

Sécurisation du barrage de Sainte Cécile d'Andorge

Emprises de retenue normale et de PHE

Légende

- Parcelles cadastrales
- Emprise des PHE (267,2 m NGF)
- Emprise de retenue normale (242 m NGF)

Fond Google Satellite



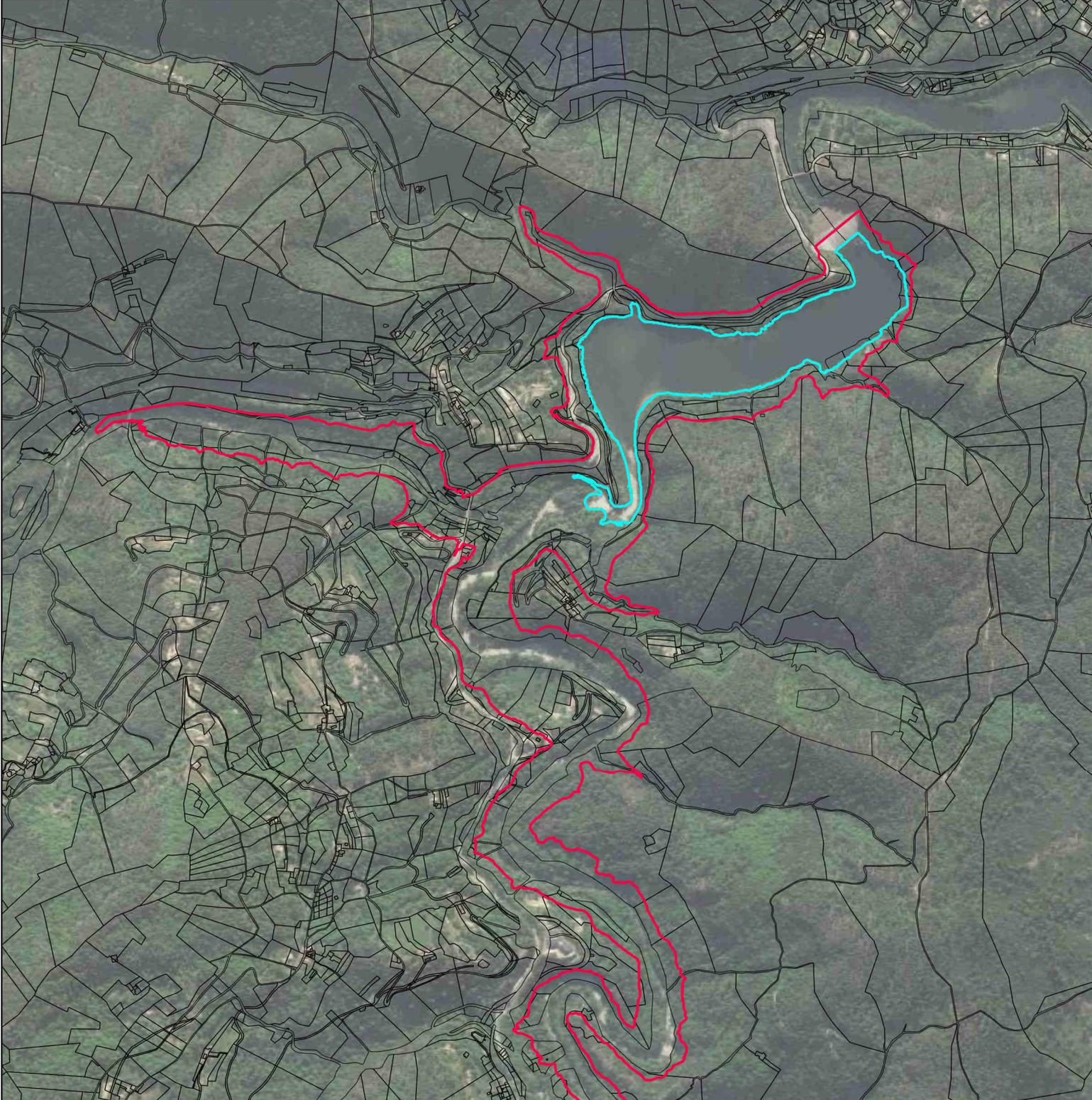
Septembre 2023

0 100 200 300 m



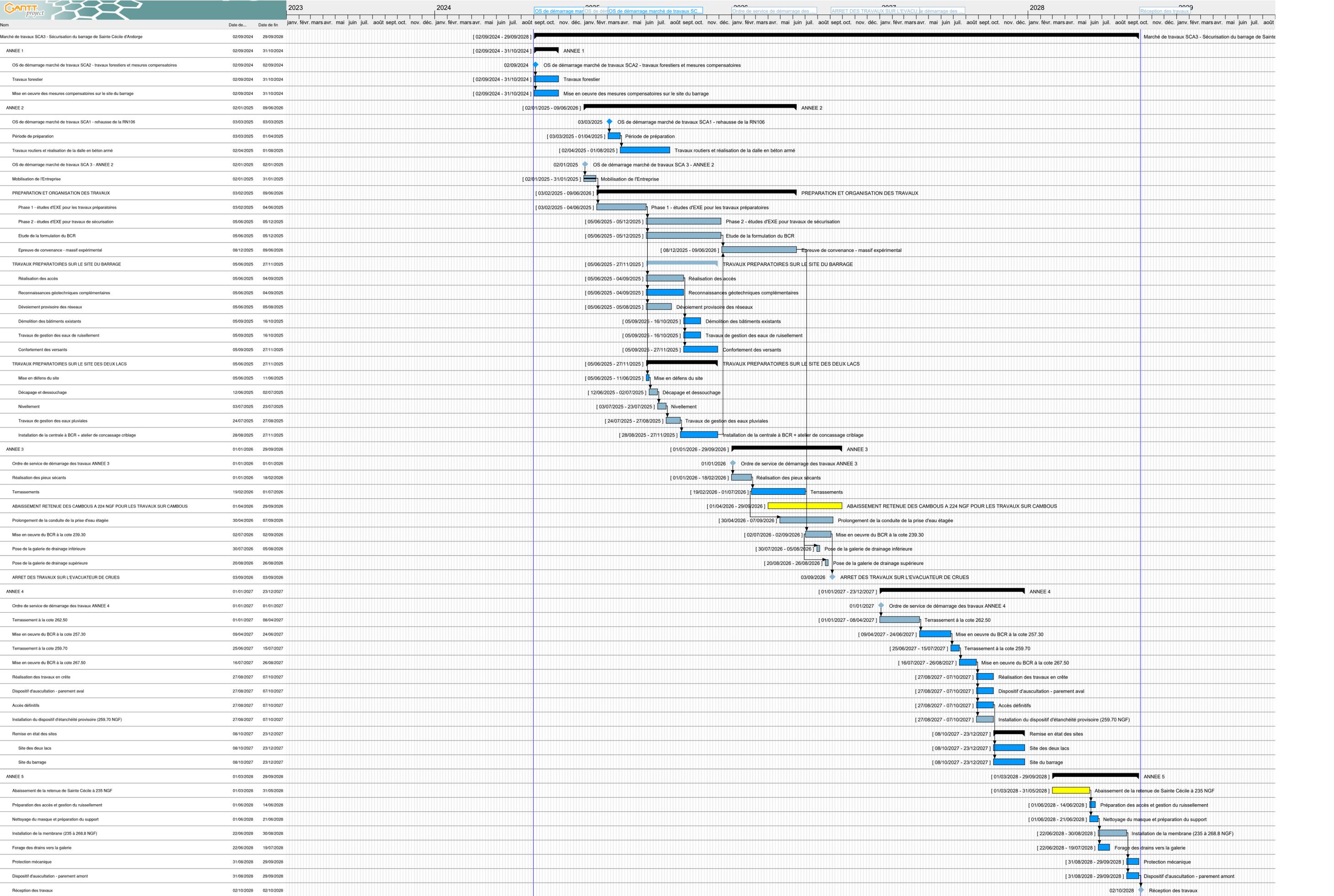
Réalisé par : EVN

Vérifié par : OMU



ANNEXE 4 PLANNING DES TRAVAUX

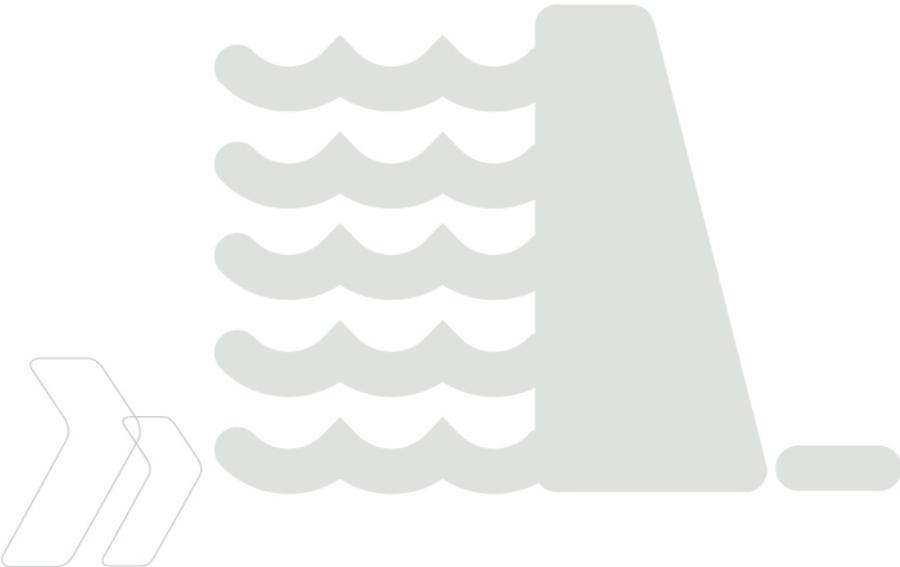
Diagramme de Gantt



ANNEXE 5 ETUDE HYDROLOGIQUE



Barrages



DOSSIER DE REVISION SPECIALE

Actualisation des études hydrologiques
des barrages de Sainte-Cécile
d'Andorge et de Sénéchas

⊕
DEPARTEMENT DU
GARD

Rapport n° : RM12-09
Révision n° : F
Date : Octobre 2015

• Votre contact :
• Akim SALMI
• salmi@isl.fr

Rapport

ISL Ingénierie – 65 av.
Clément Ader – 34170
Castelnau-le-Lez
FRANCE
Tél. : +33 4 67 54 51 88
Fax : +33 4 67 54 52 05

www.isl.fr

HYDRIS hydrologie



SOMMAIRE

1	CADRE GENERAL DES ETUDES	11
1.1	CONTEXTE DE L'ETUDE	11
1.2	OBJECTIFS DE L'ETUDE	11
1.3	LISTE DES ETUDES EXPLOITEES	11
1.4	RESULTATS DE L'ETUDE HYDROLOGIQUE DE REFERENCE	12
1.5	JUSTIFICATION DE L'ACTUALISATION DE L'ETUDE HYDROLOGIQUE DE 2008	14
1.5.1	PREAMBULE	14
1.5.2	ECART ENTRE PREVISION ET MESURE DES ALTITUDES MAXIMALES DE RETENUE	15
1.5.3	EVOLUTION DE SHYPRE	16
1.5.4	EVOLUTION DES COTES DE REFERENCE	17
2	PRESENTATION GENERALE DES AMENAGEMENTS	18
2.1	BARRAGE DE STE-CECILE	18
2.1.1	PRESENTATION GENERALE DU BARRAGE	18
2.1.2	FICHE SYNOPTIQUE DU BARRAGE DE STE-CECILE	19
2.1.3	CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT	21
2.1.4	LOI HAUTEUR-SURFACE-VOLUME	22
2.1.5	DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DE L'EVACUATEUR DE CRUE DE STE- CECILE	22
2.2	BARRAGE DE SENECHAS	25
2.2.1	PRESENTATION GENERALE	25
2.2.2	FICHE SYNOPTIQUE DU BARRAGE DE SENECHAS	26
2.2.3	CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT	27
2.2.4	LOI HAUTEUR / VOLUME	28
2.2.5	DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DE L'EVACUATEUR DE CRUE DE SENECHAS	28
2.2.5.1	Consignes de gestion	28
2.2.5.2	Loi d'évacuation du barrage de Sénéchas	29
2.3	COMPARAISON DES MORPHOLOGIES DES BASSINS VERSANTS	29

3	SITUATION DU BASSIN VERSANT PAR RAPPORT AUX EVENEMENTS REGIONAUX GENERALISES	32
3.1	CARTOGRAPHIE DES EVENEMENTS GENERALISES	32
3.2	EVENEMENT DE SEPTEMBRE 1958	32
3.3	EVENEMENT DE NOVEMBRE 1977	32
3.4	EVENEMENT D'OCTOBRE 1988	33
3.5	EVENEMENT DE SEPTEMBRE 2002	33
3.6	EVENEMENT DE SEPTEMBRE 2005	33
3.7	EVENEMENT DE NOVEMBRE 2008	33
4	VALORISATION DES DONNEES ENREGISTREES AUX BARRAGES	34
4.1	METHODE DE RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES	34
4.2	OBJECTIFS DE LA RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES	36
4.3	RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES DE STE-CECILE	36
4.4	RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES DE SENECHAS	40
4.5	DISTRIBUTION DES VOLUMES ENTRANTS	44
4.6	COMPARAISON POUR LES PLUS FORTES CRUES OBSERVEES	46
4.7	STATISTIQUES SUR LES PLUIES OBSERVEES CUMULS AU PAS DE TEMPS JOURNALIER	47
4.8	CUMULS JOURNALIERS AU BARRAGE DE STE-CECILE	49
4.9	CUMULS JOURNALIERS AU BARRAGE DE SENECHAS	50
4.10	CUMULS AUX PAS DE TEMPS 6 H	50
4.10.1	POSTES PLUVIOGRAPHIQUES	50
4.10.2	DESCRIPTION DES APPROCHES	51
4.10.3	APPROCHE 1 DE P6H PAR LA FORMULE DE MONTANA	51
4.10.4	APPROCHE 2 DE P6H A PARTIR DES POSTES PLUVIOGRAPHIQUES	52
4.10.5	SYNTHESE POUR LES PLUIES DE 6H	53
5	APPLICATION DE LA METHODE SHYPRE	54
5.1	PRESENTATION DE LA METHODE	54
5.2	CUMULS PLUVIOMETRIQUES DE REFERENCE SHYPRE	54
5.3	CALAGE DES PARAMETRES DU MODELE PLUIE-DEBIT GRS	57
5.4	RESULTATS SHYPRE	63

5.4.1	DEBITS DE POINTE DES CRUES	63
5.4.2	COTES DANS LES RETENUES	65
5.5	IMPACT D'UNE COTE INITIALE INFERIEURE A LA COTE NOMINALE SUR LA DISTRIBUTION DE FREQUENCE DES COTES MAXIMALES DU PLAN D'EAU DU BARRAGE DE SAINTE CECILE	66
5.6	REPRESENTATIVITE CLIMATOLOGIQUE DE LA PERIODE 1976- 2012	68
5.7	ANALYSE MENSUELLE DES VARIABLES DE SHYPRE DU BASSIN VERSANT DU BARRAGE DE STE-CECILE [4]	70
5.8	APPLICATION DE SHYPRE SUR LES 2 PERIODES « TRAVAUX » DU BARRAGE DE STE-CECILE	73
5.9	TRANSPOSITION ET LAMINAGE DES EVENEMENTS EXTREMES REGIONAUX PAR LE MODELE GRS	74
5.10	HYDROGRAMMES MONOFREQUENCE	75
6	ACTUALISATION DU GRADEX	76
6.1	PRESENTATION DE LA METHODE	76
6.2	ESTIMATION DE LA RETENTION	76
6.2.1	RETENTION DEDUITE DES PIVOTS	76
6.3	DETERMINATION DES V24H	77
6.4	DETERMINATION DES V6H	77
6.5	ESTIMATION DES COEFFICIENTS DE POINTE	78
6.5.1	METHODE D'ESTIMATION	78
6.5.2	COEFFICIENTS DE POINTE DU BARRAGE DE STE-CECILE	78
6.5.3	COEFFICIENTS DE POINTE DU BARRAGE DE SENECHAS	80
6.5.4	ESTIMATION DES DEBITS DE POINTE DES CRUES RARES	81
6.6	CONSTRUCTION DES HYDROGRAMMES DE REFERENCE	82
6.7	LAMINAGE DES HYDROGRAMMES DU GRADEX	84
7	CHOIX DE L'HYDROLOGIE DE REFERENCE	85
7.1	BARRAGE DE STE-CECILE	85
7.2	BARRAGE DE SENECHAS	86
8	CONSEQUENCE POUR LA SUITE DES ETUDES D'AVP DE STE-CECILE	87

8.1	CALAGE DE L'EVACUATEUR DE CRUE _____	87
8.2	PROTECTION CONTRE LES CRUES DU CHANTIER _____	87
8.3	CHOIX DES HYDROGRAMMES A LAMINER _____	87
9	ANNEXE 1 _____	89
10	ANNEXE 2 : RESULTATS DE LA METHODE DU GRADEX _____	91
11	ANNEXE 3 : PRESENTATION DE LA METHODE SHYPRE _____	95
12	ANNEXE 4 : CARTOGRAPHIE _____	98
13	ANNEXE 5 : CALCUL DU TEMPS DE CONCENTRATION SUR UN BASSIN VERSANT _____	104
14	ANNEXE 6 : ACTUALISATION DE L'HYDROLOGIE DES BARRAGES DE CLASSE A DU DEPARTEMENT DU GARD PAR LA METHODE SHYPRE » – RAPPORT PROVISOIRE V6– HYDRIS HYDROLOGIE – JUIN 2013 [3]_____	105
15	ANNEXE 7 : CALCUL DES DISTRIBUTIONS DE FREQUENCE DES COTES DU PLAN D'EAU DU BARRAGE DE SAINTE CECILE D'ANDORGE SUR 2 PERIODES « TRAVAUX » PAR LA METHODE SHYPRE – RAPPORT PROVISOIRE – V1 – HYDRIS HYDROLOGIE – MAI 2013 [4]_____	106

Table des figures

Figure 1 : distribution des Zmax dans la retenue de Sénéchas.....	13
Figure 2 : distribution des Zmax dans la retenue de Sainte Cécile.....	14
Figure 3 : ajustement de Gumbel des cotes observées	15
Figure 4 : ajustement de Gumbel des cotes observées et résultats Shypre 2008	15
Figure 5 : Loi hauteur / volume	22
Figure 6 : coupe dans la tulipe.....	23
Figure 7 : vue en plan de la corolle déversante	23
Figure 8 : loi d'évacuation du barrage de Sainte-Cécile	24
Figure 10 : loi H/V du barrage de Sénéchas	28
Figure 11 : loi d'évacuation du barrage de Sénéchas	29
Figure 12 : limnigramme et hydrogramme –crue nov 2008	35
Figure 13 : limnigramme et hydrogramme –crue dec 96	35
Figure 14 : comparaison des distributions des V24h à Sénéchas et Sainte Cécile	44
Figure 15 : comparaison des distributions des V6h à Sénéchas et Sainte Cécile	45
Figure 16 : comparaison de V6h et V24h pour des crues communes	46
Figure 17 : pluies journalières observées et ajustements.....	48
Figure 18 : Pj SHYPRE 2010 et Pj de bassin ajustées (Gumbel) pour Sainte-Cécile.....	55
Figure 19 : Pj SHYPRE 2010 et Pj de bassin ajustées (Gumbel) pour Sénéchas	55
Figure 20 : distribution des P6h – barrages de Sainte Cécile et Sénéchas	56
Figure 21 : SHYPRE 2010 - V6h (décembre/mai)- barrage de Sainte Cécile.....	57
Figure 22 : SHYPRE 2010 - V24h (décembre/mai)- barrage de Sainte Cécile.....	58
Figure 23 : SHYPRE 2010 - V6h (juin/novembre) barrage de Sainte Cécile	58
Figure 24 : SHYPRE 2010 - V24h (juin/novembre)- barrage de Sainte Cécile.....	58
Figure 25 : SHYPRE 2010 - V6h (décembre/mai) barrage de Sénéchas	59
Figure 26 : SHYPRE 2010 - V24h (décembre/mai)- barrage de Sénéchas.....	59
Figure 27 : SHYPRE 2010 - V6h (juin/novembre)- barrage de Sénéchas	60
Figure 28 : SHYPRE 2010 - V24h (juin/novembre)- barrage de Sénéchas	60
Figure 29 : SHYPRE 2010 – V6h (déc/mai)- barrage de Sénéchas et Ste-Cécile	61
Figure 30 : SHYPRE 2010 – V24h (déc/mai)- barrage de Sénéchas et Ste-Cécile	61
Figure 31 : SHYPRE 2010 – V6h (juin/nov)- barrage de Sénéchas et Ste-Cécile	62
Figure 32 : SHYPRE 2010 – V24h (juin/nov)- barrage de Sénéchas et Ste-Cécile	62
Figure 33 : distribution de fréquence des débits de pointe –Sainte Cécile	63
Figure 34 : distribution de fréquence des débits de pointe –Sénéchas	63
Figure 35 : comparaison de distributions de fréquence des débits.....	64
Figure 36 : cote dans la retenue de Sainte-Cécile	65

Figure 37 : cote dans la retenue de Sénéchas.....	65
Figure 38 : distribution de fréquence des cotes – impact de la cote initiale du plan d'eau....	67
Figure 39 : distribution de fréquence des pluies journalières au poste de Collet de Deze [3]	68
Figure 40 : distribution de fréquence des pluies journalières au poste de Cassagnas [3].....	69
Figure 41 : évolution mensuelle des paramètres de Shypre	71
Figure 42 : variations de Sclim mensuel	72
Figure 43 : distribution de fréquence des saisons « travaux » des cotes du plan d'eau	73
Figure 44 : hydrogrammes entrants des évènements extrêmes régionaux	74
Figure 45 : hydrogrammes monofréquence non centrés 10 000 et 100 000 ans.....	75
Figure 46 : Cp6h en fonction de Q6h.....	78
Figure 47 : Cp24h en fonction de Q24h.....	79
Figure 48 : Cp6h en fonction de Q6h - Sénéchas	80
Figure 49 : Cp24h en fonction de Q24h - Sénéchas	80
Figure 50 : Ste-Cécile - hydrogramme 10 000 ans du gradex (G24h=43 mm)	82
Figure 51 : Sénéchas - hydrogramme 5 000 ans du gradex	83
Figure 52 : laminage de l'hydrogramme décamillénal – Sainte Cécile	84
Figure 53 : hydrogrammes conduisant à Z10 000 dans la retenue de Sainte Cécile.....	88
Figure 54 : Pivot à 10 ans - 24h - Sainte Cécile.....	91
Figure 55 : Pivot à 50 ans - 24h - Sainte Cécile.....	91
Figure 56 : Pivot à 10 ans - 24h - Sénéchas	92
Figure 57 : Pivot à 50 ans - 24h - Sénéchas	92
Figure 58 : Pivot à 10 ans - 6h – Sainte Cécile	93
Figure 59 : Pivot à 50 ans - 6h – Sainte Cécile	93
Figure 60 : Pivot à 10 ans - 6h – Sénéchas	94
Figure 61 : Pivot à 50 ans - 6h – Sénéchas	94

Table des tableaux

Tableau 1 : résultats pour la crue de projet – barrage de Sainte Cécile	12
Tableau 2 : résultats pour la crue de projet – barrage de Sénéchas	13
Tableau 3 : résultats des ajustements des cotes observées et de l'approche Shypre	16
Tableau 4 : comparaison des cotes topographiques.....	17
Tableau 5 : caractéristiques du bassin versant de Sainte Cécile	21
Tableau 6 : estimation du temps de concentration du bassin versant de Sainte Cécile.....	21
Tableau 7 : valeurs caractéristiques de la loi H/V – Sainte Cécile.....	22
Tableau 8 : loi d'évacuation des évacuateurs du barrage de Sainte Cécile.....	24

Tableau 9 : caractéristiques du bassin versant de Sénéchas.....	27
Tableau 10 : temps de concentration du bassin versant de Sénéchas.....	27
Tableau 11 : valeurs caractéristiques de la loi H/V – Sénéchas.....	28
Tableau 12 : caractéristiques morphologiques des bassins de Ste-Cécile et Sénéchas	30
Tableau 13 : occupation des sols des bassins versants de Sainte Cécile et Sénéchas	31
Tableau 14 : crues retenues sur la période annuelle - barrage de Sainte Cécile	37
Tableau 15 : crues retenues sur la période janvier à août - barrage de Sainte Cécile.....	38
Tableau 16 : crues retenues sur la période septembre à décembre – Ste-Cécile	39
Tableau 17 : crues retenues sur la période annuelle - barrage de Sénéchas.....	41
Tableau 18 : crues retenues sur la période janvier à avril - barrage de Sénéchas	42
Tableau 19 : crues retenues sur la période septembre à décembre - barrage de Sénéchas	43
Tableau 20 : postes aux séries longues.....	47
Tableau 21 : coefficients d'abattement 24h – Sainte Cécile.....	49
Tableau 22 : PJ de poste et PJ de bassin - Sainte Cécile.....	49
Tableau 23 : coefficients d'abattement 24h – Sénéchas	50
Tableau 24 : PJ de poste et PJ de bassin - Sénéchas.....	50
Tableau 25 : postes pluviographiques	50
Tableau 26 : PJ et P6h de bassin - Sainte Cécile	51
Tableau 27 : PJ et P6h de bassin - Sénéchas	51
Tableau 28 : P6h aux postes pluviographiques	52
Tableau 29 : coefficients d'abattement	52
Tableau 30 : P6h de bassin	52
Tableau 31 : P6h du bassin de Sainte Cécile	53
Tableau 32 : P6h du bassin de Sénéchas	53
Tableau 33 : PJ et P6h SHYPRE - Sainte Cécile et Sénéchas	56
Tableau 34 : résultats Shypre	64
Tableau 35 : valeurs des variables de Shypre	71
Tableau 36 : valeurs de Scim.....	72
Tableau 37 : résultats du laminage des évènements extrêmes régionaux	74
Tableau 38 : rétention.....	76
Tableau 39 : V24h issus du gradex – Sainte Cécile et Sénéchas	77
Tableau 40 : V6h issus du gradex – Sainte Cécile- Sénéchas.....	77
Tableau 41 : coefficients de pointe du bassin de Ste-Cécile.....	79
Tableau 42 : coefficients de pointe du bassin de Sénéchas.....	81
Tableau 43 : résultats pour la crue de période de retour 10 000 ans – Sainte Cécile.....	81
Tableau 44 : résultats pour la crue de période de retour 100 ans – Sainte Cécile	81

Tableau 45 : résultats pour la crue de période de retour 5 000 ans – Sénéchas.....	82
Tableau 46 : résultats des calculs de laminage	84
Tableau 47 : synthèse des résultats pour la crue décennale – Sainte Cécile	85
Tableau 48 : résultats du laminage - Shypre.....	85
Tableau 49 : résultats de la transposition des hyétogrammes historiques	86
Tableau 50 : synthèse pour la période de retour 5 000 ans - Sénéchas	86
Tableau 51 : laminage de la crue de période de retour 5 000 ans - Sénéchas.....	86

1 CADRE GENERAL DES ETUDES

1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Après les catastrophiques inondations de septembre et octobre 1958 (40 morts), le Département du Gard a lancé un programme de protection contre les inondations basé sur la construction de 5 barrages écrêteurs sur les bassins des Gardons, du Vidourle et de la Cèze. Parmi ces barrages figurent Sainte-Cécile d'Andorge et Sénéchas.

Le présent document s'inscrit dans le cadre de la mission confiée à ISL par le Conseil Général du Gard : *maîtrise d'œuvre pour la mise en sécurité du complexe hydraulique formé par les barrages départementaux de Sainte-Cécile d'Andorge et des Cambous - phase d'avant-projet.*

Il présente une actualisation de l'étude hydrologique réalisée en 2008 par BRLi-Hydris pour les barrages de Sainte-Cécile et Sénéchas. Les motivations de cette reprise sont présentées au § 1.5

Dans le cadre de cette révision, Hydris-hydrologie est intervenu pour la mise en application de la méthode SHYPRE.

Le présent rapport comporte les cartes suivantes insérées en annexe 4 :

- Carte 1 : Cumul sur 2 jours du 2 octobre au 4 octobre 1988,
- Carte 2 : Cumul sur 2 jours du 8 septembre au 10 septembre 2002,
- Carte 3 : Cumul sur 2 jours du 5 septembre au 7 septembre 2005,
- Carte 4 : Cumul sur 2 jours du 30 septembre au 1 octobre 1958,
- Carte 5 : Cumul sur 2 jours du 22 au 24 octobre 1977,
- Carte 6 : Cumul sur 2 jours du 2008,
- Carte 7 : Localisation des postes pluviométriques aux séries longues.

1.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'étude doit permettre de définir les crues du barrage de Ste-Cécile d'Andorge pour différentes périodes de retour en débit, en volume et cotes du plan d'eau en vu :

- du dimensionnement du nouvel évacuateur de crues du barrage de Sainte-Cécile d'Andorge,
- de l'évaluation de la sécurité en cours de chantier

Compte tenu de la proximité géographique et typologique du barrage de Sénéchas, il a été décidé de reprendre également l'hydrologie du bassin versant de Sénéchas. L'analyse du bassin versant du barrage de Sénéchas permettra de consolider les données obtenues pour Sainte Cécile, en termes de lame d'eau ruisselées.

1.3 LISTE DES ETUDES EXPLOITEES

Les études suivantes ont été exploitées :

- [1] « Reprise des études hydrologiques des barrages départementaux » – Conseil Général du Gard (BRLi –Hydris) – 2008
- [2] « Barrages de Sainte Cécile d'Andorge et de Sénéchas : comparaison de caractéristiques hydrologiques de leur bassin versant » – Conseil Général du Gard–Hydris hydrologie – juillet 2012

- [3] « Actualisation de l'hydrologie des barrages de classe A du département du Gard par la méthode SHYPRE » – rapport provisoire V6– Hydris hydrologie – juin 2013 (annexe 6).
- [4] « Calcul des distributions de fréquence des cotes du plan d'eau du barrage de Sainte Cécile d'Andorge sur 2 périodes « travaux » par la méthode Shypre – rapport provisoire – V1 – Hydris Hydrologie – mai 2013 (annexe 7)

1.4 RESULTATS DE L'ETUDE HYDROLOGIQUE DE REFERENCE

L'événement majeur des 8 et 9 septembre 2002 a été caractérisé par des précipitations exceptionnelles sur la moyenne vallée des Gardons et le haut bassin du Vidourle avec plus de 500 mm en 24 heures sur environ 750 km². Cet événement a conduit le département du Gard à la révision de l'hydrologie de ses barrages dont celui de STE et des Cambous.

L'hydrologie des crues a été étudiée dans le cadre de [1].

L'étude a consisté, dans un premier temps, à une analyse statistique de la pluviométrie sur les bassins versants de STE, des Cambous et de Sénéchas. Cette analyse a porté sur les pluies journalières maximales annuelles, les pluies de courtes durées et les pluies de longues durées.

Dans un second temps les hydrogrammes de projet ont été déterminés pour chaque barrage selon trois méthodes différentes :

- ajustement statistique des pluies journalières maximales annuelles selon une loi de Gumbel et application de la méthode du Gradex,
- ajustement statistique des pluies selon une loi de Gumbel, construction de hyétogrammes iso-fréquentiels de type Kieffer et application du modèle hydrologique SCS,
- application de la méthode SHYPRE : génération stochastiques de pluies horaires puis transformation pluie-débit à l'aide du modèle de type GRs associé.

La méthode Shypre permet de générer de très longues chroniques de pluies horaires et d'hydrogrammes de crue. Afin de stabiliser les quantiles, le nombre d'années de simulation est 50 fois supérieur à la période de retour de la crue recherchée (500 000 années simulées pour une crue de période de retour 10 000 ans).

Au cours des simulations SHYPRE, les hydrogrammes de crues répondant à des critères de débits ou de volumes sont extraits.

Le tableau suivant présente les résultats pour les crues de projet :

	Barrage de Sainte Cécile – T =10 000 ans		
	Gradex	Kieffer et SCS	Shypre 2008
Pluie sur 24h	510 mm	510 mm	687 mm
Lame d'eau ruisselée sur 24h	407 mm	458 mm	605 mm
Déficit de ruissellement sur 24h	103 mm	52 mm	82 mm
Débit de pointe entrant	2174 m ³ /s	1806 m ³ /s	2728 m ³ /s

Tableau 1 : résultats pour la crue de projet – barrage de Sainte Cécile

	Barrage de Sénéchas – T = 5 000 ans		
	Gradex	Kieffer et SCS	Shypre 2008
Pluie sur 24h	431 mm	431 mm	692 mm
Lame d'eau ruisselée sur 24h	392 mm	380 mm	570 mm
Déficit de ruissellement sur 24h	39 mm	51 mm	122 mm
Débit de pointe entrant	1991 m ³ /s	1564 m ³ /s	2593 m ³ /s

Tableau 2 : résultats pour la crue de projet – barrage de Sénéchas

L'hydrogramme de projet obtenu par la méthode SHYPRE a été retenu par le Département du Gard. Il a été considéré que l'hydrogramme de projet des Cambous était celui correspondant à l'hydrogramme écrêté en sortie du barrage de STE.

Dans un troisième temps les hydrogrammes de projet ont été laminés dans les retenues de Sainte Cécile et Sénéchas.

Parallèlement, une approche « cote de projet » a été mise en œuvre. Elle a consisté à étudier directement la distribution de fréquence des cotes atteintes dans la retenue. Pour cela, HYDRIS-hydrologie a alors développé, avec l'appui scientifique de l'IRSTEA d'Aix-en-Provence, l'intégration dans SHYPRE d'un module de laminage permettant de simuler le comportement hydraulique des barrages.

L'ensemble des cotes du plan d'eau maximales atteintes (Zmax) obtenues peut alors être traité statistiquement pour aboutir à la distribution de fréquence des Zmax et à la Cote Projet (cote maximale du plan d'eau du barrage (Zmax) de période de retour 5 000 ans ou 10 000 ans).

Les distributions de fréquence des Zmax obtenues figurent sur les graphiques suivants.

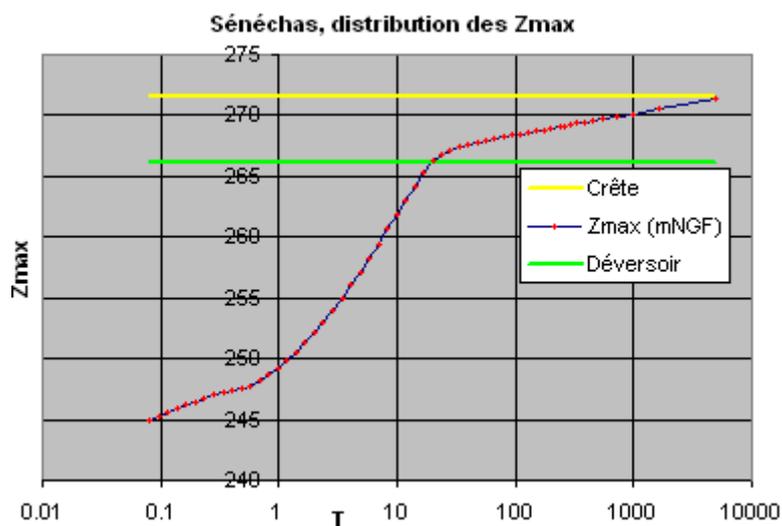


Figure 1 : distribution des Zmax dans la retenue de Sénéchas

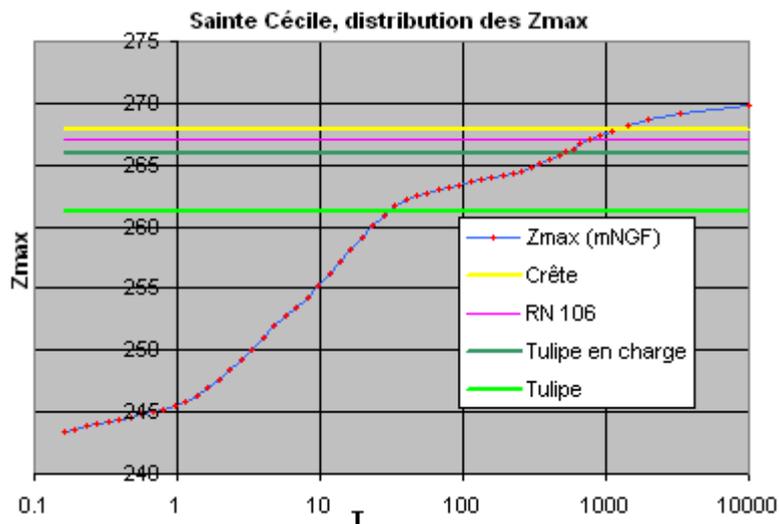


Figure 2 : distribution des Zmax dans la retenue de Sainte Cécile

L'approche « cote de projet » a été retenue par le Département du Gard et le comité de pilotage pour définir les cotes des PHE :

- Sainte Cécile : $Z^{10\,000\text{ ans}} = 269,90\text{ m NGF}$,
- Sénéchas : $Z^{5\,000\text{ ans}} = 271,50\text{ m NGF}$.

1.5 JUSTIFICATION DE L'ACTUALISATION DE L'ETUDE HYDROLOGIQUE DE 2008

1.5.1 PREAMBULE

Le chapitre suivant présente les points qui ont conduit à envisager une actualisation de l'étude hydrologique réalisée entre 2005 et 2008 :

- des écarts notables entre les résultats de l'approche en cote de SHYPRE et les cotes observées dans la retenue,
- des évolutions techniques relatives à la méthode SHYPRE.
- l'évolution de certaines cotes de référence suite à un levé topographique (tulipe, parapet et route),

Par ailleurs, au cours de l'actualisation, certaines corrections importantes ont été apportées :

- la surface du bassin versant a été portée à 115,5 km² (contre 109 km² dans l'étude de 2008),
- la reconstitution des crues a mis en évidence un certain nombre d'anomalies dans les données qui ont pu affecter les résultats de [1] avec :
 - . des anomalies sur les limnigrammes (erreur de saisie ou dysfonctionnement des capteurs) conduisant à des erreurs dans la reconstitution des débits de pointe et des volumes des crues,
 - . des erreurs de reconstitution des crues de Sénéchas liées à la non prise en compte de la période de stockage/déstockage.

1.5.2 ECART ENTRE PREVISION ET MESURE DES ALTITUDES MAXIMALES DE RETENUE

Dans le cadre des AVP et avec pour objectif de définir les contraintes en phase chantier, ISL a procédé en 2012 à une analyse statistique des niveaux observés dans la retenue de 1975 à 2011 (37 années). La figure suivante présente la distribution des niveaux maximaux annuels observés en unité gumbel. Un ajustement est proposé en bleu jusqu'à 4,6 unités gumbel (correspondant à T=100 ans) pour des valeurs qui sont toutes situées sous la cote de déversement de la tulipe (261,2 m NGF).

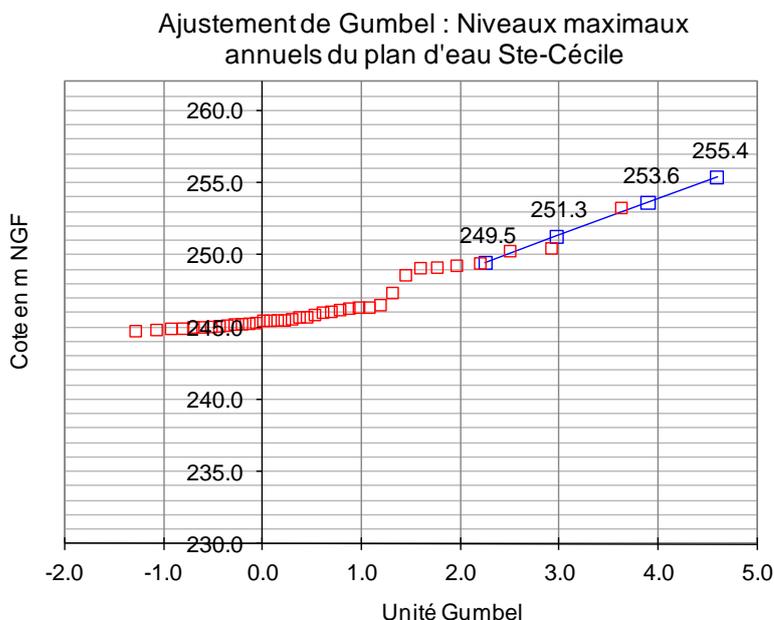


Figure 3 : ajustement de Gumbel des cotes observées

Sur la figure suivante, ces résultats sont comparés à la distribution de niveau obtenue par l'approche en cote de SHYPRE en 2008.

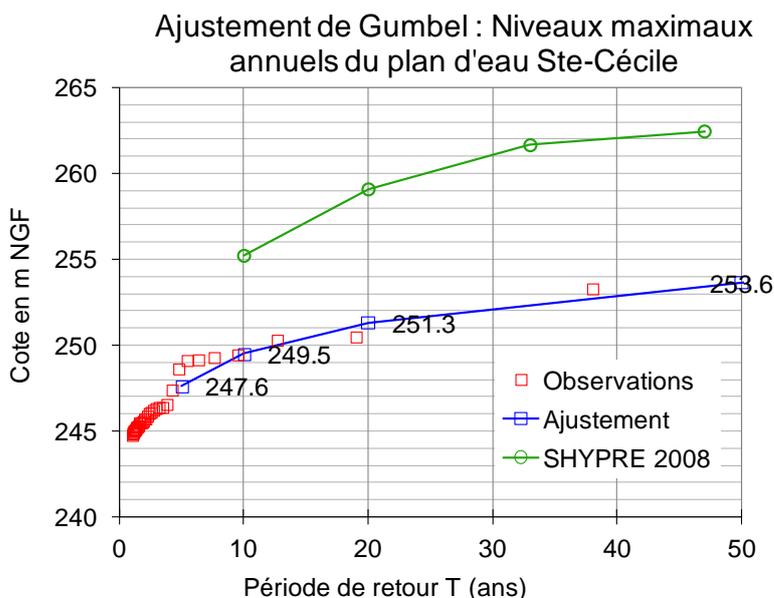


Figure 4 : ajustement de Gumbel des cotes observées et résultats Shypre 2008

Comme le montre le tableau suivant, les écarts sont importants entre les observations et l'approche en cote SHYPRE de 2008.

	T=10 ans	T=50 ans	T=100 ans
Ajustement des cotes observées	249,5 m NGF	253,6 m NGF	255,4 m NGF
Approche en cote Shypre 2008	255,2 m NGF	~ 262,5 m NGF	263,5 m NGF

Tableau 3 : résultats des ajustements des cotes observées et de l'approche Shypre

Ainsi, la cote estimée de période de 10 ans selon l'approche Shypre (255,2 m NGF) :

- à une période de retour de l'ordre de 100 ans selon l'ajustement des cotes observées ;
- n'a jamais été atteinte en 37 ans (la cote maximale observée depuis le suivi des cotes atteintes dans le barrage est de 253,3 m NGF).

L'hypothèse d'une pluviométrie plus faible sur la période considérée (1975-2011) peut être écartée à partir des résultats de [1] qui a conclu l'inverse : l'échantillon récent présente une distribution de pluies journalières plus défavorable que la distribution sur un siècle.

Ces écarts résultent de la méthodologie de calage choisie dans [1] qui s'est basée sur une approche régionale à partir des principales crues observées sur les 5 barrages du département du Gard sur lesquels portait l'étude.

Au vu du décalage entre les cotes observées et les cotes simulées, la mise en œuvre d'un recalage basé sur la reproduction de la distribution des volumes de crues entrants observés depuis la mise en service des barrages est apparue nécessaire.

1.5.3 EVOLUTION DE SHYPRE

La méthode SHYPRE est une méthode de Simulation d'Hydrogrammes pour la PREDétermination des crues. Elle associe un générateur stochastique de pluies horaires et une transformation de la pluie en débit. Elle permet de générer de très longues chroniques de pluies horaires (sur 100 000 ans, par exemple) et d'hydrogrammes de crue. Elle a été développée par l'IRSTEA en partenariat avec Météo-France et la Direction de Prévention des Pollutions et des Risques (DPPR) du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable. Une présentation de la méthode figure en annexe 3.

La dernière version de SHYPRE (version 2010) a été adoptée pour la présente étude. Elle intègre les derniers développements menés par IRSTEA sur la modélisation stochastique des pluies horaires (« Impacts du changement climatique sur les pluies extrêmes par l'utilisation d'un générateur stochastique de pluie ». Mémoire de Thèse, Philippe Cantet, 2009). Ces développements visent à améliorer les résultats notamment en région montagneuse où la version précédente (2008) avait tendance à surestimer les quantiles aux vues des observations. Ils portent sur la modélisation de :

- la variable RXP (rapport pluie maximale en 1h / volume total d'une averse principale) par une loi log-normale tronquée dont les paramètres dépendent de la durée de l'averse ;
- la dépendance entre le volume et la durée d'une averse par la théorie des copules (copule de Frank) ;
- la dépendance entre les averses successives d'un même évènement par la théorie des copules (copule de Gumbel).

Ces développements conduisent à une meilleure modélisation des pluies en une heure et à une meilleure prise en compte du phénomène de persistance des averses générant les cumuls de pluies extrêmes.

1.5.4 EVOLUTION DES COTES DE REFERENCE

Le tableau suivant présente des écarts relevés entre le plan topographique du barrage de Ste-Cécile réalisé en 2012 et les valeurs prises en compte dans l'étude de 2008 (issues de la documentation de référence du barrage).

Cote	Cote selon la documentation	Cote selon le levé topographique	Ecart
Parapet	267,8 m NGF	268,1 à 268,4 m NGF	+0,3 à +0,6 m
Débordement en rive gauche	267,0 m NGF	267,7 NGF	+0,7 m
Seuil de la tulipe	261,2 m NGF	261,34 NGF	+0,14 m

Tableau 4 : comparaison des cotes topographiques

Les 3 cotes de débordements du barrage sont modifiées ce qui conduit à devoir réviser les résultats des calculs de laminage.

Il existe une incertitude de l'ordre de 0,2 m sur la cote de déversement des pertuis de laminage (cote 242 m NGF). Cette cote n'a pas été vérifiée du fait des difficultés d'accès et parce qu'elle a peu d'influence sur les résultats (de l'ordre de 0,3% pour un remplissage maximal).

2 PRESENTATION GENERALE DES AMENAGEMENTS

2.1 BARRAGE DE STE-CECILE

2.1.1 PRESENTATION GENERALE DU BARRAGE

Le barrage de Sainte-Cécile a été achevé en 1967 sur le Gardon d'Alès dans le département du Gard. Il est situé à environ 1,6 km en amont du barrage des Cambous et contrôle un bassin versant de 116 km². Outre sa fonction d'écrêteur, il assure le soutien estival des étiages.

Il s'agit d'un barrage en enrochements de 45 m de hauteur sur fondation et de 154 m de longueur en crête. Son étanchéité est assurée par un masque amont en béton bitumineux. L'évacuation des crues est assurée par deux pertuis de demi-fond et une corolle débitant dans deux galeries d'évacuation traversant le barrage. Le détail de fonctionnement de l'évacuateur est présenté au § 2.1.5.

Le soutien d'étiage est assuré par 4 vannes de restitution étagées.



2.1.2 FICHE SYNOPTIQUE DU BARRAGE DE STE-CECILE

Les caractéristiques du barrage sont présentées dans le tableau suivant.

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DE L'OUVRAGE	
Type	Barrage en enrochements avec masque amont en béton bitumineux
Volume du barrage	244 000 m ³
Fonctions	Usage principal : écrêtement des crues Usage secondaire : soutien d'étiage
Années de fin de construction	1967
Terrain de fondation	Gneiss et micashistes
Drainage	Galerie périmétrale de pied et voile de drainage
Hauteur au-dessus du TN aval	42 m (45 m sur fondation)
Longueur en crête	154 m (crête rectiligne)
Largeur en crête	6 m
Largeur maximale au niveau du TN	136 m
Fruit du parement amont	1,7H / 1V au-dessus de la cote 235,4 m NGF Vertical sous la cote 235,4 m NGF (batardeau type poids en béton)
Fruit du parement aval	1,4H / 1V avec 3 risbermes de 4,5 m Fruit moyen de 1,75 avec les risbermes
Cote de la crête	267,5 m NGF (arase du mur anti-vague à 268,10 m NGF)

HYDROLOGIE et RETENUE	
Bassin versant	115,5 km ² ¹
Cote exceptionnelle (PHE)	266,8 m NGF
Cote de la RN	242,0 m NGF (surverse sur les pertuis)
Cote minimale	230,5 m NGF
Surface / Volume sous la cote du déversoir (RN)	25 ha / 800 000 m ³ (+800 000 m ³ d'engrèvement)
Surface / Volume sous la cote des PHE	96 ha / 14 800 000 m ³
Débit décennal	1290 m ³ /s (selon étude de 1993) / 2728 m ³ /s selon [1]
Année du débit maximal connu	Les puits ne sont jamais entrés en service
Débit maximaux observés d'après la reconstitution des crues par ISL	519 m ³ /s en octobre 1977 419 m ³ /s en octobre 1995

OUVRAGES HYDRAULIQUES	
Evacuateur de crue	2 galeries de fond de 6 m de diamètre Chaque galerie est alimentée par : – un puits à seuil libre (longueur déversante de 22,8 m calée à 261,34 m NGF) – un pertuis de demi-fond (largeur 6 m et hauteur 1,5 m calé à 242,0 m NGF) Capacité totale sous les PHE : 920 m ³ /s (dont 300 m ³ /s dans les pertuis)
Ouvrages de vidange	une conduite 800 mm calée à 229,0 m NGF débouchant dans la galerie gauche une conduite 800 mm calée à 231,9 m NGF débouchant dans la galerie droite
Débit maximal de vidange	10 m ³ /s
Ouvrages de prise	4 conduites de prise 800 mm calées à 230,0 / 232,0 / 234,0 / 235,5 m NGF débouchant dans une unique conduite de 800 mm située entre les galeries de fond et débouchant en aval
Débit maximal de prise	5 m ³ /s

¹ La superficie du bassin versant drainé au droit du barrage de Sainte Cécile était jusqu'alors estimée à 109 km² dans la bibliographie.

2.1.3 CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT

Les caractéristiques géométriques du bassin versant de Sainte Cécile sont présentées dans le tableau suivant.

Surface	Altitude maximale	Altitude minimale	Chemin hydraulique le plus long	Pente du plus long chemin	Pente pondérée
115,5 km ²	1350 m NGF	230 m NGF	25,7 km	2,9 %	0,75 %

Tableau 5 : caractéristiques du bassin versant de Sainte Cécile

Dans le cadre de la présente étude, Hydris a procédé à une délimitation automatique du bassin versant à partir du MNT tandis qu'ISL a procédé à une délimitation sur fond cartographique 1/25 000. Les deux méthodes conduisent à une superficie de 115,5 km². Cette valeur, retenue pour la suite de l'étude, est supérieure de 6 % à celle de l'étude [1] (109 km²).

Le temps de concentration du bassin (temps mis par une goutte d'eau tombée en tête de bassin versant pour arriver à l'exutoire) peut être approché à partir des formules empiriques suivantes. Le détail des formules est présenté en annexe 5.

Formule	Bassin de Sainte Cécile
Ventura	7,9 h
Passini	9,0 h
Turraza	8,4 h
Approche hydraulique	4,8 h

Tableau 6 : estimation du temps de concentration du bassin versant de Sainte Cécile

Le temps de concentration est compris entre 5h et 9h. Le gradex sera appliqué sur une durée de 24h, afin de valoriser les séries longues de pluviométrie aux postes du bassin versant, et sur une durée de 6h, proche du temps de concentration du bassin versant.

2.1.4 LOI HAUTEUR-SURFACE-VOLUME

Le graphique suivant présente la loi cote / volume du barrage de Ste-Cécile. Cette loi est issue d'un levé photogrammétrique réalisé en 2005.

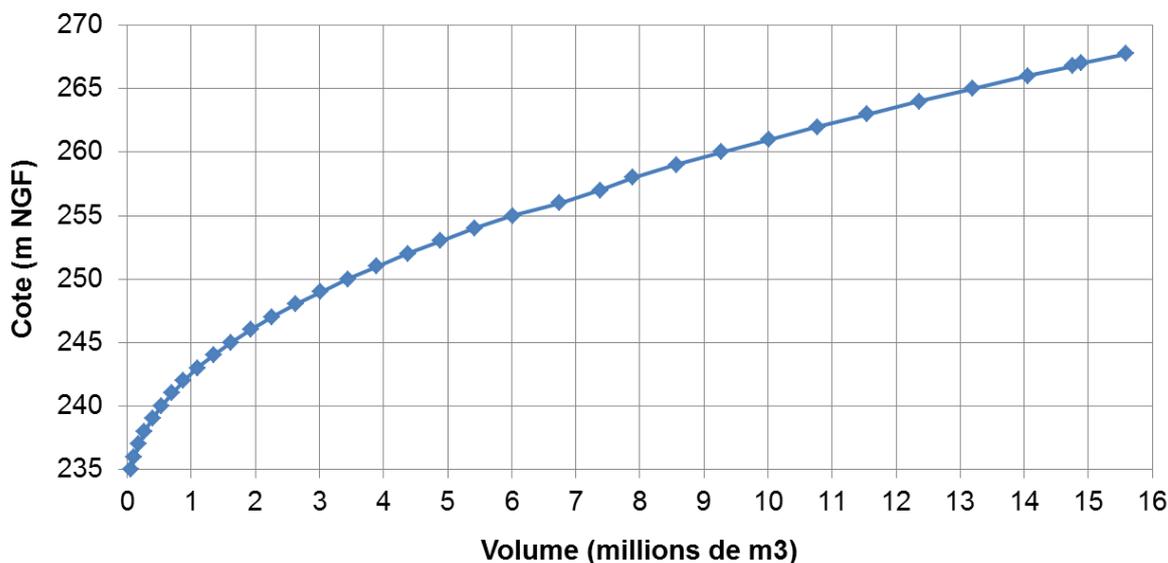


Figure 5 : Loi hauteur / volume

La retenue normale est fixée par la cote des pertuis de demi-fond (242,0 m NGF). Sous cette cote, le volume d'eau de la retenue (hors engravement) est estimé à environ 0,8 millions de m³ et la surface du plan d'eau est de l'ordre de 25 ha (environ 1,4 km de long).

L'engravement actuel du plan d'eau sous la retenue normale est estimé de l'ordre de 0,8 millions de m³. Les diverses approches mises en œuvre pour apprécier la vitesse d'engravement ont conduit à une valeur d'environ 18 000 m³/an (environ 2/3 de sables limoneux et 1/3 de graves sableuses).

Les principaux chiffres à retenir sont figurés dans le tableau suivant.

Localisation	Cote m NGF	Volume (millions de m ³)
Sous la cote des pertuis de demi-fond (RN)	229,0 / 242,0	0,8
De la RN au déversement sur la tulipe	242,0 / 261,34	10,2
Du déversement sur la tulipe aux PHE	261,34 / 266,8	14,8

Tableau 7 : valeurs caractéristiques de la loi H/V – Sainte Cécile

2.1.5 DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DE L'EVACUATEUR DE CRUE DE STE-CECILE

Pour le passage des crues, le barrage est équipé de deux galeries de fond de 6 m de diamètre. Chaque galerie est alimentée par :

- un pertuis de demi-fond calé à la cote 242,0 m NGF (largeur 6 m / hauteur 1,5 m),
- un puits à seuil libre calé à la cote 261,34 m NGF.

La longueur totale du seuil déversant de la corolle est de 45,5 m.

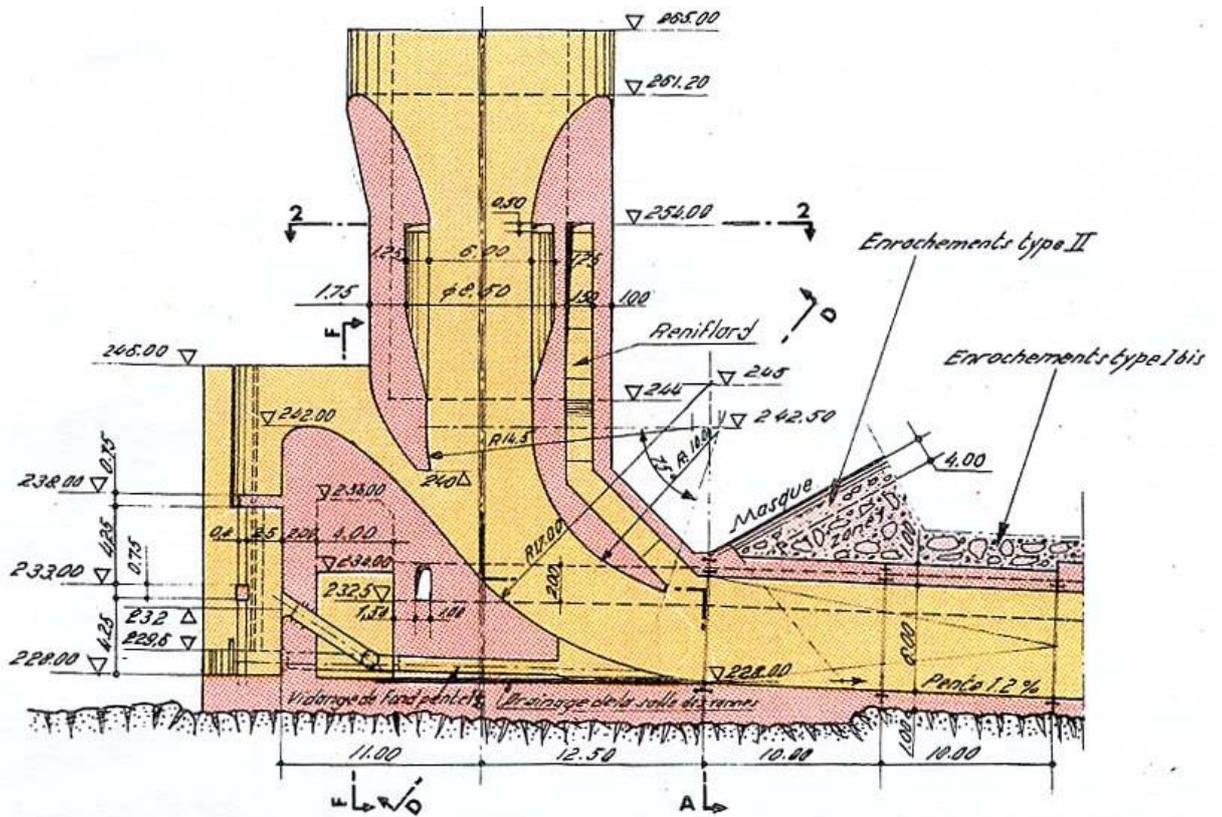


Figure 6 : coupe dans la tulipe²

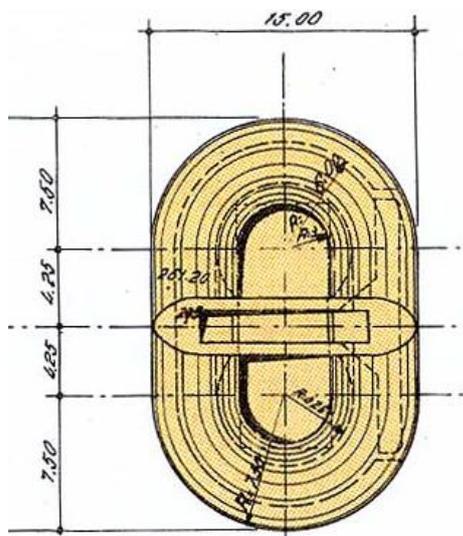


Figure 7 : vue en plan de la corolle déversante

La section de contrôle est située à la base de chaque puits. Elle ne contrôle l'écoulement qu'au-delà de 264,3 m NGF.

² Sur ce plan issu des études de conception figure la cote prévisionnelle de la tulipe. Le levé réalisé dans le cadre de l'étude a conduit à une cote de 261,34 m NGF.

La loi d'évacuation des évacuateurs du barrage de Sainte Cécile prend en compte les derniers levés topographiques réalisés sur l'ouvrage en 2012. Elle est présentée sur la tableau suivant.

	Niveau dans la retenue (m NGF)	Par rapport à la cote de la tulipe (m)	Débit évacué (m ³ /s)
Cote du seuil du pertuis	242,00	-19,2 m	0 m ³ /s
Cote du seuil de la tulipe	261,34	+0,0 m	~300 m ³ /s
Cote associée à T=100 ans selon [1]	263,50	+2,3 m	580 m ³ /s
PHE cible dans EP BRLi	266,80	+5,6 m	920 m ³ /s
Cote du couronnement	267,50	+5,8 m	920 m ³ /s
	268,50	+6,8 m	999 m ³ /s
	270,00	+8,3 m	1591 m ³ /s

Tableau 8 : loi d'évacuation des évacuateurs du barrage de Sainte Cécile

Le débit maximal évacué par les galeries a été estimé à 920 m³/s par une modélisation physique réalisée dans le cadre des études de conception.

Au-delà de la cote 267,7 m NGF, des débordements se produisent par la RN106 en rive gauche. Des débordements se produisent par-dessus le parapet au-dessus de 268,1.

Le graphique suivant présente la loi d'évacuation de 2012 intégrant les ouvrages de Ste-Cécile ainsi que les débordements sur le parapet et en rive droite. La loi d'évacuation du barrage de Sainte Cécile de 2008 figure également sur le graphique.

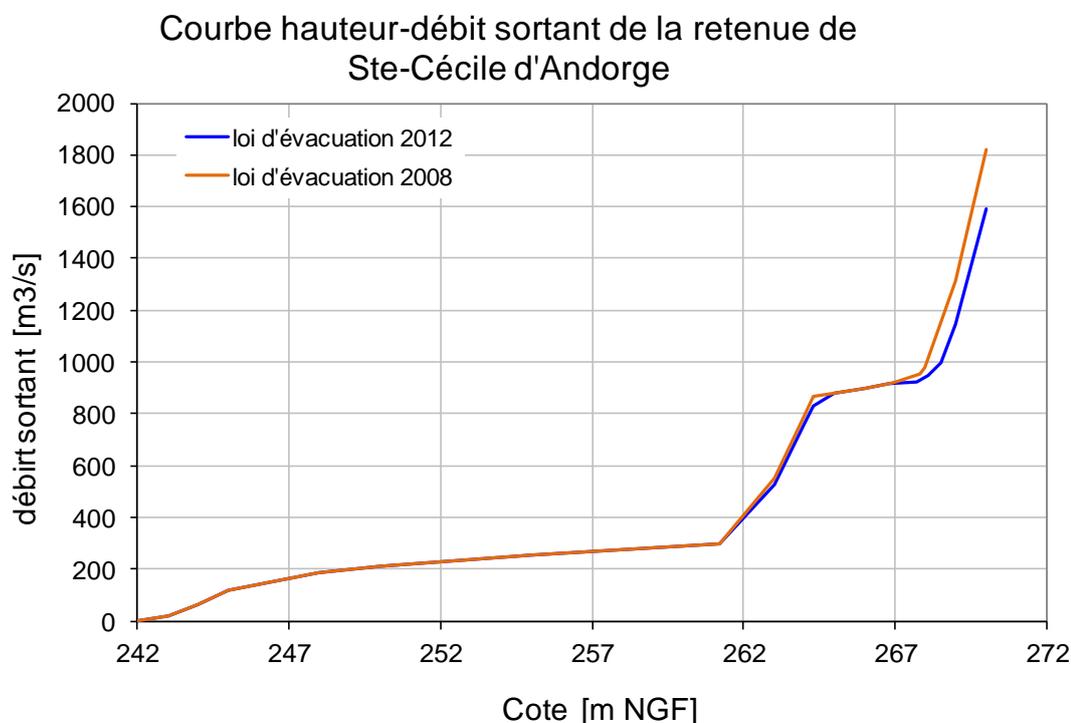


Figure 8 : loi d'évacuation du barrage de Sainte-Cécile

2.2 BARRAGE DE SENECHAS

2.2.1 PRESENTATION GENERALE

Le barrage de Sénéchas est implanté sur la Cèze, affluent côtier du Rhône. Il a pour double fonction l'écrêtement des crues et le soutien estival des étiages. Il s'agit d'un barrage route en béton de 58 m de hauteur. Il contrôle la partie supérieure du bassin versant de la Cèze (environ 113 km²).



2.2.2 FICHE SYNOPTIQUE DU BARRAGE DE SENECHAS

Les caractéristiques du barrage sont présentées dans le tableau suivant.

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DE L'OUVRAGE	
Type	Voute en béton conventionnel
Fonctions	Ecrêtement des crues et soutien estival de la Cèze
Années de fin de construction	1977
Volume du barrage	110 000 m ³
Terrain de fondation	Gneiss avec rideau d'injection de 25 à 30 m de profondeur
Drainage	Galeries en pied de barrage et dans les rives Drains inclinés à 25° de 25 à 30 m de profondeur dans la fondation
Hauteur au-dessus du terrain naturel	58 m
Longueur en crête	240 m
Rayon de courbure	120 m
Epaisseur maximale	15 m
Cote de la crête	271,5 m NGF (arase du mur anti-vague à 272,5 m NGF)

HYDROLOGIE et RETENUE	
Bassin versant	113 km ²
Cote exceptionnelle (PHE)	271,2 m NGF
Cote de la RN	243,8 m NGF
Cote minimale	230,0 m NGF
Surface / Volume sous la cote de la RN	25 ha / 2,43 hm ³
Surface / Volume sous la cote des PHE	75 ha / 15,08 hm ³
Débit maximal connu	247 m ³ /s
Année du débit maximal connu	1977
Débit maximaux observés d'après la reconstitution des crues par ISL	466 m ³ /s en octobre 1995 391 m ³ /s en décembre 1997

OUVRAGES HYDRAULIQUES	
Evacuateur de crue	- Deux pertuis vannés de 7 m ² avec seuils calés à 243,80 m NGF Débit maximal 300 m ³ /s - Seuil libre de 72 m de longueur en 6 passes calé à 266,20 m NGF Débit maximal sous la cote 271,50 m NGF : 1950 m ³ /s Débit total des évacuateurs sous la cote 271,50 m NGF : 2250 m ³ /s
Ouvrages de vidange	Deux conduites de fond de section 1,57 m ²
Débit maximal de vidange	20 m ³ /s
Ouvrage de prise	Conduite de demi-fond
Débit maximal de prise	20 m ³ /s

2.2.3 CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT

Les caractéristiques du bassin versant sont les suivantes

Surface	Altitude maximale	Altitude minimale	Chemin hydraulique le plus long	Pente du plus long chemin	Pente pondérée
113 km ²	980 m NGF	250 m NGF	27,8 km	2,7%	0,70 %

Tableau 9 : caractéristiques du bassin versant de Sénéchas

Le temps de concentration du bassin peut être approché à partir des formules empiriques suivantes.

Formule	Bassin de Sénéchas
Ventura	8,4 h
Passini	9,8 h
Turraza	9,1 h
Approche hydraulique	4,4 h

Tableau 10 : temps de concentration du bassin versant de Sénéchas

Le temps de concentration est compris entre 5h et 10h. De la même manière que sur le barrage de Sainte Cécile, le gradex sera appliqué sur une durée de 24h, afin de valoriser les séries longues de pluviométrie aux postes du bassin versant, et sur une durée de 6h, proche du temps de concentration du bassin versant.

2.2.4 LOI HAUTEUR / VOLUME

La loi hauteur / volume de la retenue est issue de [1]. Elle est présentée sur la figure suivante.

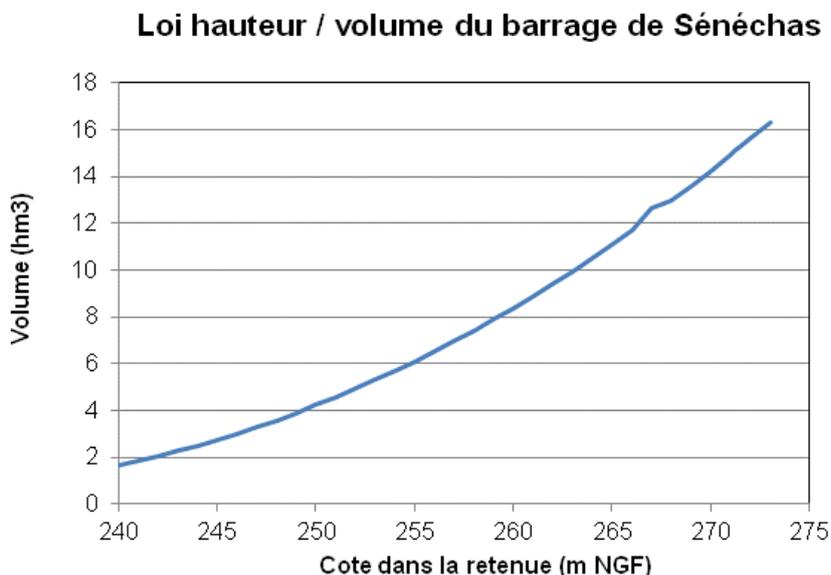


Figure 9 : loi H/V du barrage de Sénéchas

Les principaux chiffres à retenir sont figurés dans le tableau suivant.

Localisation	Cote m NGF	Volume (millions de m ³)
Sous la cote des pertuis de demi-fond (RN)	243,8	2,4
De la RN au déversement sur le seuil	243,8 / 266,2	9,5
Du déversement sur le seuil aux PHE	266,2 / 271,2	3,2

Tableau 11 : valeurs caractéristiques de la loi H/V – Sénéchas

2.2.5 DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DE L'EVACUATEUR DE CRUE DE SENECHAS

2.2.5.1 Consignes de gestion

Le fonctionnement du barrage est basé sur l'application du règlement d'eau et des consignes écrites.

Le principe de fonctionnement du barrage est de restituer à l'aval le débit amont, sauf pendant :

- les crues de la rivière,
- la période de remplissage, préalablement à la période de soutien d'étiage, qui s'étend du 1^{er} mai au 30 juin,
- la période de soutien d'étiage, qui s'étend du 1^{er} juillet au 30 septembre ; à la date du 15 août, la cote dans la retenue doit être inférieure ou égale à 243,8 m NGF pour la réouverture des pertuis.

En crue, aucun organe hydraulique n'est manœuvré. La fonction d'écrêtement des crues, fonction principale du barrage de Sénéchas, est totalement passive. :

- par écoulement dans les deux pertuis de 7 m² dont les seuils sont calés à 243,8 m NGF ; ils permettent d'évacuer un débit maximal d'environ 300 m³/s sous la cote de crête du barrage (271,5 m NGF) ;
- puis écoulement des débits supplémentaires par le seuil libre de 72 m de longueur (en 6 passes) calé à la cote 261,2 m NGF ; le seuil permet d'évacuer un débit maximal d'environ 1950 m³/s sous la cote de crête.

2.2.5.2 Loi d'évacuation du barrage de Sénéchas

La loi d'évacuation du barrage de Sénéchas a été reprise de [1]. Le graphique suivant présente la loi d'évacuation.

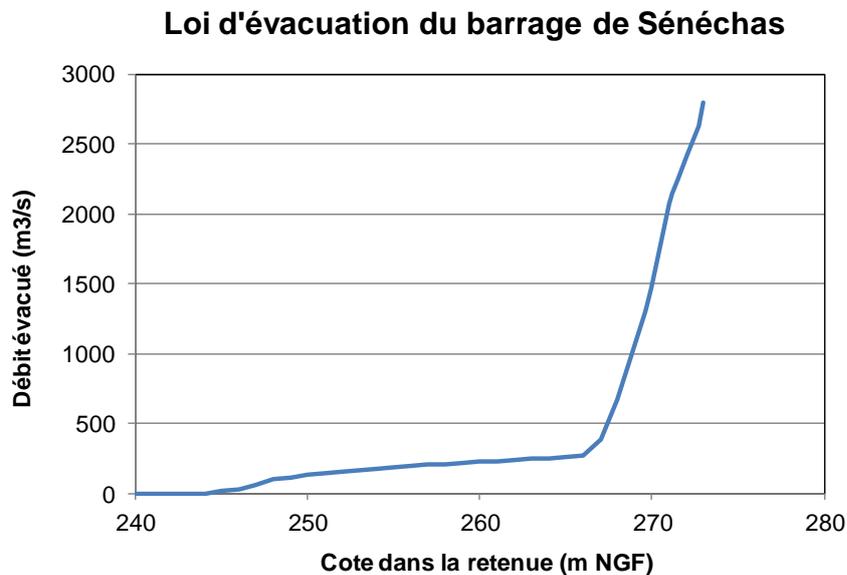


Figure 10 : loi d'évacuation du barrage de Sénéchas

2.3 COMPARAISON DES MORPHOLOGIES DES BASSINS VERSANTS

Les bassins versants des barrages de Saint-Cécile et Sénéchas sont localisés dans les Cévennes à la limite Nord du département du Gard. Le bassin de Sainte Cécile fait partie du bassin des Gardons. Le bassin de Sénéchas fait partie du bassin de la Cèze.

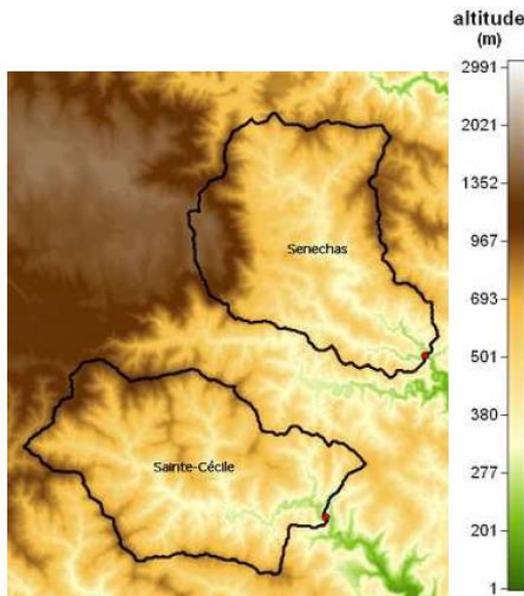
Les bassins versants figurent sur la carte 5 en annexe 4. La distance minimale séparant les périmètres des bassins versants est de 3,5 km.

Une analyse morphologique des bassins a été menée dans le cadre de [2]. Le tableau suivant compare les caractéristiques des bassins versants de Sainte Cécile de et Sénéchas.

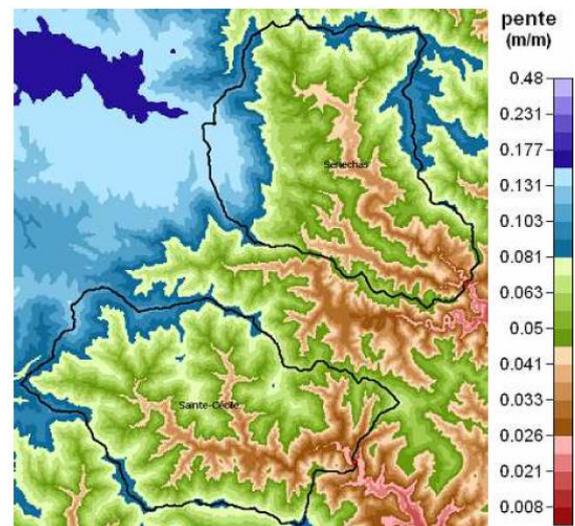
	BV Sainte Cécile	BV Sénéchas
Superficie (km ²)	116	113
Altitude maximale	1350	980
Altitude minimale (m NGF)	230	250
Pente du plus long chemin (%)	2,9	2,6
Pente pondérée (%)	0,75	0,7
Longueur du cours d'eau le plus long (km)	25,4	27,8
Compacité (Gravelius)	1,7	1,7
Densité de drainage	0,99	0,97

Tableau 12 : caractéristiques morphologiques des bassins de Ste-Cécile et Sénéchas

Outre leur proximité, les deux bassins possèdent des caractéristiques morphologiques très proches et une orientation comparable.



Altitude des bassins versants



Pente des bassins versants

Le tableau suivant présente l'occupation des sols sur chacun des bassins versants (selon la base Corine Land Cover 2004).

	BV Sainte Cécile	BV Sénéchas
Forêts	87 %	81 %
Milieus à végétation arbustive ou herbacée	10 %	9 %
Zones agricoles hétérogènes	3 %	7 %
Prairies	1 %	3 %

Tableau 13 : occupation des sols des bassins versants de Sainte Cécile et Sénéchas

Les deux bassins versants sont majoritairement couverts par des forêts avec une couverture un peu plus importante pour Sainte-Cécile.

Concernant l'hydrogéologie, d'après [2], les bassins versants de Sénéchas et de Sainte Cécile sont situés dans leur intégralité en zone j, correspondant à « des massifs cristallins et schisteux des régions montagneuses à ruissellement très prédominant. »

Au final, les productivités des deux bassins ne doivent pas être très différentes et les données observées à Sénéchas peuvent être comparées à celles de Sainte Cécile à titre de vérification.

3 SITUATION DU BASSIN VERSANT PAR RAPPORT AUX EVENEMENTS REGIONAUX GENERALISES

3.1 CARTOGRAPHIE DES EVENEMENTS GENERALISES

Les événements retenus ont été sélectionnés dans la base de données Météo-France relative aux pluies extrêmes en France métropolitaine.

Les cartes n°1 à 4 insérées en annexe présentent la localisation des bassins versants concernés sur les zonages des cumuls de référence des épisodes généralisés ayant affecté la région (source Météo-France).

3.2 EVENEMENT DE SEPTEMBRE 1958

La carte n°4 présente le zonage de la pluie sur un jour de l'événement généralisé du 30 septembre au 1^{er} octobre 1958.

Les dégâts générés par cet événement sont à l'origine de la création des barrages écreteurs du Gard.

L'épisode a touché le Gard et l'Hérault. Il est caractérisé par plusieurs cellules intenses (Saint Maurice de Navacelles, Villefort, Générargues, Lablachère). Les valeurs maximales ont atteint entre 260 et 320 mm en un jour.

Le bassin versant du barrage de Saint Cécile a reçu jusqu'à 200 mm en un jour.

La cellule intense centrée sur Villefort a touché l'extrémité nord du bassin versant de Sénéchas qui a reçu jusqu'à 250 mm en un jour.

L'hydrogramme de la crue de 1958 a été reconstitué dans le cadre des études de conception du barrage et a servi à dimensionner la protection contre les crues du chantier. Son débit de pointe a été estimé à environ 500 m³/s. Cette valeur est proche du plus fort débit reconstitué en amont du barrage (crue d'octobre 1977). Sa période de retour avait été estimée de l'ordre de 35 ans.

3.3 EVENEMENT DE NOVEMBRE 1977

La carte n°5 présente le zonage de la pluie sur deux jours de l'événement généralisé du 22 au 24 octobre 1977. L'épisode a principalement affecté la limite entre le Gard et la Lozère ainsi que la moitié ouest de l'Ardèche.

Il a conduit au plus fort débit entrant et au remplissage le plus important de la retenue de Ste-Cécile depuis la construction du barrage.

L'épisode est caractérisé par une bande intense d'environ 110 km de long pour 15 km de large (soit 1650 km²) au sein de laquelle les cumuls ont dépassé 250 mm sur deux jours. Les valeurs maximales ont atteint entre 400 et 450 mm en deux jours.

Les postes proches du bassin versant du barrage de Sainte Cécile ont reçu entre 230 mm et 350 mm en deux jours.

Les postes proches du bassin versant du barrage de Sénéchas ont reçu entre 200 mm et 400 mm en deux jours.

3.4 EVENEMENT D'OCTOBRE 1988

La carte n°1 présente le zonage de la pluie sur deux jours de l'évènement généralisé du 2 au 4 octobre 1988.

L'épisode est caractérisé par une cellule intense centrée sur Nîmes. Les cumuls pluviométriques ont été importants sur de faibles durées. A l'épicentre, la pluie a atteint plus de 420 mm en 8h30 à Nîmes.

La zone périphérique de l'évènement, peu étendue, n'a pas atteint les bassins versants de Sénéchas et Sainte-Cécile.

3.5 EVENEMENT DE SEPTEMBRE 2002

La carte n°2 présente le zonage de la pluie sur deux jours de l'évènement généralisé du 8 au 10 septembre 2002.

L'épisode est caractérisé par une cellule intense centrée sur Cardet. Les valeurs maximales ont atteint plus de 600 mm en deux jours. Il a sinistré la plus grande partie du département du Gard.

La zone périphérique de l'évènement a affecté les bassins versants des barrages de Sainte Cécile et Sénéchas.

Le bassin versant du barrage de Sainte Cécile a reçu jusqu'à 250 mm en deux jours.

Le bassin versant du barrage de Sénéchas a reçu jusqu'à 200 mm en deux jours.

3.6 EVENEMENT DE SEPTEMBRE 2005

La carte n°3 présente le zonage de la pluie sur deux jours de l'évènement généralisé du 5-7 septembre 2005. L'épisode a principalement affecté le Gard et l'Hérault et les valeurs maximales ont atteint entre 280 et 310 mm en deux jours.

La zone périphérique de l'évènement a atteint les bassins versants des barrages de Sainte Cécile et Sénéchas, qui ont reçu jusqu'à 250 mm en deux jours.

3.7 EVENEMENT DE NOVEMBRE 2008

La carte n°6 présente le zonage de la pluie sur deux jours de l'évènement généralisé du 1 au 3 novembre 2008.

L'épisode a principalement affecté la limite entre le Gard et la Lozère ainsi que la moitié ouest de l'Ardèche. Sa localisation, son extension et les cumuls maximaux sont très similaires à ceux de l'évènement d'octobre 1977. Les valeurs maximales ont atteint entre 450 et 470 mm en deux jours.

Les postes proches du bassin versant du barrage de Sainte Cécile ont reçu environ 300 mm en deux jours.

Les postes proches du bassin versant du barrage de Sénéchas ont reçu entre 220 mm et 470 mm en deux jours.

4 VALORISATION DES DONNEES ENREGISTREES AUX BARRAGES

4.1 METHODE DE RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES

Le Conseil Général du Gard a fourni à ISL les limnigrammes non critiqués des crues survenues sur les barrages de Sainte-Cécile et Sénéchas.

Pour les deux barrages, on distingue une période durant laquelle le relevé des cotes est manuel et une période durant laquelle le relevé est automatique.

Concernant le barrage de Sainte Cécile, on dispose des données suivantes :

- de 1975 à 2006 (octobre) : relevé manuel au pas de temps horaire en période de crue uniquement,
- de décembre 2006 à mars 2012 : enregistrement automatique au pas de temps horaire.

Concernant le barrage de Sénéchas, on dispose des données suivantes :

- de 1978 à 2001 (octobre) : relevé manuel au pas de temps horaire en période de crue uniquement,
- de février 2002 à décembre 2009 : enregistrement automatique au pas de temps horaire par un capteur à bulle,
- de décembre 2009 à juin 2012 : enregistrement automatique au pas de temps par la technique radar,
- de juin 2010 à juin 2012 : enregistrement automatique au pas de temps horaire par utilisation d'une sonde piézométrique.

ISL a sélectionné, après analyse des limnigrammes, les épisodes correspondants aux niveaux atteints dans la retenue les plus importants sur chaque barrage (cf. § 4.3 et § 4.4).

Pour chaque évènement sélectionné, le débit entrant a été reconstitué au pas de temps horaire à partir :

- de la variation horaire du volume stocké dans la retenue,
- du volume sortant horaire.

La variation du volume stocké dans la retenue a été calculée à partir de la variation de niveau (limnigramme) et de la loi hauteur/volume de la retenue.

Le volume sortant horaire a été déduit de loi d'évacuation du barrage.

Concernant le barrage de Sainte Cécile, cette loi a été mise à jour avec les nouvelles données topographiques de 2012.

La figure suivante superpose le limnigramme enregistré dans la retenue de Sainte Cécile pour la crue de novembre 2008 et l'hydrogramme reconstitué.

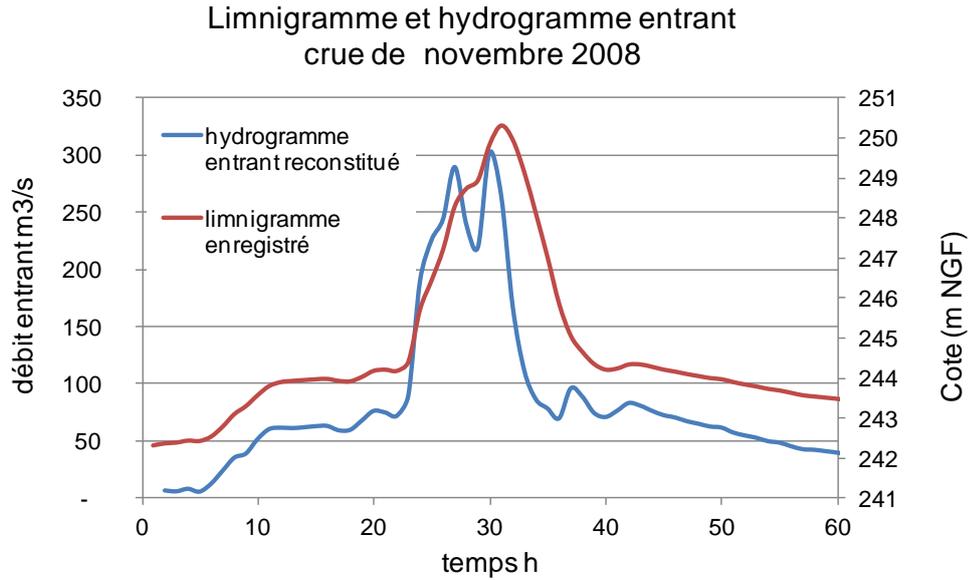


Figure 11 : limnigramme et hydrogramme –crue nov 2008

La figure suivante superpose le limnigramme enregistré dans la retenue de Sénéchas pour la crue de décembre 1996 et l'hydrogramme reconstitué.

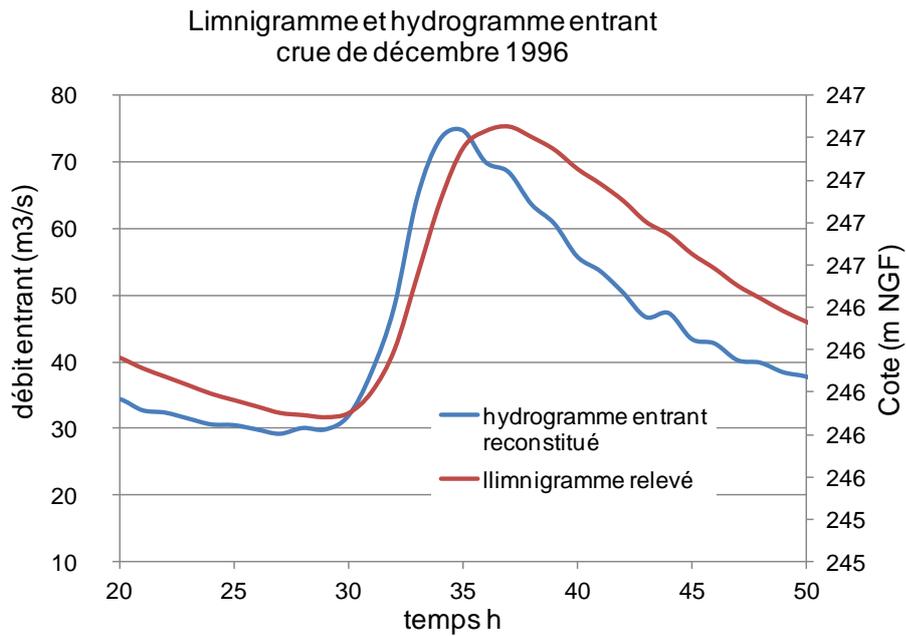


Figure 12 : limnigramme et hydrogramme –crue dec 96

4.2 OBJECTIFS DE LA RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES

Les hydrogrammes ont été reconstitués dans l'objectif de réaliser des statistiques sur le ruissellement à différents pas de temps et pour différentes saisons :

- annuelle,
- janvier à août : correspondant à la saison la plus favorable aux travaux,
- septembre à décembre : correspondant à la saison la plus défavorable.

Ces résultats seront exploités pour appliquer de manière complète la méthode du gradex à différents pas de temps.

Pour caler le modèle pluie débit de la méthode Shypre, une analyse a également été réalisée sur les saisons suivantes :

- décembre à mai,
- juin à novembre.

Le découpage saisonnier de SHYPRE est imposé par le choix qui a été fait initialement pour le simulateur de pluie dans le cadre de son développement.

4.3 RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES DE STE-CECILE

Le choix des crues pour l'analyse statistique sur le ruissellement s'est basé sur l'importance de la cote atteinte dans la retenue.

Le nombre de crues reconstituées correspond au nombre d'années d'existence du barrage (37).

Parmi les 37 crues retenues figure la crue de septembre 1976 dont la cote est la seconde plus forte d'après les données du Conseil Général. Le limnigramme de cette crue présente des anomalies évidentes et elle avait été écartée de l'analyse par ISL.

Toutefois, à la demande du Conseil Général, cet événement a été réintégré dans l'analyse. Le volume ruisselé a été approché par régression linéaire avec la cote maximale atteinte dans la retenue. Cette régression a été réalisée sur les 36 crues retenues dont les limnigrammes paraissent fiables.

Les tableaux suivants présentent les caractéristiques principales des crues retenues pour chaque saison. Les crues sont classées par ordre croissant des cotes atteintes dans la retenue.

Sainte Cécile - Période annuelle					
Date	Jour	Cote max atteinte (m)	V entrant max 24h (mm)	V entrant max 6h (mm)	Qmax entrant (m³/s)
nov-89	21 au 22	244,62	22	15	103
sept-95	18	244,62	36	16	107
févr-09	1 au 4	244,68	64	18	101
août-84	23 au 24	244,71	20	14	109
déc-76	18 au 19	244,77	54	18	110
nov-84	5 à 8	244,98	69	21	122
nov-97	4 au 6	245,02	65	20	121
nov-03	23 au 26	245,03	60	21	123
nov-02	24 au 25	245,05	49	20	124
sept-92	22	245,06	32	22	175
avr-78	30-04 au 1-05	245,10	36	21	125
janv-96	12	245,15	50	22	127
sept-94	23 au 25	245,23	44	18	143
oct-01	20 au 21	245,25	49	21	144
janv-77	22 au 24	245,28	82	24	135
janv-88	13 au 16	245,33	71	24	138
nov-94	4 au 6	245,51	51	23	155
déc-81	28 au 30	245,51	77	26	152
oct-76	23 au 31	245,59	87	27	155
sept-02	9	245,72	39	28	234
mai-99	17 au 19	245,73	46	24	189
sept-00	29 au 30	246,05	43	24	205
déc-84	30-11 au 2-12	246,11	78	29	194
déc-77	9	246,23	67	28	200
déc-03	1 au 4	246,35	93	32	189
nov-11	4	246,40	89	31	219
nov-96	11 au 14	246,57	63	29	221
août-77	27	246,60	41	29	233
oct-06	19 au 20	247,41	76	31	273
déc-97	17 au 20	248,64	112	42	261
oct-95	5	249,13	70	38	419
oct-94	19 au 21	249,17	116	44	284
nov-82	7 au 8	249,30	107	44	396
nov-76	9 au 11	249,46	117	44	349
nov-08	1 au 4	250,31	106	49	303
sept-76*	12 au 13	250,50	120	49	-
oct-77	22 au 25	253,30	164	60	519

Tableau 14 : crues retenues sur la période annuelle - barrage de Sainte Cécile

*volume reconstitué par régression sur la cote max

Les 10 crues les plus importantes, pour lesquelles les hydrogrammes ont été reconstitués figurent en annexe.

Sur 37 ans, le débit maximal entrant est de 519 m³/s. Il a été observé lors de la crue d'octobre 1977. Le second plus fort débit observé est de 419 m³/s (crue d'octobre 1995).

Pour la période de janvier à août, au vu de la disponibilité des données (faible nombre de crues relevées sur la période 1975-2006), le nombre d'hydrogrammes reconstitués a été réduit.

Sainte Cécile - Janvier à août					
Date crue	Jour	Cote max atteinte (m)	V entrant max 24h (mm)	V entrant max 6h (mm)	Q max entrant (m3/s)
févr-77	24 au 25	243,18	17	5	32
mai-78	5	243,32	10	6	35
mars-10	26	243,60	23	8	49
mai-08	29	243,46	20	8	54
mai-84	18 au 19	243,62	29	8	56
févr-90	1	243,71	32	9	57
janv-84	27	243,72	13	9	55
mai-98	1	243,68	19	9	327
janv-95	18	243,93	18	10	63
févr-08	3 au 4	244,00	40	11	70
avr-08	20 au 21	244,02	22	11	68
janv-06	28 au 29	243,99	34	11	64
avr-83	26	244,06	32	12	72
avr-98	15	244,10	33	12	71
mars-11	13 au 14	244,08	20	12	70
févr-94	24	244,10	25	12	71
mai-93	20	244,30	45	15	85
janv-08	3 au 5	244,19	33	13	74
janv-96	10	244,22	30	13	77
mars-81	29 au 30	244,32	26	13	83
août-84	23 au 24	244,71	43	14	109
mars-91	6 au 8	244,30	46	15	274
janv-79	22 au 23	244,31	34	14	80
mai-88	2	244,34	46	15	258
févr-87	10 au 12	244,12	37	15	309
avr-87	4	244,44	36	16	87
janv-98	13 au 14	244,58	32	15	98
août-76	29	244,52	64	18	101
févr-09	1 au 4	244,68	20	14	101
avr-78	30-04 au 1-05	245,10	36	21	125
janv-96	12	245,15	50	22	127
mai-99	17 au 19	245,73	82	24	189
janv-77	22 au 24	245,28	71	24	135
janv-88	13 au 16	245,33	46	24	138
août-77	27	246,60	41	29	233

Tableau 15 : crues retenues sur la période janvier à août - barrage de Sainte Cécile

Sainte Cécile - Septembre à décembre					
Date	Jour	Cote max atteinte (m)	V entrant max 24h (mm)	V entrant max 6h (mm)	Qmax entrant (m³/s)
oct-08	22	244,05	19	14	134
déc-83	16 au 17	244,08	31	12	70
nov-00	12 au 13	244,14	32	12	74
nov-95	26 au 27	244,14	39	13	73
nov-03	17 au 18	244,44	42	15	90
oct-99	20 au 21	244,47	40	16	89
déc-02	11 au 12	244,51	40	15	92
déc-00	6 au 7	244,55	57	17	95
nov-89	21 au 22	244,62	36	15	103
sept-95	18	244,62	22	16	107
déc-76	18 au 19	244,77	54	18	110
nov-84	5 au 8	244,98	69	21	122
nov-97	4 au 6	245,02	65	20	121
nov-03	23 au 26	245,03	60	21	123
nov-02	24 au 25	245,05	49	20	124
sept-92	22	245,06	32	22	175
sept-94	23 au 25	245,23	44	18	143
oct-01	20 au 21	245,25	49	21	144
déc-81	28 au 30	245,51	51	23	152
nov-94	4 au 6	245,51	77	26	155
oct-76	23 au 31	245,59	87	27	155
sept-02	9	245,72	39	28	234
sept-00	29 au 30	246,05	43	24	205
déc-84	30-11 au 2-12	246,11	78	29	194
déc-77	9	246,23	67	28	200
déc-03	1 à 4	246,35	93	32	189
nov-11	4	246,40	89	31	219
nov-96	11 au 14	246,57	63	29	221
oct-06	19 au 20	247,41	76	31	273
déc-97	17 au 20	248,64	112	42	261
oct-95	5	249,13	70	38	419
oct-94	19 au 21	249,17	116	44	284
nov-82	7 au 8	249,30	107	44	396
nov-76	9 au 11	249,46	117	44	349
nov-08	1 au 4	250,31	106	49	303
sept-76*	12 au 13	250,50	120	49	-
oct77	22 au 25	253,30	164	60	519

Tableau 16 : crues retenues sur la période septembre à décembre – Ste-Cécile

*volume reconstitué par régression sur la cote max

4.4 RECONSTITUTION DES HYDROGRAMMES DE SENECHAS

De la même manière que pour le barrage de Sainte Cécile, le choix des hydrogrammes pour les analyses statistiques sur le ruissellement s'est basé sur l'importance de la cote atteinte dans la retenue.

Il a été recherché la reconstitution de 34 hydrogrammes de crue pour chaque saison.

Les consignes écrites de gestion de la retenue de Sénéchas prévoient des manœuvres des vannes des pertuis pendant la période du 1^{er} mai au 15 août. Cette période correspond à un cycle de stockage/restitution d'eau.

Les crues se produisant pendant cette période n'ont pas pu être reconstituées de manière fiable et ont donc été écartées. Les conséquences sont limitées pour la définition des crues rares car cette période est la moins à risque.

Comme pour Sainte Cécile, certains limnigrammes ou hydrogrammes reconstitués présentent des anomalies évidentes remettant en cause leur fiabilité. Ces limnigrammes ont été écartés lorsqu'il s'agissait de crues peu importantes.

4 crues ayant conduit à des cotes importantes ont des limnigrammes peu fiables. Il s'agit des crues de novembre 1984, octobre 1986, novembre 2008 et novembre 2011. A la demande du Conseil Général ces crues ont été intégrées aux 34 crues retenues sur le bassin versant de Sénéchas. Les volumes ruisselés ont été estimés par régression linéaire avec la cote maximale atteinte dans la retenue. Cette régression a été réalisée sur les 30 crues retenues dont les limnigrammes paraissent fiables.

A noter, aucune donnée n'est disponible pour l'évènement correspondant à la plus forte de Ste-Cécile (oct. 1977) qui correspond à l'année de construction du barrage de Sénéchas. Les données ne sont disponibles qu'à partir de 1978.

Les tableaux suivants présentent les caractéristiques des crues importantes retenues sur le bassin versant de Sénéchas, pour les différentes saisons. Les crues sont classées par ordre croissant de la cote atteinte dans la retenue.

Sénéchas - Période annuelle					
Date	Jour	Cote max atteinte (m)	V entrant max 24h (mm)	V entrant max 6h (mm)	Qmax entrant (m ³ /s)
mars-91	7 au 10	247,42	47	14	77
janv-99	31/11 au 2	247,43	94	31	168
févr-94	4 au 6	247,46	45	15	80
avr-87	4 au 5	247,47	36	15	84
déc-00	24 au 25	247,55	46	15	90
nov-03	17 au 18	247,76	53	17	95
janv-98	13 au 14	247,89	41	17	106
nov-89	21 au 22	247,90	40	17	106
déc-00	6 au 10	248,23	73	21	111
sept-00	29 au 30	248,31	38	19	128
sept-92	22	248,34	38	32	317
nov-86	13 au 16	248,65	69	22	132
déc-10	23	248,77	79	22	123
oct-87	10 au 11	248,78	45	23	156
nov-00	12 au 14	248,99	57	23	154
oct-79	27	249,03	143	40	212
déc-03	3	249,23	77	25	139
nov-03	24	249,34	76	25	136
nov-94	4 au 7	249,37	83	26	154
janv-96	22 au 26	249,48	71	26	159
oct-01	19 au 21	249,77	62	26	192
nov-84*	5 au 9	250,41	75	30	-
janv-96	10 au 13	250,42	90	29	163
janv-88	14 au 16	250,89	90	30	168
nov-97	5 au 8	251,19	101	30	184
oct-94	19 au 21	253,54	124	44	279
nov-96	11 au 14	253,96	96	44	335
nov-11*	4	254,00	110	45	-
oct-06*	19 au 21	254,74	117	48	-
déc-84	30/11 au 3	255,50	126	47	286
oct-95	5 au 6	258,10	122	62	466
nov-82	8 au 9	258,85	154	61	369
déc-97	17 au 21	258,96	145	60	391
nov-08*	30/10 au 2/11	263,00	196	81	

Tableau 17 : crues retenues sur la période annuelle - barrage de Sénéchas

*volume reconstitué par régression sur la cote max

Le débit maximal entrant est de 466 m³/s. Il a été observé lors de la crue d'octobre 1995. Le second plus fort débit observé est de 391 m³/s (crue de décembre 1997).

Pour la période de janvier à avril, au vu de la disponibilité des données (faible nombre de crue relevées sur la période 1978 – 2001) le nombre d'hydrogrammes reconstitués a été réduit.

Sénéchas - Janvier à avril					
Date	Jour	Cote max atteinte (m)	V entrant max 24h (mm)	V entrant max 6h (mm)	Qmax entrant (m ³ /s)
avr-02	11 au 13	244,62	49	17	88
févr-04	janv-00	246,07	26	7	41
mars-10	25 au 28	246,54	25	9	57
janv-95	18 au 19	246,58	21	10	60
janv-84	27	246,77	24	11	74
janv-96	28 au 29	246,84	34	11	61
avr-98	15 au 16	246,92	24	11	90
févr-87	11 au 13	247,13	39	12	133
janv-79	23	247,36	42	14	74
mars-91	7 au 10	247,42	47	14	77
janv-99	31/11 au 2	247,43	94	31	168
févr-94	4 au 6	247,46	45	15	80
avr-87	4 au 5	247,47	36	15	84
janv-98	13 au 14	247,89	41	17	106
janv-96	22 au 26	249,48	71	26	159
janv-96	10 au 13	250,42	90	29	163
janv-88	14 au 16	250,89	90	30	168
avr-02	11 au 13	244,62	49	17	88

Tableau 18 : crues retenues sur la période janvier à avril - barrage de Sénéchas

Sénéchas - Septembre à décembre					
Date	Jour	Cote max atteinte (m)	V entrant max 24h (mm)	V entrant max 6h (mm)	Qmax entrant (m³/s)
sept-94	24	246,72	21	10	99
oct-84	19 au 20	246,84	31	13	125
oct-93	5 au 6	246,85	31	13	160
déc-87	5 au 6	246,89	57	30	159
oct-95	14	247,10	98	30	73
nov-95	26 au 27	247,11	37	12	64
déc-96	21 au 23	247,25	38	13	75
nov-93	2 au 5	247,36	43	14	74
déc-00	24 au 25	247,55	46	15	90
nov-03	17 au 18	247,76	53	17	95
nov-89	21 au 22	247,90	40	17	106
déc-00	6 au 10	248,23	73	21	111
sept-00	29 au 30	248,31	38	19	128
sept-92	22	248,34	38	32	317
nov-86	13 au 16	248,65	69	22	132
déc-10	6 au 10	248,77	79	22	123
oct-87	10 au 11	248,78	45	23	156
nov-00	12 au 14	248,99	57	23	154
oct-79	27	249,03	143	40	212
déc-03	3	249,23	77	25	139
nov-03	24	249,34	75	25	136
nov-94	4 au 7	249,37	83	26	154
oct-01	19 au 21	249,77	62	26	192
nov-84*	5 au 9	250,41	75	30	-
nov-97	5 au 8	251,19	101	30	184
oct-94	19 au 21	253,54	124	44	279
nov-96	11 au 14	253,96	96	44	335
nov-11*	4	254,00	110	45	-
oct-06*	19 au 21	254,74	117	48	-
déc-84	30/11 au 3	255,50	126	47	286
oct-95	5 au 6	258,10	122	62	466
nov-82	8 au 9	258,85	154	61	369
déc-97	17 au 21	258,96	145	60	391
nov-08*	30/10 au 2/11	263,00	196	81	-

Tableau 19 : crues retenues sur la période septembre à décembre - barrage de Sénéchas

*volume reconstitué par régression sur la cote max

4.5 DISTRIBUTION DES VOLUMES ENTRANTS

Pour des durées de 24h et 6h et pour les diverses saisons, les volumes ruisselés aux barrages de Sainte Cécile et Sénéchas ont été classés et ordonnés en leur attribuant une fréquence de Gumbel.

La formule pour la fréquence de Gumbel est la suivante :

$$u = -\ln(-\ln(f))$$

f est la fréquence empirique estimée par la méthode de Hazen :

$$f = \frac{i-0,5}{n},$$

Avec : i le rang de la valeur dans le classement des données,

n le nombre de valeurs.

Les figures suivantes présentent la superposition des distributions des volumes ruisselés sur 24h au droit des barrages de Saint-Cécile et Sénéchas, pour les trois saisons retenues.

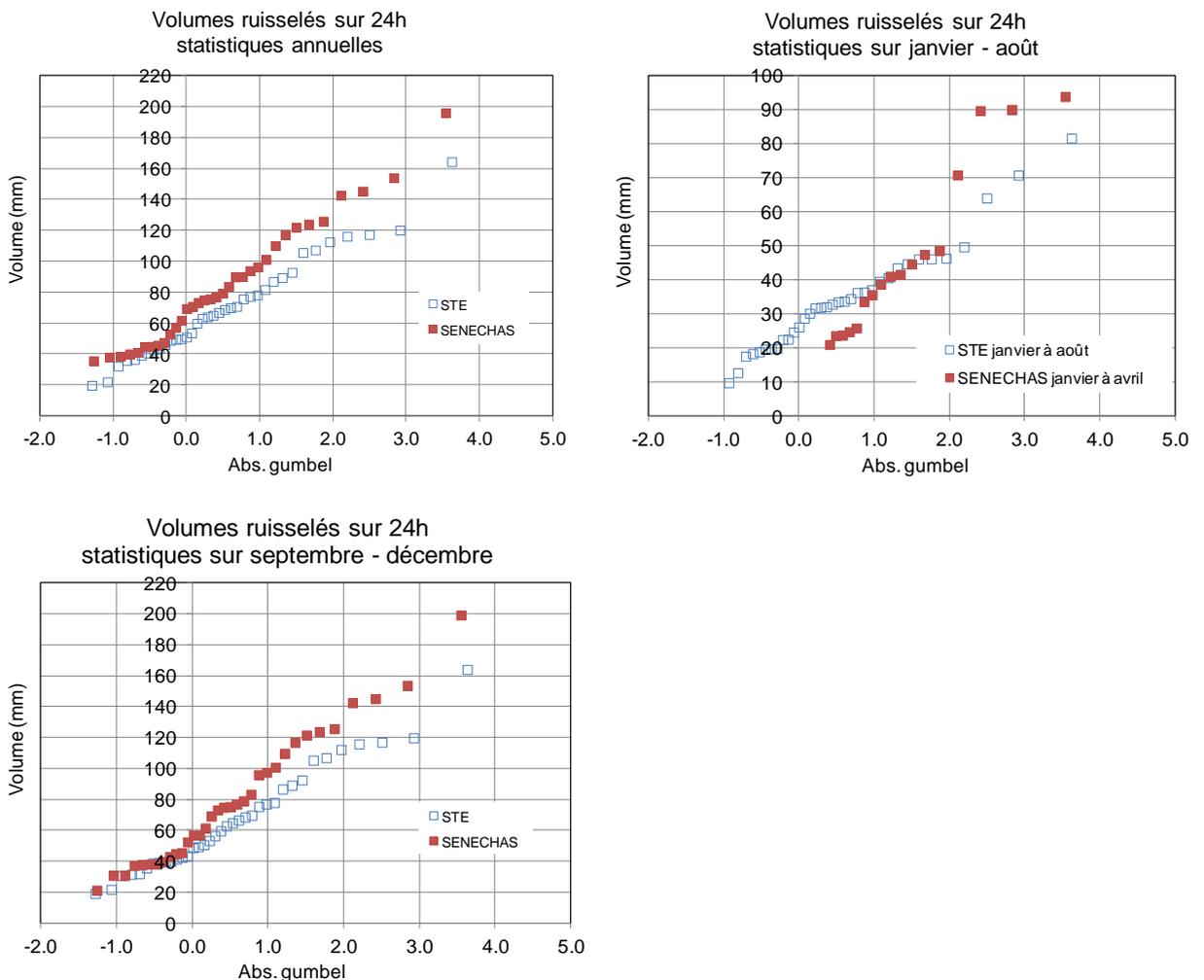


Figure 13 : comparaison des distributions des V24h à Sénéchas et Sainte Cécile

La distribution des volumes ruisselés sur 24h au barrage de Sainte Cécile est cohérente avec celle de Sénéchas pour la période annuelle et la saison de septembre à décembre.

Pour la saison janvier à août, des écarts sont relevés. Ils s'expliquent en partie par le fait que les saisons sont différentes, celle de Sénéchas ayant été tronquée (janvier à avril). La distribution de Sénéchas est quelque peu erratique.

De la même manière que pour les volumes sur 24h, les distributions des volumes ruisselés sur 6h aux barrages de Sainte Cécile et Sénéchas ont été superposées.

Les figures suivantes présentent les distributions de volume sur 6h pour les différentes saisons..

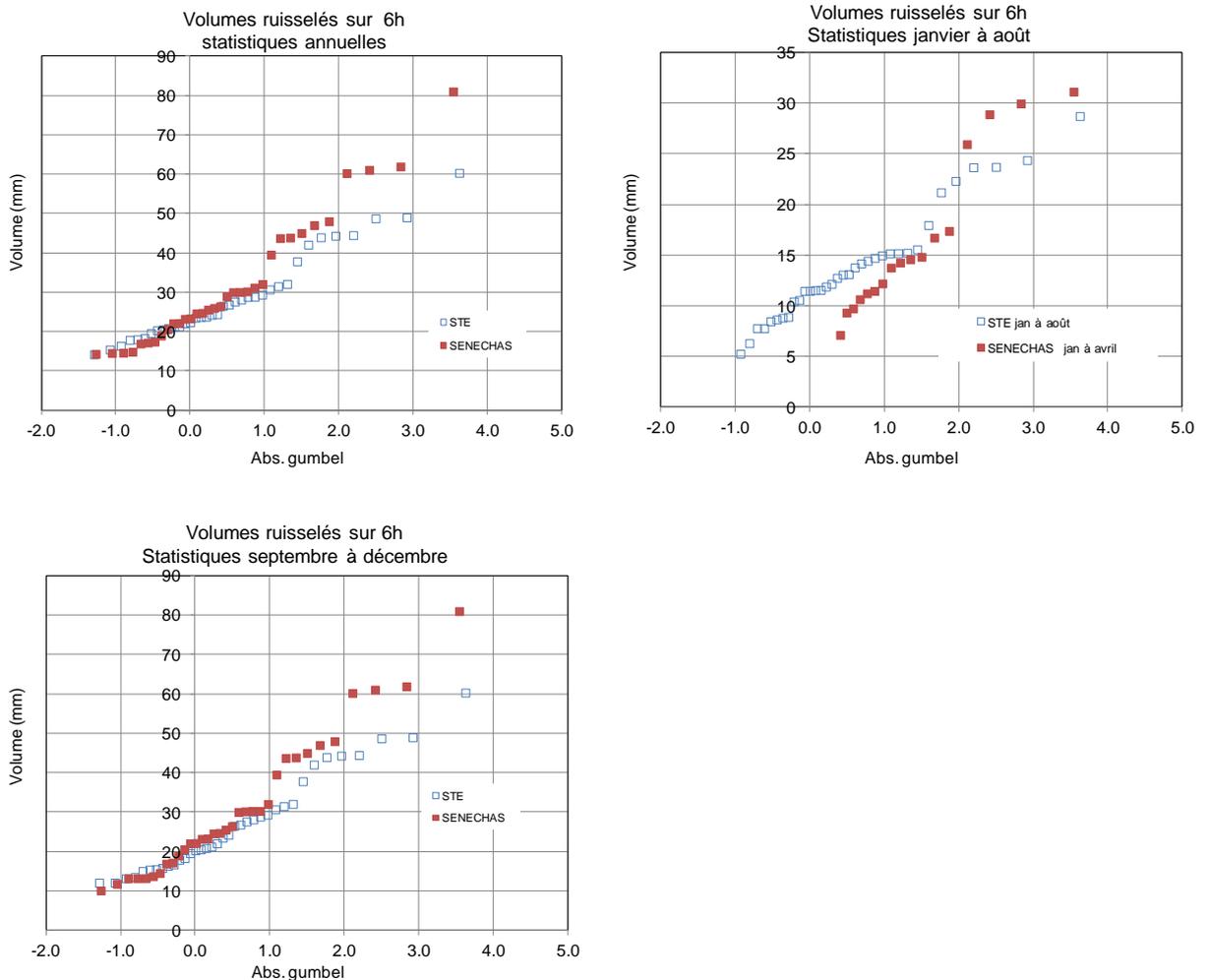


Figure 14 : comparaison des distributions des V6h à Sénéchas et Sainte Cécile

Les distributions des V6h apparaissent régulières pour Sainte Cécile sur l'année et la période la plus à risque. C'est moins le cas pour la période janvier-août, dont le caractère homogène sur le plan pluviométrique n'est pas avéré.

Les distributions de Sénéchas sont contrastées au-delà de 2,25 unités gumbel (soit environ 10 ans). La période janvier-août est encore la plus affectée.

4.6 COMPARAISON POUR LES PLUS FORTES CRUES OBSERVEES

Les graphiques suivants présentent une comparaison des volumes ruisselés pour 15 crues figurant à la fois parmi les 37 plus fortes crues reconstituées pour Ste-Cécile et les 34 plus fortes crues reconstituées pour Sénéchas.

La comparaison est réalisée sur les volumes ruisselés sur 6h et sur 24h.

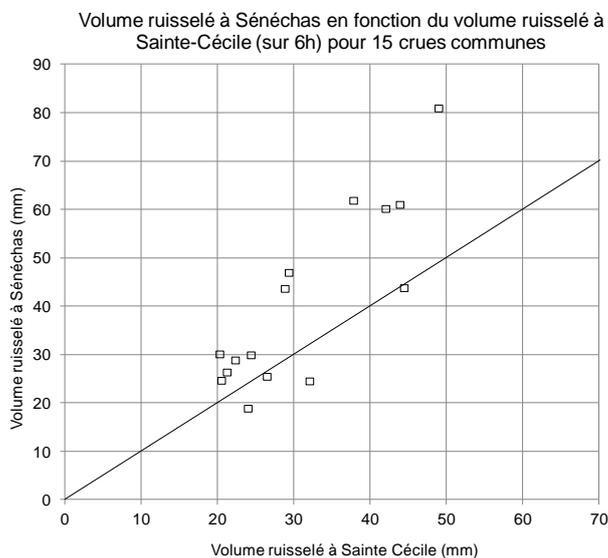
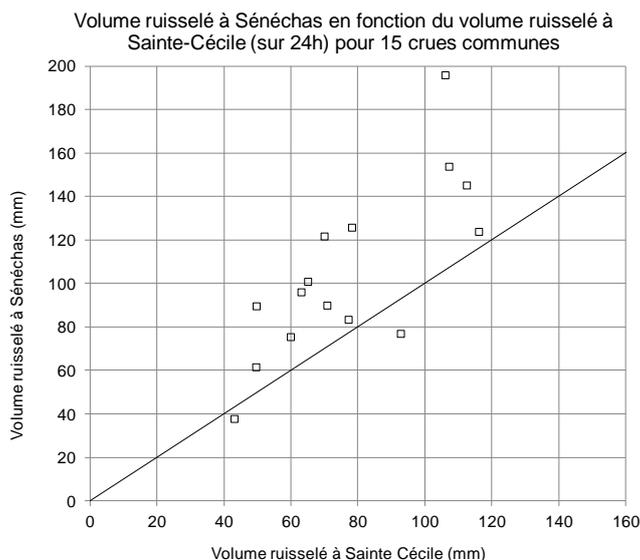


Figure 15 : comparaison de V6h et V24h pour des crues communes

Le point le plus haut correspond à l'évènement de novembre 2008 qui a nettement plus impacté le bassin versant de Sénéchas que celui de Sainte Cécile (468 mm à Villefort en 2 jours contre 290 mm à Cassagnas).

Pour V24h comme pour V6h, on note un ruissellement un peu plus fort du bassin de Sénéchas par rapport à celui Ste-Cécile avec des volumes supérieurs d'environ 20% malgré des morphologies et géologie comparables (la seule différence notable étant un couvert forestier supérieur d'environ 10% pour Sainte-Cécile par rapport à Sénéchas).

Cette différence est à associer à l'analyse des quantiles de pluies journalière des séries longues présentée au § 4.7 : cette analyse propose des valeurs un peu plus fortes sur le bassin de Sénéchas que sur celui de Ste-Cécile.

4.7 STATISTIQUES SUR LES PLUIES OBSERVEES CUMULS AU PAS DE TEMPS JOURNALIER

Dans le cadre de [1], une étude statistique des pluies journalières a été menée sur 3 postes pour Ste-Cécile et 4 postes pour Sénéchas avec :

- pour Sainte Cécile : le Collet de Dèze (représentatif de 70% de la surface du bassin versant), Cassagnas (18% du bassin) et Sainte Cécile (12% du bassin),
- pour Sénéchas : Génolhac (35% du bassin), Malon (24% du bassin), Sénéchas (21% du bassin) et Villefort (20% du bassin).

Parmi ces sept postes, 5 présentent des séries de plus d'un siècle. Le tableau suivant présente le nombre d'années de données disponibles pour chacun de ces postes.

Poste	Cassagnas	Collet de Dèze	Malon	Genolhac	Villefort
Altitude	800 m NGF	348 m NGF	620 m NGF	541 m NGF	620 m NGF
Nb d'année	129	129	128	126	129
Nb d'année	129	129	128	126	129

Tableau 20 : postes aux séries longues

La carte n°5 insérée en annexe présente l'implantation des postes pluviométriques aux séries longues.

Le graphique suivant présente :

- les distributions de fréquence des pluies journalières observées aux postes aux longues séries,
- les distributions de fréquence des pluies journalières estimées par Shypre,
- deux ajustements statistiques proposés (gradex 1 et gradex 2).

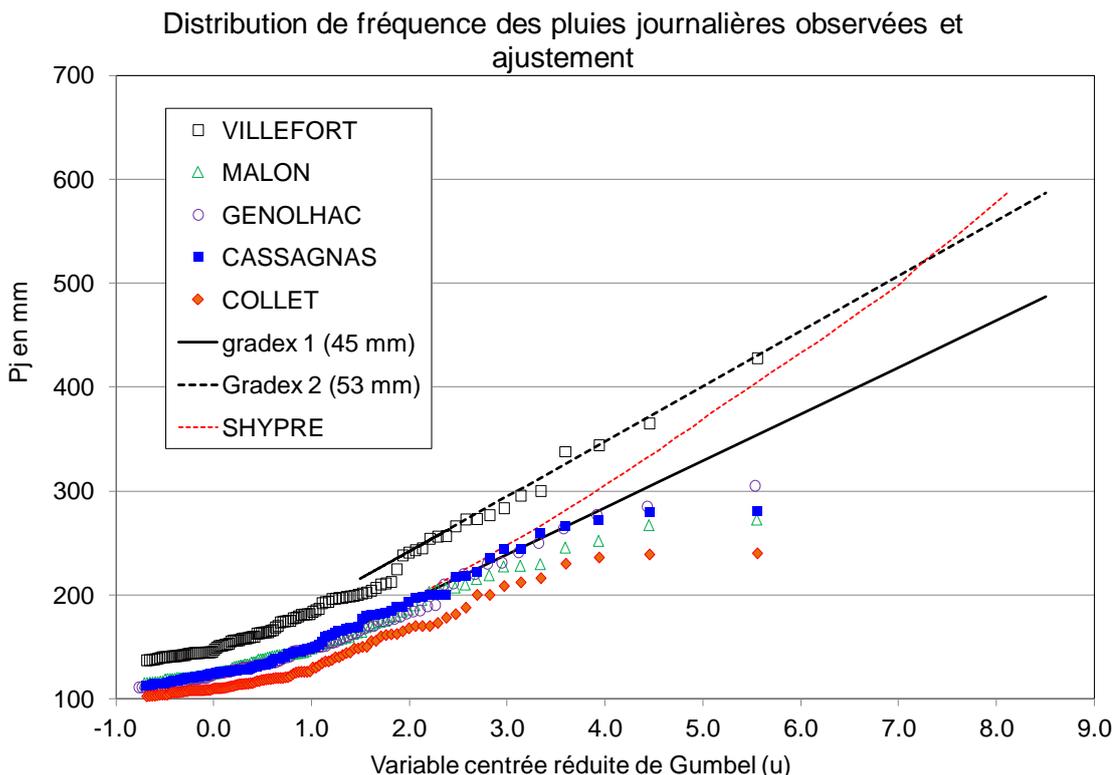


Figure 16 : pluies journalières observées et ajustements

Les distributions observées aux postes de Genolhac (541 m NGF), Cassagnas (800 m NGF) et Malon (620 m NGF) sont proches. La courbe « Gradex 1 » correspond à un ajustement moyen que l'on peut considérer représentatif de ce groupe de postes. Le gradex journalier est de 45 mm. La distribution aux postes de Collet de Dèze présente des valeurs légèrement en retrait. Par sécurité, elle ne sera pas prise en compte dans la suite de l'analyse.

La courbe « Gradex 2 » correspond à un ajustement représentatif de Villefort. Les pluies y sont notablement plus fortes que pour les autres postes. Le gradex journalier est de 53 mm.

Les distributions de fréquence des pluies SHYPRE suivent une évolution distincte de celle du gradex. Elles ne suivent pas une évolution exponentielle (comme le GRADEX) mais sur-exponentielle. L'utilisation de loi à croissance exponentielle (GRADEX) sans sous échantillonnage homogène sous estime les distributions de pluie pour les fortes périodes de retour.

Pour le bassin de Ste-Cécile, de manière sécuritaire, il est proposé de retenir comme valeurs de poste celles déduites de la courbe « Gradex 1 ».

Pour le bassin de Sénéchas, il est proposé de retenir comme valeur de poste une moyenne pondérée des gradex 1 et 2. Les coefficients de pondération correspondent au pourcentage de superficie du bassin versant influencé par chaque poste. Villefort influence 20 % du bassin versant. Genolhac et Malon influent à eux deux 80 % du bassin versant. Le gradex de poste de Sénéchas sera donc le suivant :

$$\text{Gradex poste} = (1 - 0.2) \text{ gradex 1} + 0.2 \text{ gradex 2} = 47.$$

Avant d'appliquer les pluies de poste aux bassins, elles seront réduites afin de prendre en compte l'abattement spatial selon la méthode développée par le Cémagref. Il s'agit de la même méthode que celle proposée dans [1].

Le Cémagref a établi une formule empirique pour la région Languedoc Roussillon qui permet de déterminer le coefficient d'abattement K, rapport entre la pluie bassin et la pluie ponctuelle. Le coefficient d'abattement est dépendant de la période de retour et de la durée de l'évènement. La formule est la suivante :

$$K = \frac{1}{1 + \frac{0,02\sqrt{S}}{(1 - F)^{0,07} t^{0,33}}}$$

Avec :

- « S » la superficie du bassin versant (km²) « F » la fréquence en non dépassement,
- « t » la durée de la pluie en heure.

4.8 CUMULS JOURNALIERS AU BARRAGE DE STE-CECILE

Pour le barrage de Ste-Cécile, les valeurs du coefficient d'abattement figurent dans le tableau suivant.

Coefficient d'abattement Durée de 24h	10 ans	50 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10000 ans
Sainte Cécile	92 %	91 %	91 %	89 %	88 %	87 %

Tableau 21 : coefficients d'abattement 24h – Sainte Cécile

Le tableau suivant présente les cumuls pluviométriques journaliers avant et après abattement spatial. Les valeurs sur 24h sont obtenues par multiplication des valeurs journalières par le coefficient de Weiss (1,14).

Le tableau présente également le gradex journalier avant abattement.

Bassin versant Sainte Cécile	10 ans	50 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10000 ans	Gradex journalier
Pj de poste	205 mm	279 mm	311 mm	415 mm	487 mm	518 mm	45 mm
Pj de bassin	188 mm	254 mm	281 mm	369 mm	428 mm	453 mm	-

Tableau 22 : PJ de poste et PJ de bassin - Sainte Cécile

4.9 CUMULS JOURNALIERS AU BARRAGE DE SENECHAS

Les coefficients d'abattement retenus pour le bassin versant de Sénéchas figurent dans le tableau suivant.

Coefficient d'abattement Durée de 24h	10 ans	50 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10000 ans
Sénéchas	92 %	91 %	91 %	89 %	88 %	88 %

Tableau 23 : coefficients d'abattement 24h – Sénéchas

Le tableau suivant présente les cumuls pluviométriques journaliers avant et après abattement spatial.

Bassin versant Sénéchas	10 ans	50 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10000 ans	Gradex journalier
Pj de poste	215 mm	292 mm	325 mm	432 mm	507 mm	539 mm	47 mm
Pj de bassin	198 mm	266 mm	296 mm	385 mm	446 mm	474 mm	

Tableau 24 : PJ de poste et PJ de bassin - Sénéchas

4.10 CUMULS AUX PAS DE TEMPS 6 H

4.10.1 POSTES PLUVIOGRAPHIQUES

Dans le cadre de [1], les données horaires des 9 postes figurant dans le tableau suivant ont été analysées de manière à approcher un coefficient de Montana unique pour les pluies de durées supérieures à 6h. Les échantillons comprennent entre 19 et 31 années de données.

Poste	X [LII / LIII]	Y [LII / LIII]	Z [mNGF]	Nombre d'années
Malon	726420	1880736	147	31
St-Roman	735721	1881976	73	31
Ners	731485	1917111	291	19
Mialet	725940	1903936	161	27
Sénéchas	745800	1892066	119	24
Ceyrac	714570	1906276	650	35
Rouvière	732600	1937800	118	33
Ste-Cécile	736639	1925675	290	32
Conqueyrac	726300	1883900	125	19

Tableau 25 : postes pluviographiques

4.10.2 DESCRIPTION DES APPROCHES

Comme dans [1], les gradex des pluies de 6h peuvent être appréciés par deux approches :

- Approche 1 : à partir des statistiques au droit des pluviographes de Ste-Cécile et Sénéchas dont les données sont disponibles sur respectivement 32 et 24 années,
- Approche 2 : à partir des statistiques pluviométriques sur les pluies journalières déduites des séries longues par application de la formule de Montana.

4.10.3 APPROCHE 1 DE P_{6h} PAR LA FORMULE DE MONTANA

La formule de Montana est la suivante :

$$P_{6h} = \frac{1.14P_j}{24^{1-b}} \times t^{1-b}$$

avec :

- P_{6h} : la pluie de bassin sur 6h, en mm,
- P_j : la pluie journalière sur 24h, en mm,
- b le coefficient de Montana.

D'après [1], les statistiques pluviométriques sur les pluies de courtes durées ont conduit à un coefficient b de Montana de 0,66 pour des durées t ≥ 6h.

Les tableaux suivants présentent les pluies de bassin journalières et les pluies de bassin sur 6h déduites de cette approche.

Bassin versant Sainte Cécile	10 ans	50 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10000 ans
P _j de bassin	188 mm	254 mm	281 mm	369 mm	428 mm	453 mm
P _{6h} de bassin	134 mm	181 mm	200 mm	263 mm	305 mm	322 mm

Tableau 26 : PJ et P_{6h} de bassin - Sainte Cécile

Bassin versant Sénéchas	10 ans	50 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10000 ans
P _j de bassin	198 mm	266 mm	296 mm	385 mm	446mm	474 mm
P _{6h} de bassin	141 mm	189 mm	210 mm	274 mm	317 mm	338 mm

Tableau 27 : PJ et P_{6h} de bassin - Sénéchas

4.10.4 APPROCHE 2 DE P6H A PARTIR DES POSTES PLUVIOGRAPHIQUES

Le tableau suivant présente les pluies de 6h déduites par [1] de l'approche statistique des postes pluviographiques des barrages.

P6h aux postes pluviographiques	10 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10000 ans
Poste du barrage de Sainte Cécile	155 mm	241 mm	327 mm	386 mm	412 mm
Poste du barrage de Sénéchas	129 mm	207 mm	283 mm	336 mm	359 mm

Tableau 28 : P6h aux postes pluviographiques

Pour déduire les pluies de bassin des pluies aux postes, il convient également d'appliquer un abattement spatial conformément à la formule du Cémagref.

Le coefficient d'abattement est dépendant de la période de retour et de la durée de l'évènement. Les valeurs du coefficient d'abattement pour chacun des bassins figurent dans le tableau suivant.

Coefficient d'abattement Durée de 6h	10 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10000 ans
Sainte-Cécile	88 %	86 %	84 %	82 %	82 %
Sénéchas	88 %	86 %	84 %	82 %	82 %

Tableau 29 : coefficients d'abattement

Le tableau suivant présente les pluies de 6h de bassin.

P6h de bassin	10 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10000 ans
Sainte Cécile	136 mm	207 mm	274 mm	317 mm	336 mm
Sénéchas	113 mm	178 mm	238 mm	277 mm	293 mm

Tableau 30 : P6h de bassin

4.10.5 SYNTHÈSE POUR LES PLUIES DE 6H

Le tableau suivant compare les résultats des deux approches mises en œuvre pour apprécier les pluies de 6h.

P6h du bassin de Sainte Cécile	10 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10000 ans
Approche par la formule de Montana	134 mm	200 mm	263 mm	305 mm	322 mm
Approche à partir du poste pluviographique du barrage	136 mm	207 mm	274 mm	317 mm	336 mm

Tableau 31 : P6h du bassin de Sainte Cécile

P6h du bassin de Sénéchas	10 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10000 ans
Approche par la formule de Montana	141 mm	210 mm	274 mm	317 mm	338 mm
Approche à partir du poste pluviographique du barrage	113 mm	178 mm	238 mm	277 mm	293 mm

Tableau 32 : P6h du bassin de Sénéchas

Les valeurs obtenues par les deux approches sur le bassin versant du barrage de Sainte Cécile sont comparables.

Sur le bassin versant du barrage de Sénéchas, l'approche à partir de la formule de Montana conduit à des cumuls plus importants.

Pour estimer les P6h, l'approche par la formule de Montana, plus sécuritaire et moins dépendante des données aux barrages, a été retenue pour les deux bassins versants.

5 APPLICATION DE LA METHODE SHYPRE

5.1 PRESENTATION DE LA METHODE

La méthode Shypre a été appliquée sur les bassins versants des barrages de Sainte Cécile et Sénéchas. Shypre comprend une approche saisonnière constitutive de l'approche annuelle qui comprend deux saisons hydrologiques :

- hiver : décembre à mai,
- été : juin à novembre.

Shypre a également été appliquée sur deux périodes définies par ISL comme des périodes potentielles de travaux :

- période janvier à août,
- période juin à juillet.

Une présentation de la méthode Shypre est insérée en annexe.

La version de Shypre 2010 intègre :

- la dernière version de Shypre, qui comprend les derniers développements menés par IRSTEA,
- la nouvelle loi cote-débit du barrage de Sainte Cécile,
- la nouvelle superficie du bassin versant du barrage de Sainte Cécile.

5.2 CUMULS PLUVIOMETRIQUES DE REFERENCE SHYPRE

Les cumuls pluviométriques de référence ont été estimés par la méthode Shypre (2010). Les graphiques suivants présentent sur les bassins versants de Sainte Cécile et Sénéchas :

- les ajustements de gumbel des pluies de bassin estimées dans le cadre de la présente étude,
- les distributions des pluies issues de Shypre 2010.

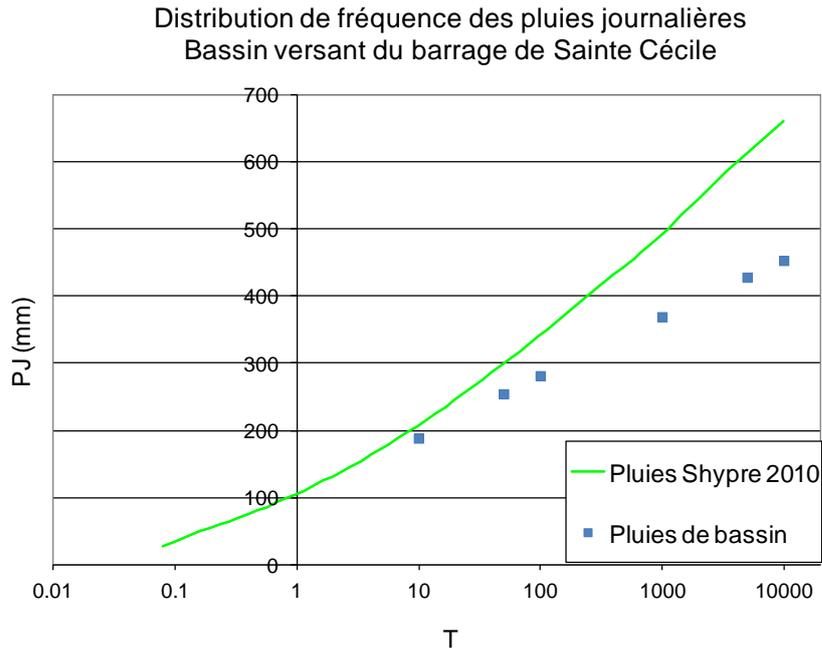


Figure 17 : Pj SHYPRE 2010 et Pj de bassin ajustées (Gumbel) pour Sainte-Cécile

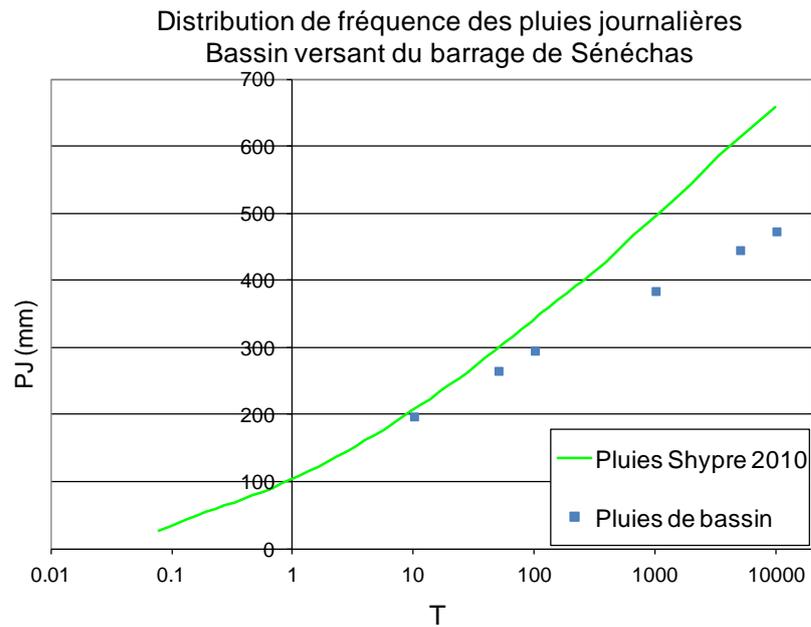


Figure 18 : Pj SHYPRE 2010 et Pj de bassin ajustées (Gumbel) pour Sénéchas

Les pluies journalières de période de retour 10 000 ans estimées par la dernière version de Shypre (2010) sont d'environ 660 mm pour les deux bassins versants.

Elles sont supérieures de 45 % environ à celles estimées dans le cadre de la présente étude par un ajustement de Gumbel (450 mm à Sainte-Cécile et environ 470 mm à Sénéchas). Ces écarts s'expliquent par le fait que l'utilisation en climat méditerranéen d'une loi à croissance exponentielle telle que la loi de Gumbel, sans sous-échantillonnage homogène par types d'événement, sous-estime les quantiles de pluie pour les fortes périodes de retour.

La figure suivante compare les distributions de fréquence SHYPRE des pluies en 6 heures des 2 bassins versants.

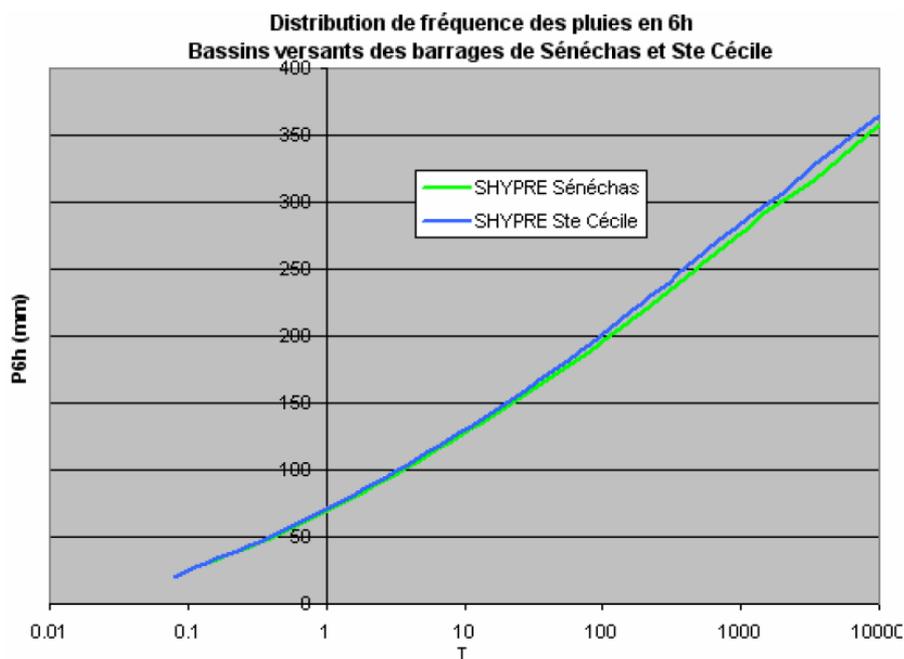


Figure 19 : distribution des P6h – barrages de Sainte Cécile et Sénéchas

La distribution de fréquence SHYPRE des pluies en 6h des deux bassins versant sont comparables.

Ces résultats sont synthétisés dans le tableau suivant. Les valeurs pour les deux bassins étant très proches, des valeurs arrondies communes aux deux bassins sont proposées.

Bassin versant Sainte Cécile et de Sénéchas	10 ans	50 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10000 ans
Pj de bassin	205 mm	300 mm	345 mm	490 mm	610 mm	660 mm
P6h de bassin	130 mm	180 mm	205 mm	285 mm	305 mm	364 mm

Tableau 33 : PJ et P6h SHYPRE - Sainte Cécile et Sénéchas

5.3 CALAGE DES PARAMETRES DU MODELE PLUIE-DEBIT GRS

Le modèle pluie-débit GRS a dans un premier temps été calé sur les distributions de fréquence des volumes ruisselés observés. Une description du modèle est présentée en annexe n°3. Ces distributions ont été issues des données de volumes ruisselés reconstitués par ISL et complétées par Hydris pour les faibles crues. Pour ces faibles crues, les volumes ruisselés ont été estimés par régression linéaire avec la cote maximale du plan d'eau.

Pour toutes saisons confondues et pour toutes durées (6h et 24h), les crues retenues par Hydris sont au total de :

- 78 sur le bassin versant de Sainte Cécile,
- 45 sur le bassin versants de Sénéchas.

La méthode SHYPRE comporte 2 saisons hydrologiques : « été » (de juin à novembre) et « hiver » (de décembre à mai). Les crues retenues par Hydris ont été classées en fonction de ces saisons.

Le recalage porte sur le paramètre de production S_0/A (Taux de remplissage (S) initiale (0) du réservoir de production (A)) du modèle pluie-débit conceptuel GR, compris entre 0 et 1 et représentant l'état de saturation hydrique du bassin versant.

Le paramètre de production S_0/A a été calé pour chacune des deux saisons, de manière à obtenir une distribution de fréquence des lames d'eau en 6h et 24h proche de la distribution de fréquence « observée ».

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

- Ste Cécile : S_0/A hiver = 0.74 et S_0/A été = 0.70
- Sénéchas : S_0/A hiver = 0.81 et S_0/A été = 0.72

Les graphiques suivants présentent les distributions de fréquence saisonnières des volumes ruisselés sur 6h et 24h issues de Shypre 2010 et des observations.

Bassin versant du barrage de Sainte Cécile :

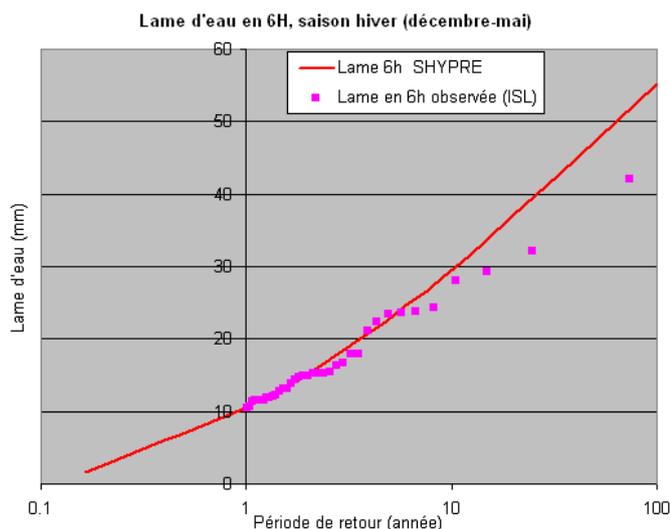


Figure 20 : SHYPRE 2010 - V6h (décembre/mai)- barrage de Sainte Cécile

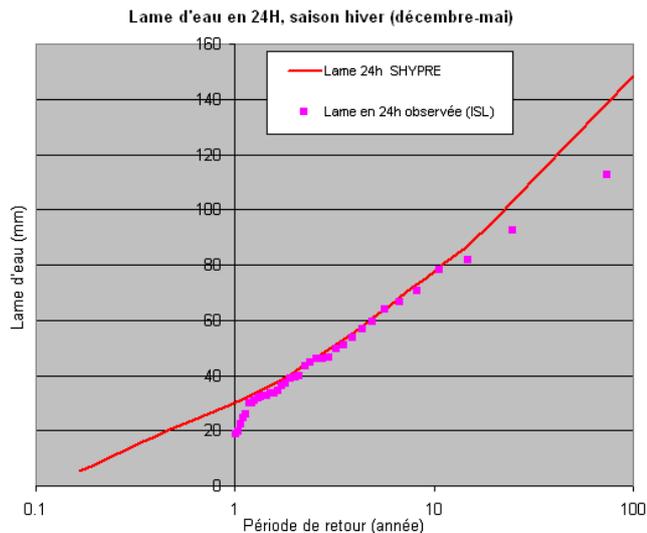


Figure 21 : SHYPRE 2010 - V24h (décembre/mai)- barrage de Sainte Cécile

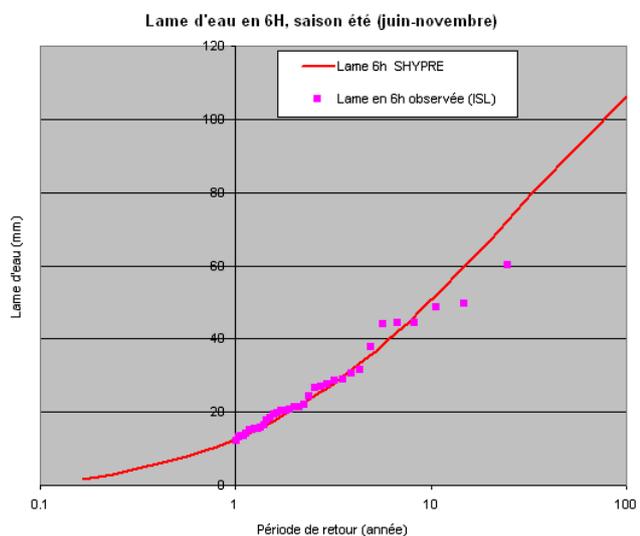


Figure 22 : SHYPRE 2010 - V6h (juin/novembre) barrage de Sainte Cécile

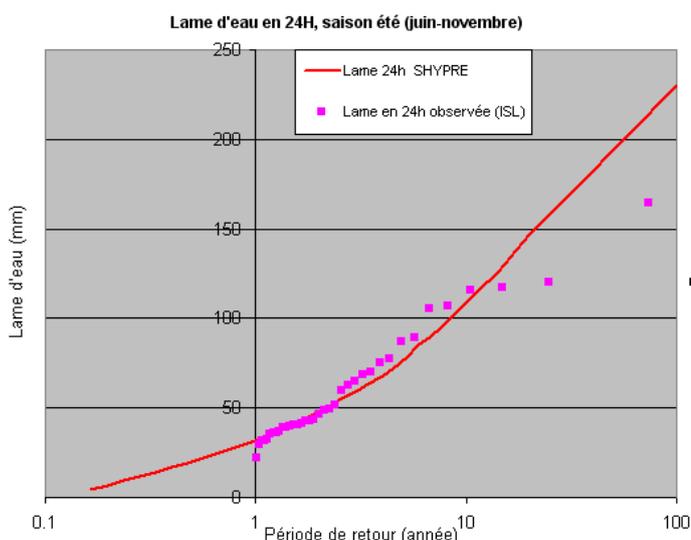


Figure 23 : SHYPRE 2010 - V24h (juin/novembre)- barrage de Sainte Cécile

Bassin versant du barrage de Sénéchas :

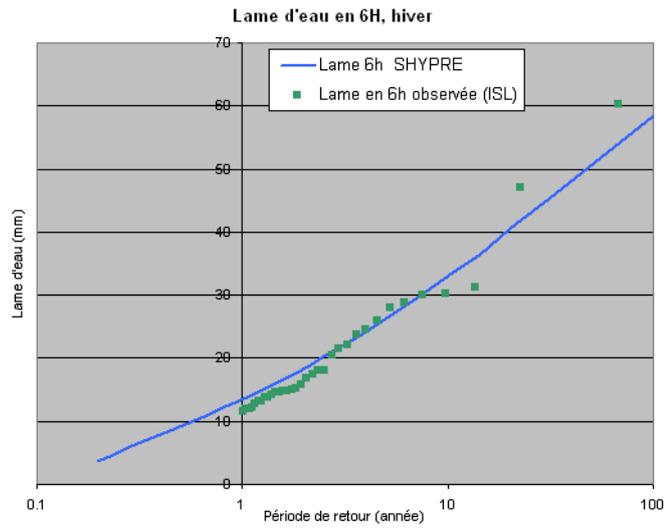


Figure 24 : SHYPRE 2010 - V6h (décembre/mai) barrage de Sénéchas

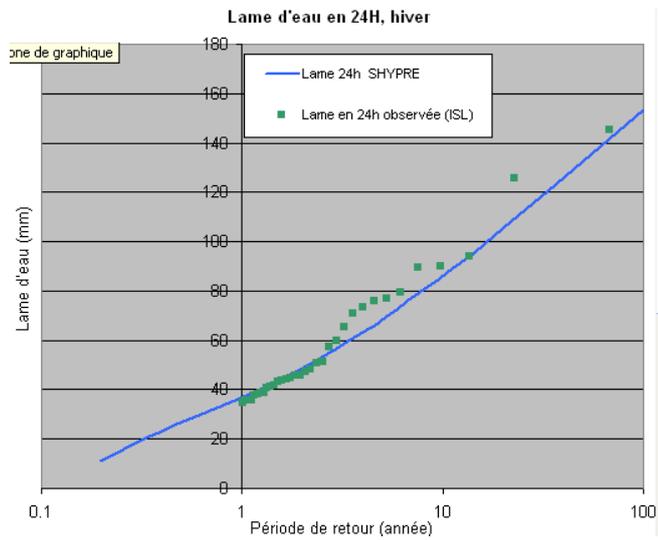


Figure 25 : SHYPRE 2010 - V24h (décembre/mai)- barrage de Sénéchas

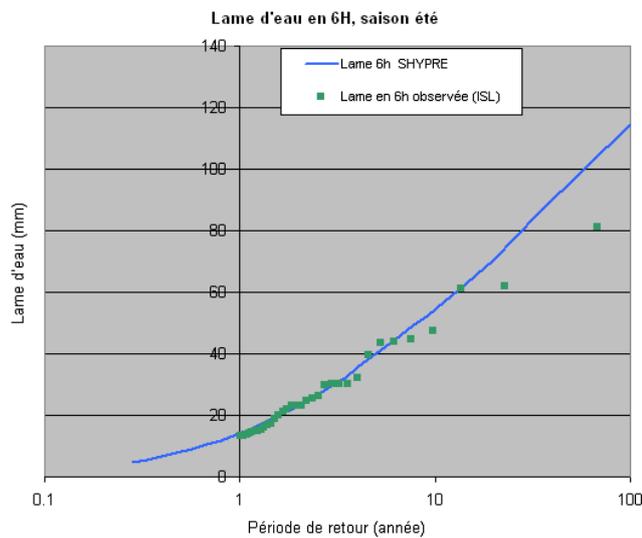


Figure 26 : SHYPRE 2010 - V6h (juin/novembre)- barrage de Sénéchas

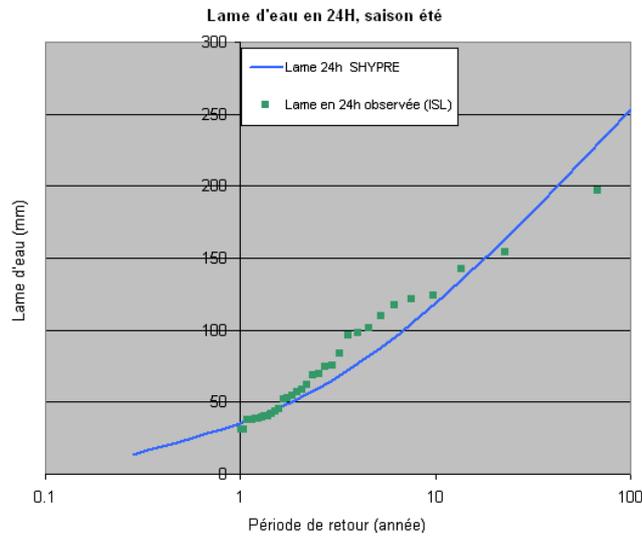


Figure 27 : SHYPRE 2010 - V24h (juin/novembre)- barrage de Sénéchas

Les distributions des lames d'eau SHYPRE 2010 sont calées sur les distributions des « lames d'eau observées » pour les fréquences courantes, zone dans laquelle les distributions « observées » sont stables et non soumises au problème de l'échantillonnage.

Les distributions des lames « observées » de Sénéchas sont moins stables que celles de Sainte Cécile. Ceci s'explique en partie par un plus grand nombre de valeurs estimées par régression (6 régressions sur Sainte Cécile contre 12 sur Sénéchas sur la période « été » de Shypre et 2 régressions sur Sainte Cécile contre 15 sur Sénéchas sur la période « hiver » de Shypre) [3].

Les graphiques suivants comparent les différentes distributions des lames d'eau en 6h et 24h sur Sénéchas et Sainte Cécile [3].

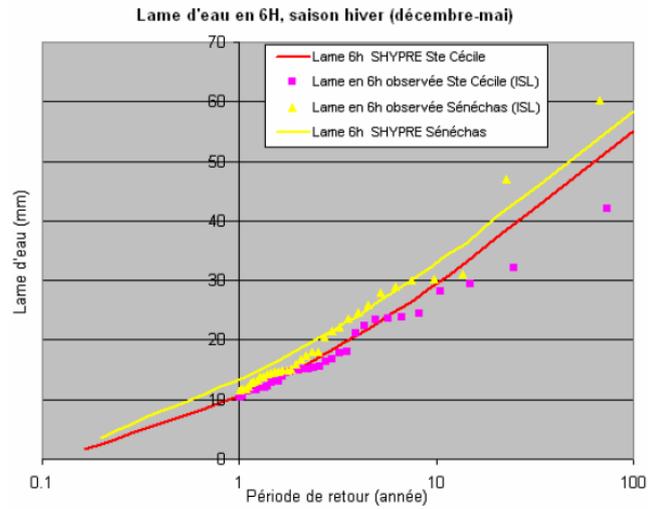


Figure 28 : SHYPRE 2010 – V6h (déc/mai)- barrage de Sénéchas et Ste-Cécile

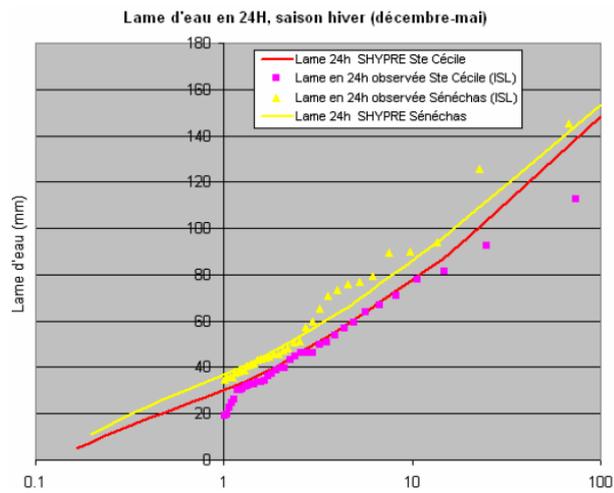


Figure 29 : SHYPRE 2010 – V24h (déc/mai)- barrage de Sénéchas et Ste-Cécile

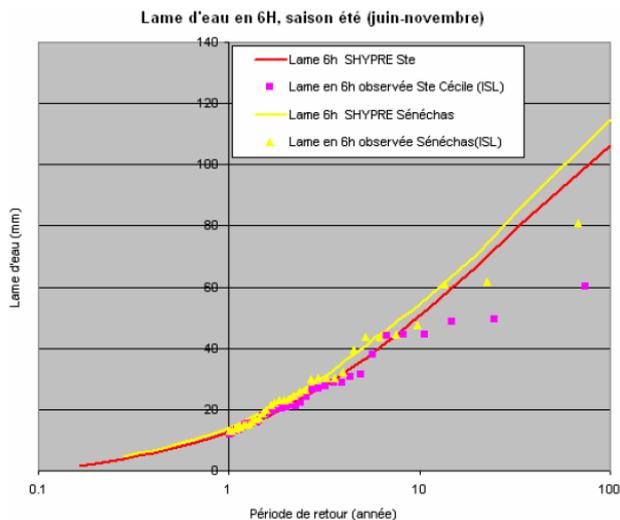


Figure 30 : SHYPRE 2010 – V6h (juin/nov)- barrage de Sénéchas et Ste-Cécile

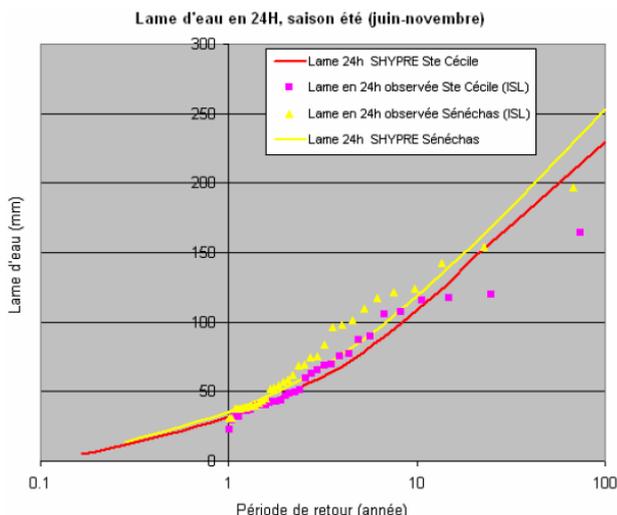


Figure 31 : SHYPRE 2010 – V24h (juin/nov)- barrage de Sénéchas et Ste-Cécile

Les distributions des lames « observées » de Sénéchas sont moins stables que celles de Ste Cécile, principalement pour la durée 24h. Ceci s'explique en partie par un plus grand nombre de valeurs estimées par régression.

5.4 RESULTATS SHYPRE

5.4.1 DEBITS DE POINTE DES CRUES

Shypre a été utilisé pour apprécier les distributions de fréquence annuelle des débits de pointe des bassins versants de Sainte Cécile et Sénéchas.

Les distributions de fréquence annuelle des débits de pointe sont présentées sur les graphiques suivants.

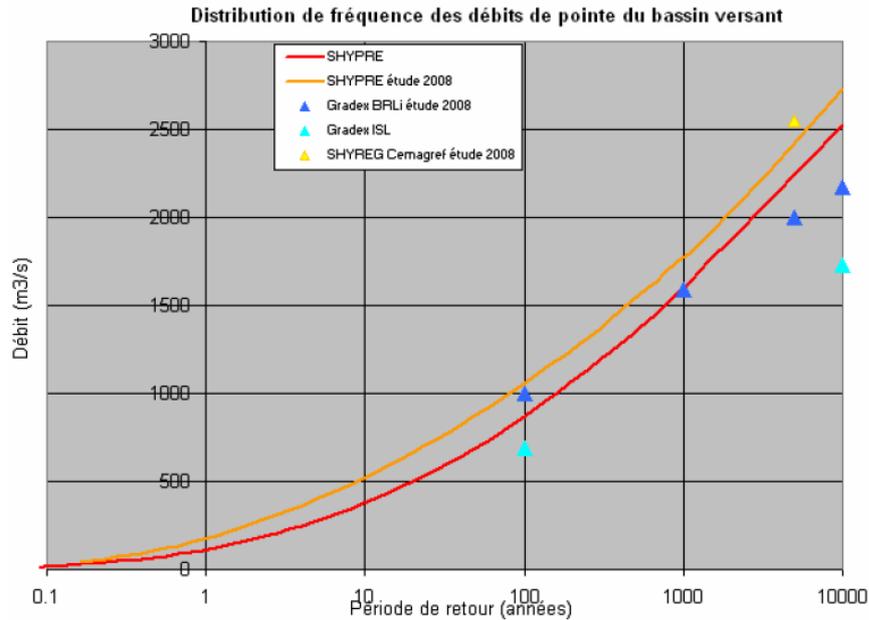


Figure 32 : distribution de fréquence des débits de pointe –Sainte Cécile

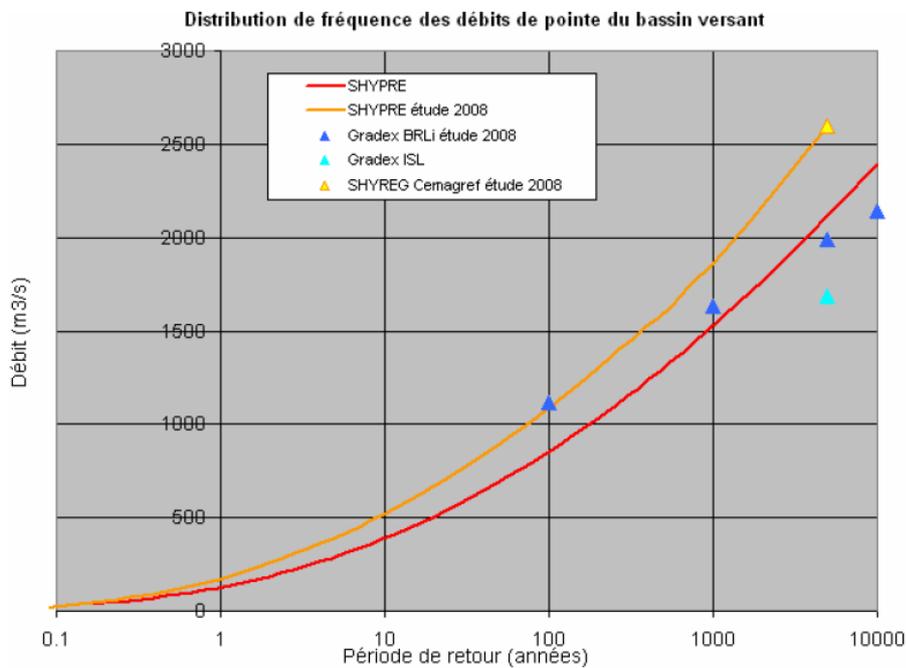


Figure 33 : distribution de fréquence des débits de pointe –Sénéchas

Les tableaux suivants présentent pour chacun des barrages les débits de pointe de référence obtenus par SHYPRE.

	10 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10000 ans
Qp Ste-Cécile	389 m ³ /s	868 m ³ /s	1605 m ³ /s	2236 m ³ /s	2520 m ³ /s
Q6h Ste-Cécile	278 m ³ /s	578 m ³ /s	948 m ³ /s	1241 m ³ /s	1374 m ³ /s
Q24h Ste-Cécile	160 m ³ /s	320 m ³ /s	538 m ³ /s	710 m ³ /s	785 m ³ /s
Qp Sénéchas	391 m ³ /s	852 m ³ /s	1527 m ³ /s	2120 m ³ /s	2390 m ³ /s
Q6h Sénéchas	287 m ³ /s	573 m ³ /s	926 m ³ /s	1204 m ³ /s	1344 m ³ /s
Q24h Sénéchas	166 m ³ /s	321 m ³ /s	532 m ³ /s	701 m ³ /s	768 m ³ /s

Tableau 34 : résultats Shypre

La figure suivante présente les distributions de fréquences SHYPRE et GRADEX (cf § 6) des débits de pointe et moyens en 6h des 2 bassins versants.

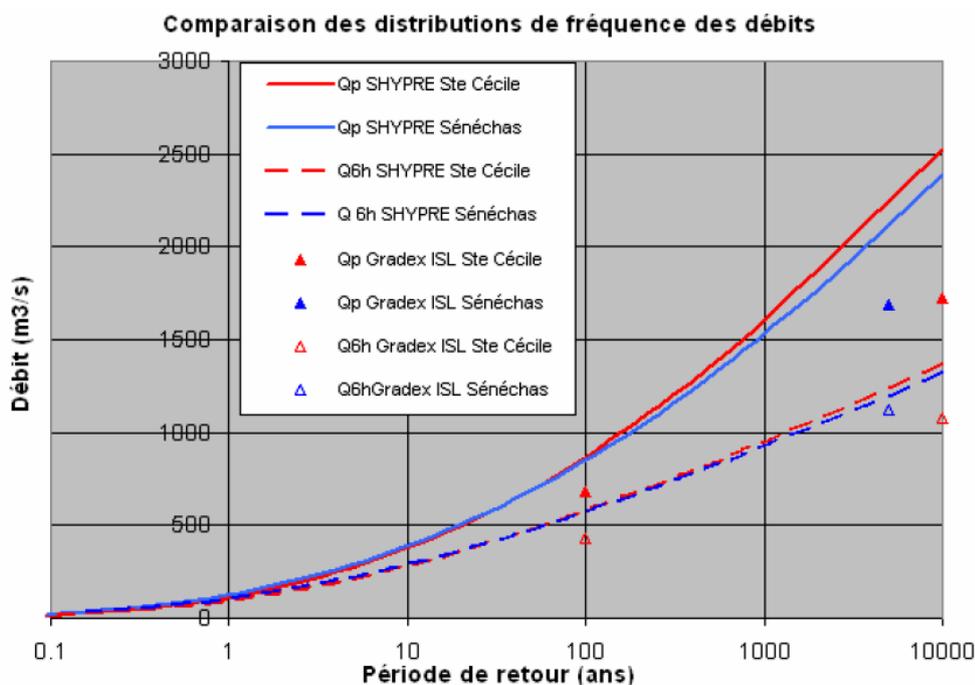


Figure 34 : comparaison de distributions de fréquence des débits

Les débits de pointe et moyens en 6h SHYPRE sont légèrement plus forts sur Ste Cécile que sur Sénéchas alors que cette tendance est inversée avec le GRADEX.

Les débits de pointe estimés par Shypre sont plus forts que ceux estimés par la méthode du gradex.

5.4.2 COTES DANS LES RETENUES

La méthode Shypre permet également de générer les distributions de cote dans les retenues. Les graphiques suivants présentent pour chaque barrage :

- les distributions des cotes observées pour les crues reconstituées par ISL,
- les distributions de fréquence des cotes du plan d'eau issues de Shypre.

Il a été fait l'hypothèse d'une cote initiale dans la retenue égale à la cote de retenue normale qui correspond à la cote des pertuis de laminage (cote 242,0 m NGF).

Il est à noter qu'une analyse de sensibilité de la cote initiale dans la retenue sur la distribution de fréquence des cotes a été réalisée pour le barrage de Sainte Cécile (cf. § 5.5).

Barrage de Sainte Cécile:

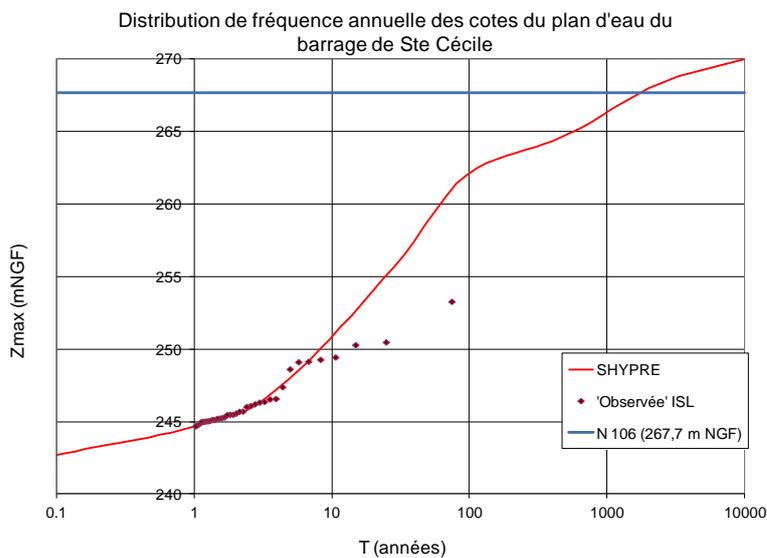


Figure 35 : cote dans la retenue de Sainte-Cécile

Barrage de Sénéchas :

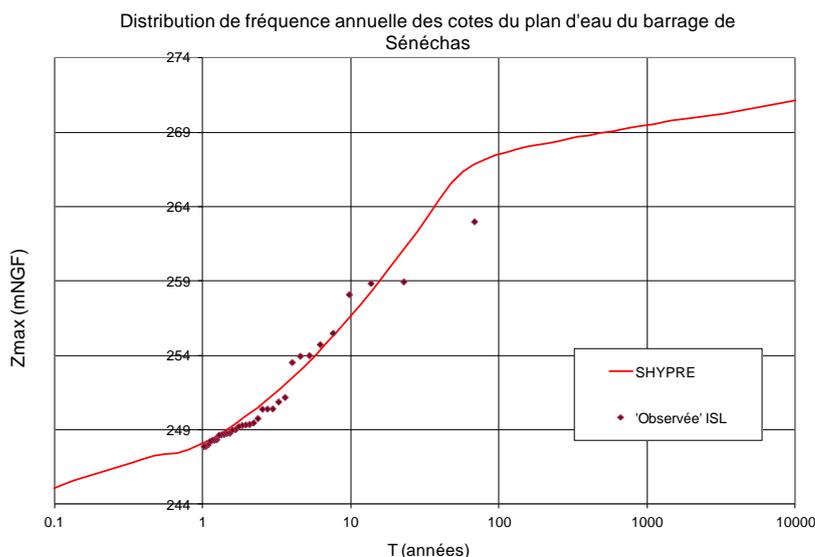


Figure 36 : cote dans la retenue de Sénéchas

Les distributions SHYPRE sont en accord avec les distributions « observées » sur la partie stable de celles-ci (au dessous de 10 ans).

Les nouvelles cotes de référence du plan d'eau déduites de l'approche en cote sont les suivantes :

- Ste-Cécile :
 - . Z 10 000 ans = 270,00 m NGF (contre 269.89 m NGF dans [1])
 - . la période de retour de déversement sur la RN106 est de l'ordre de 1800 ans (contre 800 ans dans [1])
- Sénéchas : Z 5000 ans = 270.60 m NGF (contre 271.47 m NGF dans [1]).

Concernant l'évolution de la période de retour du déversement sur le barrage de Ste-Cécile, il convient de préciser qu'elle est principalement due à l'évolution de la cote de déversement suite au dernier lever topographique (+0,7 m pour le déversement par la RN106).

5.5 IMPACT D'UNE COTE INITIALE INFÉRIEURE A LA COTE NOMINALE SUR LA DISTRIBUTION DE FREQUENCE DES COTES MAXIMALES DU PLAN D'EAU DU BARRAGE DE SAINTE CECILE

Il a été choisi pour effectuer les simulations SHYPRE de fixer la cote initiale du plan d'eau (cote avant chaque crue) à la cote nominale: 242 mNGF. Cependant, le barrage étant utilisé pour le soutien d'étiage, la cote du plan d'eau en période d'étiage peut être inférieure à 242 m NGF, avec une limite basse à 235 m NGF, en début de crue.

Aussi, afin d'examiner l'impact d'une cote initiale inférieure à la cote nominale sur la distribution de fréquence des cotes du plan d'eau, Hydris a effectué une simulation SHYPRE avec une cote initiale à 235 mNGF.

Notons que la cote de 242 mNGF correspondant à la cote du bas du puits de demi-fond, le débit sortant de la retenue sous cette cote est négligé. Le volume de la retenue sous cette cote est considéré comme un volume statique.

Le graphique suivant compare la distribution de fréquence obtenue avec une cote initiale à 235 m NGF (en pointillés bleus) avec celle obtenue avec une cote initiale à 242mNGF (en rouge) :

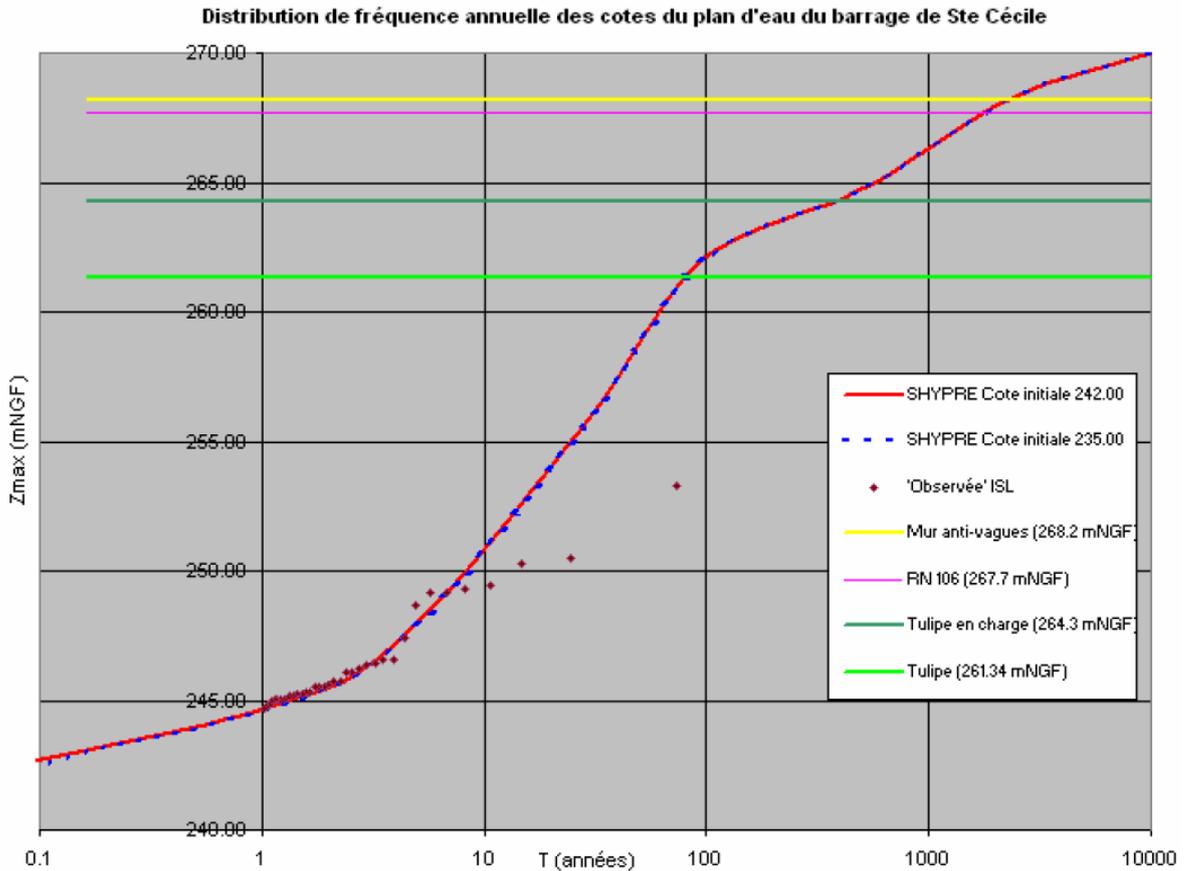


Figure 37 : distribution de fréquence des cotes – impact de la cote initiale du plan d'eau

Les deux distributions sont quasi-identiques, l'impact d'une cote initiale à 235 mNGF au lieu de 242 mNGF est négligeable.

La faiblesse de cet impact peut s'expliquer par :

- la faiblesse des volumes mis en jeu (quelques % du volume total des crues entre 235 et 242 m NGF)
- la différence de fonctionnement du barrage : le volume de la retenue entre 235 et 242 mNGF est un **volume statique**, il n'y a pas de débit sortant sous la cote 242 : lorsque la cote initiale est de 235, les débits du début de la crue remplissent ce volume statique ; le volume de la retenue au dessus de 242 est un **volume dynamique**, les débits transitent par le pertuis de demi fond dont la cote basse est à 242 m NGF : lorsque la cote initiale est de 242 m NGF, les débits du début de la crue transitent par le pertuis de demi-fond et la cote de la retenue évolue en fonction de la forme de la crue.

5.6 REPRESENTATIVITE CLIMATOLOGIQUE DE LA PERIODE 1976-2012

Le calage du modèle pluie-débit GRs d'Hydris reposant sur les mesures limnigraphiques de la période de 37 années 1976-2012, il a été cherché à définir la représentativité climatique de cette période par rapport aux séries longues de pluies journalières.

Pour cela Hydris a examiné les distributions de fréquences des pluies journalières des postes de Collet de Dèze et Cassagnas (utilisés pour le calcul de la pluie de bassin de Ste Cécile) sur la période 1894-2012 (112 ans de données) et sur 3 périodes de 37 années de données : 1898-1938, 1939-1975, 1976-2012.

Les distributions de fréquences correspondantes figurent sur les graphiques suivants.

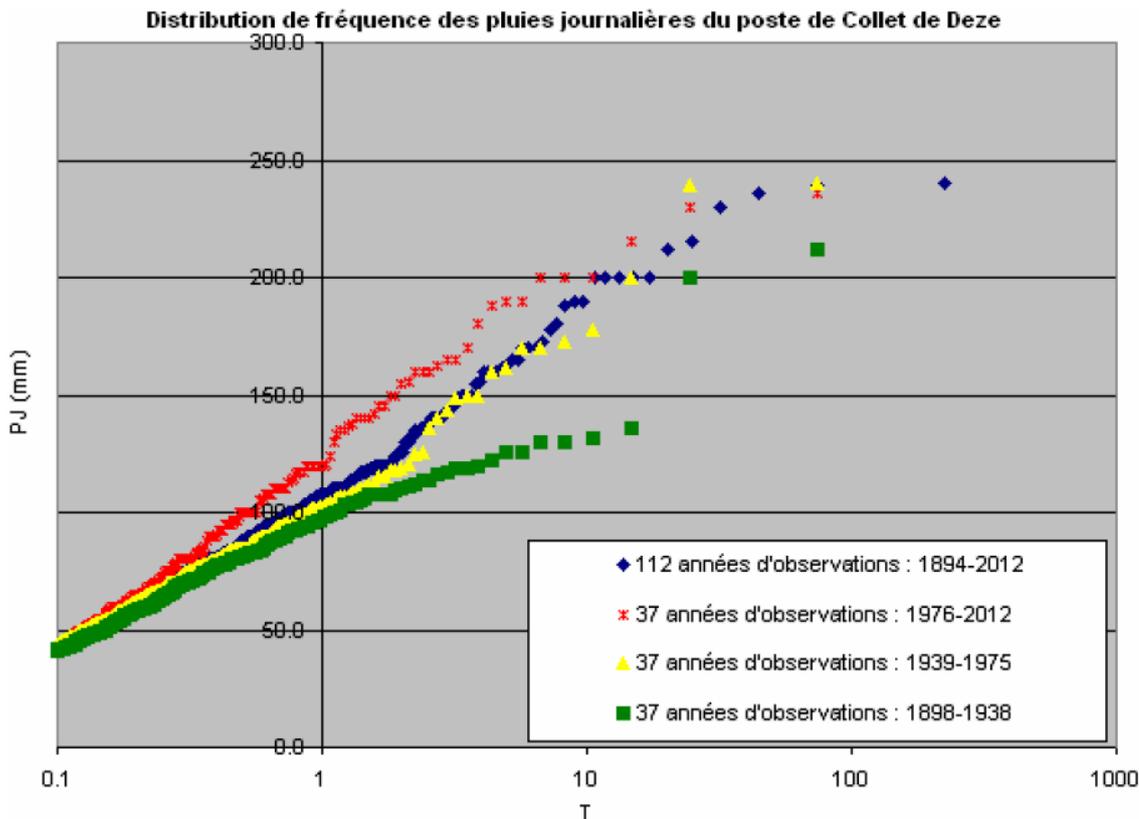


Figure 38 : distribution de fréquence des pluies journalières au poste de Collet de Deze [3]

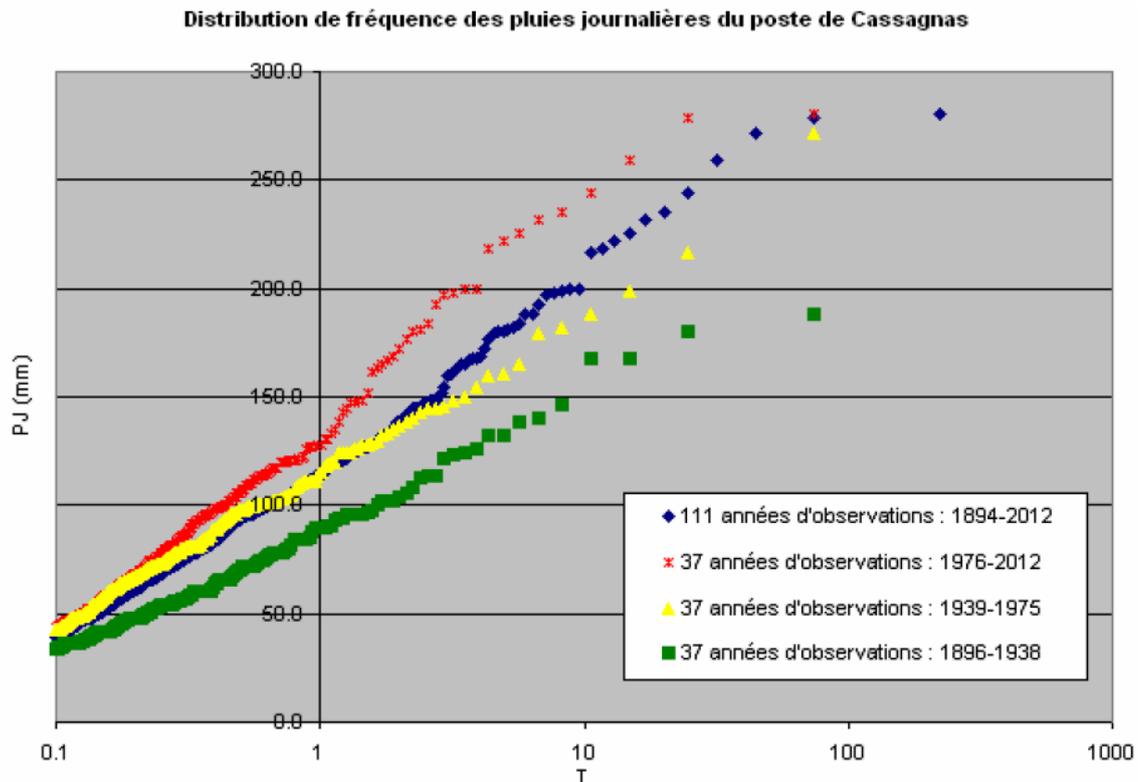


Figure 39 : distribution de fréquence des pluies journalières au poste de Cassagnas [3]

Pour ces deux stations, la distribution de fréquences des pluies journalières de la période 1976-2012 est nettement supérieur à celle de 1939-1975, elle même nettement supérieur à celle de 1898-1938.

Face à ce constat, l'avis de Météo France a été sollicité par le Conseil Général.

Les investigations menées par Météo-France sur la station de Collet de Dèze ont montré l'existence de ruptures d'homogénéité sur la période 1887-2000. Ces ruptures peuvent avoir des causes diverses : changement d'opérateur, modification de l'instrumentation, déplacement des stations ...).

Une série homogénéisée est disponible pour cette station et cette période mais au pas de temps mensuel et non pas au pas de temps journalier comme cela est nécessaire pour appliquer la méthode SHYPRE. N'étant pas en mesure de produire des séries homogénéisées au pas de temps journalier, le Conseil Général a choisi de garder les chroniques de 110 ans de pluie journalière (1894-2003) non homogénéisées comme données d'entrée.

Outre la problématique de l'homogénéité des séries, ces comparaisons montrent que la période de 37 années (1976-2012), dont les données sont a priori les plus fiables et sur laquelle repose le calage du modèle pluie-débit GRs [3], présente des cumuls de pluviométrie journalière un peu plus forte.

Les distributions de fréquence des lames d'eaux observées utilisées pour caler SHYPRE ne pêcheraient donc pas par défaut pour les fréquences courantes et se placent donc du côté de la prudence.

A contrario, cette hétérogénéité des séries pluviométriques incite à considérer avec prudence les estimations basées sur le gradex à partir de ces séries.

5.7 ANALYSE MENSUELLE DES VARIABLES DE SHYPRE DU BASSIN VERSANT DU BARRAGE DE STE-CECILE [4]

La méthode SHYPRE comporte 2 saisons hydrologiques :

- saison 1 : de décembre à mai (nommée « hiver »),
- saison 2 : de juin à novembre (nommée « été »).

Il est apparu nécessaire de modifier ce découpage afin d'obtenir des données sur les deux périodes potentielles de travaux envisagées par ISL (de janvier à août avec une sous-saison de juin à juillet pour les travaux les plus sensibles aux crues).

Afin de modifier ce découpage de l'année, il est nécessaire de redéfinir ces 2 saisons de la façon suivante :

Période janvier-août :

- saison 1 : de janvier à mai
- saison 2 : de juin à août

Période juin-juillet :

- saison 1 : sans objet
- saison 2 : juin et juillet

Afin de définir les variables de SHYPRE de chacune des saisons de ces nouvelles périodes, il est alors nécessaire d'analyser mensuellement ces variables.

Les variables du générateur de pluie de SHYPRE sont :

- NE : le nombre moyen d'événement (en jour),
- PJmax : la moyenne des pluies journalières maximales de chaque événement,
- Dtot : la durée moyenne de chaque événement.

Ces 3 variables sont calculées, à partir de la « station journalière de bassin » (Station fictive calculée par BRLi par la méthode des polygones de Thiessen à partir des stations du bassin versant : Collet-de-Dèze, Cassagnas et Sainte-Cécile), pour chaque mois de l'année :

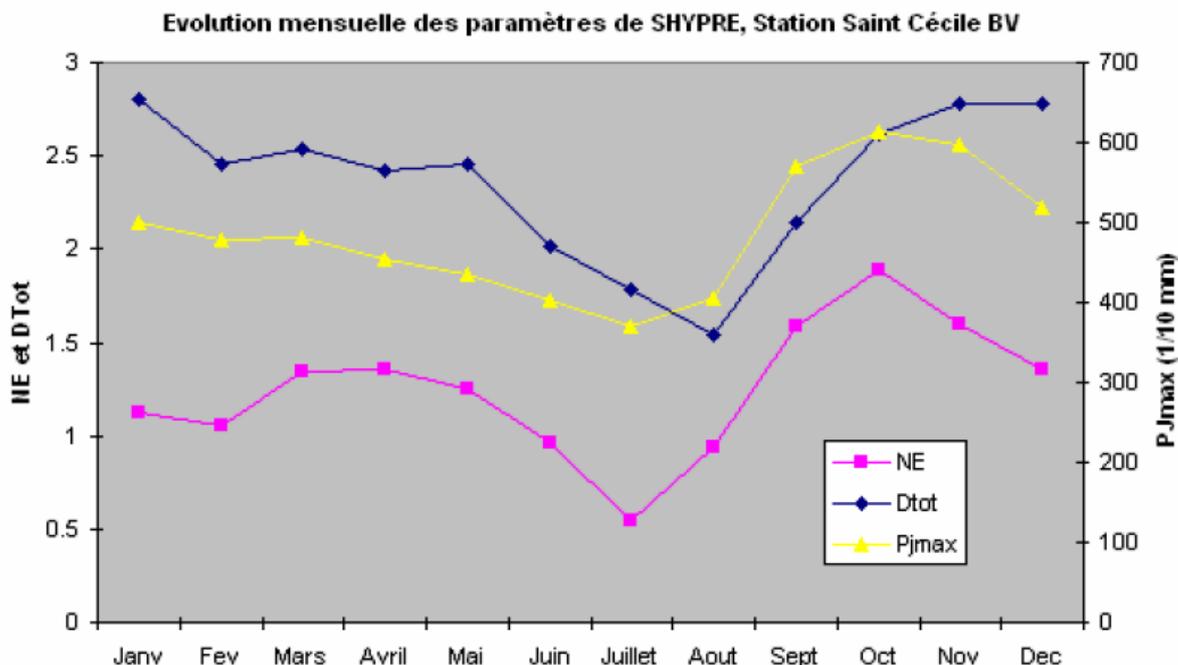


Figure 40 : évolution mensuelle des paramètres de Shypre

Ces valeurs mensuelles sont ensuite recomposées pour obtenir les valeurs de chacune des saisons de la période étudiée (cf tableau suivant).

Période	NE		Dtot		Pjmax	
	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2
Année	7.50	7.50	2.60	2.30	477.90	530.50
Janvier-aout	6.12	2.45	2.53	1.78	469	396.36
Juin-juillet		1.51		1.93		391.03

Tableau 35 : valeurs des variables de Shypre

Paramètre du modèle pluie-débit

Le paramètre du modèle pluie-débit de SHYPRE (GRs horaire) est le paramètre de production S0/A qui correspond au taux de remplissage initial du réservoir de production du modèle GR. Ce paramètre est un paramètre de calage.

Pour appréhender sa valeur sur chacune des saisons des nouvelles périodes étudiées, les valeurs mensuelles du paramètre Sclim (S/A climatique, S/A étant le taux de remplissage du réservoir de production du modèle GR) ont été utilisées.

Les chroniques de Sclim sont les valeurs de S/A obtenues en faisant fonctionner en continu le module de production du modèle GR journalier, à partir des chroniques de pluie et d'ETP fournies par SAFRAN. Ces valeurs sont calculées sur la maille des données SAFRAN (8 km x 8 km) puis intégrées sur chaque bassin versant.

Des chroniques journalières de Sclim ont été calculées sur une dizaine d'années depuis le 1^{er} août 1995 dans l'étude « Développement de la méthode AIGA version 2, étude de l'initialisation d'une version dégradée d'AIGA sur 1039 bassins versants français », Patrick Arnaud, IRSTEA, décembre 2008. Les valeurs mensuelles moyennes de Sclim découlant de ces chroniques pour le bassin versant du barrage de Saint Cécile sont décrites par le graphique suivant.

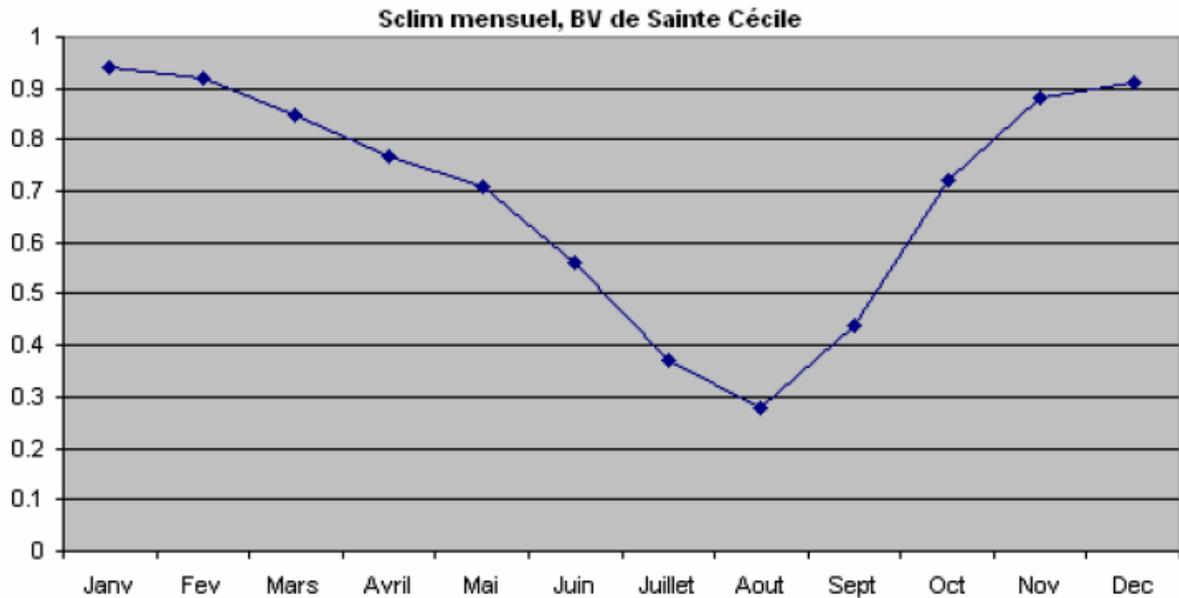


Figure 41 : variations de Sclim mensuel

A partir de ces Sclim mensuels et des valeurs mensuelles de NE, la valeur du Sclim de chacune des saisons des périodes étudiées est calculée comme la moyenne des Sclim mensuel pondérée par NE mensuel. Les valeurs retenues figurent dans le tableau suivant.

Saison	Sclim
été : Juin-novembre	0.59
hiver : Décembre-mai	0.85
Janvier-mai	0.83
Juin-juillet	0.49
Juin-août	0.41

Tableau 36 : valeurs de Sclim

La valeur de S0/A de chacune des saisons des nouvelles périodes étudiées est alors définie de la façon suivante (S0/A hiver et S0/A été étant les valeurs calées précédemment : 0.74 et 0.70):

Période janvier-août :

- $S0/A_{\text{janvier-mai}} = S0/A_{\text{hiver}} \times (Sclim_{\text{janvier-mai}} / Sclim_{\text{hiver}}) = 0.73$
- $S0/A_{\text{juin-août}} = S0/A_{\text{été}} \times (Sclim_{\text{juin-août}} / Sclim_{\text{été}}) = 0.48$

Période juin-juillet :

- $S0/A_{\text{juin-juillet}} = S0/A_{\text{été}} \times (Sclim_{\text{juin-juillet}} / Sclim_{\text{été}}) = 0.58$

5.8 APPLICATION DE SHYPRE SUR LES 2 PERIODES « TRAVAUX » DU BARRAGE DE STE-CECILE

A partir de ce recalage de SHYPRE et de l'analyse mensuelle de ces variables, SHYPRE est appliqué sur les 2 périodes « travaux » proposées par ISL :

- janvier à août
- juin et juillet

Pour ces 2 périodes travaux, la distribution de fréquence des cotes du plan d'eau SHYPRE est alors comparée à la distribution de fréquence des cotes du plan d'eau « observées » élaborée par ISL à partir de 37 années d'observation des cotes du plan d'eau du barrage.

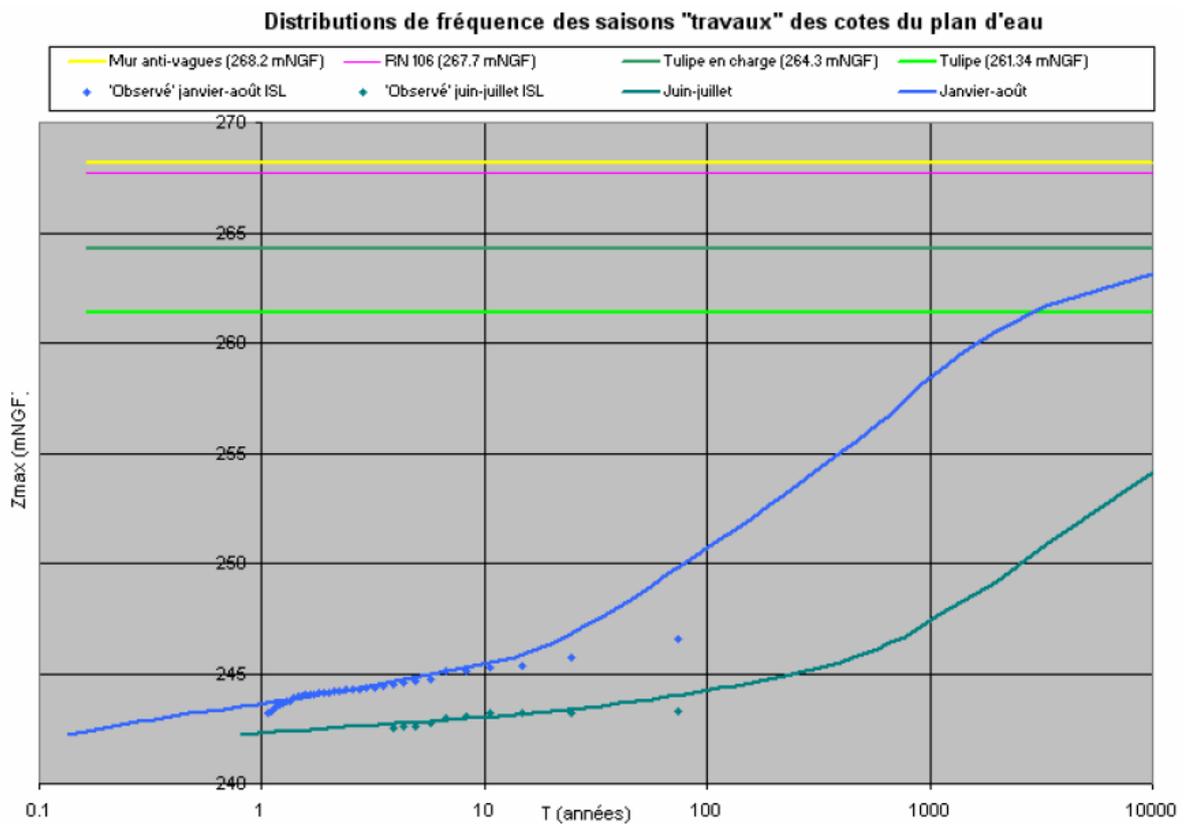


Figure 42 : distribution de fréquence des saisons « travaux » des cotes du plan d'eau

Les distributions SHYPRE sont en accord avec les distributions « observées » sur la partie stable de celles-ci (au dessous de 10 ans). Ceci valide la cohérence de la méthode.

Les cotes du plan d'eau pour la période de retour de déversement sur la RN 106 (1775 ans) sont de :

- 260.3 m NGF sur la période janvier à août,
- 248.9 m NGF sur la période juin à juillet.

Ces cotes constituent les cotes minimales du remblai du barrage (après terrassement) à adopter pendant la période des travaux associée pour ne pas augmenter le risque actuel de surverse.

5.9 TRANSDITION ET LAMINAGE DES EVENEMENTS EXTREMES REGIONAUX PAR LE MODELE GRS

Le modèle GRS (modèle pluie-débit) a été utilisé afin de transposer les hyétogrammes de deux évènements extrêmes centrés sur le barrage de Sainte Cécile : Léznigan 1999 et Cardet 2002. Les paramètres moyens saisonniers du modèle GRS ont été employés.

Les hydrogrammes ainsi obtenus figurent sur le graphique suivant.

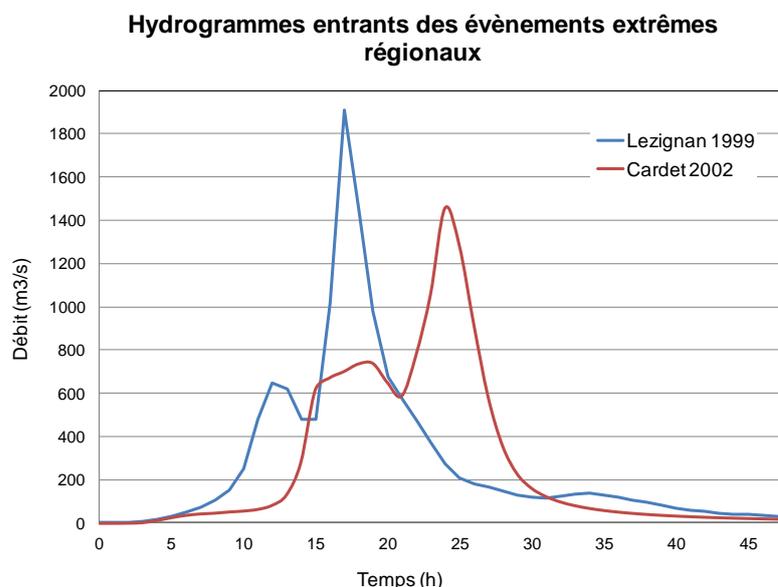


Figure 43 : hydrogrammes entrants des évènements extrêmes régionaux

	Leznigan 1999	Cardet 2002
P24h max (mm)	542	648
P6h max (mm)	245	269
Q entrant (m ³ /s)	1910	1455
Q sortant (m ³ /s)	1025	993
Cote (m NGF)	268,58	268,46
Surverse sur le parapet	0,5 m	0,4 m
Surverse sur la N 106 (267,7 m NGF)	0,9 m	0,8 m

Tableau 37 : résultats du laminage des évènements extrêmes régionaux

Le laminage des deux évènements régionaux conduit à une surverse par-dessus la RN106 et par-dessus le parapet du barrage.

5.10 HYDROGRAMMES MONOFREQUENCE

Des Hydrogrammes Synthétiques Monofréquence (HSMF) de période de retour 10 000 ans et 100 000 ans sont construits à partir des quantiles de débits issus de la méthode SHYPRE. Ces hydrogrammes sont exploités pour le prédimensionnement du nouvel évacuateur de crues.

Les figures suivantes présentent les hydrogrammes monofréquence (non centrés) de période de retour 10 000 ans et 100 000 ans.

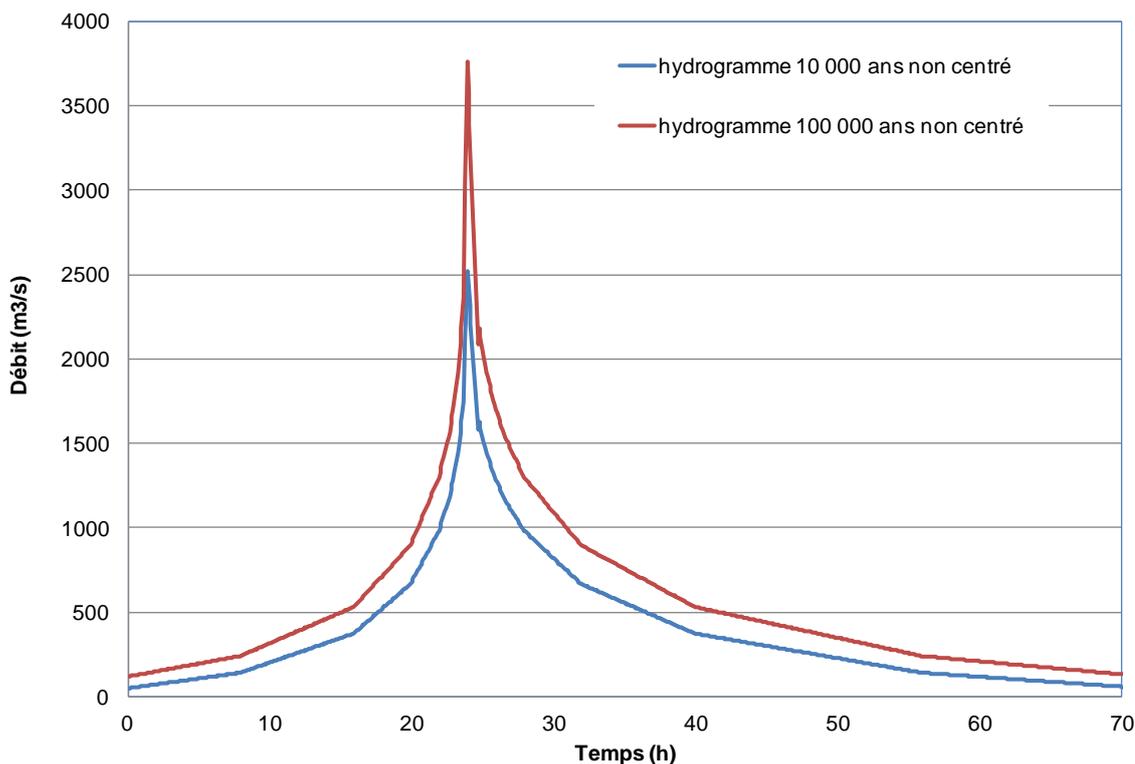


Figure 44 : hydrogrammes monofréquence non centrés 10 000 et 100 000 ans

Les principales valeurs de l'hydrogramme monofréquence de période de retour 10 000 ans sont figurées dans le tableau suivant.

	T = 10 000 ans	T = 100 000 ans
Bassin versant : S (km ²)	116	116
Débit de pointe : Q _p (m ³ /s)	2 520	3 760
Débit spécifique de pointe : Q _p /S (m ³ /s/km ²)	22	32
Débit sur 24h : Q _{24h} (m ³ /s)	790	1110
Coefficient Q _p /Q _{24h}	3,2	3,4
Débit sur 6h : Q _{6h} (m ³ /s)	1 380	1 920
Coefficient Q _p /Q _{6h}	1,8	2,0

Les coefficients de pointe augmentent avec la période de retour.

6 ACTUALISATION DU GRADEX

6.1 PRESENTATION DE LA METHODE

La méthode du gradex est une approche hydropluviométrique probabiliste du calcul des débits de crues extrêmes d'une rivière pour des événements de durée de retour située entre cent et dix mille ans.

Le principe est de déduire le comportement asymptotique de la loi de probabilité des volumes de crues rares de la loi de probabilité des cumuls de pluies extrêmes.

Le gradex fait l'hypothèse que la capacité de rétention tend à devenir constante pour des fortes averses à partir d'une certaine période de retour (pivot du gradex).

6.2 ESTIMATION DE LA RETENTION

6.2.1 RETENTION DEDUITE DES PIVOTS

La relation liant les pluies et les volumes ruisselés s'écrit de la manière suivante : $V = P - S$

Avec

- V : le volume ruisselé (mm),
- P : la pluie (mm),
- S : la rétention (mm) qui est considéré constante au-delà du pivot.

Dans le cadre de la présente étude, la méthode du gradex a été appliquée :

- sur les crues de la saison annuelle aux pas de temps 6h et 24h
- en considérant un pivot à 50 ans

Les pluies de bassin sur 6h et 24h sont issues des analyses présentées aux § 4.8 à 4.10.

Les volumes ruisselés sur 6h et 24h sont issus de l'ajustement des volumes des hydrogrammes entrants (cf. § 4) dans les retenues de Sainte Cécile et Sénéchas.

La rétention a été calculée à partir de ces valeurs (pour une période de retour donnée : rétention = pluie ajustée – volume ruisselé ajusté). Le tableau suivant présente les estimations des rétentions.

Bassin	T pivot	D pivot	P bassin (mm)	V ruisselé (mm)	Rétention (mm)
Ste-Cécile	50 ans	6 h	181	61	120
Sénéchas	50 ans	6 h	189	80	109
Ste-Cécile	50 ans	24 h	289	164	125
Sénéchas	50 ans	24 h	303	201	102

Tableau 38 : rétention

Selon les hypothèses,

- pour une durée de 6h, la rétention est comprise entre 109 et 120 mm,
- pour une durée de 24h, la rétention est comprise entre 102 et 120 mm.

Pour les crues rares (période de retour supérieure à 100 ans), ces rétentions conduisent à des coefficients de ruissellement :

- sur le bassin versant de Sainte Cécile :
 - . de 0,56 pour 6h
 - . de 0,61 pour 24h
- sur le bassin versant de Sénéchas :
 - . de 0,63 pour 6h
 - . de 0,70 pour 24h

6.3 DETERMINATION DES V24H

Les graphiques insérés en annexe 2 illustrent les résultats du gradex. Les valeurs de rétention conduisent aux volumes ruisselés figurant dans les tableaux suivants.

Barrage	50 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10 000 ans
Sainte-Cécile V24h / Pivot à 50 ans	164 mm	195 mm	295 mm	363 mm	391 mm
Sénéchas V24h / Pivot à 50 ans	201 mm	235 mm	337 mm	406 mm	438 mm

Tableau 39 : V24h issus du gradex – Sainte Cécile et Sénéchas

6.4 DETERMINATION DES V6H

Les graphiques insérés en annexe illustrent les résultats du gradex. Les valeurs de rétention conduisent aux volumes ruisselés figurant dans les tableaux suivants.

Barrage	50 ans	100 ans	1000 ans	5000 ans	10 000 ans
Sainte-Cécile V6h / Pivot à 50 ans	80 mm	102 mm	165 mm	208 mm	228 mm
Sénéchas V6h / Pivot à 50 ans	61 mm	80 mm	143 mm	185 mm	202 mm

Tableau 40 : V6h issus du gradex – Sainte Cécile- Sénéchas

Au vu de l'ajustement des V6h, le pivot à 50 ans paraît légitime.

6.5 ESTIMATION DES COEFFICIENTS DE POINTE

6.5.1 METHODE D'ESTIMATION

Les coefficients de pointe sont estimés à partir des coefficients calculés à partir des crues les plus importantes reconstituées (37 pour Ste-Cécile et 34 pour Sénéchas).

– sur 24h : $C_{p24h} = \frac{Q_p}{Q_{24h}}$,

– sur 6h : $C_{p6h} = \frac{Q_p}{Q_{6h}}$.

Avec,

- Q_p le débit de pointe de l'hydrogramme,
- Q_{24h} le débit moyen sur 24h, calculé à partir du volume ruisselé maximal sur 24h,
- Q_{6h} le au débit moyen sur 6h, calculé à partir du volume ruisselé maximal sur 6h.

Les coefficients de pointe ont été calculés pour les crues de la saison annuelle.

6.5.2 COEFFICIENTS DE POINTE DU BARRAGE DE STE-CECILE

Les deux graphiques suivants présentent :

- en abscisse, les débits de pointe des 37 crues observées sélectionnées,
- en ordonnées, les coefficients ou C_{p6h} (Figure 45 : C_{p6h} en fonction de Q_{6h}) et C_{p24h} (Figure 46 : C_{p24h} en fonction de Q_{24h}).

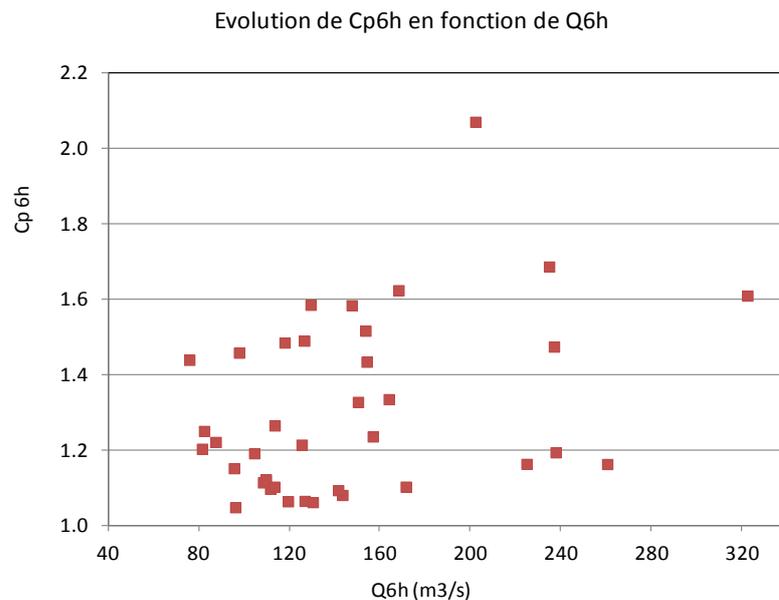


Figure 45 : C_{p6h} en fonction de Q_{6h}

Pour les crues les plus importantes ($Q_{6h} > 200 \text{ m}^3/\text{s}$) les C_{p6h} varient entre 1,2 et 1,7.

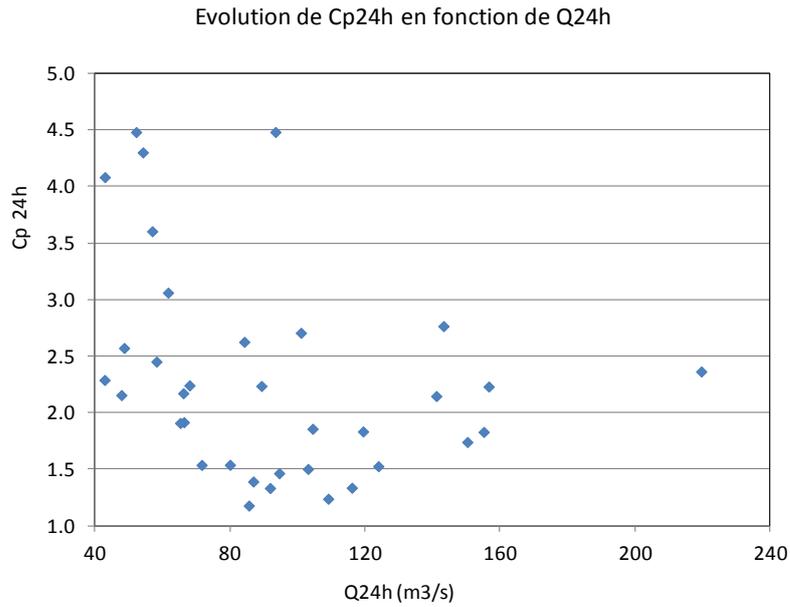


Figure 46 : Cp24h en fonction de Q24h

Pour les crues les plus fortes ($Q_{24h} > 140 \text{ m}^3/\text{s}$) Cp_{24h} varient entre 1,7 et 2,8.

Les coefficients de pointe issus de la méthode du Gradex qu'il est proposé de retenir figurent dans le tableau suivant. Ils correspondent à des débits compris entre :

- 120 et 240 m^3/s sur 24h,
- 200 et 340 m^3/s sur 6h.

Durée	24h	6h
Coefficient de pointe du gradex	2,5	1,6

Tableau 41 : coefficients de pointe du bassin de Ste-Cécile

6.5.3 COEFFICIENTS DE POINTE DU BARRAGE DE SENECHAS

Les deux graphiques suivants présentent :

- en abscisse, les débits de pointe des 34 crues observées sélectionnées,
- en ordonnées, les coefficients ou Cp6h et Cp24h (figures suivantes).

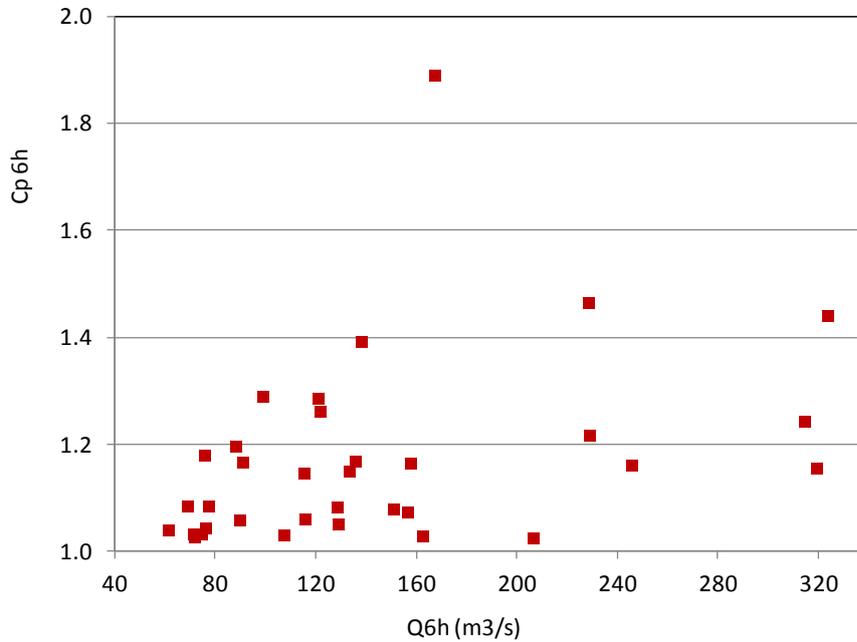


Figure 47 : Cp6h en fonction de Q6h - Sénéchas

Pour les crues les plus importantes ($Q_{6h} > 200 \text{ m}^3/\text{s}$) les Cp6h varient entre 1,0 et 1,5.

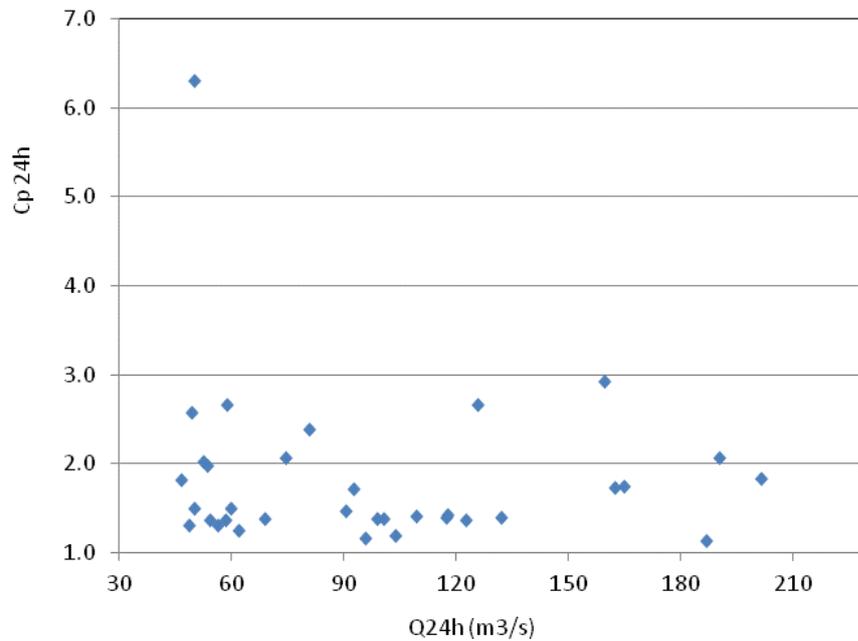


Figure 48 : Cp24h en fonction de Q24h - Sénéchas

Pour les crues les plus fortes ($Q_{24h} > 140 \text{ m}^3/\text{s}$) C_{p24h} varient entre 1,1 et 2,9.

Les coefficients de pointe issus de la méthode du Gradex qu'il est proposé de retenir figurent dans le tableau suivant.

- 120 et 210 m^3/s sur 24h,
- 170 et 340 m^3/s sur 6h.

Durée	24h	6h
Coefficient de pointe du gradex	2,5	1,5

Tableau 42 : coefficients de pointe du bassin de Sénéchas

6.5.4 ESTIMATION DES DEBITS DE POINTE DES CRUES RARES

L'objectif principal de la méthode du Gradex était d'estimer les lames d'eau ruisselées sur les bassins versants de Sainte Cécile et Sénéchas afin de conforter les données de calage pour la méthode Shypre.

Un second objectif de la méthode du gradex est d'estimer les débits de pointe et établir une comparaison avec les débits de pointe issus de Shypre.

Pour ce second point, les crues à définir sont :

- les crues de période de retour 100 ans et 10 000 ans du bassin de Ste-Cécile,
- la crue de période de retour 5 000 ans du bassin de Sénéchas.

Le tableau suivant présente les débits de pointe obtenus par la méthode du gradex pour les crues rares de Sainte-Cécile.

Bassin versant de Sainte Cécile	Pivot à T = 50 ans
Q24h 10 000 ans	523 m^3/s
Qp 10 000 ans	1308 m^3/s
Q6h 10 000 ans	1080 m^3/s
Qp 10 000 ans	1728 m^3/s

Tableau 43 : résultats pour la crue de période de retour 10 000 ans – Sainte Cécile

Bassin versant de Sainte Cécile	Pivot à T = 50 ans
Q24h 100 ans	261 m^3/s
Qp 100 ans	653 m^3/s
Q6h 100 ans	429 m^3/s
Qp 100 ans	686 m^3/s

Tableau 44 : résultats pour la crue de période de retour 100 ans – Sainte Cécile

Pour le barrage de Ste-Cécile, au vu des ajustements sur les volumes observées et au vu des distributions des coefficients de pointe, les valeurs obtenues pour $D=6h$ avec un pivot à 50 ans apparaissent comme les plus légitimes. Elles sont les seules conservées dans la suite de l'analyse.

Le tableau suivant présente les débits de pointe obtenus par la méthode du gradex pour le bassin de Sénéchas pour T=5000 ans.

Bassin versant de Sénéchas	Pivot à T = 50 ans
Q24h 5000 ans	532 m ³ /s
Qp 5000 ans	1330 m ³ /s
Q6h 5000 ans	1090m ³ /s
Qp 5000 ans	1635 m³/s

Tableau 45 : résultats pour la crue de période de retour 5 000 ans – Sénéchas

Au vu des ajustements sur les volumes observées et au vu des distributions des coefficients de pointe, les valeurs obtenues pour D=6h avec un pivot à 50 ans apparaissent comme les plus légitimes. Elles sont les seules conservées dans la suite de l'analyse.

6.6 CONSTRUCTION DES HYDROGRAMMES DE REFERENCE

Les hydrogrammes de référence de période de retour 100 ans et 10 000 ans ont été construits de façon symétrique selon la géométrie du double triangle de manière à respecter les valeurs suivantes :

- le débit de pointe (Q_p) avec un pivot à 50 ans,
- le volume maximal ruisselé sur 6h (V6h),
- le volume maximal ruisselé sur 24h (V24h).

La figure suivante présente à titre d'exemple l'hydrogramme décamillénal du bassin versant de Sainte-Cécile.

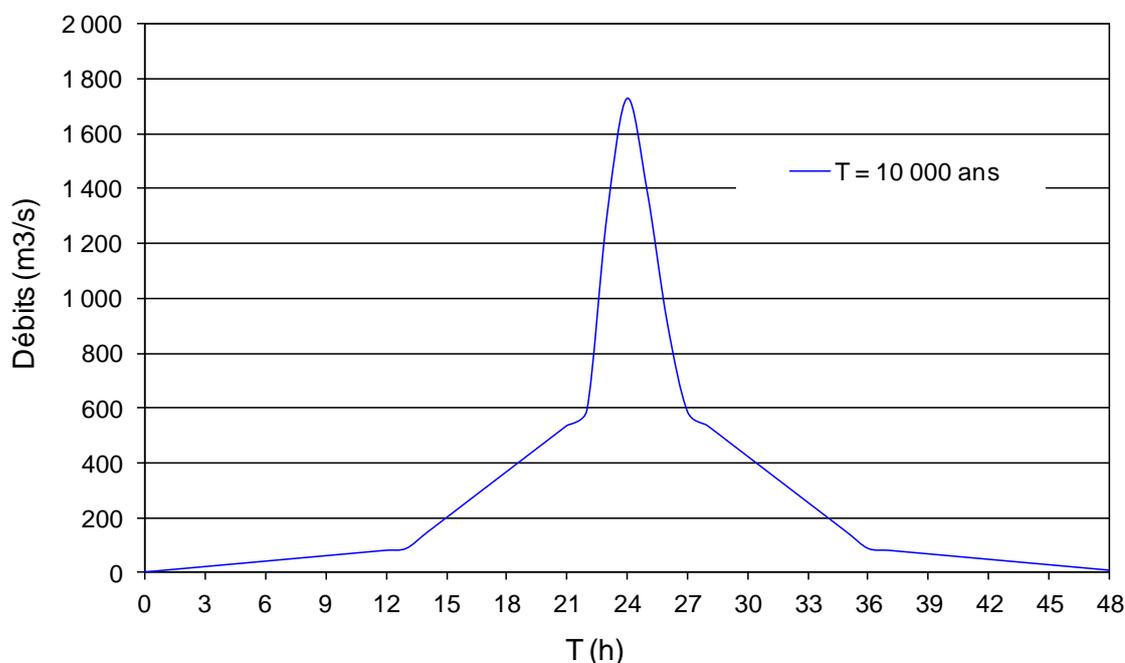


Figure 49 : Ste-Cécile - hydrogramme 10 000 ans du gradex (G24h=43 mm)

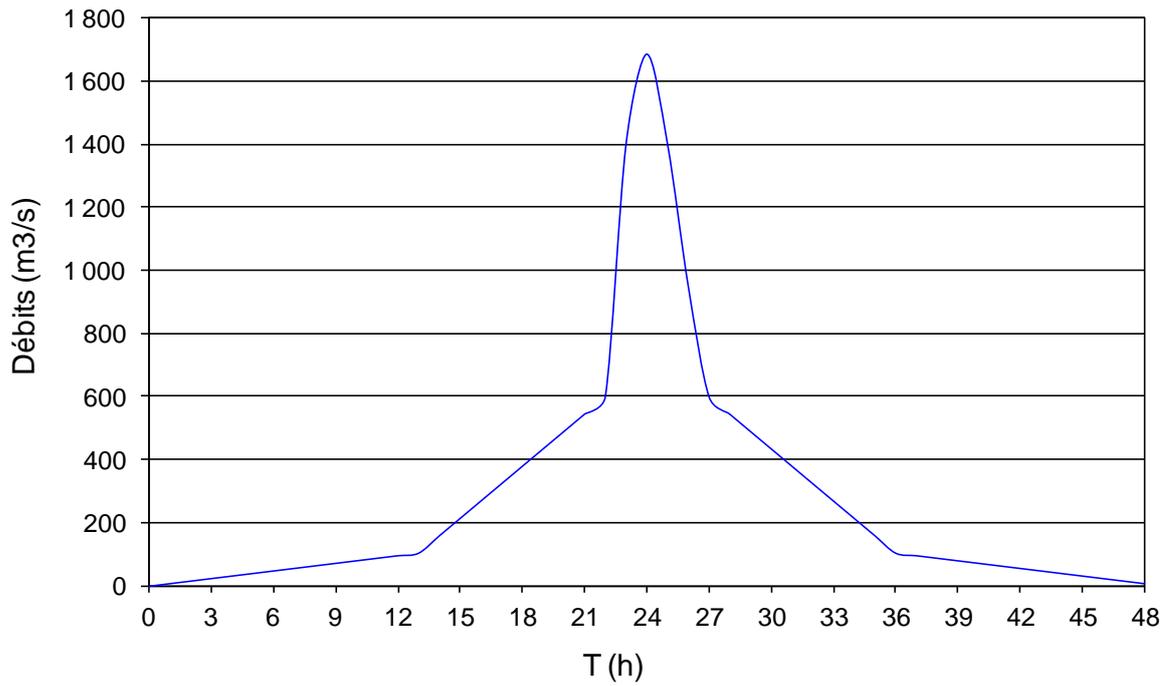


Figure 50 : Sénéchas - hydrogramme 5 000 ans du gradex

6.7 LAMINAGE DES HYDROGRAMMES DU GRADEX

Le logiciel BASSIN^{ISL} a été utilisé pour le laminage des hydrogrammes déduits du gradex :

- pour Ste-Cécile, de période de retour 100 ans et 10000 ans,
- pour Sénéchas, de période de retour 5000 ans.

Le graphique suivant présente à titre d'exemple le laminage de l'hydrogramme décamilléal dans la retenue du barrage de Sainte Cécile.

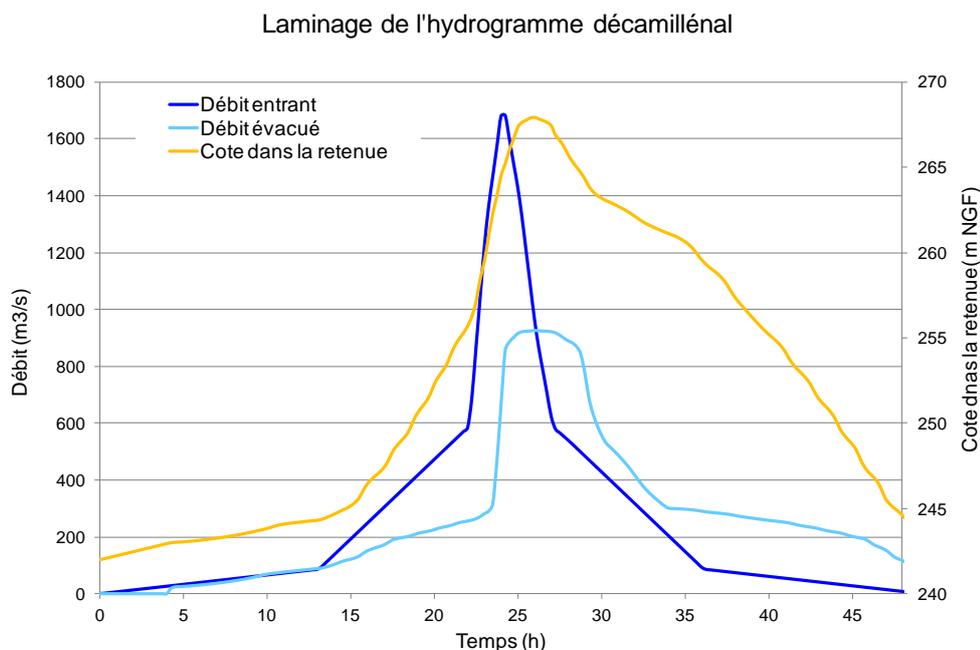


Figure 51 : laminage de l'hydrogramme décamilléal – Sainte Cécile

Pour le barrage de Sénéchas, il a été considéré que la crue se produisait entre le 15 août et le 30 avril soit en dehors de la période de stockage. Le fonctionnement du barrage est alors totalement passif.

Les résultats du laminage sont présentés dans le tableau suivant.

Barrage	T	Débit entrant	Débit évacué par les évacuateurs	Cote maximale dans la retenue
Ste-Cécile	100 ans	684 m ³ /s	265 m ³ /s	256,42 m NGF
Ste-Cécile	10000 ans	1728 m ³ /s	940 m ³ /s	267,95 m NGF
Sénéchas	5000 ans	1 635 m ³ /s	1 566 m ³ /s	270,56 m NGF

Tableau 46 : résultats des calculs de laminage

On rappelle que l'ajustement par ISL des cotes observées dans la retenue de Sainte Cécile a conduit à une cote de période de retour 100 ans à 255,4 m NGF (soit une valeur proche celle obtenue par le gradex : 256,42 m NGF).

7 CHOIX DE L'HYDROLOGIE DE REFERENCE

7.1 BARRAGE DE STE-CECILE

Le tableau suivant présente une synthèse des résultats exposés dans le présent document et des résultats antérieurs à la présente étude, pour la crue de période de retour 10 000 ans. Ces résultats correspondent à la saison annuelle.

T = 10 000 ans	P24h (mm)	P6h (mm)	V24h (mm)	V6h (mm)	Qp (m³/s)
Shypre 2008	763	363	591	259	2 728
Shypre 2012	764	363	587	257	2 520
Gradex 2012 (pivot à 50 ans d=6h)	516	322	391	202	1 728

Tableau 47 : synthèse des résultats pour la crue décennale – Sainte Cécile

Une analyse comparative a montré que la méthode du gradex et la méthode shypre présentait des convergences pour les faibles périodes de retour (<100 ans), qu'il s'agisse des pluies, des débits, des rétentions ou des coefficients de pointe.

En revanche, les valeurs obtenues par le gradex sont sensiblement inférieures pour les fortes périodes de retour. Cet écart est lié au fait que les distributions de fréquence des pluies SHYPRE suivent une évolution sur-exponentielle distincte de celle du gradex (évolution exponentielle).

Pour la suite des études, **le Conseil Général du Gard a choisi de retenir les résultats de la méthode SHYPRE** dont la légitimité scientifique actuelle est mise en évidence notamment par les résultats de projet EXTRAFLU (2009-2013) du programme RISKMAT de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) qui est un travail d'inter-comparaison de méthodes probabilistes d'estimation des crues extrêmes mené par Irstéa, Météo-France, EDF, HydroSciences Montpellier et Géosciences Montpellier et dont les résultats seront publiés courant 2013.

Les résultats du laminage de l'hydrogramme de période de retour 10 000 ans selon la méthode Shypre sont rappelés ci-dessous.

	Qp entrant (m³/s)	Qp sortant (m³/s)	Cote dans la retenue (m NGF)	Surverse sur parapet (268,2 m NGF)
Shypre 2012	2520	1589	269,99	+1,8 m

Tableau 48 : résultats du laminage - Shypre

La méthode SHYPRE révisée en 2012 conduit à une surverse importante (1,8 m).

Le tableau suivant rappelle les résultats de la transposition des hyétogrammes historiques de Léznigan (Aude nov. 1999) et Cardet (Gard sept. 2002). Ces hyétogrammes n'ont pas été spatialement abattus.

	P24h (mm)	P6h (mm)	V24h (mm)	V6h (mm)	Qp (m ³ /s)
Leznigan 1999	542	245	375	206	1 910
Cardet 2002	648	269	389	190	1 455

Tableau 49 : résultats de la transposition des hyétogrammes historiques

Concernant le laminage des crues dans la retenue, les crues reconstituées à partir des hyétogrammes de Leznigan (1999) et Cardet (2002) sans considérer d'abattement spatial conduisent à une surverse d'environ 0,5 m.

7.2 BARRAGE DE SENECHAS

Le tableau suivant présente une synthèse des résultats exposés dans le présent document et des résultats antérieurs à la présente étude, pour la crue de période de retour 5000.

T = 5000 ans	P24h (mm)	P6h (mm)	V24h (mm)	V6h (mm)	Qp (m ³ /s)
Shypre 2008	736	-	570	-	2 594
Shypre 2012	705	334	540	230	2 120
Gradex 2012 (pivot à 50 ans d=6h)	508	317	406	208	1 635

Tableau 50 : synthèse pour la période de retour 5 000 ans - Sénéchas

Le tableau suivant présente les résultats du laminage de la crue de période de retour 5000 ans.

T = 5 000 ans	Qp (m ³ /s)	Cote atteinte dans la retenue (m NGF)	Surverse sur parapet (272,7 m NGF)
Shypre 2012	2 120	270,60*	Pas de surverse

Tableau 51 : laminage de la crue de période de retour 5 000 ans - Sénéchas

Les cotes atteintes sont inférieures à la cote de PHE du barrage (271,2 m NGF) et à la cote de couronnement du barrage (271,5 m NGF).

8 CONSEQUENCE POUR LA SUITE DES ETUDES D'AVP DE STE-CECILE

8.1 CALAGE DE L'EVACUATEUR DE CRUE

La capacité d'écrêtement de la retenue ne doit pas être modifiée jusqu'à un événement hydrologique de période de retour 100 ans. La cote atteinte pour cet événement a été retenue par le maître d'ouvrage comme cote d'entrée en service de l'évacuateur complémentaire.

Selon l'approche en cote 2012 de SHYPRE, une cote de mise en service de 262,5 m NGF permet d'atteindre cet objectif (soit environ 1 m de moins que pour l'hydrologie 2008).

8.2 PROTECTION CONTRE LES CRUES DU CHANTIER

Le chantier est prévu sur la période de janvier à aout. Durant le chantier :

- la probabilité de surverse sur la durée du chantier ne doit pas être augmentée par rapport à l'état actuel,
- la tulipe doit pouvoir entrer en service ce qui signifie que la retenue doit pouvoir monter jusqu'à une cote supérieure à 261,34 m NGF.

Sur l'année, la période de retour de déversement par la RN106 (267,7 m NGF) est estimée à 1800 ans dans l'état actuel.

Sur la période des travaux (janvier à aout), la cote atteinte pour une période de retour de 1800 ans est de 260,3 m NGF. Cette cote étant inférieure à la cote de surverse de la tulipe, elle ne constitue pas une contrainte pour le chantier.

Il est proposé d'assurer la protection du chantier jusqu'à la cote 262,5 m NGF. Cette cote permet l'évacuation d'un débit de 435 m³/s (75 m³/s par la tulipe et 360 m³/s par les pertuis).

Sur la période des travaux, elle est associée à une période de retour supérieure à 5000 ans.

Sur l'année, elle est associée à une période de retour de 100 ans.

8.3 CHOIX DES HYDROGRAMMES A LAMINER

Parmi les hydrogrammes extraits conduisant à Z10 000, quatre hydrogrammes ont été retenus. Ils ont été choisis de la manière suivante :

- le premier (d) présente un fort débit de pointe (3387 m³/s),
- le second (a) présente une forme ramassée,
- le troisième (e) présente un débit de pointe proche de celui estimé de période de retour 10 000 ans par la méthode SHYPRE (environ 2500 m³/s),
- le quatrième est l'hydrogramme monofréquence 10 000 ans issu de Shypre.

L'hydrogramme monofréquence est utilisé pour le dimensionnement de l'évacuateur de crue. Les autres hydrogrammes sont laminés à titre d'information.

Le graphique suivant présente ces quatre hydrogrammes.

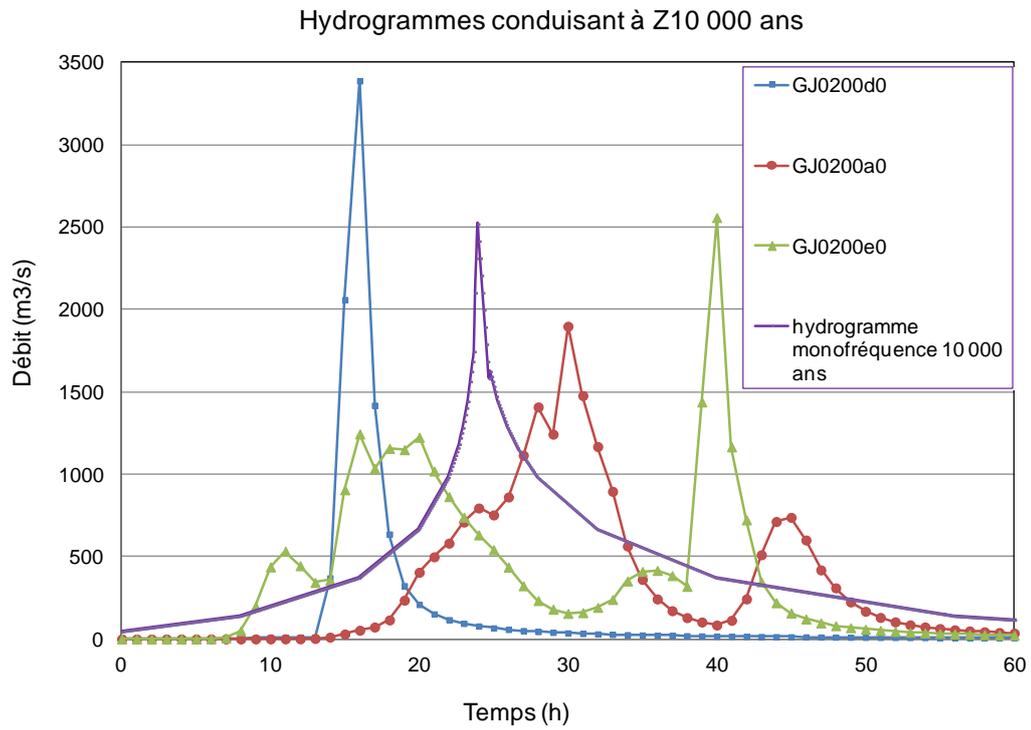
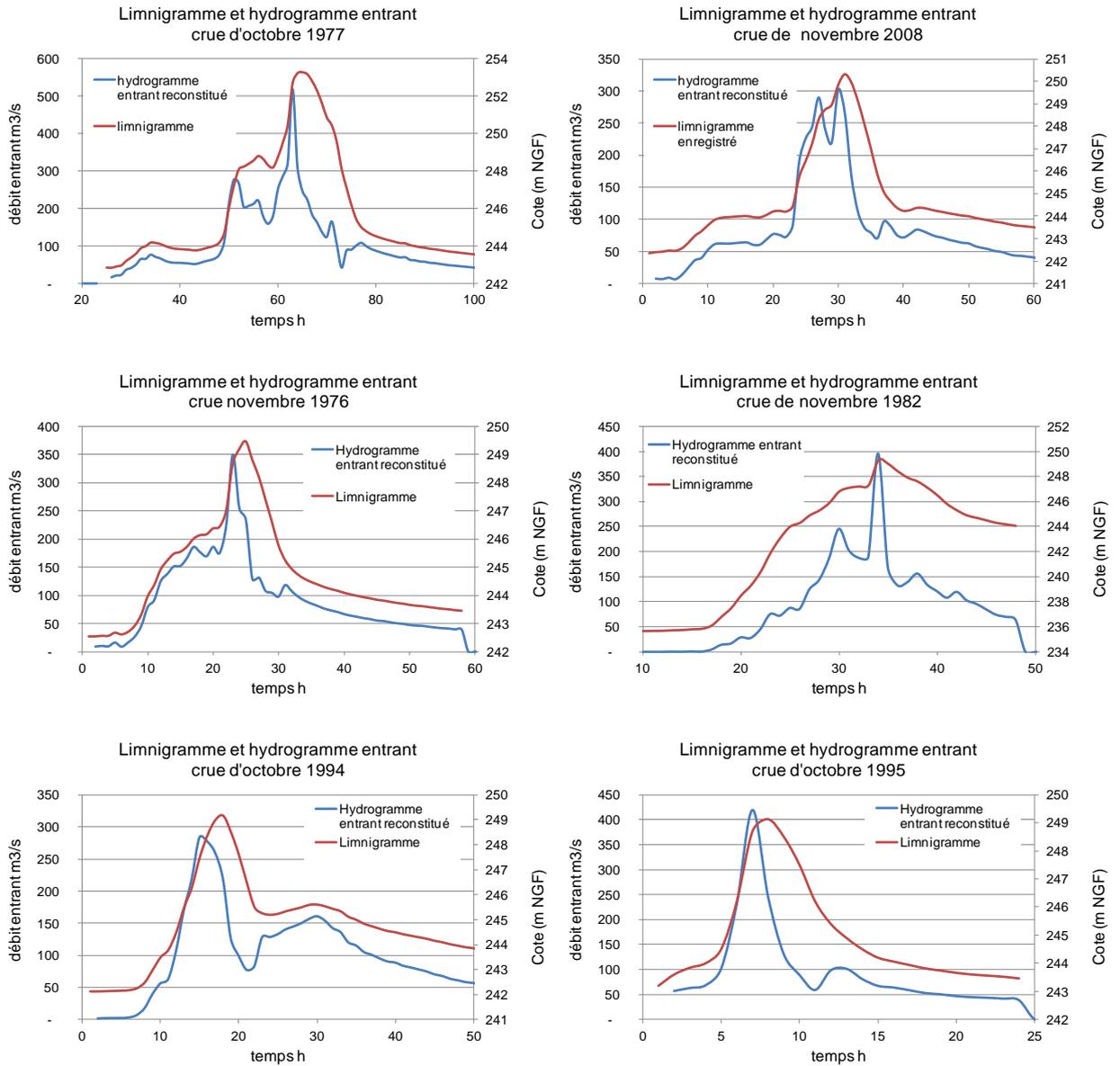


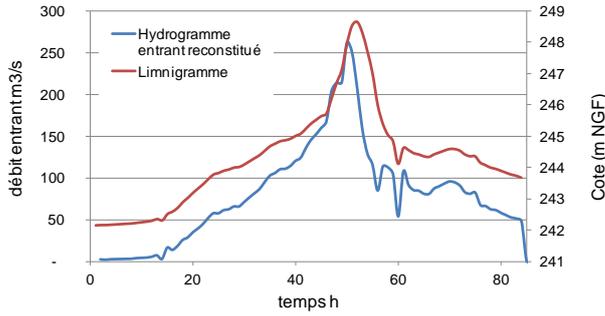
Figure 52 : hydrogrammes conduisant à Z10 000 dans la retenue de Sainte Cécile

9 ANNEXE 1

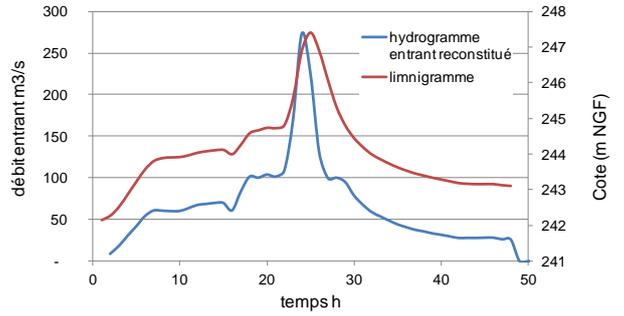
Les figures suivantes présentent les 10 crues les plus importantes sur le bassin versant de Sainte Cécile.



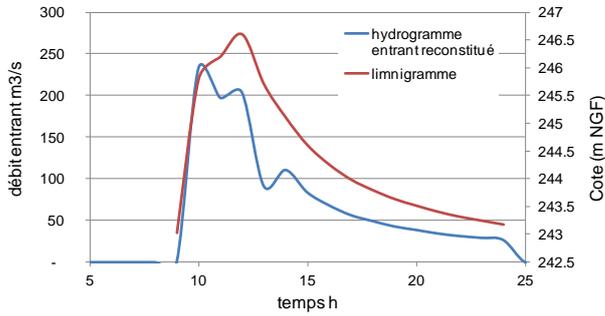
Limnigramme et hydrogramme entrant
cru de décembre 1997



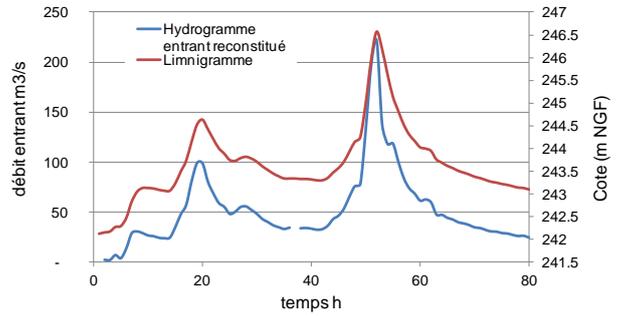
Limnigramme et hydrogramme entrant
cru de d'octobre 2006



Limnigramme et hydrogramme entrant
cru d'août 1977



Limnigramme et hydrogramme entrant
cru de novembre 1996



10 ANNEXE 2 : RESULTATS DE LA METHODE DU GRADEX

Méthode du gradex sur les V24h - barrage de Sainte Cécile :

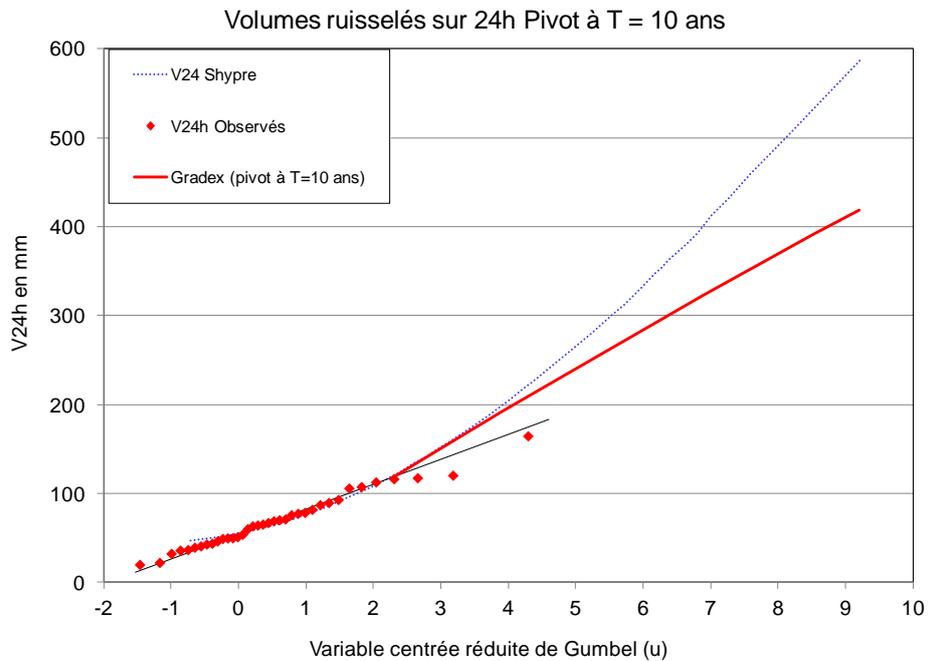


Figure 53 : Pivot à 10 ans - 24h - Sainte Cécile

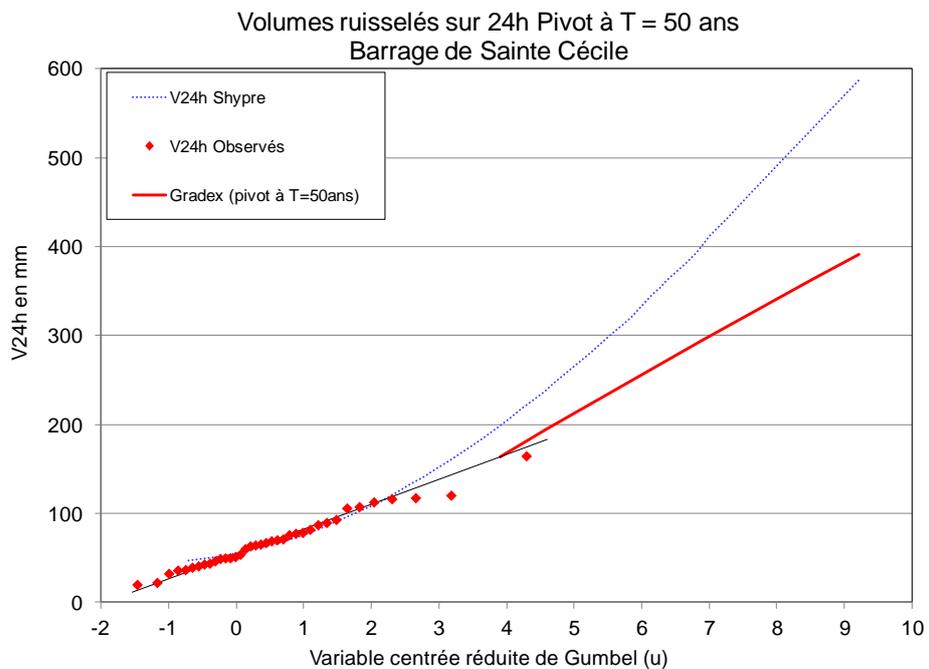


Figure 54 : Pivot à 50 ans - 24h - Sainte Cécile

Méthode du gradex sur les V24h - barrage de Sénéchas :

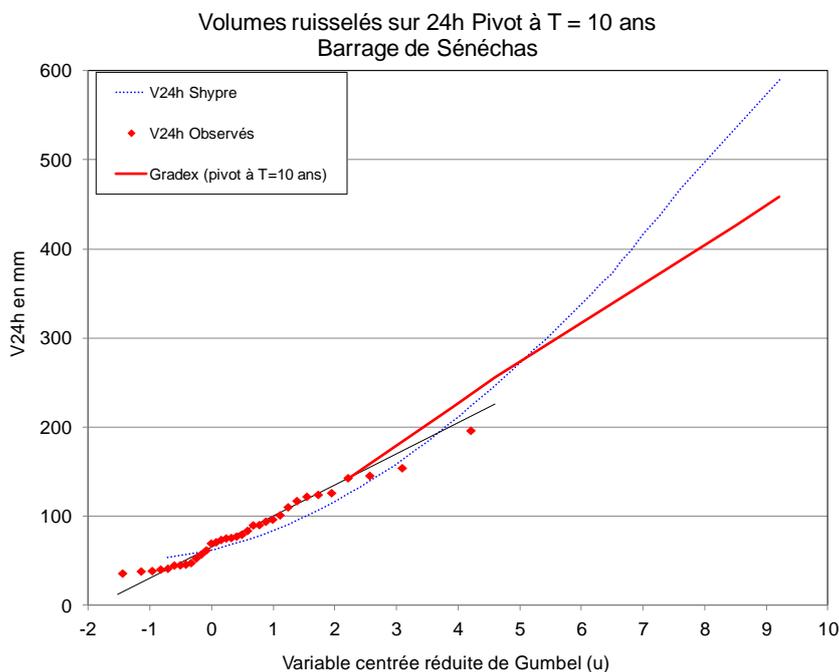


Figure 55 : Pivot à 10 ans - 24h - Sénéchas

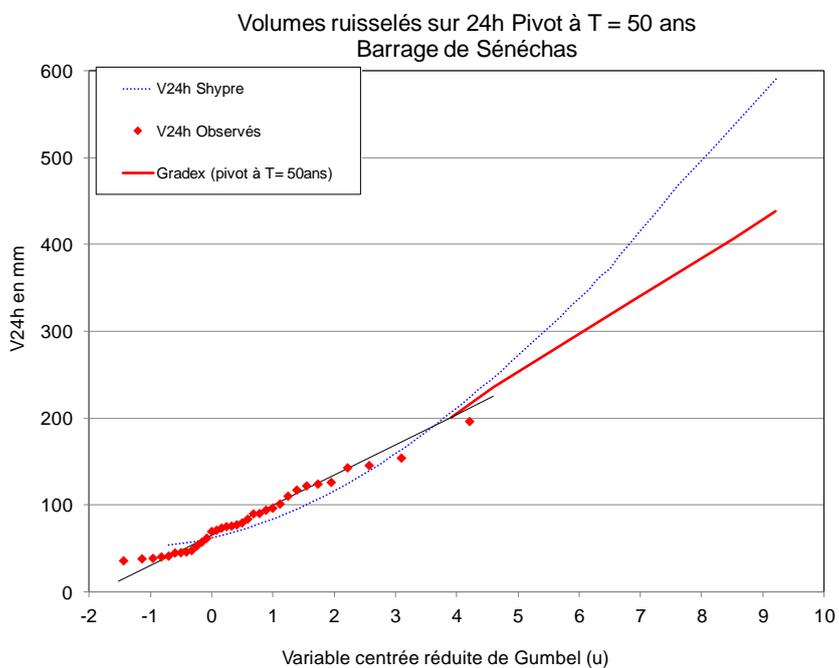


Figure 56 : Pivot à 50 ans - 24h - Sénéchas

Méthode du gradex sur les V6h – barrage de Sainte Cécile:

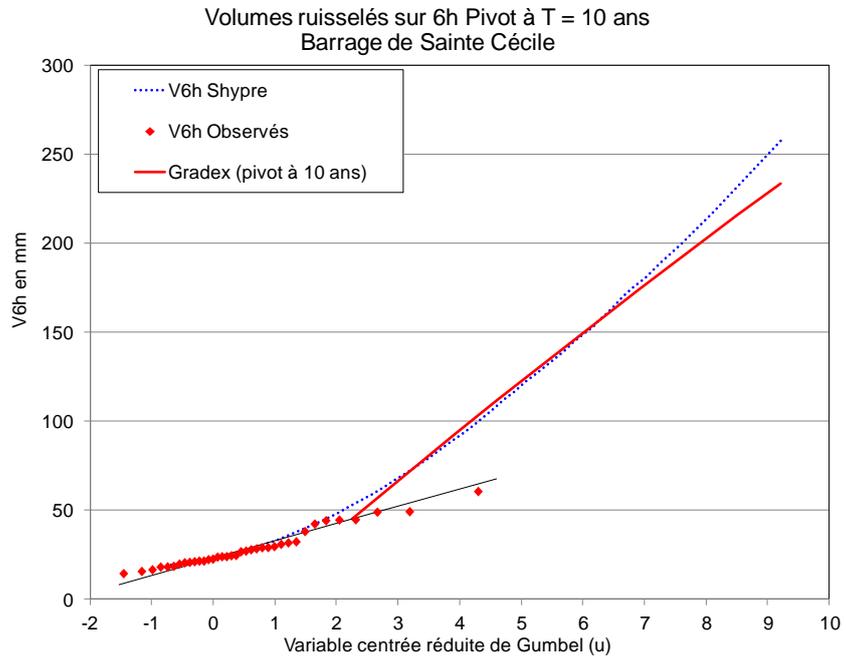


Figure 57 : Pivot à 10 ans - 6h – Sainte Cécile

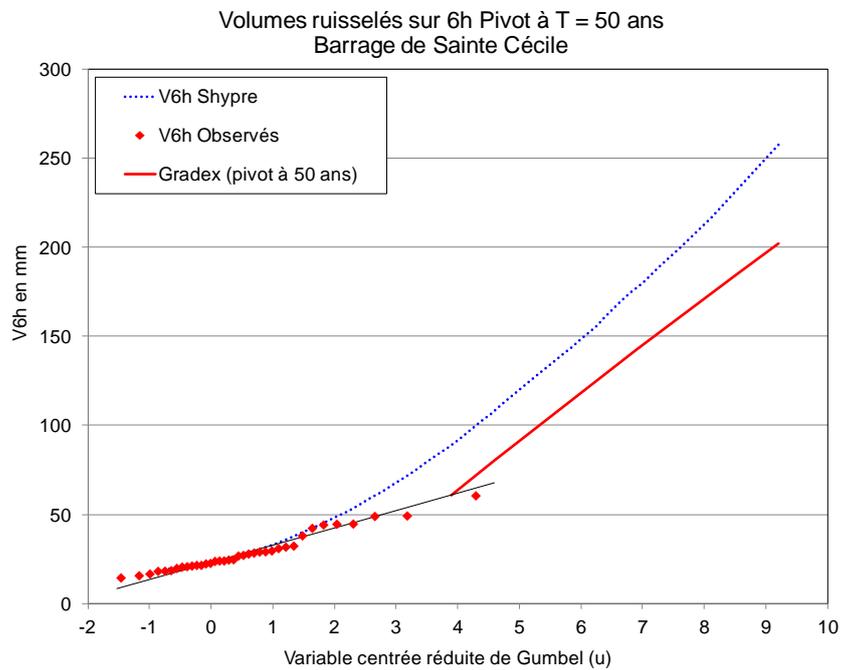


Figure 58 : Pivot à 50 ans - 6h – Sainte Cécile

Méthode du gradex sur les V6h – barrage de Sénéchas :

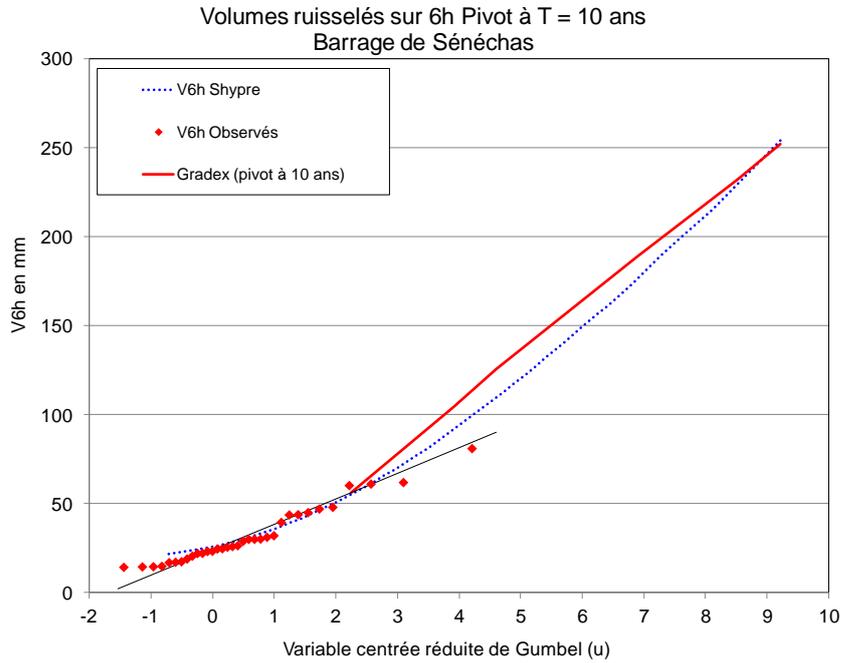


Figure 59 : Pivot à 10 ans - 6h – Sénéchas

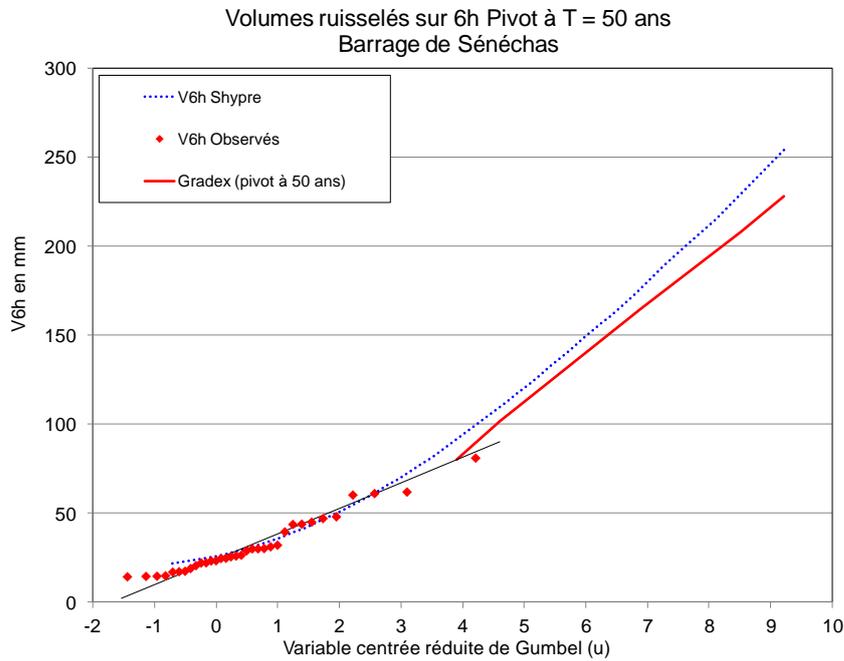


Figure 60 : Pivot à 50 ans - 6h – Sénéchas

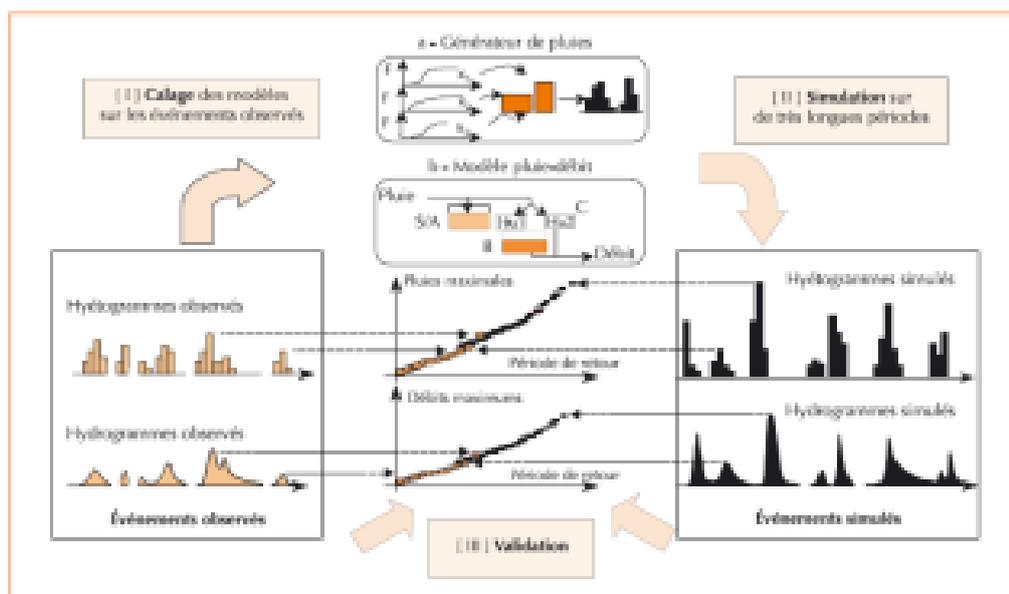
11 ANNEXE 3 : PRESENTATION DE LA METHODE SHYPRE

La méthode SHYPRE, développée par l'IRSTEA (anciennement Cemagref) d'Aix-en-Provence, associe :

- un générateur stochastique de pluies horaires,
- et une transformation de la pluie en débit.

Ces techniques de simulation permettent de générer de très longues chroniques de pluies horaires (sur 100 000 ans, par exemple) et d'hydrogrammes de crue.

Un simple classement des pluies et des débits simulés permet alors de tracer les distributions de fréquence « empiriques » des pluies et des débits de différentes durées et d'en déduire les quantiles pour une large gamme de période de retour (de 2 à 10000 ans, par exemple) et pour les deux saisons de SHYPRE : l'été (mois de Juin à Novembre) et l'hiver (mois de Décembre à Mai).



Principe de la méthode SHYPRE

Le modèle de génération stochastique des pluies horaires :

Le modèle de génération de la pluie s'appuie sur une description géométrique du signal temporel de pluie. La génération du signal temporel de pluie est réalisée en deux étapes :

La première étape est l'étude descriptive du phénomène. Elle est basée sur l'analyse de la structure temporelle interne des événements pluvieux observés au pas de temps horaire. Un événement pluvieux est défini comme une succession de pluies journalières supérieures à 4mm et dont au moins une est supérieure à 20 mm. Huit variables, identifiées par leur loi de probabilité, sont utilisées pour décrire le signal. Ces 8 variables sont alors « journalisées », ce qui permet de les déterminer à partir de 3 paramètres journaliers :

- NE = le nombre moyen d'événements pluvieux de la saison (en jours).

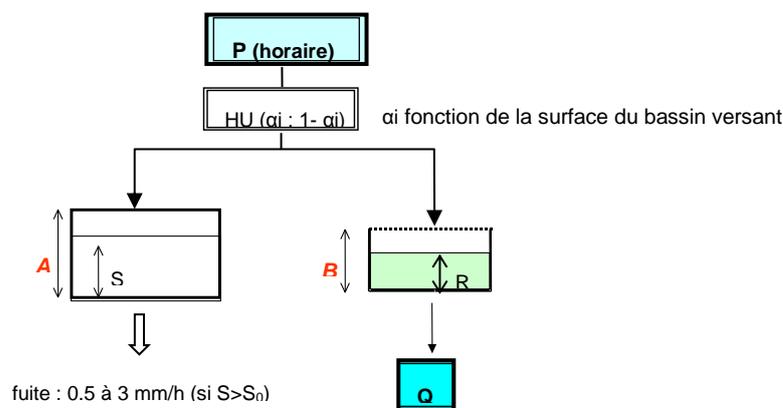
- PJmax = la moyenne des hauteurs des pluies journalières maximales par épisodes de la saison (en 1/10 mm).
- DTOT = la moyenne de la durée totale des événements de la saison (en jours).

Les données d'une station pluviométrique journalière suffisent alors pour appliquer SHYPRE.

La seconde étape consiste alors en la génération des hyétogrammes horaires à partir des variables descriptives qui sont générées, de manière indépendante, par tirage aléatoire dans leur loi de probabilité suivant une méthode de Monte-Carlo. De multiples scénarios de pluies horaires générées sur de très longues périodes de simulation sont ainsi obtenus.

Le modèle pluie-débit :

Dans sa version actuelle, SHYPRE utilise une version simplifiée du modèle GRs au pas de temps horaire développé par l'IRSTEA. Son architecture est la suivante :



Architecture du modèle GRs

L'expérience de l'IRSTEA, qui a utilisé les modèles SCS et GRs dans SHYPRE, a conduit au choix du modèle GRs qui s'est avéré meilleur pour traiter des chroniques de pluie horaire.

C'est un modèle comportant 2 réservoirs : A et B.

Le réservoir A assure le rôle de fonction de production non linéaire. Il ne produit pas de débit et se vidange par un débit de perte constant. Sa valeur est fixée à la valeur de la pluie journalière centennale du bassin versant avec la contrainte d'être ≥ 200 mm. Le débit de fuite est fixé à 1% de PJ100 avec la contrainte d'appartenir à l'intervalle [0.5 ; 3].

Le réservoir B assure le rôle de fonction de transfert non linéaire. En amont de ce réservoir B, la pluie passe par un hydrogramme unitaire (HU) très simple qui la répartit sur quelques heures : α % de la pluie entrent dans B pendant le pas de temps t et $(\alpha - 1)$ % sont reportés aux pas de temps suivants (α étant fonction de la surface du bassin versant). Le débit qui sort de B est proportionnel au niveau R de B

La pluie horaire est répartie entre les réservoirs A et B : La proportion de pluie qui entre dans A est inversement proportionnelle au niveau S de A.

Les deux paramètres de calage sont alors :

- S_0/A : le niveau de remplissage du réservoir A au début de l'événement,
- B la capacité du réservoir B.

S0/A est évènementiel : il peut varier d'un événement à l'autre, alors que B est considéré comme fixe pour un bassin versant.

12 ANNEXE 4 : CARTOGRAPHIE

- Carte 1 : Cumul sur 2 jours du 2 octobre au 4 octobre 1988,
- Carte 2 : Cumul sur 2 jours du 8 septembre au 10 septembre 2002,
- Carte 3 : Cumul sur 2 jours du 5 septembre au 7 septembre 2005,
- Carte 4 : Cumul sur 2 jours du 30 septembre au 1 octobre 1958,
- Carte 5 : Cumul sur 2 jours du 22 au 24 octobre 1977,
- Carte 6 : Cumul sur 2 jours du 2008,
- Carte 7 : Localisation des postes pluviométriques aux séries longues

13 ANNEXE 5 : CALCUL DU TEMPS DE CONCENTRATION SUR UN BASSIN VERSANT

Afin d'évaluer le temps de concentration d'un bassin versant, différentes formules peuvent être utilisées, elles sont présentées ci-dessous :

Formule de Turazza :

$$Tc(h) = 0.1 \times (S \cdot L)^{\frac{1}{3}} \times I^{-0.5}$$

Avec : Tc : temps de concentration
I : pente du thalweg (m/m)
S : surface (km²)
L : chemin hydraulique (km)

Formule de Ventura:

$$Tc(min) = 7,62 \times \sqrt{\frac{A}{p}}$$

Avec : Tc : temps de concentration
A: surface du bassin versant (km²)
p : pente du thalweg (m/m)

Formule de Passini:

$$Tc(min) = 6.48 \times \frac{(A \times L)^{1/3}}{\sqrt{p}}$$

Avec : Tc : temps de concentration
A: surface du bassin versant (km²)
L : chemin hydraulique le plus long (km)
p : pente du thalweg (m/m)

Approche hydraulique (pour des bassins versants dont la pente pondérée est inférieure à 0,01) :

$$Tc(min) = \frac{L}{3.6}$$

Avec : Tc : temps de concentration
L : chemin hydraulique correspondant au 2/3 aval du chemin hydraulique le plus long (km)

14 ANNEXE 6 : ACTUALISATION DE L'HYDROLOGIE
DES BARRAGES DE CLASSE A DU
DEPARTEMENT DU GARD PAR LA METHODE
SHYPRE » – RAPPORT PROVISOIRE V6–
HYDRIS HYDROLOGIE – JUIN 2013 [3]

15 ANNEXE 7 : CALCUL DES DISTRIBUTIONS DE
FREQUENCE DES COTES DU PLAN D'EAU DU
BARRAGE DE SAINTE CECILE D'ANDORGE SUR
2 PERIODES « TRAVAUX » PAR LA METHODE
SHYPRE – RAPPORT PROVISOIRE – V1 –
HYDRIS HYDROLOGIE – MAI 2013 [4]

N

0 10 km

BV Sainte Cécile

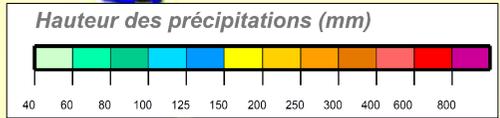
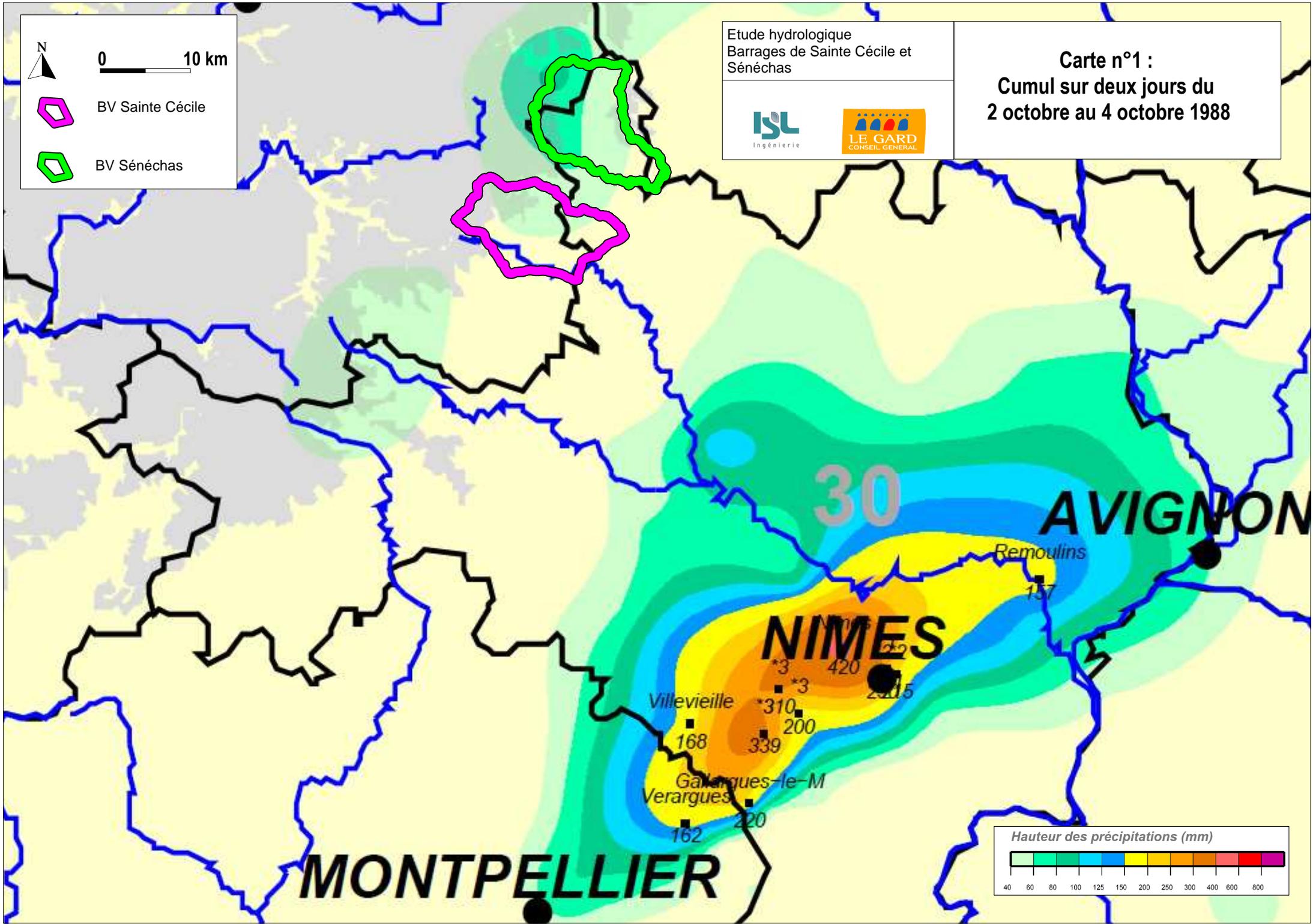
BV Sénéchas

Etude hydrologique
Barrages de Sainte Cécile et
Sénéchas

ISL
Ingénierie

LE GARD
CONSEIL GENERAL

Carte n°1 :
Cumul sur deux jours du
2 octobre au 4 octobre 1988

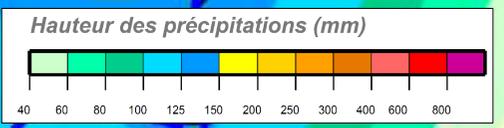
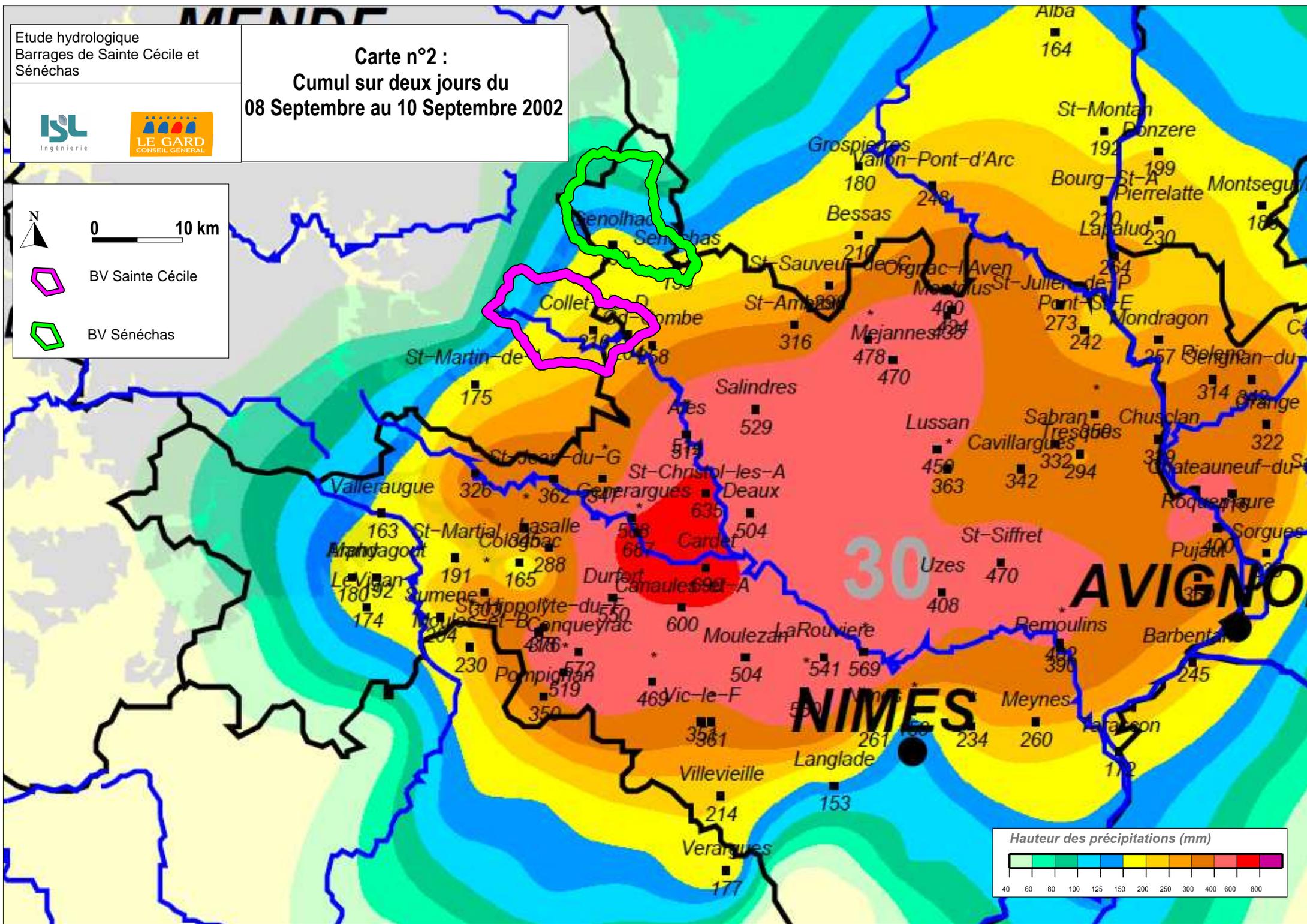




BV Sainte Cécile



BV Sénéchas



Carte n°3 :
Cumul sur deux jours du
5 Septembre au 7 Septembre 2005



0 10 km



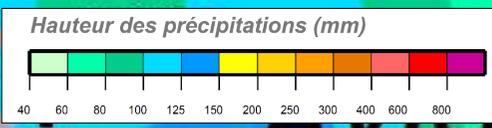
BV Sainte Cécile



BV Sénéchas

MENDE

PRIVAS



Carte n°4 :
Cumul sur un jour du
30 Septembre au 1 octobre 1958

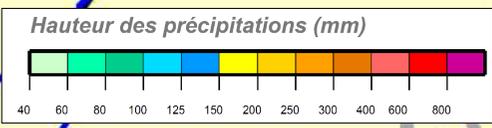
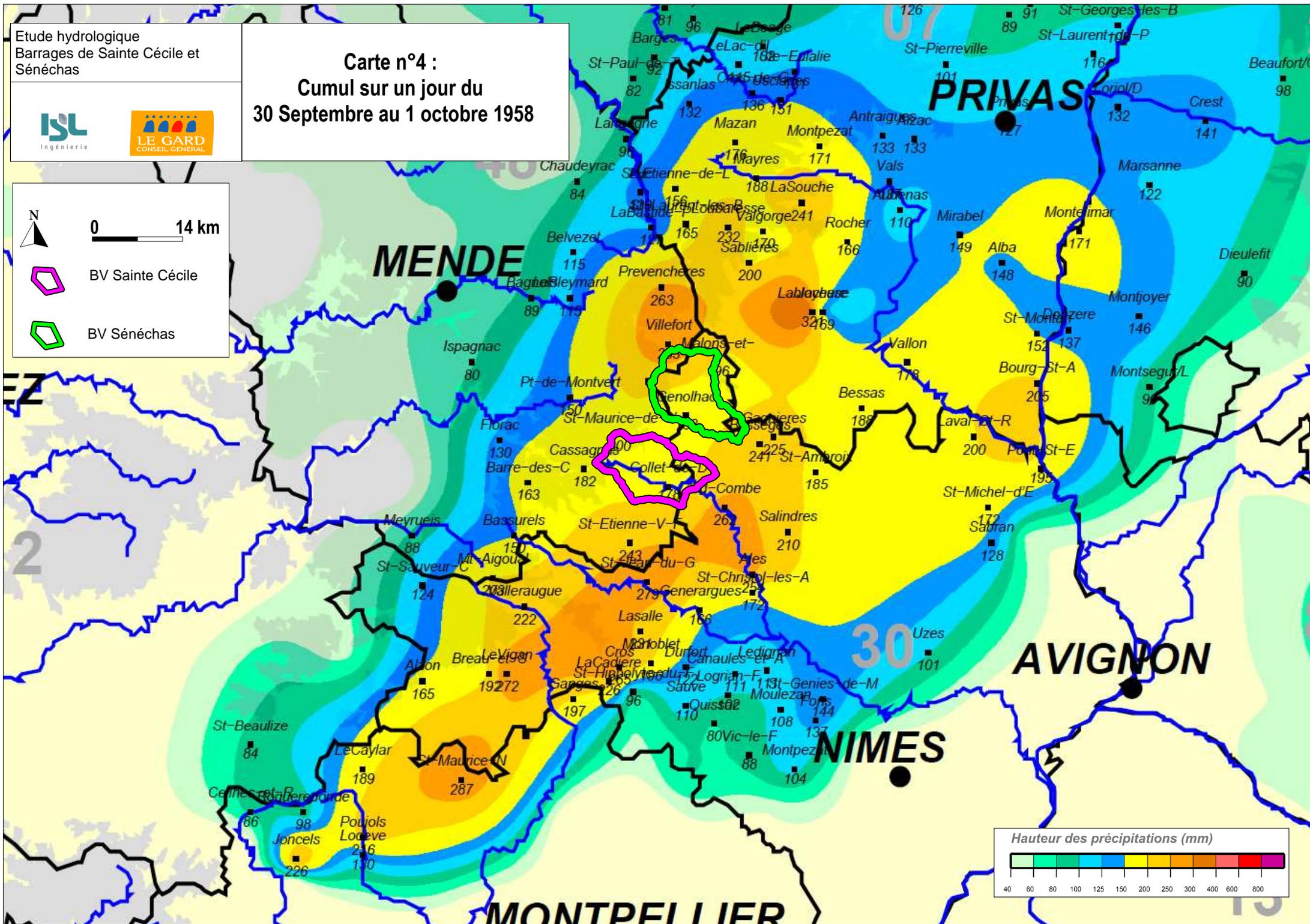
0 14 km



BV Sainte Cécile



BV Sénéchas



Carte n°5 :
Cumul sur deux jours du
22 octobre au 24 octobre 1977



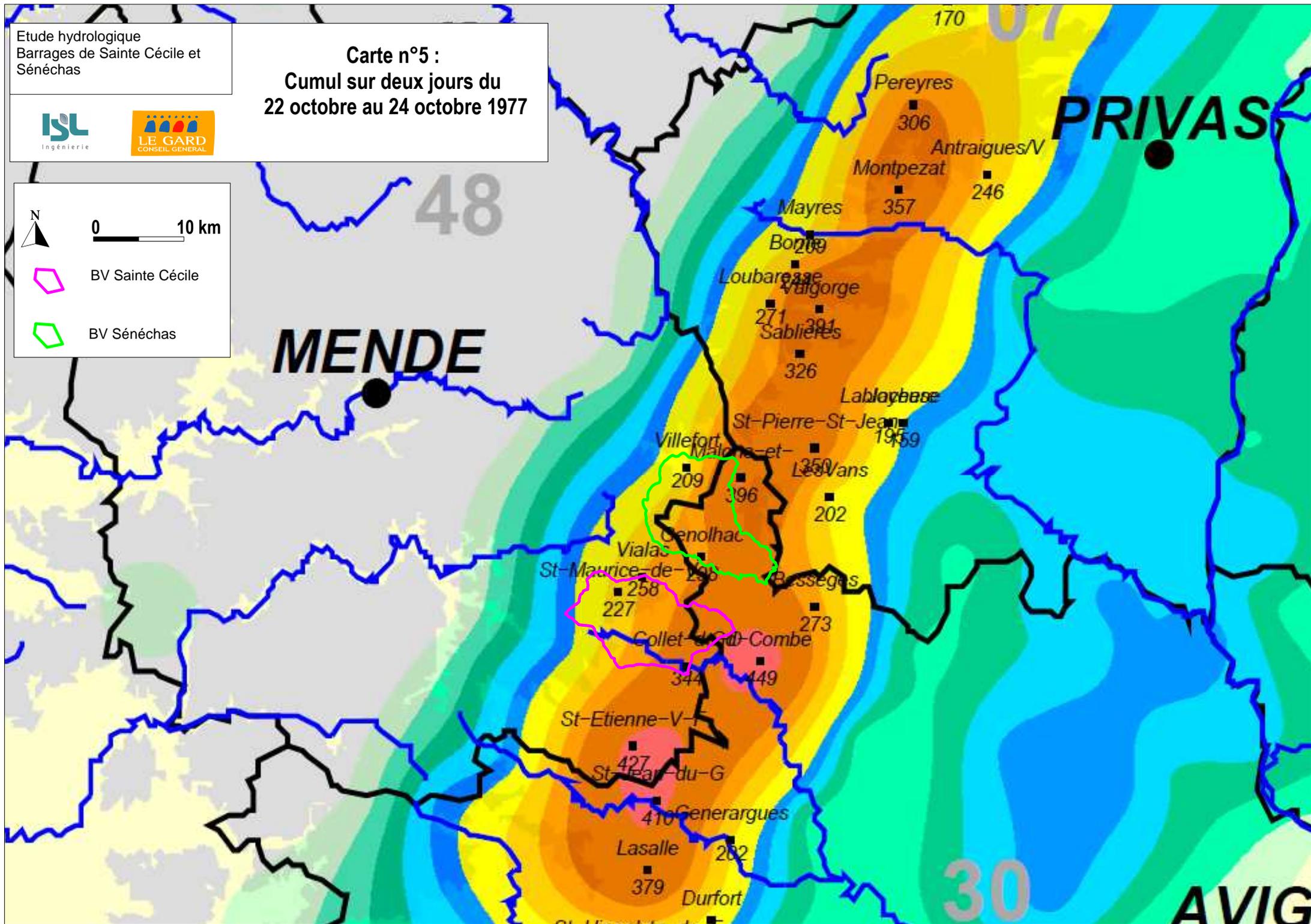
0 10 km



BV Sainte Cécile



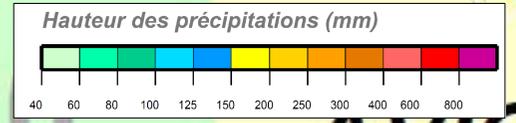
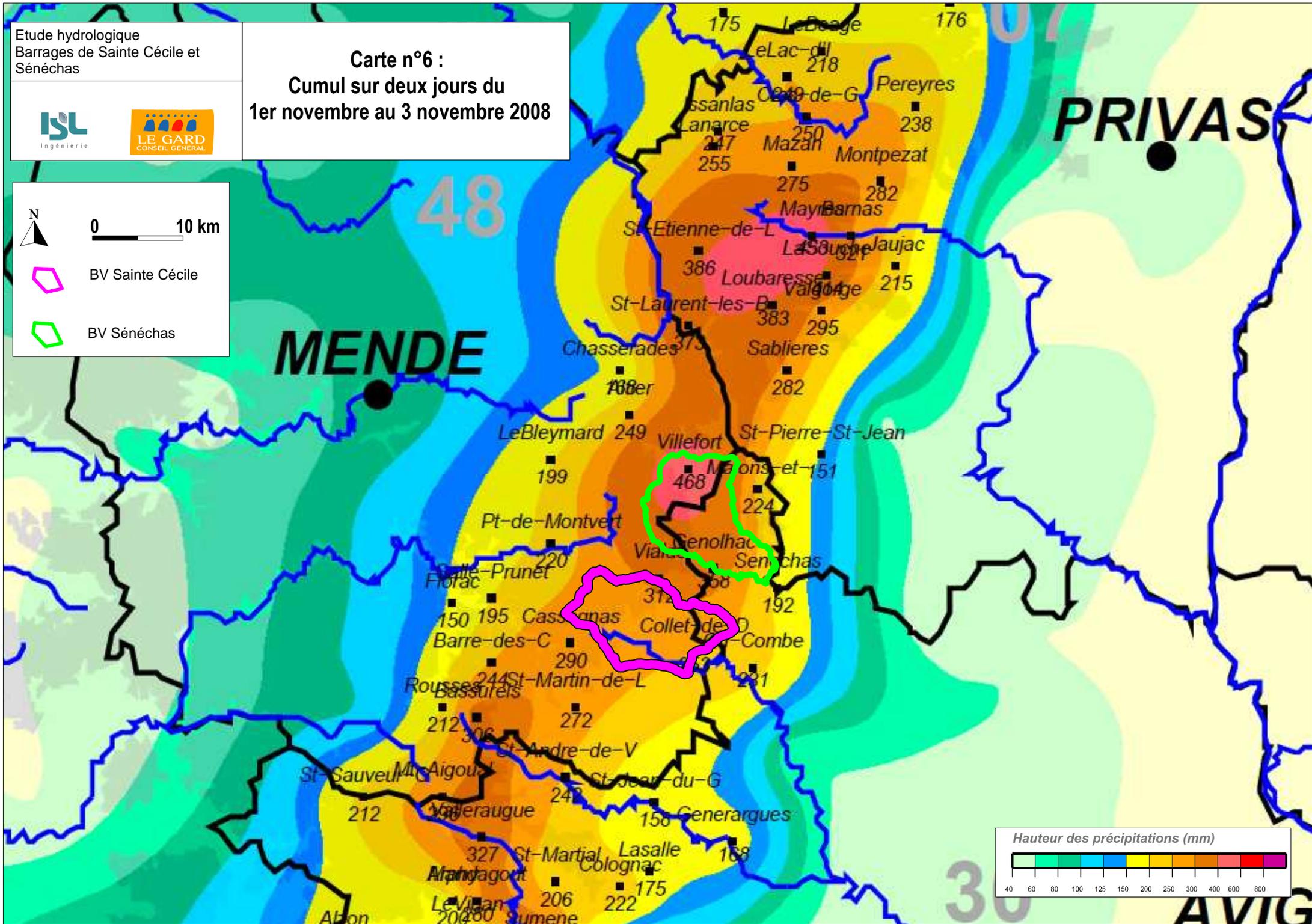
BV Sénéchas



Carte n°6 :
Cumul sur deux jours du
1er novembre au 3 novembre 2008

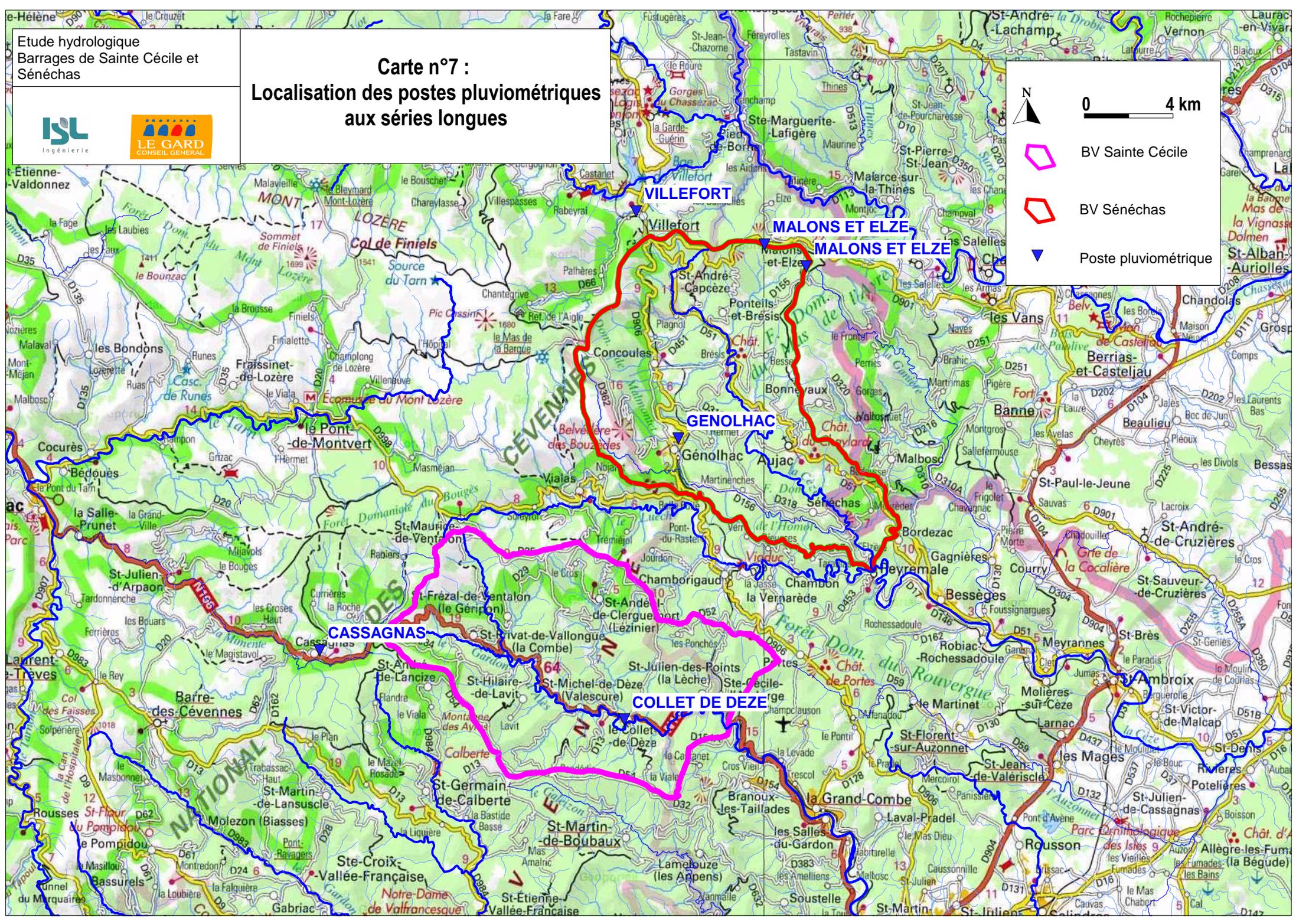


- BV Sainte Cécile
- BV Sénéchas



Carte n°7 : Localisation des postes pluviométriques aux séries longues

- BV Sainte Cécile
- BV Sénéchas
- Poste pluviométrique



13 ANNEXE 5 : CALCUL DU TEMPS DE CONCENTRATION SUR UN BASSIN VERSANT

Afin d'évaluer le temps de concentration d'un bassin versant, différentes formules peuvent être utilisées, elles sont présentées ci-dessous :

Formule de Turazza :

$$Tc(h) = 0.1 \times (S.L)^{\frac{1}{3}} \times I^{-0.5}$$

Avec : Tc : temps de concentration
I : pente du thalweg (m/m)
S : surface (km²)
L : chemin hydraulique (km)

Formule de Ventura:

$$Tc(min) = 7,62 \times \sqrt{\frac{A}{p}}$$

Avec : Tc : temps de concentration
A: surface du bassin versant (km²)
p : pente du thalweg (m/m)

Formule de Passini:

$$Tc(min) = 6.48 \times \frac{(A \times L)^{1/3}}{\sqrt{p}}$$

Avec : Tc : temps de concentration
A: surface du bassin versant (km²)
L : chemin hydraulique le plus long (km)
p : pente du thalweg (m/m)

Approche hydraulique (pour des bassins versants dont la pente pondérée est inférieure à 0,01) :

$$Tc(min) = \frac{L}{3.6}$$

Avec : Tc : temps de concentration
L : chemin hydraulique correspondant au 2/3 aval du chemin hydraulique le plus long (km)

14 ANNEXE 6 : ACTUALISATION DE L'HYDROLOGIE
DES BARRAGES DE CLASSE A DU
DEPARTEMENT DU GARD PAR LA METHODE
SHYPRE » – RAPPORT PROVISOIRE V6–
HYDRIS HYDROLOGIE – JUIN 2013 [3]

CG 30

**Actualisation de l'hydrologie des
barrages de classe A du département du
Gard par la méthode SHYPRE**

Rapport provisoire-V6

06 juin 2013

Jean-Alain FINE

HYDRIS *hydrologie*

Sommaire

Introduction	3
1 Nouvelle version de SHYPRE	4
2 Nouvelle loi côte-débit du barrage de Ste Cécile	7
3 Nouvelle superficie du bassin versant du barrage de Ste Cécile.....	8
4 Recalage de SHYPRE sur les distributions de fréquence des débits observées.....	8
5 Validation de SHYPRE sur la distribution de fréquence des cotes observées.....	20
6 Représentativité climatologique de la période 1976-2012.....	21
7 Impact d'une cote initiale inférieure à la cote nominale sur la distribution de fréquence des cotes maximales du plan d'eau du barrage de Sainte Cécile.....	23
8 Conclusion.....	25
ANNEXES	26
1- Valeurs numériques des distributions de fréquence des cotes	26
2 - Régressions lame d'eau en fonction de la cote max	28

Introduction

L'étude menée en 2008 par HYDRIS-hydrologie et BRLi sur 5 barrages écrêteurs de crue du département Gard, dont les deux barrages de classe A : Sénéchas et Sainte Cécile d'Andorge, a conclu au sous dimensionnement de l'évacuateur de crue du barrage de Sainte Cécile d'Andorge.

Dans le cadre de l'étude de l'aménagement de cet évacuateur de crue menée actuellement par ISL, le CG 30 a commandé à HYDRIS-hydrologie l'actualisation du calcul de la distribution de fréquence des cotes du plan d'eau des barrages de classe A (Sénéchas et Sainte Cécile d'Andorge) par la méthode SHYPRE en prenant en compte un recalage de la méthode SHYPRE sur les distributions de fréquence des débits en 6h et 24h élaborées par ISL à partir des cotes observées.

Pour cela, nous avons adopté **la dernière version de SHYPRE** (version 2010) qui intègre les derniers développements menés par IRSTEA, **la nouvelle loi côte-débit du barrage de Ste Cécile** fournie par ISL qui intègre les derniers levés topographiques ainsi que **la nouvelle superficie du bassin versant du barrage de Ste Cécile**.

Notons que la méthode SHYPRE ne prend pas en compte la non stationnarité éventuelle du climat.

1 Nouvelle version de SHYPRE

Pour cette étude, nous avons adopté la dernière version de SHYPRE (version 2010) qui intègre les derniers développements menés par IRSTEA (« Impacts du changement climatique sur les pluies extrêmes par l'utilisation d'un générateur stochastique de pluie ». Mémoire de Thèse, Philippe Cantet, 2009) sur la modélisation stochastique des pluies horaires afin d'en améliorer les résultats notamment en région montagneuse où la version précédente avait tendance à surestimer les quantiles aux vues des observations.

Ces derniers développements portent sur la modélisation de :

- La variable RXP (rapport pluie maximale en 1h / volume total d'une averse principale) par une loi log-normale tronquée dont les paramètres dépendent de la durée de l'averse.
- La dépendance entre le volume et la durée d'une averse par la théorie des copules (copule de Frank).
- La dépendance entre les averses successives d'un même événement par la théorie des copules (copule de Gumbel)

Ils conduisent à une meilleure modélisation des pluies en une heure et à une meilleure prise en compte du phénomène de persistance des averses générant les cumuls de pluies extrêmes.

Tout comme dans l'étude de 2008, la méthode SHYPRE est utilisée en mode « local journalisé » : ses paramètres d'entrée sont issus de l'analyse d'un chronique de pluie un pas de temps journalier, ici la chronique de 110ans de « pluie de bassin journalière » reconstituée par BRLi à partir des postes journaliers de :

- ✧ Ste Cécile : Collet-de-Déze, Cassagnas et Ste Cécile
- ✧ Sénéchas : Génolhac, Malons, Sénéchas et Villefort

Ces paramètres journaliers, pour chacune des 2 saisons de la méthode SHYPRE (« été » de juin à novembre et « hiver » de décembre à mai) sont :

- **NE = le nombre moyen d'événements pluvieux de la saison (en jours).**
- **PJmax = la moyenne des hauteurs des pluies journalières maximales par épisodes de la saison (en 1/10 mm).**
- **DTOT = la moyenne de la durée totale des événements de la saison (en jours).**

Les valeurs de ces 3 paramètres sont identiques à celles de l'étude de 2008 et sont :

POSTE	NE été	NE hiver	Dtot été	Dtot hiver	Pjmax été	Pjmax hiver
Sénéchas	7.3	7.6	2.5	2.7	536.0	459.6
Sainte Cécile	7.5	7.5	2.3	2.6	530.5	477.9

Cette nouvelle version de SHYPRE conduit sur les bassins versants des barrages de Sainte Cécile et Sénéchas à des quantiles de pluies légèrement plus faibles :

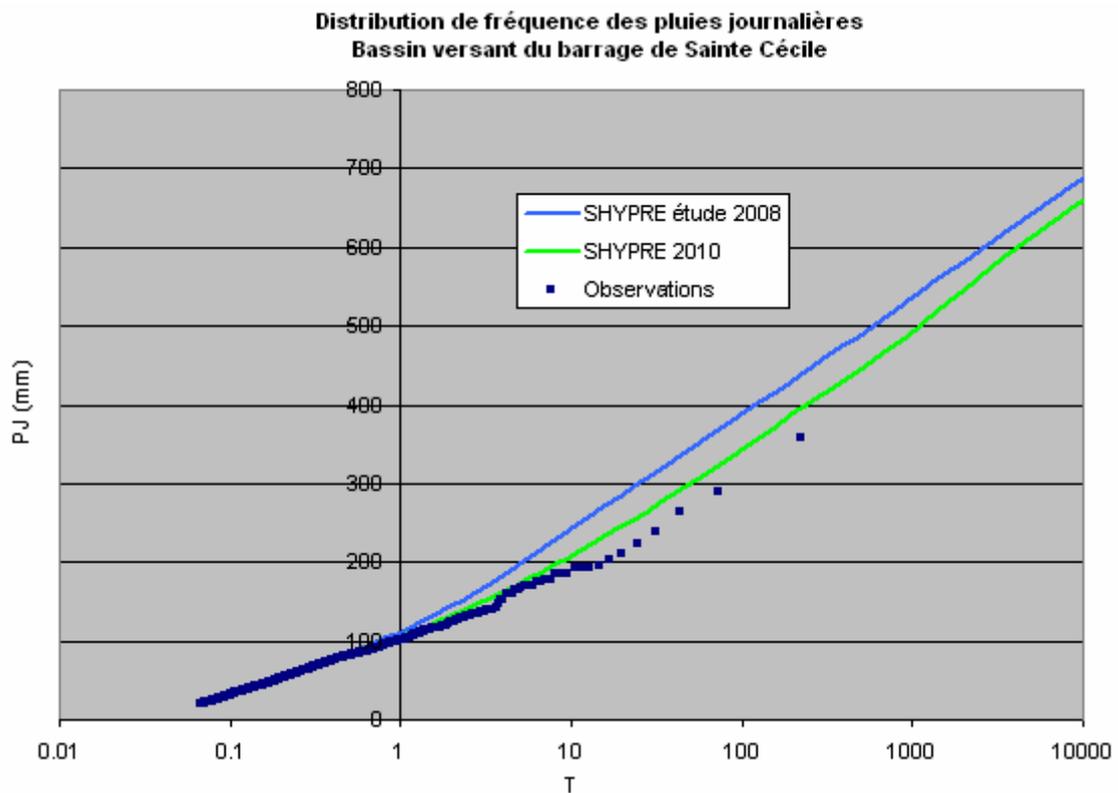


Figure 1

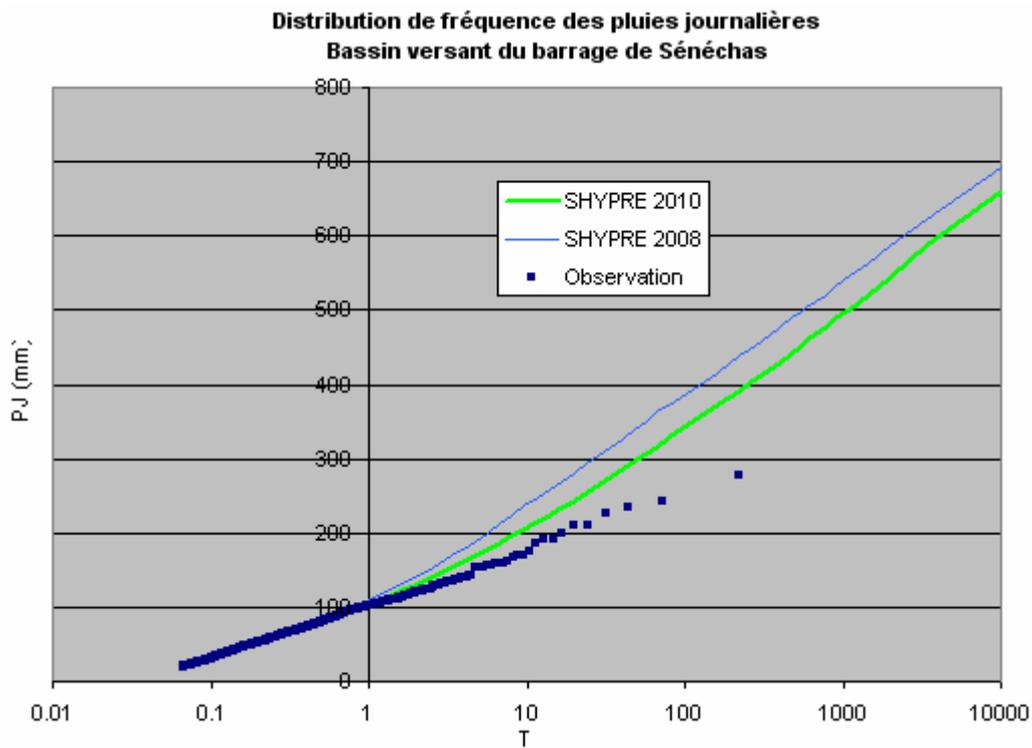


Figure 2

La nouvelle pluie journalière de période de retour 10 000 ans est :

✧ Ste Cécile **PJ 10000 = 660 mm** (PJ 10 000 étude 2008 = 687 mm)

✧ Sénéchas **PJ 10000 = 659 mm** (PJ 10 000 étude 2008 = 692 mm)

On notera que Shypre n'est pas « calé » sur la distribution des pluies observées, les paramètres d'entrée de SHYPRE sont issus de l'analyse de la chronique des pluies.

Pour le bassin versant du barrage de Ste Cécile, la distribution des pluies SHYPRE est cohérente avec la distribution de « pluie de bassin observée » pour les fréquences courantes, zone dans laquelle la distribution des pluies observées est stable, et supérieure à celle-ci au delà de 20 ans, zone dans laquelle la distribution des pluies observées est moins fiable du fait du problème de l'échantillonnage. De plus, SHYPRE tout comme la distribution de « pluie de bassin observée » ne sont pas en accord avec l'hypothèse de linéarité de Gumbel.

Pour le bassin versant du barrage de Sénéchas, la distribution des pluies SHYPRE est supérieure au delà de 2 ans à la distribution de « pluie de bassin observée ».

La figure suivante compare les distributions de fréquence des pluies journalières des 2 bassins versants :

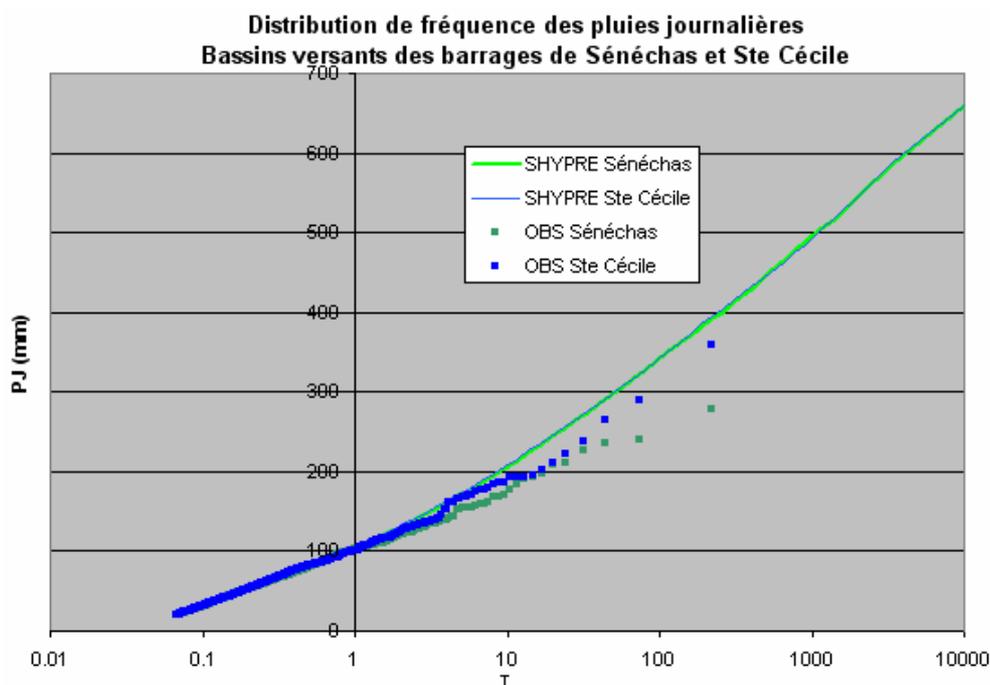


Figure 3

Les distributions de fréquence des pluies journalières des 2 bassins versants obtenues par SHYPRE sont quasi-identiques alors celles obtenues à partir des observations sont légèrement différentes au delà de 5 ans en divergeant au-delà de 20 ans du fait du problème de l'échantillonnage.

La figure suivante compare les distributions de fréquence SHYPRE des pluies en 6 heures des 2 bassins versants :

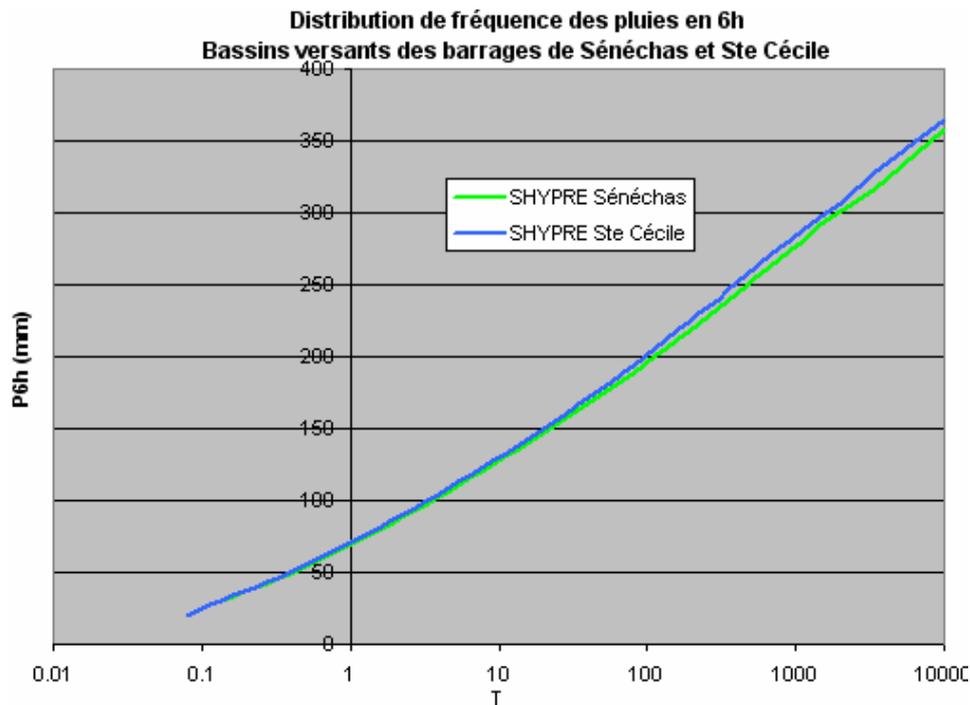


Figure 4

La distribution de fréquence SHYPRE des pluies en 6h du bassin versant de Ste Cécile est très légèrement plus forte que celle du bassin versant de Sénéchas. Cette très légère différence nous semble trop faible pour mettre en évidence une tendance climatique.

2 Nouvelle loi côte-débit du barrage de Ste Cécile

La nouvelle loi côte-débit-sortant du barrage de Ste Cécile fournie par ISL intègre les derniers levés topographiques. Ces levés donnent une altitude pour la RN106 à 267.70 mNGF (au lieu de 267.0), le mur anti-vagues à 268.2 mNGF (au lieu de 267.8) et la tulipe à 261.34 mNGF (au lieu de 261.20) :

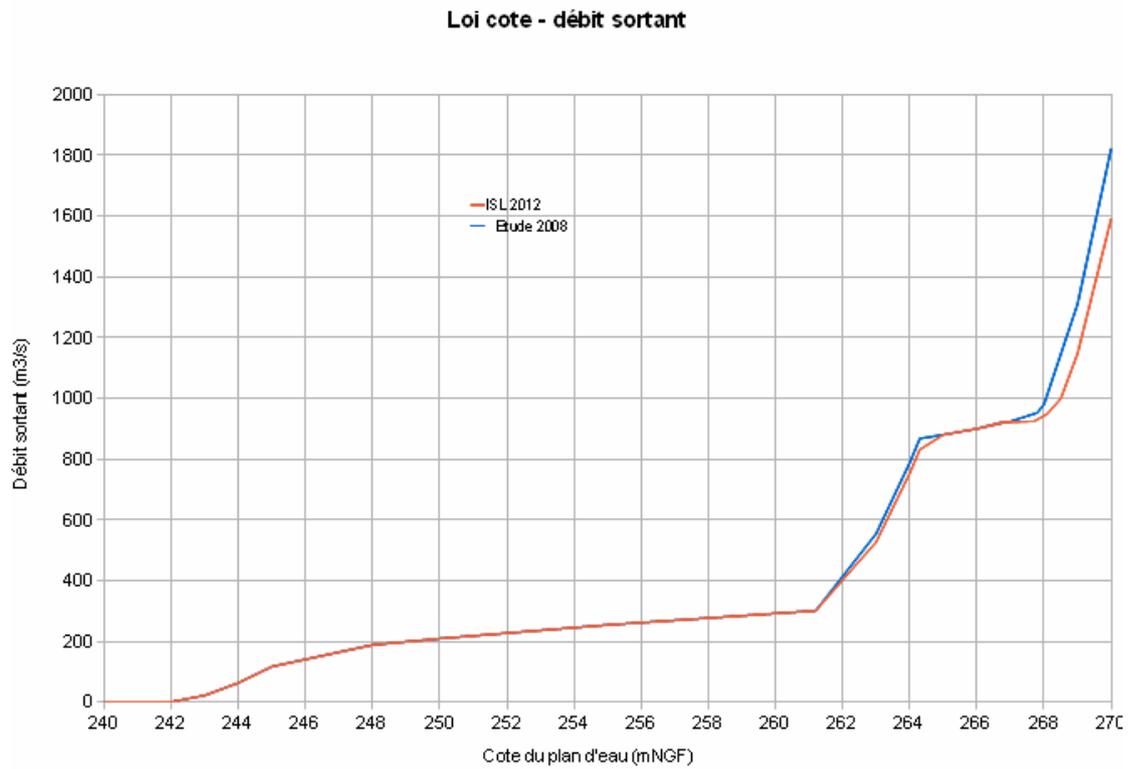


Figure 5

3 Nouvelle superficie du bassin versant du barrage de Ste Cécile

Au cours des investigations menées sous SIG pour cette étude, nous avons mis en évidence une différence entre la superficie du bassin versant du barrage de Ste Cécile utilisée jusqu'alors, 109 km², et celle donnée par un découpage automatique du MNT : 115,5 km². Cette valeur de 115,5 km² est confirmée par la mesure de la surface du bassin versant dont les limites sont proposées par BRLi dans les annexes cartographiques de l'étude de 2008 aussi que par ISL.

La nouvelle valeur adoptée pour la superficie du bassin versant est donc de 115,5 km².

4 Recalage de SHYPRE sur les distributions de fréquence des débits observés

Les « distributions de fréquence des débits observés » ont été élaborées par ISL à partir de :

- ❖ **Ste Cécile: 37 années d'observation** (1976-2012) des cotes du plan d'eau du barrage.
- ❖ **Sénéchas : 34 années d'observation** (1979-2012) des cotes du plan d'eau du barrage.

Ces distributions « observées » correspondent aux distributions empiriques des lames d'eau en 6h et 24h (en mm: volume écoulé/surface du bassin versant) générées par le bassin versant **pour les 37 (respectivement 34) crues ayant générées les 37 (respectivement 34) plus fortes cotes** de chacune des 2 saisons de la méthode SHYPRE (« été » de juin à novembre et « hiver » de décembre à mai).

Notons que ces 2 bassins versants ont des surfaces très proches :

- ✧ **Ste Cécile** : 115.5 km²
- ✧ **Sénéchas** : 113 km²

Certaines crues n'ayant pas été prises en compte par ISL (données incomplètes), elles ont été réintégrées dans l'échantillon en estimant leurs lames en 6 et 24h d'eau par régression linéaire avec la cote max du plan d'eau ; les coefficients de détermination étant de :

- ✧ Ste Cécile : $R^2_{6h\ hiver}=0.96$, $R^2_{24h\ hiver}=0.74$, $R^2_{6h\ été}=0.96$, $R^2_{24h\ été}=0.80$
- ✧ Sénéchas : $R^2_{6h\ hiver}=0.81$, $R^2_{24h\ hiver}=0.76$, $R^2_{6h\ été}=0.84$, $R^2_{24h\ été}=0.66$

Les représentations graphiques de ces régressions sont fournies en annexe.

Ces crues sont :

- ✧ **Ste Cécile** : 8 crues : septembre 1976, octobre 1979, octobre 1987, janvier 1999, avril 2004, septembre 2005, novembre 2005 et novembre 2006.
- ✧ **Sénéchas** : 17 crues : mars 1981, décembre 1981, avril 1983, novembre 1984, février 1990, septembre 1994, septembre 1995, avril 1998, décembre 2002, avril 2004, septembre 2005, novembre 2005, octobre 2006, novembre 2006, octobre 2008, novembre 2008, novembre 2011.

De plus, pour le barrage de Sénéchas, les crues sont sélectionnées **en dehors de la période 1^{er} mai – 15 août**. En effet, cette période du 1^{er} mai au 15 août correspond à la période de sur stockage et de gestion dynamique des crues pour le soutient d'étiage qui rendent le calcul des hydrogrammes de crue à partir des limnigrammes trop aléatoire. 4 crues notables sont présentes sur cette période : mai 1988, mai 1993, mai 1998 et mai 1999. Pour ces 4 crues ainsi que pour les crues d'octobre 1999, novembre 2002, janvier 2006, janvier 2008, février 2009 et mars 2011, après avoir vérifié, lorsque les données le permettaient, que la pluie journalière fût semblable sur les bassins versants de Ste Cécile et de Sénéchas, les lames en 6h mesurées sur le barrage de Ste Cécile sont utilisées pour le barrage de Sénéchas pour en estimer la cote puis la lame en 24h, en utilisant les régressions linéaires définies ci-dessus :

- La lame en 6h écoulée de Sénéchas = La lame en 6h mesurée sur Ste Cécile,
- La cote max Sénéchas est déterminée par régression linéaire à partir de la lame en 6h,
- La lame en 24h écoulée de Sénéchas est déterminée par régression linéaire à partir de la cote max Sénéchas.

On notera que la cote de 252.08 observée sur le barrage de Sénéchas en décembre 1992 n'est pas utilisée car aucune pluie ou crue notable n'est observée par les pluviomètres ou sur le barrage de Ste Cécile. Cette cote est inexploitée.

On notera également pour Sénéchas que les deux fortes crues de septembre 1976 et octobre 1977 ne font pas partie de l'échantillon (données exploitables à partir de 1979).

Le nombre de crues réintégrées est donc au total de 8 pour Ste Cécile et 27 sur Sénéchas.

Le tableau ci-dessous synthétise les principales crues :

été		Cote max plan d'eau		Pluie journalière de BV		hiver		cote max plan d'eau		Pluie journalière de BV		
Date	Sénéchas	Ste Cecile	Sénéchas	Ste Cecile	Date	Sénéchas	Ste Cecile	Sénéchas	Ste Cecile	Date	Sénéchas	Ste Cecile
août-76		244.52	227	161	déc-76		244.77	105.8	107.2			
sept-76		250.5	138	153	janv-77		245.28	105.1	92.8			
oct-76		245.59	120	116	déc-77		246.23	143.1	141.6			
nov-76		249.46	160	177	avr-78		245.1	100.4	72.3			
août-77		246.4	144	100	janv-79	247.36	244.31	80.1	81.1			
oct-77		253.3	190	184	mars-81	246.6	244.32	78.0	74.8			
oct-79	249.05	244.85	103	115	déc-81	248.68	245.51	113.0	114.8			
nov-82	258.85	249.3	278	238	avr-83	247.75	244.06	80.9	56.5			
août-84	246	244.71	140	203	déc-83	245.37	244.08	96.2	84.5			
nov-84	250.41	244.94	154	130	janv-84	246.77	243.72	86.7	77.3			
nov-86	248.6	244.06	137	124	déc-84	255.5	246.11	154.3	130.0			
oct-87	248.78	245.49	108	107	févr-87	247.13	244.12	65.0	63.0			
oct-88	245.76	243.82	89	75	avr-87	247.47	244.44	86.3	82.6			
nov-89	247.9	244.62	112	102	déc-87	246.89	243.5	65.4	55.4			
sept-92	248.34	245.06	130	169	janv-88	250.89	245.33	107.0	117.2			
oct-93	246.85		67	53	mai-88	246.9	244.34	82.9	88.7			
oct-93	246.70	243.26	54	56	févr-90	247.2	243.71	75.5	50.2			
nov-93	247.36	243.91	80	57	mars-91	247.42	244.3	95.7	91.9			
sept-94	246.7	245.23	130	152	mai-93	246.3	244.3	116.1	107.6			
oct-94	253.54	249.17	209	186	févr-94	247.46	244.1	88.8	84.6			
nov-94	249.37	245.51	109	131	janv-95	246.58	243.93	58.9	58.0			
sept-95	246.54	244.63	128	131	janv-96	246.84		56.5	82.6			
oct-95	258.1	249.13	158	136	janv-96	249.48	244.22	66.5	110.7			
oct-95	247.1		74	165	janv-96	250.42	245.89	91.1	89.9			
nov-95	247.11	244.14	77	82	déc-96	247.25	243.7	70.3	73.8			
nov-96	253.96	246.57	137	130	déc-97	258.96	248.64	192.3	140.2			
nov-97	251.19	244.76	153	141	janv-98	247.89	244.58	98.8	83.7			
oct-99	247.0	244.56	140	192	avr-98	250.4	244.1	73.7	82.6			
sept-00	248.31	246.05	134	120	mai-98	246.1	244.55	108.1	165.5			
nov-00	248.99	244.14	86	79	janv-99	247.43	243.96	131.1	161.1			
oct-01	249.77	245.25	89	80	mai-99	249.3	245.73	120.1	127.8			
sept-02	244.07	245.72	102	174	déc-00	248.23	244.55	100.8	99.6			
oct-02		243.95	104	133	déc-00	247.55		102.9	87.8			
nov-02	248.0	245.03	77	92	déc-02	246.86	244.51	83.1	100.3			
nov-03	247.76	244.44	86	87	avr-02	244.62		39.8	35.1			
nov-03	249.34	245.01	95	128	déc-03	249.23	246.33	91.0	98.9			
sept-05	246.6	244.06			avr-04	246.96	244.41					
nov-05	248.3	244.36			janv-06	246	243.99					
oct-06	254.74	247.41			janv-08	246.4	244.19					
nov-06	248.7	245.15			févr-08		244					
oct-08	246.8	244.05			avr-08	246	244.02					
nov-08	263	250.33			févr-09	247.7	244.68					
oct-10	246.57	243.79			déc-10	248.77	244.54					
nov-11	254	246.4			mars-11	246.1	244.08					
Cote réintégrée mesurée		Cote réintégrée estimée par la lame 6h Ste Cécile				Cote non utilisée car trop faible						

Tableau 1

Le recalage porte sur le paramètre de production $S0/A$ (Taux de remplissage (S) initiale (0) du réservoir de production (A)) du modèle pluie-débit conceptuel GRs, compris entre 0 et 1 et représentant l'état de saturation hydrique du bassin versant.

La méthode SHYPRE comporte 2 saisons hydrologiques : « été » (de juin à novembre) et « hiver » (de décembre à mai), il y a donc 2 paramètres de production à caler : $S0/A_{\text{été}}$ et $S0/A_{\text{hiver}}$.

Chacun de ces 2 paramètres est calé pour obtenir par SHYPRE, pour la saison considérée, une distribution de fréquence des lames d'eau en 6h et 24h proche de la distribution de fréquence « observée ».

Les valeurs obtenues sont :

❖ **Ste Cécile :**

$S0/A_{\text{hiver}} = 0.74$

$S0/A_{\text{été}} = 0.70$

❖ **Sénéchas :**

$S0/A_{\text{hiver}} = 0.81$

$S0/A_{\text{été}} = 0.72$

Les distributions de fréquence saisonnières des lames d'eau en 6 et 24 h qui en résultent sont tracées ci-après. Les fréquences empiriques sont ici calculées par la formulation de Hazen : $F=(r-0,5)/n$; r étant le rang dans la série de données classée par valeurs croissantes, n est la taille de l'échantillon.

❖ **Ste Cécile :**

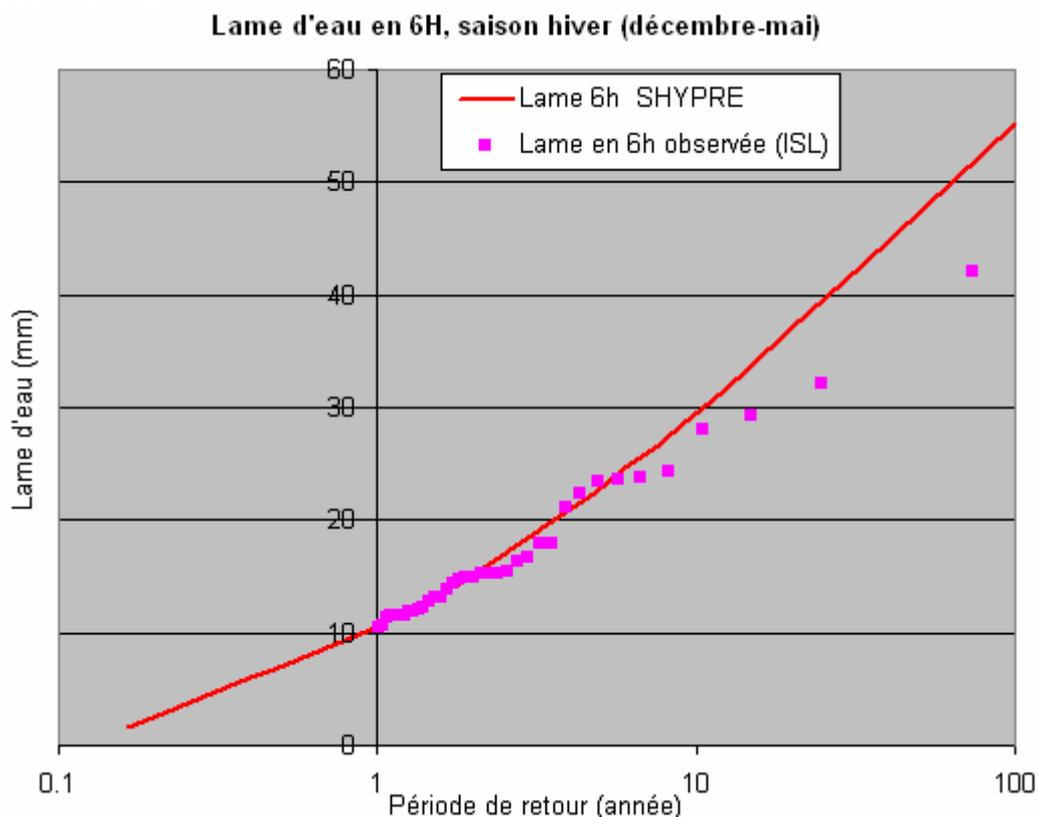
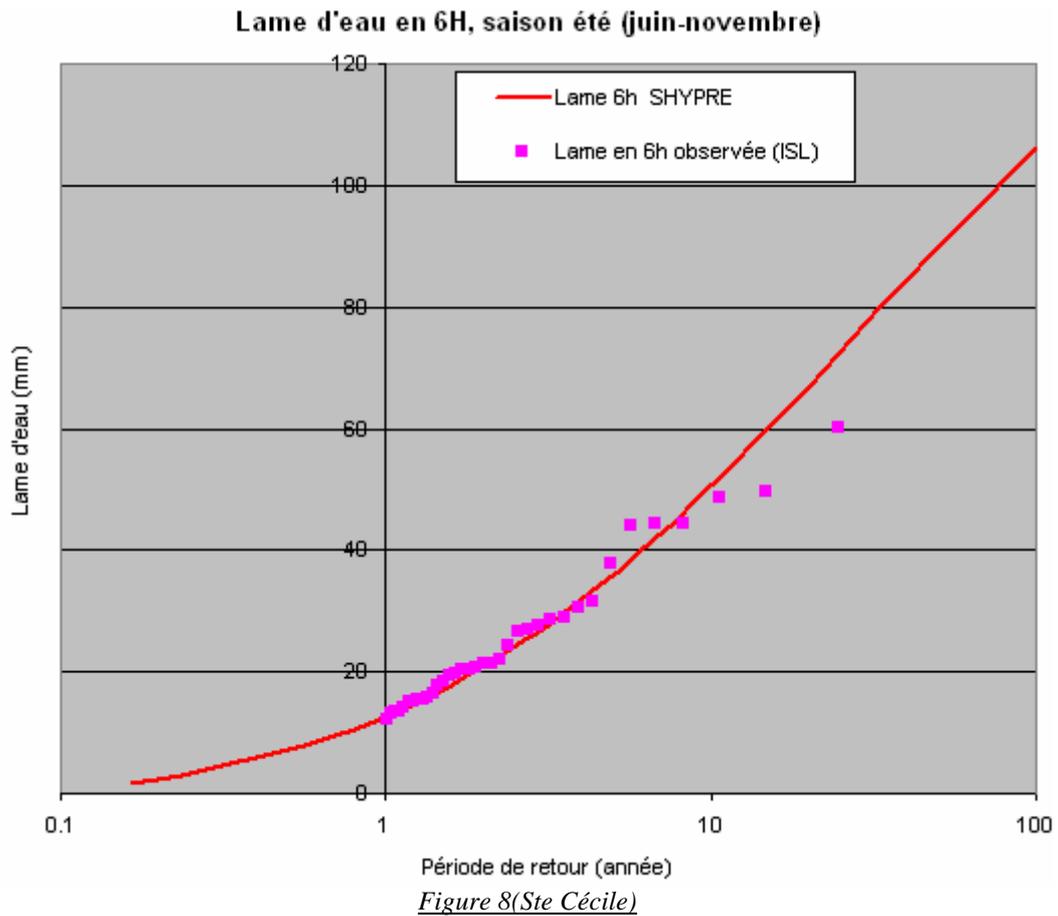
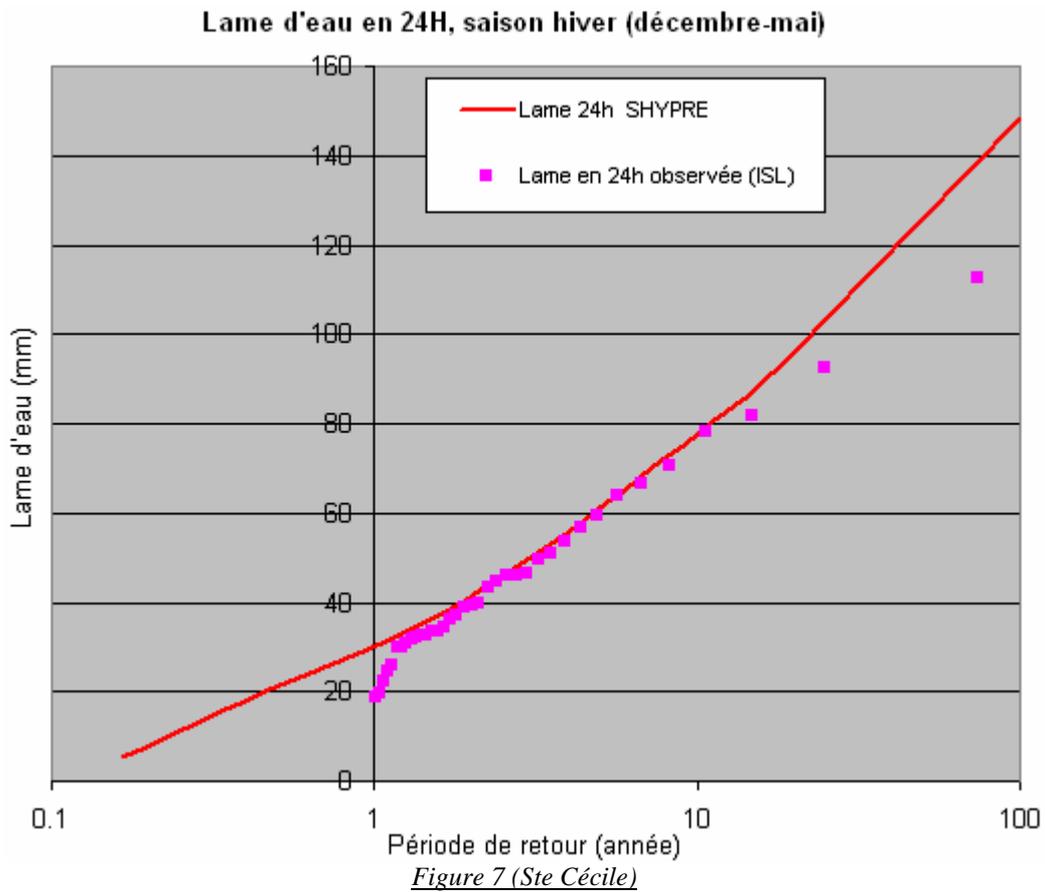
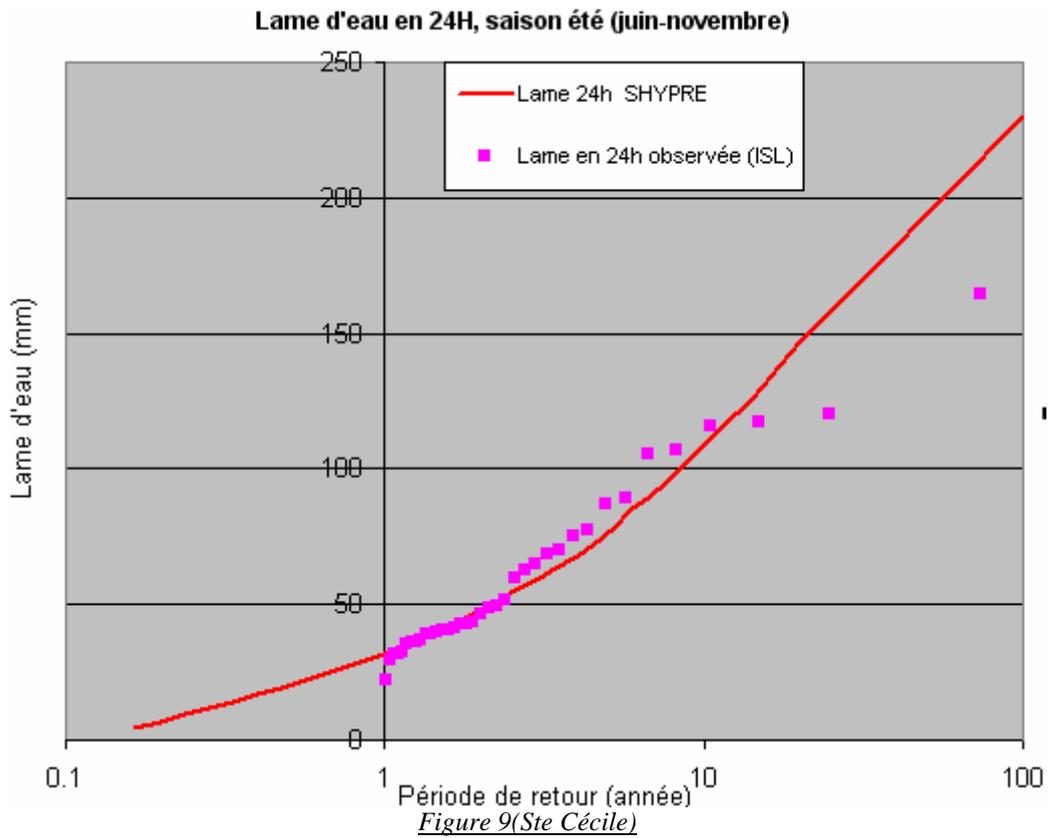
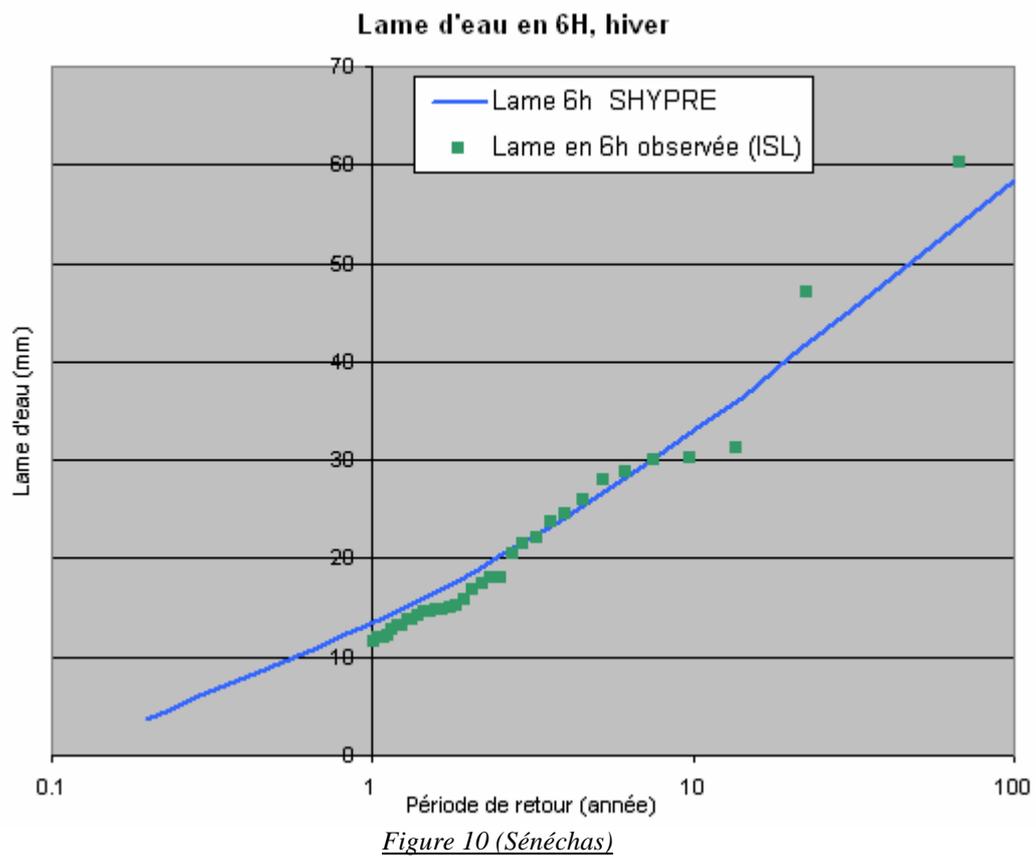


Figure 6 (Ste Cécile)





❖ **Sénéchas :**



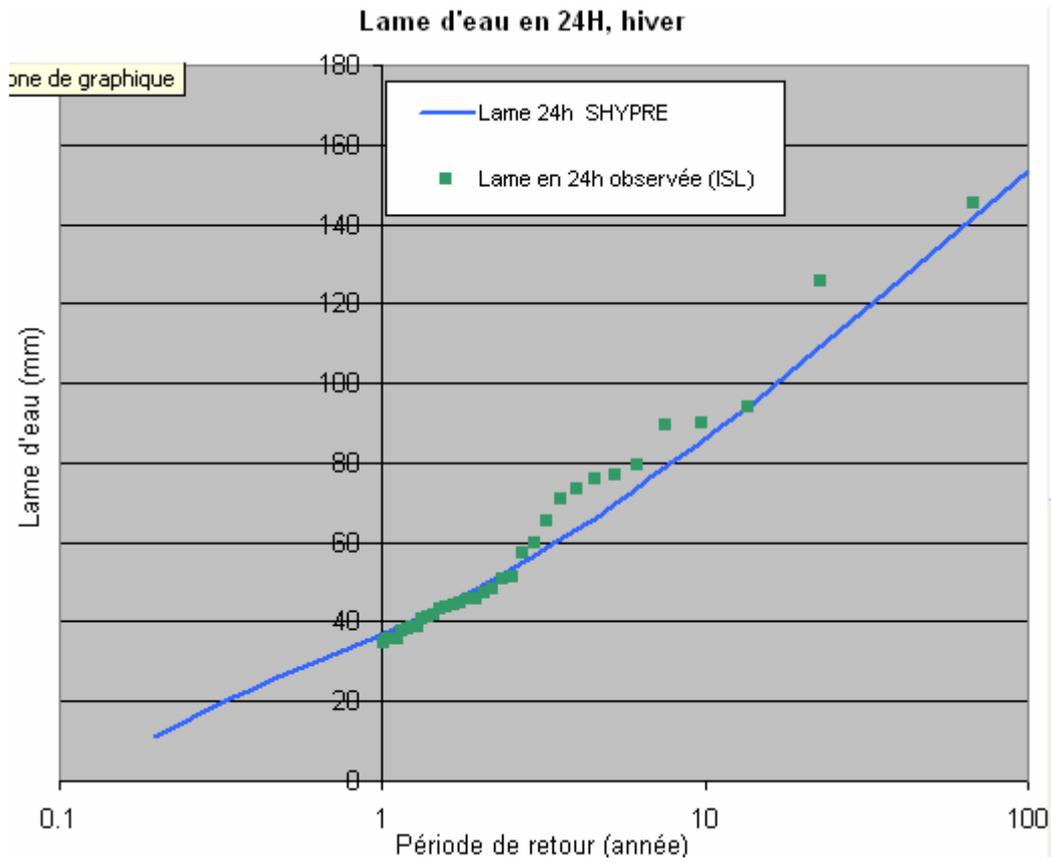


Figure 11 (Sénéchas)

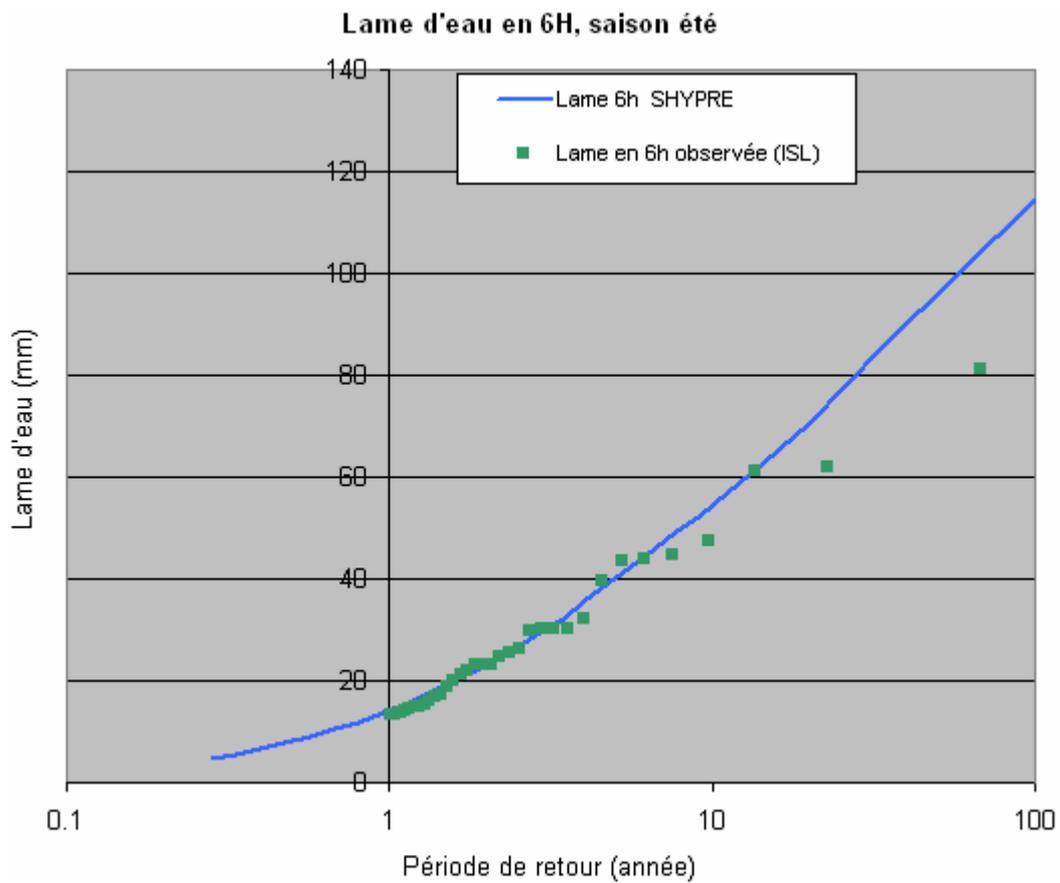


Figure 12 (Sénéchas)

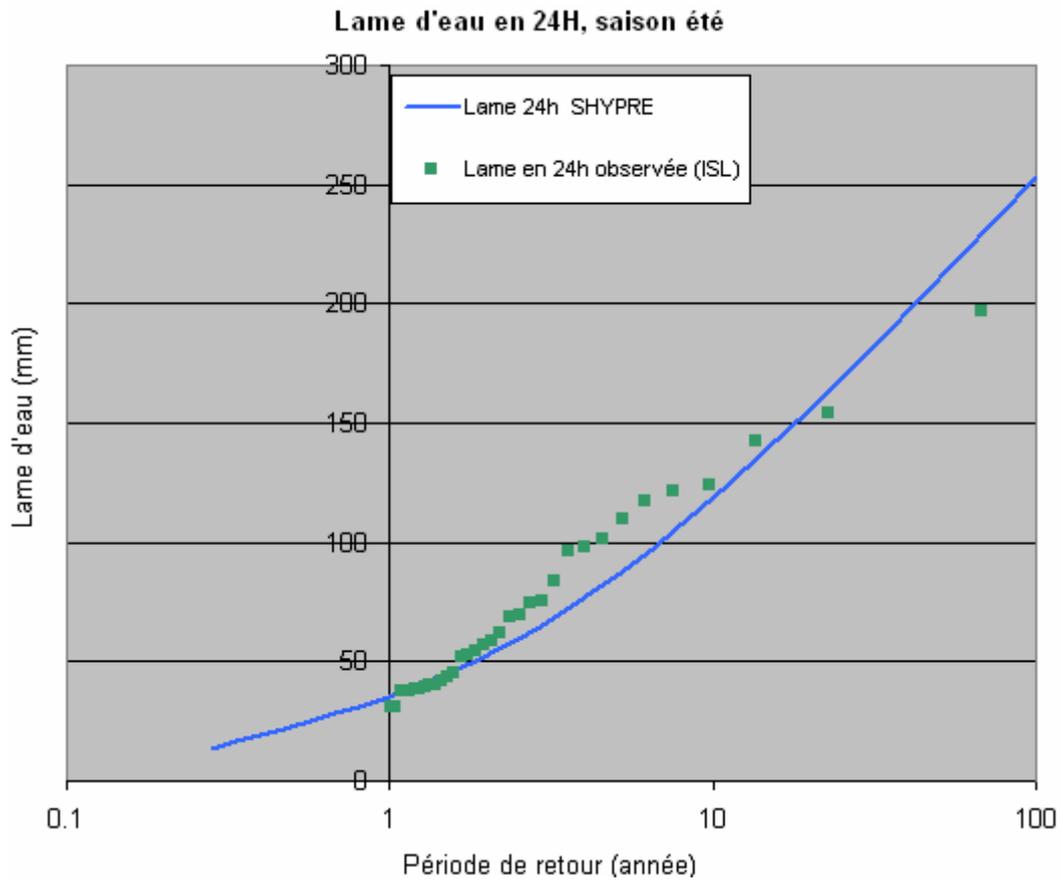


Figure 13 (Sénéchas)

Les distribution des lames d'eau SHYPRE sont calées sur les distributions des « lames d'eau observées » pour les fréquences courantes, zone dans laquelle les distributions « observées » sont stables et non soumises au problème de l'échantillonnage.

Les figures suivantes comparent ces différentes distributions de lame d'eau en 6 et 24h des bassins versants de Ste Cécile et Sénéchas :

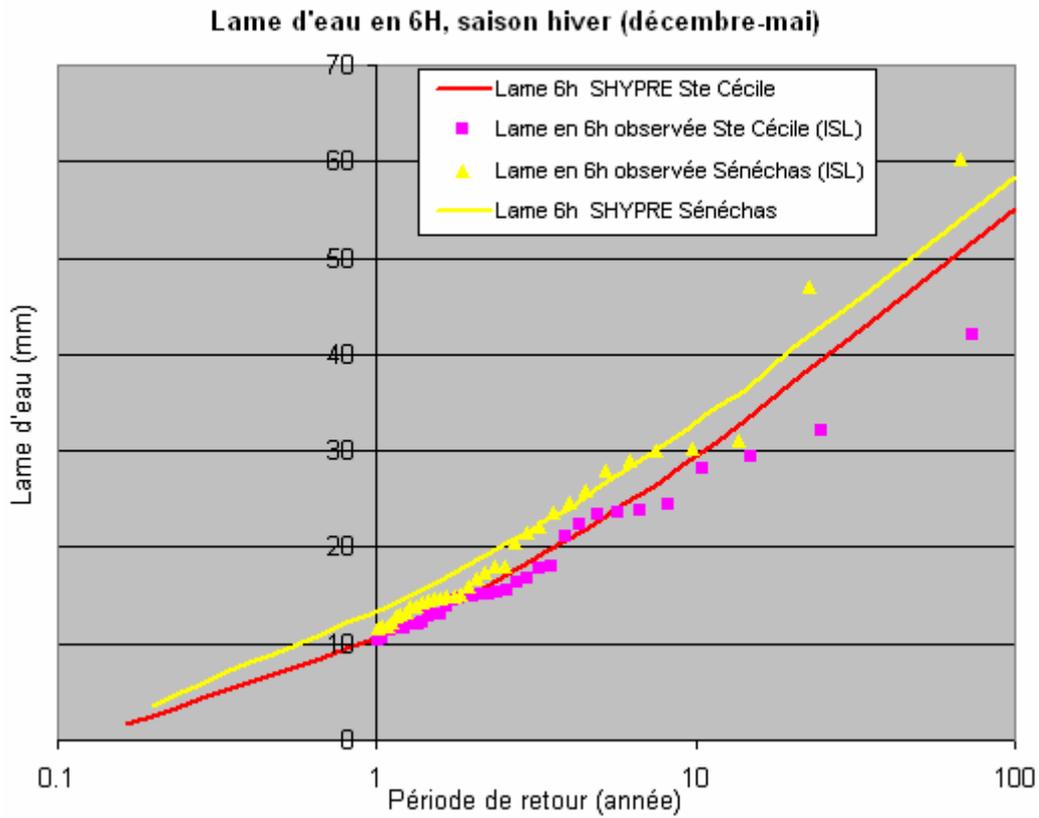


Figure 14

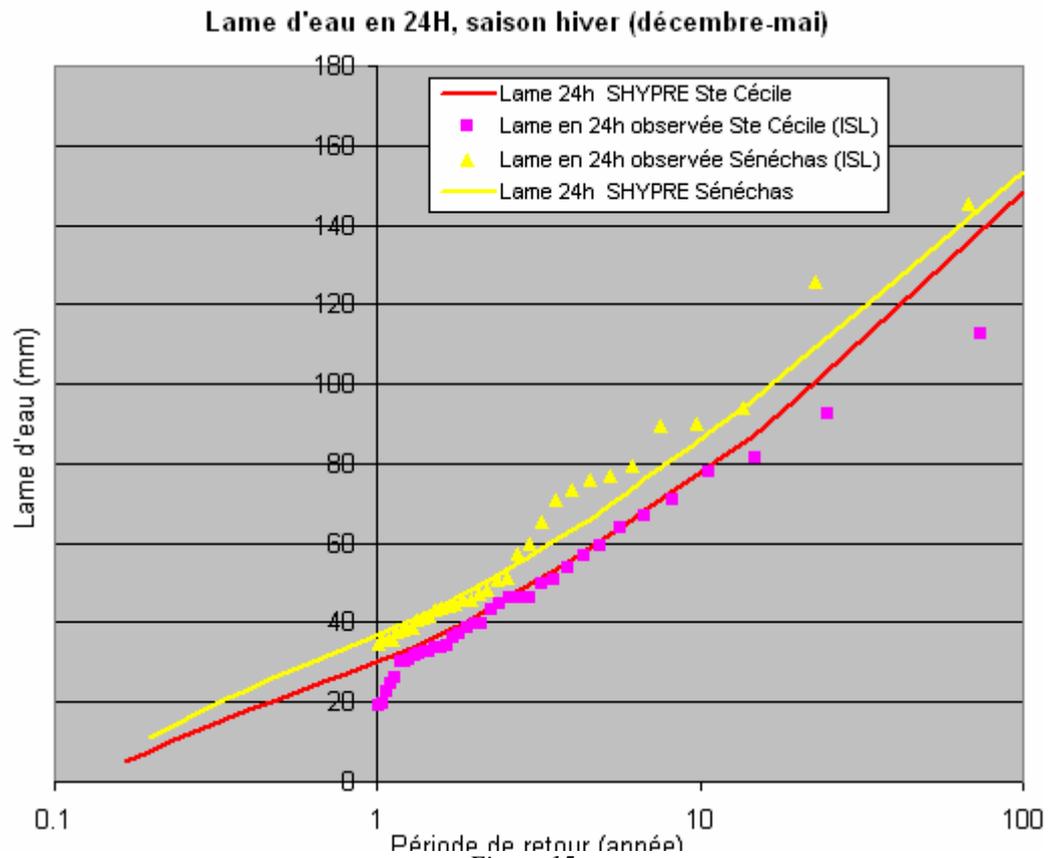


Figure 15

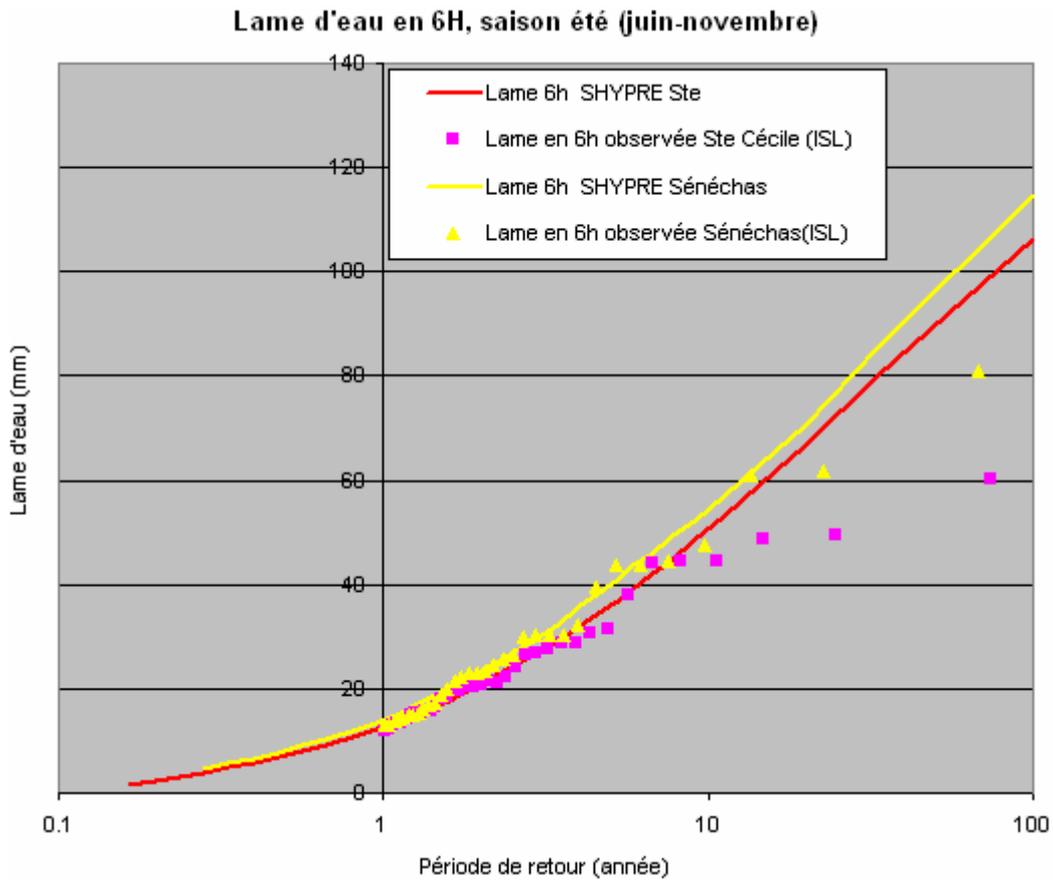


Figure 16

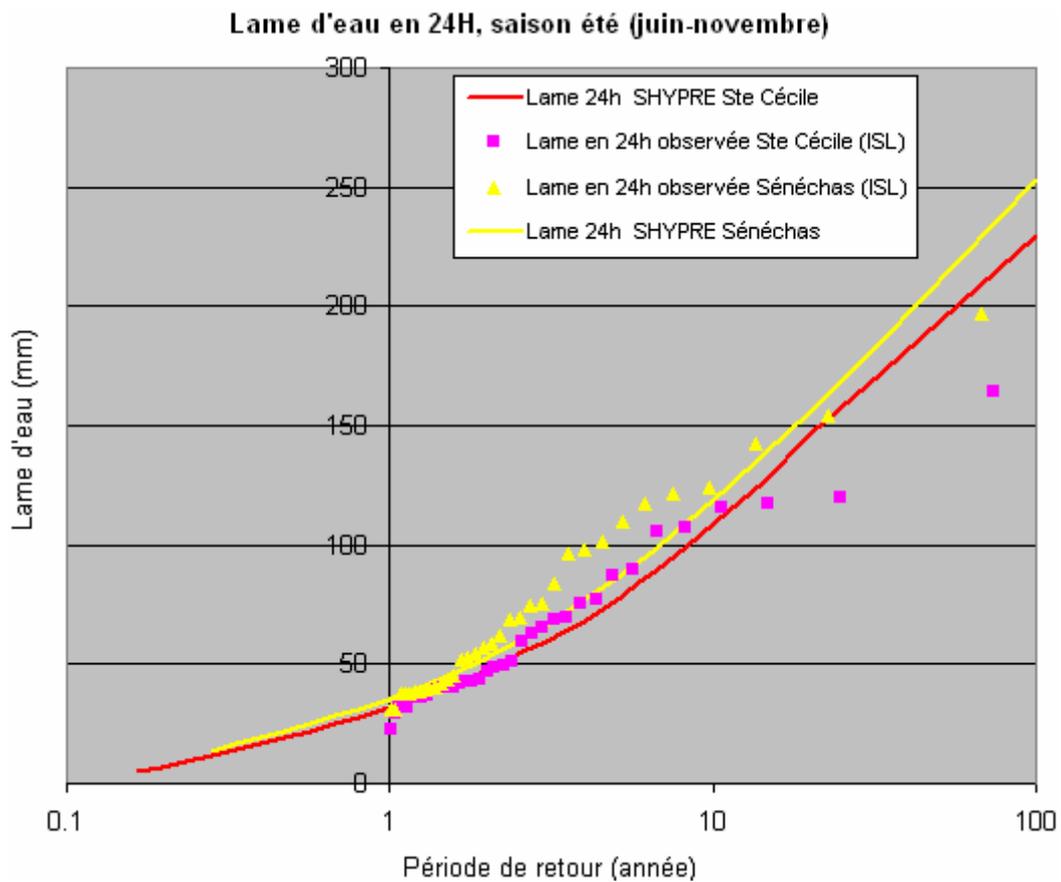


Figure 17

Quelque soit la durée et la saison, les distributions « observées » et simulées des lames d'eau de Sénéchas sont légèrement supérieures à celle de Ste Cécile.

Les distributions des lames « observées » de Sénéchas sont moins stables que celles de Ste Cécile, principalement pour la durée 24h. Ceci s'explique probablement par un plus grand nombre de valeurs estimées.

La distribution de fréquence annuelle des débits de pointe du bassin versant qui en résulte est la suivante :

❖ **Ste Cécile :**

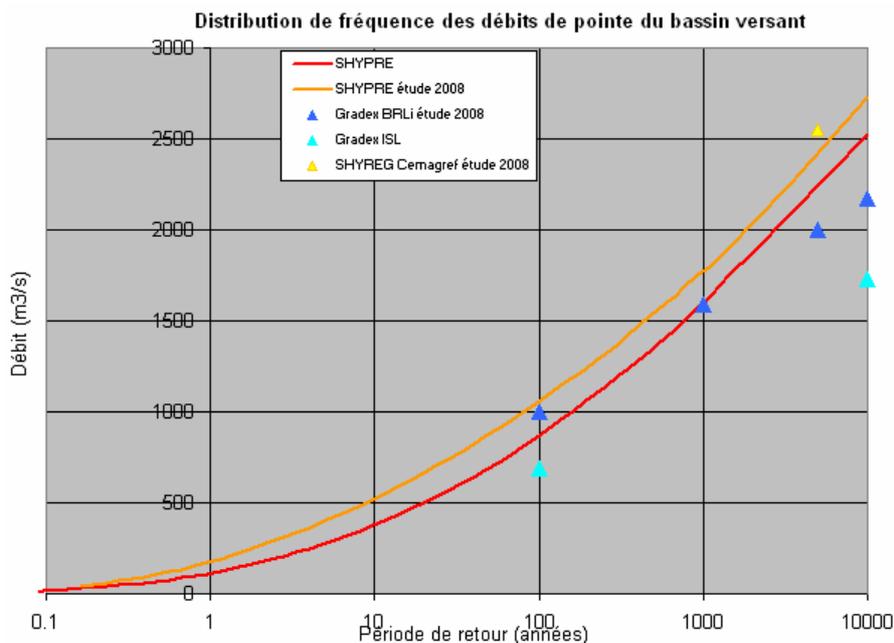


Figure 18 (Ste Cécile)

❖ **Sénéchas :**

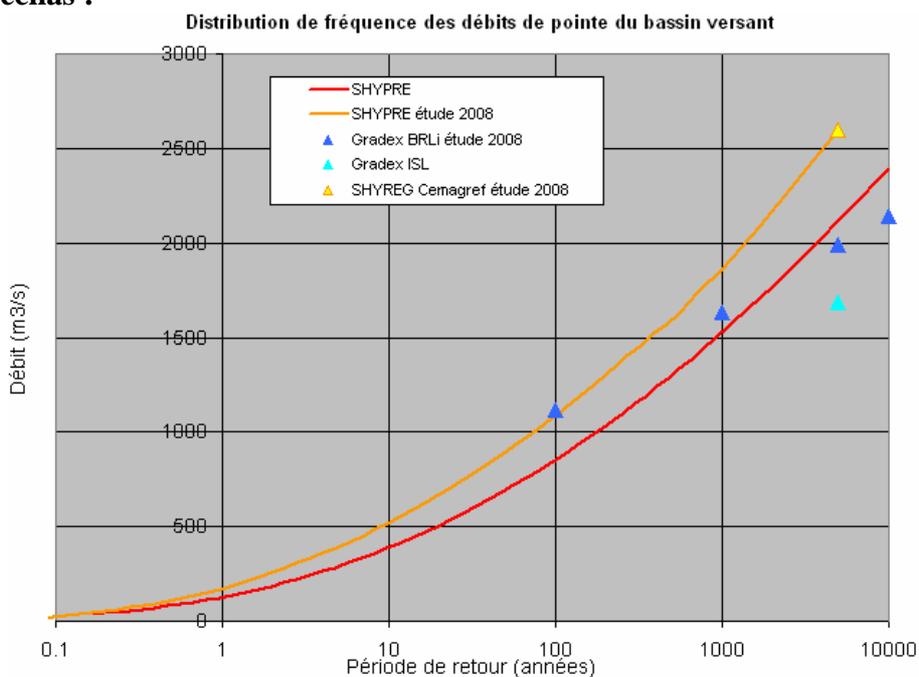


Figure 19 (Sénéchas)

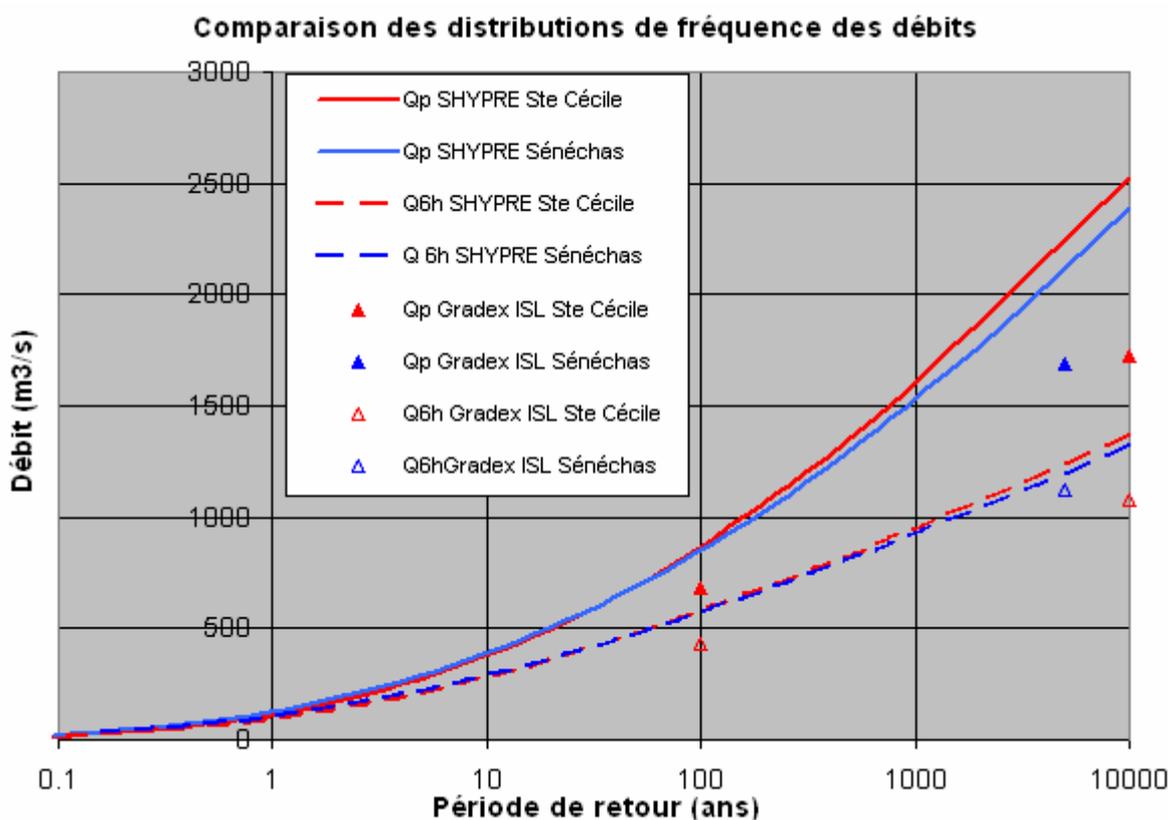
Le nouveau débit de pointe de période de retour 10000 ans :

✧ **Ste Cécile : $Q_p 10000 = 2520 \text{ m}^3/\text{s}$** ($Q_p 10000$ étude 2008 = $2728 \text{ m}^3/\text{s}$)

✧ **Sénéchas : $Q_p 10000 = 2390 \text{ m}^3/\text{s}$**

$Q_p 5000 = 2120 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_p 5000$ étude 2008 = $2594 \text{ m}^3/\text{s}$)

La figure ci-dessous compare les distributions de fréquences SHYPRE et GRADEX-ISL des débits de pointe et moyens en 6h des 2 bassins versants :



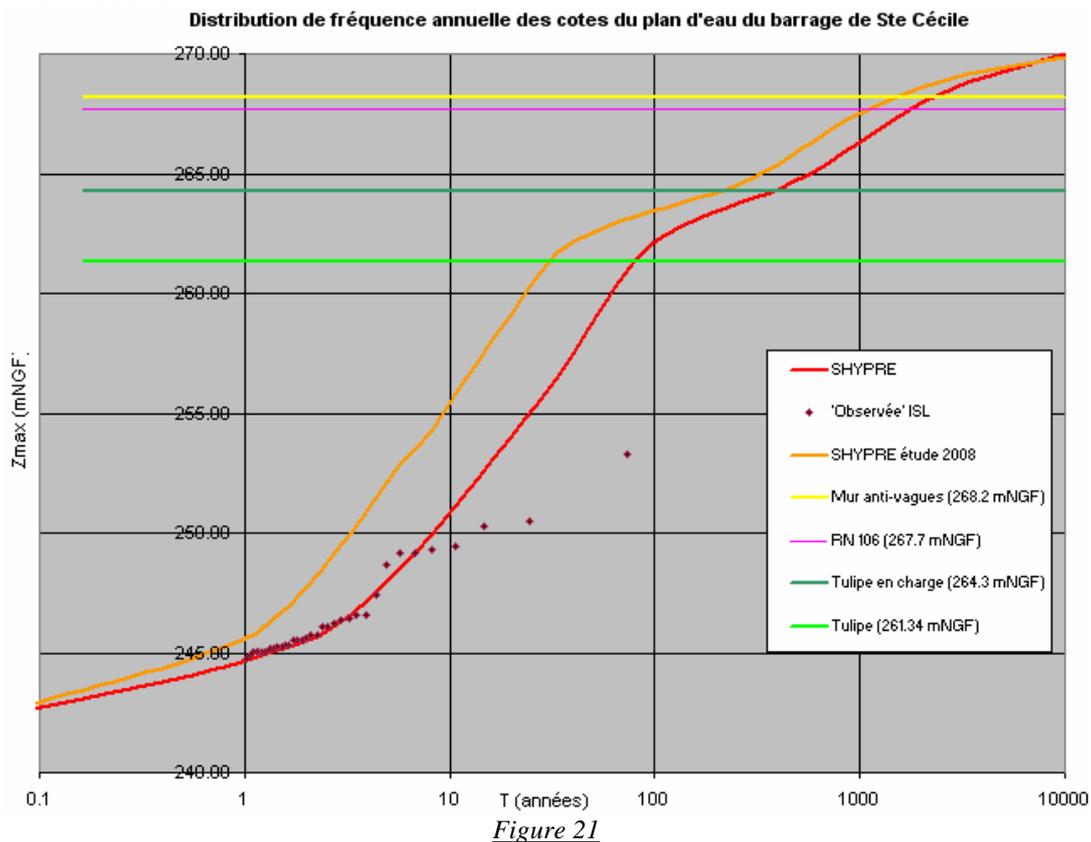
Les débits de pointe et moyens en 6h SHYPRE sont légèrement plus forts sur Ste Cécile que sur Sénéchas alors que cette tendance est inversée avec le GRADEX-ISL.

Notons enfin que le débit de pointe de la **crue historique du 30 septembre 1958** peut être estimé au barrage des Cambous à $1420 \text{ m}^3/\text{s}$ (Données IRSTEA : Cote 231mNGF, coefficient de débit : 0.45), soit **$1340 \text{ m}^3/\text{s}$ au droit du site du barrage de Ste Cécile** (en tenant compte de la différence de surface des bassins versants : 124 km^2 pour Cambous, $115,5 \text{ km}^2$ pour Ste Cécile). **La période de retour de ce débit de pointe** serait, d'après la méthode SHYPRE, d'environ **500 ans**, et d'après la méthode GRADEX-ISL, d'environ **2000ans**.

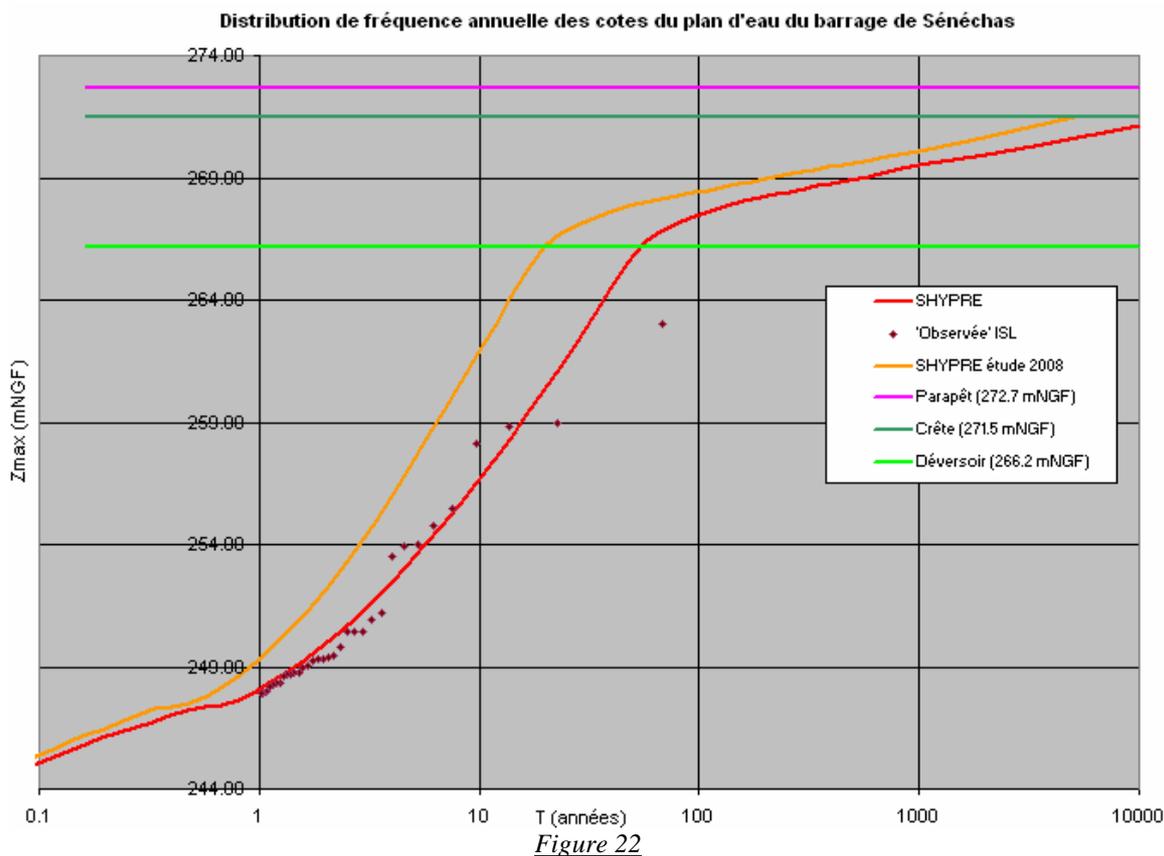
5 Validation de SHYPRE sur la distribution de fréquence des cotes observées

La distribution de fréquence annuelle des cotes du plan d'eau SHYPRE est alors comparée à la distribution de fréquence des cotes du plan d'eau « observées » élaborée par ISL à partir de 37, respectivement 34, années d'observation des cotes du plan d'eau du barrage de Ste Cécile, respectivement Sénéchas, et complétée par 5, respectivement 10, crues (cf. paragraphe 4):

✧ Ste Cecile :



✧ Sénéchas :



Les distributions SHYPRE sont en accord avec les distributions « observées » sur la partie stable de celles-ci (au dessous de 10 ans). Ceci valide la cohérence de la méthode.

Les nouvelles cotes du plan d'eau de période de retour 10000ans pour Ste Cécile (Barrage poids en terre) et 5000 ans pour Sénéchas (Barrage voûte en béton) sont :

✧ **Ste Cécile :**

Z 10000 = 270.00 mNGF (Z 10000 étude 2008 = 269.89 mNGF)

La période de retour de déversement sur la RN 106 est de **1775 ans**. (800 ans dans l'étude 2008)

✧ **Sénéchas :**

Z 5000 ans = 270.60 mNGF (Z 5000 étude 2008 = 271.47 mNGF)

Les valeurs numériques de ces courbes sont fournies en annexe.

6 Représentativité climatologique de la période 1976-2012

Le calage du modèle pluie-débit reposant sur les mesures limnigraphiques de la période de 37 années 1976-2012, nous avons cherché à définir la représentativité climatologique de cette

période par rapport à la période de 120 ans 1893-2012 pour laquelle nous disposons des mesures de pluie journalière.

Pour cela nous avons examiné les distributions de fréquences des pluies journalières des postes de Collet de Dèze et Cassagnas (Utilisés pour le calcul de la pluie de bassin de Ste Cécile) sur la période 1894-2012 (112 ans de données) et sur 3 périodes de 37 années de données : 1898-1938, 1939-1975, 1976-2012 :

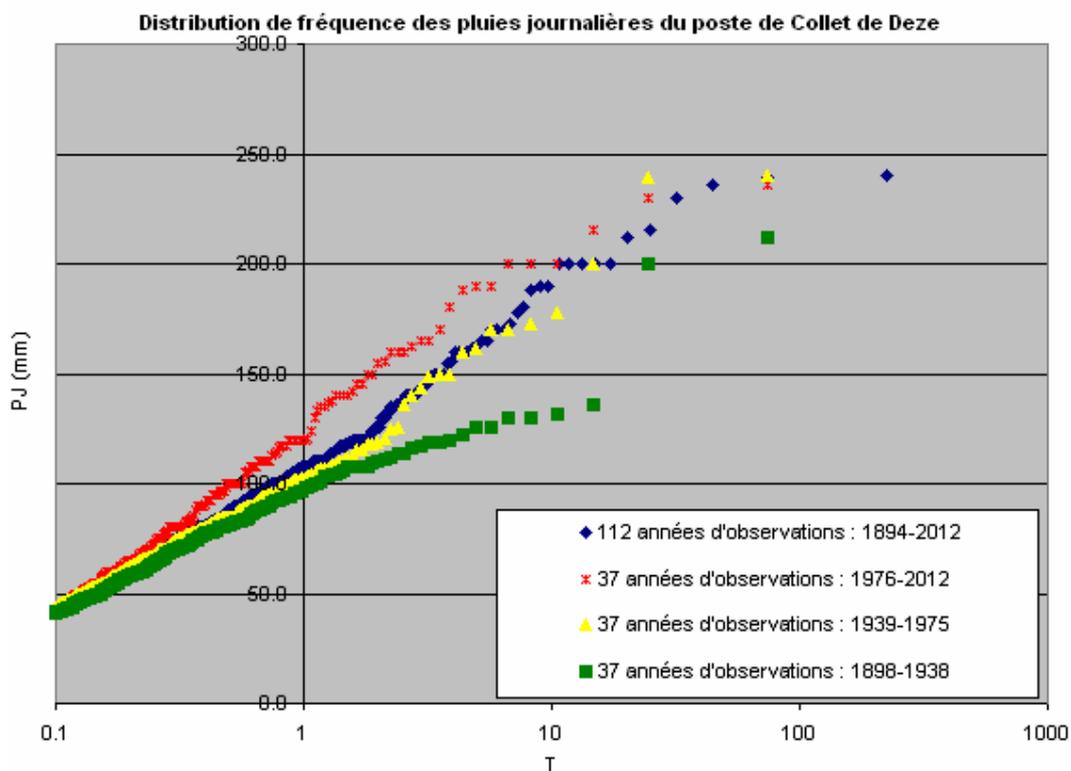


Figure 23

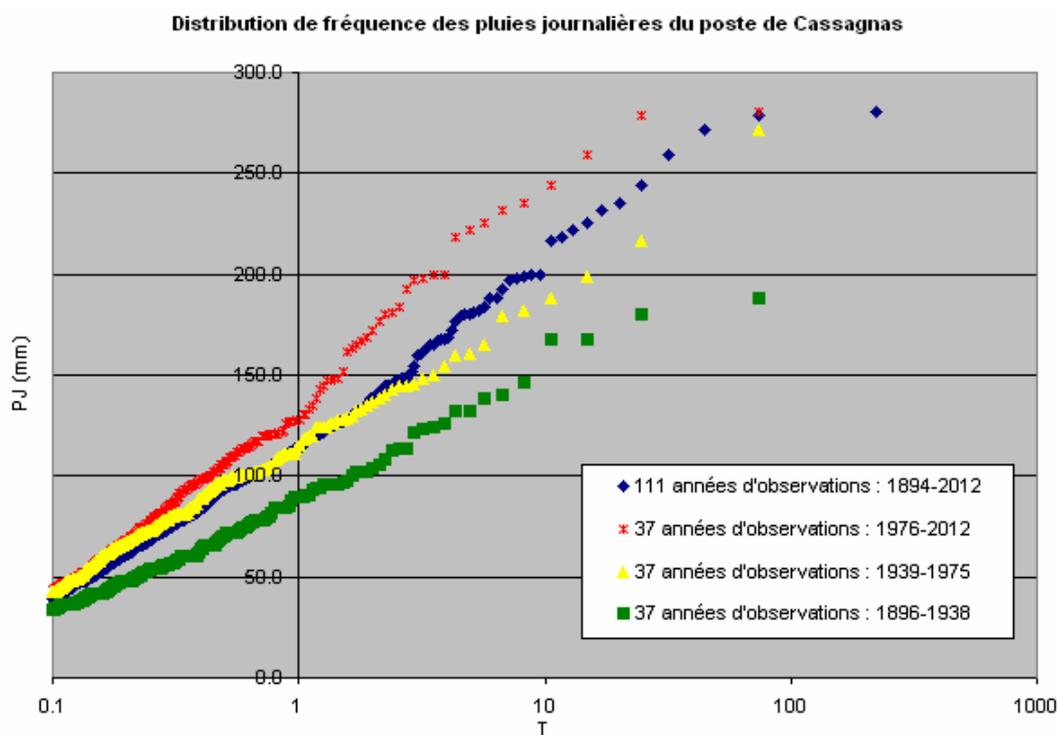


Figure 24

Pour ces deux stations, la distribution de fréquences des pluies journalières de la période 1976-2012 est nettement supérieur à celle de 1939-1975, elle même nettement supérieur à celle de 1898-1938.

Les éléments suivants peuvent être en partie responsables de telles variations:

- ❖ Les fluctuations naturelles de la pluie journalière moyenne à cette échelle temporelle.
- ❖ La mesure : déplacement du poste, évolution des méthodes de mesure.
- ❖ Une évolution du climat.

Les investigations menées par Météo-France sur la station de Collet de Dèze ont montré l'existence de ruptures d'homogénéité sur la période 1887-2000; une série homogénéisée est disponible pour cette station et cette période mais au pas de temps mensuel et non au pas de temps journalier comme cela est nécessaire pour appliquer la méthode SHYPRE. N'étant pas en mesure de produire des séries homogénéisées au pas de temps journalier, le Conseil Général a choisi de garder les chroniques de 110ans de pluie journalière (1894-2003) non homogénéisées comme données d'entrée. Outre la problématique de l'homogénéité des séries, ces comparaisons montrent que la période de 37 années (1976-2012) sur laquelle repose le calage du modèle pluie-débit semble être une période plutôt forte en terme de pluviométrie journalière moyenne. Les distributions de fréquence des lames d'eaux observées utilisées pour caler SHYPRE ne pêcheraient donc pas par défaut pour les fréquences courantes.

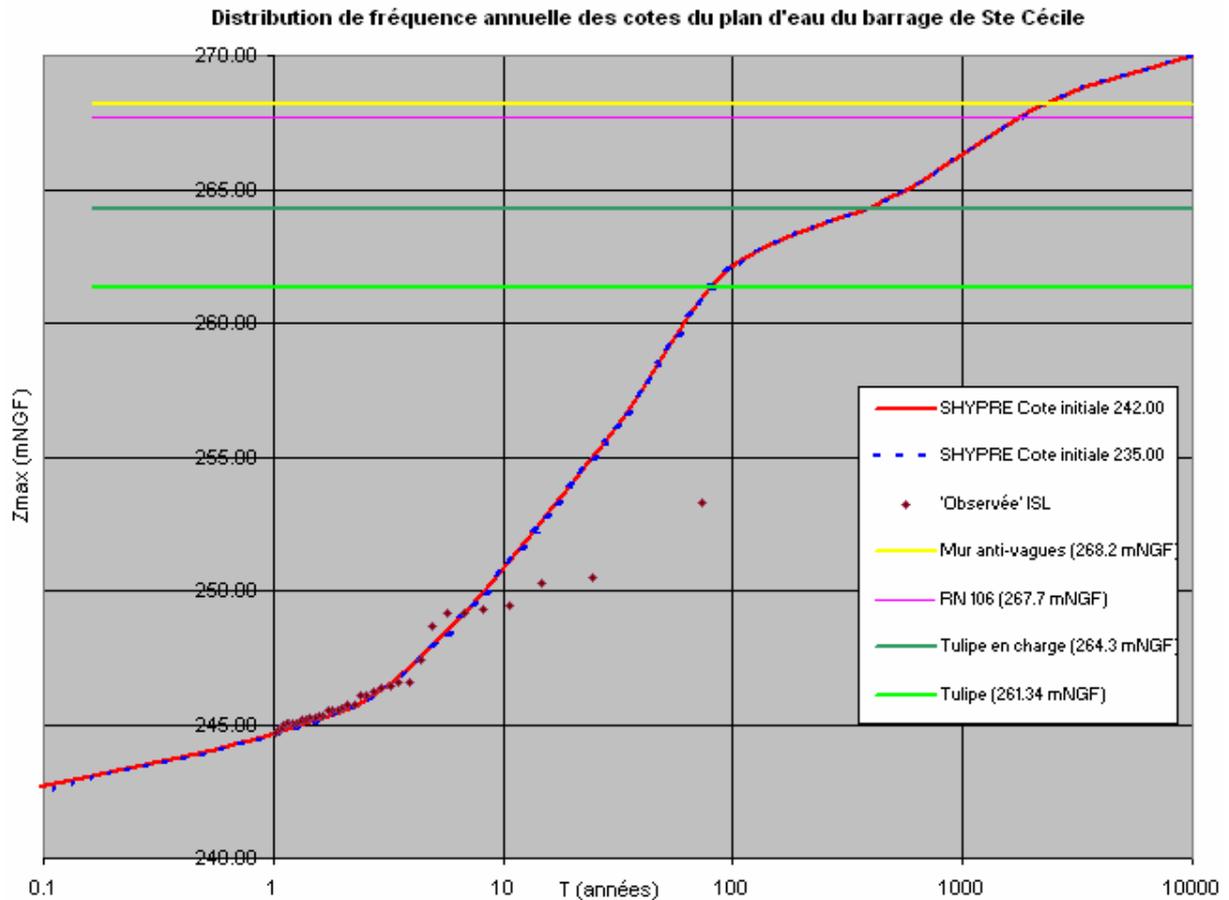
7 Impact d'une cote initiale inférieure à la cote nominale sur la distribution de fréquence des cotes maximales du plan d'eau du barrage de Sainte Cécile.

Il a été choisi pour effectuer les simulations SHYPRE de fixer la cote initiale du plan d'eau (cote avant chaque crue) à la cote nominale: 242 mNGF. Cependant, le barrage étant utilisé pour le soutien d'étiage, la cote du plan d'eau en période d'étiage peut être inférieure à 242 mNGF, avec une limite basse à 235 mNGF, en début de crue.

Aussi, afin d'examiner l'impact d'une cote initiale inférieure à la cote nominale sur la distribution de fréquence des cotes du plan d'eau, nous avons effectué une simulation SHYPRE avec une cote initiale à 235 mNGF.

Notons que la cote de 242 mNGF correspondant à la cote du bas du pertuis de demi-fond, le débit sortant de la retenue sous cette cote est négligé; le volume de la retenue sous cette cote est considéré comme un volume statique.

Le graphe ci-dessous compare la distribution de fréquence obtenue avec une cote initiale à 235 mNGF (en pointillés bleus) avec celle obtenue avec une cote initiale à 242mNGF (en rouge) :



Les deux distributions sont quasi-identiques, l'impact d'une cote initiale à 235 mNGF au lieu de 242 mNGF est négligeable.

La faiblesse de cet impact peut s'expliquer par :

- La faiblesse des volumes mis en jeu : le volume de la retenue entre 235 et 242 mNGF n'est que de 0.822 million de M^3 , soit quelques % du volume total des crues.
- La différence de fonctionnement du barrage : le volume de la retenue entre 235 et 242 mNGF est un **volume statique**, il n'y a pas de débit sortant sous la cote 242 : lorsque la cote initiale est de 235, les débits du début de la crue remplissent ce volume statique ; alors que le volume de la retenue au dessus de 242 est un **volume dynamique**, les débits transitent par le pertuis de fond dont la cote basse est à 242 : lorsque la cote initiale est de 242, les débits du début de la crue transitent par le pertuis de demi-fond et la cote de la retenue évolue en fonction de la forme de la crue.

8 Conclusion

Pour le barrage de Ste Cécile comme pour le barrage de Sénéchas, le recalage de SHYPRE sur les débits générés par le bassin versant permet d'obtenir une distribution de fréquence des cotes max du plan d'eau en accord avec les observations. Cette nouvelle approche modifie les résultats de l'étude de 2008.

L'hydrologie de crue des bassins versants de ces deux barrages ainsi que leurs caractéristiques géologiques et morphométriques sont très proches ; les résultats (pluies et débits de crue) obtenus par la méthode SHYPRE sur ces deux bassins versants sont également très proches.

Enfin, notons que la pertinence de la méthode SHYPRE est validée par les résultats du projet de recherche ExtraFlo (2009-2013) financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) qui est un travail d'inter-comparaison de méthodes probabilistes d'estimation des crues extrêmes mené par Irstéa, Météo-France, EDF, HydroSciences Montpellier et Géosciences Montpellier et dont les résultats seront publiés courant 2013.

ANNEXES

1- Valeurs numériques des distributions de fréquence des cotes

✧ Ste Cécile :

"Observée" ISL		SHYPRE		SHYPRE étude 2008
T(an)	Z (m NGF)	T(an)	Z (m NGF)	Z (m NGF)
74.000	253.3	10000.000	269.99	269.89
24.667	250.5	3333.333	268.84	269.14
14.800	250.31	2000.000	267.96	268.61
10.571	249.46	1428.571	267.23	268.14
8.222	249.3	1111.111	266.59	267.70
6.727	249.17	909.091	266.09	267.33
5.692	249.13	769.231	265.64	266.99
4.933	248.64	666.667	265.30	266.66
4.353	247.41	588.235	265.05	266.32
3.895	246.6	526.316	264.82	266.06
3.524	246.57	476.190	264.65	265.82
3.217	246.4	400.000	264.35	265.42
2.960	246.35	344.828	264.12	265.09
2.741	246.23	303.030	263.97	264.80
2.552	246.11	256.410	263.76	264.54
2.387	246.05	222.222	263.57	264.33
2.242	245.73	188.679	263.35	264.14
2.114	245.72	158.730	263.09	263.95
2.000	245.59	133.333	262.81	263.77
1.897	245.51	112.360	262.45	263.59
1.805	245.51	95.238	262.02	263.41
1.721	245.49	80.000	261.39	263.22
1.644	245.33	67.114	260.49	262.99
1.574	245.28	56.497	259.53	262.75
1.510	245.25	47.393	258.51	262.46
1.451	245.23	39.841	257.46	262.14
1.396	245.15	33.445	256.44	261.66
1.345	245.15	28.011	255.61	260.91
1.298	245.1	23.529	254.83	260.04
1.254	245.06	19.724	253.99	259.09
1.213	245.05	16.529	253.12	258.15
1.175	245.03	13.831	252.29	257.17
1.138	245.02	11.587	251.49	256.21
1.104	244.98	9.699	250.70	255.22
1.072	244.85	8.123	249.94	254.24
1.042	244.77	6.798	249.20	253.52
1.014	244.71	5.692	248.50	252.87
		4.764	247.84	251.92
250.5	Valeur réintégrée	3.989	247.21	250.98
		3.339	246.64	250.07

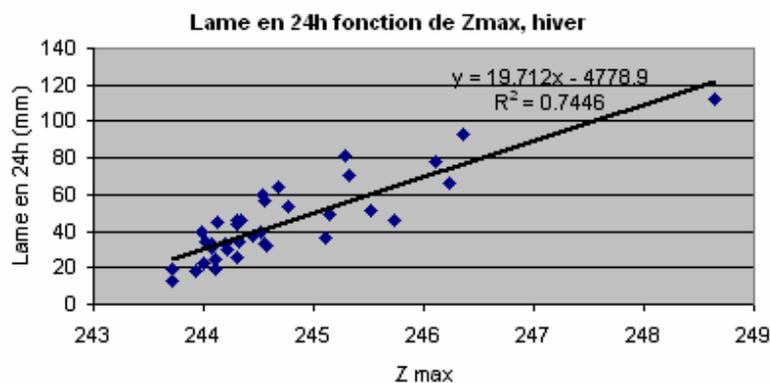
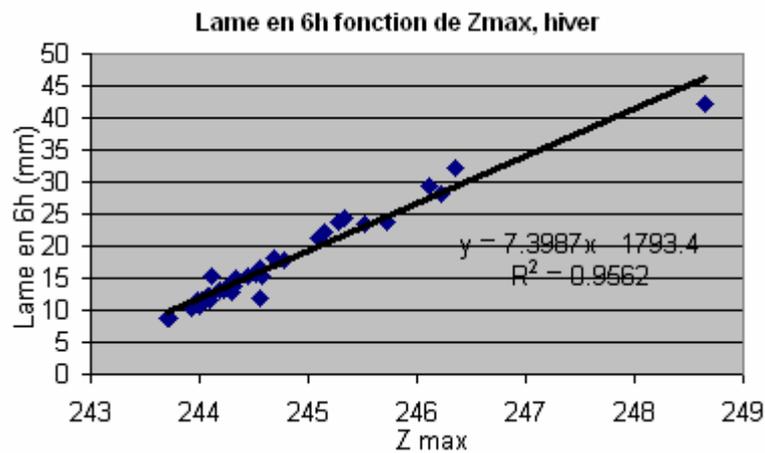
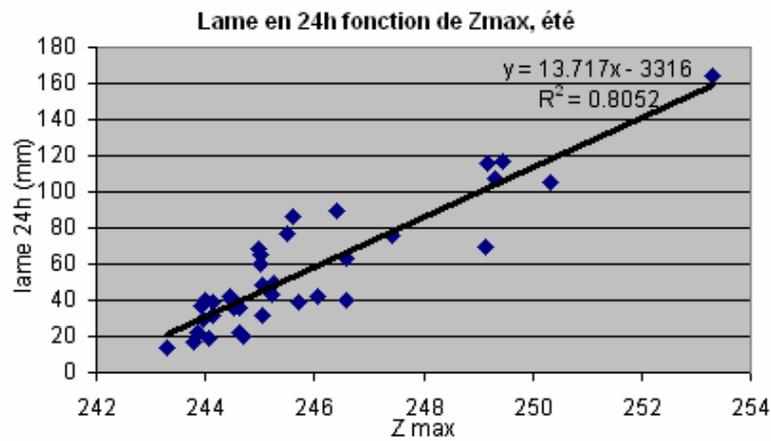
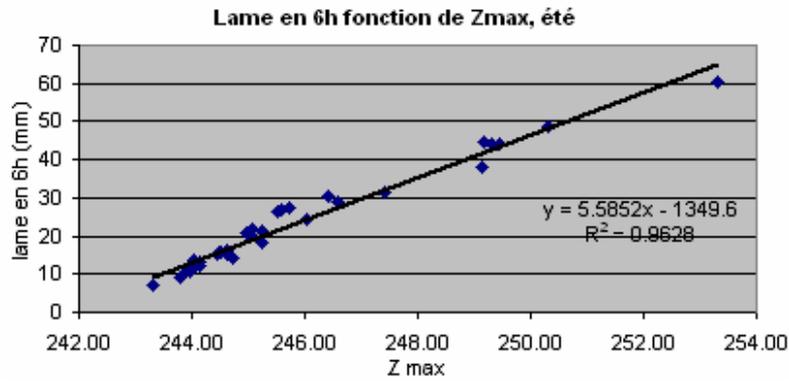
	Cote (m NGF)
Mur anti-vagues	268.2
RN 106	267.7
Tulipe en charge	264.3
Tulipe	261.34

✧ Sénéchas :

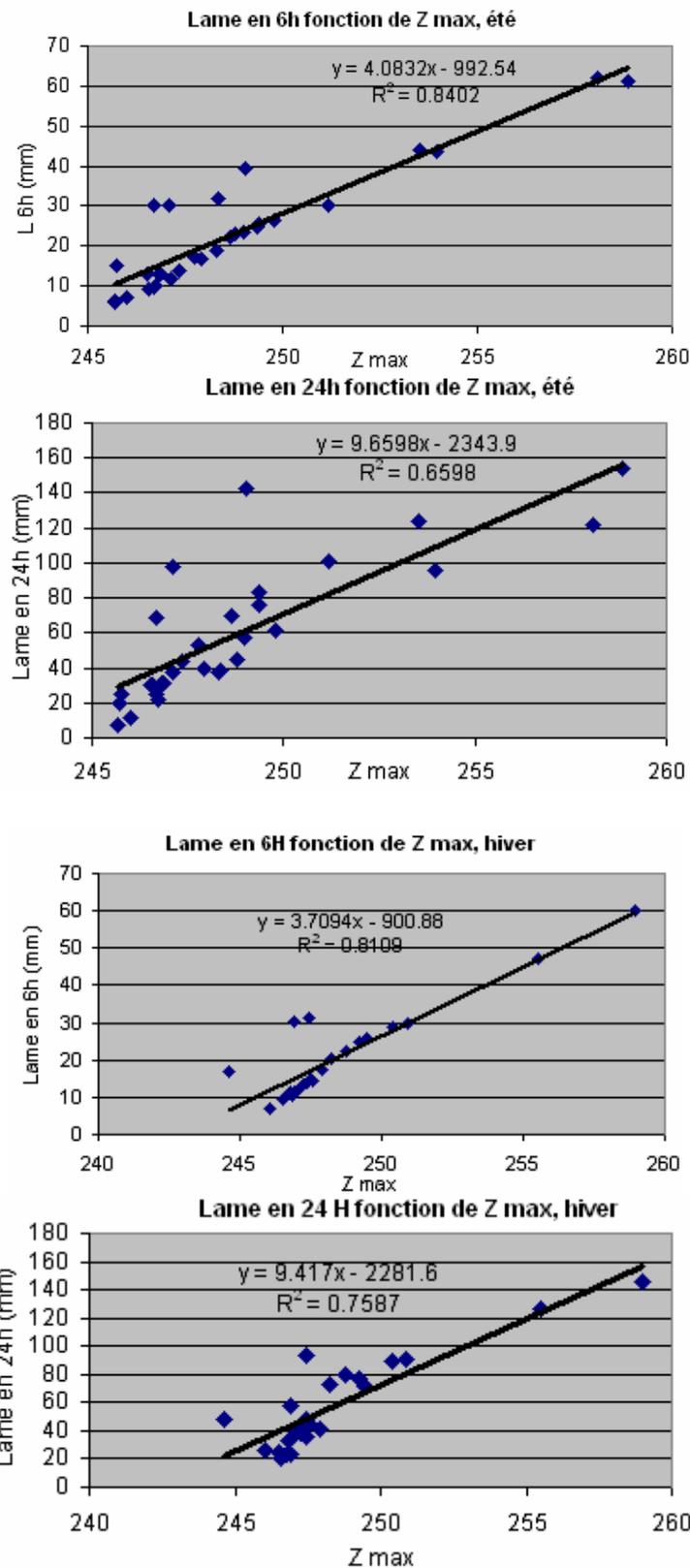
"Observées" ISL		SHYPRE		SHYPRE étude 2008	
T(an)	Z max (m NGF)	T(an)	Z max (m NGF)	T(an)	Z max (mNGF)
68.000	263	10000.000	271.16	5000.000	271.47
22.667	258.96	3333.333	270.28	1666.667	270.50
13.600	258.85	2000.000	269.97	1000.000	270.11
9.714	258.1	1428.571	269.75	714.286	269.87
7.556	255.5	1111.111	269.57	555.556	269.70
6.182	254.74	909.091	269.42	454.545	269.54
5.231	254	769.231	269.29	384.615	269.44
4.533	253.96	666.667	269.16	333.333	269.34
4.000	253.54	588.235	269.06	294.118	269.24
3.579	251.19	526.316	268.99	263.158	269.15
3.238	250.89	476.190	268.92	238.095	269.07
2.957	250.42	400.000	268.79	200.000	268.94
2.720	250.41	344.828	268.68	172.414	268.83
2.519	250.4	303.030	268.57	151.515	268.73
2.345	249.77	256.410	268.43	128.205	268.62
2.194	249.48	222.222	268.31	111.111	268.50
2.061	249.37	188.679	268.19	94.340	268.38
1.943	249.34	158.730	268.04	79.365	268.25
1.838	249.3	133.333	267.87	66.667	268.12
1.744	249.23	112.360	267.67	56.180	267.98
1.659	249.03	95.238	267.45	47.619	267.82
1.581	248.99	80.000	267.15	40.000	267.62
1.511	248.78	67.114	266.81	33.557	267.39
1.447	248.77	56.497	266.36	28.249	267.09
1.388	248.7	47.393	265.55	23.697	266.75
1.333	248.68	39.841	264.50	19.920	266.23
1.283	248.65	33.445	263.41	16.722	265.25
1.236	248.34	28.011	262.33	14.006	264.11
1.193	248.31	23.529	261.31	11.765	262.97
1.153	248.3	19.724	260.29	9.862	261.81
1.115	248.23	16.529	259.31	8.264	260.64
1.079	248	13.831	258.34	6.916	259.45
1.046	247.9	11.587	257.40	5.794	258.32
1.015	247.89	9.699	256.51	4.850	257.17
		8.123	255.63	4.062	256.06
263	Valeur réintégrée	6.798	254.78	3.399	254.99
		5.692	253.97	2.846	253.97
		4.764	253.20	2.382	253.02
		3.989	252.46	1.994	252.13
		3.339	251.76	1.669	251.30
		2.794	251.09	1.397	250.54
		2.338	250.47	1.169	249.85
		1.957	249.89	0.978	249.22
		1.637	249.34	0.819	248.67
		1.370	248.84	0.685	248.19
		1.147	248.39	0.573	247.79
		0.960	248.00	0.480	247.49

2 - Régressions lame d'eau en fonction de la cote max

✧ Ste Cécile :



✧ **Sénéchas :**



15 ANNEXE 7 : CALCUL DES DISTRIBUTIONS DE
FREQUENCE DES COTES DU PLAN D'EAU DU
BARRAGE DE SAINTE CECILE D'ANDORGE SUR
2 PERIODES « TRAVAUX » PAR LA METHODE
SHYPRE – RAPPORT PROVISOIRE – V1 –
HYDRIS HYDROLOGIE – MAI 2013 [4]

CG 30

**Calcul des distributions de fréquence des
cotes du plan d'eau du barrage de Ste
Cécile d'Andorge sur 2 périodes
« travaux » par la méthode SHYPRE**

Rapport provisoire-V1

28 mai 2013

Jean-Alain FINE

HYDRIS *hydrologie*

Sommaire

Introduction	3
1 Rappel des résultats de l'étude « Actualisation de l'hydrologie des barrages de classe A du département du Gard par la méthode SHYPRE » pour le barrage de Sainte Cécile d'Andorge	3
2 Analyse mensuelle des variables de SHYPRE du bassin versant du barrage de Ste Cécile.....	4
3 Application de SHYPRE sur les 2 périodes « travaux » du barrage de Ste Cécile.....	8
Conclusion	10

Introduction

L'étude menée en 2008 par HYDRIS-hydrologie (pour la méthode SHYPRE) et BRLi sur 5 barrages écrêteurs de crue du département Gard a conclu au sous dimensionnement de l'évacuateur de crue du barrage de Sainte Cécile d'Andorge.

Suite à cette conclusion, dans le cadre de l'étude de l'aménagement de cet évacuateur de crue menée actuellement par ISL, le CG 30 a commandé à HYDRIS-hydrologie l'étude : « Actualisation de l'hydrologie des barrages de classe A du département du Gard par la méthode SHYPRE ». Cette étude a permis d'aboutir, par la prise en compte des nouvelles données (volumes des crues observées reconstitués, nouveaux levés topographiques, nouvelle surface de bassin versant) et des dernières avancées méthodologiques, à l'actualisation de la distribution de fréquence des cotes du plan d'eau du barrage de Ste Cécile.

Cependant, afin de ne pas augmenter le risque de surverse durant la période des travaux, le CG 30 a également commandé à HYDRIS-hydrologie la présente étude afin de calculer par la méthode SHYPRE **les distributions de fréquence des cotes du plan d'eau du barrage de Ste Cécile sur 2 périodes potentielles de travaux fixées par ISL :**

- **De janvier à août**
- **Juin et juillet**

1 Rappel des résultats de l'étude « Actualisation de l'hydrologie des barrages de classe A du département du Gard par la méthode SHYPRE » pour le barrage de Sainte Cécile d'Andorge

Cette étude porte sur l'actualisation du calcul de la distribution de fréquence des cotes du plan d'eau des barrages de classe A (Sénéchas et Sainte Cécile d'Andorge) par la méthode SHYPRE en prenant en compte **un recalage de la méthode SHYPRE sur les distributions de fréquence des débits observés en 6h et 24h** élaborées par ISL en reconstituant les volumes des crues observées à partir des cotes du plan d'eau du barrage observées de 1976 à 2012 (37 années d'observation). Cette actualisation prend également en compte les nouveaux levés topographiques, une nouvelle surface de bassin versant et des dernières avancées méthodologiques de SHYPRE.

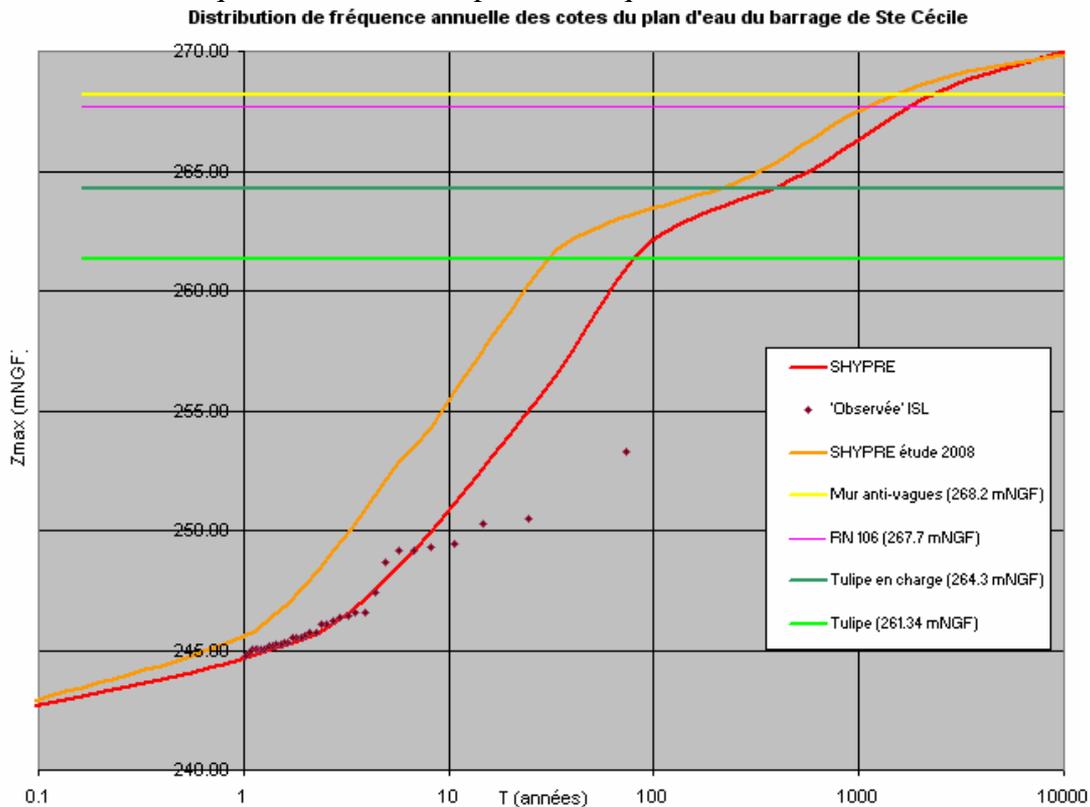
Le recalage porte sur le paramètre de production $S0/A$ (Taux de remplissage (S) initiale (0) du réservoir de production (A)) du modèle pluie-débit conceptuel GRs, compris entre 0 et 1 et représentant l'état de saturation hydrique du bassin versant.

La méthode SHYPRE comporte 2 saisons hydrologiques : « été » (de juin à novembre) et « hiver » (de décembre à mai), il y a donc 2 paramètres de production à caler : $S0/A_{\text{été}}$ et $S0/A_{\text{hiver}}$.

Chacun de ces 2 paramètres est calé pour obtenir par SHYPRE, pour la saison considérée, une distribution de fréquence des lames d'eau en 6h et 24h proche de la distribution de fréquence « observée ».

Les valeurs obtenues sont :
S0/A hiver = 0.74
S0/A été = 0.70

La distribution de fréquence des cotes du plan d'eau qui est résulte est tracée ci-dessous :



Les distributions SHYPRE sont en accord avec les distributions « observées » sur la partie stable de celles-ci (au dessous de 10 ans). Ceci valide la cohérence de la méthode.

La cote du plan d'eau de période de retour 10 000ans est :

$$Z_{10000} = 270.00 \text{ mNGF} \quad (Z_{10000} \text{ étude 2008} = 269.89 \text{ mNGF})$$

La période de retour de déversement sur la RN 106 est de **1775 ans**. (800 ans dans l'étude 2008)

Les valeurs numériques de ces courbes sont fournies dans le tableau 5 en fin de rapport.

2 Analyse mensuelle des variables de SHYPRE du bassin versant du barrage de Ste Cécile

La méthode SHYPRE comporte 2 saisons hydrologiques :

- Saison 1 : de décembre à mai (nommée « hiver »)
- Saison 2 : de juin à novembre (nommée « été »)

Afin de modifier ce découpage de l'année pour appliquer SHYPRE sur les 2 périodes potentielles de travaux fixées par ISL (De janvier à août et Juin-juillet), il est nécessaire de redéfinir ces 2 saisons de la façon suivante :

Période janvier-août :

- Saison 1 : de janvier à mai
- Saison 2 : de juin à août

Période juin-juillet :

- Saison 1 : sans objet
- Saison 2 : juin et juillet

Afin de définir les variables de SHYPRE de chacune des saisons de ces nouvelles périodes, il est alors nécessaire d'analyser mensuellement ces variables :

Variables du générateur de pluie :

Le générateur de pluie de SHYPRE comporte 3 variables :

- NE : le nombre moyen d'événement (en jour)
- PJmax : la moyenne des pluies journalières maximales de chaque événement
- Dtot : la durée moyenne de chaque événement.

Ces 3 variables sont ici calculées, à partir de la « station journalière de bassin » (Station fictive calculée par BRLi par la méthode des polygones de Thiessen à partir des stations du bassin versant : Collet-de-Dèze, Cassagnas et Sainte-Cécile), pour chaque mois de l'année :

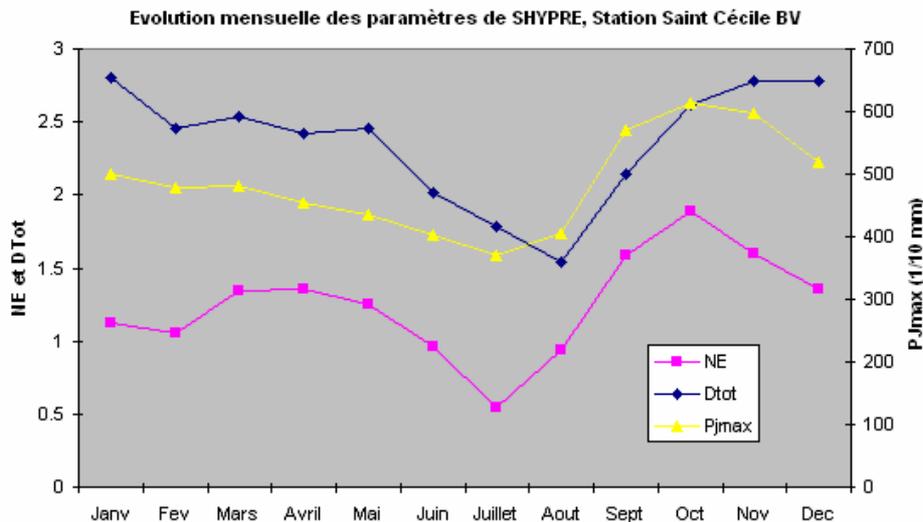


Figure 2

	NE	Dtot	Pjmax
Janv	1.12	2.8	499.15
Fev	1.05	2.45	479.03
Mars	1.34	2.54	481.52
Avril	1.36	2.42	455.39
Mai	1.25	2.45	434.95
Juin	0.96	2.02	403.2
Juillet	0.55	1.78	369.8
Aout	0.94	1.54	404.91
Sept	1.59	2.14	570.3
Oct	1.89	2.62	614.47
Nov	1.6	2.78	596.72
Dec	1.35	2.78	518.16

Tableau 1

Ces valeurs mensuelles sont ensuite recomposées pour obtenir les valeurs de chacune des saisons de la période étudiée :

Période	NE		Dtot		Pjmax	
	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2
Année	7.50	7.50	2.60	2.30	477.90	530.50
Janvier-aout	6.12	2.45	2.53	1.78	469	396.36
Juin-juillet		1.51		1.93		391.03

Tableau 2

Paramètre du modèle pluie-débit

Le paramètre du modèle pluie-débit de SHYPRE (GRs horaire) est le paramètre de production S0/A qui correspond au taux de remplissage initial du réservoir de production du modèle GR. Ce paramètre est un paramètre de calage.

Pour appréhender sa valeur sur chacune des saisons des nouvelles périodes étudiées, nous avons utilisé les valeurs mensuelles du paramètre Sclim (S/A climatique, S/A étant le taux de remplissage du réservoir de production du modèle GR) :

Les chroniques de Sclim sont les valeurs de S/A obtenues en faisant fonctionner en continu le module de production du modèle GR journalier, à partir des chroniques de pluie et d'ETP fournies par SAFRAN. Ces valeurs sont calculées sur la maille des données SAFRAN (8 km x 8 km) puis intégrées sur chaque bassin versant.

Des chroniques journalières de Sclim ont été calculées sur une dizaine d'années depuis le 1er août 1995 dans l'étude « Développement de la méthode AIGA version 2, étude de l'initialisation d'une version dégradée d'AIGA sur 1039 bassins versants français », Patrick Arnaud, Cemagref, décembre 2008.

Les valeurs mensuelles moyennes de Sclim découlant de ces chroniques pour le bassin versant du barrage de Saint Cécile sont décrites par le graphe et le tableau suivant :

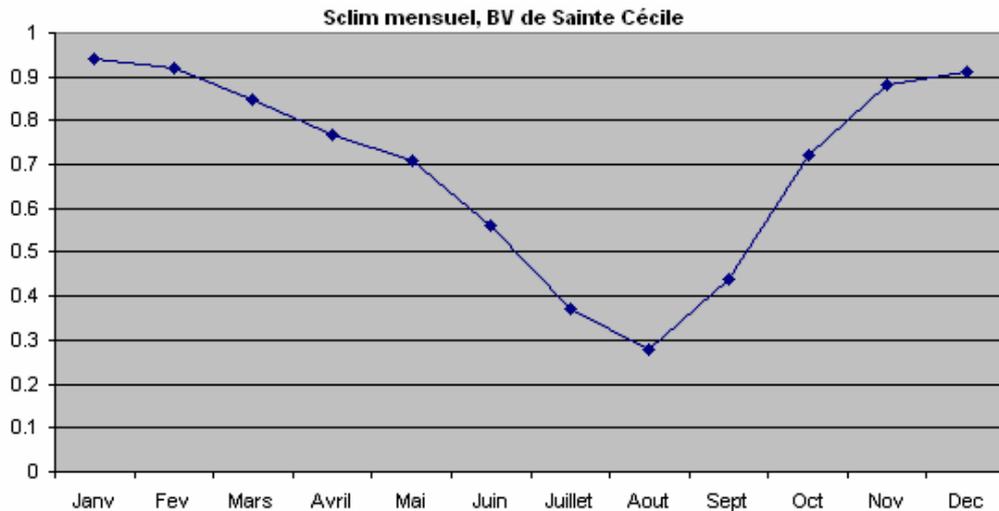


Figure 3

	Sclim
Janv	0.94
Fev	0.92
Mars	0.85
Avril	0.77
Mai	0.71
Juin	0.56
Juillet	0.37
Aout	0.28
Sept	0.44
Oct	0.72
Nov	0.88
Dec	0.91

Tableau 3

A partir de ces Sclim mensuels et des valeurs mensuelles de NE, la valeur du Sclim de chacune des saisons des périodes étudiées est calculée en calculant la moyenne des Sclim mensuel pondérée par NE mensuel :

Saison	Sclim
été : Juin-novembre	0.59
hiver : Décembre-mai	0.85
Janvier-mai	0.83
Juin-juillet	0.49
Juin-août	0.41

Tableau 4

La valeur de $S0/A$ de chacune des saisons des nouvelles périodes étudiées est alors définie de la façon suivante ($S0/A_{\text{hiver}}$ et $S0/A_{\text{été}}$ étant les valeurs calées précédemment : 0.74 et 0.70):

Période janvier-août :

- $S0/A_{\text{janvier-mai}} = S0/A_{\text{hiver}} \times (Sclim_{\text{janvier-mai}} / Sclim_{\text{hiver}}) = 0.73$
- $S0/A_{\text{juin-août}} = S0/A_{\text{été}} \times (Sclim_{\text{juin-août}} / Sclim_{\text{été}}) = 0.48$

Période juin-juillet :

- $S0/A_{\text{juin-juillet}} = S0/A_{\text{été}} \times (S_{\text{clim}}_{\text{juin-juillet}} / S_{\text{clim}}_{\text{été}}) = 0.58$

3 Application de SHYPRE sur les 2 périodes « travaux » du barrage de Ste Cécile

A partir de ce recalage de SHYPRE et de l'analyse mensuelle de ces variables, SHYPRE est appliqué sur les 2 périodes « travaux » proposées par ISL :

- De janvier à août
- Juin et juillet

Pour ces 2 périodes travaux, la distribution de fréquence des cotes du plan d'eau SHYPRE est alors comparée à la distribution de fréquence des cotes du plan d'eau « observées » élaborée par ISL à partir de 37 années d'observation des cotes du plan d'eau du barrage :

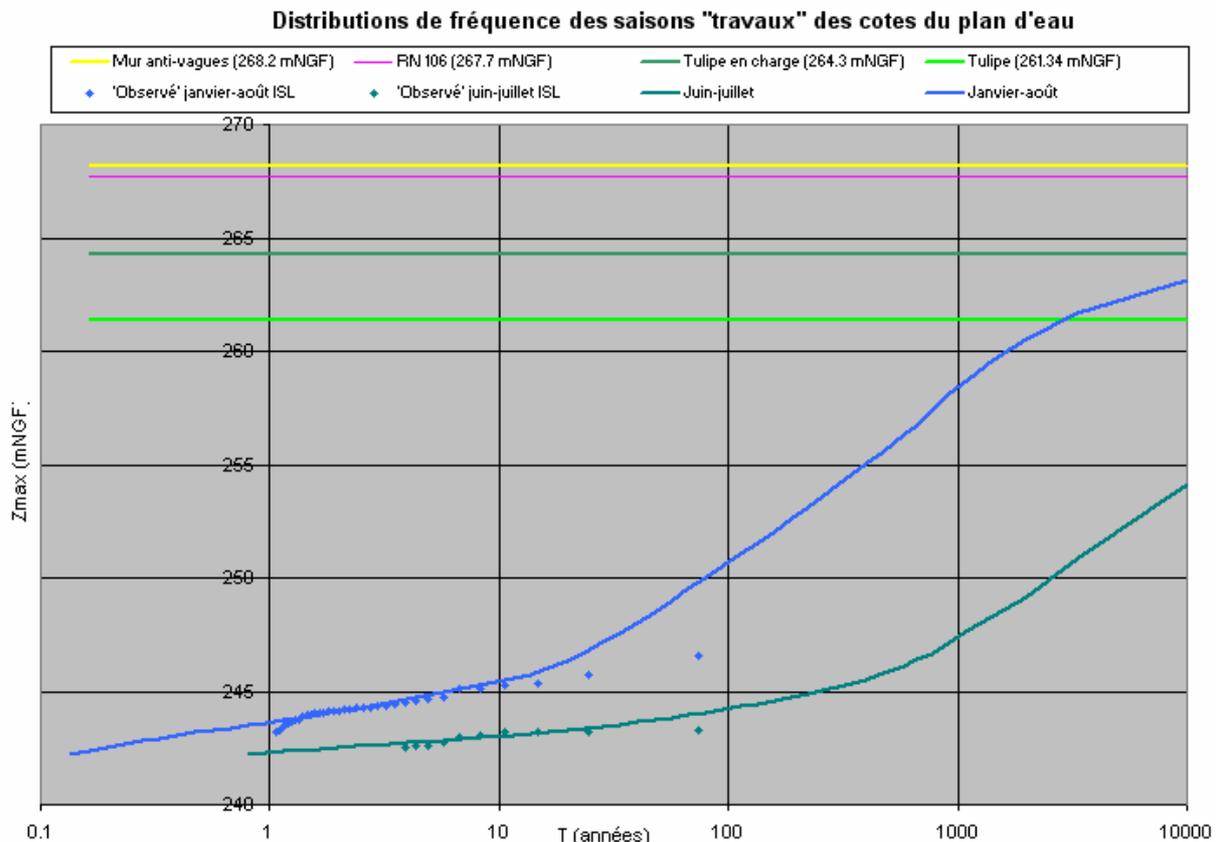


Figure 4

Les distributions SHYPRE sont en accord avec les distributions « observées » sur la partie stable de celles-ci (au dessous de 10 ans). Ceci valide la cohérence de la méthode.

Les cotes du plan d'eau pour la période de retour de déversement sur la RN 106 (1775 ans) sont de :

- De janvier à août : 260.3 mNGF
- Juin et juillet : 248.9 mNGF

Ces cotes constituent les cotes minimales de la digue du barrage à adopter pendant la période des travaux associée pour ne pas augmenter le risque actuel de surverse.

Les valeurs numériques de ces courbes sont fournies dans le tableau ci dessous :

Distributions "observées" ISL				SHYPRE				SHYPRE étude 2008
T(an)	Année	Juin-juillet	Janvier-août	T(an)	Année	Juin-juillet	Janvier-août	Année
74.000	253.3	243.32	246.6	10000.000	269.99	254.12	263.10	269.89
24.667	250.5	243.24	245.73	3333.333	268.84	250.82	261.66	269.14
14.800	250.31	243.18	245.33	2000.000	267.96	249.19	260.56	268.61
10.571	249.46	243.18	245.28	1428.571	267.23	248.30	259.65	268.14
8.222	249.3	243.06	245.15	1111.111	266.59	247.68	258.75	267.70
6.727	249.17	243	245.1	909.091	266.09	247.12	258.07	267.33
5.692	249.13	242.71	244.71	769.231	265.64	246.64	257.40	266.99
4.933	248.64	242.61	244.68	666.667	265.30	246.39	256.75	266.66
4.353	247.41	242.58	244.58	588.235	265.05	246.14	256.34	266.32
3.895	246.6	242.53	244.52	526.316	264.82	245.95	255.92	266.06
3.524	246.57		244.44	476.190	264.65	245.78	255.58	265.82
3.217	246.4		244.34	400.000	264.35	245.52	255.06	265.42
2.960	246.35		244.32	344.828	264.12	245.34	254.56	265.09
2.741	246.23		244.31	303.030	263.97	245.21	254.15	264.80
2.552	246.11		244.3	256.410	263.76	245.04	253.59	264.54
2.387	246.05		244.3	222.222	263.57	244.90	253.11	264.33
2.242	245.73		244.22	188.679	263.35	244.75	252.61	264.14
2.114	245.72		244.19	158.730	263.09	244.60	252.07	263.95
2.000	245.59		244.12	133.333	262.81	244.45	251.55	263.77
1.897	245.51		244.1	112.360	262.45	244.32	251.03	263.59
1.805	245.51		244.1	95.238	262.02	244.19	250.53	263.41
1.721	245.49		244.08	80.000	261.39	244.07	250.02	263.22
1.644	245.33		244.06	67.114	260.49	243.95	249.51	262.99
1.574	245.28		244.02	56.497	259.53	243.84	249.01	262.75
1.510	245.25		244	47.393	258.51	243.74	248.51	262.46
1.451	245.23		243.99	39.841	257.46	243.64	248.03	262.14
1.396	245.15		243.93	33.445	256.44	243.54	247.57	261.66
1.345	245.15		243.72	28.011	255.61	243.45	247.14	260.91
1.298	245.1		243.71	23.529	254.83	243.36	246.74	260.04
1.254	245.06		243.68	19.724	253.99	243.29	246.36	259.09
1.213	245.05		243.62	16.529	253.12	243.21	246.03	258.15
1.175	245.03		243.6	13.831	252.29	243.14	245.74	257.17
1.138	245.02		243.46	11.587	251.49	243.07	245.57	256.21
1.104	244.98		243.32	9.699	250.70	243.01	245.41	255.22
1.072	244.85		243.18	8.123	249.94	242.94	245.26	254.24
1.042	244.77			6.798	249.20	242.88	245.10	253.52
1.014	244.71			5.692	248.50	242.83	244.95	252.87
				4.764	247.84	242.77	244.80	251.92
250.5	Valeur réintégrée			3.989	247.21	242.72	244.65	250.98

Tableau 5

Conclusion

L'application de la méthode SHYPRE, calée sur les distributions de fréquence des débits observés en 6h et 24h élaborées par ISL en reconstituant les volumes des crues observées à partir des cotes du plan d'eau du barrage observées de 1976 à 2012 (37 années d'observation), sur les 2 périodes « travaux » proposées par ISL (de janvier à août et de Juin à juillet) permet de définir les cotes minimales de la digue du barrage à adopter pendant ces périodes de travaux pour ne pas augmenter le risque actuel de surverse (période de retour de déversement sur la RN 106 de 1775 ans) :

- De janvier à août : 260.3 mNGF
- Juin et juillet : 248.9 mNGF