivante :

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

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.

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 pointe 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 calculé 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.

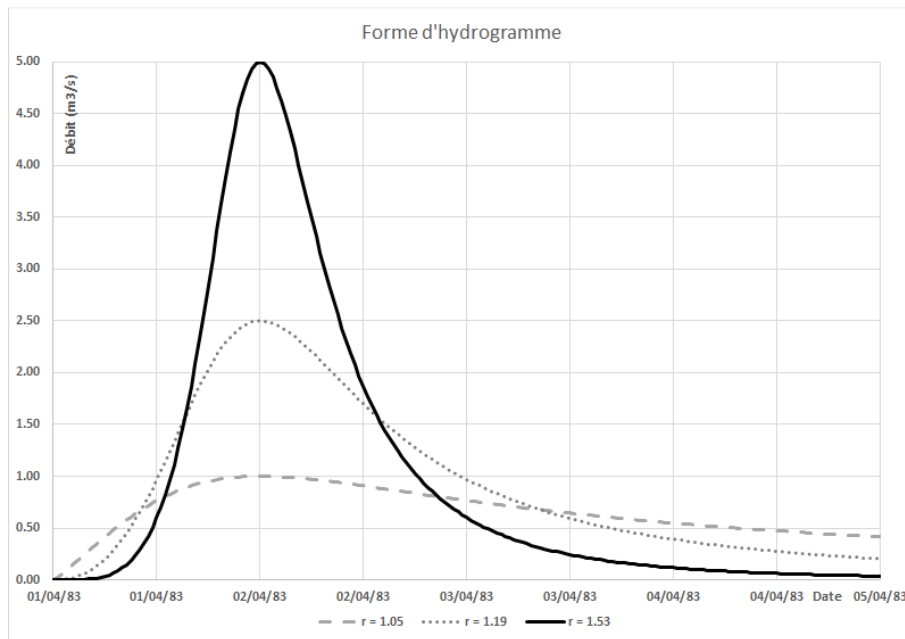


Figure 3-1 : illustration de l'influence du coefficient de forme sur la forme des hydrogrammes.

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 .

Les mêmes observations formulées au 3.3.1.2 pour la méthode du GRADEX peuvent être formulées pour la méthode du GRADEX progressif.

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.

3.3.4 CHOIX ENTRE LA METHODE GRADEX ET LA METHODE AGREGEE

Les deux méthodes ont été appliquées sur l'ensemble des stations hydrométriques étudiées (cf. ANNEXE 8).

Pour chaque station, une proposition de débits de crues est formulée sur la base d'un choix entre ces deux méthodes. Ce choix repose principalement sur les caractéristiques physiques, en particulier la géologie, des bassins versants.

Ainsi, les principes suivants ont été retenus :

- **Moselle et affluents en amont de Remiremont/Saint-Nabord** : les bassins versants de la Moselle amont et ses affluents reposent exclusivement sur le socle cristallin vosgien, composé de granites et schistes. Compte tenu du caractère peu perméable et des pentes fortes, **la méthode du GRADEX est préconisée et retenue** sur ces bassins versants ;
- **Moselle et affluents en aval de la Vologne et Meurthe et affluents en aval de Saint-Dié** : les bassins versants reposent en grande partie sur les roches sédimentaires du plateau lorrain. Les pentes des bassins versants sont moins marquées que sur les Vosges. Pour l'ensemble de ces bassins versants, **la méthode AGREGEE est préconisée et retenue** ;
- **Bassins de la Vologne et de la Meurthe à Saint-Dié** : ces deux bassins versants marquent la transition entre le socle cristallin vosgien et les formations des grès vosgiens du piémont plus perméables. Ces deux bassins versants présentent un relief un peu moins marqué que la haute Moselle et ses affluents. Pour ces deux bassins versants, **la méthode AGREGEE est préconisée et retenue** ;
- **Petits bassins versants** : deux bassins versants dont la superficie est inférieure à 30 km² sont étudiés. Il s'agit du ruisseau d'Olima à proximité d'Epinal et de la Fensch à Knutange. Compte tenu de la faible taille de ces bassins versants, la saturation de l'ensemble du bassin versant peut être envisagée. Pour ces deux bassins versants, **la méthode GRADEX est préconisée et retenue**.

Ces choix méthodologiques ont été validés lors des différentes réunions du comité technique.

3.4 BASE DE DONNEES SHYREG-DEBIT DE 2019

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

Les valeurs de 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 BANQUE HYDRO. Plusieurs procédures permettent de récupérer les données :

- Procédure CRUCAL : permet d'extraire les maxima annuels de débits de pointe pour une sous-période donnée ;
- 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. Les hydrogrammes des crues de mai 1970, mai 1983 et mai/juin 2016 sont également récupérées même si ces crues sont en dehors de la période préférentielle de survenue des crues qui s'étend d'octobre à avril ;

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 8 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 38 points de calcul.

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 8.

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 POINTS DE CALCUL

Cinq points de calcul des débits de crues sont localisés sur le cours principal de la Moselle amont :

N°	Point hydrologique	Sous-bassin	Débits de crues	Débits d'étiages
7	La Moselle à Remiremont	Moselle amont	X	X
8	La Moselle à Epinal	Moselle amont	X	X
9	La Moselle à Pont-Saint-Vincent	Moselle amont	X	
18	La Moselle à Custines	Moselle amont	X	X
29	La Moselle à Toul	Moselle amont	X	X

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

Neuf stations hydrométriques sont disponibles pour l'évaluation des débits de crues en ces cinq points de calcul :

Code HYDRO	Nom Station	Cours d'eau	Surface BV	Alt	Date Début	Date Fin	Durée	% Lacunes
A4050620	La Moselle à Rupt-sur-Moselle	La Moselle	152.0	433	29/08/1968	29/06/2020	52	3.8%
A4200620	La Moselle à Remiremont	La Moselle	589.0	379	13/10/1993	30/04/2020	27	7.1%
A4200630	La Moselle à Saint-Nabord [Noirgueux]	La Moselle	626.0	371	01/12/1961	30/04/2020	58	0.2%
A4250640	La Moselle à Épinal	La Moselle	1 217.0	324	01/01/1960	30/04/2020	60	0.0%
A5110608	La Moselle à Velle-sur-Moselle	La Moselle	1 975.0	231	01/01/2010	30/06/2020	10	0.0%
A5110610	La Moselle à Tonnoy	La Moselle	1 976.0	231	20/08/1980	30/06/2020	40	7.8%
A5500610	La Moselle à Pont-Saint-Vincent	La Moselle	3 070.0	215	16/09/1988	30/04/2020	32	0.2%
A5730610	La Moselle à Toul	La Moselle	3 338.0	201	01/01/1960	30/05/2020	60	0.0%
A7010610	La Moselle à Custines	La Moselle	6 830.0	184	01/01/1973	30/05/2020	47	0.0

Tableau 4-2 : stations hydrométriques sur le cours principal de la Moselle amont.

La station de Velle-sur-Moselle présente une chronique assez courte, d'environ 10 ans : elle n'est pas retenue pour l'analyse statistique, d'autant que la station de Tonnoy, située toute proche, présente une chronique depuis 1980.

Les données aux stations permettent de calculer les débits de référence aux cinq points de calcul qui sont tous localisés au droit de stations hydrométriques.

4.2 RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES

Le Tableau 4-3 et le Tableau 4-5 présentent les débits de crues de référence au droit des stations hydrométriques. Le Tableau 4-4 et le Tableau 4-6 rappellent les débits de référence issus de la bibliographie.

Hypothèses	Moselle à Rupt/Moselle	Moselle à Remiremont	Moselle à Saint-Nabord	Moselle à Epinal
Bassin versant	152 km ²	589 km ²	626 km ²	1 217 km ²
Ajustement statistique	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}
Méthode retenue	GRADEX	GRADEX	GRADEX	AGREGEE
D	1 j	1 j	1 j	1 j
Gradex pluies	20,1 mm/j	14,0 mm/j	14,0 mm/j	11,1 mm/j
r _D	1,50	1,40	1,30	1,30
T _{piv}	10 ans	10 ans	10 ans	10 ans
Période de retour	Moselle à Rupt/Moselle	Moselle à Remiremont	Moselle à Saint-Nabord	Moselle à Epinal
2 ans	92	292	309	418
5 ans	122	382	401	526
10 ans	144	455	467	611
30 ans	204	607	617	763
50 ans	231	676	685	849
100 ans	268	769	777	976
1000 ans	390	1 077	1 081	1 430

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

Période de retour	Moselle à Rupt/Moselle	Moselle à Remiremont	Moselle à Saint-Nabord	Moselle à Epinal
2 ans [1]	76		260	330
10 ans [1]	135		460	580
100 ans [1]	280		715	900
1000 ans [4]				1 200

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

Hypothèses	Moselle à Tonnoy	Moselle à Pont-Saint-Vincent	Moselle à Toul	Moselle à Custines
Bassin versant	1 976 km ²	3 070 km ²	3 338 km ²	6 830 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	AGREGÉE	AGREGÉE	AGREGÉE	AGREGÉE
D	2 j	2 j	2 j	3 j
Gradex pluies	15,9 mm/2j	12,7 mm/j	12,7 mm/j	13,2 mm/3j
r _D	1,40	1,50	1,40	1,40
T _{piv}	10 ans	10 ans	10 ans	20 ans
Période de retour	Moselle à Tonnoy	Moselle à Pont-Saint-Vincent	Moselle à Toul	Moselle à Custines
2 ans	520	621	545	970
5 ans	646	831	738	1 257
10 ans	759	990	865	1 453
30 ans	948	1 250	1 101	1 762
50 ans	1 055	1 396	1 240	1 940
100 ans	1 214	1 609	1 448	2 217
1000 ans	1 783	2 369	2 211	3 276

Tableau 4-5 : débits de crues sur la Moselle amont.

Période de retour	Moselle à Tonnoy	Moselle à Pont-Saint-Vincent	Moselle à Toul	Moselle à Custines
2 ans [1]	450		625	910
10 ans [1]	653		900	1 420
100 ans [1]	900		1 250	1 890-2 010
1000 ans [4]			1 650	2 800

Tableau 4-6 : débits de référence sur la Moselle amont d'après la bibliographie.

Pour les débits de période de retour inférieure ou égale à 100 ans, les estimations proposées dans la présente étude sont cohérentes avec les débits de référence issus de la bibliographie (à $\pm 10\%$), hormis sur la partie médiane entre Tonnoy et Toul où les écarts sont plus importants, notamment pour la crue centennale. Ces écarts plus importants peuvent (en partie) s'expliquer par la prise en compte des crues de décembre 2001 et octobre 2006 qui ont particulièrement été intenses dans ce secteur.

Les estimations de crue millénale sont quant à elles significativement supérieures aux valeurs retenues dans les TRI de la Moselle (cf. [4]) : + 20 % (environ) à Epinal et Custines, + 35 % à Toul.

4.3 TRANSDITION AUX POINTS DE CALCUL

Sur le cours de la Moselle amont, les cinq points de calcul sont situés au droit de stations hydrométriques.

Les résultats obtenus à Pont-Saint-Vincent et Toul font apparaître une incohérence entre les estimations, mise en évidence notamment pour les crues Q100 et Q1000. Ainsi, d'après les calculs, les débits à Pont-Saint-Vincent sont plus de 10% supérieurs à ceux de Toul alors que le bassin versant croît d'environ 10 % entre les deux stations.

Si un laminage des débits de pointe n'est pas à exclure entre les deux stations, une diminution des débits de 10% apparaît néanmoins peu réaliste.

Cette incohérence est mise en évidence sur la Figure 4-1 :

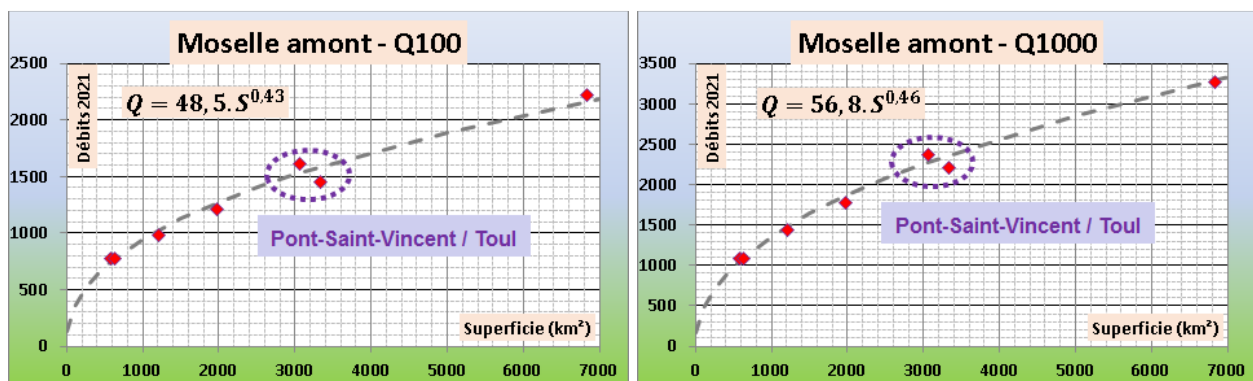


Figure 4-1 : incohérence mise en évidence entre les estimations à Pont-Saint-Vincent et Toul.

L'analyse des calculs montre que deux paramètres expliquent les écarts entre les deux stations. Le premier paramètre est la valeur du débit pivot (période de retour 10 ans dans les deux cas) : le débit décennal à Pont-Saint-Vincent est estimé à 990 m³/s tandis que celui à Toul (en aval) est estimé à 865 m³/s. Cet écart explique une grande partie des écarts entre les estimations aux deux stations. Le second paramètre expliquant les écarts, dans une moindre mesure, est le coefficient de forme plus élevé à Pont-Saint-Vincent (1,5 à Pont-Saint-Vincent, 1,4 à Toul). Le gradex des pluies est quant à lui équivalent sur les deux bassins versants.

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 : et, notamment, ces incohérences se retrouvent pour des débits avoisinant 800 à 900 m³/s, soit des débits assez voisins du débit de la crue décennale aux deux stations.

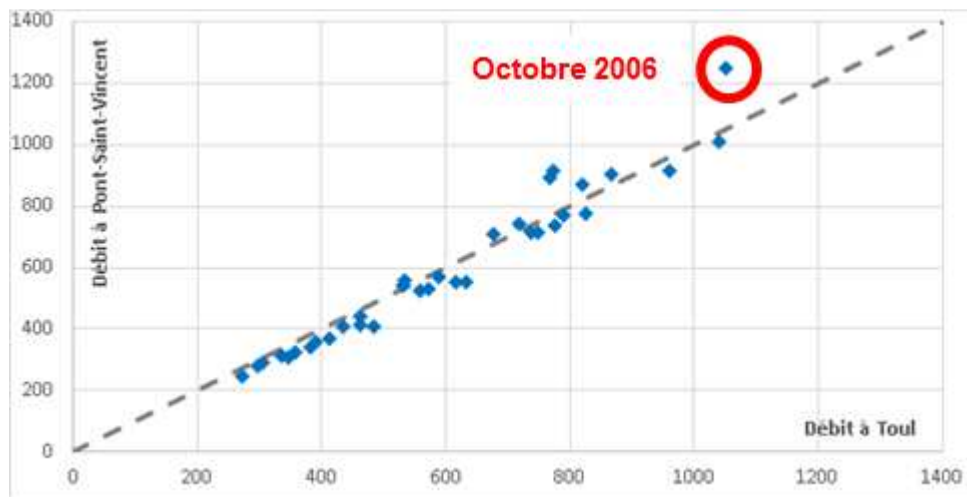


Figure 4-2 : débits de pointe à Pont-Saint-Vincent et Toul en crues (source : Banque Hydro).

Les données de jaugeages et les courbes de tarage aux deux stations ont été fournies par la DREAL Grand Est :

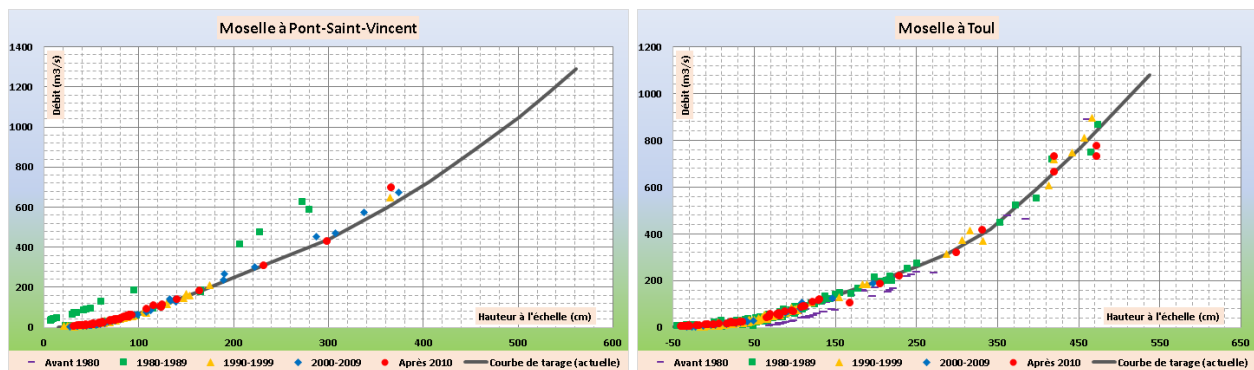


Figure 4-3 : jaugeages et courbes de tarage aux stations de Pont-Saint-Vincent et Toul (source des données : DREAL Grand-Est)

Sur la station de Pont-Saint-Vincent, le jaugeage donnant le débit le plus élevé a été réalisé en février 2021 pour un débit mesuré de 695 m³/s. Soit un débit inférieur à l'estimation de la crue décennale. Les jaugeages sont relativement peu dispersés autour de la courbe de tarage.

Sur la station de Toul, le jaugeage donnant le débit le plus élevé a été réalisé en février 1990 pour un débit mesuré de 897 m³/s. Soit un débit de l'ordre de grandeur du débit estimé de la crue décennale. Cependant, les valeurs de jaugeages parmi les débits les plus élevés sont relativement dispersées : ainsi, en prenant l'enveloppe des sondages dans le « haut de la courbe » (pour des hauteurs voisines de 450 cm), les valeurs mesurées varient de ± 100 m³/s (environ) par rapport à la courbe de tarage.

Au regard de ces éléments, il apparaît difficile de privilégier les estimations sur l'une ou l'autre des deux stations :

- Sur la station de Pont-Saint-Vincent, le jaugeage maximal correspond à un débit de crue de période de retour comprise entre 2 et 5 ans, les débits supérieurs sont dans le domaine d'extrapolation de la courbe de tarage ;
- Sur la station de Toul, les jaugeages maximaux sont de l'ordre de grandeur du débit de la crue décennale, mais la dispersion des débits jaugés est significative avec des écarts d'environ ± 100 m³/s autour de la valeur centrale (soit une incertitude de l'ordre de 10 à 15 %).

En conclusion, il est proposé d'utiliser les formulations de type Myer pour estimer les débits de crues aux deux stations. Les coefficients sont calculés par ajustements à partir des débits aux stations de Remiremont, Epinal, Tonnoy et Custines. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Période de retour	Coefficients de la formulation de Myer ²		Estimation à Pont-Saint-Vincent	Estimation à Toul
	a	b		
2 ans	16,7	0,45	618	641
5 ans	20,4	0,46	806	837
10 ans	22,0	0,47	971	1 010
30 ans	39,4	0,42	1 179	1 222
50 ans	44,1	0,42	1 312	1 359
100 ans	48,5	0,43	1 511	1 566
1 000 ans	56,8	0,46	2 235	2 322

Tableau 4-7 : débits de crues à Pont-Saint-Vincent et Toul sur la Moselle.

Les résultats finaux sur l'axe Moselle amont sont synthétisés dans le Tableau 4-8 :

Période de retour	Moselle à Remiremont	Moselle à Epinal	Moselle à Pont-Saint-Vincent	Moselle à Toul	Moselle à Custines
2 ans	292	418	618	641	970
5 ans	382	526	806	837	1 257
10 ans	455	611	971	1 010	1 453
30 ans	607	763	1 179	1 222	1 762
50 ans	676	849	1 312	1 359	1 940
100 ans	769	976	1 511	1 566	2 217
1000 ans	1 077	1 430	2 235	2 322	3 276

Tableau 4-8 : débits de crues sur la Moselle amont – points de calcul.

4.4 HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE

Les hydrogrammes sont construits directement à partir des hydrogrammes moyens normés aux cinq stations hydrométriques concernées.

Concernant la station de Remiremont, les débits en-dessous de 96 m³/s ne sont pas mesurés, ce qui donne un débit de base des hydrogrammes qui peut être important et peu représentatif.

Les hydrogrammes des crues de références sur la Moselle amont sont donnés sur la Figure 4-4. Le temps t pour référence ($t = 0$) l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.

² : valeurs arrondies.

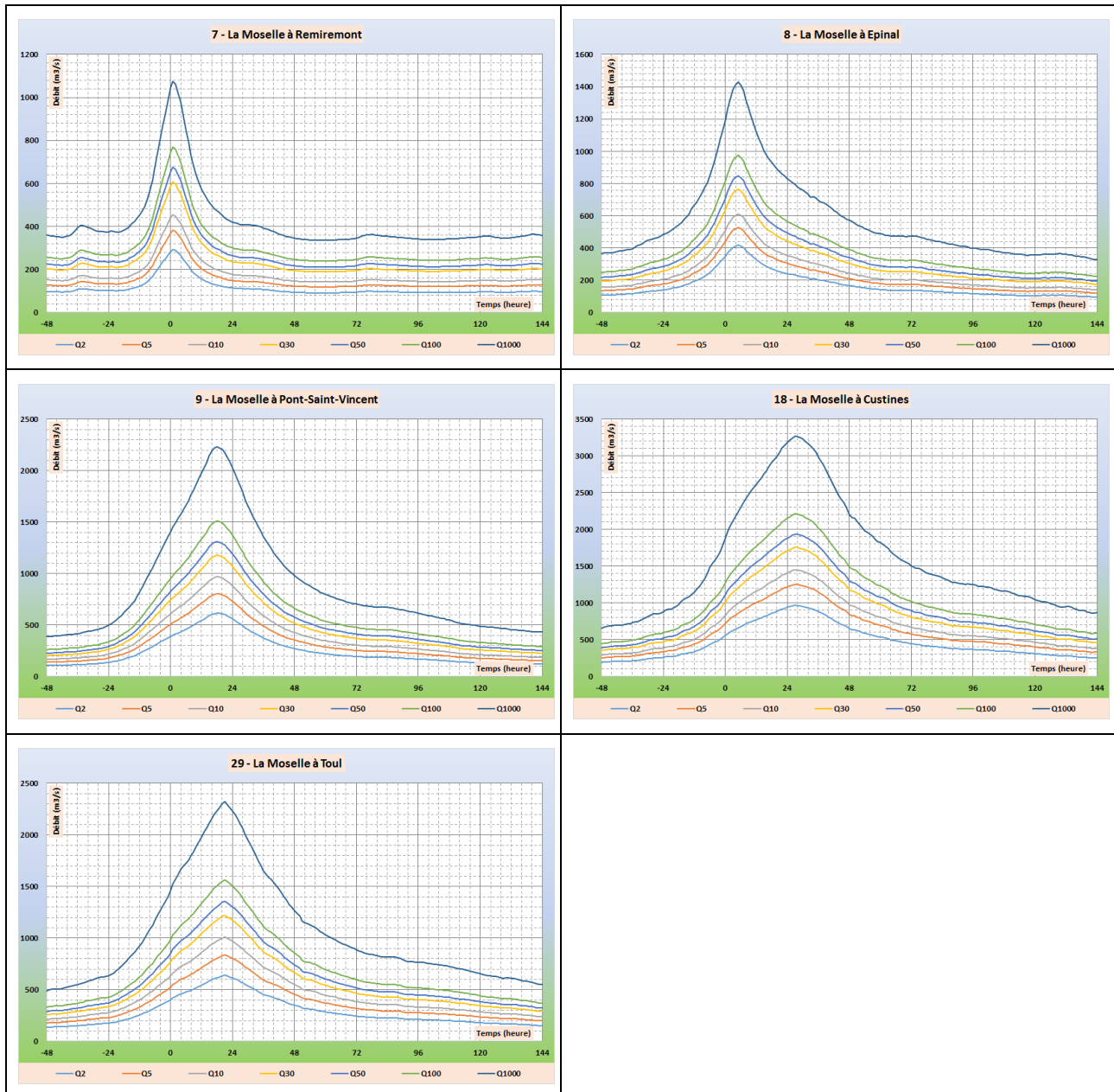


Figure 4-4 : hydrogrammes des crues de références sur la Moselle amont.

5 AFFLUENTS DE LA MOSELLE AMONT

Les fiches détaillant les ajustements statistiques et l'approche hydro-météorologique sur les affluents de la Moselle amont sont fournies en ANNEXE 2.

Le détail des calculs et la justification des choix des paramètres retenus pour l'application des méthodes sont présentés en ANNEXE 8.

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 POINTS DE CALCUL

Huit points de calcul des débits de crues sont localisés sur les affluents de la Moselle amont :

N°	Point hydrologique	Sous-bassin	Débits de crues	Débits d'étiages
1	L'Ingressin à Toul	Moselle amont	X	
2	L'Euron à Lorey	Moselle amont	X	
3	Le Terrouin à Villey-Saint-Etienne	Moselle amont	X	
4	Le Durbion à Châtel-sur-Moselle	Moselle amont	X	
5	La Vologne à Jarménil	Moselle amont	X	
6	La Moselotte à Saint-Etienne-lès-Remiremont	Moselle amont	X	
10	Le Madon à Pont-Saint-Vincent	Moselle amont	X	
27	Le ruisseau d'Olima (ruisseau de Gandrupt)	Moselle amont	X	

Tableau 5-1 : points de calcul des débits de crues sur les affluents de la Moselle amont.

Neuf stations hydrométriques sont disponibles pour l'évaluation des débits de crues en ces huit points de calcul :

Code HYDRO	Nom Station	Cours d'eau	Surface BV	Alt	Date Début	Date Fin	Durée	% Lacunes
A4140202	La Moselotte à Vagney [zainvillers]	La Moselotte	184.0	406	02/11/2005	30/04/2020	14	0.0%
A4142010	La Moselotte à Vagney [ancienne]	La Moselotte	187.0	406	20/04/1967	14/12/2006	40	1.1%
A4173010	La Cleurie à Cleurie	La Cleurie	63.0	451	06/08/1970	30/04/2020	50	1.3%
A4362020	La Vologne à Cheniménil [ancienne]	La Vologne	355.0	369	01/01/1969	31/12/1988	20	1.7%
A4362030	La Vologne à Cheniménil	La Vologne	355.0	368	23/01/1970	30/04/2020	50	28.8%
A4442010	Le Durbion à Vaxoncourt	Le Durbion	145.0	285	01/01/1971	09/01/1989	18	0.0%
A5012010	L'Euron à Froville	L'Euron	91.9	250	01/01/1969	21/08/2006	38	16.5%
A5431010	Le Madon à Pulligny	Le Madon	943.0	225	20/01/1964	30/05/2020	56	0.0%
A5723010	L'Ingressin à Toul	L'Ingressin	54.7	209	01/01/1991	01/10/2004	14	1.3%

Tableau 5-2 : stations hydrométriques sur les affluents de la Moselle amont.

Le cas des stations de la Moselotte à Vagney est discuté en ANNEXE 8 : des incohérences entre les mesures aux deux stations sont identifiées. Seules les données à la nouvelle station de Zainvillers sont exploitées, avec prudence toutefois, car un plafonnement des mesures de débits de pointe est pressenti.

Les chroniques aux stations de Cheniménil sur la Vologne ne présentent pas d'incohérences manifestes et sont assemblées afin de constituer une unique série de débits sur l'ensemble de la période couverte par les deux stations (1969-2020).

Les points de calcul ne sont pas tous situés au droit de stations hydrométriques : une transposition des résultats est donc nécessaire. De manière générale, les points de calculs sont peu éloignés des stations hydrométriques. Néanmoins, deux cas particuliers sont identifiés :

- 6 – Moselotte à Saint-Etienne-lès-Remiremont : les stations de Vagney et Cleurie « couvrent » 70 % du bassin versant de la Moselotte à son exutoire ;
- 27 – Ruisseau d'Olima : il s'agit d'un petit bassin versant de 10 km² sur lequel aucune mesure des débits n'est effectuée.

5.2 RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES

Le Tableau 5-3 et le Tableau 5-5 présentent les débits de crues de référence au droit des stations hydrométriques. Le Tableau 5-4 et le Tableau 5-6 rappellent les débits de référence issus de la bibliographie.

Hypothèses	Moselotte à Vagney	Cleurie à Cleurie	Vologne à Cheniménil	Durbion à Vaxoncourt
Bassin versant	184 km ²	63 km ²	355 km ²	145 km ²
Ajustement statistique	Moy{GEV ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{EXP ; GPD}
Méthode retenue	nc	GRADEX	AGREGEE	AGREGEE
D	1 j	1 j	2 j	1 j
Gradex pluies	12,9 mm/j	10,4 mm/j	14,9 mm/2j	14,9 mm/j
r _D	1,50	1,60	1,40	1,40
T _{piv}	10 ans	10 ans	20 ans	10 ans
Période de retour	Moselotte à Vagney	Cleurie à Cleurie	Vologne à Cheniménil	Durbion à Vaxoncourt
2 ans	nc	27	68	39
5 ans	nc	34	86	50
10 ans	nc	39	98	59
30 ans	nc	53	117	73
50 ans	nc	59	130	81
100 ans	nc	67	151	92
1000 ans	nc	95	240	130

Tableau 5-3 : débits de crues sur les affluents de la Moselle amont.

Période de retour	Moselotte à Vagney	Cleurie à Cleurie	Vologne à Cheniménil	Durbion à Vaxoncourt
2 ans [1]	131	26	64	32
10 ans [1]	157	39	96	48
100 ans [1]	190	55	136	68
1000 ans [4]				

Tableau 5-4 : débits de référence sur les affluents de la Moselle amont d'après la bibliographie.

Hypothèses	Euron à Froville	Madon à Pulligny	Ingressin à Toul
Bassin versant	92 km ²	943 km ²	55 km ²
Ajustement statistique	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}
Méthode retenue	AGREGÉE	AGREGÉE	AGREGÉE
D	1 j	2 j	1 j
Gradex pluies	8,4 mm/j	13,0 mm/2j	9,3 mm/j
r _D	1,40	1,50	1,50
T _{piv}	10 ans	20 ans	10 ans
Période de retour	Euron à Froville	Madon à Pulligny	Ingressin à Toul
2 ans	22	169	5
5 ans	28	219	7
10 ans	32	253	9
30 ans	40	309	12
50 ans	45	343	14
100 ans	52	398	19
1000 ans	80	624	37

Tableau 5-5 : débits de crues sur les affluents de la Moselle amont.

Période de retour	Euron à Froville	Madon à Pulligny	Ingressin à Toul
2 ans [1]	21	159	
10 ans [1]	31	237 [5] 374 [3]	
100 ans [1]	45	340 [5] 529 [6]	
1000 ans [4]		435 [5] 741 [3]	

Tableau 5-6 : débits de référence sur les affluents de la Moselle amont d'après la bibliographie.

De manière générale, les débits calculés dans la présente étude sont plus élevés que les débits de référence issus de la bibliographie. L'amplitude des écarts est variable selon les stations concernées et même selon les périodes de retour considérées. Ces écarts peuvent (en partie) s'expliquer par la prise en compte d'environ 20 années supplémentaires d'observations, à la fois sur les débits et sur les pluies (influence sur le gradex des pluies).

Seule l'estimation de la crue millénale sur le Madon à Pulligny est répertoriée : elle a été réalisée dans le cadre des études sur le TRI de Pont-Saint-Vincent (cf. [5]). L'écart entre la valeur proposée dans la présente étude et celle du TRI est important, d'environ +45 %.

Concernant le Madon à Pulligny, les résultats de la présente étude sont très inférieurs à ceux de l'étude de diagnostic [3] portée par l'EPTB Meurthe-Madon. Dans le cadre de l'étude de diagnostic [3], les débits de pointe ont été reconstitués par modélisation hydraulique en se calant sur les laisses de crues observées. Les écarts sont importants et illustrent toute l'incertitude dans l'estimation des débits de fortes périodes de retour.

5.3 BASSINS NON-JAUGES

Le bassin versant du ruisseau d'Olima ne compte aucune station de mesure des débits. Il s'agit d'un bassin versant de faible taille, environ 10 km².

L'estimation des débits de crues sur le bassin versant du ruisseau d'Olima est présentée en ANNEXE 10.

5.4 TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL

Sur les affluents de la Moselle amont, les points de calcul sont situés à l'exutoire des différents bassins versants. Une loi de transposition est donc recherchée pour évaluer les débits aux exutoires.

Pour les points de calcul situés à proximité d'une 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 le cas présent, les écarts de superficie de bassin versant entre le point de calcul et la station hydrométrique la plus proche étant généralement faibles, le choix du coefficient b a un impact très limité : cela concerne la Vologne, le Durbion, l'Euron, le Madon et l'Ingressin. La valeur $b=0,75$ est retenue pour la transposition.

Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 5-7 :

Période de retour	Ingressin à Toul	Euron à Lorey	Durbion à Châtel-sur-Moselle	Vologne à Jarménil	Madon à Pont-Saint-Vincent
2 ans	5	31	39	70	182
5 ans	8	39	51	88	235
10 ans	9	45	60	100	272
30 ans	13	57	74	120	332
50 ans	15	64	81	134	368
100 ans	19	74	92	155	428
1000 ans	38	113	130	247	670

Tableau 5-7 : débits de crues sur les affluents de la Moselle amont – points de calcul.

Pour le point de calcul de la Moselotte, une relation régionale basée sur les résultats aux stations de Rupt-sur-Moselle, Remiremont et Saint-Nabord, toutes sur la Moselle, est établie. Le coefficient b de la loi de transposition varie de 0,73 pour Q1000 à 0,85 pour Q2.

Pour le point de calcul du Terrouin, de la même façon, une relation régionale basée sur les résultats aux stations de l'Ingressin et du ruisseau d'Esch (cf. paragraphe 10) est établie. Le coefficient b de la loi de transposition varie de 0,56 pour Q1000 à 0,78 pour Q2.

Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 5-8 :

Période de retour	Moselotte à Saint-Etienne-lès-Remiremont	Ruisseau d'Olima	Terrouin à Villey-Saint-Etienne
2 ans	191	1,6	13
5 ans	251	2,4	17
10 ans	295	2,9	20
30 ans	401	6,3	26
50 ans	450	7,8	29
100 ans	515	9,9	36
1000 ans	730	16,8	69

Tableau 5-8 : débits de crues sur les affluents de la Moselle amont – points de calcul.

5.5 HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE

Pour les points de calcul situés à proximité d'une station hydrométrique, les hydrogrammes sont construits à partir des hydrogrammes moyens normés aux stations hydrométriques concernées.

Les hydrogrammes sont construits directement à partir des hydrogrammes moyens normés aux cinq stations hydrométriques concernées.

Pour les trois autres points de calcul, les hydrogrammes moyens normés sont construits à partir de simulations de crues par un modèle de transformation pluie-débit au pas de temps horaire (cf. ANNEXE 9 pour la Moselotte et le Terrouin, et ANNEXE 10 pour le ruisseau d'Olima).

Les hydrogrammes des crues de références des affluents de la Moselle amont sont donnés sur la Figure 5-1. Le temps $t = 0$ pour référence est l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.

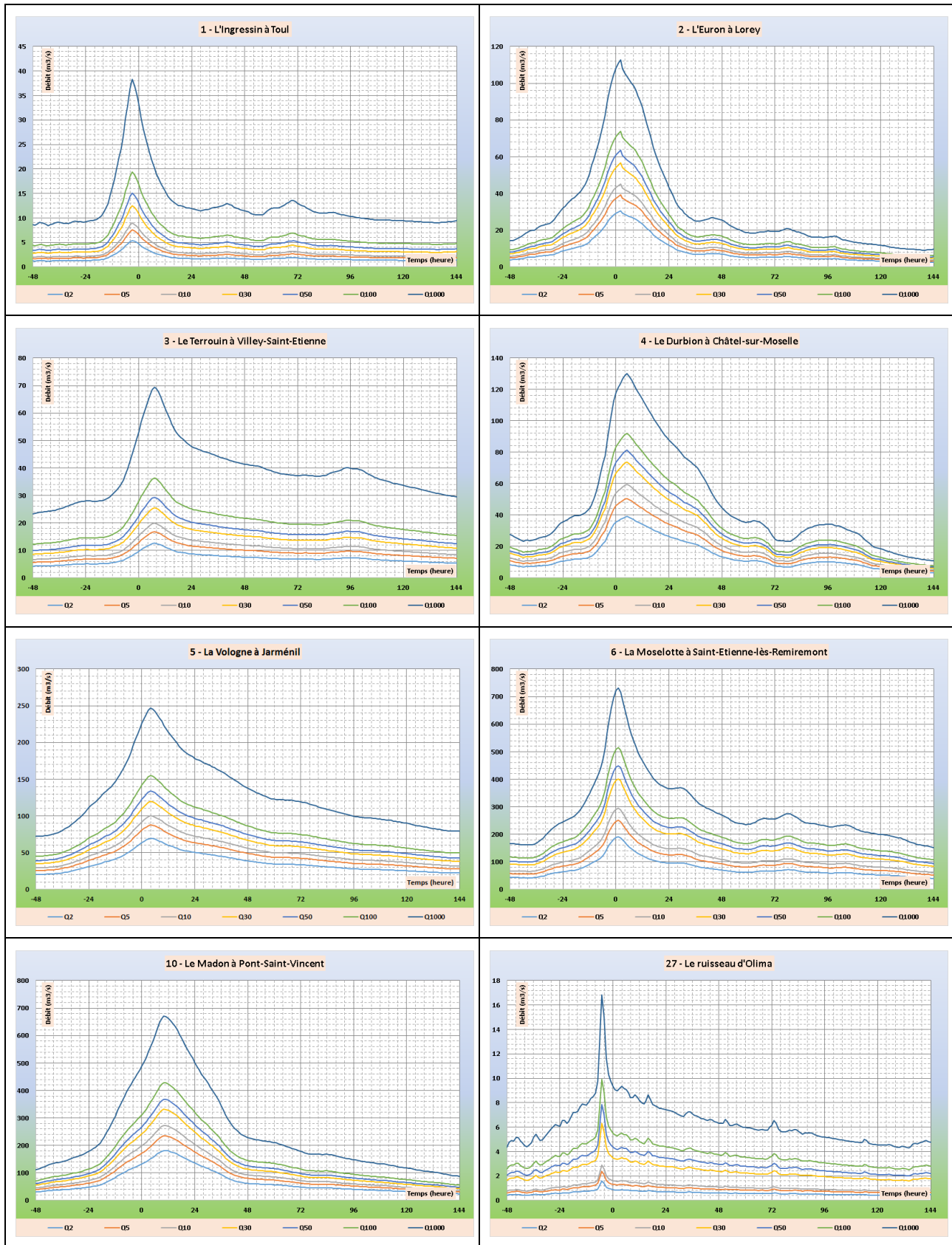


Figure 5-1 : hydrogrammes des crues de références sur les affluents de la Moselle amont.

6 LA MEURTHE ET SES AFFLUENTS

Les fiches détaillant les ajustements statistiques et l'approche hydro-météorologique sur le bassin versant de la Meurthe sont fournies en ANNEXE 3.

Le détail des calculs et la justification des choix des paramètres retenus pour l'application des méthodes sont présentés en ANNEXE 8.

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.

6.1 POINTS DE CALCUL

Huit points de calcul des débits de crues sont localisés sur le bassin versant de la Meurthe :

N°	Point hydrologique	Sous-bassin	Débits de crues	Débits d'étiages
11	La Meurthe à Saint-Dié-des-Vosges	Meurthe	X	X
12	La Meurthe à Raon-l'Étape	Meurthe	X	
13	La Plaine à Raon-l'Étape	Meurthe	X	
14	La Meurthe à Lunéville	Meurthe	X	
15	La Vezouze à Lunéville	Meurthe	X	X
16	Le Sânon à Dombasle-sur-Meurthe	Meurthe	X	
17	La Meurthe à Laneuveville-devant-Nancy	Meurthe	X	X
28	La Meurthe à Damelevières	Meurthe	X	X

Tableau 6-1 : points de calcul des débits de crues sur le bassin versant de la Meurthe.

Neuf stations hydrométriques sont disponibles pour l'évaluation des débits de crues en ces huit points de calcul :

Code HYDRO	Nom Station	Cours d'eau	Surface BV	Alt	Date Début	Date Fin	Durée	% Lacunes
A6051020	La Meurthe à Saint-Dié	La Meurthe	374.0	336	11/08/1992	30/06/2020	28	0.0%
A6051020	La Meurthe à Saint-Dié [Ancienne localisation]	La Meurthe	374.0	336	30/08/1967	10/08/1992	25	0.0%
A6232010	La Plaine à Raon-l'Étape [La Trouche]	La Plaine	116.0	290	01/01/1970	30/04/2020	50	1.0%
A6151030	La Meurthe à Raon-l'Étape	La Meurthe	727.0	281	01/11/1973	30/06/2020	47	76.3%
A6341010	La Meurthe à Lunéville [aval]	La Meurthe	1 105.0	219	18/12/1982	30/04/2020	37	25.6%
A6571110	La Vezouze à Lunéville	La Vezouze	559.0	220	01/01/1969	30/04/2020	51	0.9%
A6761010	La Meurthe à Damelevières	La Meurthe	2 280.0	211	09/09/1969	30/06/2020	51	0.1
A6872010	Le Sanon à Dombasle-sur-Meurthe	Le Sanon	284.0	203	01/01/1988	30/04/2020	32	0.2
A6921010	La Meurthe à Laneuveville-devant-Nancy	La Meurthe	2 780.0	200	31/12/1985	30/04/2020	34	0.0
A6941010	La Meurthe à Malzéville [ancienne]	La Meurthe	2 930.0	189	01/01/1960	31/12/1990	31	0.0
A6941020	La Meurthe à Malzéville	La Meurthe	2 960.0	188	01/01/1991	30/04/2020	29	8.2

Tableau 6-2 : stations hydrométriques sur la Meurthe et ses affluents.

Les chroniques aux stations de Saint-Dié ne présentent pas d'incohérences manifestes et sont assemblées afin de constituer une unique série de débits sur l'ensemble de la période couverte par les deux stations (1967-2020).

De même pour les deux stations de Malzéville qui permettent la constitution d'une chronique de 1960 à 2020.

Les points de calcul ne sont pas tous situés au droit de stations hydrométriques : une transposition des résultats est donc nécessaire. De manière générale, les points de calculs sont peu éloignés des stations hydrométriques.

6.2 RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES

Le Tableau 6-3 et le Tableau 6-5 présentent les débits de crues de référence au droit des stations hydrométriques. Le Tableau 6-4 et le Tableau 6-6 rappellent les débits de référence issus de la bibliographie.

Hypothèses	Meurthe à Saint-Dié	Meurthe à Raon-l'Etape	Plaine à Raon-l'Etape	Meurthe à Lunéville	Vezouze à Lunéville
Bassin versant	374 km ²	727 km ²	116 km ²	1 105 km ²	559 km ²
Ajustement statistique	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	EXP	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}
Méthode retenue	AGREGEE	AGREGEE	AGREGEE	AGREGEE	AGREGEE
D	2 j	2 j	2 j	3 j	1 j
Gradex pluies	15,3 mm/2j	15,0 mm/2j	16,3 mm/2j	15,9 mm/3j	10,7 mm/3j
r _D	1,50	1,40	1,25	1,40	1,30
Tpiv	10 ans	10 ans	10 ans	10 ans	10 ans
Période de retour	Meurthe à Saint-Dié	Meurthe à Raon-l'Etape	Plaine à Raon-l'Etape	Meurthe à Lunéville	Vezouze à Lunéville
2 ans	72	111	11	134	91
5 ans	98	155	16	203	127
10 ans	115	187	18	255	152
30 ans	150	246	24	329	201
50 ans	170	281	28	370	233
100 ans	200	335	35	430	283
1000 ans	311	530	62	643	478

Tableau 6-3 : débits de crues sur la Meurthe amont.

Période de retour	Meurthe à Saint-Dié	Meurthe à Raon-l'Etape	Plaine à Raon-l'Etape	Meurthe à Lunéville	Vezouze à Lunéville
2 ans [6]	68	112	14	154	82
10 ans [6]	116	190	21	261	141
100 ans [6]	195	321	30	441	268
1000 ans					

Tableau 6-4 : débits de référence sur la Meurthe amont d'après la bibliographie.

Hypothèses	Meurthe à Damelevières	Sânon à Dombasle-sur-Meurthe	Meurthe à Laneuveville	Meurthe à Malzéville
Bassin versant	2 280 km ²	284 km ²	2 780 km ²	2 960 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	AGREGÉE	AGREGÉE	AGREGÉE	AGREGÉE
D	2 j	2 j	3 j	3 j
Gradex pluies	14,0 mm/2j	12,8 mm/2j	15,3 mm/3j	15,3 mm/3j
r _D	1,30	1,40	1,50	1,30
T _{piv}	20 ans	10 ans	20 ans	20 ans
Période de retour	Meurthe à Damelevières	Sânon à Dombasle-sur-Meurthe	Meurthe à Laneuveville	Meurthe à Malzéville
2 ans	276	34	303	299
5 ans	380	48	410	418
10 ans	454	57	486	503
30 ans	574	75	608	636
50 ans	646	86	681	715
100 ans	765	103	804	847
1000 ans	1 266	168	1 317	1 395

Tableau 6-5 : débits de crues sur la Meurthe aval.

Période de retour	Meurthe à Damelevières	Sânon à Dombasle-sur-Meurthe	Meurthe à Laneuveville	Meurthe à Malzéville
2 ans [6]	270	-		345
10 ans [6]	430	56		590
100 ans [6]	740	84		910
1000 ans				1 330 [4]

Tableau 6-6 : débits de référence sur la Meurthe aval d'après la bibliographie.

De manière générale, les débits calculés dans la présente étude sont assez proches des débits de référence estimés dans le cadre du PAPI de la Meurthe. Les écarts les plus importants sont identifiés à la station de Dombasle-sur-Meurthe sur le Sânon : environ +20 % pour l'estimation de la crue centennale.

Concernant les estimations de crue millénale, une estimation est disponible à la station de Malzéville : cette estimation est très proche de celle de la présente étude. Pour les autres stations, les seules estimations disponibles sont issues de la base de données SHYREG-2019 : ces estimations sont assez proches de celles de la présente étude, tantôt supérieures, tantôt inférieures selon les stations. L'estimation sur le Sânon à Dombasle-sur-Meurthe présente un écart un peu plus important qu'aux autres stations du bassin de la Meurthe (+15 %).

6.3 TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL

Sur le cours de la Meurthe, les cinq points de calcul sont situés au droit de stations hydrométriques. Les résultats sont donc repris directement des calculs aux stations concernées et synthétisés dans le Tableau 6-7 :

Période de retour	Meurthe à Saint-Dié	Meurthe à Raon-l'Etape	Meurthe à Lunéville	Meurthe à Damelevières	Meurthe à Laneuveville
2 ans	72	111	134	276	303
5 ans	98	155	203	380	410
10 ans	115	187	255	454	486
30 ans	150	246	329	574	608
50 ans	170	281	370	646	681
100 ans	200	335	430	765	804
1000 ans	311	530	643	1 266	1 317

Tableau 6-7 : débits de crues sur le cours de la Meurthe – points de calcul.

Sur les affluents de la Meurthe, les points de calcul sont situés à l'exutoire des différents bassins versants. Une loi de transposition est donc recherchée pour évaluer les débits aux exutoires.

Les points de calcul étant situés à proximité d'une 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 le cas présent, les écarts de superficie de bassin versant entre le point de calcul et la station hydrométrique la plus proche étant généralement faibles, le choix du coefficient b a un impact très limité : cela concerne la Plaine, la Vezouze et le Sânon. La valeur $b=0,75$ est retenue pour la transposition.

Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 6-8 :

Période de retour	Plaine à Raon-l'Étape	Vezouze à Lunéville	Sânon à Dombasle-sur-Meurthe
2 ans	12	92	34
5 ans	16	128	48
10 ans	19	153	58
30 ans	24	202	76
50 ans	28	234	87
100 ans	35	285	105
1000 ans	63	481	170

Tableau 6-8 : débits de crues sur les affluents de la Meurthe – points de calcul.

6.4 HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE

L'ensemble des points de calcul étant situé au droit ou à proximité d'une station hydrométrique, les hydrogrammes sont construits à partir des hydrogrammes moyens normés aux stations hydrométriques concernées.

Sur la Plaine, les hydrogrammes moyens normés sont construits à partir de simulations de crues par un modèle de transformation pluie-débit au pas de temps horaire (cf. ANNEXE 9).

Les hydrogrammes des crues de références sur le bassin versant de la Meurthe sont donnés sur la Figure 6-1. Le temps $t = 0$ pour référence est l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.

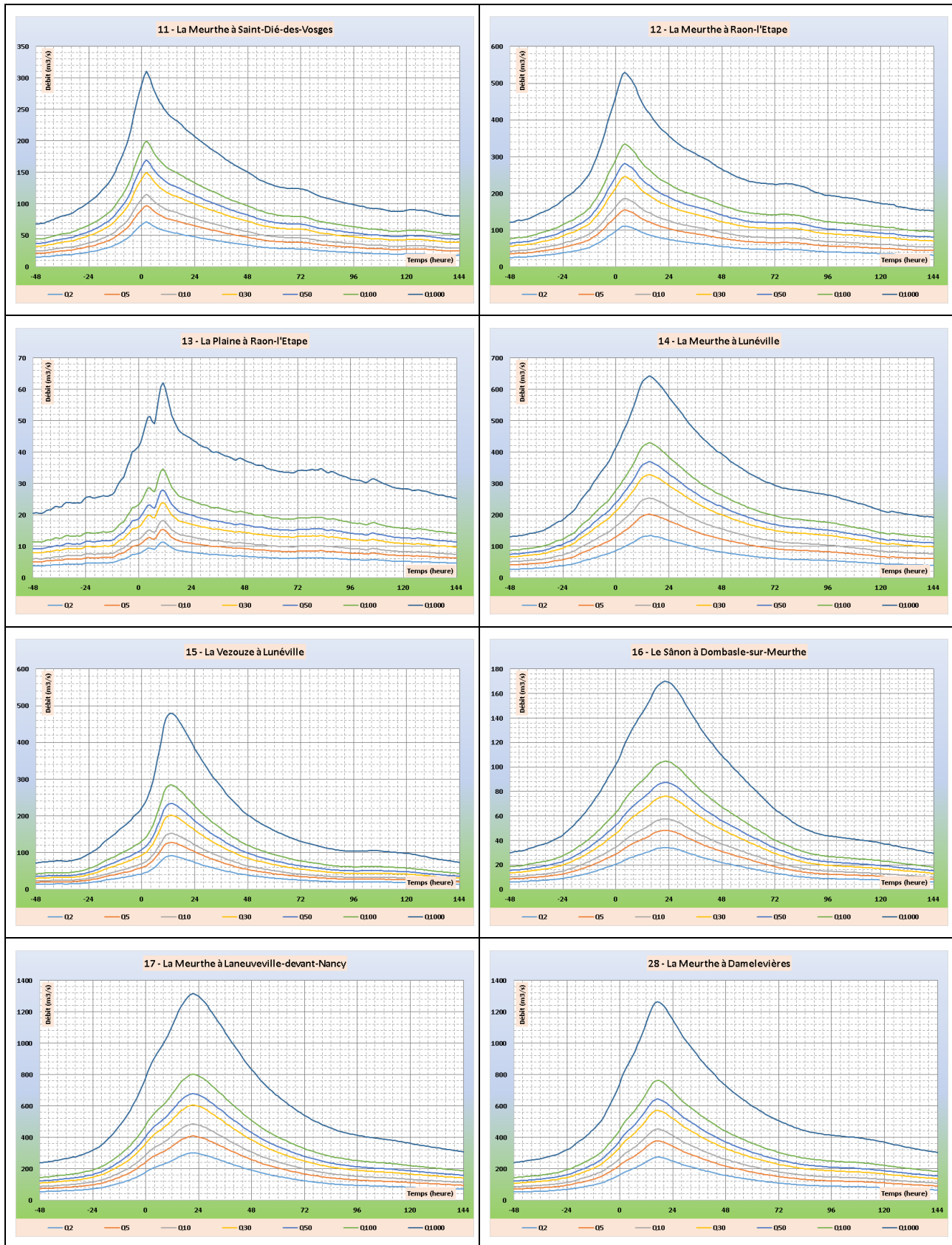


Figure 6-1 : hydrogrammes des crues de références sur le bassin versant de la Meurthe.

7 LA MOSELLE AVAL

Les fiches détaillant les ajustements statistiques et l'approche hydro-météorologique sur la Moselle aval sont fournies en ANNEXE 4.

Le détail des calculs et la justification des choix des paramètres retenus pour l'application des méthodes sont présentés en ANNEXE 8.

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.

7.1 POINTS DE CALCUL

Cinq points de calcul des débits de crues sont localisés sur le cours principal de la Moselle aval :

N°	Point hydrologique	Sous-bassin	Débits de crues	Débits d'étiages
18	La Moselle à Custines	Moselle aval	X	X
24	La Moselle à Metz	Moselle aval	X	
25	La Moselle à Uckange	Moselle aval	X	X
26	La Moselle à Apach	Moselle aval	X	
31	La Moselle en amont de Pont-à-Mousson	Moselle aval	X	X

Tableau 7-1 : points de calcul des débits de crues sur la Moselle aval.

Six stations hydrométriques sont disponibles pour l'évaluation des débits de crues en ces quatre points de calcul :

Code HYDRO	Nom Station	Cours d'eau	Surface BV	Alt	Date Début	Date Fin	Durée	% Lacunes
A7010610	La Moselle à Custines	La Moselle	6 830.0	184	01/01/1973	30/05/2020	47	0.0
A7030620	La Moselle à Blénod-lès-Pont-à-Mousson	La Moselle	6 925.0	177	01/01/1969	31/12/1970	2	0.0
A7400061	La Moselle à Corny-sur-Moselle	La Moselle	7 762.0	172	25/04/2014	31/05/2020	6	0.0
A7430610	La Moselle à Metz [Pont des Morts]	La Moselle	7 878.0	159	01/01/1988	31/05/2020	32	25.7
A7930061	La Moselle à Hagondange	La Moselle	9 422.0	154	26/11/2012	31/05/2020	8	0.0
A7930610	La Moselle à Hauconcourt	La Moselle	9 387.0	155	01/01/1960	20/02/2013	53	0.1
A8500610	La Moselle à Uckange	La Moselle	10 770.0	150	01/01/1981	30/05/2020	39	0.1

Tableau 7-2 : stations hydrométriques sur la Moselle aval.

Les deux stations de Blénod-lès-Pont-à-Mousson et de Corny-sur-Moselle présentent des chroniques très courtes (2 et 6 ans respectivement) et ne sont pas retenues pour l'analyse statistique.

La station de Metz (Pont des Morts) présente de nombreuses lacunes sur sa période d'ouverture. Il s'agit d'une station d'annonce des crues pour laquelle les débits en-dessous de 296 m³/s ne sont pas mesurés et/ou étalonnés. En outre, la station est contournée par une partie du débit qui transite par le bras mort : **compte tenu de ces éléments, les mesures à la station de Metz ne sont pas exploitées dans le cadre de la présente étude.**

Les chroniques aux stations de Hagondange et Hauconcourt ne présentent pas d'incohérences manifestes et sont assemblées afin de constituer une unique série de débits sur l'ensemble de la période couverte par les deux stations (1960-2020).

Les données hydrométriques de la station de Perl, située en aval de la frontière, ont été demandée auprès du service allemand. Les données fournies comprennent :

- Les débits au pas de temps 15 minutes sur la période du 1^{er} janvier 2019 au 1^{er} mars 2021 ;
- Les débits maxima mensuels sur la période du 1^{er} janvier 2015 au 1^{er} mars 2021.

Les données fournies ne sont pas suffisantes dans le cadre de la présente étude. Les données recueillies sur la station de Perl n'ont ainsi pas été utilisées.

Les points de calcul ne sont pas tous situés au droit de stations hydrométriques : une transposition des résultats est nécessaire pour les trois points situés en amont de Pont-à-Mousson, à Metz et Apach.

7.2 RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES

Le Tableau 7-3 présente les débits de crues de référence au droit des stations hydrométriques. Le Tableau 7-4 rappelle les débits de référence issus de la bibliographie.

Hypothèses	Moselle à Custines	Moselle à Hagondange	Moselle à Uckange
Bassin versant	6 830 km ²	9 422 km ²	10 770 km ²
Ajustement statistique	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}
Méthode retenue	AGREGÉE	AGREGÉE	AGREGÉE
D	3 j	4 j	4 j
Gradex pluies	13,2 mm/3j	15,3 mm/4j	15,3 mm/4j
r _D	1,40	1,40	1,40
T _{piv}	20 ans	20 ans	20 ans
Période de retour	Moselle à Custines	Moselle à Hagondange	Moselle à Uckange
2 ans	970	961	1 084
5 ans	1 257	1 238	1 378
10 ans	1 453	1 428	1 588
30 ans	1 762	1 729	1 926
50 ans	1 940	1 912	2 128
100 ans	2 217	2 213	2 464
1000 ans	3 276	3 445	3 862

Tableau 7-3 : débits de crues sur la Moselle aval.

Période de retour	Moselle à Custines	Moselle à Metz	Moselle à Hagondange	Moselle à Uckange
2 ans [1]	910		960	
10 ans [1]	1 420	1 440	1 580	
100 ans [1]	1 890-2 010	2 100 à 2 450	2 200 à 2 460	2 430
1000 ans [4]	2 800		3 150	

Tableau 7-4 : débits de référence sur la Moselle aval d'après la bibliographie.

De manière générale, les débits calculés dans la présente étude sont assez proches des débits de référence estimés dans le cadre de l'AZI de la Moselle. Hormis à Custines, les valeurs de crues centennales sont cohérentes avec les estimations de l'AZI de la Moselle. A Custines, l'estimation de la présente étude est supérieure d'environ 10 %.

Concernant les estimations de crue millénale, les valeurs estimées dans la présente étude sont supérieures à celles des études du TRI, d'environ 10 % pour ce qui concerne Hagondange/Hauconcourt et de l'ordre de 17 % pour Custines.

7.3 TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL

Sur le cours de la Moselle aval, deux des cinq points de calcul sont situés au droit de stations hydrométriques. Les résultats sont donc repris directement des calculs aux stations concernées.

Pour les trois autres points de calcul, une loi de transposition est recherchée pour évaluer les débits de référence. 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 la plus proche et b un coefficient régional.

Cependant, les débits estimés sur l'axe Moselle aval, entre les stations de Custines, Hagondange/Uckange, ne s'ajustent pas très bien à une loi de type Myer :

- Pour les crues fréquentes, le débit tend à diminuer entre Custines et Hagondange, puis augmente significativement entre Hagondange et Uckange (contributions de l'Orne notamment) ;
- Pour la crue centennale, les estimations à Custines et Hagondange sont équivalentes à 1% près ;
- Pour les crues rares, les débits sont croissants entre Custines et Hagondange.

Ces observations sont illustrées sur la Figure 7-1 :

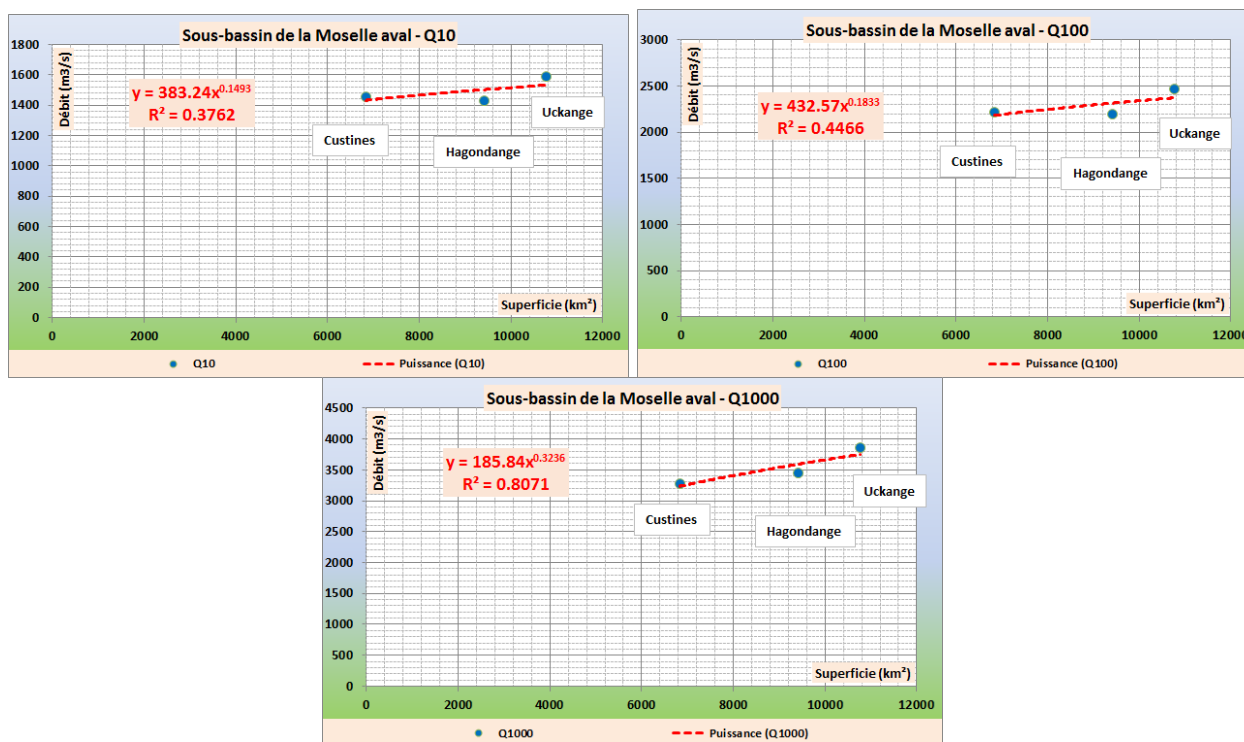


Figure 7-1 : débits de crues sur l'axe Moselle aval pour Q10, Q100 et Q1000.

Les valeurs « classiques » du coefficient b sont comprises entre 0,7 et 0,8. Un ajustement des débits de pointe en fonction de la superficie du bassin versant le long de l'axe Moselle donne des valeurs de b variant de 0,15 à 0,32 selon la période de retour considérée.

La loi de Myer ne prenant pas bien en compte les différences de comportement entre l'amont et l'aval de la confluence avec L'Orne, le parti pris suivant est retenu :

- Pour les points de calcul à Pont-à-Mousson et Metz, les débits sont calculés par interpolation linéaire entre les stations de Custines et Hagondange/Hauconcourt ;
- Pour le point à Apach, les débits sont calculés par une loi de Myer à partir des débits à Uckange. Une valeur moyenne de 0,2 est appliquée pour l'exposant b de la loi. Le choix de l'exposant a un impact limité sur les valeurs calculées compte tenu de la faible différence de bassin versant entre Uckange et Apach.

Les résultats aux cinq points de calcul sont synthétisés dans le Tableau 7-5 :

Période de retour	Moselle à Custines	Moselle à Metz	Moselle à Uckange	Moselle à Apach	Moselle à Pont-à-Mousson
2 ans	970	966	1 084	1 098	970
5 ans	1 257	1 249	1 378	1 396	1 256
10 ans	1 453	1 443	1 588	1 609	1 452
30 ans	1 762	1 749	1 926	1 951	1 761
50 ans	1 940	1 929	2 128	2 156	1 939
100 ans	2 217	2 208	2 464	2 497	2 216
1000 ans	3 276	3 344	3 862	3 913	3 282

Tableau 7-5 : débits de crues sur la Moselle aval – points de calcul.

7.4 HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE

L'ensemble des points de calcul étant situé au droit ou à proximité d'une station hydrométrique, les hydrogrammes sont construits à partir des hydrogrammes moyens normés aux stations hydrométriques concernées.

Pour le point de calcul de Pont-à-Mousson, l'hydrogramme normé de Custines est utilisé.

Pour le point de calcul d'Apach, l'hydrogramme normé d'Uckange est utilisé.

Les hydrogrammes des crues de références sur la Moselle aval sont donnés sur la Figure 7-2. Le temps a pour référence ($t = 0$) l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.

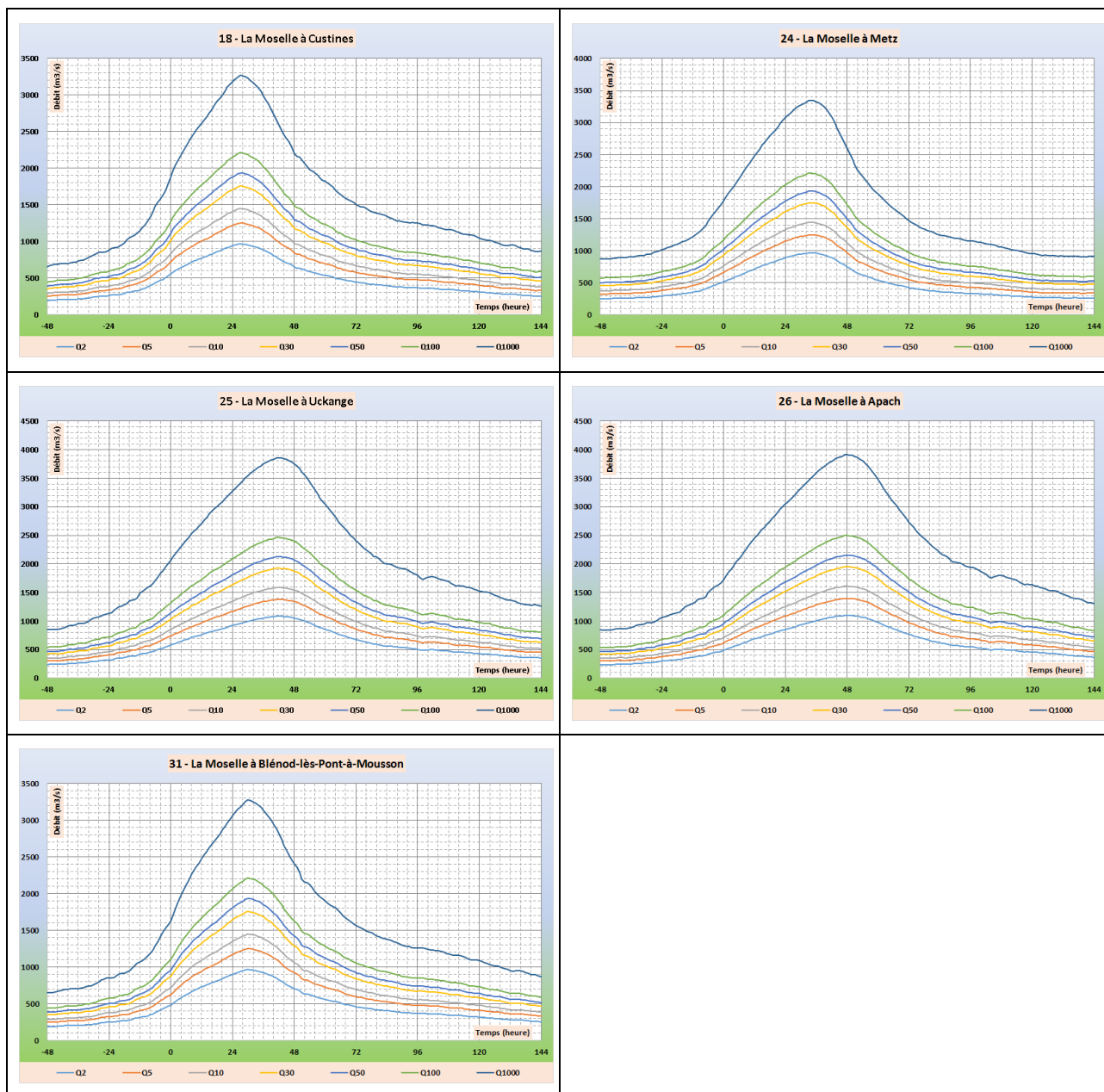


Figure 7-2 : hydrogrammes des crues de références sur la Moselle aval.

8 LA SEILLE ET SES AFFLUENTS

Les fiches détaillant les ajustements statistiques et l'approche hydro-météorologique sur le bassin versant de la Seille sont fournies en ANNEXE 5.

Le détail des calculs et la justification des choix des paramètres retenus pour l'application des méthodes sont présentés en ANNEXE 8.

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.

8.1 POINTS DE CALCUL

Quatre points de calcul des débits de crues sont localisés sur le bassin versant de la Seille :

N°	Point hydrologique	Sous-bassin	Débits de crues	Débits d'étiages
32	La Petite Seille	Moselle aval	X	
33	La Seille à Salonnas (amont Petite Seille)	Moselle aval	X	X
34	La Seille à Nomeny	Moselle aval	X	
20	La Seille à Metz	Moselle aval	X	X

Tableau 8-1 : points de calcul des débits de crues sur le bassin versant de la Seille.

Six stations hydrométriques sont disponibles pour l'évaluation des débits de crues en ces quatre points de calculs :

Code HYDRO	Nom Station	Cours d'eau	Surface BV	Alt	Date Début	Date Fin	Durée	% Lacunes
A7581020	La Seille à Moyenvic	La Seille	352	199	23/08/1985	30/04/2020	35	0.5
A7642010	La Petite Seille à Château-Salins	La Petite Seille	143	202	01/01/1969	31/05/2020	51	0.5
A7701010	La Seille à Chambrey	La Seille	559	199	30/12/2002	30/05/2020	17	0.5
A7821010	La Seille à Nomeny	La Seille	925	181	01/01/1969	30/05/2020	51	0.3
A7881010	La Seille à Metz [pont Lothaire]	La Seille	1 280	163	01/10/1964	20/09/2015	51	1.9
A7881020	La Seille à Metz [Pont Lothaire amont]	La Seille	1 280	163	01/11/2015	30/05/2020	5	0.0

Tableau 8-2 : stations hydrométriques sur le bassin versant de la Seille.

Les chroniques aux stations de Metz ne présentent pas d'incohérences manifestes et sont assemblées afin de constituer une unique série de débits sur l'ensemble de la période couverte par les deux stations (1964-2020).

Les points de calcul ne sont pas tous situés au droit de stations hydrométriques : une transposition des résultats est donc nécessaire. De manière générale, les points de calculs sont peu éloignés des stations hydrométriques.

8.2 RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES

Le Tableau 8-3 présente les débits de crues de référence au droit des stations hydrométriques. Le Tableau 8-4 rappelle les débits de référence issus de la bibliographie.

Hypothèses	Seille à Moyenvic	Petite Seille à Château-Salins	Seille à Nomény	Seille à Metz
Bassin versant	352 km ²	143 km ²	925 km ²	1 280 km ²
Ajustement statistique	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	GPD	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}
Méthode retenue	AGREGÉE	AGREGÉE	AGREGÉE	AGREGÉE
D	3 j	2 j	5 j	5 j
Gradex pluies	14,6 mm/3j	12,5 mm/2j	12,9 mm/5j	12,9 mm/5j
r _D	1,20	1,30	1,30	1,50
T _{piv}	10 ans	10 ans	10 ans	10 ans
Période de retour	Seille à Moyenvic	Petite Seille à Château-Salins	Seille à Nomény	Seille à Metz
2 ans	24	15	68	77
5 ans	33	23	89	106
10 ans	39	28	101	127
30 ans	51	38	129	165
50 ans	59	43	144	188
100 ans	72	51	167	222
1000 ans	123	81	247	349

Tableau 8-3 : débits de crues sur la Seille et la Petite Seille.

Période de retour	Seille à Moyenvic	Petite Seille à Château-Salins	Seille à Nomény	Seille à Metz
2 ans [1]			56	
10 ans [1]			112	136
100 ans [1]			159	212
1000 ans				

Tableau 8-4 : débits de référence sur la Seille d'après la bibliographie.

De manière générale, les débits calculés dans la présente étude sont assez proches des débits de référence estimés dans le cadre de l'AZI de la Moselle.

Concernant les estimations de crue millénale, les seules estimations disponibles sont issues de la base de données SHYREG-2019 : ces estimations sont très nettement supérieures aux estimations de la présente étude pour toutes les stations.

8.3 TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL

Les points de calcul de Nomény et Metz sont situés au droit d'une station hydrométrique. Les résultats sont donc repris directement des calculs aux stations concernées

Pour les deux autres points de calcul, situés à proximité d'une 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. Un ajustement des débits de pointe en fonction de la superficie du bassin versant sur la Seille donne des valeurs de b variant de 0,67 à 0,78 selon la période de retour considérée. En fait, dans le cas présent, les écarts de superficie de bassin versant entre le point de calcul et la station hydrométrique la plus proche étant généralement faibles, le choix du coefficient b a un impact très limité. La valeur $b=0,75$ est retenue pour la transposition.

Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 8-5 :

Période de retour	Petite Seille	Seille à Salornnes	Seille à Nomény	Seille à Metz
2 ans	16	26	68	77
5 ans	24	35	89	106
10 ans	30	41	101	127
30 ans	40	54	129	165
50 ans	46	63	144	188
100 ans	55	77	167	222
1000 ans	87	131	247	349

Tableau 8-5 : débits de crues sur la Seille et la Petite Seille – points de calcul.

8.4 HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE

L'ensemble des points de calcul étant situé au droit ou à proximité d'une station hydrométrique, les hydrogrammes sont construits à partir des hydrogrammes moyens normés aux stations hydrométriques concernées.

Les hydrogrammes des crues de références sur le bassin versant de la Seille sont donnés sur la Figure 8-1. Le temps t pour référence ($t = 0$) l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.

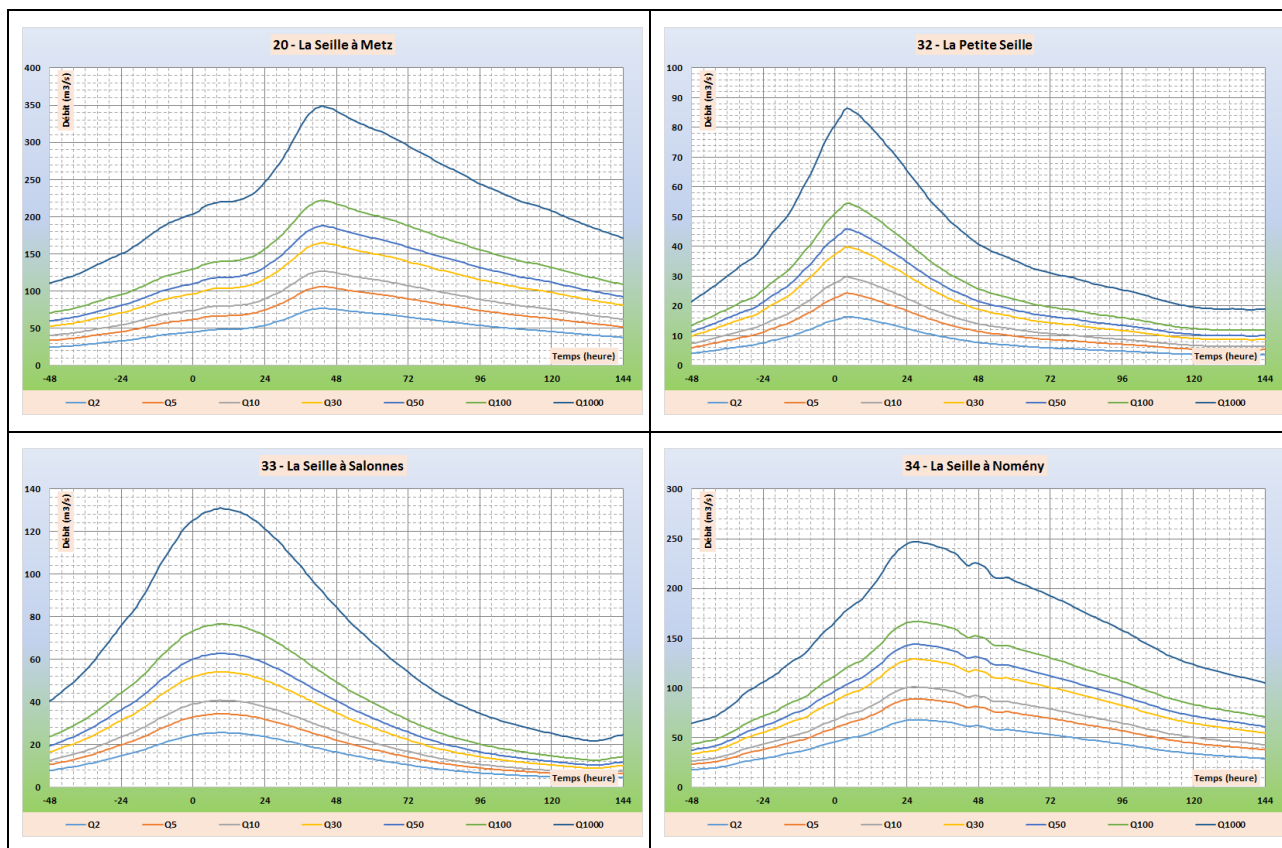


Figure 8-1 : hydrogrammes des crues de références sur la Seille et la Petite Seille.

9 L'ORNE ET SES AFFLUENTS

Les fiches détaillant les ajustements statistiques et l'approche hydro-météorologique sur le bassin versant de l'Orne sont fournies en ANNEXE 6.

Le détail des calculs et la justification des choix des paramètres retenus pour l'application des méthodes sont présentés en ANNEXE 8.

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.

9.1 POINTS DE CALCUL

Six points de calcul des débits de crues sont localisés sur le bassin versant de l'Orne :

N°	Point hydrologique	Sous-bassin	Débits de crues	Débits d'étiages
21	L'Orne à Moyeuvre-Grande	Moselle aval	X	X
22	L'Orne à son exutoire	Moselle aval	X	X
23	L'Orne à Jarny (amont confluence Yron)	Moselle aval	X	X
35	Le Woigot	Moselle aval	X	X
36	Le Longeau	Moselle aval	X	X
37	L'Yron	Moselle aval	X	X

Tableau 9-1 : points de calcul des débits de crues sur le bassin versant de l'Orne.

Dix stations hydrométriques sont disponibles pour l'évaluation des débits de crues en ces six points de calculs :

Code HYDRO	Nom Station	Cours d'eau	Surface BV	Alt	Date Début	Date Fin	Durée	% Lacunes
A8006210	Le ruisseau de Vaux à Morgemoulin	Le ruisseau de Vaux	42.3	207	23/06/1984	30/04/2020	36	0.0
A8021010	L'Orne à Étain	L'Orne	138.0	199	01/01/1997	31/05/2020	23	13.1
A8071010	L'Orne à Boncourt	L'Orne	412.0	185	01/01/1960	30/06/2020	60	17.7
A8120201	L'Yron à Jarny [droitaumont]	L'Yron	156.0	189	01/01/2013	31/05/2020	7	13.1
A8122000	L'Yron à Hannonville-Suzémont	L'Yron	150.0	197	04/12/1998	31/05/2020	21	1.1
A8182010	L'Yron à Jarny [La Cartoucherie]	L'Yron	383.0	187	01/01/1960	27/02/2003	43	31.2
A8201010	L'Orne à Jarny [Labry]	L'Orne	820.0	186	01/01/2007	31/05/2020	13	0.0
A8322010	Le Woigot à Briey	Le Woigot	75.8	204	14/06/1967	31/05/2020	53	0.0
A8401010	L'Orne à Moyeuvre-Grande	L'Orne	1 141.0	170	25/12/2003	30/05/2020	16	0.4
A8431010	L'Orne à Rosselange	L'Orne	1 226.0	164	16/12/1967	30/04/2020	52	11.4

Tableau 9-2 : stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Orne.

L'analyse des débits aux stations de l'Orne (cf. ANNEXE 8) a mis en évidence l'absence de fortes crues observées sur le bassin depuis la crue de décembre 2001. La seule crue notable sur l'Orne depuis 2001 est celle de mai/juin 2016 : cette crue demeure toutefois très inférieure en intensité aux principales crues antérieures à 2001. Cette observation est valable pour les bassins voisins du Rupt de Mad et du ruisseau d'Esch, soit toute la partie Nord-Ouest du bassin versant de la Moselle française (affluents aval de rive gauche).

En conséquence, toutes les stations ouvertes après 2001 sont écartées de l'analyse.

9.2 RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES

Le Tableau 9-3 présente les débits de crues de référence au droit des stations hydrométriques retenues pour l'analyse. Le Tableau 9-4 rappelle les débits de référence issus de la bibliographie.

Hypothèses	Orne à Etain	Orne à Boncourt	Yron à Jarny	Woigot à Briey	Orne à Rosselange
Bassin versant	138 km ²	412 km ²	383 km ²	76 km ²	1 226 km ²
Ajustement statistique	Moy{GEV ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	EXP
Méthode retenue	AGREGÉE	AGREGÉE	AGREGÉE	AGREGÉE	AGREGÉE
D	1 j	1 j	1 j	1 j	2 j
Gradex pluies	7,3 mm/j	6,8 mm/j	7,7 mm/j	7,6 mm/j	6,8 mm/2j
r _D	1,30	1,20	1,20	1,60	1,40
T _{piv}	10 ans	10 ans	10 ans	10 ans	10 ans
Période de retour	Orne à Etain	Orne à Boncourt	Yron à Jarny	Woigot à Briey	Orne à Rosselange
2 ans	20	55	76	17	153
5 ans	25	75	107	24	208
10 ans	28	89	129	29	250
30 ans	35	115	165	38	318
50 ans	40	131	183	42	359
100 ans	48	154	210	49	419
1000 ans	80	241	302	71	643

Tableau 9-3 : débits de crues sur l'Orne et ses affluents.

Période de retour	Orne à Etain	Orne à Boncourt	Yron à Jarny	Woigot à Briey	Orne à Rosselange
2 ans [1]					178
10 ans [1]					305
100 ans [1]					432
1000 ans					

Tableau 9-4 : débits de référence sur l'Orne d'après la bibliographie.

Seuls les débits à Rosselange peuvent être comparés. Les débits de crue centennale sont très proches. Les estimations pour les crues de périodes de retour plus fréquentes sont moins élevées dans la présente étude : cette différence peut s'expliquer par la prise en compte des 20 dernières années avec pas ou peu de forte crue.

9.3 CAS DE L'YRON A JARNY

L'homogénéité des débits calculés est appréciée en comparant les valeurs de débits de pointe, exprimés en valeur brute (m^3/s) et en valeur spécifique (l/s/km^2).

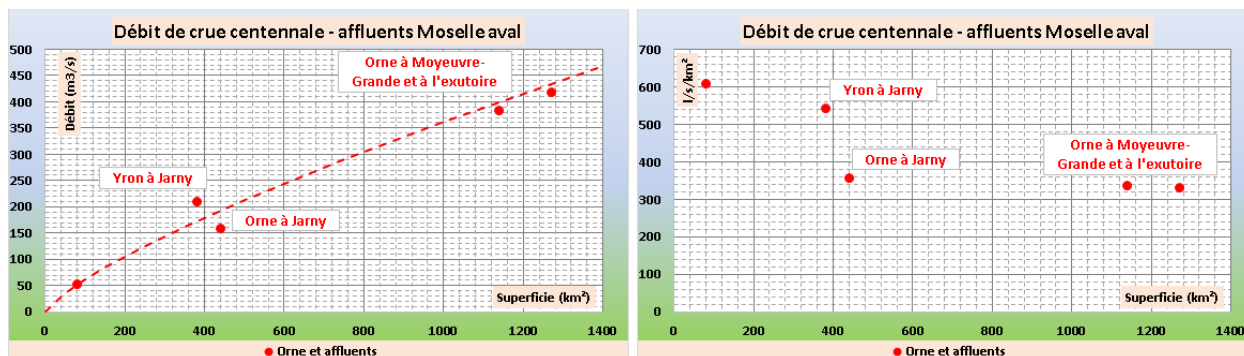


Figure 9-1 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Orne et ses affluents.

Les graphiques de la Figure 9-1 mettent en évidence un comportement contrasté entre l'Yron à Jarny et l'Orne à Jarny (amont confluence avec l'Yron). Les débits spécifiques des deux cours d'eau sont très différents alors que les caractéristiques physiques des deux bassins versants sont assez similaires et que la pluviométrie est peu contrastée entre les deux bassins versants. Cette observation est valable également pour les autres périodes de crues estimées.

Dans le cadre des études de modélisations hydrauliques menées par le Syndicat Mixte Moselle Aval, l'influence de l'Orne sur les hauteurs d'eau au droit de la station de l'Yron à Jarny (La Cartoucherie) a été mise en évidence : cette influence pourrait se traduire par une sur-estimation des débits de crues à la station de l'Yron à Jarny (La Cartoucherie), ce que suggère également les graphiques de la Figure 9-1.

Pour rappel, pour ce qui concerne l'Yron à Jarny, les observations sont utilisées pour estimer les débits de crues de périodes de retour 2 à 10 ans. Au-delà, la méthode du gradex progressif est appliquée.

Plusieurs alternatives ont été envisagées afin d'améliorer l'estimation des débits de crues sur l'Yron à Jarny :

- Ré-échantillonnage des crues pour isoler les crues de l'Yron seul : cette méthode consiste à ne retenir que les crues de l'Yron seul, c'est-à-dire sans crue concomitante de l'Orne amont, pour constituer l'échantillon. L'analyse des observations montre que les crues de l'Yron et de l'Orne amont sont majoritairement concomitantes. Cette méthode conduit à une réduction drastique de l'échantillon et écarte toutes les plus fortes crues observées. Cette méthode n'est pas retenue ;
- Reconstitution de la courbe de tarage de l'Yron à Jarny (La Cartoucherie) par modélisation hydraulique : cette méthode consiste à reconstituer la courbe de tarage en utilisant le modèle hydraulique. Toutefois, si l'influence de l'Orne est avérée, la courbe de tarage ainsi reconstituée ne peut être univoque : la hauteur d'eau à la station de l'Yron à Jarny dépend à la fois du débit de l'Yron et du débit de l'Orne. Cette méthode n'est pas retenue car elle nécessite de reconstituer de nombreuses crues et qu'elle dépend également de l'estimation du débit de l'Orne ;

- Utilisation des résultats du modèle hydrologique : le modèle hydrologique développé pour l'étude des étiages (cf. rapport 20F-085-RP-3) a permis de reconstituer des chroniques de débits journaliers sur la période 1980-2020. Le modèle montre de bonnes performances à la station de Boncourt sur l'Orne pour les débits de crues. Cette méthode est retenue et développée ci-après.

La méthode retenue est ainsi de s'appuyer sur les chroniques de débits journaliers reconstituées par modélisation hydrologique. La Figure 9-2 compare l'échantillon des débits journaliers maximaux annuels (MAXAN) calculés par le modèle hydrologique (GESRES) et l'échantillon issu des données observées de la BANQUE HYDRO.

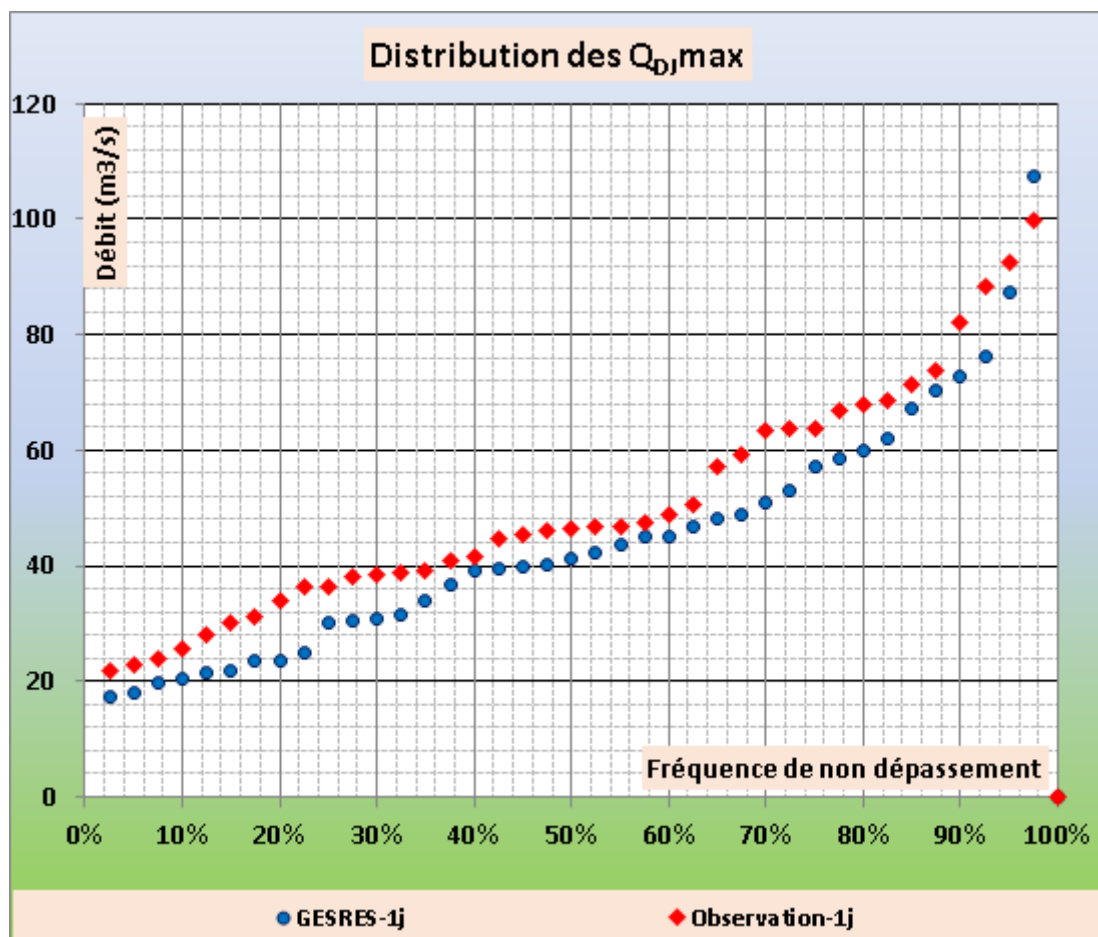


Figure 9-2 : échantillons des débits journaliers maximaux annuels calculés et observés (durée caractéristique D = 1 jour) à la station de Boncourt sur l'Orne.

A la station de Boncourt sur l'Orne, les deux échantillons sont très proches. En appliquant le coefficient de forme de l'hydrogramme, il est possible d'estimer les débits de pointe. Le tableau suivant compare les estimations à Boncourt issues des ajustements statistiques sur les données BANQUE HYDRO et sur les débits reconstitués par le modèle hydrologique :

T	Q BANQUE HYDRO	Q modèle hydrologique
2 ans	55	49
5 ans	75	71
10 ans	89	85

Tableau 9-5 : comparaison des débits de pointe de l'Orne à Boncourt à partir des données BANQUE HYDRO et à partir des données reconstituées par modélisation hydrologique.

Les résultats obtenus à partir du modèle hydrologique sont cohérents sur la station de Boncourt sur l'Orne, légèrement inférieurs.

Compte tenu des caractéristiques physiques similaires entre les deux bassins versants (Orne à Boncourt et Yron à Jarny) et des bonnes performances du modèle hydrologique à Boncourt, les résultats du modèle hydrologique à Jarny sur l'Yron sont utilisés pour estimer les débits de crues de périodes de retour 2 à 10 ans. Le passage au débit de pointe est opéré par application d'un coefficient de forme égal à 1,2.

Les résultats sont donnés dans le Tableau 9-7

9.4 TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL

Les points de calcul sont situés à proximité d'une station hydrométrique hormis le point n°36 à l'exutoire du Longeau.

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. Un ajustement des débits de pointe en fonction de la superficie du bassin versant sur l'Orne donne des valeurs de b variant de 0,77 à 0,79 selon la période de retour considérée. En fait, dans le cas présent, les écarts de superficie de bassin versant entre le point de calcul et la station hydrométrique la plus proche étant généralement faibles, le choix du coefficient b a un impact très limité. La valeur $b=0,78$ est retenue pour la transposition.

Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 9-6 et le Tableau 9-7 :

Période de retour	Orne à Moyeuvre-Grande	Orne à l'exutoire	Orne à Jarny
2 ans	144	157	60
5 ans	197	214	82
10 ans	231	253	95
30 ans	299	326	122
50 ans	334	364	137
100 ans	382	416	157
1000 ans	551	601	231

Tableau 9-6 : débits de crues sur l'Orne – points de calcul.

Le cas du Longeau est un peu particulier dans la mesure où il n'y a pas de station hydrométrique sur le bassin versant. Les débits de référence sont calculés à partir des résultats obtenus à la station de Jarny sur l'Yron.

Période de retour	Woigot	Longeau	Yron
2 ans	18	30	48
5 ans	26	43	68
10 ans	31	51	81
30 ans	40	67	107
50 ans	44	77	123
100 ans	51	92	147
1000 ans	71	148	237

Tableau 9-7 : débits de crues sur les affluents de l'Orne – points de calcul.

9.5 HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE

L'ensemble des points de calcul étant situé au droit ou à proximité d'une station hydrométrique, les hydrogrammes sont construits à partir des hydrogrammes moyens normés aux stations hydrométriques concernées.

Sur le Longeau, les hydrogrammes moyens normés sont construits à partir de simulations de crues par un modèle de transformation pluie-débit au pas de temps horaire (cf. ANNEXE 9).

Les hydrogrammes des crues de références sur le bassin versant de l'Orne sont donnés sur la Figure 9-3. Le temps $t = 0$ pour référence est l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.

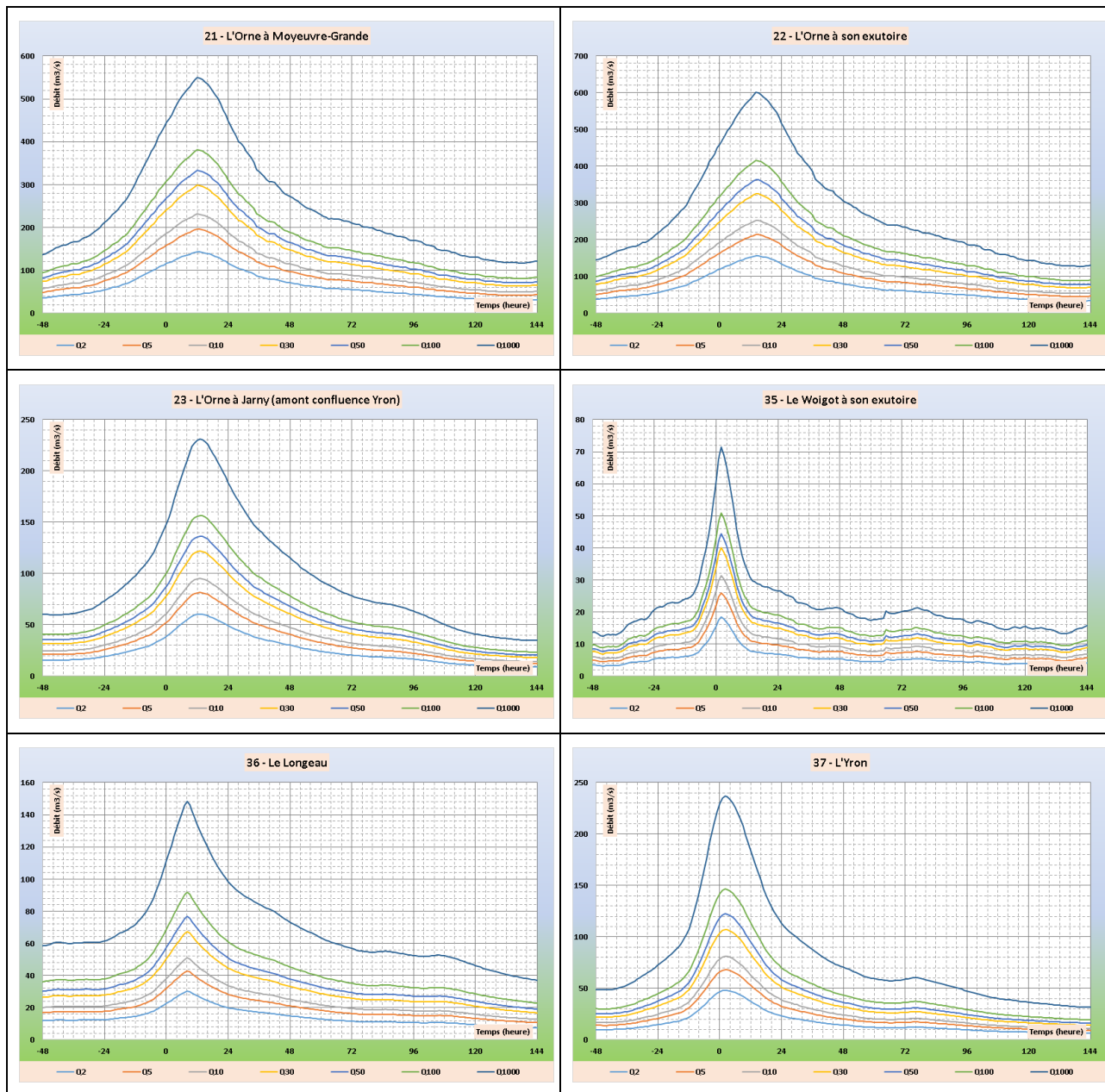


Figure 9-3 : hydrographes des crues de références sur l'Orne et ses affluents.

10 AFFLUENTS DE LA MOSELLE AVAL

Les fiches détaillant les ajustements statistiques et l'approche hydro-météorologique sur les affluents de la Moselle aval sont fournies en ANNEXE 7.

Le détail des calculs et la justification des choix des paramètres retenus pour l'application des méthodes sont présentés en ANNEXE 8.

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.

10.1 POINTS DE CALCUL

Trois points de calcul des débits de crues sont localisés sur les affluents de la Moselle aval :

N°	Point hydrologique	Sous-bassin	Débits de crues	Débits d'étiages
19	Le Rupt de Mad à Arnaville	Moselle aval	X	
30	Le ruisseau d'Esch à Pont-à-Mousson	Moselle aval	X	
38	La Fensch à Knutange	Moselle aval	X	X

Tableau 10-1 : points de calcul des débits de crues sur les affluents de la Moselle aval.

Quatre stations hydrométriques sont disponibles pour l'évaluation des débits de crues en ces six points de calculs :

Code HYDRO	Nom Station	Cours d'eau	Surface BV	Alt	Date Début	Date Fin	Durée	% lacunes
A7122010	L'Esch à Jezainville	L' Esch	231.0	182	07/08/1969	31/05/2020	51	2.2
A7352010	Le Rupt de Mad à Onville	Le Rupt de Mad	358.0	184	18/08/1964	31/05/2020	56	0.0
A8612010	La Fensch à Florange [Maisons Neuves]	La Fensch	82.6	152	01/01/1968	02/07/2002	34	3.1
A8612020	La Fensch à Knutange	La Fensch	28.6	200	01/10/1984	31/05/2020	36	44.9

Tableau 10-2 : stations hydrométriques sur les affluents de la Moselle aval.

Deux stations sont installées sur la Fensch : le point de calcul se situant à Knutange, la station de Florange n'est pas exploitée dans l'analyse hydrologique.

Pour rappel, l'analyse des débits aux stations de l'Orne (cf. ANNEXE 8) a mis en évidence l'absence de fortes crues observées sur son bassin versant depuis la crue de décembre 2001. Cette observation est valable pour les bassins voisins du Rupt de Mad et du ruisseau d'Esch, soit toute la partie Nord-Ouest du bassin versant de la Moselle française (affluents aval de rive gauche).

10.2 RESULTATS AU DROIT DES STATIONS HYDROMETRIQUES

Le Tableau 10-3 présente les débits de crues de référence au droit des stations hydrométriques retenues pour l'analyse. Le Tableau 10-4 rappelle les débits de référence issus de la bibliographie.

Hypothèses	Esch à Jézainville	Rupt-de-Mad à Onville	Fensch à Knutange
Bassin versant	231 km ²	358 km ²	29 km ²
Ajustement statistique	EXP	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}	Moy{GUM ; GEV ; EXP ; GPD}
Méthode retenue	AGREGÉE	AGREGÉE	GRADEX
D	2 j	1 j	1 j
Gradex pluies	10,8 mm/2j	8,1 mm/j	6,9 mm/j
r _D	1,40	1,30	1,20
T _{piv}	20 ans	20 ans	10 ans
Période de retour	Esch à Jézainville	Rupt-de-Mad à Onville	Fensch à Knutange
2 ans	16	41	4,2
5 ans	21	58	5,1
10 ans	25	69	5,6
30 ans	31	87	8,7
50 ans	35	98	10,1
100 ans	43	118	12,1
1000 ans	82	206	18,4

Tableau 10-3 : débits de crues sur les affluents de la Moselle aval.

Période de retour	Esch à Jézainville	Rupt-de-Mad à Onville	Fensch à Knutange
2 ans [1]	18	41	
10 ans [1]	28	88	
100 ans [1]	40	125	
1000 ans [4]			

Tableau 10-4 : débits de référence sur les affluents de la Moselle aval d'après la bibliographie.

Les estimations calculées dans la présente étude sont cohérentes avec les estimations de l'AZI de 2000 pour les périodes de retour jusqu'à 100 ans.

Les seules estimations de la crue millénale sont celles fournies par la base SHYREG-2019 : ces estimations sont supérieures à celles de la présente étude d'environ 30 % sur le ruisseau d'Esch et de l'ordre de 15 % sur le Rupt de Mad.

10.3 TRANSPOSITION AUX POINTS DE CALCUL

Les points de calcul sont situés à proximité d'une 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 le cas présent, les écarts de superficie de bassin versant entre le point de calcul et la station hydrométrique la plus proche étant généralement faibles, le choix du coefficient b a un impact très limité. La valeur $b=0,75$ est retenue pour la transposition.

Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 10-5 :

Période de retour	Rupt de Mad à Arnaville	Esch à Pont-à-Mousson	Fensch à Knutange
2 ans	43	16	4,2
5 ans	61	22	5,1
10 ans	73	26	5,6
30 ans	92	32	8,7
50 ans	103	36	10,1
100 ans	125	44	12,1
1000 ans	218	84	18,4

Tableau 10-5 : débits de crues sur les affluents de la Moselle aval – points de calcul.

10.4 HYDROGRAMMES DES CRUES DE REFERENCE

L'ensemble des points de calcul étant situé au droit ou à proximité d'une station hydrométrique, les hydrogrammes sont construits à partir des hydrogrammes moyens normés aux stations hydrométriques concernées.

Les hydrogrammes des crues de références sur les affluents de la Moselle aval sont donnés sur la Figure 10-1. Le temps a pour référence ($t = 0$) l'heure du pic à Rupt-sur-Moselle.

Concernant la Fensch à Knutange, aucun décalage du pic n'est donné dans la mesure où les crues de la Fensch sont peu concomitantes avec celles de la Moselle aval.

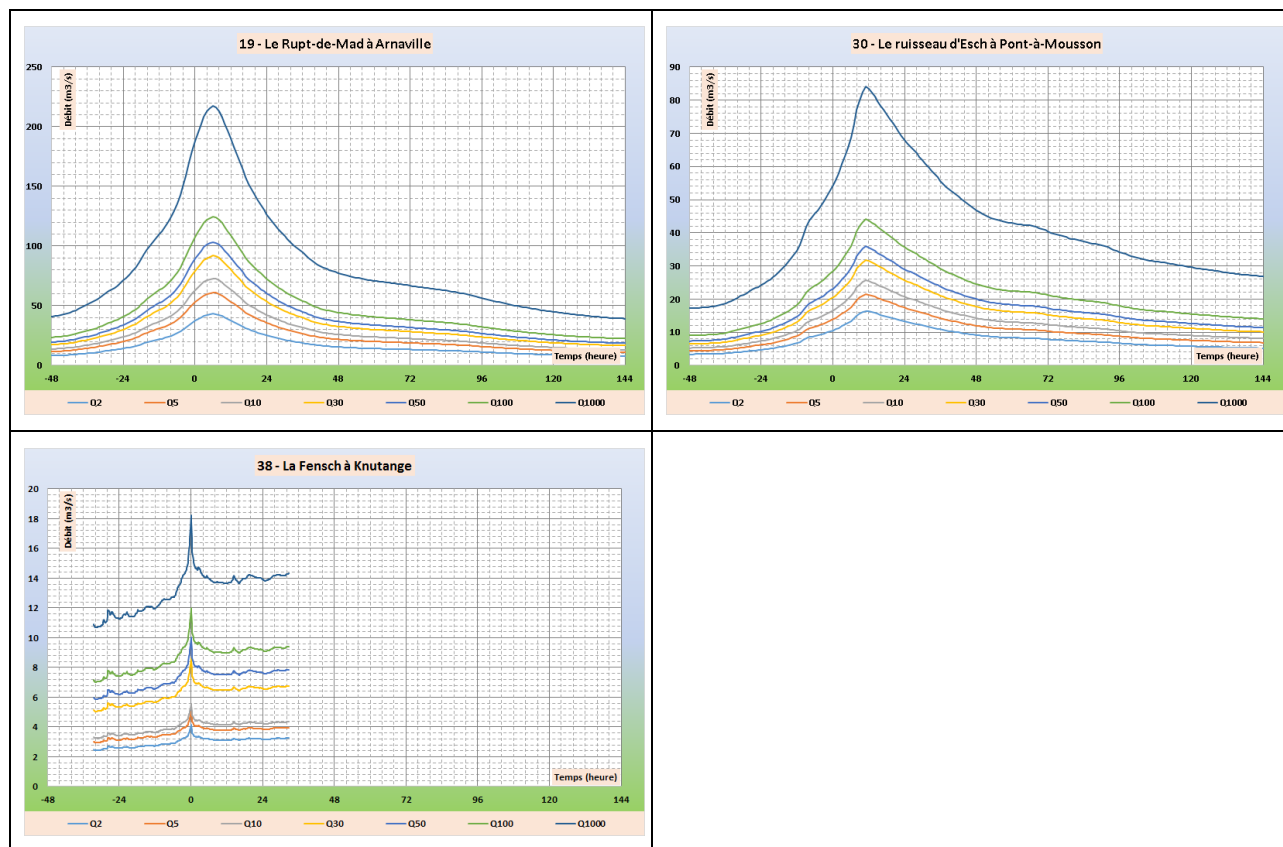


Figure 10-1 : hydrographes des crues de références sur les affluents de la Moselle aval.

11 SYNTHÈSE ET HOMOGENÉITÉ DES RESULTATS

11.1 MOSELLE AMONT ET AFFLUENTS

11.1.1 AFFLUENTS DE LA MOSELLE

11.1.1.1 Comparaison avec les valeurs issues de la bibliographie

Sur les affluents de la Moselle amont, l'estimation des débits de crues aux différents points de calcul repose sur les résultats aux différentes stations hydrométriques. Pour rappel, la station de Zainvillers sur la Moselotte n'est pas prise en compte au regard des doutes sur la courbe de tarage.

Les estimations des débits de crue centennale sont, de manière générale, supérieures aux estimations issues de l'étude hydrologique de l'AZI de la Moselle [1]. Les écarts sont significatifs : de 15 % sur le Madon jusqu'à 26 % sur le Durbion.

Ces écarts importants s'expliquent par la méthodologie employée. Dans le cadre de l'étude AZI de la Moselle [1], l'estimation des débits de crues repose sur les ajustements à une loi de Gumbel des débits réduits observés. Dans la présente étude, des méthodes pluie-débit de type GRADEX sont employées. La figure suivante illustre les cas de la Cleurie et de l'Euron :

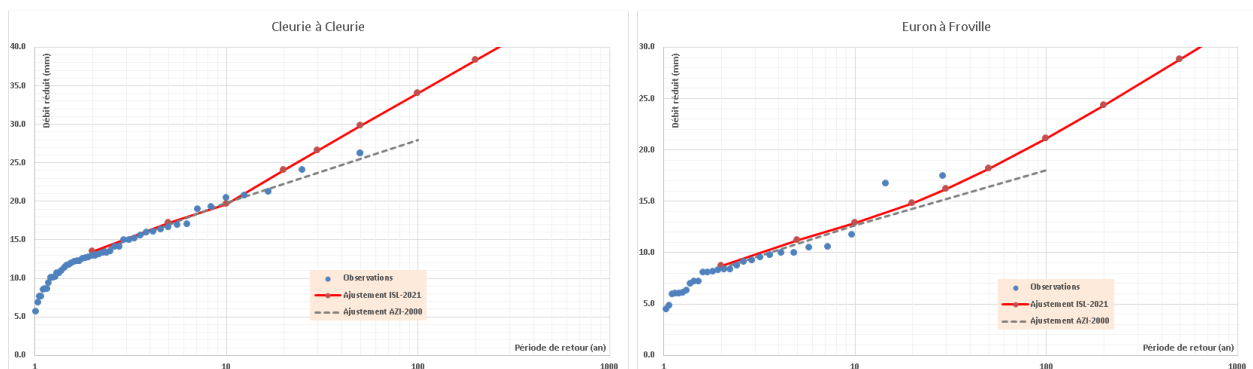


Figure 11-1 : appréciation des écarts entre les méthodologies d'estimation des crues.

La Figure 11-2 synthétise les écarts d'estimations des débits de crue centennale sur les affluents de la Moselle amont.

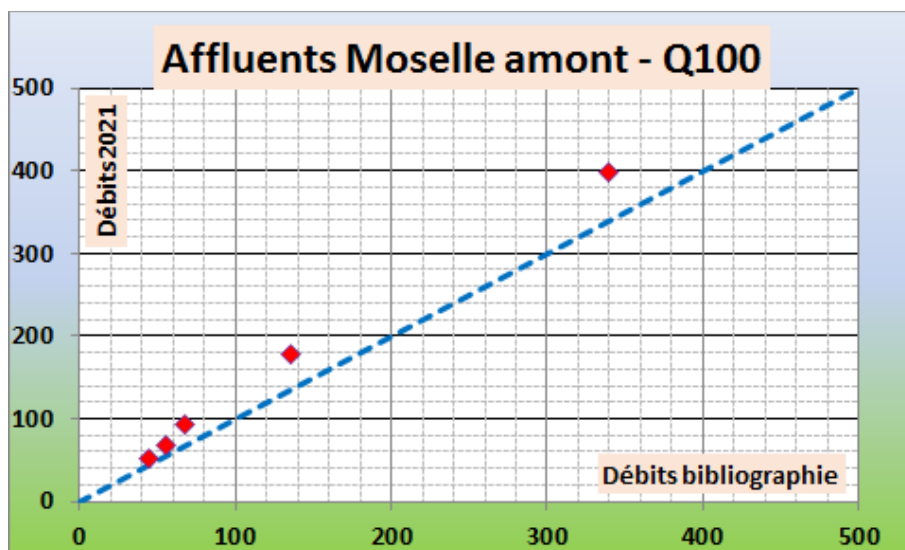


Figure 11-2 : comparaison des estimations de crue centennale – affluents de la Moselle amont.

Pour ce qui concerne le Madon, les débits de crues estimés dans la présente étude sont, d'une part, supérieurs à ceux de l'étude de 2000 [1] et, d'autre part, inférieurs à ceux de l'étude diagnostic portée par l'EPTB Meurthe-Madon [3]. Dans l'étude diagnostic du Madon, la méthodologie employée est très différente de celle mise en œuvre dans la présente étude : il s'agit en effet de reconstitutions des débits de crues à partir d'un modèle hydraulique et par calage sur les laisses de crue. Les deux méthodologies sont très différentes et conduisent, dans le cas du Madon, à des résultats également très différents sans que l'on puisse conclure à ce stade sur la « meilleure » estimation. Au final, ces écarts traduisent toute l'incertitude dans l'estimation des débits de crues sur le Madon.

11.1.1.2 Homogénéité des résultats

L'homogénéité des débits calculés est appréciée en comparant les valeurs de débits de pointe des affluents, exprimés en valeur brute (m^3/s) et en valeur spécifique (l/s/km^2).

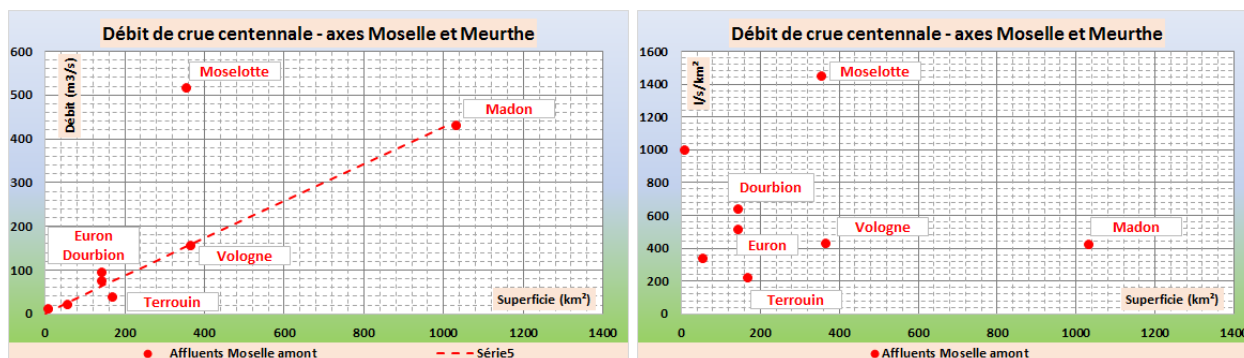


Figure 11-3 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Affluents de la Moselle amont.

Pour les affluents de la Moselle amont, l'homogénéité est plutôt mal vérifiée avec une forte dispersion des valeurs. Cette dispersion est attendue et traduit les comportements très différents des bassins versants entre les bassins amont (comme la Moselotte) fortement arrosés et au caractère montagneux et les bassins aval (le Terrouin par exemple) situés sur des plateaux et beaucoup moins arrosés.

11.1.2 L'AXE MOSELLE AMONT

11.1.2.1 Comparaison avec les valeurs issues de la bibliographie

Sur l'axe Moselle, les estimations de débits de crues reposent sur les estimations aux stations hydrométriques, qui correspondent aux points de calcul.

Sur la partie amont jusqu'à Epinal, les estimations proposées sont proches des valeurs de la bibliographie : pour la crue centennale, les écarts sont au maximum de 8 % à Epinal. Le débit de pointe de crue centennale y est ainsi supérieur de 8 % au débit estimé de la crue de décembre 1947, ce qui demeure un écart acceptable.

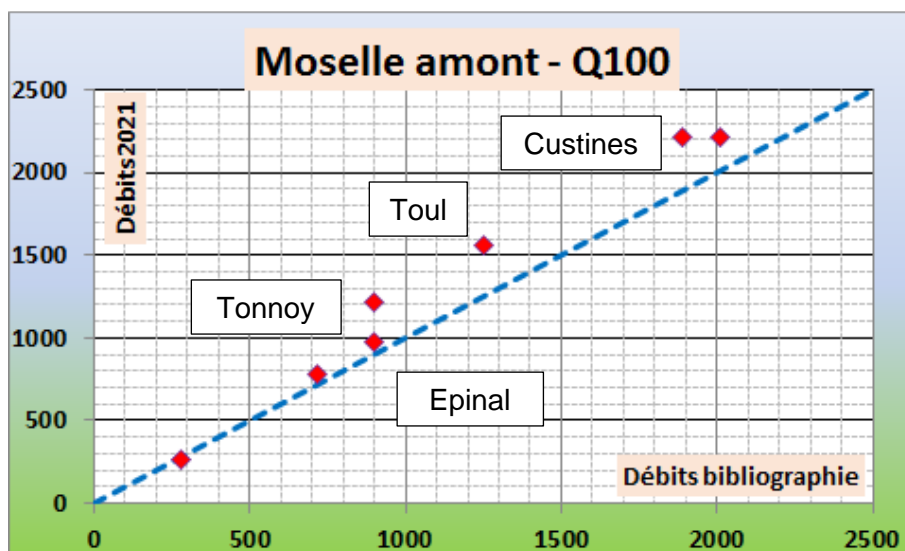


Figure 11-4 : comparaison des estimations de crue centennale – axe Moselle amont.

En aval d'Epinal, sur la partie médiane, les écarts sont plus importants pour la crue centennale :

- Tonnoy : + 25 % pour la crue centennale. Le débit proposé dans l'étude AZI de 2000 est égal au débit à Epinal ce qui explique en grande partie l'écart ;
- Toul : + 17 % pour la crue centennale ;
- Custines : + 9 à + 15 % pour la crue centennale selon la fourchette d'estimation.

Dans le cadre de l'étude AZI de la Moselle de 2000, les débits caractéristiques à Toul sont estimés par ajustement de longues séries de débits de crues, pour la plupart reconstitués sur la base de la courbe de tarage présentée sur la Figure 11-5 :

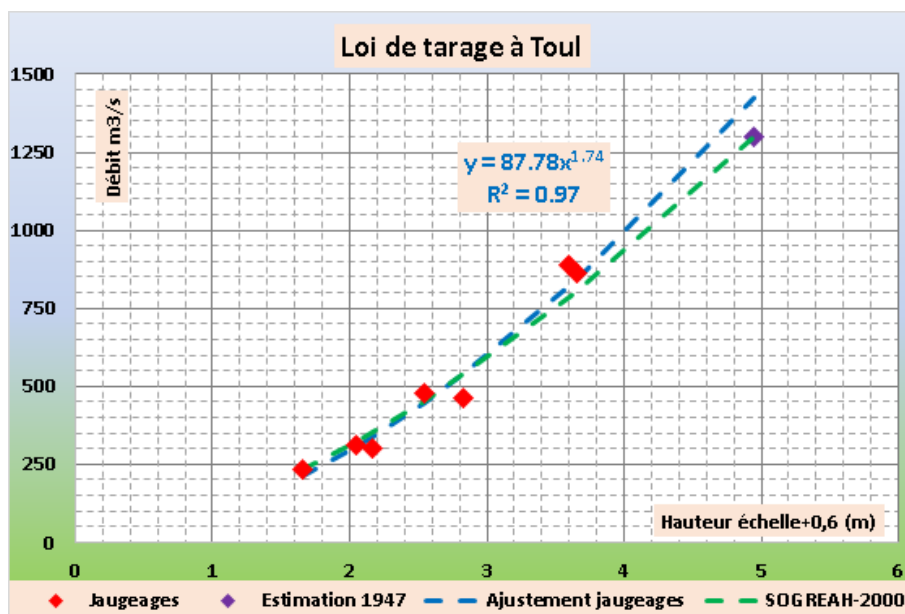


Figure 11-5 : loi de tarage à Toul d'après données de l'étude AZI de 2000.

Les points rouges figurent les jaugeages tandis que le point violet illustre l'estimation du débit de la crue de 1947. La courbe pointillée verte correspond à la courbe de tarage proposée dans l'étude AZI, la courbe pointillée bleue correspond à la courbe de tendance obtenue par un tableur à partir des mêmes données.

La loi de tarage proposée dans l'étude AZI de 2000 amène à estimer le débit de la crue de 1947 à 1 298 m³/s. L'équation retenue est $Q = 104 \cdot (H + 0,6)^{1,58}$, avec H la hauteur mesurée à l'échelle d'annonce de crues.

L'ajustement d'une courbe de tendance avec un tableur sur les mêmes données de jaugeage amène à une équation un peu différente : $Q = 87,78 \cdot (H + 0,6)^{1,74}$, avec H la hauteur mesurée à l'échelle d'annonce de crues. Avec cette formulation, le débit de crue de 1947 est évalué à 1 423 m³/s.

En outre, comme évoqué au 4.3, l'incertitude sur les estimations de débits pour les fortes crues est assez importante compte tenu de la dispersion des valeurs issues des jaugeages. L'incertitude sur l'estimation du débit de la crue de décembre 1947 peut être considérée comme importante, sans doute de l'ordre de ± 150 m³/s en première approximation (correspondant à l'écart entre les deux courbes de tendance).

11.1.2.2 Homogénéité des résultats

L'homogénéité des débits calculés est appréciée en comparant les valeurs de débits de pointe, exprimés en valeur brute (m³/s) et en valeur spécifique (l/s/km²).

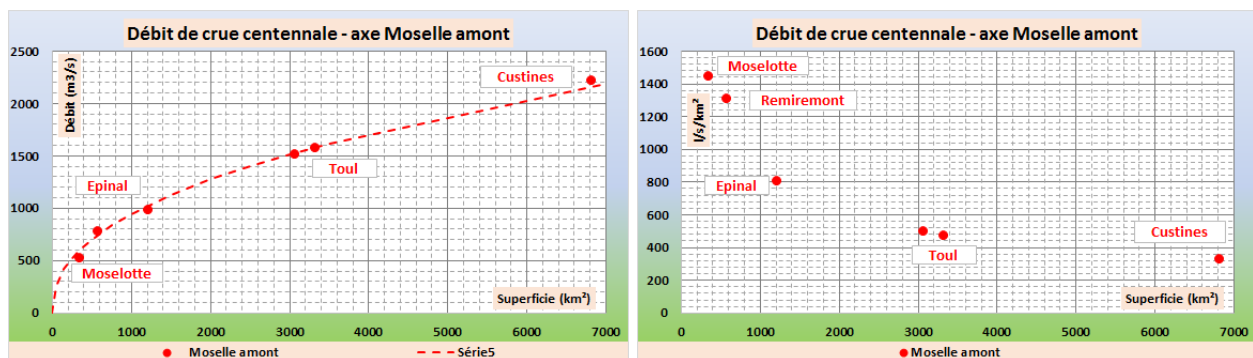


Figure 11-6 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Moselle amont.

L'homogénéité des débits de crue est bien vérifiée le long de l'axe Moselle amont. La valeur de la Moselotte a également été ajoutée sur les graphiques.

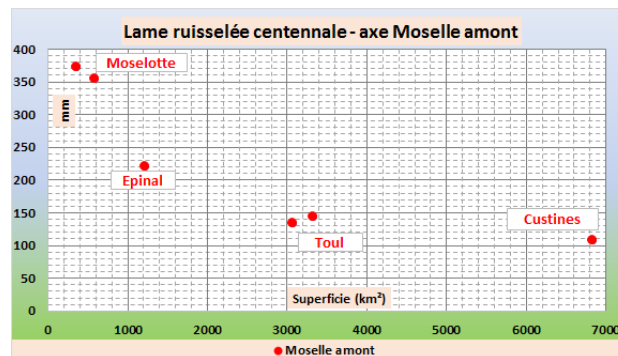


Figure 11-7 : homogénéité sur les volumes de crue Q100 – Moselle amont.

La Figure 11-7 illustre l'homogénéité des volumes de crues, exprimés en lame d'eau équivalente, le long de l'axe Moselle amont. Un écart est noté entre Toul et Pont-Saint-Vincent dû à une forme d'hydrogramme un peu différente. Cet écart n'est toutefois pas significatif.

11.2 MEURTHE ET SES AFFLUENTS

11.2.1 COMPARAISON AVEC LES VALEURS ISSUES DE LA BIBLIOGRAPHIE

Les estimations des débits de crues reposent sur les stations hydrométriques qui équipent le bassin versant.

Les études hydrologiques du PAPI de la Meurthe fournissent les estimations les plus récentes des débits de crues sur le bassin versant de la Meurthe.

Globalement, les estimations de la crue centennale proposées dans la présente étude sont cohérentes avec les estimations des études du PAPI, les écarts étant de $\pm 7\%$ pour la plupart des stations.

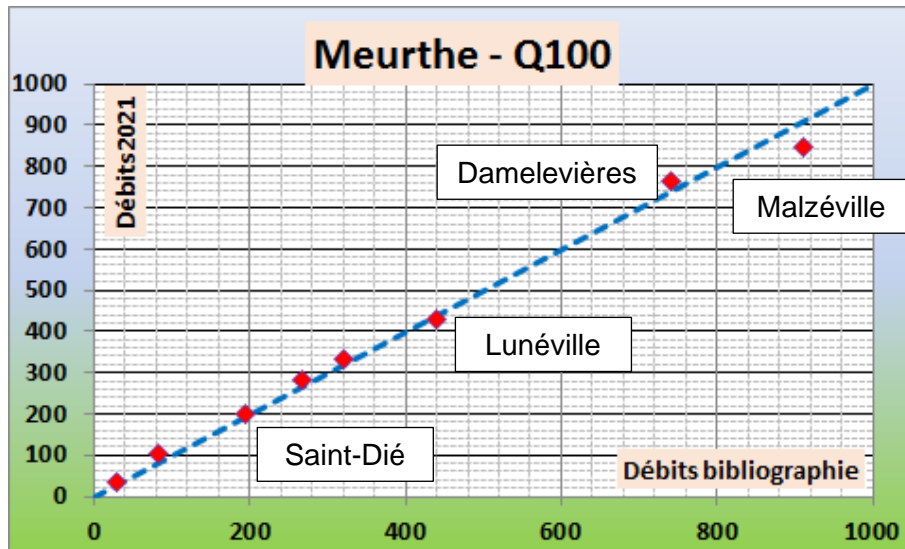


Figure 11-8 : comparaison des estimations de crue centennale – Meurthe et affluents.

Seules les estimations sur le Sânon à Dombasle-sur-Meurthe présentent des écarts importants, de l'ordre de 20 %. Il est à noter que les estimations sur le Sânon n'ont pas été actualisées dans le cadre de l'étude PAPI par rapport aux estimations faites dans le cadre de l'étude des AZI de la Moselle en 2000. La Figure 11-9 illustre les écarts dans les méthodologies d'évaluation des débits de crues : dans le cadre de l'étude des AZI de la Moselle, l'extrapolation aux fréquences rares est assurée par une loi de Gumbel.

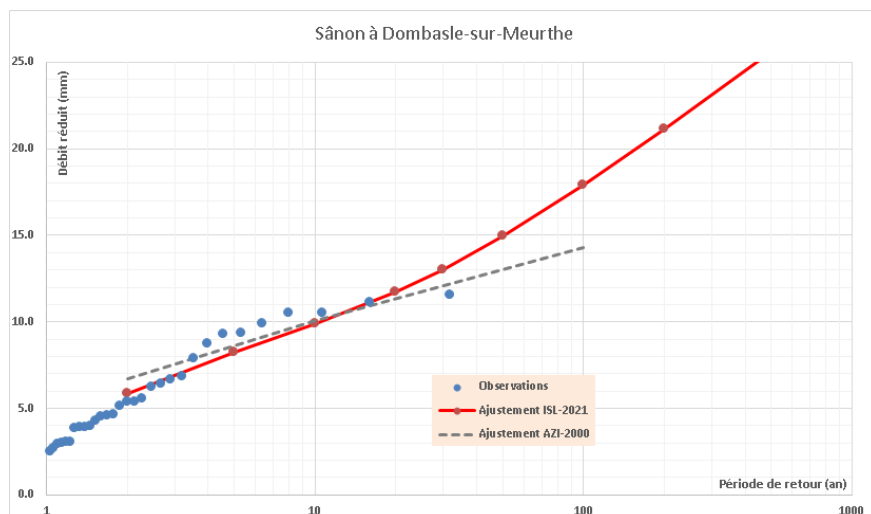


Figure 11-9 : appréciation des écarts entre les méthodologies d'estimation des crues sur le Sânon.

11.2.2 HOMOGENEITE DES RESULTATS

L'homogénéité des débits calculés est appréciée en comparant les valeurs de débits de pointe, exprimés en valeur brute (m^3/s) et en valeur spécifique (l/s/km^2).

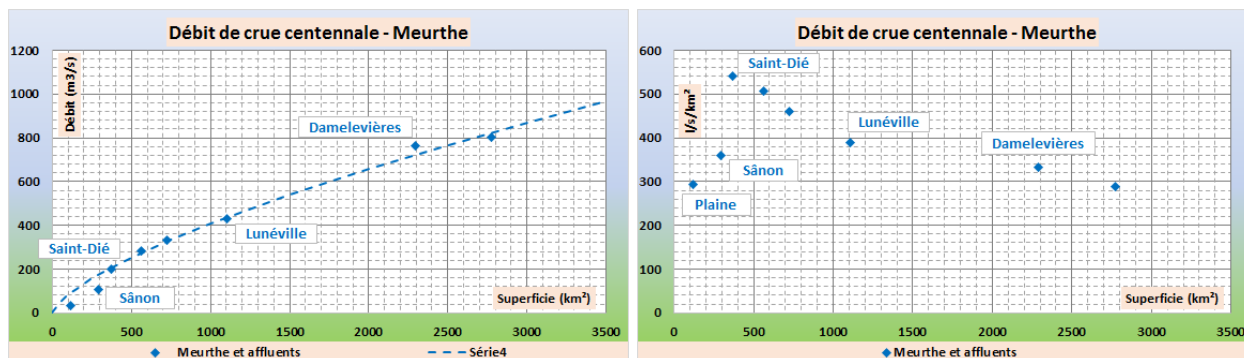


Figure 11-10 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Meurthe.

L'homogénéité des débits de crue est bien vérifiée le long de l'axe Meurthe, y compris la Vezouze. Les valeurs sur la Plaine et le Sânon s'écartent quelque peu. Pour la Plaine, ceci peut s'expliquer par la géologie du bassin versant, entièrement situé sur les grès vosgiens plus perméables. Pour le Sânon, cet écart peut s'expliquer par sa situation très en aval du bassin versant de la Meurthe.

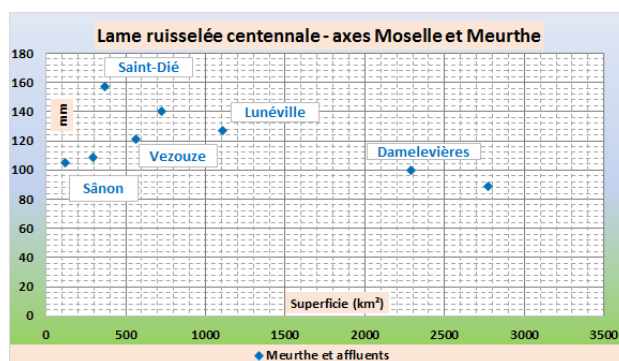


Figure 11-11 : homogénéité sur les volumes de crue Q100 – Meurthe.

La Figure 11-7 illustre l'homogénéité des volumes de crues, exprimés en lame d'eau équivalente, le long de l'axe Meurthe. Les valeurs sur les affluents s'écartent de celles de la Meurthe : ces dernières intègrent tout le volume précipité sur la haute Meurthe tandis que les affluents sont moins arrosés.

11.3 MOSELLE AVAL

11.3.1 AFFLUENTS DE LA MOSELLE AVAL

11.3.1.1 Comparaison avec les valeurs issues de la bibliographie

Sur les affluents de la Moselle aval, l'estimation des débits de crues aux différents points de calcul repose sur les résultats aux différentes stations hydrométriques. Pour rappel, sur l'Orne, les stations ouvertes à partir de la fin des années 1990/début des années 2000 ne sont pas retenues : il s'agit des stations de l'Orne à Etain (ouverture en janvier 1997), l'Yron à Jarny-Droitaumont (janvier 2013), l'Yron à Hannoville-Suzémont (décembre 1998), l'Orne à Jabry (janvier 2007) et l'Orne à Moyeuvre-Grande (décembre 2003).

Sur l'Esch et le Rupt de Mad, les estimations de débits de crue centennale sont cohérentes avec celles réalisées dans le cadre de l'étude des AZI de la Moselle (6-7 % d'écart sur l'estimation du débit de pointe centennal).

Sur la Seille, aux stations de Nomény et Metz, les estimations du débit de crue centennale sont cohérentes avec celles réalisées dans le cadre de l'étude des AZI de la Moselle (4-5 % d'écart sur l'estimation du débit de pointe centennal).

Sur l'Orne, à la station de Rosselange, l'estimation du débit de crue centennale est cohérente avec celle réalisée dans le cadre de l'étude des AZI de la Moselle (3 % d'écart sur l'estimation du débit de pointe centennal).

La Figure 11-12 synthétise les écarts d'estimations des débits de crue centennale sur les affluents de la Moselle aval.

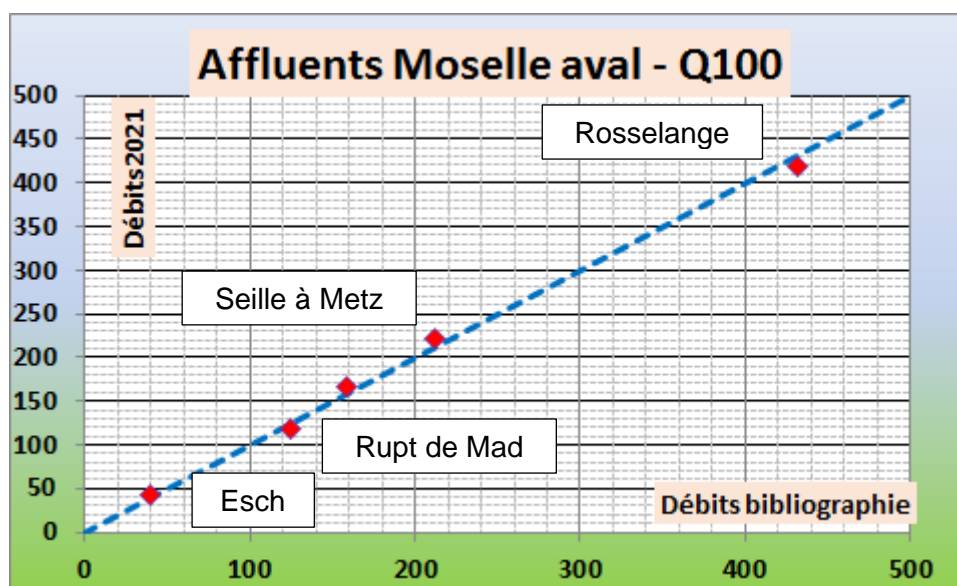


Figure 11-12 : comparaison des estimations de crue centennale – affluents de la Moselle aval.

11.3.1.2 Homogénéité des résultats

L'homogénéité des débits calculés est appréciée en comparant les valeurs de débits de pointe, exprimés en valeur brute (m^3/s) et en valeur spécifique (l/s/km^2).

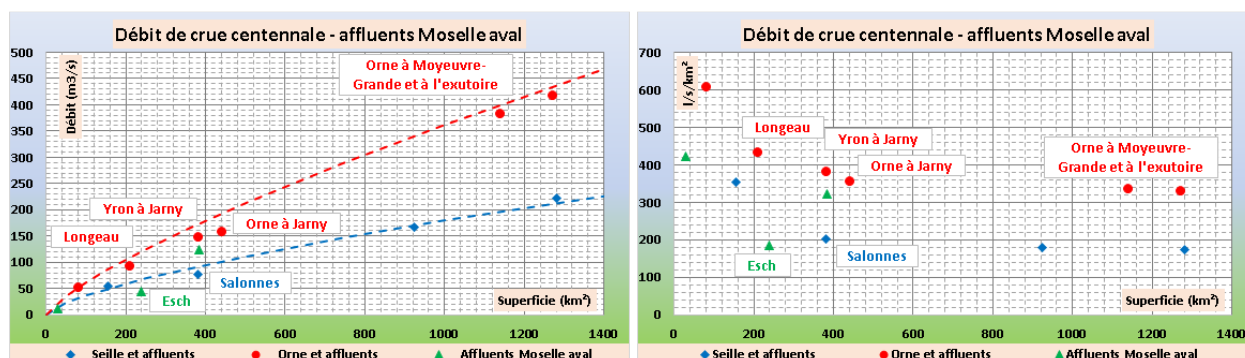


Figure 11-13 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Affluents de la Moselle aval.

Sur les bassins de l'Orne et la Seille, l'homogénéité des débits est globalement bien vérifiée. Les valeurs de débits de pointe sont plus élevées sur l'Orne que sur la Seille ce qui est cohérent avec les observations. A Jarny, les apports de l'Yron et de l'Orne apparaissent cohérents.

Concernant les valeurs sur l'Esch, le Rupt-de-Mad et la Fensch, elles sont globalement intermédiaires entre celles de l'Orne et de la Seille. Les débits spécifiques sur l'Esch sont un peu inférieurs aux autres cours d'eau.

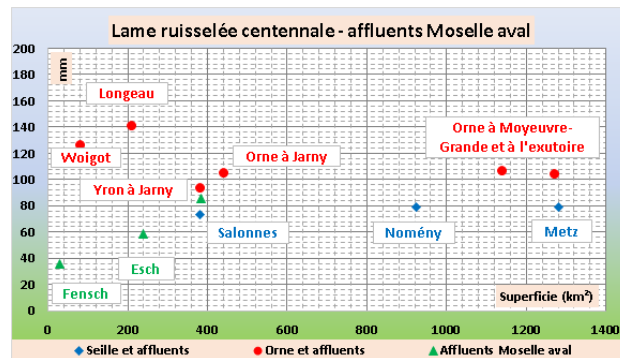


Figure 11-14 : homogenéité sur les volumes de crue Q100 – Affluents de la Moselle aval.

Cette homogenéité se retrouve sur les volumes pour ce qui concerne l'Orne et la Seille. Les lames d'eau sur la Fensch, l'Esch et le Woigot apparaissent plus faibles qu'aux autres stations.

11.3.2 L'AXE MOSELLE AVAL

11.3.2.1 Comparaison avec les valeurs issues de la bibliographie

Le cas de la station de Custines est abordé au paragraphe 11.1.2.

Les estimations de la crue centennale sont cohérentes avec celles réalisées dans le cadre des AZI de la Moselle ($\pm 10\%$ d'écart maximal sur l'estimation du débit de pointe centennal).

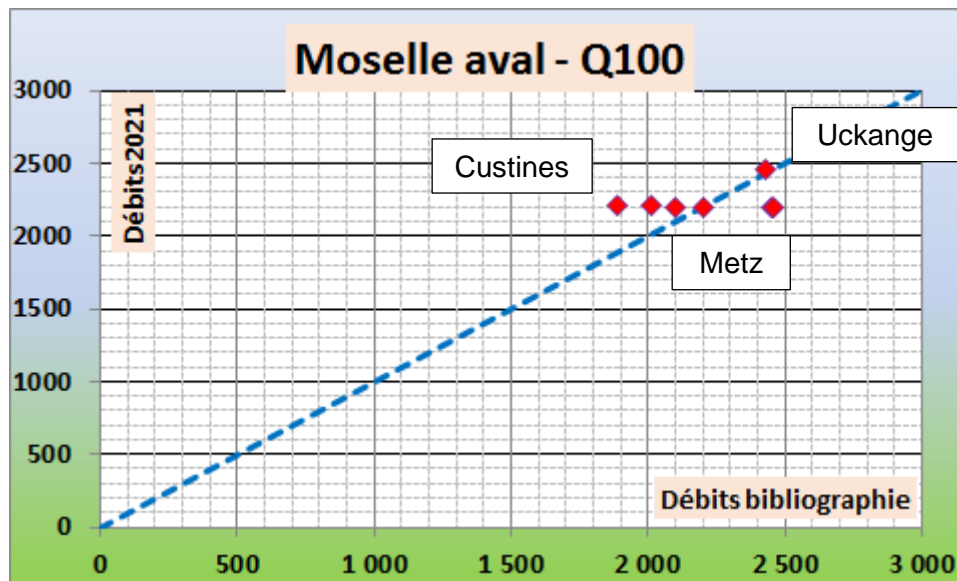


Figure 11-15 : comparaison des estimations de crue centennale – axe Moselle aval.

11.3.2.2 Homogenéité des résultats

L'homogenéité des débits calculés est appréciée en comparant les valeurs de débits de pointe, exprimés en valeur brute (m^3/s) et en valeur spécifique (l/s/km^2).

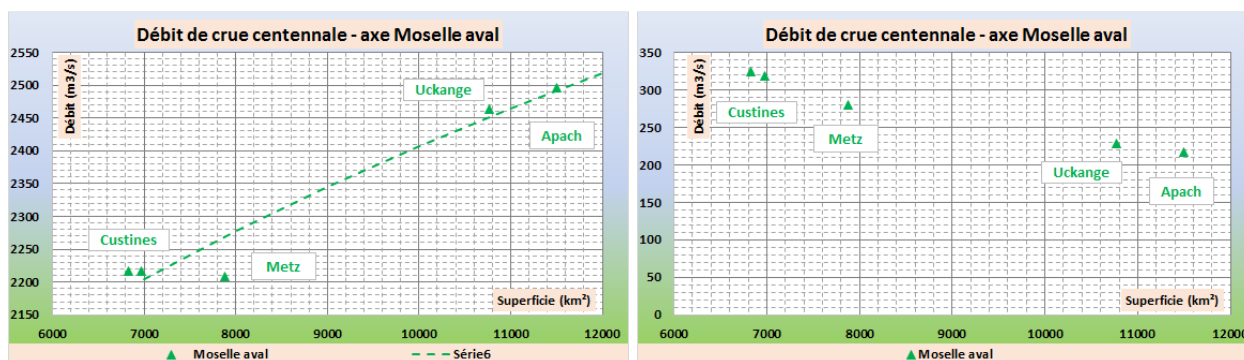


Figure 11-16 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Moselle amont.

L'homogénéité des débits de crue est bien vérifiée le long de l'axe Moselle aval. La valeur de débit de pointe à Metz ressort légèrement plus faible.

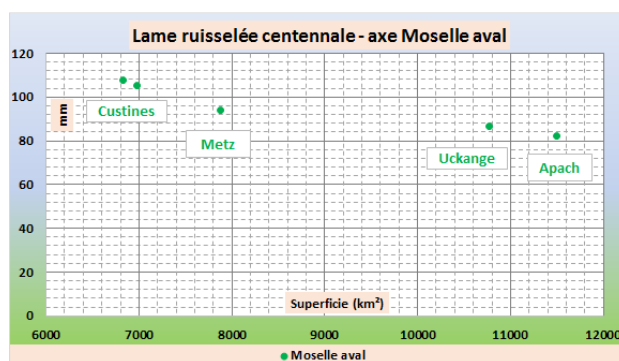


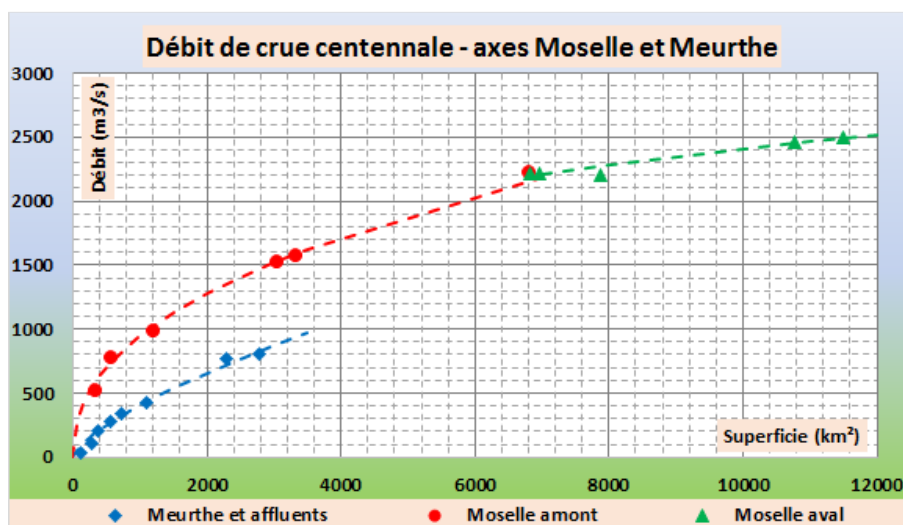
Figure 11-17 : homogénéité sur les volumes de crue Q100 – Moselle aval.

La Figure 11-17 illustre l'homogénéité des volumes de crues, exprimés en lame d'eau équivalente, le long de l'axe Moselle aval.

11.4 COHERENCE D'ENSEMBLE DES RESULTATS

11.4.1 COHERENCE DES DEBITS DE POINTE

La cohérence globale sur les débits est vérifiée le long des deux principaux axes, la Moselle et la Meurthe.



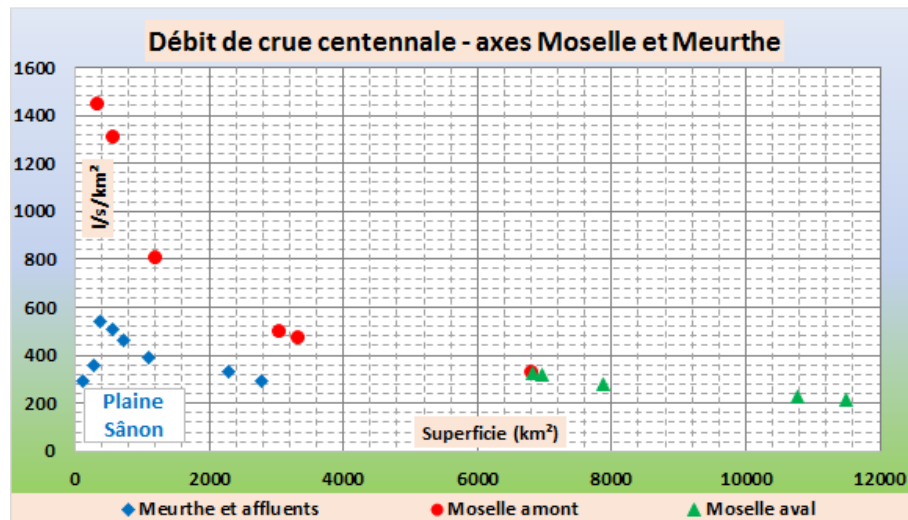


Figure 11-18 : homogénéité sur les débits de crue Q100 – Moselle et Meurthe.

11.4.2 COHERENCE DES VOLUMES DE CRUES

La cohérence globale sur les volumes est vérifiée le long des deux principaux axes, la Moselle et la Meurthe.

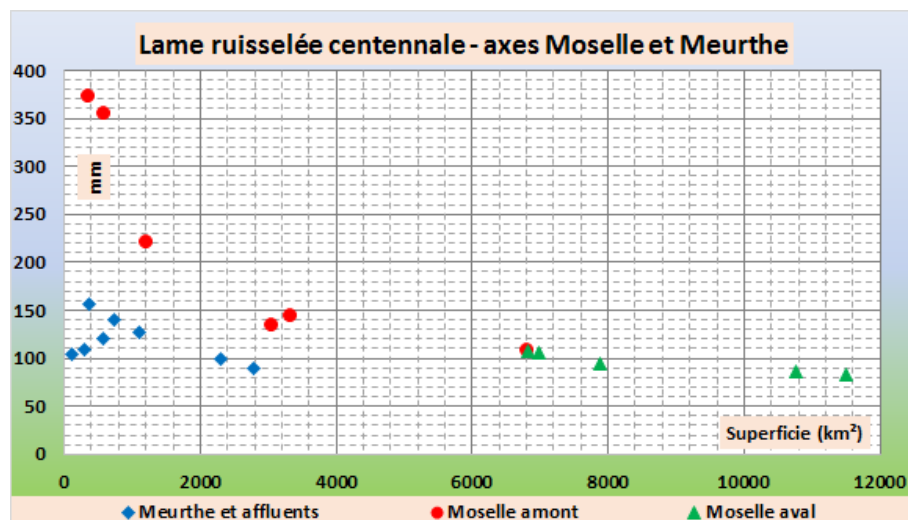


Figure 11-19 : homogénéité sur les volumes de crue Q100 – Moselle et Meurthe.

Les tableaux suivants donnent quelques volumes de crue centennale aux principales confluences :

Confluence Meurthe	Volume hydrogramme
Moselle amont à Toul	479 hm ³
Meurthe à Laneuveville	247 hm ³
Moselle aval à Custines	735 hm ³

Tableau 11-1 : volumes des hydrogrammes à la confluence Meurthe et Moselle.

Le volume de l'hydrogramme de crue centennale à Custines correspond à peu près à la somme des volumes des hydrogrammes de la Moselle et de la Meurthe.

Confluence Orne	Volume hydrogramme
Moselle à Custines	735 hm ³
Esch à l'exutoire	14 hm ³
Rupt de Mad à l'exutoire	33 hm ³
Moselle à Metz	741 hm ³
Seille à l'exutoire	101 hm ³
Orne à l'exutoire	132 hm ³
Moselle à Uckange	934 hm ³

Tableau 11-2 : volumes des hydrogrammes à la confluence Meurthe et Moselle.

Sur la Moselle aval, les volumes aux stations de la Moselle sont légèrement inférieurs à la somme des volumes des hydrogrammes amont avec les affluents : il faut toutefois considérer que la concomitance d'une crue centennale de la Moselle à Custines avec une crue centennale de tous les affluents aval est en soi un événement de période de retour supérieure à 100 ans.

Ceci étant dit, les ordres de grandeurs aux confluences sont plutôt bien respectés (10 % d'écart entre la somme des volumes de Custines avec les affluents aval et le volume à Uckange).

12 BIBLIOGRAPHIE

- [1] SOGREAH, «Atlas des zones inondables de la Moselle et de la Meurthe,» Ministère de l'Environnement - Navigation du Nord-Est, 2000.
- [2] SOGREAH, «Etude de préfiguration du PAPI Meurthe,» DIREN Lorraine, 2008.
- [3] EGIS-SINBIO, «Etude globale de diagnostic, modélisation et propositions d'aménagements du Madon et de ses affluents,» EPTB Meurthe-Madon, 2016.
- [4] CETE Est, «Cartographie de la crue "extrême" pour les TRI de la rivière Moselle,» 2013.
- [5] CETE Est, «Cartographie des crues fréquente, moyenne et extrême du Madon sur le TRI de Pont-Saint-Vincent,» 2013.
- [6] EGIS-SINBIO, «Etude globale de diagnostic, modélisation et propositions d'aménagements de la Meurthe et de ses affluents,» EPTB Meurthe-Madon, 2015.
- [7] M. BOUDOU, «Monographie des inondations de décembre 1947 - janvier 1948,» 2015.
- [8] DIREN, «Etude hydrologique des crues du bassin français de la Moselle sur la période 1970-1991,» DIREN Lorraine, 1994.
- [9] Groupe de Travail International, «Hydrologie des crues de la Moselle et de la Sarre,» 1995.
- [10] CFBR, «Les crues de projet des barrages : méthode du GRADEX,» 18ème congrès CIGB/ICOLD, 1994.
- [11] M. MARGOUM, «Principes du modèle AGREGEE,» Hydologie continentale, volume 9, n°1, 1994.
- [12] G. BONTRON, «Application de la méthode du gradex à des grands bassins versants : cas de la Loire au Bec d'Allier (32 000 km²),» la Houille Blanche, n°6-1999, 1999.
- [13] DREAL-Lorraine, «Cartographie du risque inondation sur le TRI de Metz-Thionville-Pont-à-Mousson - Inondation par débordement de la Moselle,» 2014.
- [14] DREAL-Lorraine, «Cartographie du risque inondation sur le TRI de Nancy-Damelevères et Saint-Dié-Baccarat - Inondation par débordement de la Meurthe,» 2014.
- [15] DREAL-Lorraine, «Cartographie du risque inondation sur le TRI de Pont-Saint-Vincent - Inondation par débordement du Madon,» 2014.
- [16] DREAL-Lorraine, «Cartographie du risque inondation sur le TRI d'Epinal - Inondation par débordement de la Moselle,» 2014.

- [17] Y. AUBERT, «Estimation des valeurs extrêmes de débit par la méthode SHYREG - Réflexions sur l'équifinalité dans la modélisation de la transformation pluie en débit,» UPMC-IRSTEA, 2011.

ANNEXE 1 FICHES STATIONS – MOSELLE AMONT

ANNEXE 2 FICHES STATIONS – AFFLUENTS DE LA MOSELLE AMONT

ANNEXE 3 FICHES STATIONS – MEURTHE ET SES AFFLUENTS

ANNEXE 4 FICHES STATIONS – MOSELLE AVAL

ANNEXE 5 FICHES STATIONS – SEILLE ET SES AFFLUENTS

ANNEXE 6 FICHES STATIONS – ORNE ET SES AFFLUENTS

ANNEXE 7 FICHES STATIONS – AFFLUENTS DE LA MOSELLE AVAL

ANNEXE 8 DETAIL DES CALCULS DE DEBITS

ANNEXE 9 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 et/ou de l'influence d'aménagements (barrages).

Il s'agit en particulier des points de calcul suivants :

- 3 – Terrouin à son exutoire ;
- 6 – Moselotte à son exutoire ;
- 13 – Plaine à son exutoire ;
- 36 – Longeau à son exutoire.

Le cas du ruisseau d'Olima (point 27) est traité à l'ANNEXE 10.

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.

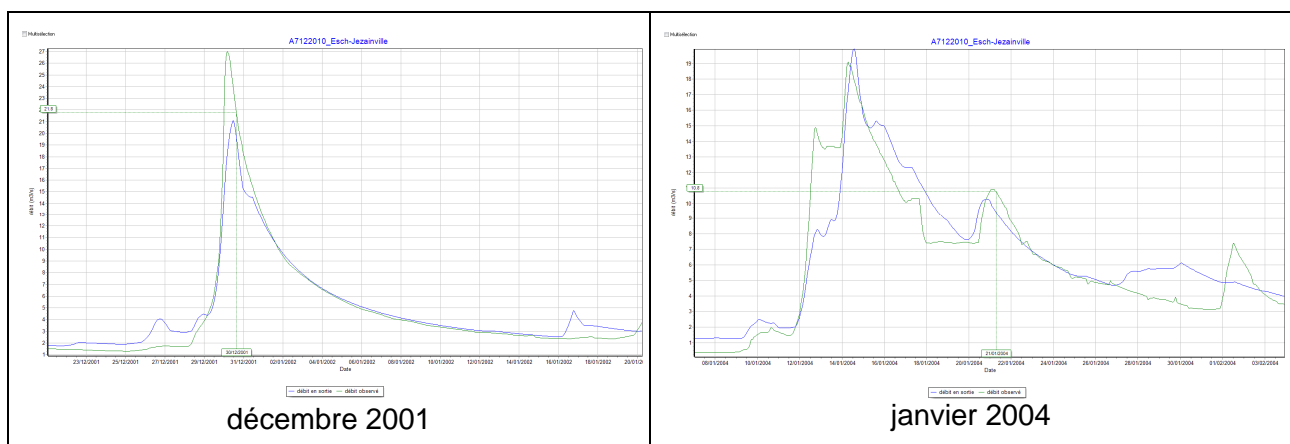
Les pluies horaires de bassin versant sont reconstitués à partir des chroniques journalières (données Météo-France) et des données horaires aux postes de la DREAL. En pratique, les pluies journalières des postes Météo-France sont « distribuées » à un pas de temps horaire à partir des pluies horaires 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).

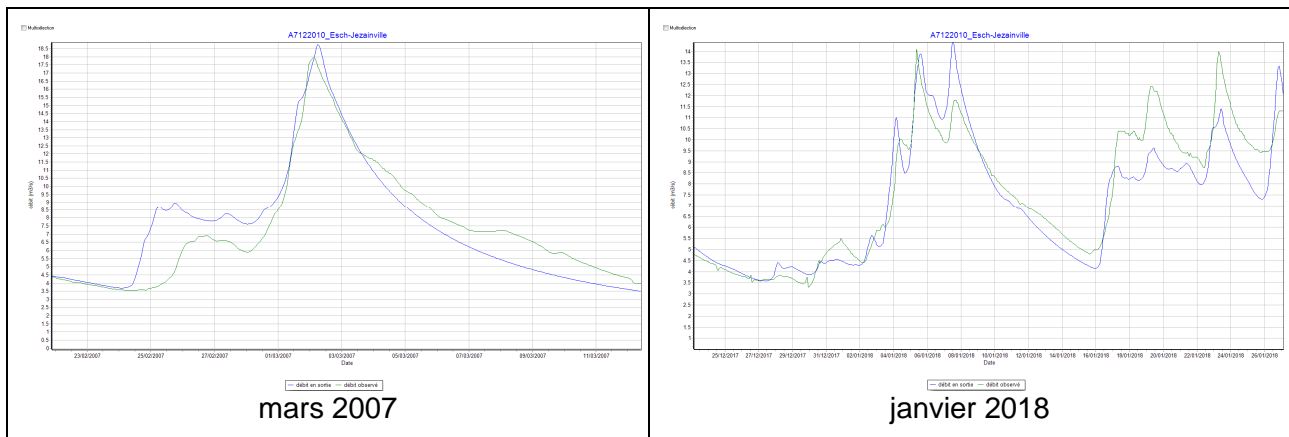
Plusieurs crues historiques sont ainsi reconstituées. A noter que plusieurs grandes crues ne peuvent être reconstituées faute de données horaires : crues d'avril et mai 1983 par exemple.

Reconstitution des hydrogrammes du Terrouin

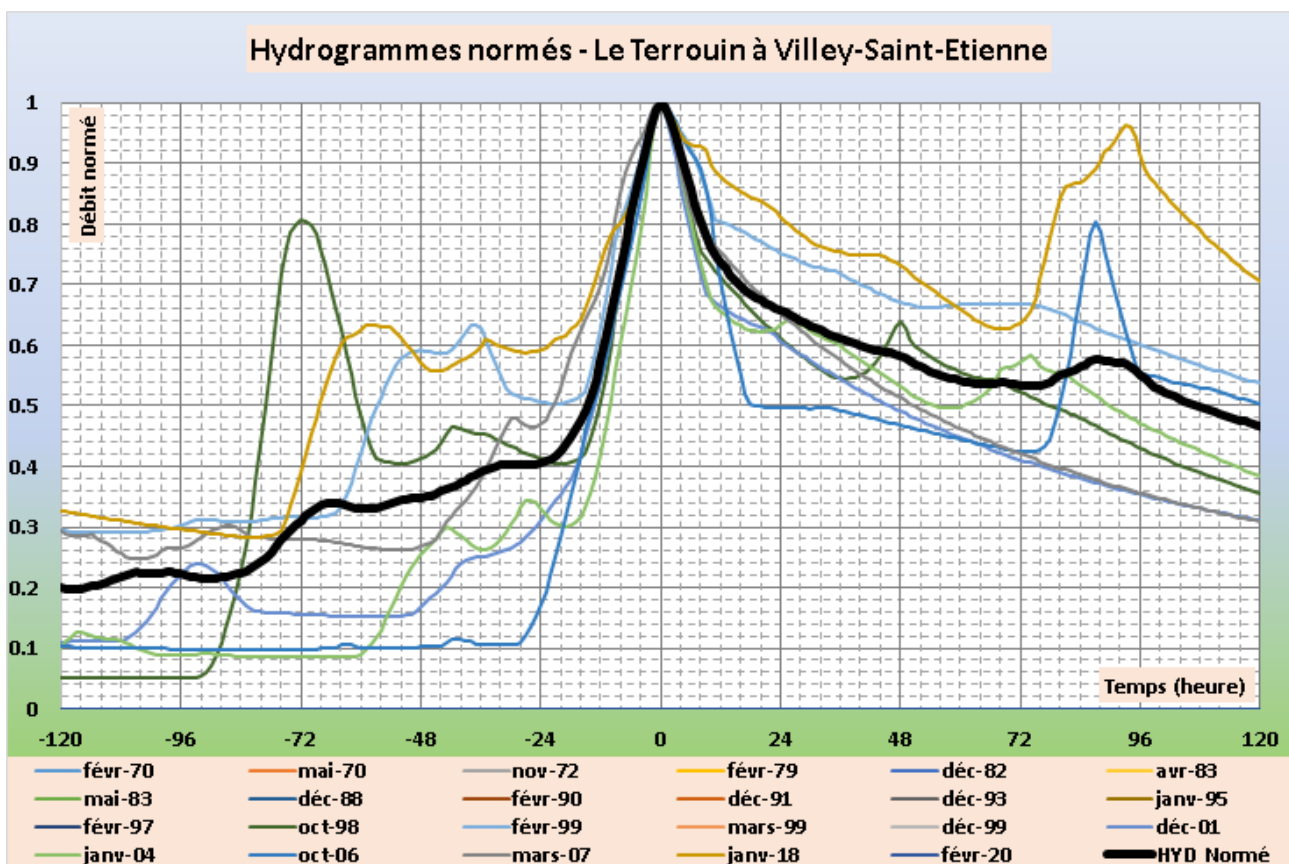
Le calage sur le Terrouin est fait par analogie avec le bassin versant de l'Esch à Jézainville. Les figures suivantes présentent quelques exemples de calage à la station de Jézainville sur l'Esch.

Le calage est satisfaisant pour des crues de différentes intensités.





Les hydrogrammes reconstitués sur le Terrouin sont utilisés pour estimer l'hydrogramme moyen normé. Huit hydrogrammes reconstitués sont ainsi utilisés :

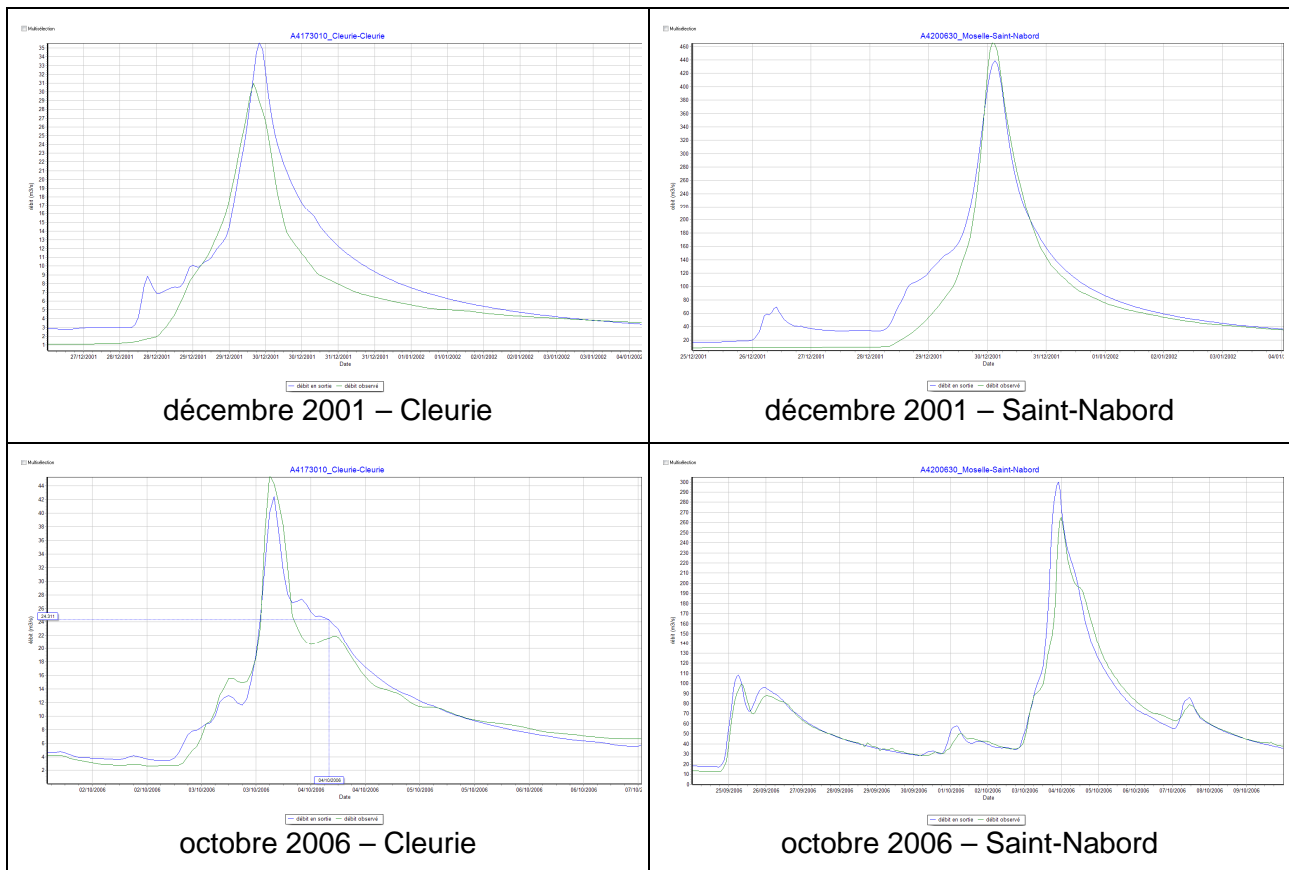


Le modèle hydrologique permet également d'estimer le décalage temporel de la pointe de la crue : il est estimé à 7 heures après la pointe à Rupt-sur-Moselle.

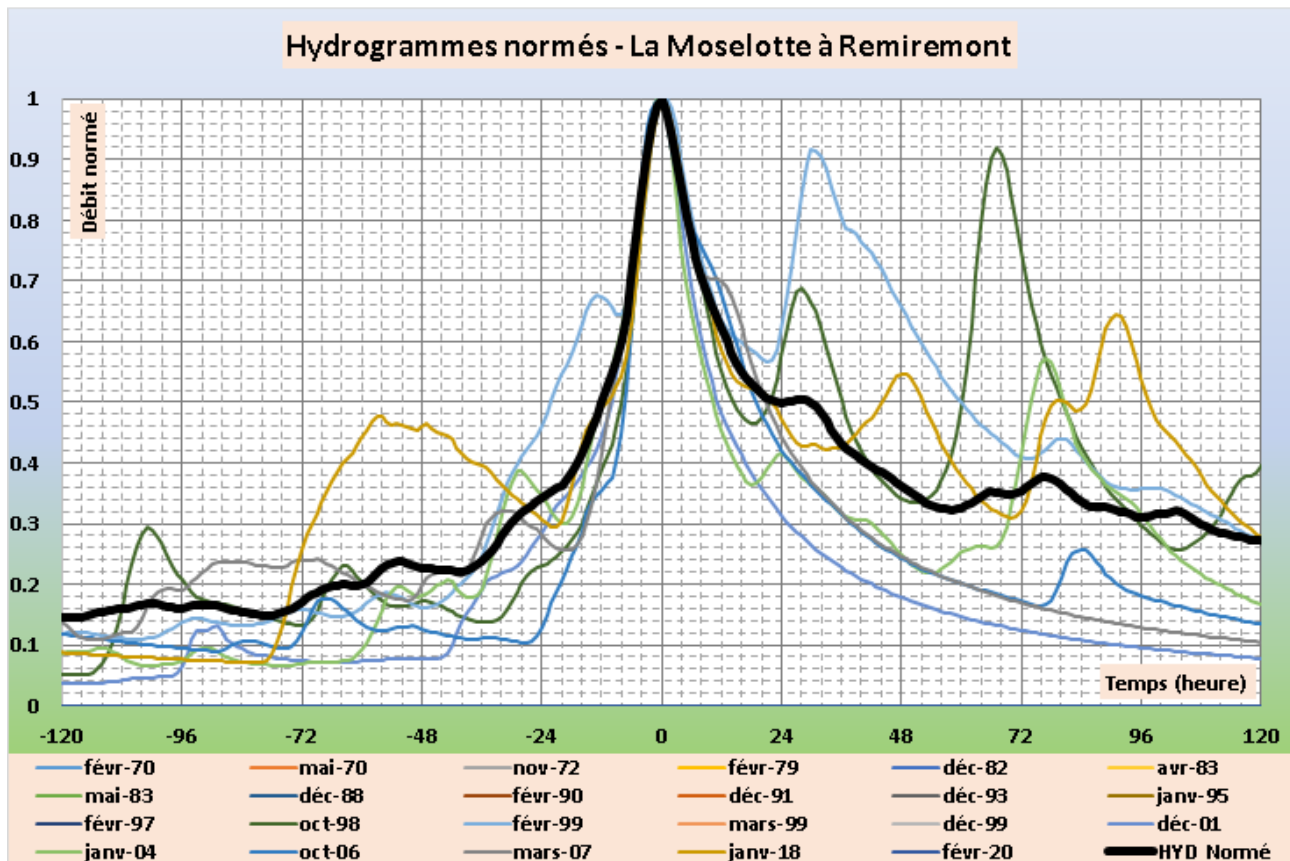
Reconstitution des hydrogrammes de la Moselotte

Le calage sur la Moselotte 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 Cleurie sur la Cleurie et de Saint-Nabord 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 Moselotte à la confluence avec la Moselle à Remiremont sont utilisés pour estimer l'hydrogramme moyen normé. Huit hydrogrammes reconstitués sont ainsi utilisés :

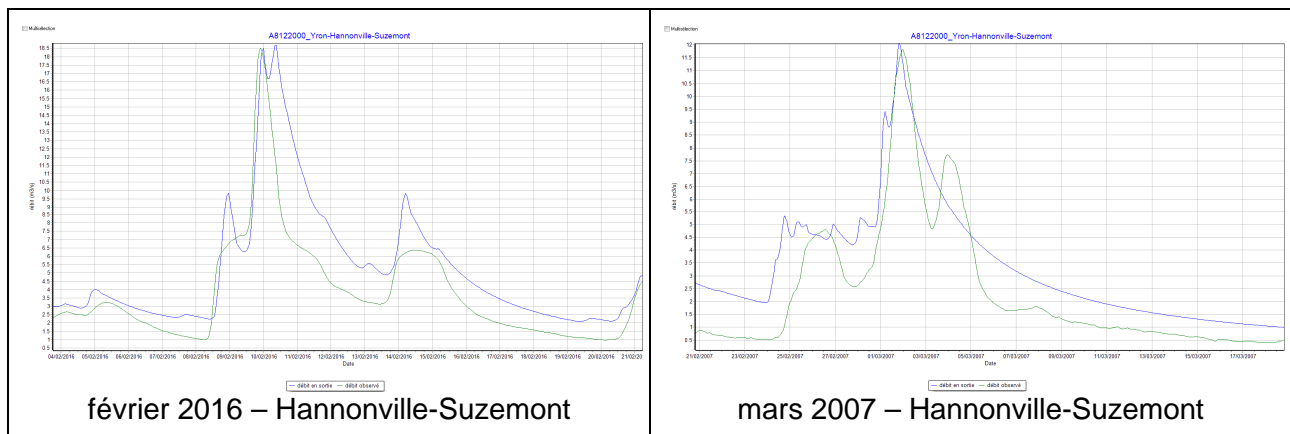


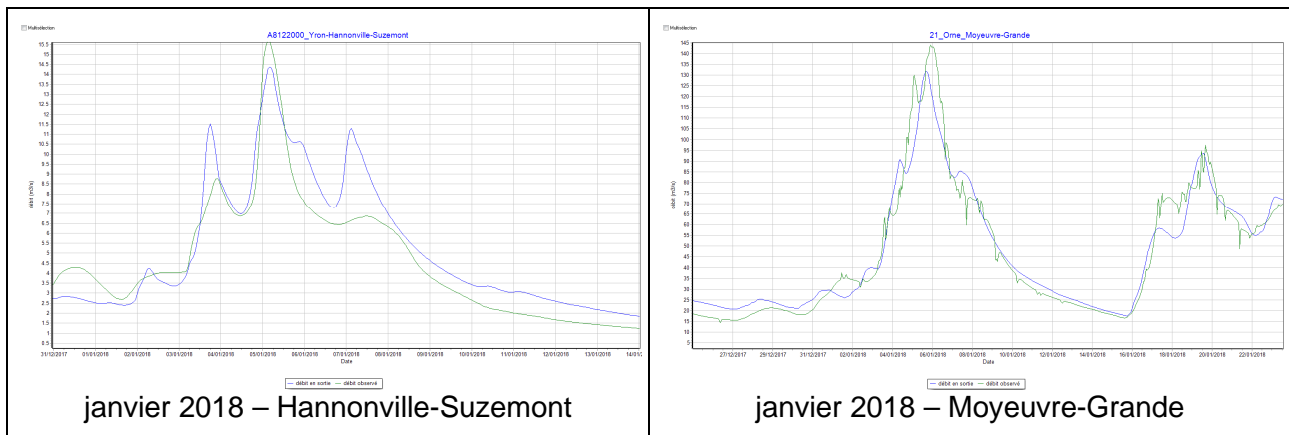
Le modèle hydrologique permet également d'estimer le décalage temporel de la pointe de la crue : il est estimé à 1 heure après la pointe à Rupt-sur-Moselle.

Reconstitution des hydrogrammes du Longeau

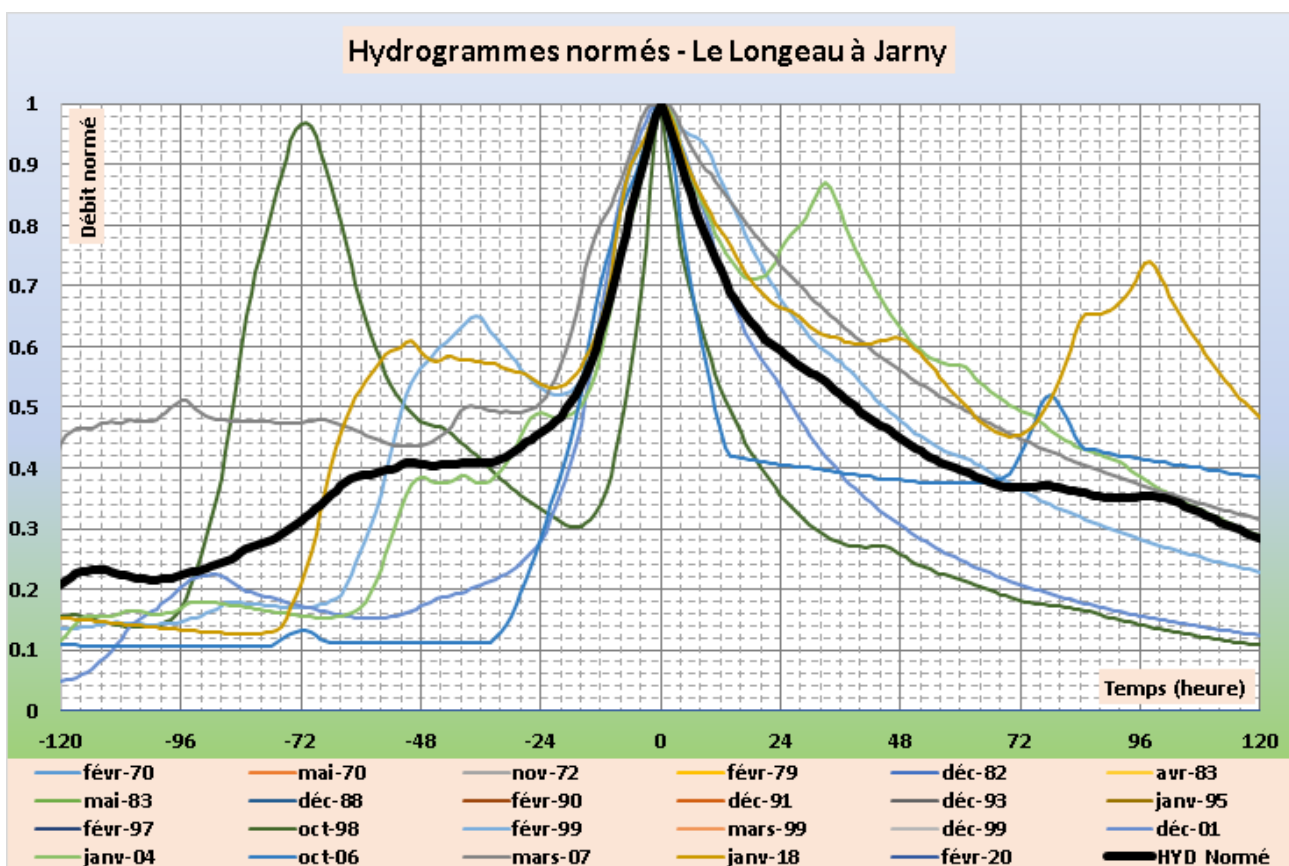
Le calage sur le Longeau est fait par analogie avec le bassin versant de l'Yron à Hannonville-Suzemont. Les figures suivantes présentent quelques exemples de calage à la station d'Hannonville-Suzemont. Le calage est également réalisé sur les stations en aval pour vérifier la cohérence d'ensemble de la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

Le calage est satisfaisant pour des crues de différentes intensités.





Les hydrographes reconstitués sur le Longeau sont utilisés pour estimer l'hydrogramme moyen normé. Huit hydrographes reconstitués sont ainsi utilisés :



Le modèle hydrologique permet également d'estimer le décalage temporel de la pointe de la crue : il est estimé à 8 heures après la pointe à Rupt-sur-Moselle.

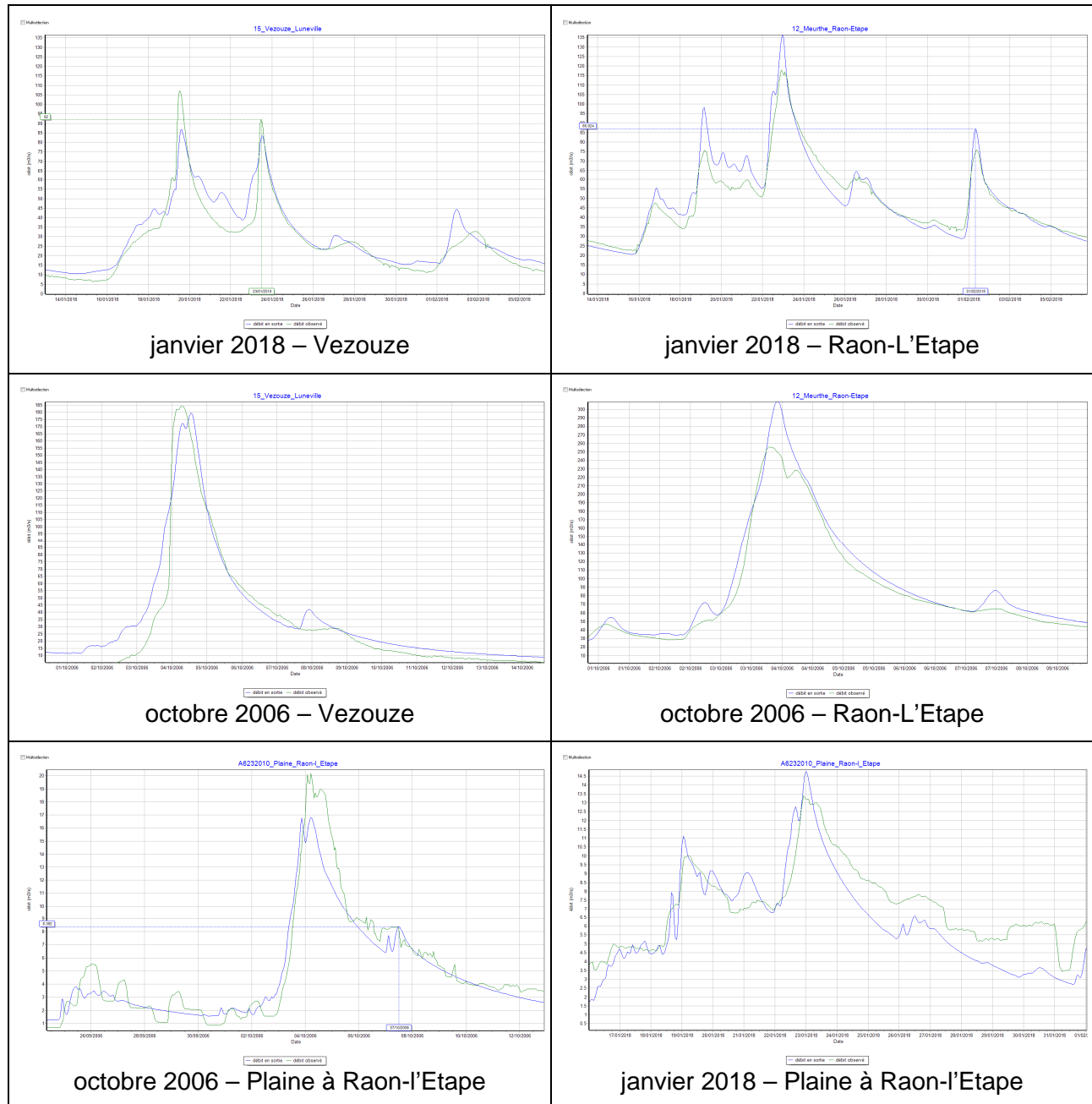
Reconstitution des hydrographes de la Plaine

Le calage sur la Plaine est fait par analogie avec les bassins versants voisins de la Vezouze et de la Meurthe.

Les figures suivantes présentent quelques exemples de calage aux stations de Lunéville sur la Vezouze et de Raon-l'Etape sur la Meurthe.

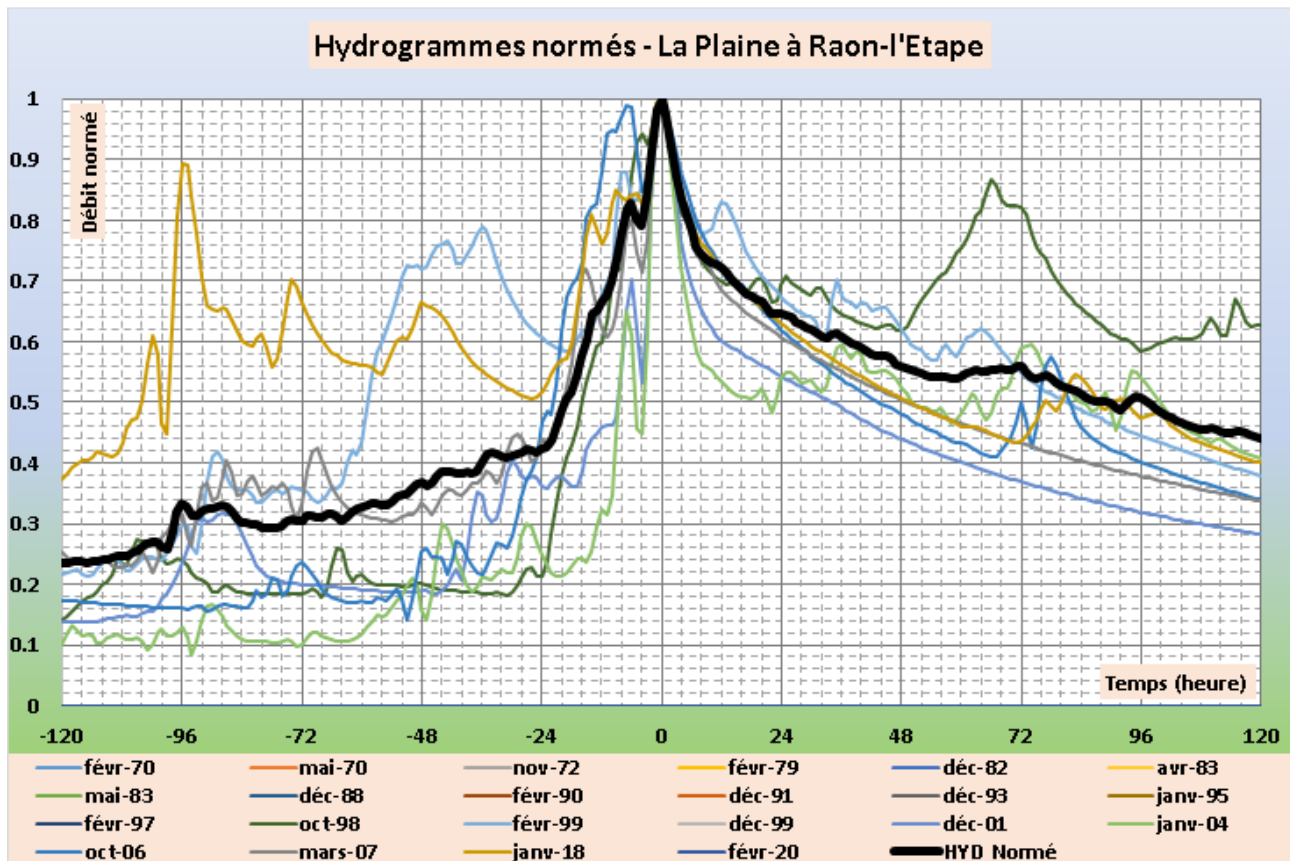
Le modèle de la Plaine est également calé sur les crues d'octobre 2006 et janvier 2018 en simulant les consignes de crues du lac de Celles-sur-Plaine.

Le calage est satisfaisant pour des crues de différentes intensités.



Une fois le modèle calé, les crues sont simulées en « désactivant » l'effet des barrages de Celles-sur-Plaine et de Vieux-Pré afin de reconstituer des hydrogrammes « naturels » de crues.

Les hydrogrammes reconstitués sur la Plaine à la confluence avec la Meurthe à Raon-l'Etape sont utilisés pour estimer l'hydrogramme moyen normé. Huit hydrogrammes reconstitués sont ainsi utilisés :



Le modèle hydrologique permet également d'estimer le décalage temporel de la pointe de la crue : il est estimé à 11 heures après la pointe à Rupt-sur-Moselle.

ANNEXE 10 RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES SUR LE BASSIN VERSANT DU RUISSEAU D'OLIMA

La reconstitution des débits sur le ruisseau d'Olima 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 reposant majoritairement sur des formations de grès des Vosges. Le temps de montée de l'hydrogramme est calculé en fonction du temps de concentration qui est estimé à 2,6 heures.

Une chronique de pluies horaires a été reconstituée à partir des pluies journalières mesurées à la station Météo-France d'Epinal et des pluies horaires mesurées à la station DREAL de Mirecourt. La chronique ainsi reconstituée, s'étend de septembre 1991 à mai 2020.

La simulation permet de reconstituer une chronique de débits horaires du ruisseau d'Olima 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 : une valeur moyenne de 6 heures est retenue.

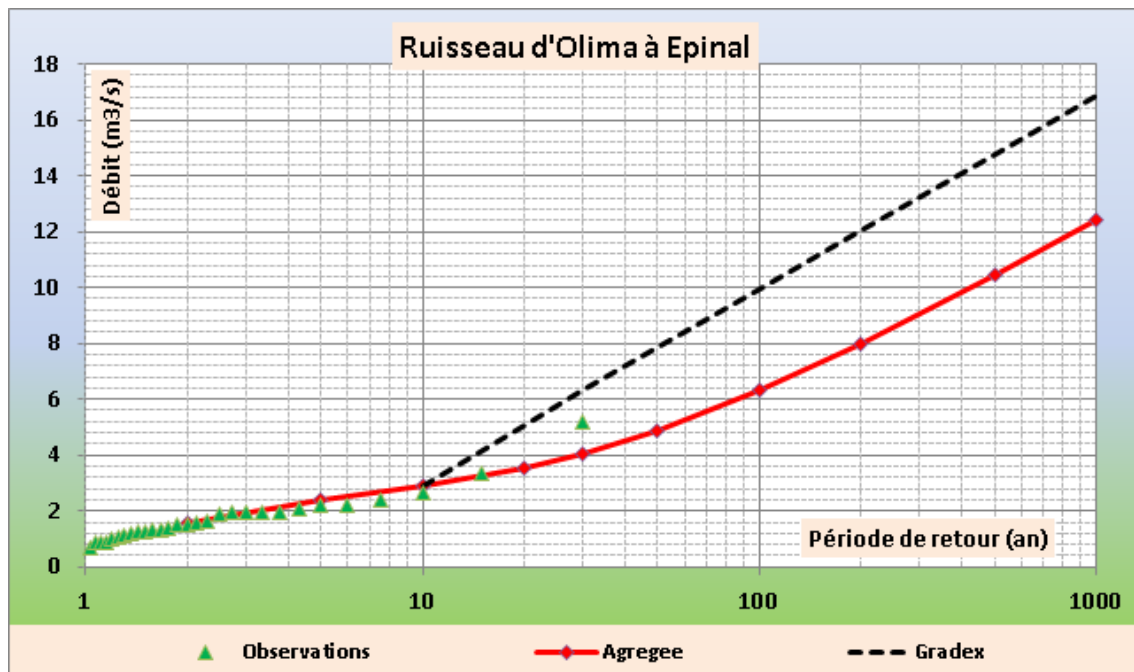
Le gradex des pluies de durée 6 heures est calculé à partir du gradex des pluies de durée 24 heures en utilisant le coefficient de Montana à Epinal ($b=0,65$). La formulation est la suivante :

$$P(6 \text{ heures}) = P(24 \text{ heures}) \cdot \left(\frac{6}{24}\right)^{1-b}$$

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 1,25 à partir des données SHYREG-débit (variable de 1,2 à 1,3 pour les périodes de retour 100 à 1 000 ans), il est supposé constant.

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

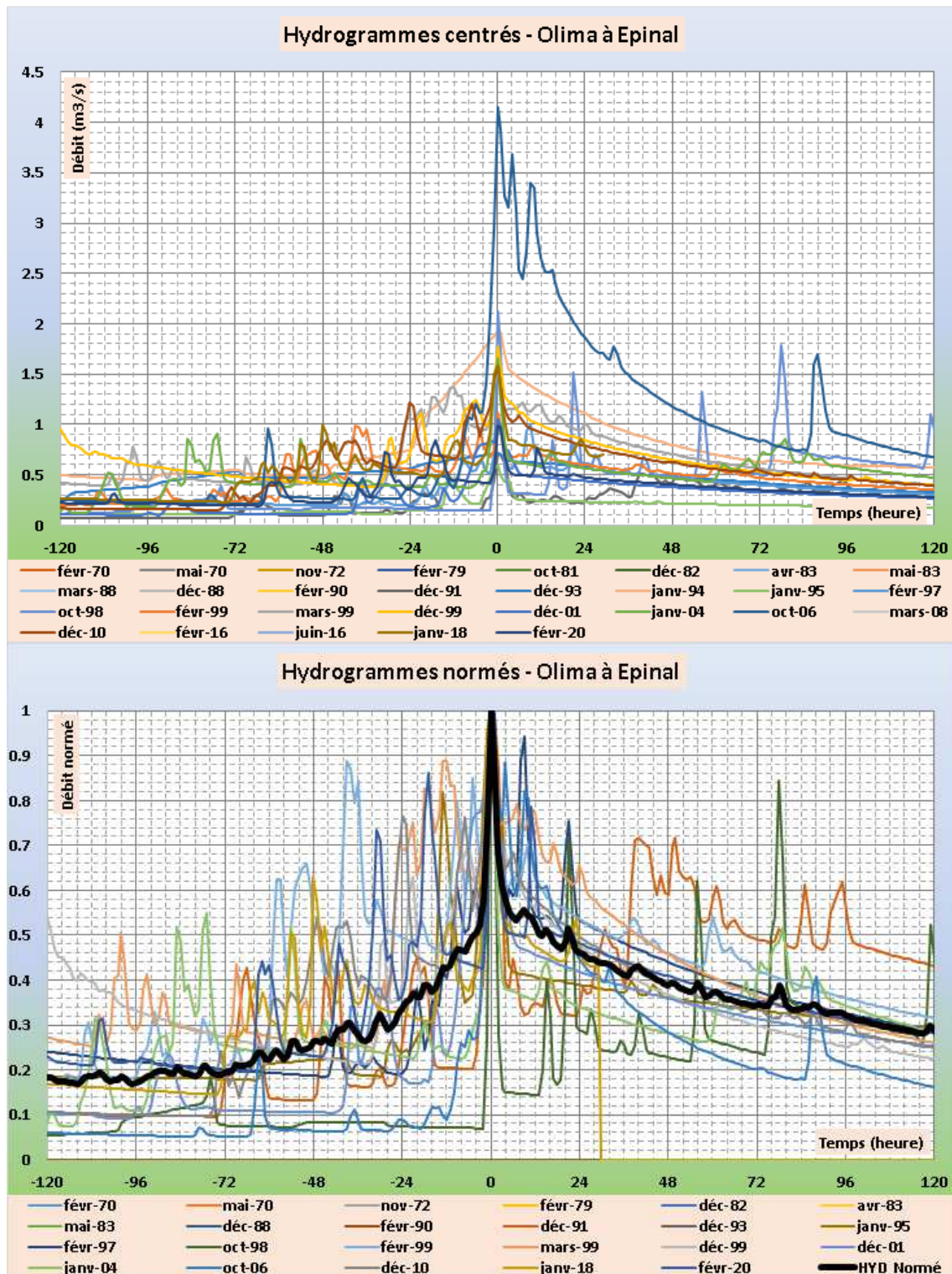
Période de retour (ans)	GRADEX (m ³ /s)	AGREGEE (m ³ /s)
2	1,6	1,6
5	2,4	2,4
10	2,9	2,9
30	6,3	4,1
50	7,8	4,9
100	9,9	6,3
1 000	16,8	12,4



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

A noter que les estimations de la base SHYREG-débit sont très supérieures aux estimations de la méthode GRADEX. Par exemple, les débits spécifiques pour la crue décennale sont de 1,04 m³/s/km², de 2,01 m³/s/km² pour la crue centennale et de 3,53 m³/s/km² pour la crue millénale. Ces valeurs apparaissent particulièrement fortes dans le contexte local même si le tiers aval du bassin versant est très urbanisé.

L'hydrogramme normé obtenu est donné sur les figures suivantes :



La plus forte crue reconstituée sur la période 1991 à 2020 est celle d'octobre 2006.

Le modèle hydrologique permet également d'estimer le décalage temporel de la pointe de la crue : il est estimé à 5 heures avant la pointe à Rupt-sur-Moselle.

ANNEXE 11 ESTIMATION DES INTERVALLES D'INCERTITUDE

Les intervalles d'incertitudes, proposés en synthèse de la présente étude d'évaluation des débits de crues, ont été déterminés par analyse de sensibilité sur les différents paramètres des deux méthodes de type GRADEX.

Deux tests sont réalisés sur cinq paramètres :

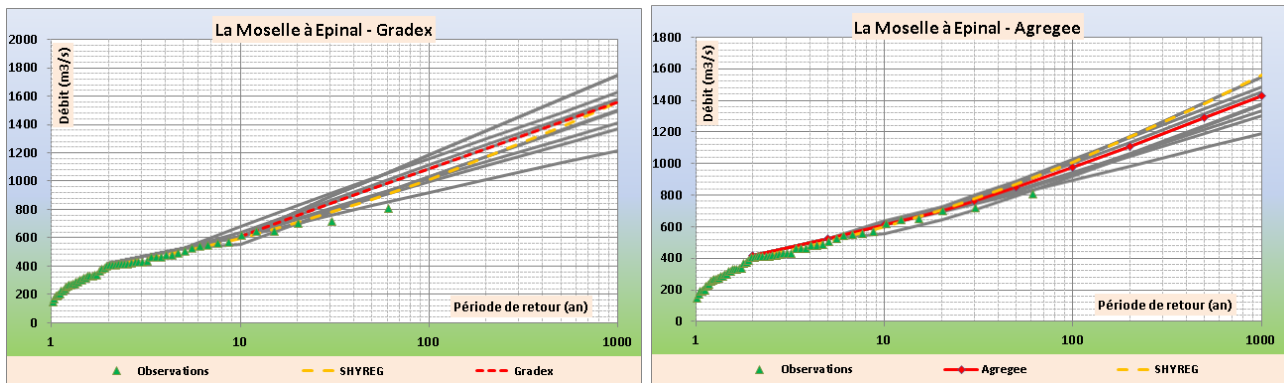
- **Estimation du débit pour la période de retour pivot** : pour ces deux tests, la valeur centrale du débit pivot est remplacée par les deux bornes (inférieure et supérieure) de l'intervalle de confiance à 70 % estimé à partir des ajustements statistiques ;
- **Estimation de la durée** : pour ces deux tests, la durée caractéristique retenue est modifiée à ± 1 jour. Pour les stations dont la durée caractéristique est estimée à 1 jour, il n'y a pas de test avec la valeur inférieure. Les valeurs du gradex des pluies et du coefficient de forme sont modifiées en cohérence avec la durée caractéristique du test ;
- **Estimation du coefficient de forme** : pour ces deux tests, le coefficient de forme est forfaitairement modifié de ± 20 % par rapport à la valeur centrale retenue ;
- **Estimation du gradex des pluies** : pour ces deux tests, la valeur du gradex des pluies est forfaitairement modifié de ± 20 % par rapport à la valeur centrale retenue ;
- **Estimation de la période de retour pivot** : pour ces deux tests, la période de retour pivot est modifiée aux périodes inférieures et supérieures à la valeur centrale retenue.

La figure suivante illustre l'application des différents tests pour la station d'Epinal sur la Moselle.

Analyse de sensibilité sur les paramètres											
Analyse sur P10			Analyse sur durée		Analyse sur r		Analyse sur Gp		Analyse sur T piv		
	Q10min	Q10max				20%		20%			
Gumbel	541.2	623.2									
GEV	553.0	620.0									
Exponentielle	566.5	655.4									
GPD	560.8	641.7									
Valeurs retenues	555.4	635.1									
La Moselle à La Moselle à Épinal											
S	1217	1217	1217	1217	1217	1217	1217	1217	1217	1217	1217
D	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
Gq	113.5	113.5	113.5	113.5	113.5	113.5	113.5	113.5	113.5	113.5	113.5
gp	11.1	11.1	11.1	16.6	11.1	11.1	8.9	13.3	11.1	11.1	11.1
Gp	156.4	156.4	156.4	116.8	156.4	156.4	100.1	187.6	156.4	156.4	156.4
r	1.3	1.3	1.3	1.5	1.0	1.6	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
T piv	10	10	10	10	10	10	10	10	5	20	20
Q10	555	635	611	611	611	611	611	611	526	697	697
upiv	2.25037	2.25037	2.25037	2.25037	2.25037	2.25037	2.25037	2.25037	1.49994	2.97020	2.97020
T	u										
2	0.366512921	418	418	418	418	418	418	418	418	418	418
5	1.499939987	526	526	526	526	526	526	526	526	526	526
10	2.250367327	555	635	611	611	611	611	611	679	611	555
20	2.970195249	702	781	757	735	728	787	705	825	697	679
30	3.384294493	786	866	841	806	795	888	758	888	909	781
50	3.901938658	891	971	947	895	879	1014	826	1014	1015	886
100	4.600149227	1033	1113	1089	1015	993	1184	917	1184	1156	1028
200	5.295812143	1174	1254	1230	1135	1106	1354	1007	1354	1298	1170
500	6.213607264	1361	1441	1416	1293	1255	1578	1126	1578	1484	1356
1000	6.907255071	1502	1582	1557	1413	1368	1747	1217	1747	1625	1497
Enveloppes											
GRADEX											
2	0.366512921	418	418	418	418	418	418	418	418	418	418
5	1.499939987	526	526	526	526	526	526	526	526	526	526
10	2.250367327	555	635	611	611	611	611	611	616	611	555
20	2.970195249	646	725	701	698	697	704	693	704	726	697
30	3.384294493	708	787	763	756	753	771	742	771	797	747
50	3.901938658	794	874	849	833	828	867	806	867	891	821
100	4.600149227	920	1000	976	944	934	1012	895	1012	1025	936
200	5.295812143	1054	1133	1109	1059	1043	1169	984	1169	1162	1062
500	6.213607264	1235	1315	1291	1214	1190	1384	1102	1384	1345	1239
1000	6.907255071	1374	1454	1430	1333	1302	1550	1192	1550	1486	1377
AGREGEE											
2	0.366512921	418	418	418	418	418	418	418	418	418	418
5	1.499939987	526	526	526	526	526	526	526	526	526	526
10	2.250367327	555	635	611	611	611	611	611	616	611	555
20	2.970195249	646	725	701	698	697	704	693	704	726	697
30	3.384294493	708	787	763	756	753	771	742	771	797	747
50	3.901938658	794	874	849	833	828	867	806	867	891	821
100	4.600149227	920	1000	976	944	934	1012	895	1012	1025	936
200	5.295812143	1054	1133	1109	1059	1043	1169	984	1169	1162	1062
500	6.213607264	1235	1315	1291	1214	1190	1384	1102	1384	1345	1239
1000	6.907255071	1374	1454	1430	1333	1302	1550	1192	1550	1486	1377

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.