

PAR COURRIEL

Québec, le 25 février 2022

Objet : Demande d'accès n° 2022-02-034 – Lettre de réponse

Monsieur,

La présente fait suite à votre demande d'accès, reçue le 7 février dernier, concernant « des calculs hydrologique et hydraulique au lac Morin pour la crue 1000 ans (ÉÉS, 2021) ».

Le document suivant est accessible. Il s'agit de :

- Étude d'évaluation de la sécurité – Aménagement Morin 2021, 39 pages

Conformément à l'article 51 de la Loi sur l'accès aux documents des organismes publics et sur la protection des renseignements personnels (RLRQ, chapitre A-2.1), nous vous informons que vous pouvez demander la révision de cette décision auprès de la Commission d'accès à l'information. Vous trouverez, en pièce jointe, une note explicative concernant l'exercice de ce recours.

Pour obtenir des renseignements supplémentaires, vous pouvez communiquer avec M^{me} Katrine Vanessa Girard, analyste responsable de votre dossier, à l'adresse courriel katrine-vanessa.girard@environnement.gouv.qc.ca, en mentionnant le numéro de votre dossier en objet.

Veuillez agréer, Monsieur, l'expression de nos sentiments les meilleurs.

ORIGINAL SIGNÉ PAR

pour Chantale Bourgault, directrice

p. j. 2

c. c. M. Jean-François Langevin, Jean-Francois.Langevin@environnement.gouv.qc.ca

Étude d'évaluation de la sécurité Aménagement Morin

**Barrage Morin (X0000730)
et digue Morin (X0000731)**


2021



ANNEXE 4

ANALYSE HYDRAULIQUE-HYDROLOGIE

Réalisation :


2021-02-15 OIQ 113641

Charles Poirier, ing., M. Sc.
n° OIQ : 113641

2021-02-15

Date

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
2	DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT	1
3	DONNÉES HYDROLOGIQUES	3
4	ANALYSE DES APPORTS RECONSTITUÉS	3
4.1	Analyse des apports reconstitués	3
4.2	Analyses statistiques des crues	5
4.3	Développement des hydrogrammes synthétiques	6
5	LAMINAGE DES CRUES	9
5.1	Gestion du réservoir	9
5.1.1	Capacité d'emmagasinement	10
5.1.2	Capacité d'évacuation	12
5.1.3	Capacités de retenue	13
5.1.4	Laminage des crues	14
6	REVANCHE HYDRAULIQUE	19
7	NIVEAUX REQUIS PAR LES ANALYSES STRUCTURALES ET GÉOTECHNIQUES	22
8	CONCLUSION	23
9	RÉFÉRENCES	23

Liste des tableaux

Tableau 4-1 : Synthèse des ajustements statistiques aux crues	6
Tableau 5-1 : Paramètres d'exploitation au réservoir Morin	9
Tableau 5-2 : Coefficients des courbes d'emmagasinement du réservoir Morin	11
Tableau 5-3 : Capacité d'emmagasinement du réservoir Morin	11
Tableau 5-4 : Caractéristiques des appareils d'évacuation au barrage Morin	12
Tableau 5-5 : Données d'entrée et résultats de calculs de retenue pour l'aménagement Morin	14
Tableau 5-6 : Synthèse des résultats de laminage des crues	17
Tableau 5-7 : Synthèse des résultats de laminage avec un évacuateur inopérant	19
Tableau 6-1 : Impact sur le niveau du réservoir pour deux cas contraignants ciblés	20
Tableau 7-1 : Résumé des caractéristiques hydrauliques	22
Tableau 7-2 : Valeurs de niveaux et hauteur d'eau utilisées pour les analyses de stabilité	22

Liste des figures

Figure 2-1 : Aménagement Morin - Bassin versant	2
---	---

Figure 4-1 : Apports journaliers maximums annuels des crues de printemps et d'été-automne	4
Figure 4-2 : Volume d'apports des crues annuelles de printemps et d'été-automne	5
Figure 4-3 : Hydrogramme synthétique printanier 1 : 10 000 ans (apports journaliers et volume cumulé sur 76 jours) et hydrogramme de référence (1983)	7
Figure 4-4 : Hydrogramme synthétique d'été-automne 1 : 10 000 ans (apports journaliers et volume cumulé sur 7 jours), hydrogramme de référence (1981)	8
Figure 5-1 : Courbe d'emménagement du réservoir Morin	10
Figure 5-2 : Courbes d'évacuation du barrage Morin	13
Figure 5-3 : Laminage de la crue printanière 1 : 10 000 ans	15
Figure 5-4 : Laminage de la crue d'été-automne 1 : 10 000 ans	16
Figure 5-5 : Crue d'été-automne 1 : 10 000 ans avec certains évacuateurs inopérants	18

Liste des annexes

Figure A- 1 : Ajustement statistique des maxima d'apports journaliers printaniers	25
Figure A- 2 : Ajustement statistique des maxima d'apports journaliers d'été-automne	25
Figure A- 3 : Ajustement statistique des maxima de volumes 76 jours printaniers	26
Figure A- 4 : Ajustement statistique des maxima de volumes 7 jours d'été-automne	26
Figure A- 5 : Hydrogramme synthétique printanier 1 : 100 ans	27
Figure A- 6 : Hydrogramme synthétique printanier 1 : 1 000 ans	27
Figure A- 7 : Laminage de la crue printanière 100 ans	28
Figure A- 8 : Laminage de la crue printanière 1 000 ans	29
Figure A- 9 : Hydrogramme synthétique d'été-automne 1 : 100 ans	30
Figure A- 10 : Hydrogramme synthétique d'été-automne 1 : 1 000 ans	30
Figure A- 11 : Laminage de la crue d'été-automne 100 ans	31
Figure A- 12 : Laminage de la crue d'été-automne 1 000 ans	32

1 INTRODUCTION

Le présent rapport sectoriel a été réalisé à l'occasion de la seconde étude d'évaluation de la sécurité (ÉÉS) de l'aménagement Morin, constitué du barrage et de la digue Morin, respectivement inscrits au Répertoire des barrages du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) sous les numéros X0000730 et X0000731. Il vise notamment à répondre aux exigences de l'article 48 du Règlement sur la sécurité des barrages (chapitre S-3.1.01, r.1) concernant « *la vérification des critères de conception, soit les données, hypothèses et méthodes d'analyse considérées lors de la conception du barrage et portant notamment sur l'hydrologie, l'hydraulique, (...), la capacité d'évacuation et le laminage des crues* ». Les trois points suivants y sont présentés :

- La caractérisation de la crue de sécurité;
- La vérification de la capacité d'évacuation;
- Le laminage des crues.

Une première étude d'évaluation a été réalisée en 2006 par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ, 2006).

2 DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT

Le barrage et la digue Morin sont situés à la sortie du lac Morin. La superficie du bassin versant à l'amont du barrage est de 261 km² tel que présenté à la figure 2-1. Le lac Morin possède une superficie de 6,1 km² et la superficie des lacs et marécages présents sur le bassin versant représente environ 14 % de sa superficie totale. L'occupation du territoire du bassin versant est en majeure partie forestière. Le lac Morin est alimenté par la rivière Fourchue et y déverse également ses eaux. La rivière Fourchue est un tributaire de la rivière du Loup.

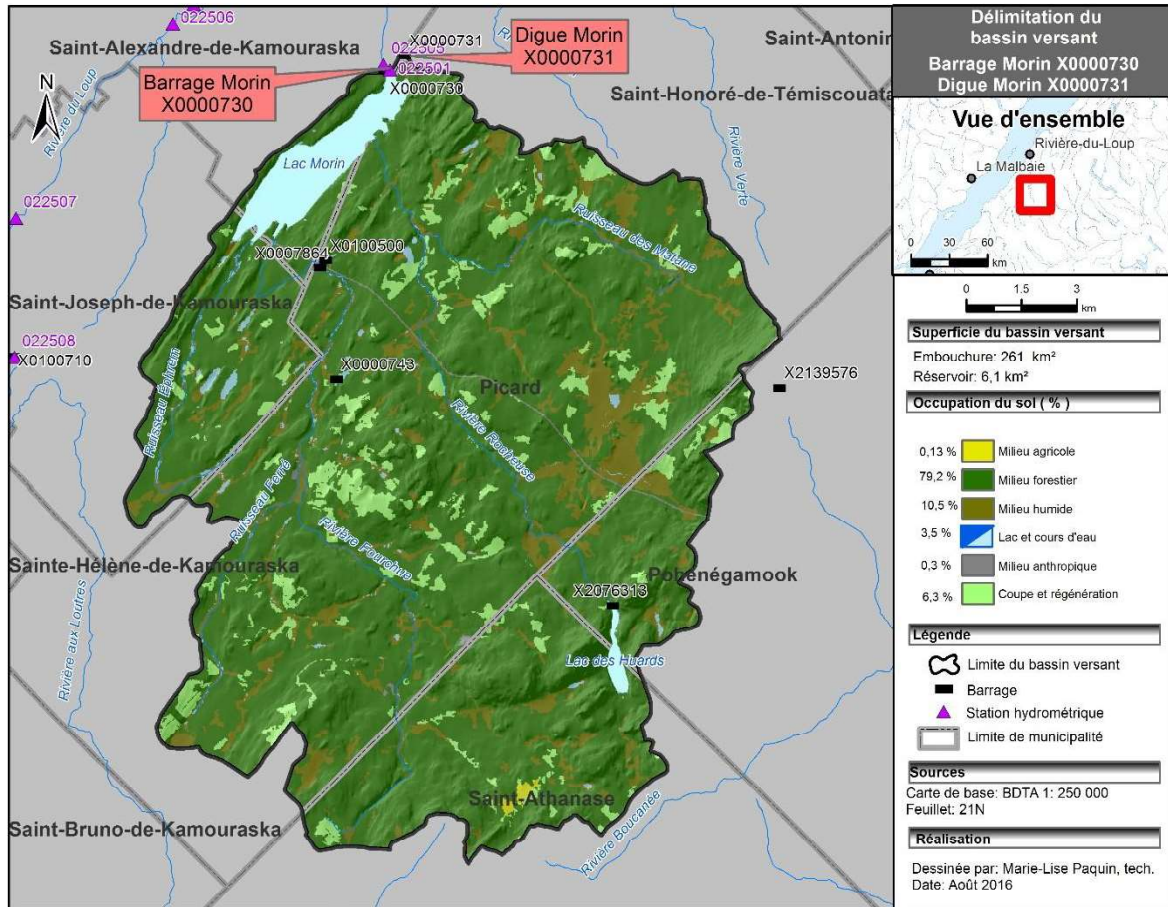


Figure 2-1 : Aménagement Morin - Bassin versant

3 DONNÉES HYDROLOGIQUES

Les débits évacués par le barrage Morin sont jaugés par la station 022505 située à 200 m à l'aval de celui-ci. Cette station est entrée en fonction en 1943, soit l'année de construction du barrage. Le niveau du réservoir Morin est enregistré par la station 022501. L'historique des données archivées disponibles débute en 1964.

Les apports journaliers au barrage Morin ont été majoritairement reconstitués par la Direction de l'expertise hydrique (DEH) du MELCC selon une méthodologie classique (filtrage des données de niveau, puis reconstitution par bilan hydrique). De 2016 à 2019, les apports ont été calculés par la Direction des opérations selon la même méthode. La série d'apports reconstitués jugée fiable couvre la période allant de 1967 à 2019.

Les sous-sections suivantes décrivent le détail des étapes de la méthode employée pour déterminer, pour diverses récurrences et différentes saisons (printemps et été-automne), les quantiles d'apports journaliers, ainsi que les quantiles de volumes de crues saisonnières. Il est à noter que le niveau des conséquences actuel de l'aménagement Morin étant très important, la crue 1 : 10 000 ans est employée dans l'étude actuelle.

4 ANALYSE DES APPORTS RECONSTITUÉS

4.1 ANALYSE DES APPORTS RECONSTITUÉS

La série d'apports reconstitués a été analysée selon les étapes suivantes afin de caractériser les crues de diverses récurrences et de diverses durées.

1. Choix des saisons : une analyse des volumes de crues saisonnières a mené à définir la saison printanière du 1^{er} avril au 15 juin inclusivement et à définir la saison d'été-automne du 16 juin au 30 novembre inclusivement. Cette analyse tient compte de la climatologie et du régime hydrique, propres au bassin versant du lac Morin.
2. Extraction des maximums annuels d'apports journaliers des saisons printanière et d'été-automne.
3. Choix des périodes pour les crues de volumes : une analyse des volumes de crues saisonnières a mené à fixer la période de l'hydrogramme typique printanier à 76 jours, soit l'entièreté de la saison printanière définie précédemment. La période de l'hydrogramme typique d'été-automne est, quant à elle, fixée à 7 jours. Cette analyse est basée sur l'expérience en gestion des crues des ingénieurs de garde de la Direction des opérations du MELCC.
4. Extraction des maximums annuels de volumes d'hydrogrammes printanier et d'été-automne des périodes définies précédemment. Pour l'été-automne, chaque année, on détermine le

maximum annuel du volume sur 7 jours en faisant glisser cette période entre les bornes de la saison.

5. Analyse fréquentielle des maximums annuels d'apports journaliers, ainsi que des maximums annuels des volumes d'hydrogrammes printanier et d'été-automne.
6. Développement d'hydrogrammes synthétiques à partir des résultats des analyses fréquentielles.

Les maximums annuels d'apports journaliers et de volumes de crue printanière et d'été-automne sont respectivement illustrés aux figure 4-1 et 4-2. Ces figures présentent également les quantiles 10 000 ans des saisons printanières et d'été-automne, qui sont tirés du tableau 4-1, présenté à la section suivante. Sur la figure 4-1, on remarque que les quantiles d'apports 10 000 ans établis par SNC-Lavalin en 2001 et utilisés dans la dernière ÉÉS (CEHQ, 2006) apparaissent très proches des maxima de l'historique. De ce fait, ces valeurs de quantiles sont jugées peu plausibles et sont conséquemment révisées dans la présente étude.

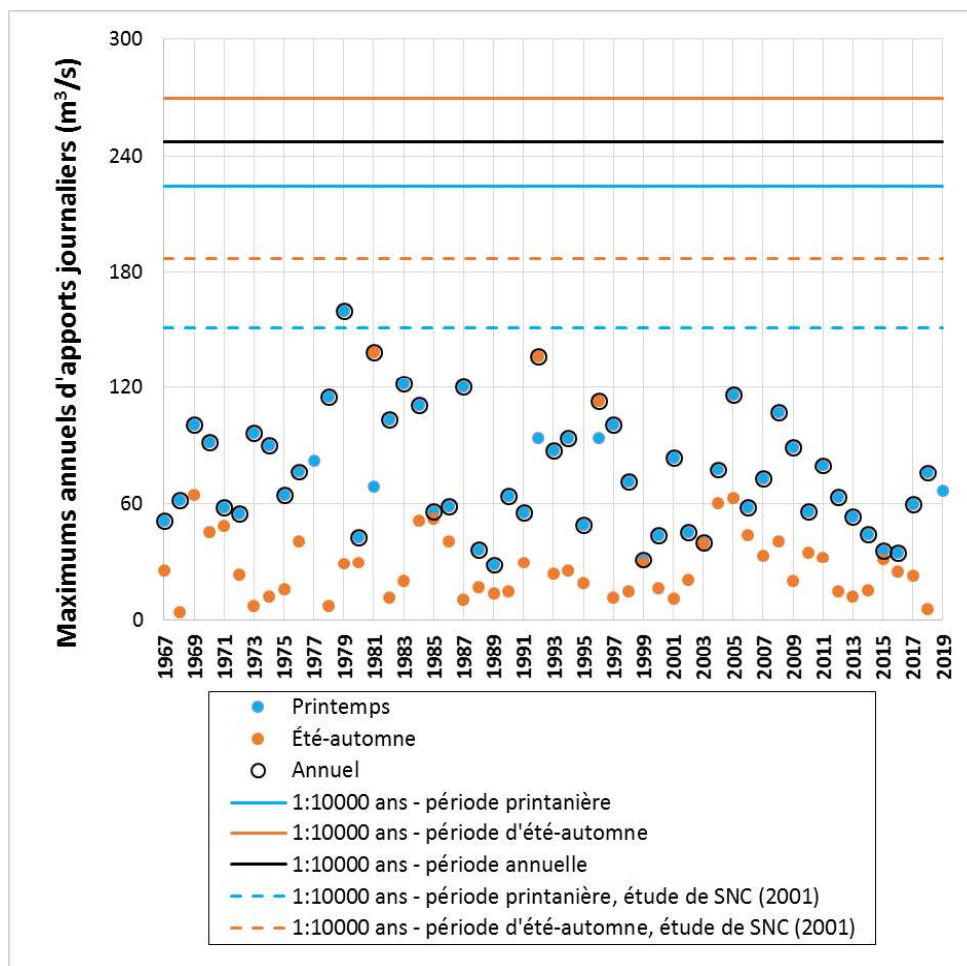


Figure 4-1 : Apports journaliers maximums annuels des crues de printemps et d'été-automne

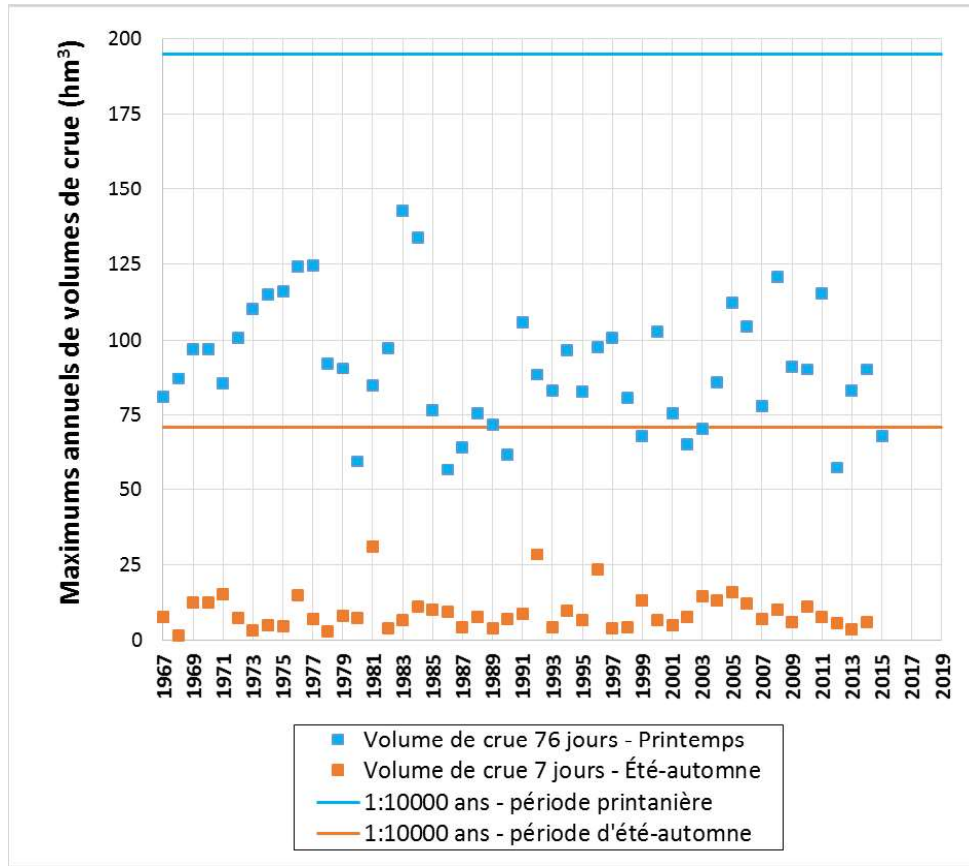


Figure 4-2 : Volume d'apports des crues annuelles de printemps et d'été-automne

4.2 ANALYSES STATISTIQUES DES CRUES

L'analyse statistique des maximums annuels d'apports journaliers et des volumes de crue pour les périodes de printemps et d'été-automne est réalisée à l'aide du logiciel Hyfran-Plus Version 1.3 (Chaire en hydrologie statistique, 2002).

Le choix de l'ajustement des distributions statistiques retenues a été effectué en considérant :

- la vérification des représentations graphiques des résultats;
- l'adéquation des ajustements selon la valeur du test du Chi carré (χ^2);
- le choix de distributions menant à des estimations prudentes et raisonnables des apports et des volumes de crues.

Les résultats d'ajustement sont de plus comparés aux résultats d'une analyse fréquentielle réalisée par SNC-Lavalin en 2001, laquelle a servi d'étude hydrologique dans l'ÉÉS de 2006 (CEHQ, 2006). Le tableau 4-1 présente la synthèse des résultats des ajustements statistiques, tandis que les ajustements statistiques retenus dans la présente étude sont présentés aux figures A-1, A-2, A-3 et A-4 de l'annexe 1.

Tableau 4-1 : Synthèse des ajustements statistiques aux crues

Saison considérée	Printemps			Été-Automne		
Années couvertes	Étude SNC-Lavalin 2001	1967-2019	1967-2015	Étude SNC-Lavalin 2001	1967-2018 (sauf 1977)	1967-2014 (sauf 1977)
Nombre d'observations		53	49		51	47
Dates		1 ^{er} avril au 15 juin			16 juin au 30 novembre	
Distribution		Gamma	Halphen type A		Exponentielle	Log-Normale 3 paramètres
Méthode d'ajustement		Méthode des moments	Maximum vraisemblance		Maximum vraisemblance	Maximum vraisemblance
(χ^2 ; point critique ne devant pas être dépassé)		(3,55 ; 12,6)	(1,51 ; 11,1)		(9,53 ; 12,6)	(6,81 ; 11,1)
Période de retour (Années)		Apports journaliers	Apports journaliers		Volume crue 76 jours	Apports journaliers
	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(hm ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(hm ³)
2	47	70	89,1	16	23,8	7,7
10	72	110,8	117,9	34	70,3	16,5
20	81	124,6	127,4	44	90,3	20,5
50	92	141,4	138,7	58	116,8	26,2
100	100	153,4	146,7	69	136,9	30,8
1000	125	190,3	171	119	203,4	48,7
10 000	151	224,5	194,9	187	270	70,9

Les quantiles présentés au tableau 4-1 sont également montrés aux figures 4-1 et 4-2, afin de contextualiser les maximums annuels historiques disponibles. Selon les résultats obtenus, pour la récurrence 10 000 ans, les apports journaliers estimés dans l'étude actuelle sont 49 % et 44 % supérieurs à ceux utilisés dans l'étude précédente (CEHQ, 2006), respectivement pour la période printanière et la période d'été-automne. Les quantiles d'apports journaliers d'été-automne calculés dans la présente étude s'avèrent par ailleurs supérieurs à ceux du printemps pour les récurrences 1 000 ans et 10 000 ans.

4.3 DÉVELOPPEMENT DES HYDROGRAMMES SYNTHÉTIQUES

Le développement des hydrogrammes synthétiques est réalisé à partir de l'analyse des hydrogrammes provenant de l'historique des apports reconstitués. Les périodes de printemps et d'été-automne sont traitées de manière indépendante et les périodes des hydrogrammes développés sont fixées à 76 jours pour les crues de printemps et à 7 jours pour les crues d'été-automne, tel que mentionné à la section 4.1. Pour chacune des saisons du printemps et d'été-automne, on repère dans l'historique un hydrogramme dont la pointe d'apport journalier et le volume de la période définie s'avèrent très forts ou maximums. Chacun de ces hydrogrammes de référence est ensuite ajusté avec des facteurs de pondération journaliers pour les amplifier de

manière à honorer les quantiles de la crue de sécurité, tant pour l'apport journalier que pour le volume de crue de la période définie.

La figure 4-3 présente l'hydrogramme synthétique printanier réalisé pour la présente étude. Il est obtenu en amplifiant l'hydrogramme printanier de 1983, cette crue s'avérant la plus forte de l'historique en termes de pointe journalière ainsi que de volume cumulé sur 76 jours. L'hydrogramme rencontre simultanément les conditions des quantiles 10 000 ans de l'apport journalier et du volume cumulé sur 76 jours qui sont présentés au tableau 4-1. Outre les apports, la figure 4-3 présente aussi le volume cumulé de l'hydrogramme synthétique et les facteurs de pondération employés. Les hydrogrammes synthétiques de récurrences 100 ans et 1 000 ans sont présentés en annexe aux figures A-5 et A-6. Selon la figure A-5, la forme et la pointe de l'hydrogramme synthétique 100 ans suggèrent que la récurrence de la crue printanière 1983 utilisée comme crue de référence serait légèrement inférieure à 100 ans.

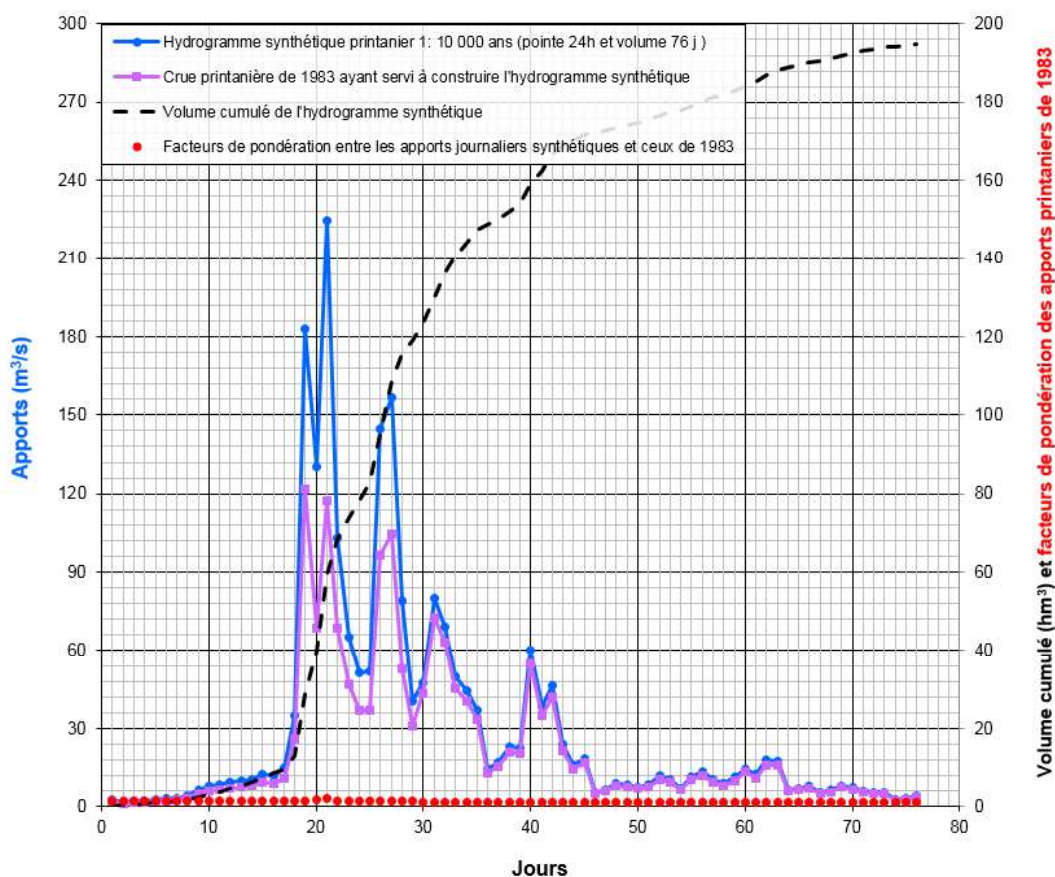


Figure 4-3 : Hydrogramme synthétique printanier 1 : 10 000 ans (apports journaliers et volume cumulé sur 76 jours) et hydrogramme de référence (1983)

La figure 4-4 présente l'hydrogramme synthétique d'été-automne. Il est obtenu en amplifiant l'hydrogramme de la crue du 6 août 1981, cette crue d'été-automne s'avérant la plus forte de l'historique en termes de pointe journalière ainsi que de volume cumulé sur 7 jours (la récurrence estimée de cette crue historique est de 100 ans). L'hydrogramme synthétique montré à la figure 4-4 est généré au pas de temps 6 h, mais sa pointe journalière honore le quantile d'apport maximal 10 000 ans. De plus, tel que montré, l'hydrogramme s'étend sur 15 jours, mais est ajusté de manière à produire un cumul de volume sur 7 jours, égal à celui de récurrence 10 000 ans (du jour 3 à 9 inclusivement). L'hydrogramme rencontre simultanément les conditions des quantiles 10 000 ans de l'apport journalier et du volume cumulé sur 7 jours qui sont présentés au tableau 4-1. Tout comme la figure précédente, la figure 4-4 présente le volume cumulé et les facteurs de pondération employés.

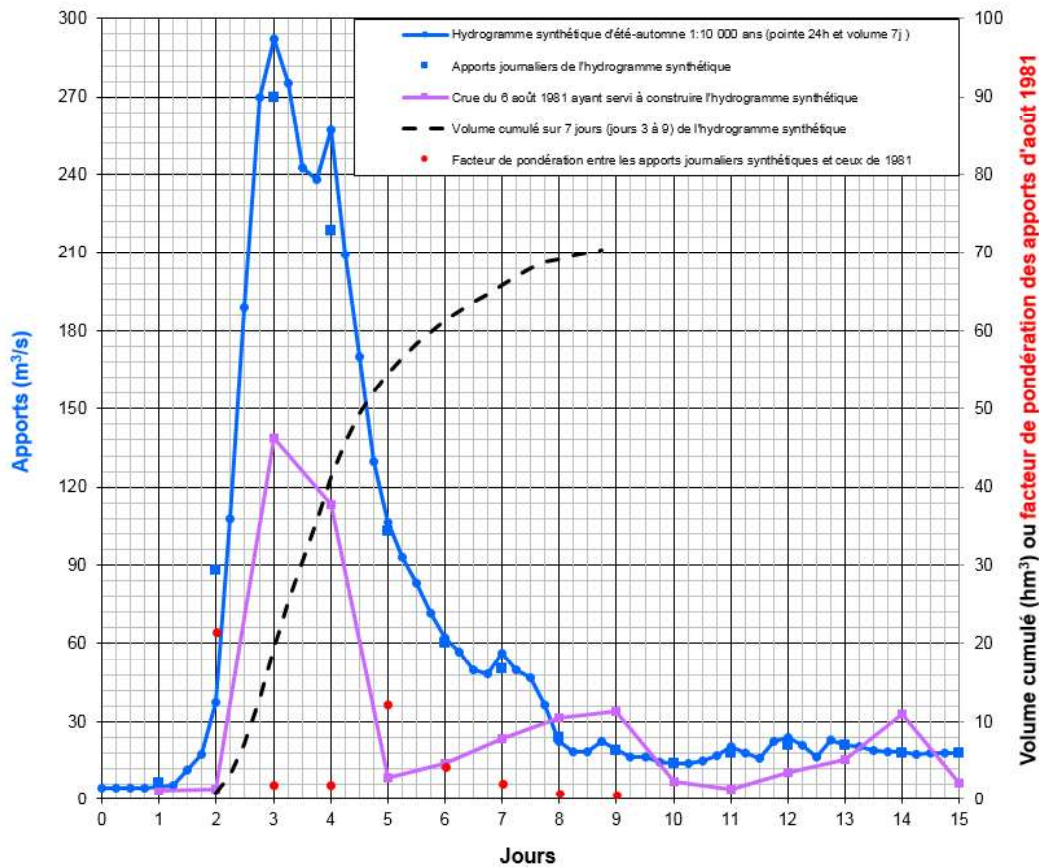


Figure 4-4 : Hydrogramme synthétique d'été-automne 1 : 10 000 ans (apports journaliers et volume cumulé sur 7 jours), hydrogramme de référence (1981)

Les hydrogrammes synthétiques de récurrence 100 ans et 1 000 ans sont présentés en annexe aux figures A-9 et A-10. Selon la figure a- 9, la forme et la pointe de l'hydrogramme synthétique 100 ans suggèrent que la récurrence de la crue d'août 1981 utilisée comme crue de référence est très proche d'être centennale.

5 LAMINAGE DES CRUES

Le laminage des crues est réalisé en simulant l'opération du barrage en réponse aux hydrogrammes exposés à la section 4.3. Cette étape vise à déterminer les niveaux d'eau atteints à l'amont ainsi que les débits évacués à l'aval du barrage lors du laminage des crues de différentes récurrences. Les règles de gestion du barrage et du réservoir, la capacité d'emmagasinement du réservoir et la capacité d'évacuation du barrage sont considérées.

5.1 GESTION DU RÉSERVOIR

Les principaux paramètres d'exploitation du réservoir Morin sont présentés au tableau 5-1.

Tableau 5-1 : Paramètres d'exploitation au réservoir Morin

Niveau du réservoir Morin	Élévation (m)
Niveau maximal normal d'exploitation (m)	195,07
Niveau maximal d'exploitation (m)	195,68
Niveau minimal de vidange (m)	187,00
Niveau de la crête du barrage Morin (m)	197,21
Niveau minimum de la crête de la digue Morin (m)	198,08
Débit de la rivière Fourchue à l'aval du barrage (station 022505)	
Débit du seuil mineur d'inondation (m ³ /s)	60
Débit du seuil majeur d'inondation (m ³ /s)	90
Débit de la rivière du Loup à Rivière-du-Loup (station 022513)	
Débit du seuil mineur d'inondation (m ³ /s)	200

La gestion du barrage Morin permet d'assurer un débit minimum sur la rivière Fourchue ainsi que sur la rivière du Loup située en aval du confluent de la Fourchue. Ce débit minimum est établi en fonction des besoins fauniques et de la présence d'un prélèvement d'eau pour une usine de pâtes et papiers. En période de crue, la gestion du barrage Morin permet également de laminar les apports hydriques de la rivière Fourchue, ce qui contribue à régulariser le débit et les niveaux de la rivière du Loup, laquelle s'écoule à travers Rivière-du-Loup plus en aval.

Depuis quelques années, la gestion du barrage Morin est moins contraignante que jadis, du fait que la gestion du niveau du réservoir et des débits évacués ne nécessite plus d'être harmonisée avec les besoins de producteurs hydroélectriques situés en aval. Les contraintes de gestion demeurant en vigueur incluent la présence d'un niveau de vidange atteint entre la fin mars et la fin avril, le remplissage du réservoir complété en mai et le respect d'un niveau minimal en été

pour la villégiature. En période de crue, les évacuations sont contrôlées de manière à éviter un dépassement du niveau maximal d'exploitation tout en minimisant l'atteinte ou le dépassement des seuils mineur et majeur d'inondations.

5.1.1 Capacité d'emmagasinement

Depuis 2011, suivant l'intégration de nouveaux relevés bathymétriques réalisés au réservoir, la capacité d'emmagasinement est constituée de deux courbes juxtaposées, pour deux gammes de niveaux du réservoir, tel que montré à la figure 5-1. Il est à noter que la reconstitution des apports hydriques a été réalisée à partir de ces nouvelles courbes d'emmagasinement pour tout l'historique, ces courbes étant jugées davantage plus précises que l'unique courbe d'emmagasinement précédente.

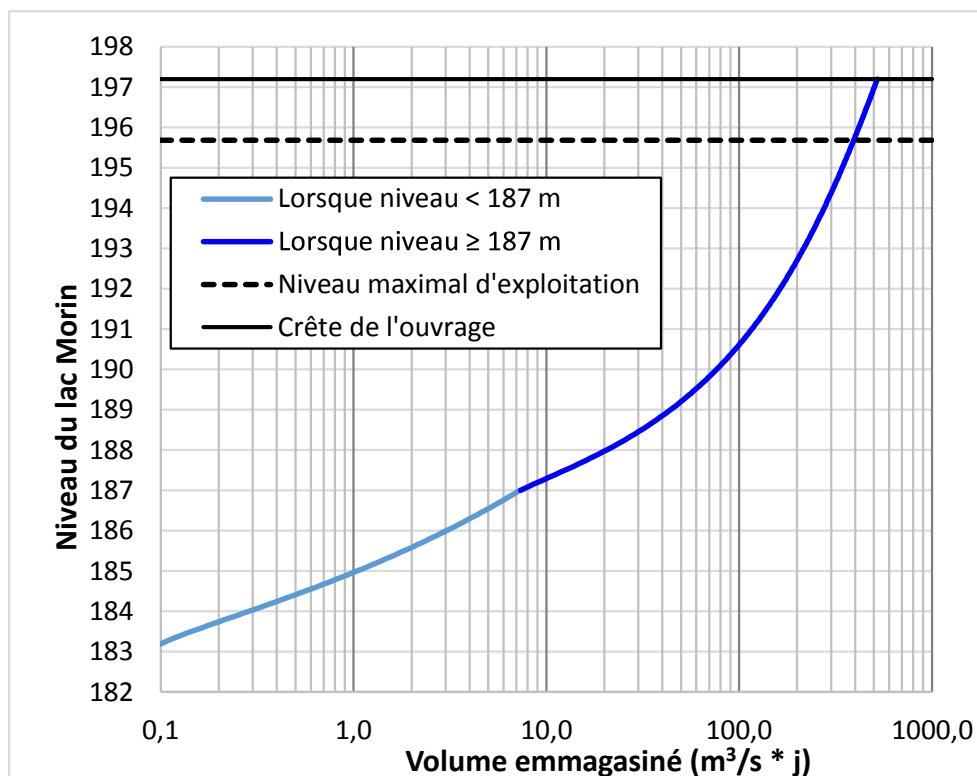


Figure 5-1 : Courbe d'emmagasinement du réservoir Morin

Les courbes s'expriment par des équations polynomiales du quatrième degré, comme suit :

$$\text{Volume emmagasiné (m}^3/\text{s * j)} = a_0 + a_1\text{Niv} + a_2\text{Niv}^2 + a_3\text{Niv}^3 + a_4\text{Niv}^4$$

Où, Niv est le niveau du réservoir mesuré à la station hydrométrique 022501. Le tableau 5-2 présente les coefficients déduits suite aux relevés bathymétriques de 2011.

Tableau 5-2 : Coefficients des courbes d'emménagement du réservoir Morin

	a₀	a₁	a₂	a₃	a₄
Niveau < 187 m	16 191 217.701	354 747.963	2914.76324	-10.64427	0.0145771
Niveau ≥ 187 m	26 062 355.628	541 392.813	4219.79850	-14.62772	0.0190293

Le tableau 5-3 présente certains volumes d'emménagement calculés pour différents niveaux d'eau du réservoir.

Tableau 5-3 : Capacité d'emménagement du réservoir Morin

Niveau (m)	Particularité du niveau	Volume	
		(hm³)	(m³/s jour)
187,00		0,63	7,3
188,00		1,77	20,5
189,00		3,81	44,1
190,00		6,61	76,5
191,00		10,05	116,4
192,00		14,08	163,0
193,00		18,67	216,1
194,00		23,83	275,8
195,07	Niveau maximal normal d'exploitation	30,04	347,7
195,68	Niveau maximal d'exploitation	33,95	392,9
196,00		36,11	417,9
197,21	Niveau de la crête du barrage	45,11	522,2

5.1.2 Capacité d'évacuation

Les cinq évacuateurs du barrage Morin sont réunis dans une structure de béton située un peu plus près de la rive gauche. Le tableau 5-4 présente les caractéristiques des évacuateurs.

Tableau 5-4 : Caractéristiques des appareils d'évacuation au barrage Morin

Vanne n°	Type	Élévation du seuil (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Ouverture maximale (m)	Coefficient de vanne C	Fonction
1	fond	188,062	1,828	2,438	2,438	0,600	Gestion du niveau et évacuation des crues
2	fond	185,318	1,828	2,438	2,438	0,600	Gestion du niveau et évacuation des crues
3	fond	182,575	1,828	2,438	2,438	0,600	Gestion du niveau et évacuation des crues
4	demi-fond	189,890	4,572	2,300	2,300	0,600	Évacuateur de crues
5	demi-fond	189,890	4,572	2,300	2,300	0,600	Évacuateur de crues

Le barrage est muni de trois vannes de fond qui permettent la gestion du niveau d'eau du réservoir jusqu'au niveau de vidange habituel de 188,0 m (vanne n° 1), ou même en dessous (vanne nos 2 et 3). Les vannes nos 4 et 5 constituent les principaux évacuateurs de crue, pouvant être opérées lorsque le niveau dépasse 190 m. La figure 5-2 présente les courbes de capacité d'évacuation, lesquelles sont estimées à l'aide des équations théoriques de vannes, en présence des ouvertures maximales des vannes (tableau 5-4). La figure inclut deux cas où l'une des vannes est inopérante, pour cause de défaillance. Ces cas représentent des cas critiques, où la capacité d'évacuation du barrage est réduite, et ce, d'autant plus lorsque l'appareil inopérant est l'un des deux évacuateurs de crue.

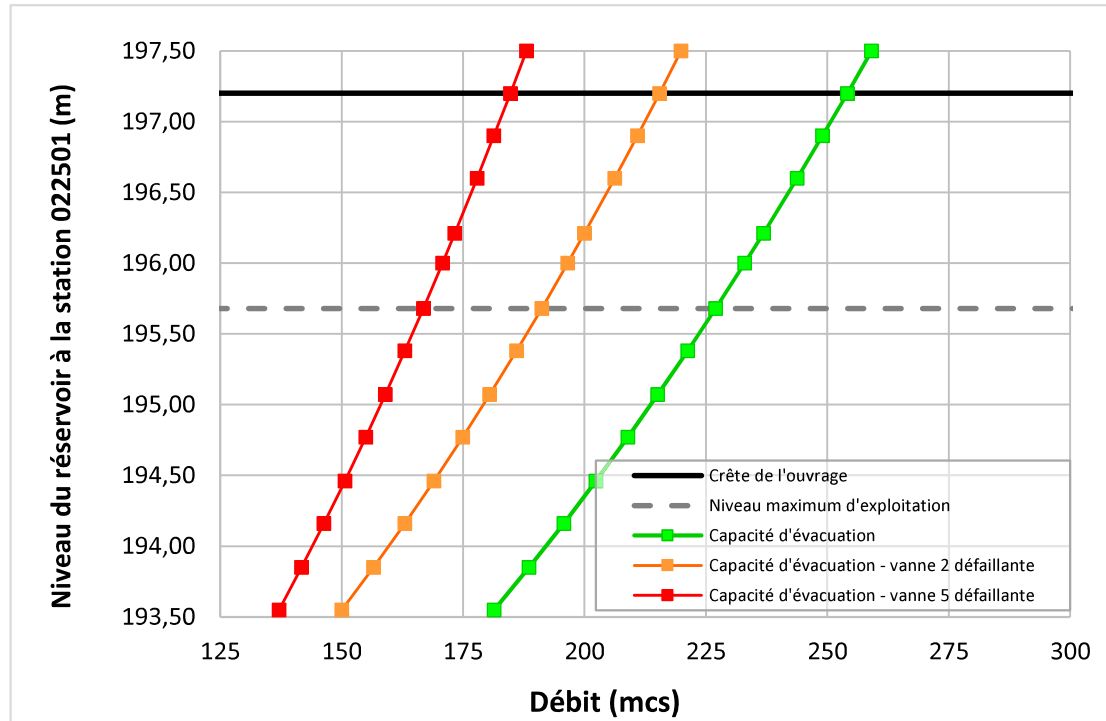


Figure 5-2 : Courbes d'évacuation du barrage Morin

L'équation employée pour calculer les capacités d'évacuation est la suivante :

$$\text{Débit} = C \text{ Largeur (Ouv max)}(2gh)^{0.5}$$

$$\text{avec } h = \text{Niv} - (\text{Seuil} - \text{Ouv max}/2)$$

Où, pour chaque évacuateur, les valeurs des constantes C, Largeur, Ouv. max (ouverture maximum) et Seuil sont tirées du tableau 5-4, alors que $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Il est à noter que dans l'ÉÉS de 2006, les capacités d'évacuation s'avèrent 10 % supérieures à celles calculées dans la présente étude, du fait que les calculs de h sont réalisés avec $h = \text{Niv} - \text{Seuil}$, ce qui surévalue la pression hydrostatique réelle agissant sur l'ouverture de chaque pertuis.

5.1.3 Capacités de retenue

Dans cette section sont calculées, pour chaque ouvrage de l'aménagement Morin, la hauteur, la hauteur de retenue ainsi que de la capacité de retenue. Le tableau 5-5 présente les données requises à ces calculs, ainsi que les résultats obtenus pour chaque ouvrage. Les calculs de cette section font usage du niveau maximal normal d'exploitation, jugé plus adéquat que le niveau maximal d'exploitation, plus rarement rencontré (tableau 5-1). Le tableau 5-5 montre que l'élévation minimale de la crête de la digue Morin, et cette élévation s'avère 0,87 m supérieure à l'élévation de la crête du barrage. L'élévation de la crête du barrage constitue donc l'élévation minimale de l'aménagement.

Tableau 5-5 : Données d'entrée et résultats de calculs de retenue pour l'aménagement Morin

	Barrage Morin (X000730)	Digue Morin (X000731)
Élévation du pied aval	181,25 m	194,97 m
Élévation minimale de la crête	197,21 m	198,08 m
Élévation maximale de la crête	197,21 m	198,30 m
Élévation du niveau maximal normal d'exploitation	195,07 m	195,07 m
Hauteur de l'ouvrage	15,96 m	3,33 m
Hauteur de retenue	13,82 m	0,10 m
Capacités de retenue	30 020 942 m ³	613 471 m ³

La hauteur de chaque ouvrage présentée au tableau 5-5 est déterminée en soustrayant l'élévation du pied aval de l'ouvrage de l'élévation maximale de la crête.

La hauteur de retenue de chaque ouvrage également présentée au tableau 5-5 est déduite de l'écart entre le niveau maximal normal d'exploitation et l'élévation du pied aval du barrage.

Enfin, à partir de l'équation de la courbe d'emménagement (section 5.1.1) et de l'élévation du pied aval, ainsi que du niveau maximal normal d'exploitation, la capacité de retenue a été calculée pour chaque ouvrage, et est présentée au tableau 5-5. Elle résulte de la différence des volumes d'emménagement propres à chacun de ces niveaux.

5.1.4 Laminage des crues

Le laminage des crues au barrage Morin est réalisé pour les crues printanières et d'été-automne de récurrences de 100 ans, 1 000 ans et 10 000 ans. Les opérations au barrage Morin sont simulées au pas de temps de six heures pour reproduire une gestion adaptative et conservatrice de l'ouvrage et ainsi, prendre en compte l'incertitude et l'imprécision des informations guidant les prises de décisions (principalement les prévisions hydrologiques et les apports reconstitués en temps réel durant les événements de crue).

En cohérence avec les informations présentées à la dernière colonne du tableau 5-4, la gestion du barrage Morin sollicite d'abord les trois vannes de fond (n^{os} 1, 2 et 3) pour respecter les contraintes de niveau. Au besoin, les évacuateurs de crue (vannes de demi-fond n^{os} 4 et 5) sont ensuite opérés lorsque le niveau du lac dépasse les seuils de ces deux évacuateurs.

La figure 5-3 présente l'impact du laminage de la crue printanière 1 : 10 000 ans. Le scénario de gestion simulé est aussi présenté, au bas de la figure. Pour les récurrences de 100 et 1 000 ans, les figures équivalentes sont présentées à l'annexe 1 (figures A-7 et A-8 respectivement).

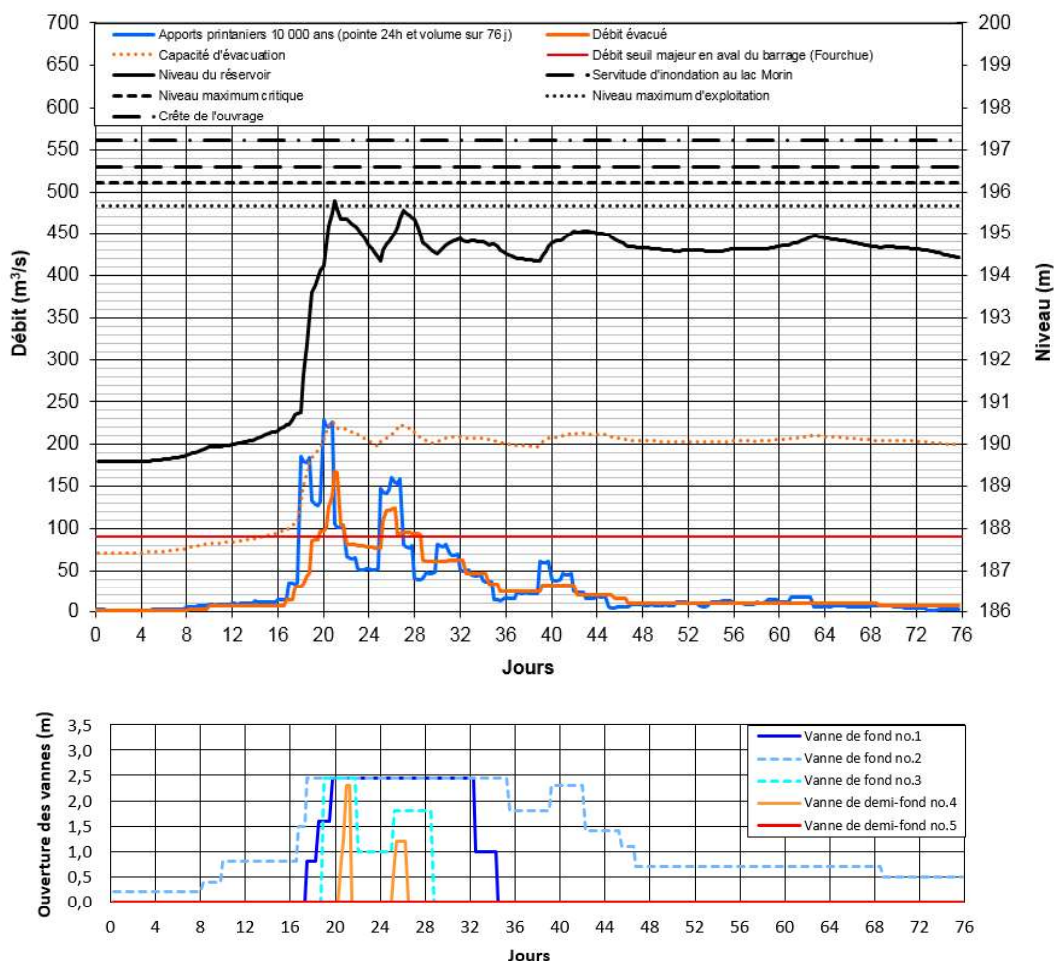


Figure 5-3 : Laminage de la crue printanière 1 : 10 000 ans

Pour la crue printanière 1 : 10 000 ans, la figure 5-3 montre que le laminage de la crue est réalisé en recourant à un seul des deux évacuateurs de crue, et ce, durant seulement quelques jours. Cette situation est rendue possible par le fait qu'avant cette crue printanière, le niveau du réservoir est bas, à 189,60 m. Ce niveau s'avère toutefois 2,60 m supérieur au niveau de vidange minimal de 187,00 m (tableau 5-1), ce qui simule un remplissage du réservoir déjà amorcé lorsque la crue décennale survient.

La figure 5-4 présente l'impact du laminage de la crue d'été-automne 1 : 10 000 ans. Pour les récurrences de 100 et 1 000 ans, les figures équivalentes sont présentées à l'annexe 1 (figures A-11 et A-12 respectivement).

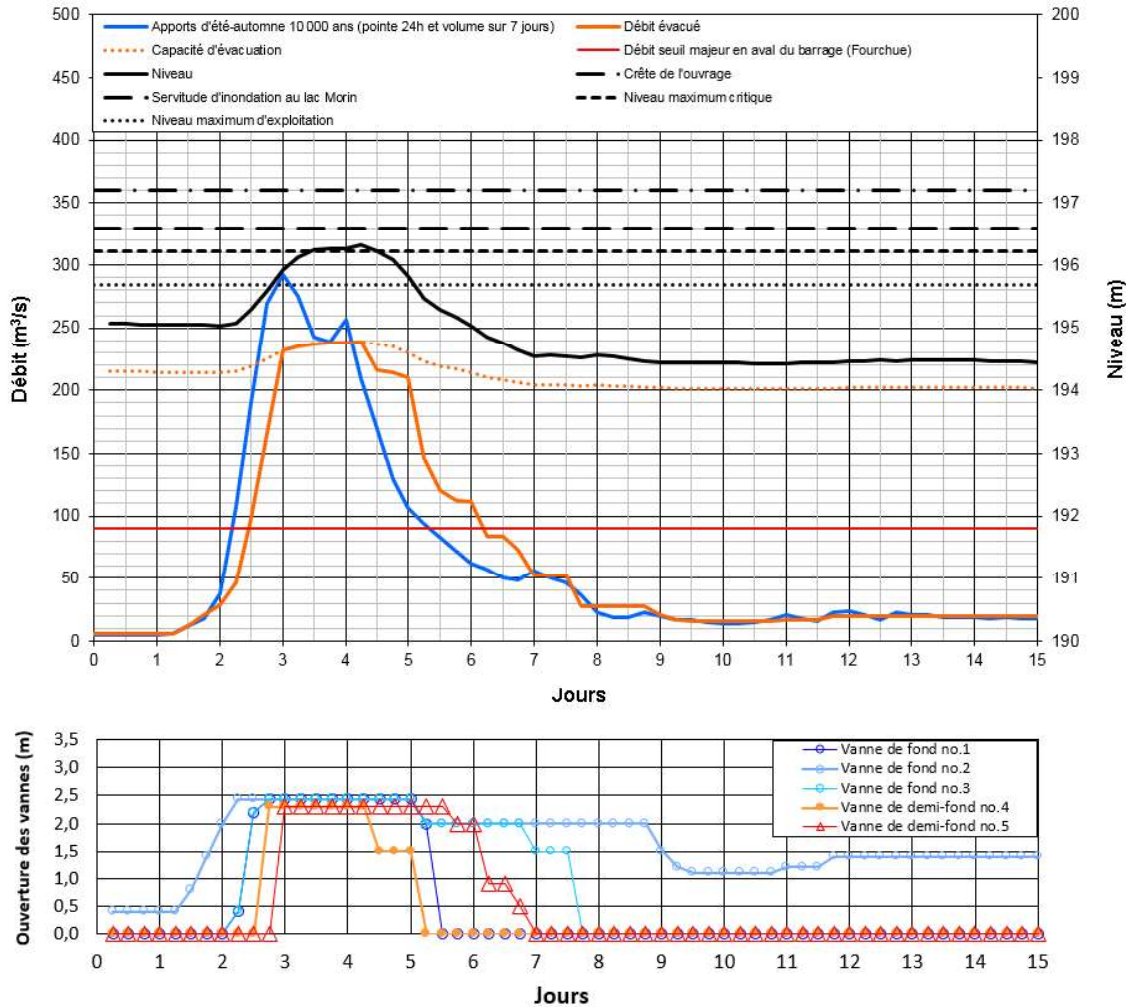


Figure 5-4 : Laminage de la crue d'été-automne 1 : 10 000 ans

Pour la crue d'été-automne 1 : 10 000 ans, la figure 5-4 montre que le laminage de la crue nécessite de recourir à tous les évacuateurs durant plus de deux jours. On observe également que la capacité maximale d'évacuation est atteinte durant une demi-journée (courbes orange colinéaires dans le graphique du haut de la figure). Le niveau d'eau avant la crue est fixé à 195,07 m, soit le niveau maximal normal d'exploitation (tableau 5-1). Le

tableau 5-6 présente une synthèse des résultats de ces études de laminage. Les valeurs du tableau sont obtenues à un pas de temps de calcul de 6 heures.

Tableau 5-6 : Synthèse des résultats de laminage des crues

Réurrence (ans)	Apports maximaux journaliers (m ³ /s)	Apports maximaux ¹ (m ³ /s)	Débit maximal total évacué ¹ (m ³ /s)	Niveau initial du réservoir ¹ (m)	Niveau maximal atteint ^{1, 2} (m)
Printemps					
1:100	153,4	156,5	74,3	189,60	195,70
1:1 000	190,3	194,1	92,1	189,60	195,79
1:10 000	224,5	229,1	168,1	189,60	195,78
Été-automne					
1:100	136,9	148,2	100,3	195,07	195,72
1:1 000	203,4	220,3	228,9	195,07	195,78
1:10 000	270,0	292,2	238,7	195,07	196,31

¹ Valeurs obtenues au pas de temps 6 heures.

² L'élévation de la crête du barrage est de 197,21 m, et correspond à l'élévation minimale de l'aménagement.

En conclusion, ces études de laminage montrent que :

- pour la crue décennale, les niveaux maximums atteints sont de 195,78 m et 196,31 m, respectivement pour la crue printanière et la crue d'été-automne.
- La crue décennale d'été-automne est plus contraignante à laminar, le niveau atteint étant le plus élevé. Ceci est dû au fait que le niveau du réservoir précédant le passage de la crue d'été-automne correspond à la cote du niveau maximal normal d'exploitation (195,07 m). Le réservoir est donc rempli à sa cote estivale lorsque la crue survient, ce qui rend ces études de laminage conservatrices pour les crues d'été-automne.

Scénarios avec vannes inopérantes

Afin d'analyser la criticité des appareils d'évacuation, le laminage de la crue décennale la plus contraignante (d'été-automne) est analysé pour deux cas critiques additionnels :

- 1- La vanne de fond n° 2 inopérante.
- 2- L'évacuateur de crue n° 5 inopérant.

La figure 5-5 et le tableau 5-7 présentent les résultats obtenus lorsque l'un des 5 évacuateurs est inopérant durant cette crue.

De ces deux cas, celui le plus critique est lorsque la vanne n° 5 est inopérante. Advenant que cette vanne soit inopérante durant toute la crue 1 : 10 000 ans d'été-automne, le niveau maximum atteint sera de 197,22 m, tout juste supérieur à l'élévation de la crête du barrage (tableau 5-5). Ce scénario de gestion n'est pas montré à la figure 5-5, mais les résultats de ce laminage sont présentés à la dernière ligne du tableau 5-7. La figure 5-5 présente plutôt le cas où la vanne n° 5 s'avérerait inopérante durant les 36 premières heures de la crue décennale ce, après quoi, on simule que des mesures d'urgence seraient déployées pour débloquer la vanne. Sur la figure, cette simulation de déblocage en urgence se traduit par la hausse subite du débit d'évacuation autour du jour 4, ainsi que par le plafonnement du niveau à 196,79 m, soit 0,42 m sous la crête du barrage.

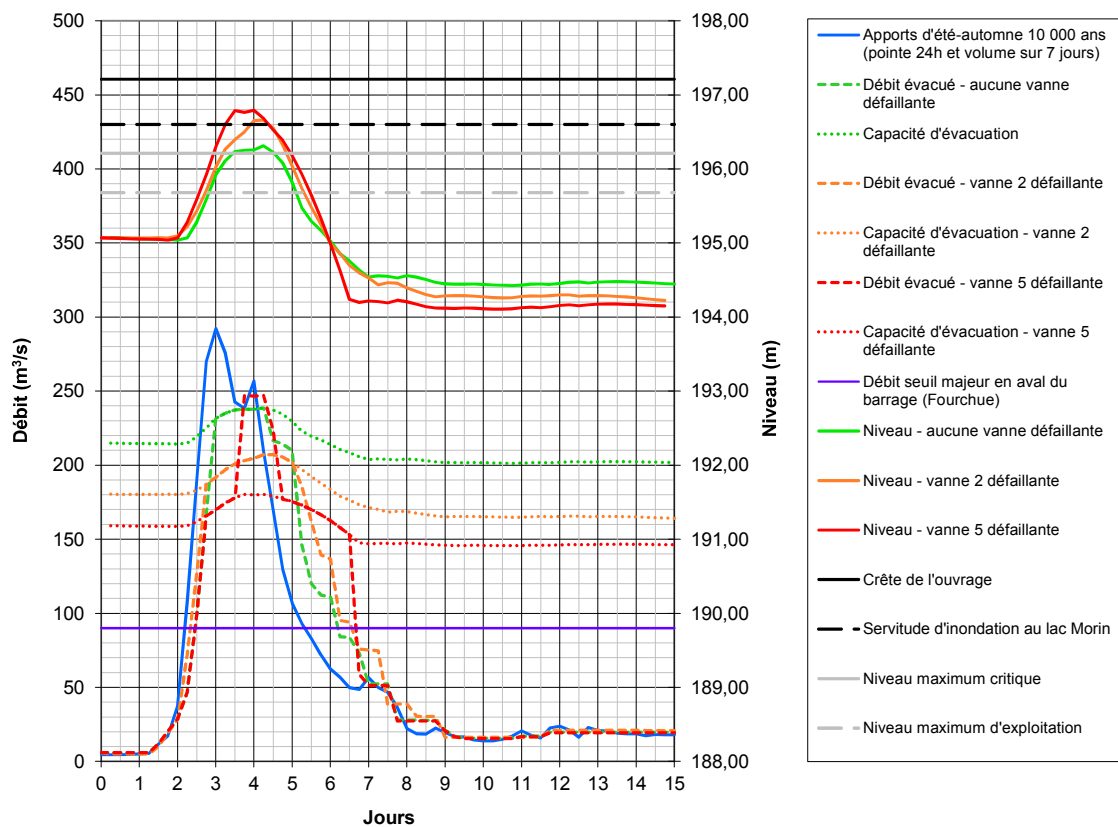


Figure 5-5 : Crue d'été-automne 1 : 10 000 ans avec certains évacuateurs inopérants

Tableau 5-7 : Synthèse des résultats de laminage avec un évacuateur inopérant

Réurrence (ans)	Évacuateur inopérant	Apports maximaux journaliers (m ³ /s)	Apports maximaux ¹ (m ³ /s)	Débit maximal total évacué ¹ (m ³ /s)	Niveau maximal atteint ^{1,2} (m)
Été-automne					
1:10 000	aucun	270,0	292,2	238,7	196,31
1:10 000	vanne fond n° 2	270,0	292,2	207,1	196,66
1:10 000	vanne demi-fond n° 5 les 36 premières heures de la crue	270,0	292,2	247,11	196,79
1:10 000	vanne demi-fond n° 5	270,0	292,2	185,0	197,22

¹ Valeurs obtenues au pas de temps 6 heures.

² L'élévation de la crête du barrage est de 197,21 m et correspond à l'élévation minimale de l'aménagement.

Ces résultats démontrent que face à la crue de sécurité d'été-automne, la fonctionnalité des deux évacuateurs de crues (vannes n°s 4 et 5) s'avère indispensable, à défaut de quoi le niveau du réservoir dépasse l'élévation de la crête du barrage, qui est l'élévation minimale de l'aménagement.

6 REVANCHE HYDRAULIQUE

L'article 25 du Règlement sur la sécurité des barrages stipule qu'il doit exister une distance minimale de 1,0 m entre le point bas de la crête d'un barrage susceptible d'érosion et le niveau maximal atteint lors de la crue de sécurité, à moins que le propriétaire ne démontre que toutes les incertitudes hydrologiques ainsi que celles relatives à la gestion des crues ont été prises en compte dans l'établissement de la crue de sécurité.

Le barrage Morin est en béton et en crue de sécurité, la revanche hydraulique est de 0,90 m. La revanche de la digue est quant à elle supérieure à un mètre, à 1,77 m.

Parallèlement à ces résultats, pour ces deux ouvrages, il est jugé souhaitable d'analyser les incertitudes hydrologiques sur le niveau du réservoir. Pour ce faire, les deux cas suivants sont retenus. L'impact sur le niveau est analysé pour :

- Une seiche produite par une crue d'été-automne de récurrence de 100 ans soumise à des vents de 75 km/h;
- Une seiche produite par la crue de sécurité d'été-automne (1 : 10 000 ans) soumise à des vents de 50 km/h.

Le tableau 6-1 présente les données d'entrée et les résultats obtenus pour ces deux cas, à partir des équations classiques utilisées par la DGB dans l'outil de calculs des incertitudes dédié à ce besoin (DGB, 2019 – Notes de calculs des incertitudes hydrauliques).

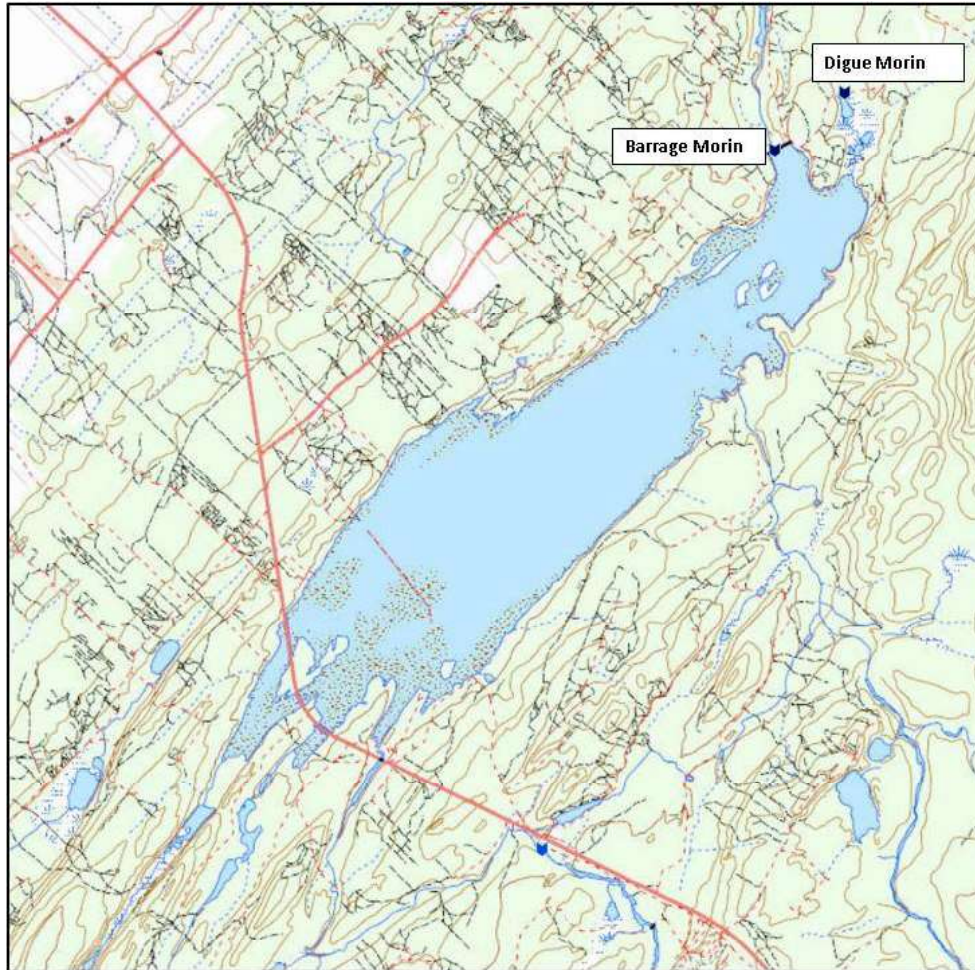
Selon le tableau 6-1, l'élévation minimale requise est de 196,66 m, ce qui est inférieur à l'élévation minimale de l'aménagement (197,21 m). Par ailleurs, la prise en compte du rehaussement le plus critique (0,52 m) abaisse la revanche de la digue Morin de 1,77 m à 1,25 m.

Tableau 6-1 : Impact sur le niveau du réservoir pour deux cas contraignants ciblés

Contrainte étudiée	Crue	Vents (km/h)	Rehaussement obtenu (m)	Niveau atteint (m)
Influence d'une seiche	1 : 100 ans (été-automne)	75	0,52	196,24
Influence d'une seiche	Sécurité 1 : 10 000 ans (été-automne)	50	0,35	196,66

Pourtour du réservoir

L'élévation de la crête du barrage constitue l'élévation minimale de l'aménagement Morin. Une vérification graphique est tout de même réalisée au moyen de la figure 4-4, qui présente la topographie entourant le réservoir Morin.



L'analyse visuelle de la figure permet de voir qu'il n'y pas de point bas particulier pouvant constituer une zone d'écoulement préférentielle. En effet, toutes les courbes topographiques illustrées le long du pourtour du lac sont parallèles au contour du rivage. En conséquence, aucun rehaussement n'apparaît requis sur la base de cette carte.

7 NIVEAUX REQUIS PAR LES ANALYSES STRUCTURALES ET GÉOTECHNIQUES

L'analyse hydrologique et hydraulique fait ressortir les points présentés au tableau suivant :

Tableau 7-1 : Résumé des caractéristiques hydrauliques

Ouvrage	Barrage Morin	Digue Morin
Crue de sécurité	1 : 10 000 ans, été-automne	
Niveau des conséquences	Reconduit à « très important »	Révisé à « moyen »
Apports journaliers maximums de la crue de sécurité	270 m ³ /s	
Niveau d'eau amont associé à la crue de sécurité	196,31 m	
Capacité d'évacuation	Adéquate	
Capacité de retenue	30 020 942 m ³	613 471 m ³
Revanche	Adéquate à 0,90 m	
Point bas du réservoir	Au site du barrage	

Enfin, le tableau suivant présente les valeurs communes utilisées aux fins d'analyse de stabilité.

Tableau 7-2 : Valeurs de niveaux et hauteur d'eau utilisées pour les analyses de stabilité

Remarque	Valeur
Niveau minimal d'exploitation	187,80 m
Niveau de vidange printanière visé	188,50 m
Niveau maximal normal d'exploitation	195,07 m
Niveau maximal d'exploitation	195,68 m
Niveau amont de la crue de sécurité (10 000 ans)	196,31 m
Élévation minimale de la crête du barrage	197,21 m
Élévation minimale de la revanche	0,90 m
Niveau atteint de la vague 50 km/h	196,66 m
Rehaussement de la vague 50 km/h	0,35 m
Niveau atteint de la vague 75 km/h	196,24 m
Rehaussement de la vague 75 km/h	0,52 m

8 CONCLUSION

L'aménagement Morin est composé du barrage (X0000730) et de la digue (X0000731). La présente étude hydrologique et hydraulique, réalisée dans le cadre de l'étude d'évaluation de la sécurité de cet aménagement, a permis de caractériser la crue de sécurité printanière et d'été-automne, ainsi que les niveaux résultants atteints par des scénarios de laminage conservateurs. Selon les analyses réalisées, la revanche hydraulique de l'aménagement Morin est suffisante.

9 RÉFÉRENCES

CHAIRE EN HYDROLOGIE STATISTIQUE, 2002, HYFRAN-PLUS. *Logiciel pour l'analyse fréquentielle en hydrologie*, version 1.3, INRS-ETE (Université du Québec)

Centre d'expertise hydrique du Québec. (2006). *Étude d'évaluation de la sécurité du barrage Morin d'avril 2006*.

Centre d'expertise hydrique du Québec. (2014). *Guide d'élaboration et de réalisation - Études hydrauliques*. Québec.

Direction générale des barrages (2019). *Notes de calculs des incertitudes hydrauliques, fichier Excel joint au dossier*.

ANNEXE

Représentation graphique des ajustements des distributions statistiques

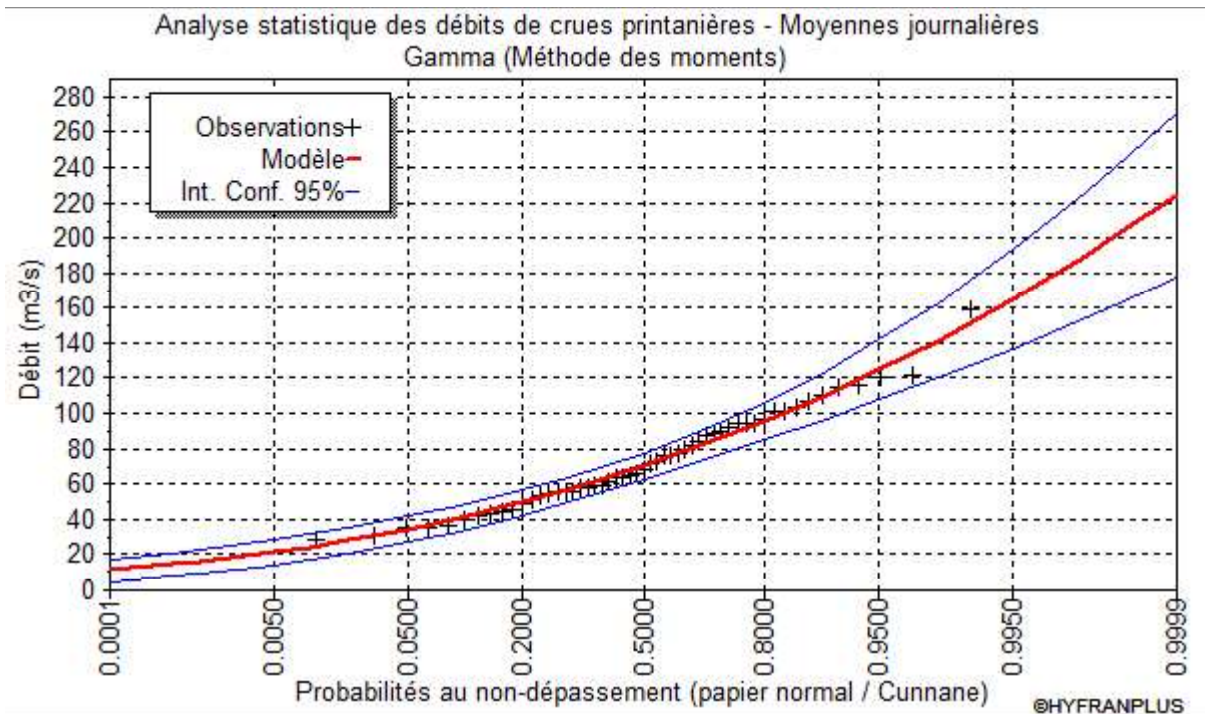


Figure A- 1 : Ajustement statistique des maxima d'apports journaliers printaniers

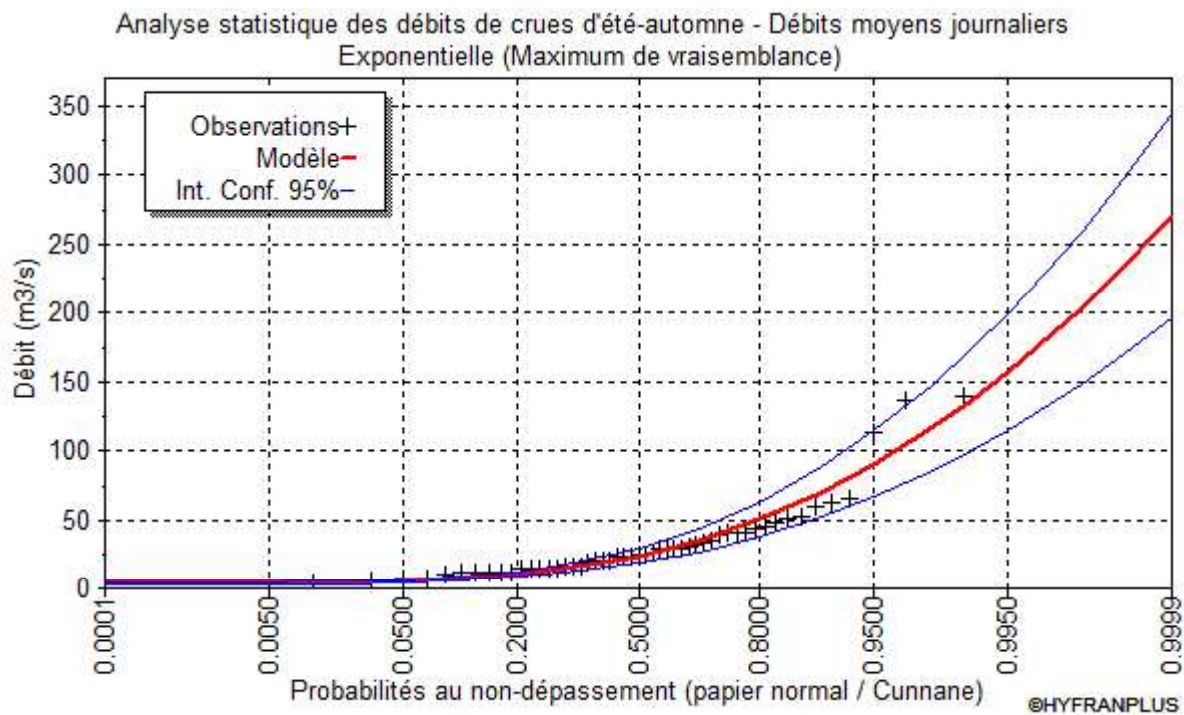


Figure A- 2 : Ajustement statistique des maxima d'apports journaliers d'été-automne

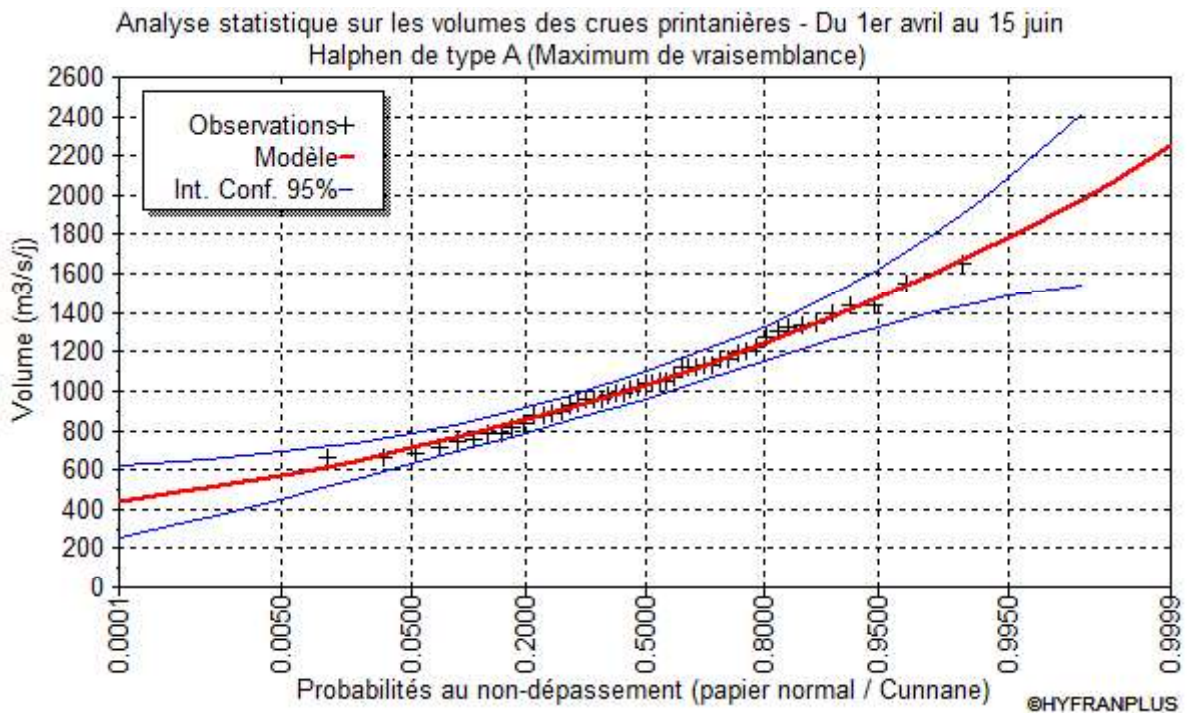


Figure A- 3 : Ajustement statistique des maxima de volumes 76 jours printaniers

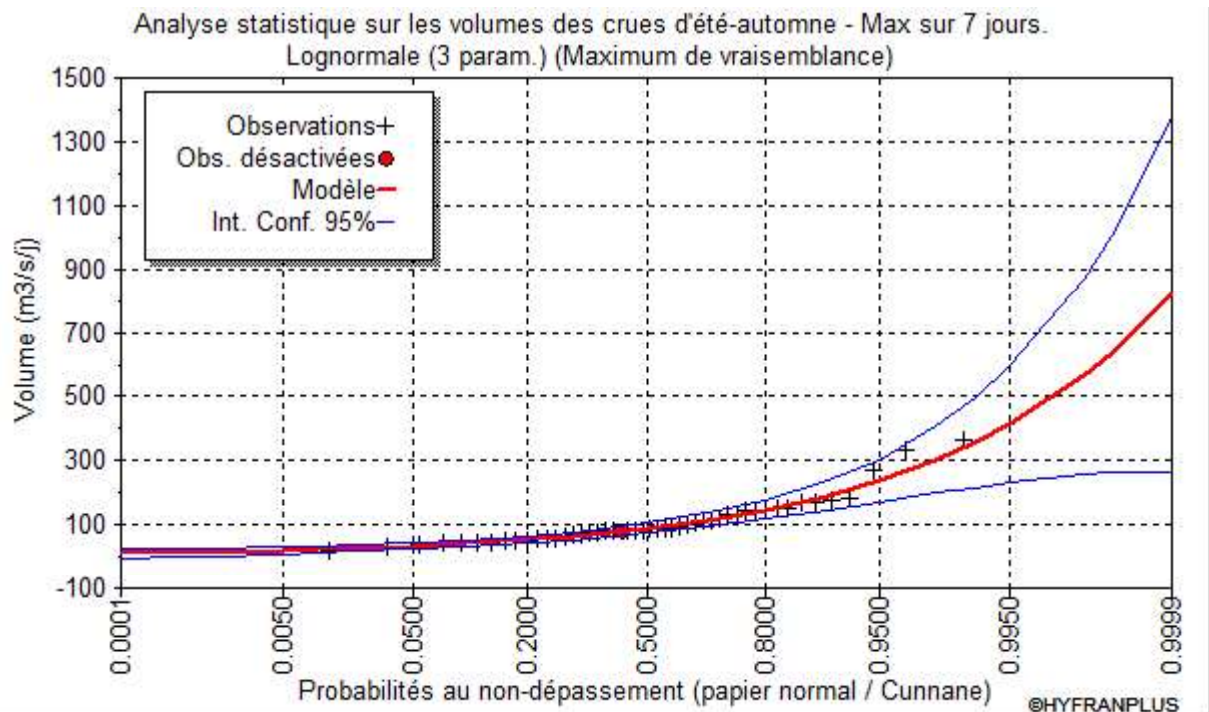


Figure A- 4 : Ajustement statistique des maxima de volumes 7 jours d'été-automne

Figures complémentaires produites lors des études de laminage de crues printanières

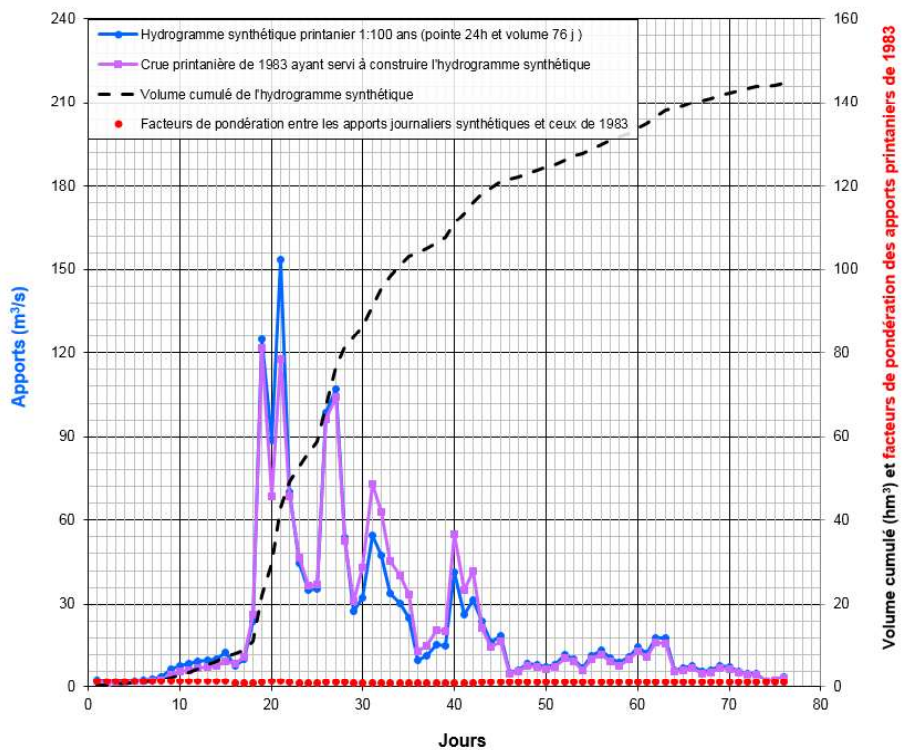


Figure A- 5 : Hydrogramme synthétique printanier 1 : 100 ans

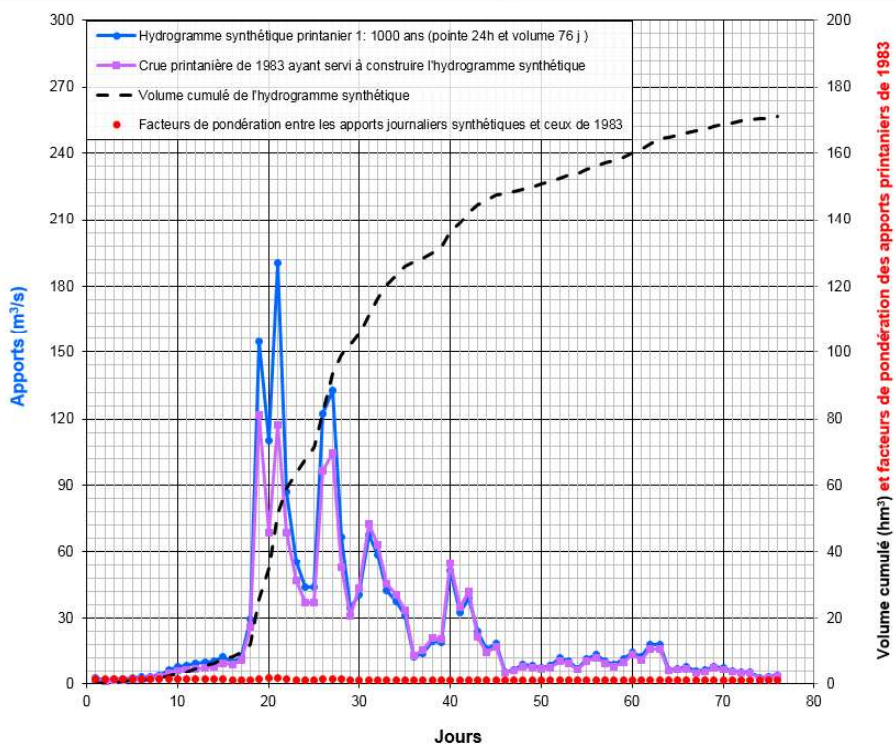


Figure A- 6 : Hydrogramme synthétique printanier 1 : 1 000 ans

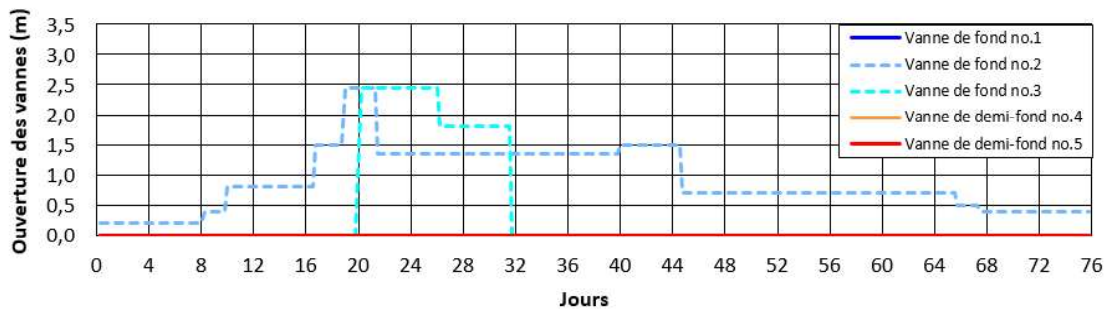
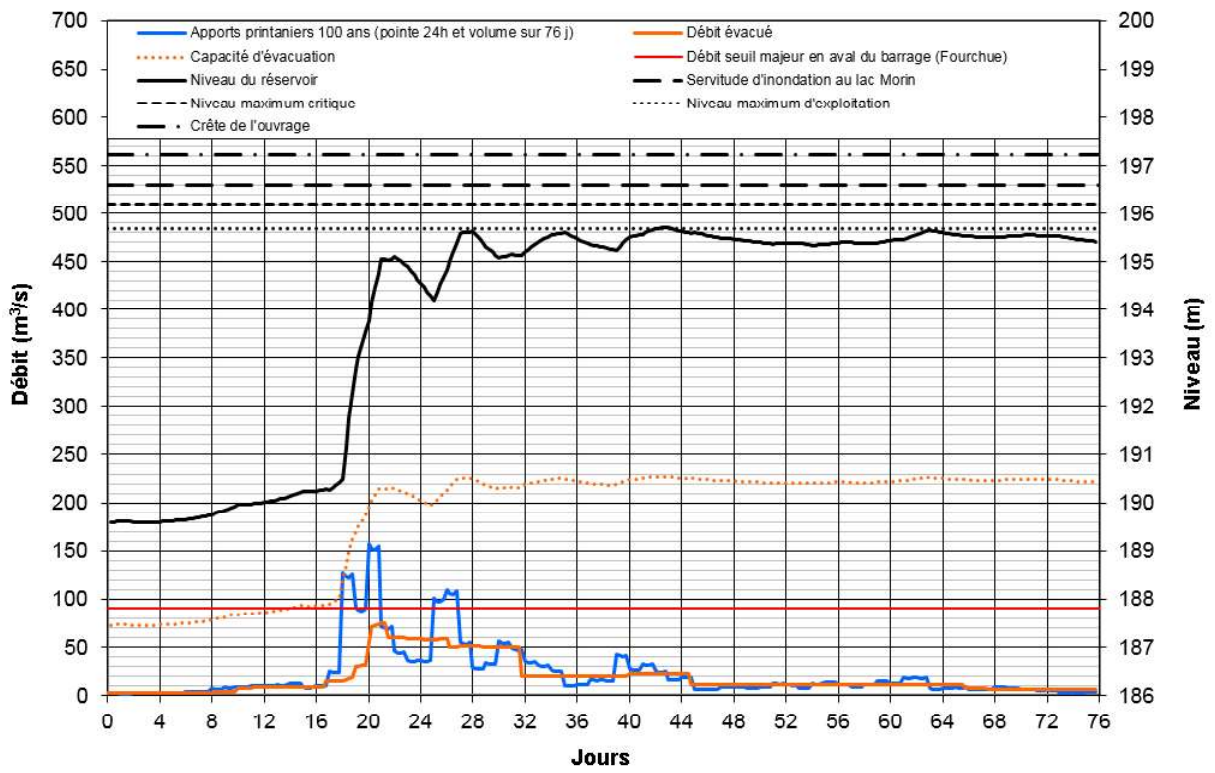


Figure A-7 : Laminage de la crue printanière 100 ans

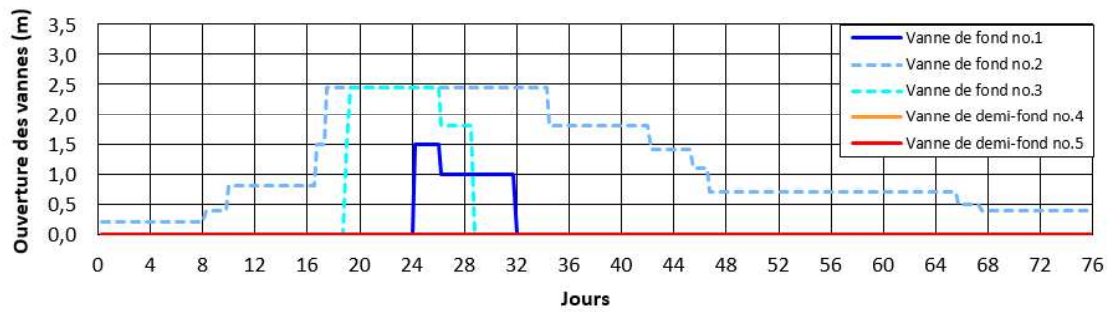
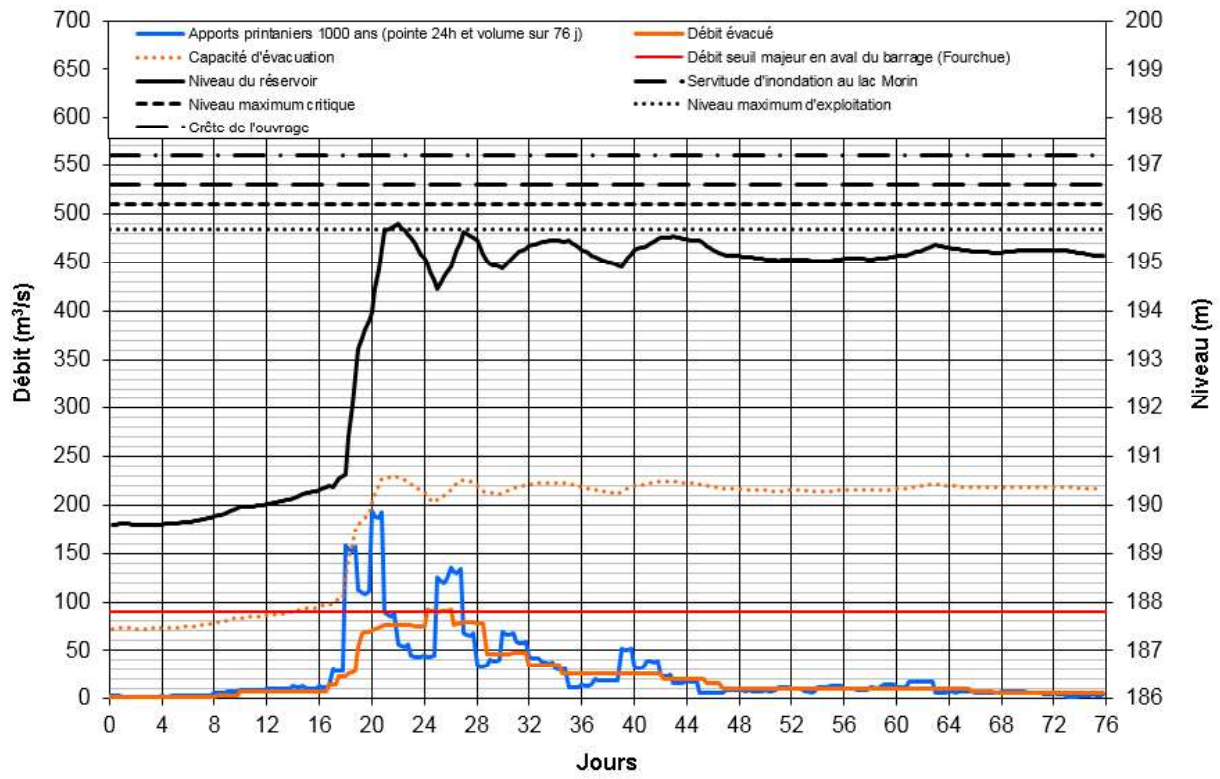


Figure A- 8 : Laminage de la crue printanière 1 000 ans

Figures complémentaires produites lors des études de laminage de crues d'été-automne

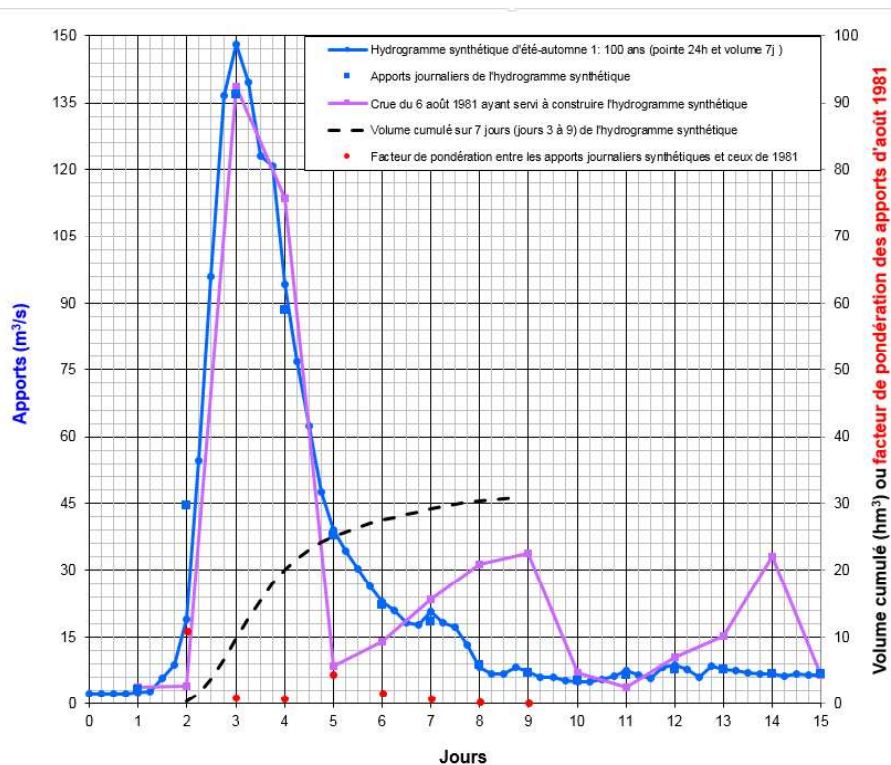


Figure A- 9 : Hydrogramme synthétique d'été-automne 1 : 100 ans

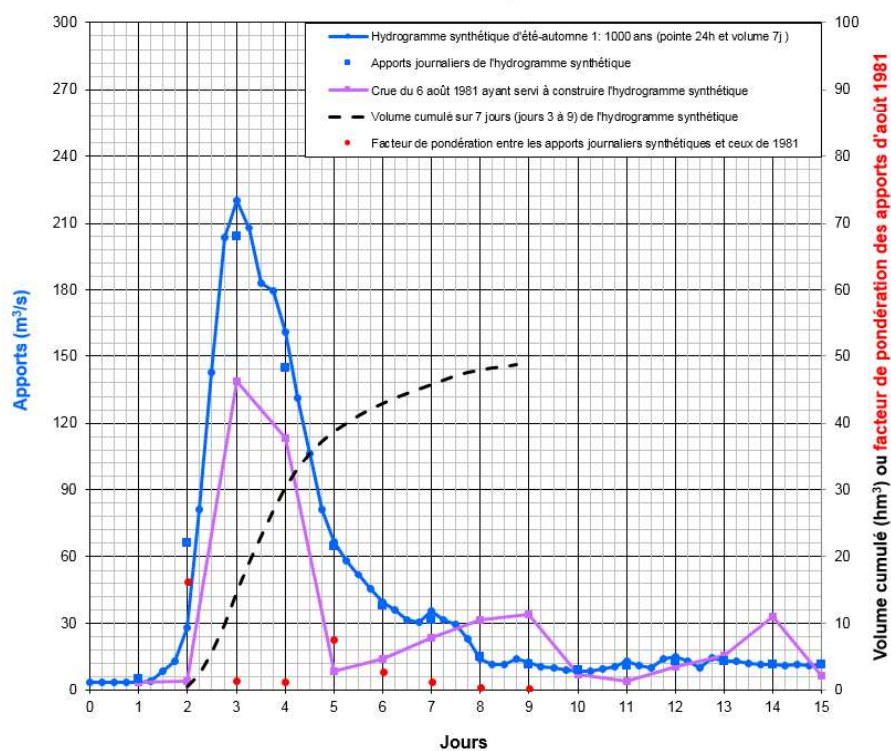


Figure A- 10 : Hydrogramme synthétique d'été-automne 1 : 1 000 ans

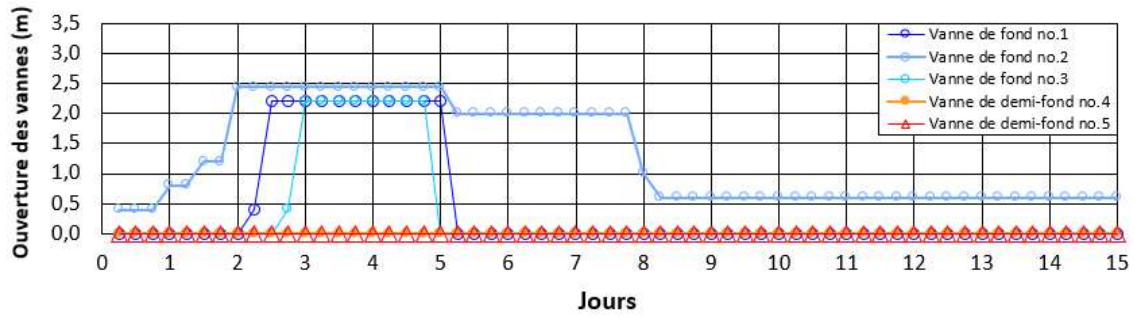
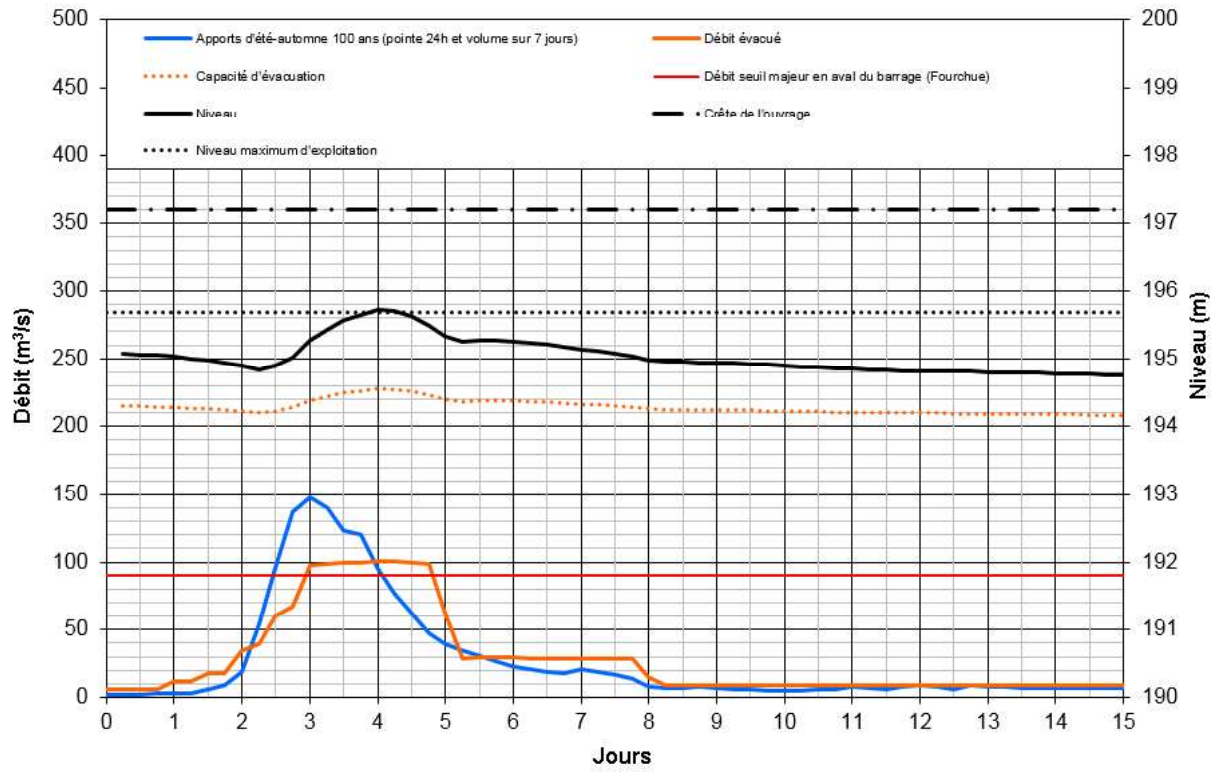


Figure A- 11 : Laminage de la crue d'été-automne 100 ans

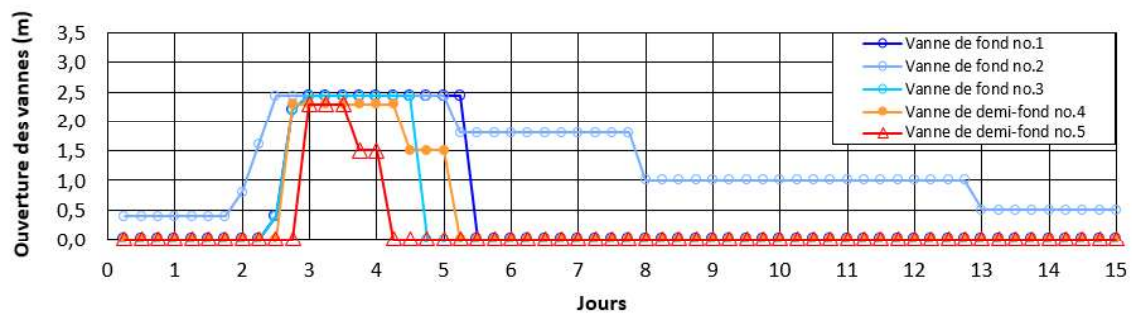
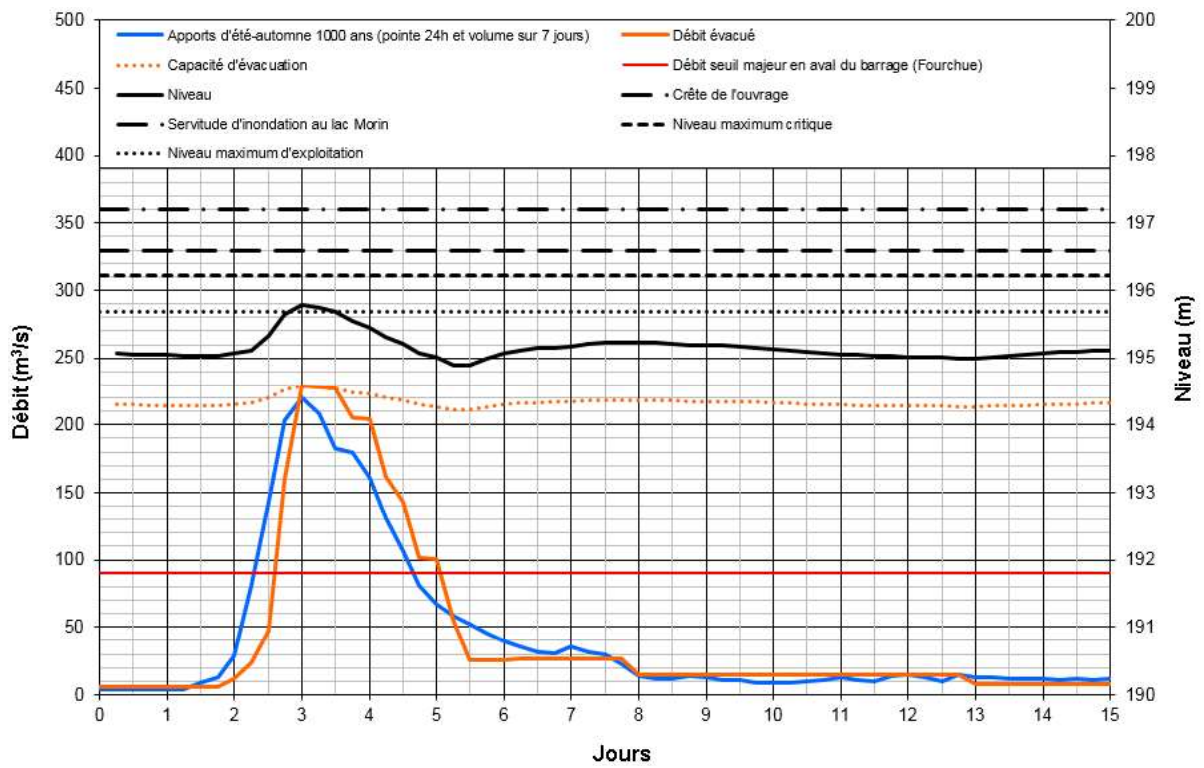


Figure A- 12 : Laminage de la crue d'été-automne 1 000 ans