Design Hydraulique & Energie

ETABLISSEMENT PUBLIC LOIRE

UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de Développement Régional

L'EUROPE s'engage sur le bassin de la Loire avec le FEDER

« Cette opération est cofinancée par l'Union Européenne. L'Europe s'engage sur le bassin de la Loire avec le Fonds Européen de Développement Régional. »

agence de l'eau Loire-Bretagne
Établissement public du ministère chargé du développement durable

PHASE 3 :

Elaboration d'une stratégie d'adaptation du mode de gestion du barrage de Villerest

Etude d'adaptation du mode de gestion du barrage de Villerest sous l'effet du changement climatique

Date	15/04/2016
Réalisation	Olivier SONNET
Secteur	ETABLISSEMENT PUBLIC DE LA LOIRE
Modification	V3

Design Hydraulique & Energie
14 rue d'Aix 13510 EGUILLES
Email : sonnetolivier@neuf.fr
Tel/Fax : +33 (0)4-88-05-39-92
Mobile : +33 (0)6-64-97-03-91

Etude d'adaptation du mode de gestion du barrage de Villerest sous l'effet du changement climatique	Etablissement Public Loire
	Changement Climatique

Création - Modifications

Indice	Auteur(s)			Vérificateur(s)			Approbateur(s)		
	Nom	Visa	Date	Nom	Visa	Date	Nom	Visa	Date
V1	SONNET	X	15/04/2016						
V2	SONNET	X	20/04/2016						
V3	SONNET	X	03/05/2016						

Historique des modifications

Indice	Date	Paragraphes modifiés / Objet
V2	20/04/2016	Prise en compte des remarques de l'EPTB Loire.
V3	03/05/2016	Modifications courbes de gestion.

Diffusion

Destinataire(s)	Nb
ETABLISSEMENT PUBLIC LOIRE	1

SOMMAIRE

1 PREAMBULE 4

2 RAPPELS DES PRINCIPAUX POINTS A CONSIDERER POUR LA GESTION DU BARRAGE 6

2.1 LES PRINCIPALES TENDANCES LIEES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE 6

2.2 LES BESOINS EN SOUTIEN D'ETIAGE 7

2.3 LA GESTION ACTUELLE 9

3 TEST N°1 : TRAVAIL AUTOUR DE LA COURBE DE GESTION ACTUELLE – COURBES A1 12

4 TEST N°2 : COTE DE REMPLISSAGE A 316.30MNGF – COURBES A2 21

5 TEST N°3 : RECHERCHE DU GAIN MAXIMAL POUR LE SOUTIEN D'ETIAGE – COURBES A3 31

5.1 EXPLOITATION DU MODELE TYPE SCC AVEC LES REGLES DE BASCULEMENT ENTRE VILLEREST ET NAUSSAC 31

5.2 EXPLOITATION DU MODELE TYPE SCB SANS APPORTS DE NAUSSAC 40

6 CONCLUSIONS 42

Table des illustrations

Figure 1 : Besoin moyen en soutien d'étiage à Gien pour les différents GCMs 8
Figure 2 : Principales crues historiques vs courbe de gestion sur le barrage de Villerest 9
Figure 3 : Débits maxima journaliers annuels sur la période 1961-2000 (Temps Présent) vs courbe de gestion sur le barrage de Villerest 10
Figure 4 : Débits maxima journaliers annuels sur la période 2046-2065 (Milieu du Siècle) vs courbe de gestion sur le barrage de Villerest 10
Figure 5 : Courbe de gestion A1 13
Figure 6 : Courbe de gestion A1bis 14
Figure 7 : Courbe de gestion A1ter 14
Figure 8 : Courbe de gestion A1quater 15
Figure 9 : Courbe de gestion A1quinter 15
Figure 10 : Synthèse des courbes de gestion testées du type A1 16
Figure 11 : Z moyen (A1) 17
Figure 12 : Z moyen (A1bis) 18
Figure 13 : Z moyen (A1ter) 18
Figure 14 : Z moyen (A1quater) 19
Figure 15 : Z moyen (A1quinter) 19
Figure 16 : Z moyen barrage de Villerest (A1, A1bis, A1ter, A1quater et A1quinter) pour des années type 1989, 1990, 2003 et 2011 20
Figure 17 : Courbe de gestion A2 22

Figure 18 : Courbe de gestion A2bis 23
Figure 19 : Courbe de gestion A2ter 23
Figure 20 : Courbe de gestion A2quater 24
Figure 21 : Courbe de gestion A2quinter 24
Figure 22 : Synthèse des courbes de gestion testées du type A2 25
Figure 23 : Z moyen (A2) 27
Figure 24 : Z moyen (A2bis) 27
Figure 25 : Z moyen (A2ter) 28
Figure 26 : Z moyen (A2quater) 28
Figure 27 : Z moyen (A2quinter) 29
Figure 28 : Z moyen barrage de Villerest (A2, A2bis, A2ter, A2quater et A2quinter) pour des années type 1989, 1990, 2003 et 2011 30
Figure 29 : Courbe de gestion A3 33
Figure 30 : Courbe de gestion A3bis 33
Figure 31 : Courbe de gestion A3ter 34
Figure 32 : Courbe de gestion A1quater 34
Figure 33 : Synthèse des courbes de gestion testées du type A3 35
Figure 34 : Z moyen (A3) 36
Figure 35 : Z moyen (A3bis) 37
Figure 36 : Z moyen (A3ter) 37
Figure 37 : Z moyen (A3quater) 38
Figure 38 : Z moyen dans le barrage de Villerest (A3, A3bis, A3ter, A3quater) pour des années type 1989, 1990, 2003 et 2011 39
Figure 39 : Z moyen (scC A3 et scB A3) 40
Tableau 40 : Tableau de synthèse des résultats obtenus avec les différentes de courbes de gestion de type A1, A2 et A3 44

1 PREAMBULE

Le présent rapport s'intéressera à la phase 3, et cherche à élaborer une stratégie d'adaptation de la gestion du barrage de Villerest pour limiter les impacts du changement climatique.

Les objectifs

Pour cette troisième phase de l'étude, nous avons donc travaillé sur les cotes de gestion, en recherchant des adaptations en lien avec :

- d'une part les évolutions des périodes à risque de crue attendues,
- et d'autre part l'augmentation des besoins en eau pour le soutien d'étiage à Gien.

La méthode de travail

Pour ce faire, nous allons donc exploiter les scénarios de type scC1 en modifiant les règles de gestion et en cherchant donc à améliorer les principaux indicateurs de performance du barrage de Villerest, et tout particulièrement le volume fourni par Villerest pour le soutien d'étiage à Gien.

Nota : rappelons que le modèle scC du barrage de Villerest intègre un apport de Naussac qui aujourd'hui n'est pas limité et qui est probablement parfois bien supérieur aux réelles capacités du barrage. Ce point devra être amélioré dans le cadre d'une simulation en parallèle des 2 barrages.

Dans un premier temps, 2 modes d'adaptation sont testés au travers :

- des scénarios de type A1, *travaillant autour de la courbe de gestion actuelle* tout en préservant notamment la cote de remplissage actuelle et les autres valeurs à atteindre.
- et des scénarios de type A2, pour lesquels la cote de remplissage est relevée d'1m à 316.30mNGF.

Dans un second temps, nous avons testé des *scénarios de type A3,* qui feront abstraction des contraintes d'usage présentes sur le barrage et des règles de sécurité existantes pour la gestion des crues. Il s'agit tout simplement de quantifier le gain maximum envisageable en termes de volume pour le soutien d'étiage. Cette évaluation a été réalisée en fixant la cote de remplissage de 319mNGF pour tenir compte du risque de vagues.

2 RAPPELS DES PRINCIPAUX POINTS A CONSIDERER POUR LA GESTION DU BARRAGE

2.1 LES PRINCIPALES TENDANCES LIEES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Tout d'abord, rappelons les principales tendances du changement climatique analysées notamment dans le rapport de phase 1, et qui vont impacter les choix des modes de gestion.

1) Concernant les crues, « la Loire amont présenterait moins d'épisodes automnaux et il y aurait un glissement des pluies fortes vers l'hiver ». Les projections du Milieu du Siècle tendent ainsi à redistribuer les maximal annuels sur la période hivernale avec une augmentation de la fréquence des crues sur les mois de janvier à mars.
   - ⇨ Le relèvement du seuil à 304mNGF sur la période automnale, qui intègre aujourd'hui le risque de crue lié notamment aux 2 plus fortes crues historiques sur ce secteur à savoir les crues d'octobre 1846 et septembre 1866, paraît ainsi une option à tester. *Il s'agira d'analyser l'effet du décalage et du relèvement de ce seuil sur les capacités à soutenir le DOE à Gien.*

2) La baisse des écoulements annuels et mensuels est relativement marquée, nécessitant un soutien d'étiage plus important à Gien, et notamment de la part du barrage de Villerest.
   - ⇨ On comprend bien dès lors que seul un stock plus important dans le barrage au démarrage de la période de soutien d'étiage permettra d'améliorer la capacité du barrage de Villerest à soutenir les débits à Gien.

     Ainsi, nous avons cherché à évaluer le gain maximal envisageable en testant un scénario de gestion « volontairement idéal » vis-à-vis du soutien d'étiage. *La cote maximale envisageable doit prendre en compte une revanche vis-à-vis des effets du vent sur le plan d'eau. Une évaluation de la hauteur de la vague pouvant être engendrée sur la retenue de Villerest a été réalisée dans le cadre du dossier « Etude de dangers – Barrage de Villerest », à partir de la formule de Smith :*
     - *0.88m pour un vent de période de retour 50 ans.*
     - *1.17 pour un vent de période de retour 1000 ans.*
   - ⇨ Nous avons retenu par la suite une revanche de sécurité de 1m. Le déversoir étant calé à 320mNGF, on envisagera donc une cote maximale à 319mNGF. *Le différentiel de volume de remplissage entre 315mNGF et 319mNGF, est de l'ordre de +35 millions de m^3.*

2.2 LES BESOINS EN SOUTIEN D'ETIAGE

A partir des débits naturels à Gien impactés par les différentes évolutions saisonnières des GCMs, une évaluation des besoins en eau pour le soutien d'étiage a été réalisée.

⇨ Ce calcul a été effectué en comparant le débit naturel avec les 2 hypothèses de DOE à Gien, à savoir 60 ou 50 m^3/s.

	DOE = 60 m^3/s	DOE = 50 m^3/s
Actuel	**82 742 431**	**42 077 483**
ccma_cgcm3	289 349 674	192 947 600
cnrm_cm3	243 197 547	151 240 375
csiro_mk3	149 041 740	83 086 276
gfdl_cm2	304 628 382	211 921 048
giss_aom	301 478 738	203 934 412
giss_model	272 153 492	173 213 214
ingv_echam4	163 866 611	93 879 028
ipsl_cm4	233 039 279	144 258 506
miroc3_2_medres	285 407 879	188 734 176
miub_echo	265 800 717	173 686 805
mpi_echam	234 322 855	148 970 438
mri_cgcm	148 525 586	85 782 884
ncar_ccsm	311 457 092	205 536 374
Min	148 525 586	83 086 276
Max	311 457 092	211 921 048
Moyenne	**246 328 430**	**158 245 472**

Pour un DOE = 60m^3/s à Gien, on estime ainsi un besoin moyen en soutien d'étiage de 246.3 millions de m^3, soit un besoin complémentaire par rapport à l'état actuel de +163.6 millions de m^3.

Pour un DOE = 50 m^3/s à Gien, on estime ainsi un besoin moyen en soutien d'étiage de 158.2 millions de m^3, soit un besoin complémentaire par rapport à l'état actuel de +158.2 millions de m^3.

Le scénario climatique le plus critique selon l'hypothèse du DOE serait :

- ncar_ccsm pour un DOE de 60 m^3/s,
- gfdl_cm2 pour un DOE de 50 m^3/s.

Il est également intéressant d'analyser l'évolution des besoins moyens sur l'année. Le graphique suivant présente ainsi la moyenne des besoins en soutien d'étiage calculés à Gien pour chaque GCM :

- Le démarrage de la saison de soutien d'étiage s'opère début mai.
- On notera une baisse assez marquée des besoins entre la mi-octobre et le début du mois de novembre.
- Un second décrochage apparaît ensuite début novembre, marquant la fin de la saison de soutien d'étiage.
- Les besoins moyens deviennent très faibles à partir de début décembre, et restent ainsi quasi inexistants jusqu'au début du mois de mai.

Nota : on notera également la présente d'un pic après la descente de la cote à 304mNGF. Cet effet était déjà visible sur d'autres graphiques, et notamment ceux présentant les évolutions en termes de soutien d'étiage dans l'année (cf. Phase1). Il est vraisemblable que cet effet est artificiel et lié à la chronique des débits reconstitués à Gien, qui traduit un soutien d'étiage plus marqué que dans la réalité.

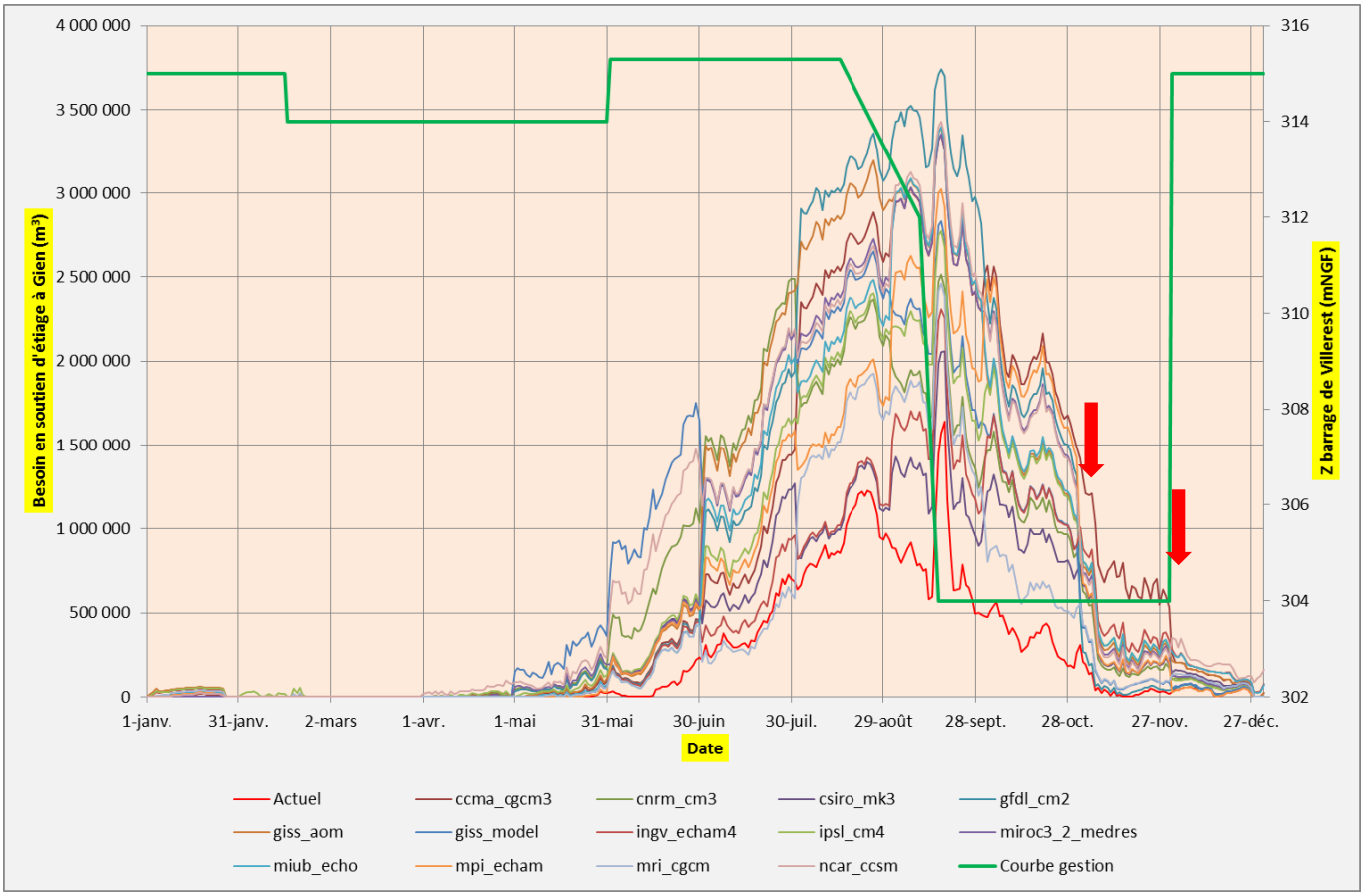

Figure 1 : Besoin moyen en soutien d'étiage à Gien pour les différents GCMs

2.3 LA GESTION ACTUELLE

Nous avons sur le graphique suivant superposé les crues historiques *(source EPTB Loire)* avec la courbe de gestion normale actuellement exploitée sur le barrage de Villerest. La gestion actuelle est marquée par 2 périodes à risque de crue, dont l'une est caractérisée par la survenue des 2 plus fortes crues connues sur l'amont du barrage, à savoir les évènements d'octobre 1846 et de septembre 1866.

> ⇨ Il est évident qu'il sera difficile de faire abstraction de ces 2 crues historiques, malgré une tendance à la concentration du risque de crue sur la période hivernale.

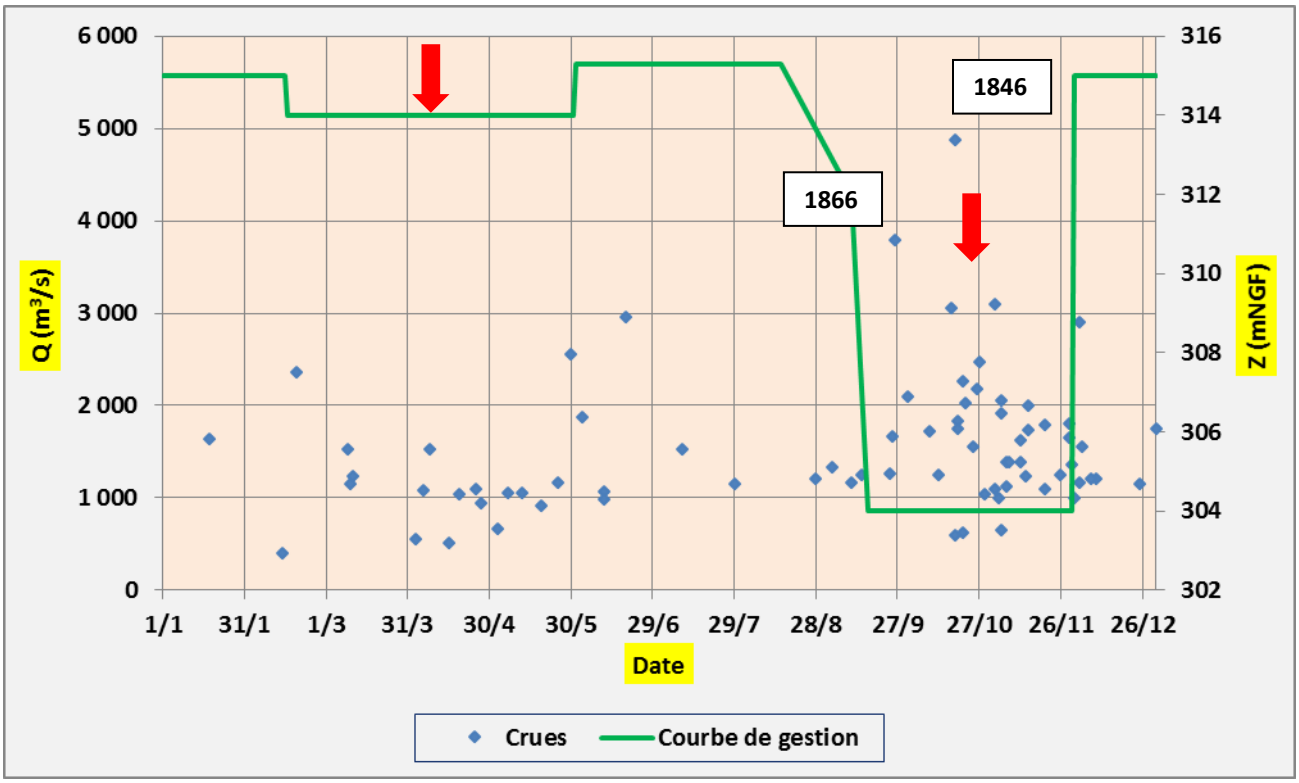

Figure 2 : Principales crues historiques vs courbe de gestion sur le barrage de Villerest

- La baisse à 304mNGF du 16/09 au 30/11 correspond à une période de risque de crue : creux réservé pour les crues d'automne.
- La baisse à 314mNGF du 16/02 au 31/05 correspond à une période de risque de crue également : creux réservé pour les crues de printemps.

Nous avons également superposé les maxima annuels obtenus à partir des chroniques de débit à la station de Bas-en-Basset *(issues des modélisations hydrologiques réalisées dans le projet de recherche ICC-Hydroqual)*, en Temps Présent et en Milieu du Siècle.

⇨ On constate comme évoqué précédemment une disparition des principales crues sur la période du 15 septembre au 30 novembre. Les principaux pics sont concentrés sur les mois de décembre à février.

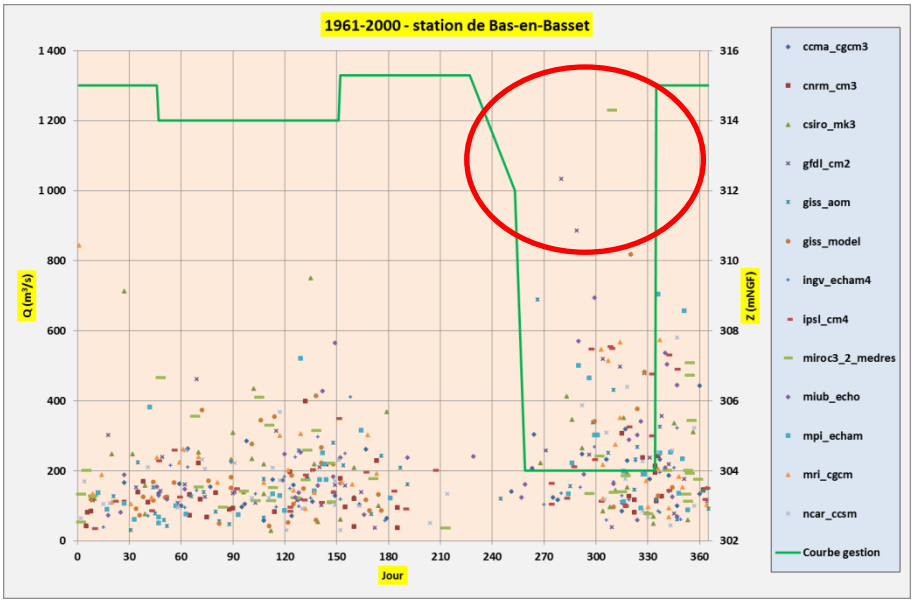

Figure 3 : Débits maxima journaliers annuels sur la période 1961-2000 (Temps Présent) vs courbe de gestion sur le barrage de Villerest

Les crues maximales annuelles issues de l'exploitation des chroniques de débits en Temps Présent sont localisées sur la période automnale, *cette dernière étant identifiée dans la gestion actuelle en fort risque de crue.*

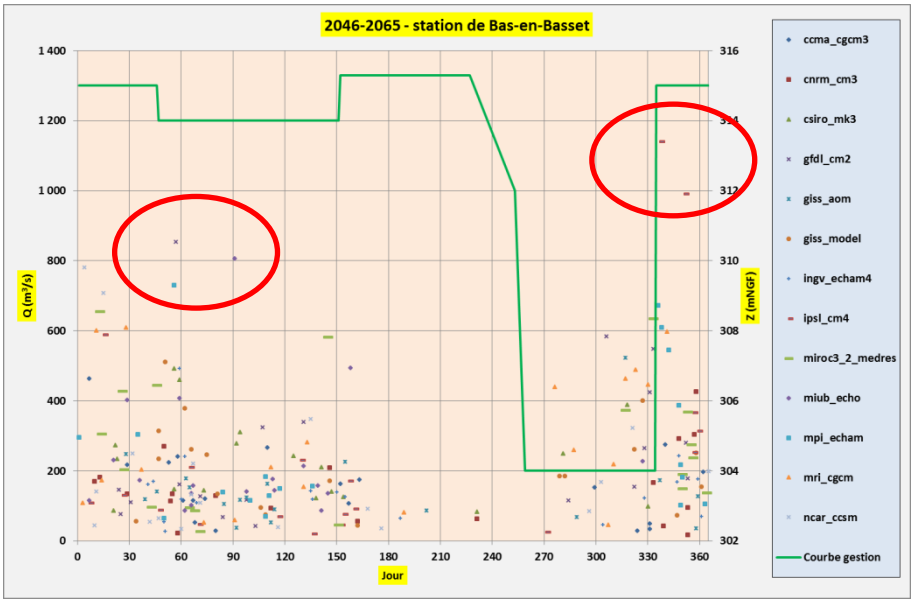

Figure 4 : Débits maxima journaliers annuels sur la période 2046-2065 (Milieu du Siècle) vs courbe de gestion sur le barrage de Villerest

Les crues maximales annuelles issues de l'exploitation des chroniques de débits en Milieu du Siècle sont localisées sur le mois de décembre, *au cours duquel la cote de gestion normale est aujourd'hui fixée à 315mNGF.*

Nota : on notera pour la suite des simulations réalisées, que la règle de passage progressif de 315.3mNGF à 304mNGF a été simplifiée, cette descente progressive ayant pour objectif de limiter les débits sortant de Villerest. En effet, on constatera que des

basculements plus directs sont retenus dans les courbes de gestion testées. Ce choix a été dicté par une simplification des règles de calcul à la vue des nombreux scénarios testés.

- ⇨ *Il est toutefois évident que cette simplification n'a pas vocation à remettre en cause les résultats obtenus pour les différents scénarios testés.*

3 TEST N°1 : TRAVAIL AUTOUR DE LA COURBE DE GESTION ACTUELLE – COURBES A1

Le premier scénario de gestion testé **(A1)** correspond au scénario actuel qui serait décalé, afin d'une part de conserver le stock et favoriser la mobilisation des évènements de début d'automne pour le soutien d'étiage, et d'autre part d'intégrer le risque de crue vers l'hiver, en maintenant la cote à 304mNGF du 01/11 au 31/12.

La cote objectif de 315.3mNGF serait ainsi maintenue jusqu'au 15/10, et on ne passerait à la cote de 304mNGF qu'à partir du 01/11.

⇨ Cette modification permettrait de regagner en moyenne +0.5 millions de m³ pour le soutien d'étiage depuis le barrage de Villerest, avec un maximum pour le GCM csiro_mk3 (+1.6 millions de m³) et un minimum pour le GCM cnrm_cm3 (+9 702 m³).

GCM	Scénario scCC1	ScCC1-A1	Gain en soutien d'étiage depuis Villerest (m³)
ccma_cgcm3	173 169 786	173 930 755	+760 969
cnrm_cm3	158 775 413	158 785 115	+9 702
csiro_mk3	115 721 843	117 299 734	+1 577 891
gfdl_cm2	181 430 529	181 546 311	+115 782
giss_aom	182 031 183	182 244 745	+213 561
giss_model	179 266 621	179 373 786	+107 165
ingv_echam4	124 986 137	126 264 364	+1 278 227
ipsl_cm4	162 740 546	162 970 372	+229 826
microc3_2_medres	180 365 102	180 708 082	+342 980
miub_echo	173 696 073	174 047 673	+351 600
mpi_echam	160 218 137	161 790 928	+1 572 792
mri_cgcm	119 629 211	119 695 999	+66 789
ncar_ccsm	182 760 195	183 230 256	+470 060
Moyenne	**161 137 752**	**161 683 702**	**+545 950**

Une descente plus tardive à 304mNGF **(A1bis)**, avec un maintien par exemple de la cote 315.3mNGF jusqu'au 15/11 ne permettrait pas d'améliorer les performances en termes de soutien d'étiage.

⇨ Aucun volume supplémentaire ne serait mobilisé pour le soutien d'étiage à Gien dans cette configuration.

Il semble de fait qu'il y ait suffisamment d'eau dans le barrage à cette période de l'année, au regard des besoins en soutien d'étiage. Il est à ce titre important de rappeler que les besoins en termes de soutien d'étiage deviennent en moyenne assez faibles à partir du 15 octobre.

⇨ Le décalage de la date de descente à 304mNGF au-delà du 15/10 ne semble donc pas présenter une option intéressante.

Nota : on rappelle que dans le cadre de ces simulations, le soutien d'étiage est également assuré par Naussac sans limite sur sa capacité à fournir les volumes demandés. Certaines conclusions pourraient donc être revues dans le cadre de la simulation en parallèle des 2 barrages.

Synthèse des scénarios de gestion A1, A1bis, A1ter, A1quater et A1quinter

- Courbes de gestion testées :

  Les courbes testées sont construites sur un principe commun, à savoir travailler à partir de la courbe de gestion actuelle, en cherchant d'une part à retarder la date de descente à 304mNGF à l'automne (tests réalisés entre le 15/09 et le 30/11) et également à maintenir la cote à 304mNGF sur la période hivernale (15/02 ou 15/03).

  - A1 : courbe actuelle avec un décalage de la redescente à 304mNGF au 01/11
    - 312mNGF le 31/10
    - 304mNGF du 06/11 au 31/12
    - 315mNGF du 01/01 au 15/02
    - 314mNGF du 16/02 au 31/05
    - 315.3mNGF du 01/06 au 15/10

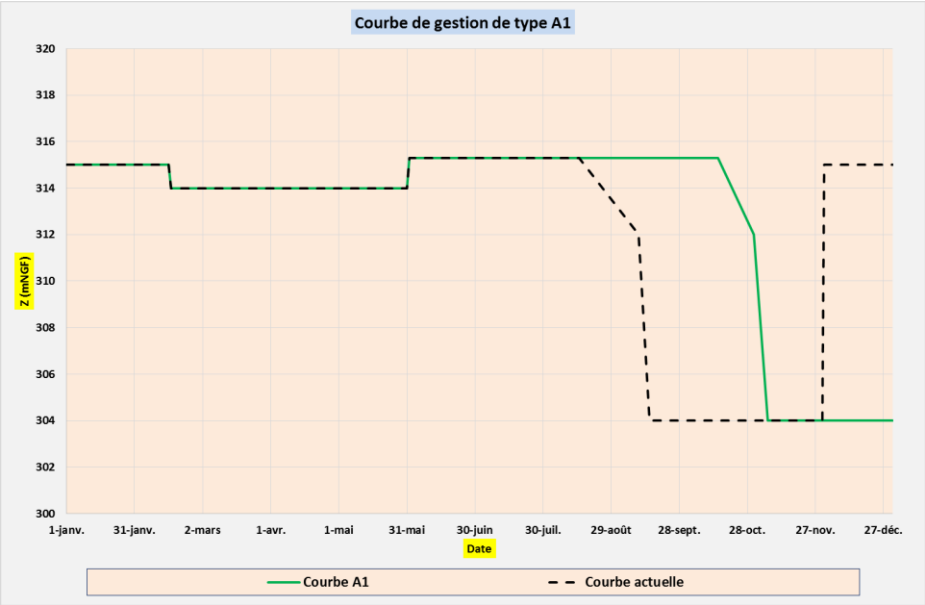

Figure 5 : Courbe de gestion A1

  - A1bis : courbe actuelle avec un décalage de la redescente à 304mNGF au 01/12
    - 312mNGF le 30/11
    - 304mNGF du 06/12 au 31/12
    - 315mNGF du 01/01 au 15/02

- 314mNGF du 16/02 au 31/05
- 315.3mNGF du 01/06 au 15/11

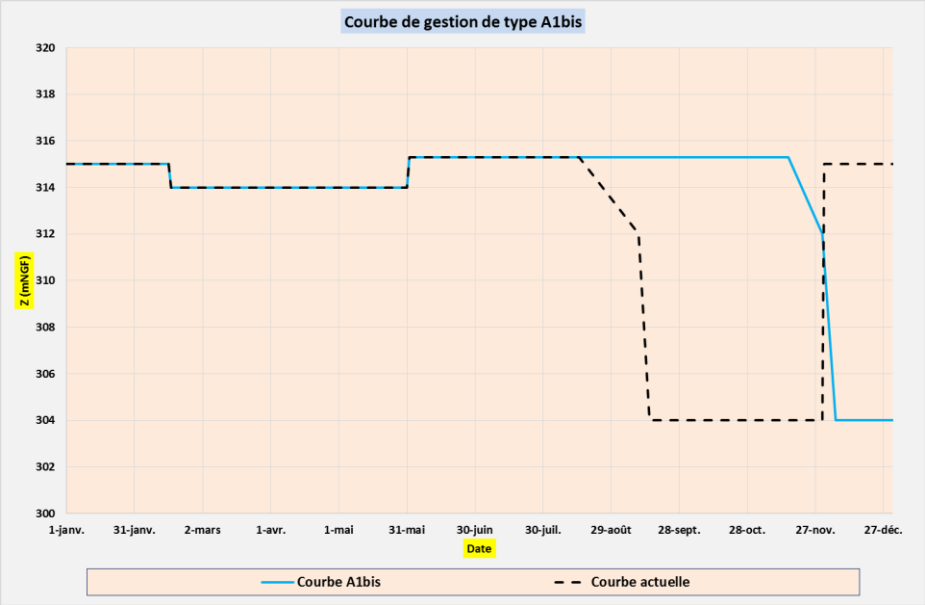

Figure 6 : Courbe de gestion A1bis

- A1ter : même courbe que A1 avec un maintien de la cote 304mNGF jusqu'au 15/02
  - 312mNGF le 31/10
  - 304mNGF du 06/11 au 15/02
  - 314mNGF du 16/02 au 31/05
  - 315.3mNGF du 01/06 au 15/10

Figure 7 : Courbe de gestion A1ter

- A1quater : prolongation de la cote à 304mNGF jusqu'au 15/03 et avancement de la descente à 304mNGF au 16/09.

- 312mNGF le 11/09
- 304mNGF du 16/09 au 15/03
- 314mNGF du 16/03 au 31/05
- 315.3mNGF du 01/06 au 10/09

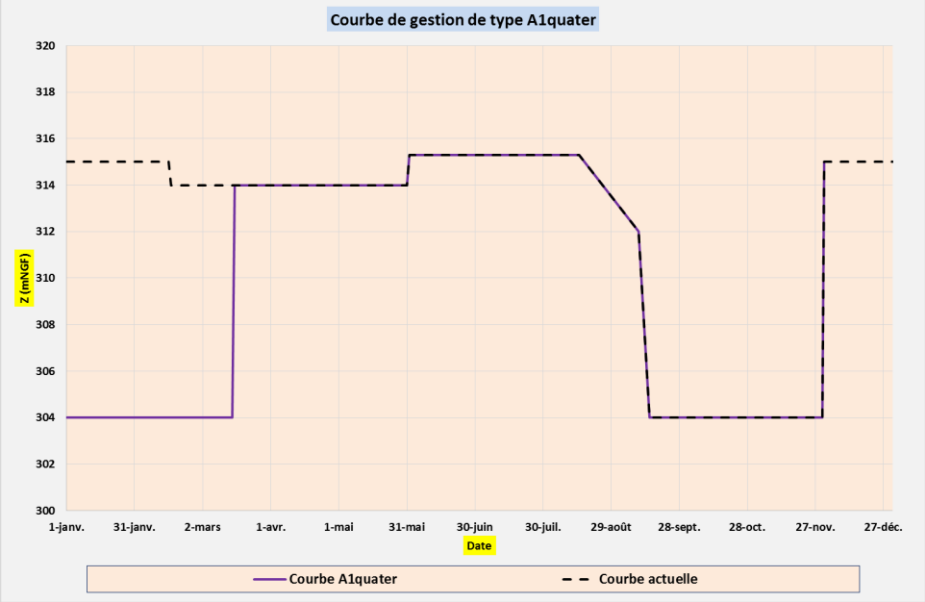

Figure 8 : Courbe de gestion A1quater

- A1quater : prolongation de la cote à 304mNGF jusqu'au 15/03 et avancement de la descente à 304mNGF au 16/09.
  - 312mNGF le 10/09
  - 304mNGF du 16/09 au 15/02
  - 314mNGF du 16/03 au 31/05
  - 315.3mNGF du 01/06 au 10/09

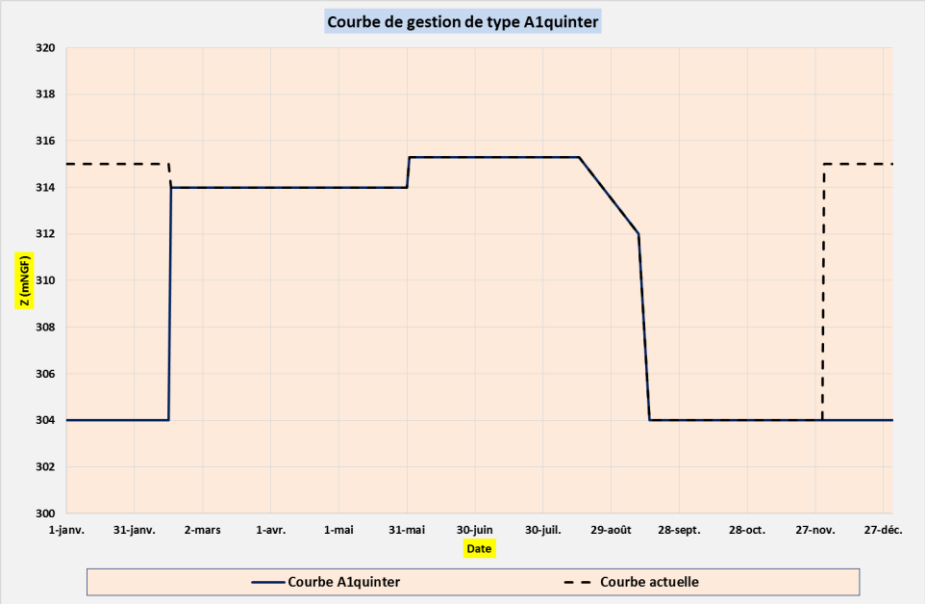

Figure 9 : Courbe de gestion A1quinter

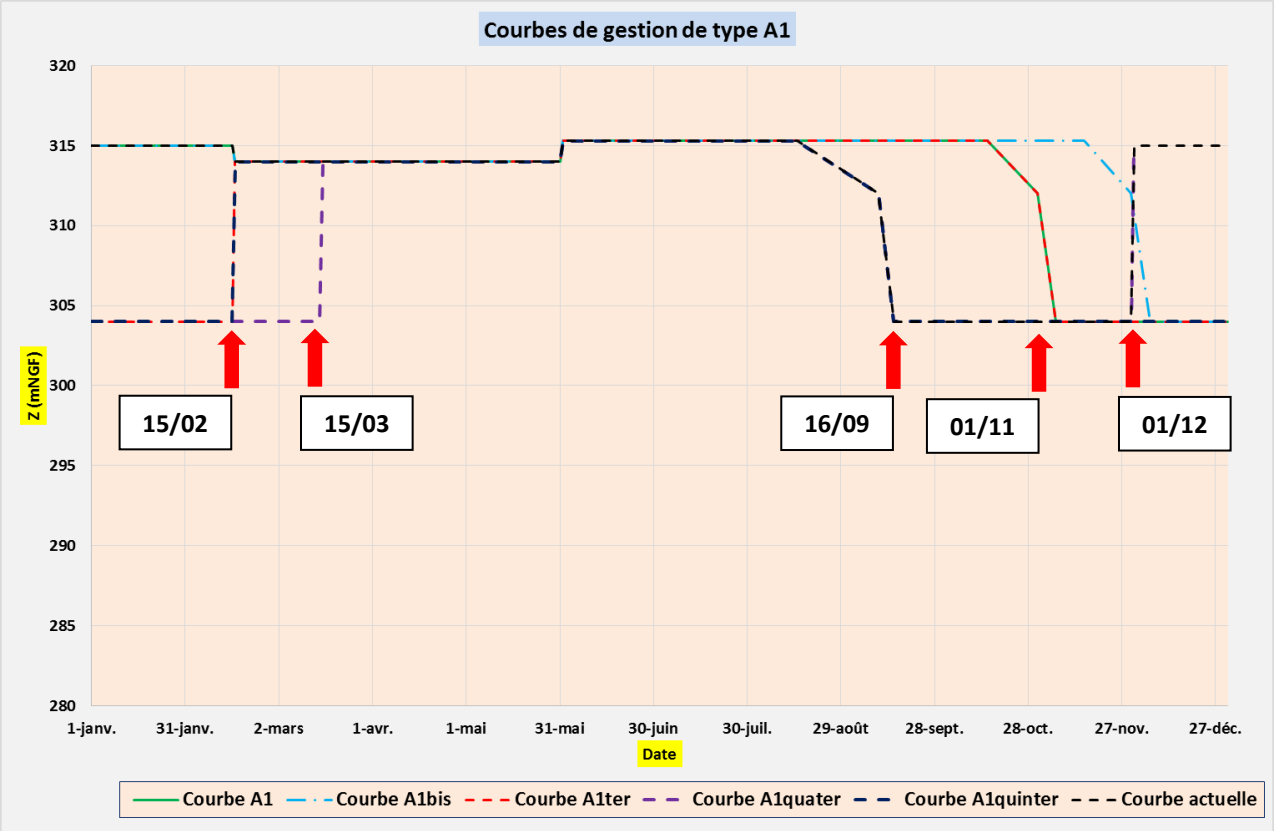

Figure 10 : Synthèse des courbes de gestion testées du type A1

	Courbe de gestion	A1	A1bis	A1ter	A1quater	A1quinter
Moyenne de tous les GCMs	Volume depuis Villerest pour le soutien d'étiage (m^3)	161 683 702	161 683 702	161 683 702	159 948 639	161 137 752
	Volume supplémentaire mobilisé % aux règles de gestion actuelle (m^3)	+545 950	+545 950	+545 950	-1 189 113	0
	Z min (mNGF)	297.1	300.7	299.2	296.3	296.4

On constate que la prolongation de la cote 315.3mNGF jusqu'au 15/10 **(scénario A1)**, et donc un abaissement à 304mNGF au 01/11 permettrait de gagner en moyenne +0.5 millions de m^3 pour le soutien d'étiage depuis Villerest, *favorisant le maintien du*

stock et la mobilisation d'apports automnaux. La prolongation au-delà du 01 novembre **(scénario A1bis)** d'une cote supérieure à 304mNGF ne semble pas présenter d'intérêts, à rapprocher avec des besoins en soutien d'étiage faibles.

On note également que le maintien d'une cote à 304mNGF jusqu'au 15 février **(scénario A1ter)** permet d'atteindre en moyenne le niveau de remplissage à 315.3mNGF avant la période de soutien d'étiage.

Le test réalisé **(scénario A1quater)** avec une prolongation de la cote jusqu'au 15/03 abaisserait légèrement le niveau moyen de remplissage de -0.20m, conduisant à un volume pour le soutien d'étiage moins important qu'avec la gestion actuelle (écart de -1 189 113 m^3).

Enfin, le dernier scénario **(A1quinter)** correspondant à la gestion actuelle avec un maintien de la cote à 304mNGF jusqu'au 15/02, conduirait un volume de soutien d'étiage en moyenne équivalent à celui obtenu avec la gestion actuelle.

- ⇨ Ce résultat conforte l'impact limité d'un abaissement de la cote 315mNGF à 304mNGF du 01/12 au 15/02, du fait du non impact sur l'atteinte de la cote de remplissage avant le début du soutien d'étiage.

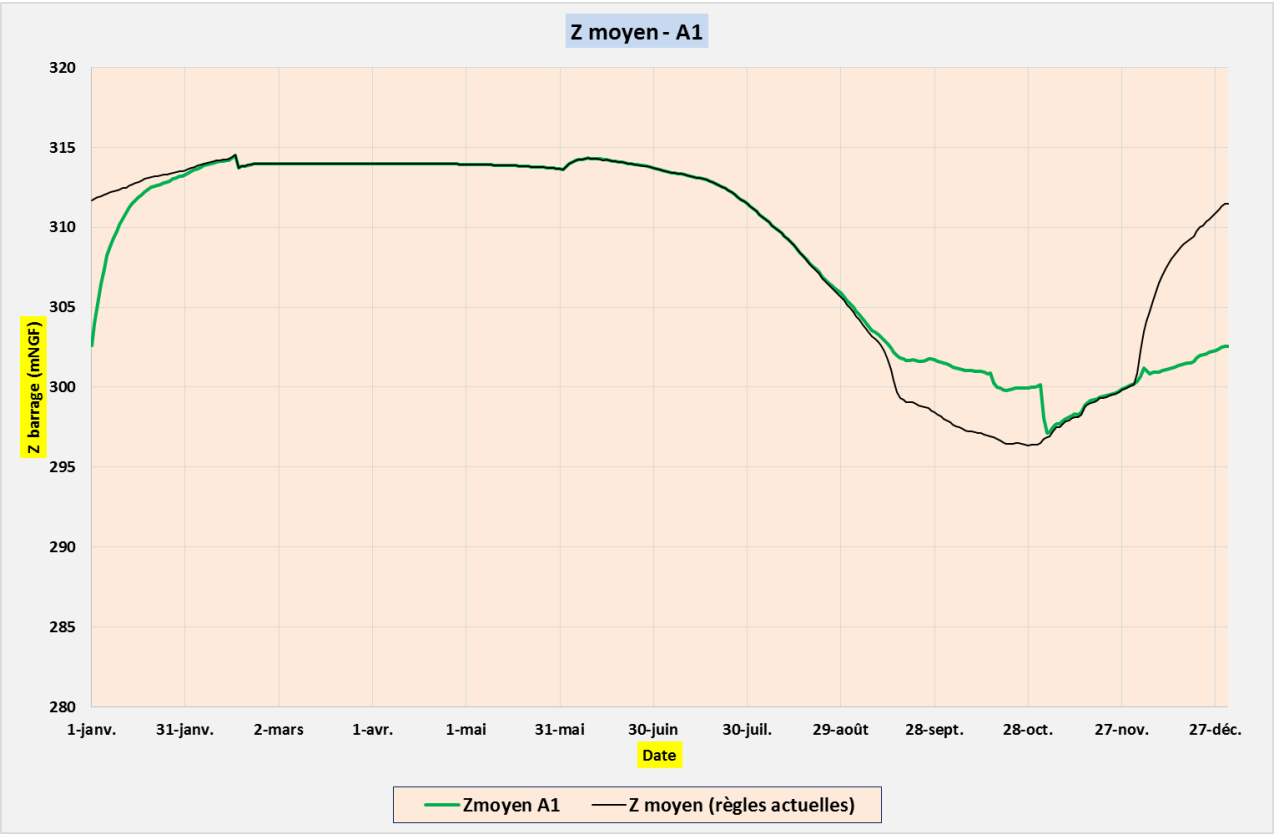

Figure 11 : Z moyen (A1)

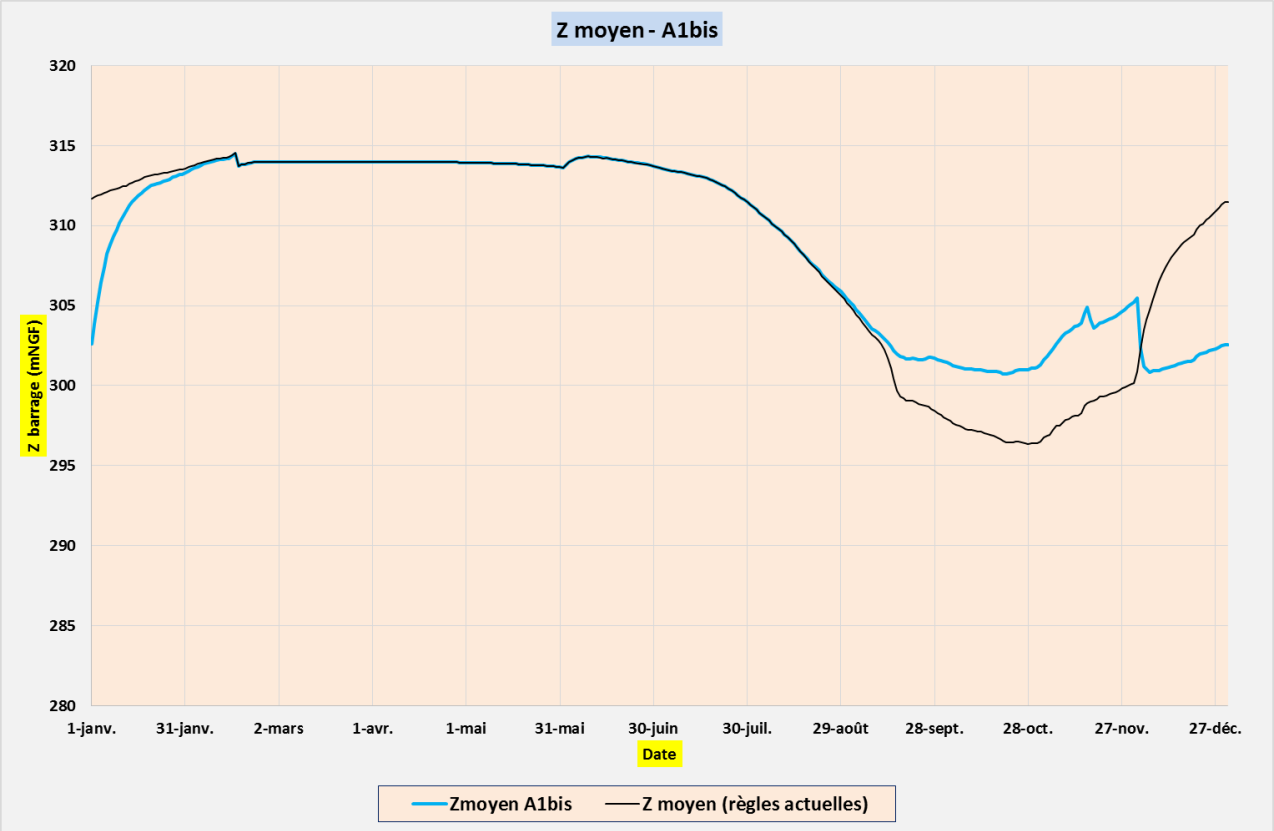

Figure 12 : Z moyen (A1bis)

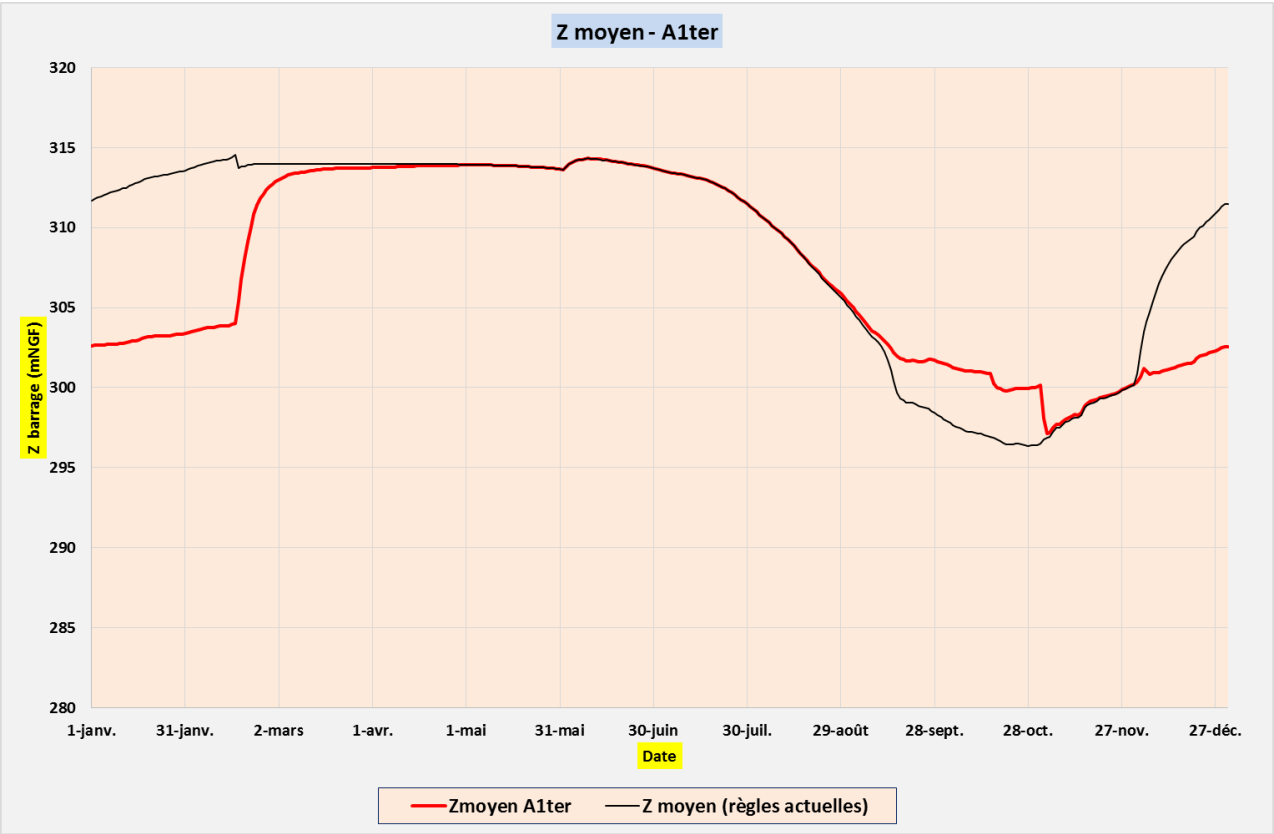

Figure 13 : Z moyen (A1ter)

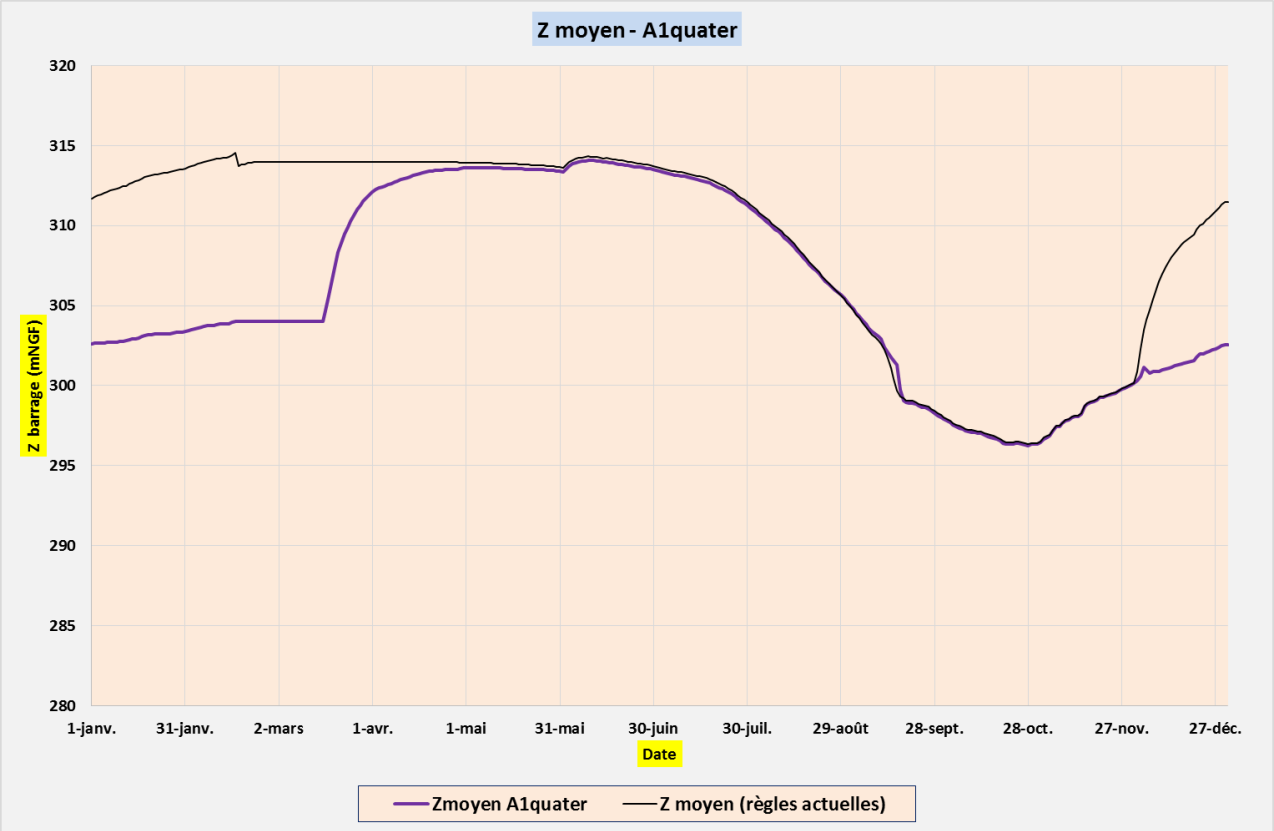

Figure 14 : Z moyen (A1quater)

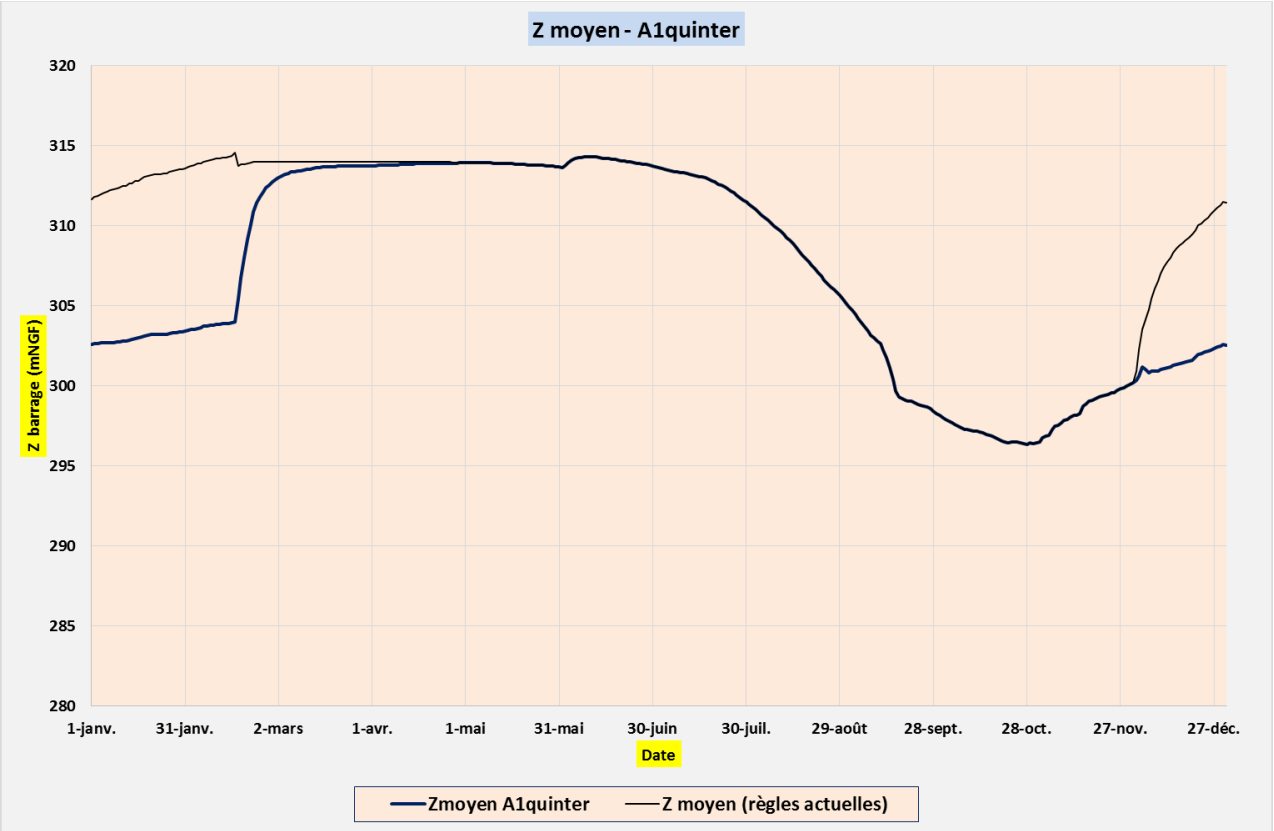

Figure 15 : Z moyen (A1quinter)

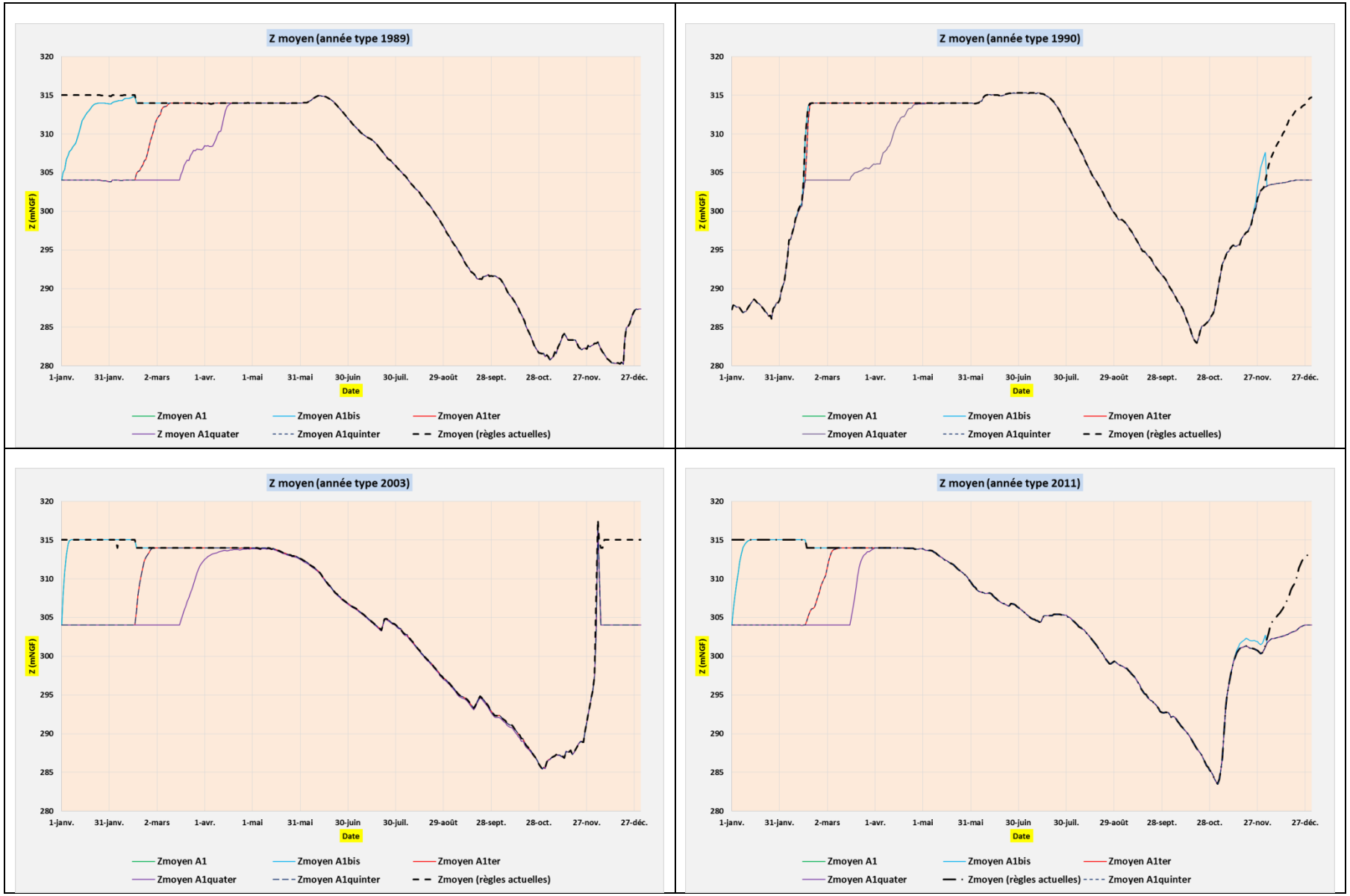

Figure 16 : Z moyen barrage de Villerest (A1, A1bis, A1ter, A1quater et A1quinter) pour des années type 1989, 1990, 2003 et 2011

4 TEST N°2 : COTE DE REMPLISSAGE A 316.30MNGF – COURBES A2

Le premier scénario de gestion testé **(A2)** intègre un relèvement de la cote de remplissage fixée à 316.3mNGF.

Des tests intégrant un décalage de la cote ont également été réalisés, afin d'une part de favoriser le maintien du stock et la mobilisation des évènements de début d'automne pour le soutien d'étiage, et d'autre part d'intégrer le risque de crue vers l'hiver en maintenant la cote à 304mNGF du 01/11 au 31/12.

Le scénario de gestion A2 permettrait de regagner en moyenne +3.2 millions de m^3 pour le soutien d'étiage depuis le barrage de Villerest, avec un maximum pour le GCM ccma_cgcm3 (+4.7 millions de m^3) et un minimum pour le GCM mri_cgcm (+1.2 millions de m^3).

GCM	Scénario scC1	ScC1-A2	Gain en soutien d'étiage depuis Villerest (m^3)
ccma_cgcm3	173 169 786	177 879 184	+4 709 398
cnrm_cm3	157 760 114	161 184 337	+2 408 924
csiro_mk3	115 060 770	117 946 696	+2 224 852
gfdl_cm2	180 292 441	185 937 010	+4 506 481
giss_aom	180 898 928	185 988 372	+3 957 189
giss_model	178 102 567	181 683 402	+2 416 781
ingv_echam4	124 399 707	127 000 277	+2 014 140
ipsl_cm4	161 499 567	165 406 724	+2 666 178
microc3_2_medres	179 118 449	184 053 744	+3 688 642
miub_echo	172 640 070	177 728 494	+4 032 420
mpi_echam	159 019 525	164 055 258	+3 837 121
mri_cgcm	118 607 148	120 819 149	+1 189 939
ncar_ccsm	182 760 195	186 638 032	+3 877 836
Moyenne	**161 137 752**	**164 332 360**	**+3 194 608**

Synthèse des scénarios de gestion A2, A2bis, A2ter, A2quater, A2quinter

- Courbes de gestion testées :

  Les courbes testées sont construites sur un principe commun, à savoir relever d'1m la cote de remplissage en la faisant passer de 315.3 à 316.3mNGF, en cherchant en parallèle d'une part à retarder la date de descente à 304mNGF à l'automne *(tests réalisés entre le 15/09 et le 30/11)* et également à maintenir la cote à 304mNGF sur la période hivernale *(jusqu'au 15/02 ou 15/03)*.

  - A2 : relèvement de la cote de remplissage de 315.30 à 316.30mNGF avec un décalage jusqu'au 10/10, 304mNGF du 01/11 au 31/12
    - 312mNGF le 31/10
    - 304mNGF du 01/11 au 31/12
    - 315mNGF du 01/01 au 15/02
    - 314mNGF du 16/02 au 31/05
    - 316.3mNGF du 01/06 au 10/10

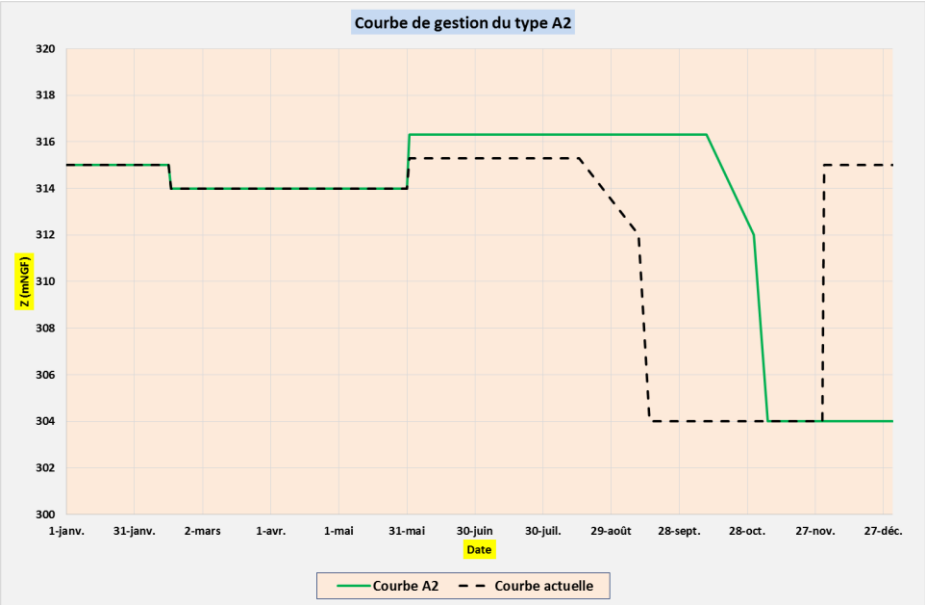

Figure 17 : Courbe de gestion A2

  - A2bis : remontée de la cote 316.30mNGF dès le 16/02, 304mNGF du 01/11 au 31/12
    - 312mNGF le 31/10
    - 304mNGF du 01/11 au 31/12
    - 315mNGF du 01/01 au 15/02
    - 316.3mNGF du 16/02 au 10/10

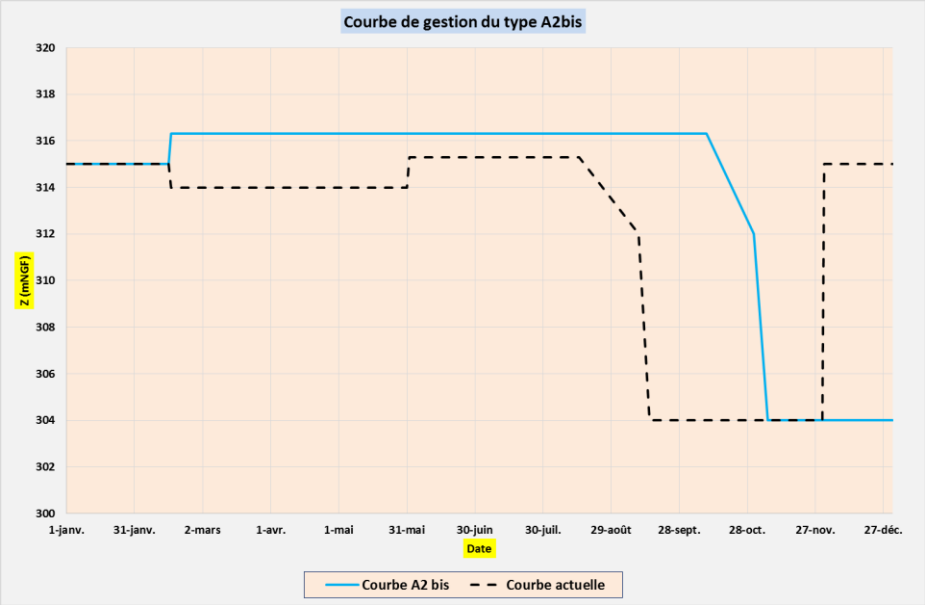

Figure 18 : Courbe de gestion A2bis

- A2ter : prolongation de la cote 304mNGF jusqu'au 15/02
  - 312mNGF le 31/10
  - 304mNGF du 01/11 au 15/02
  - 316.3mNGF du 16/02 au 10/10

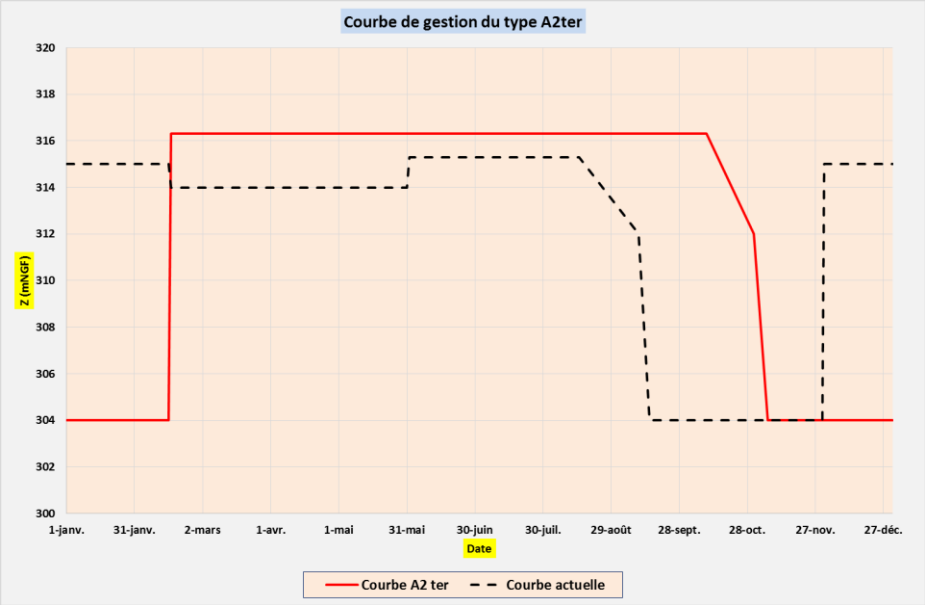

Figure 19 : Courbe de gestion A2ter

- A2quater : abaissement à 304mNGF dès le 16/09 jusqu'au 15/02
  - 312mNGF le 10/09
  - 304mNGF du 16/09 au 15/02
  - 316.3mNGF du 16/02 au 15/08

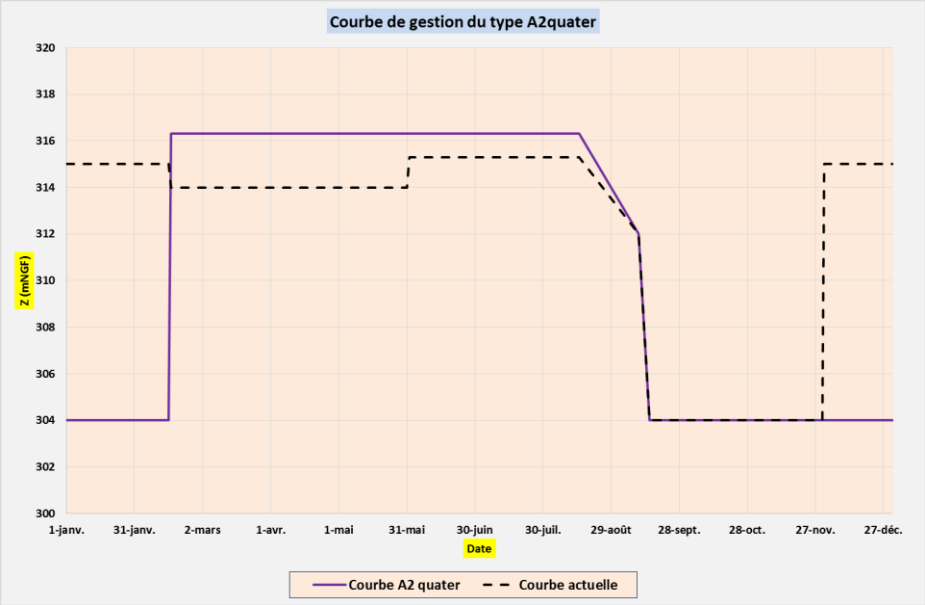

Figure 20 : Courbe de gestion A2quater

- A2quinter : abaissement à 304mNGF dès le 16/09 et prolongation de cette cote jusqu'au 16/03
  - 312mNGF le 10/09
  - 304mNGF du 16/09 au 15/03
  - 316.3mNGF du 16/03 au 15/08

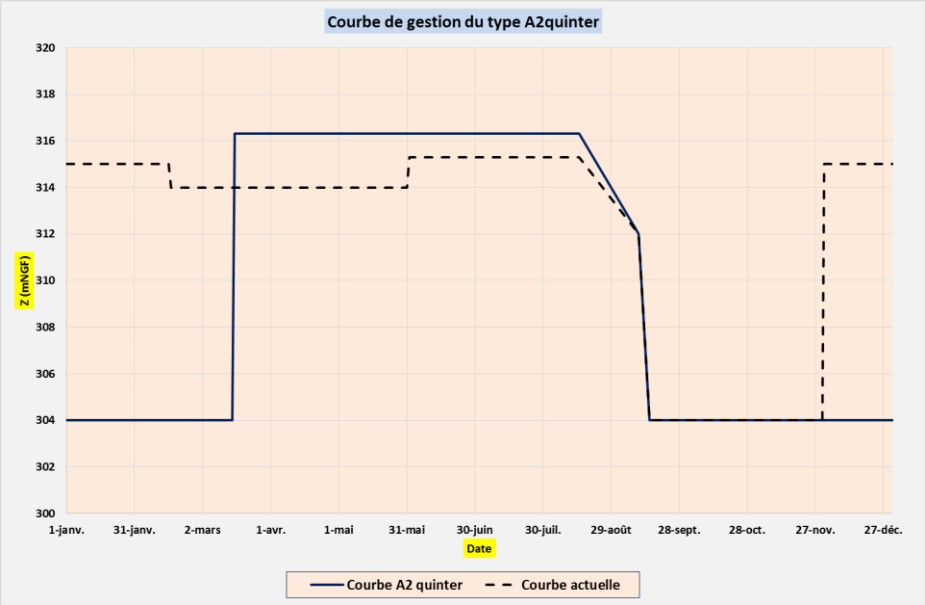

Figure 21 : Courbe de gestion A2quinter

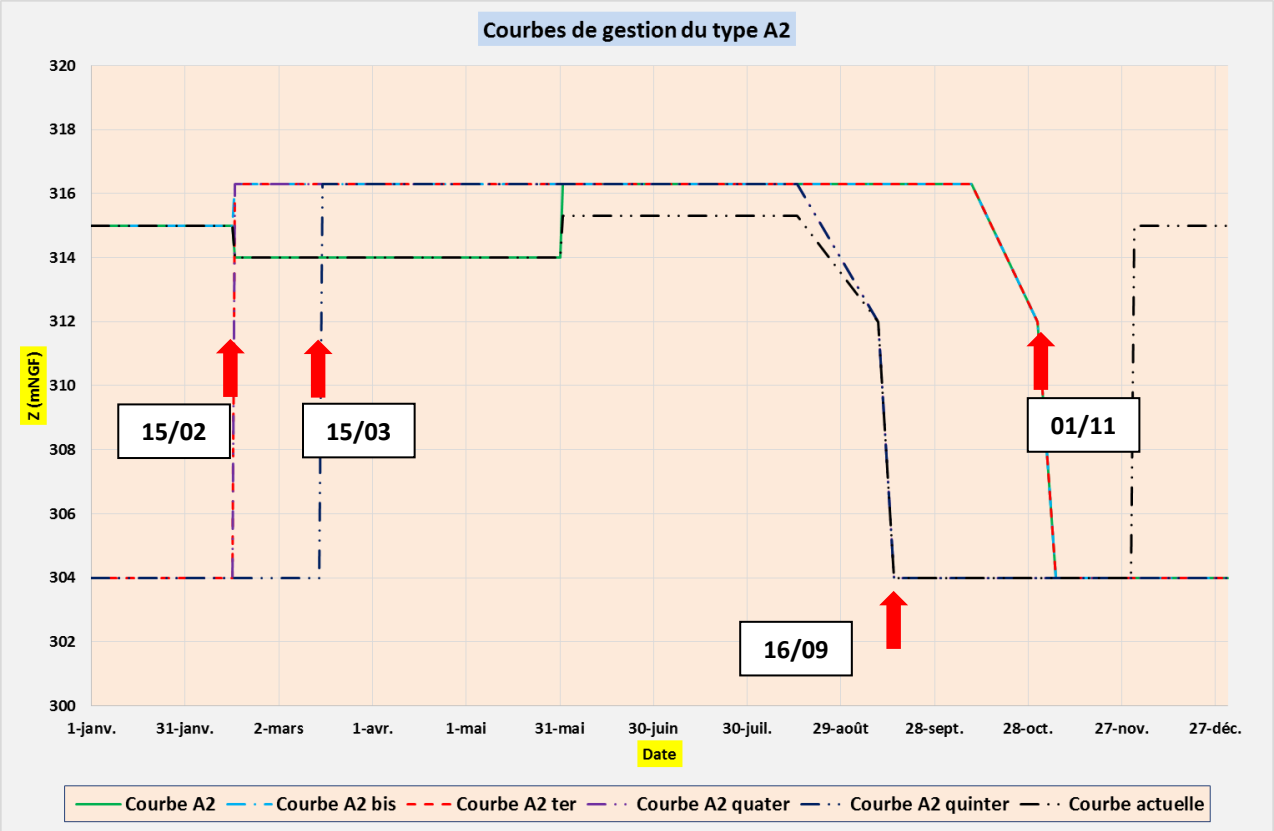

Figure 22 : Synthèse des courbes de gestion testées du type A2

	Courbe de gestion	A2	A2bis	A2ter	A2quater	A2quinter
Moyenne de tous les GCMs	Volume depuis Villerest pour le soutien d'étiage (m^3)	164 332 360	168 489 886	168 489 886	167 761 740	165 822 221
	Volume supplémentaire mobilisé % aux règles de gestion actuelle (m^3)	+3 194 608	+7 352 134	+7 352 134	+6 623 988	+4 684 469
	Z min (mNGF)	297.2	297.3	297.3	296.5	296.4

Dans le cadre du **scénario A2**, on constate que le maintien de la cote 314mNGF jusqu'au 31/05 ne permet pas en moyenne d'atteindre la cote de remplissage fixée dans le cas présent à 316.30mNGF. *La moyenne des différentes simulations conclut à une cote maximum de 314.9mNGF à la mi-juin.*

On constate que si l'on souhaite atteindre une cote de remplissage proche de 316.30mNGF avant la saison d'étiage, il est nécessaire de relever la cote avant le 31/05. Le **scénario A2bis** intègre une cote à 316.30mNGF dès le 15/02, et permet ainsi *par rapport au scénario précédent de doubler le volume mobilisé depuis Villerest* avec en moyenne +7.4 millions de m^3. *La cote de 316.30mNGF est ainsi atteinte dès le 27/02 et se maintient jusqu'au 01/05.*

Afin de mieux intégrer le risque de crue, le maintien d'une cote à 304mNGF jusqu'au 15/02 **(scénario A2ter)** et également jusqu'au 15/03 **(scénario A2quater)** ont été testés. Le scénario **A2quater** intègre un abaissement à 304mNGF dès le 15/09.

On constate que le **scénario A2ter** conduirait à un volume mobilisé identique au **scénario A2bis**, démontrant la possibilité de maintenir une cote à 304mNGF sur la période hivernale, *sans pour autant remettre en cause l'atteinte de la cote de remplissage du barrage*. Le **scénario A2ter** permet d'atteindre en moyenne une cote de 316.2mNGF à partir du 29/04 et la maintenir jusqu'au 19/05.

Le **scénario A2quater** en abaissant la cote de gestion à 304mNGF comme aujourd'hui dès le 15/09, diminue légèrement le volume mobilisé pour le soutien d'étiage +6.6 millions de m^3 (écart de –728 145 m^3 par rapport au **scénario A2ter**). *Cette option semble donc peu préjudiciable au soutien d'étiage si l'on souhaite conserver la prise en compte du risque de crue cévenole à cette saison.*

Ce résultat trouve probablement son explication dans le fait que le niveau du barrage est probablement inférieur dans de nombreuses simulations à cette cote de 304mNGF, ce qui n'engendre pas de lâchers excessifs, tout en conservant un stock suffisant pour les besoins à venir du fait du basculement sur Naussac.

Enfin le dernier **scénario A2quinter** a pour objectif de tester la prolongation d'une cote à 304mNGF *sur l'atteinte de la cote de remplissage du barrage.* Ainsi le basculement de 304 à 316.3mNGF fixé au 15/03 ne permet pas d'atteindre la cote de remplissage à 316.3mNGF, avec en moyenne une cote de 315.7mNGF à partir du 03/05 jusqu'au 27/05.

Le volume mobilisé depuis Villerest est ainsi en baisse par rapport au scénario précédent, avec + 4.7 millions de m^3 soit un écart de -1 939 519m^3 par rapport au **scénario A2quater**.

- ⇨ Le choix de la période de remontée à la cote de 316.3mNGF est donc important, avec une optimisation à faire avant le 15/03.

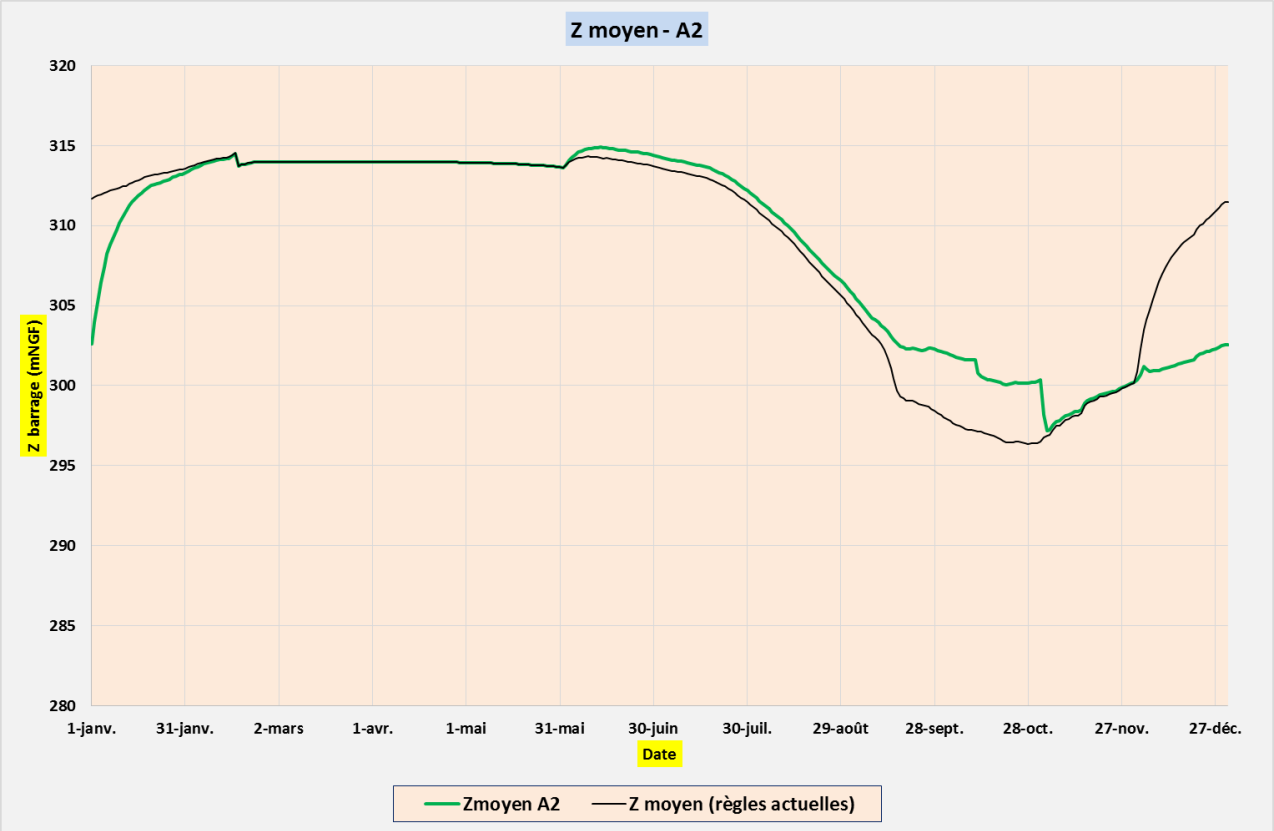

Figure 23 : Z moyen (A2)

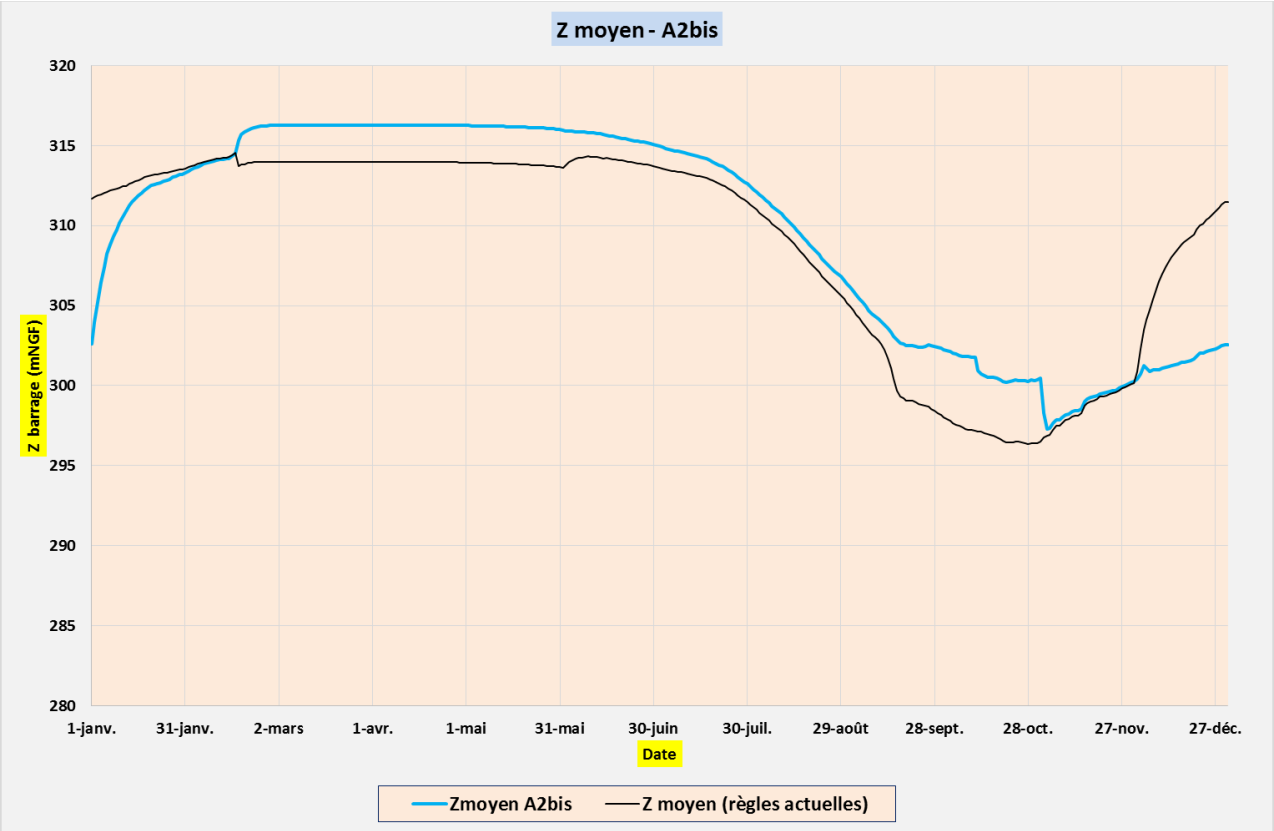

Figure 24 : Z moyen (A2bis)

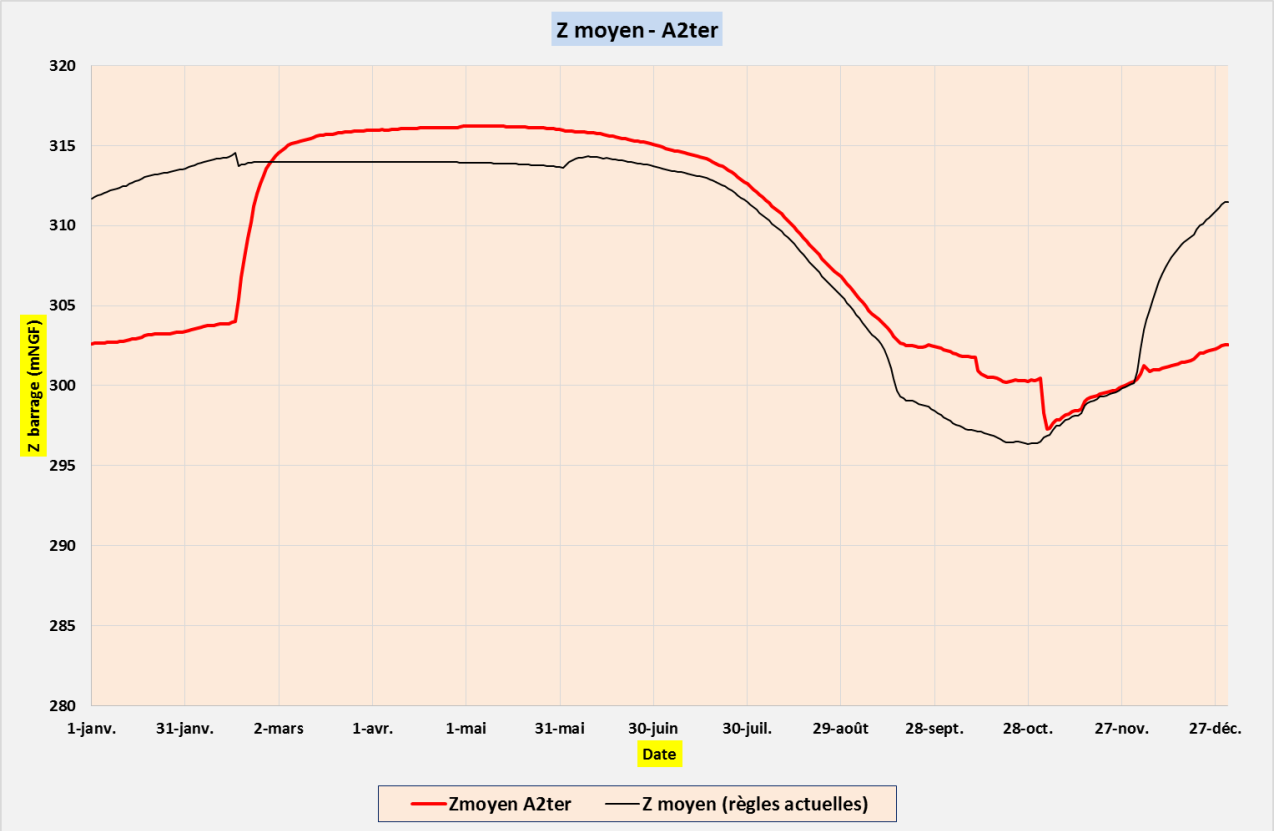

Figure 25 : Z moyen (A2ter)

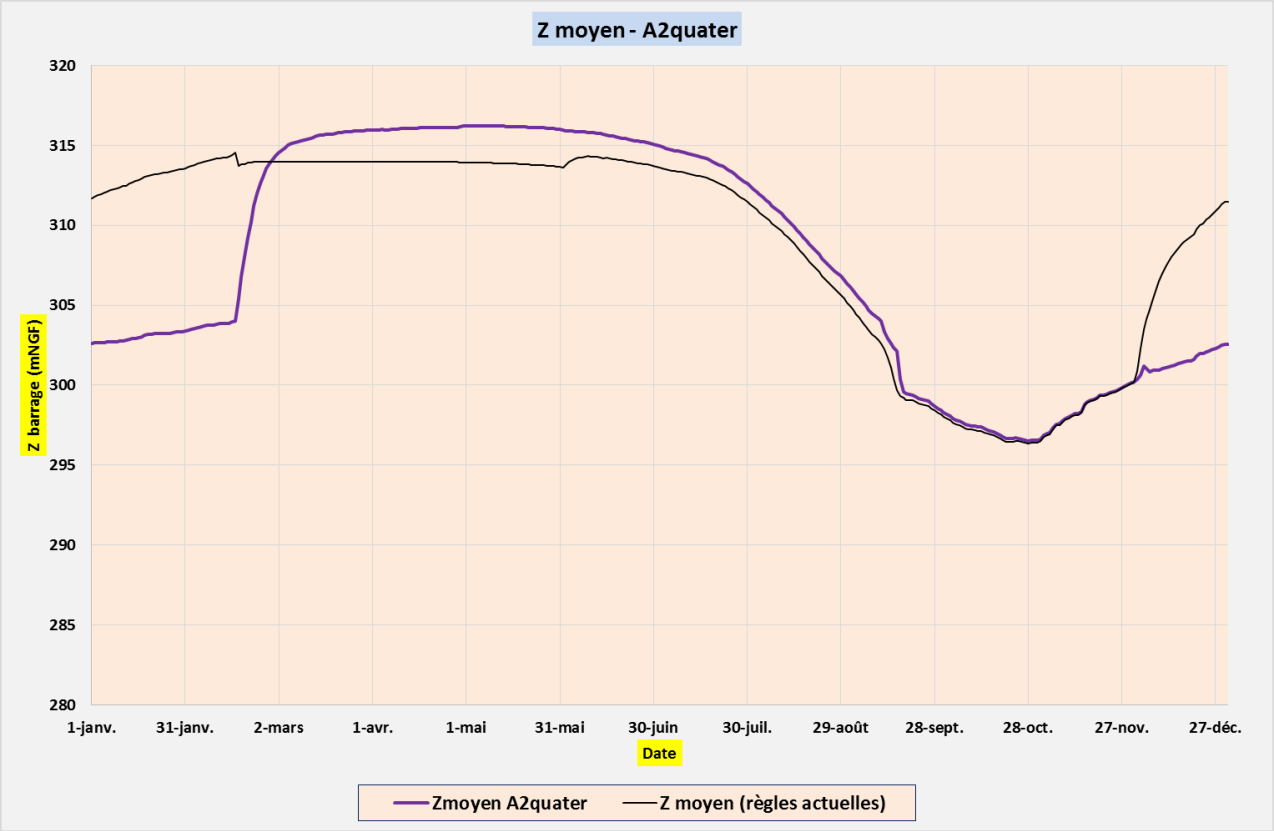

Figure 26 : Z moyen (A2quater)

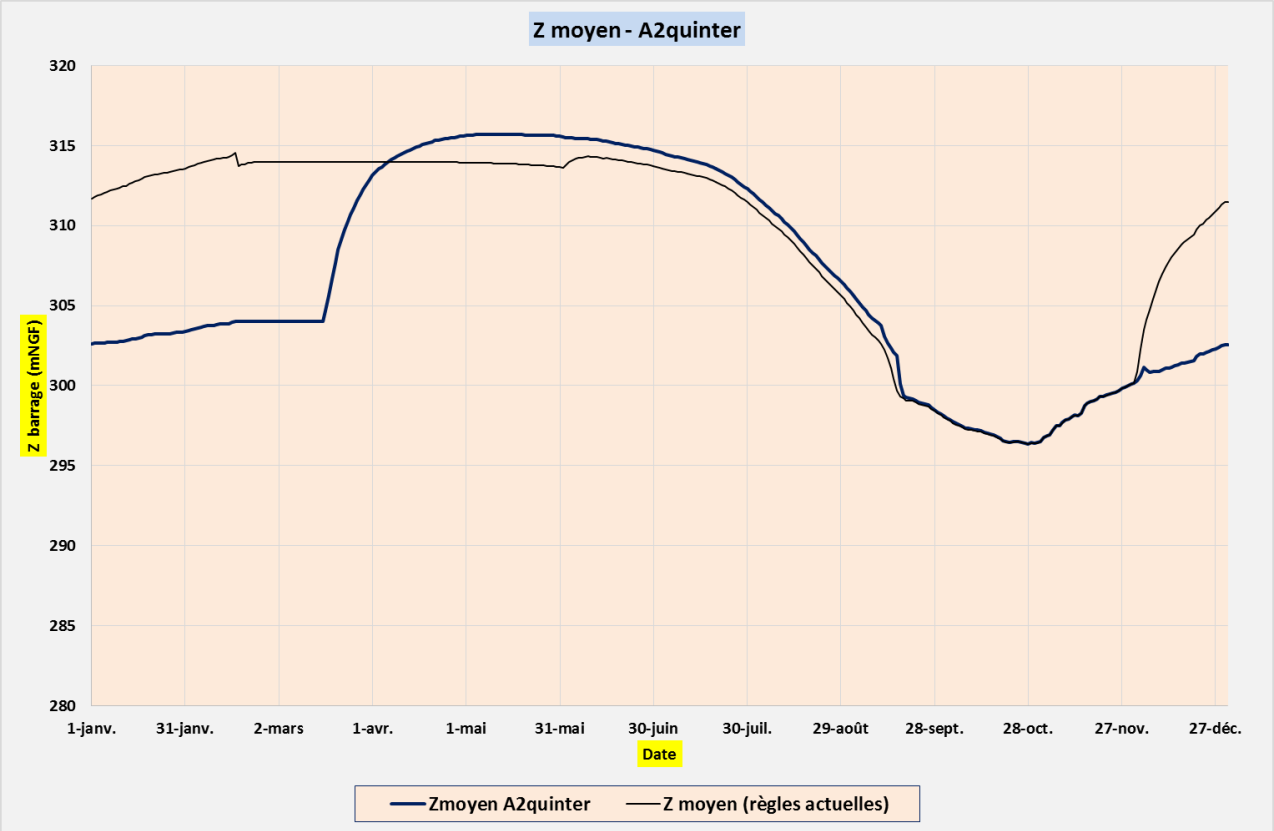

Figure 27 : Z moyen (A2quinter)

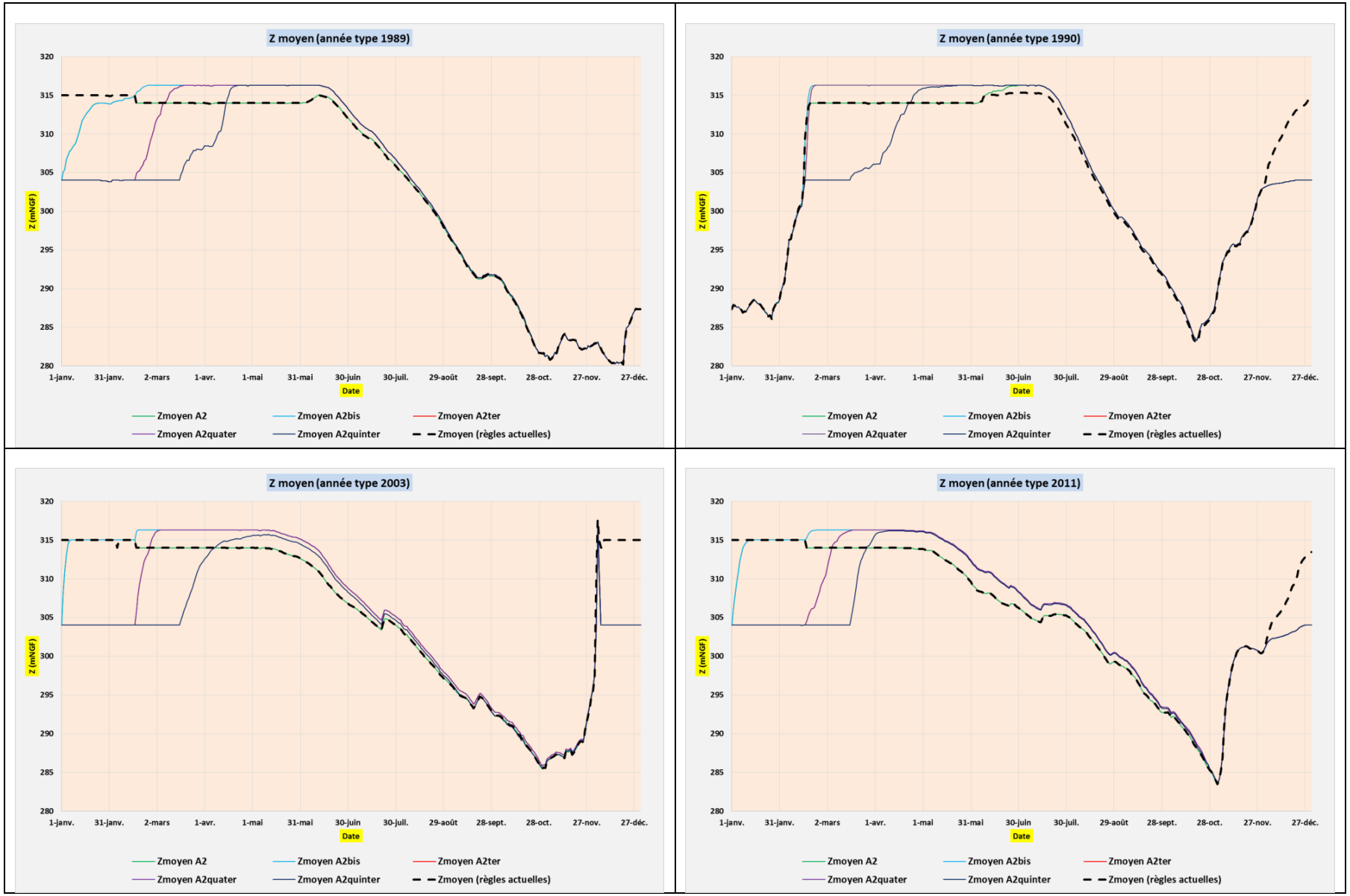

Figure 28 : Z moyen barrage de Villerest (A2, A2bis, A2ter, A2quater et A2quinter) pour des années type 1989, 1990, 2003 et 2011

5 TEST N°3 : RECHERCHE DU GAIN MAXIMAL POUR LE SOUTIEN D'ETIAGE – COURBES A3

5.1 EXPLOITATION DU MODELE TYPE SCC AVEC LES REGLES DE BASCULEMENT ENTRE VILLEREST ET NAUSSAC

Afin d'estimer les gains maximum que nous pourrions obtenir en termes de soutien d'étiage depuis Villerest dans la configuration actuelle, nous avons réalisé un test en fixant une cote de gestion à 319mNGF toute l'année **(courbe de gestion A3)**. *Cette cote a ainsi été fixée en considérant une revanche de +1.0m par rapport au radier des déversoirs.*

Cette cote correspond donc au stock maximal envisageable sur Villerest avant la saison de soutien d'étiage.

- ⇨ Ce test a donc vocation à définir le gain maximum envisageable sur les volumes délivrés par Villerest pour le soutien des débits à Gien.

Par rapport à la cote actuelle de 315.30mNGF, la capacité du barrage est relevée de +32.8 millions de m^3.

- ⇨ L'exploitation des simulations fait ainsi apparaître un gain moyen pour le soutien d'étiage en provenance de Villerest, pour l'ensemble des scénarios de +21.3 millions de m^3, avec un maximum pour le GCM ncar_ccsm (+27.6 millions de m^3) et un minimum pour le GCM mri_cgcm (+10.2 millions de m^3).

GCM	scC1 (règles de gestion actuelles)	scC1- courbe de gestion A3	Gain en soutien d'étiage depuis Villerest (m^3)
ccma_cgcm3	173 169 786	199 728 979	+26 559 193
cnrm_cm3	157 760 114	181 560 119	+22 784 706
csiro_mk3	115 060 770	127 217 964	+11 496 121
gfdl_cm2	180 292 441	209 805 664	+28 375 135
giss_aom	180 898 928	209 108 177	+27 076 993
giss_model	178 102 567	203 198 060	+23 931 439
ingv_echam4	124 399 707	137 007 291	+12 021 154
ipsl_cm4	161 499 567	182 022 488	+19 281 942
microc3_2_medres	179 118 449	205 170 438	+24 805 336
miub_echo	172 640 070	196 056 011	+22 359 938
mpi_echam	159 019 525	180 679 820	+20 461 684
mri_cgcm	118 607 148	129 827 019	+10 197 809
ncar_ccsm	182 760 195	210 317 631	+27 557 435
Moyenne	**161 137 752**	**182 438 435**	**+21 300 683**

Les règles de basculement existantes entre Villerest et Naussac, conduisent donc dans cette configuration à diminuer de -21.3 millions de m^3, les besoins en provenance de Naussac pour le soutien d'étiage à Gien, passant d'un besoin moyen de +85.0 à +63.7 millions de m^3. En parallèle, on observe également une remontée du niveau moyen le plus bas de 296.4 à 303.4mNGF, soit un différentiel de +7.0m. Le barrage disposerait ainsi en moyenne d'un stock minimum de + 65 millions de m^3, contre +38.2millions de m^3 avec les règles de gestion actuelle.

Un scénario dérivé intitulé **A3 bis**, consistant à baisser la cote 319mNGF à 315mNGF sur la période la plus à risque pour les crues (du 11 septembre au 15 février) a également été testé. On constate ainsi que le maintien d'une cote hivernale à 315mNGF permet d'atteindre le même niveau de remplissage dès début mars.

⇨ Le stock ainsi constitué avant la période de soutien d'étiage serait équivalent entre les 2 scénarios (**A3** et **A3bis**).

La principale différence va concerner la période de la mi-septembre à la fin de l'année. On constate en effet que le maintien d'une cote à 319mNGF dans le cadre de la **courbe de gestion A3** aboutirait à un niveau en moyenne supérieur à celui constaté avec la courbe A3bis.

Pour l'un des GCMs les plus contraignant à savoir le ncar_ccsm, on peut ainsi avancer pour des années similaires à 1989, 2003, 2005 et 2011 sous l'effet du changement climatique les volumes suivants :

	Gestion actuelle			Gestion A3		
Année type	Volume de Villerest pour le soutien d'étiage	Volume de Naussac pour le soutien d'étiage	Total	Volume de Villerest pour le soutien d'étiage	Volume de Naussac pour le soutien d'étiage	Total pour le soutien d'étiage
	(millions de m³)			*(millions de m³)*		
1989	**208.4**	400.2*	608.6	**248.2 (+39.8)**	360*	608.2
2003	**190**	391.5*	581.5	**227.3 (+37.3)**	354.2*	581.5
2005	**206**	268.8*	474.8	**247.8 (+41.8)**	227*	474.8
2011	**246.8**	345*	591.8	**289.4 (+42.6)**	302.4*	591.8

*En jaune : le volume supplémentaire assuré par Villerest pour le soutien d'étiage à Gien avec une gestion selon **la courbe A3**.*

(*) Ces valeurs représentent des volumes théoriques qui devraient être assurés par le barrage de Naussac. Une modélisation du fonctionnement du barrage de Naussac est nécessaire pour affiner les volumes qui pourront réellement être fournis.

Synthèse des scénarios de gestion A3, A3bis, A3ter et A3quater

- Courbes de gestion testées :

  Les courbes testées sont construites sur un principe commun, à savoir favoriser un stockage maximal avant la période de soutien d'étiage avec une cote fixée à 319mNGF.

  Nous avons ensuite joué sur l'abaissement des cotes de gestion à 315 puis à 304mNGF, à la fois sur la période automnale (dès le 11 septembre) et sur la période hivernale.

  - A3 : cote constante à 319mNGF
    - 319mNGF du 01/01 au 31/12

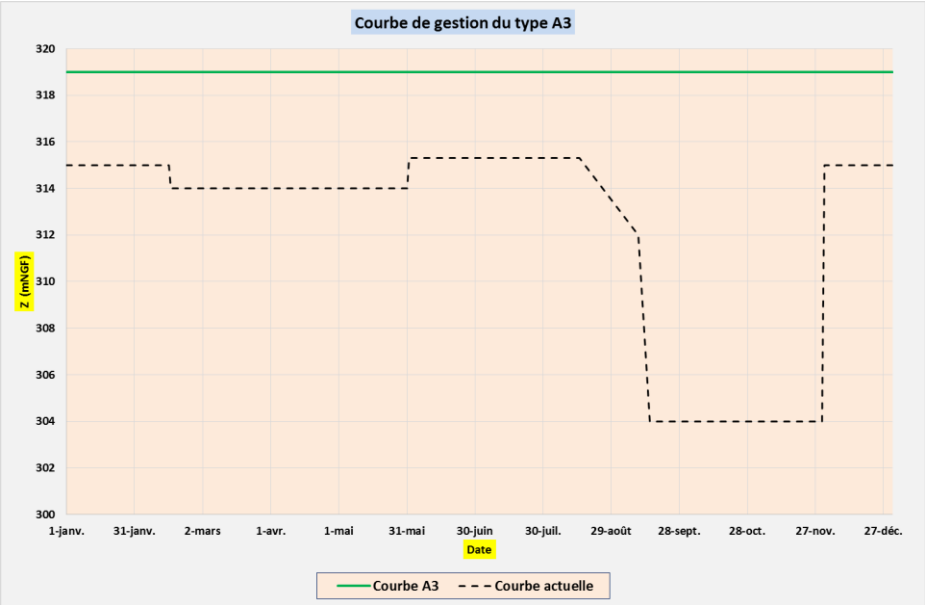

Figure 29 : Courbe de gestion A3

  - A3bis :
    - 319mNGF du 16/02 au 15/08
    - 315mNGF du 10/09 au 15/02

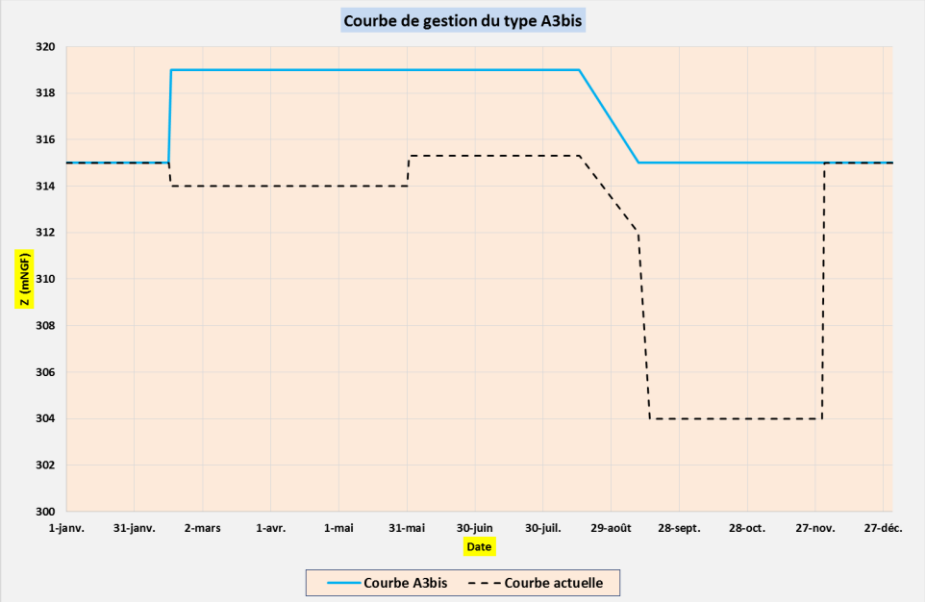

Figure 30 : Courbe de gestion A3bis

- A3ter :
  - 319mNGF du 16/02 au 15/08
  - 312mNGF le 10/09
  - 304mNGF du 16/09 au 15/02

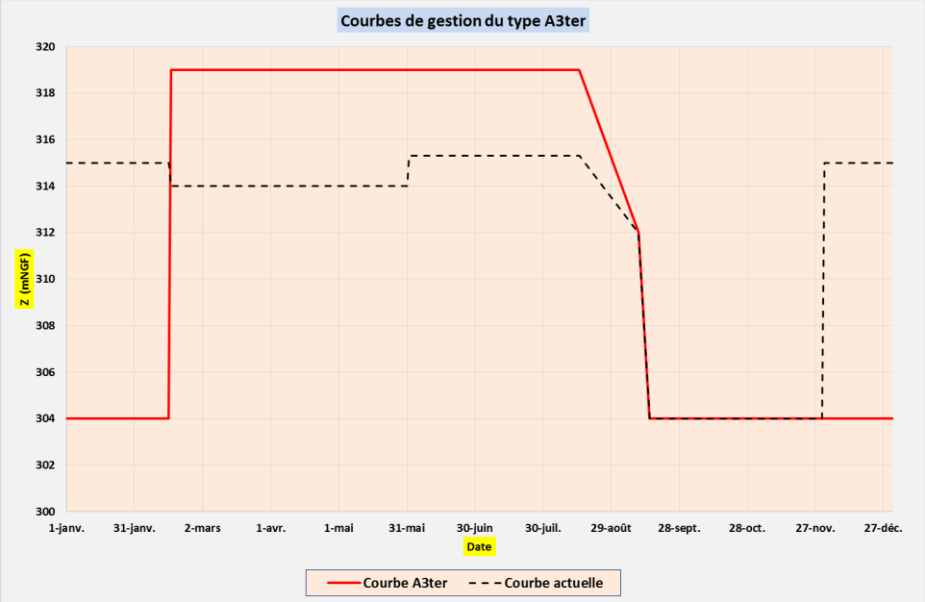

Figure 31 : Courbe de gestion A3ter

- A3quater : prolongation de la cote à 304mNGF jusqu'au 15/03.
  - 319mNGF du 16/03 au 15/08
  - 312mNGF le 10/09
  - 304mNGF du 16/09 au 15/03

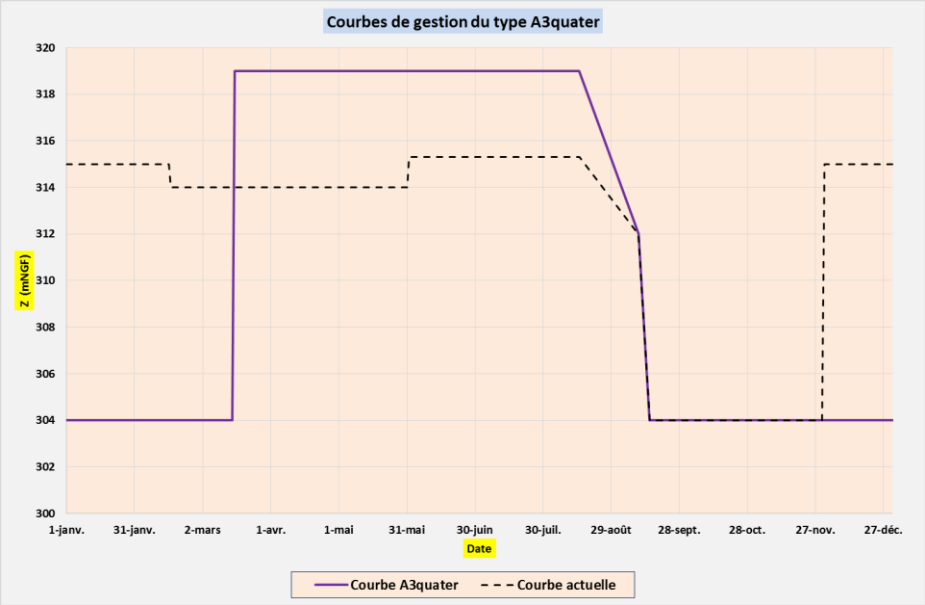

Figure 32 : Courbe de gestion A1quater

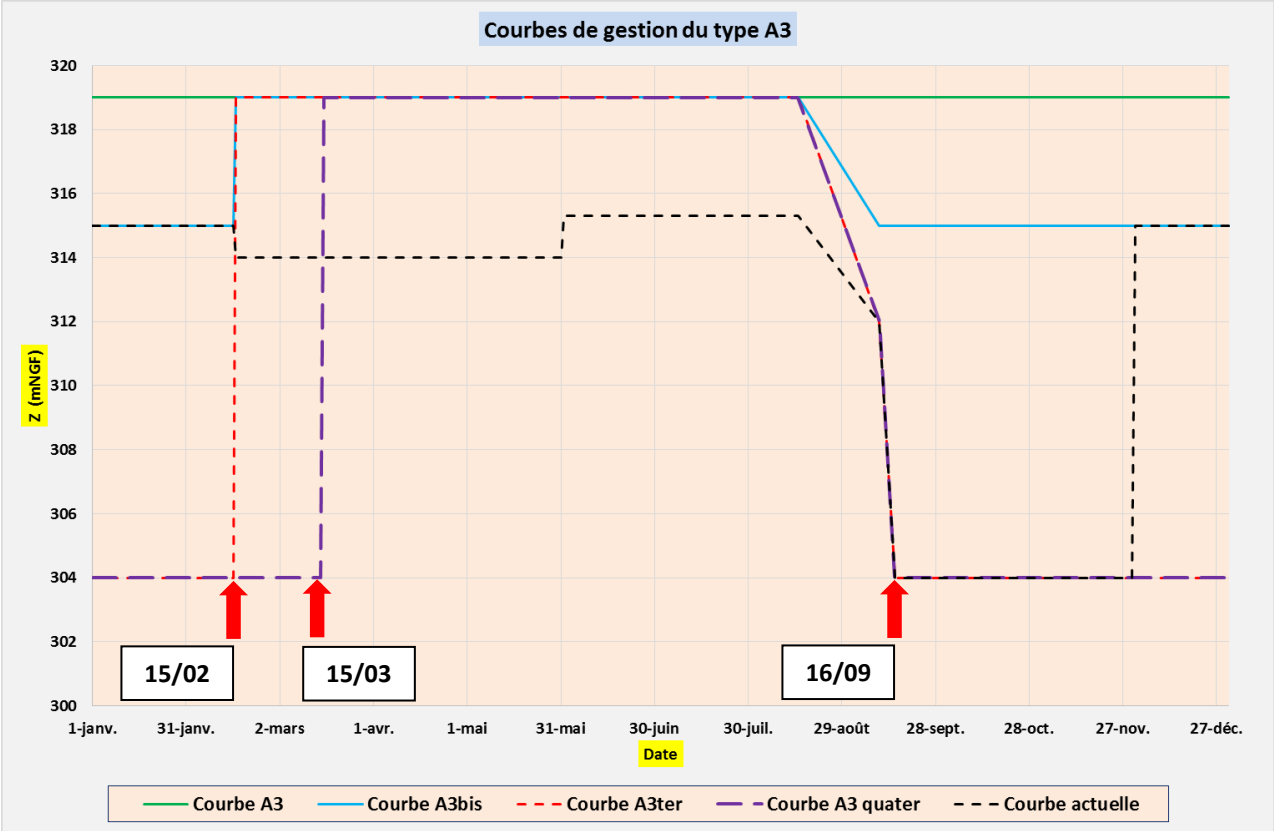

Figure 33 : Synthèse des courbes de gestion testées du type A3

	Courbe de gestion	A3	A3bis	A3ter	A3quater
Moyenne de tous les GCMs	Volume depuis Villerest pour le soutien d'étiage (m^3)	182 438 435	182 436 978	179 738 594	176 335 127
	Volume supplémentaire mobilisé % aux règles de gestion actuelle (m^3)	+21 287 803	+21 299 226	+18 600 842	+15 197 375
	Z min (mNGF)	303.4	302.2	296.5	296.4

On constate que l'abaissement dès septembre à une cote de 315mNGF n'a aucune incidence sur le volume mobilisé pour le soutien d'étiage (écart de +1 458m^3 entre A3bis et A3).

L'impact d'un abaissement à 304mNGF a une incidence plus forte sur le volume pour le soutien d'étiage de l'ordre de –2.7 millions de m^3 (*écart entre **A3ter** et **A3**).*

- ⇨ On peut par ailleurs noter que le maintien d'une cote à 304mNGF jusqu'au 15 février n'aurait pas d'incidence sur l'atteinte d'un stock à 319mNGF avant la période de soutien d'étiage.

Enfin, la dernière courbe de gestion **A3quater** démontre qu'il y a une optimisation entre le 15/02 et le 15/03 pour garantir l'atteinte du stock maximal, fixé ici à 319mNGF dans le cas présent. On remarque en effet que le maintien d'une cote à 304mNGF jusqu'au 15/03, ne permet en moyenne que d'atteindre une cote maximale de 318.1mNGF vers la mi-mai.

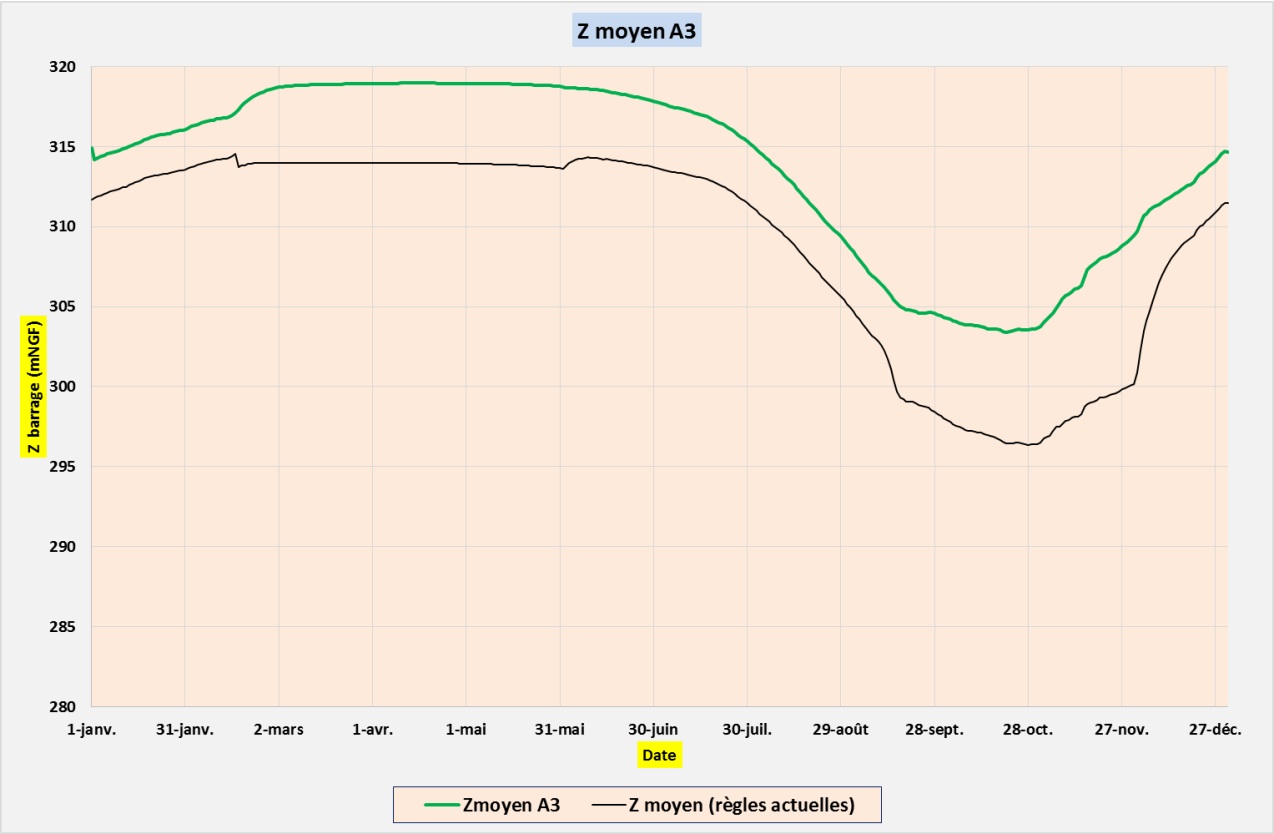

Figure 34 : Z moyen (A3)

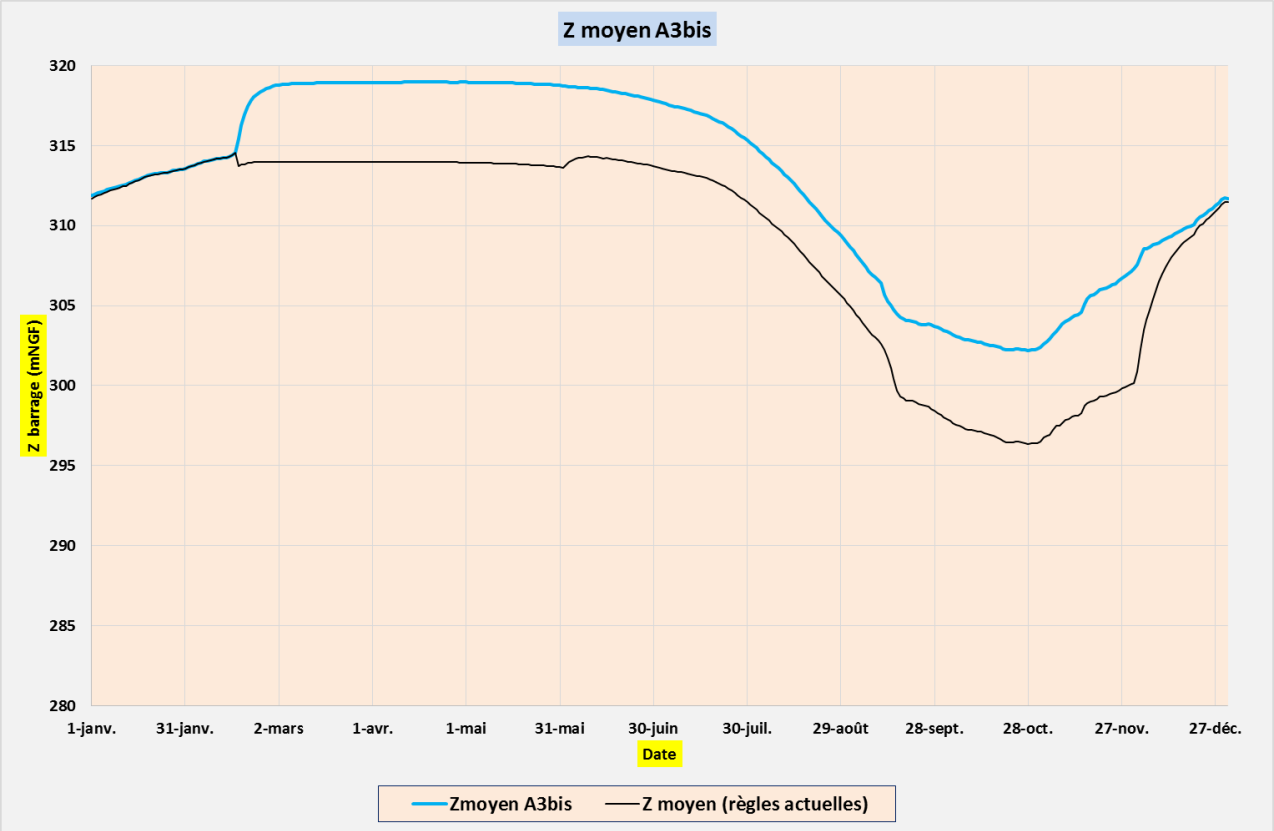

Figure 35 : Z moyen (A3bis)

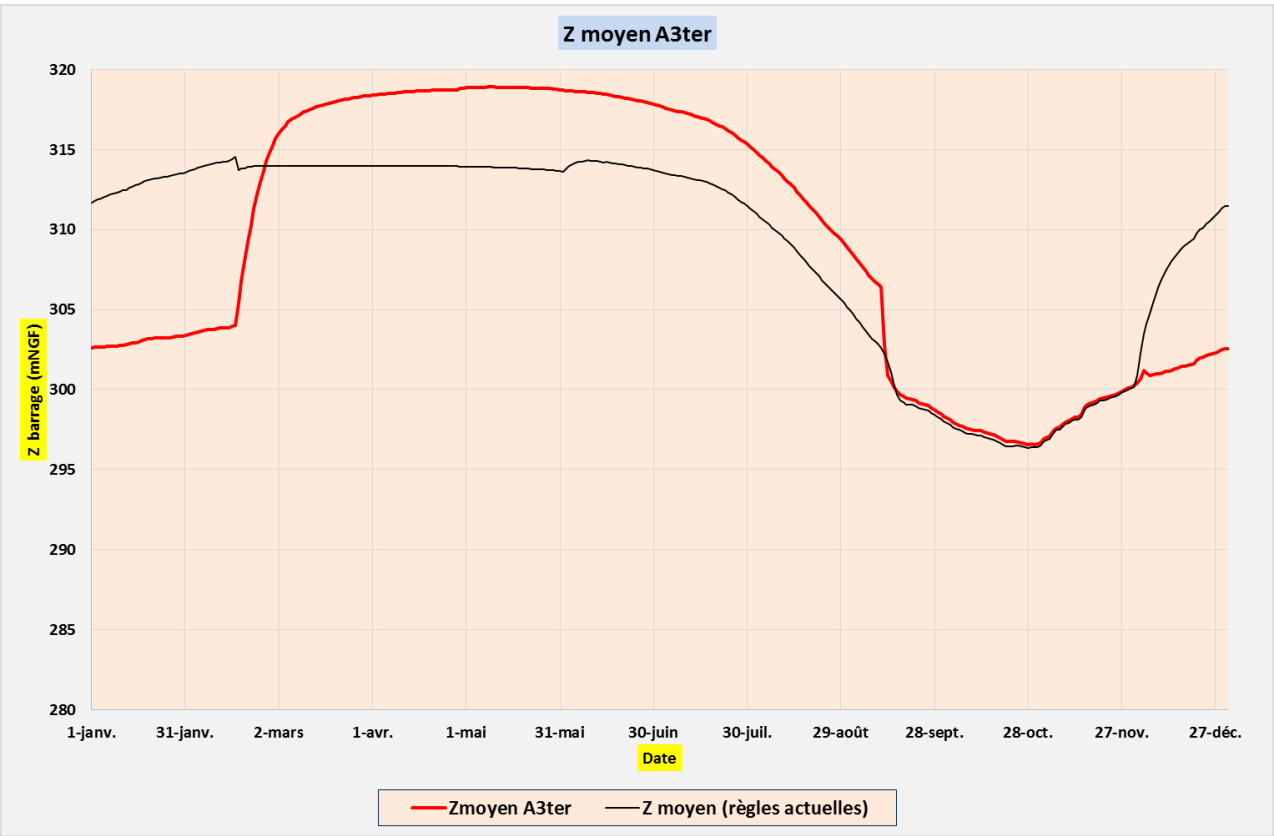

Figure 36 : Z moyen (A3ter)

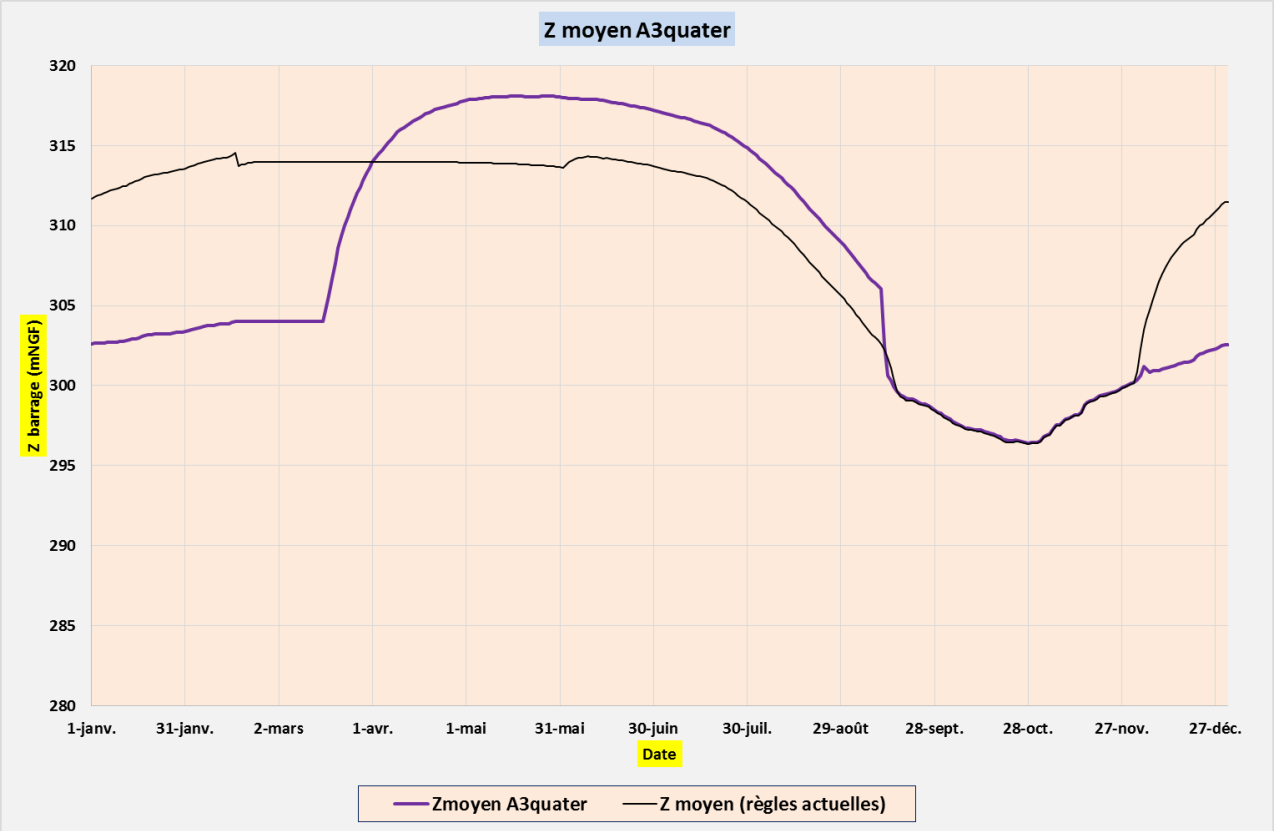

Figure 37 : Z moyen (A3quater)

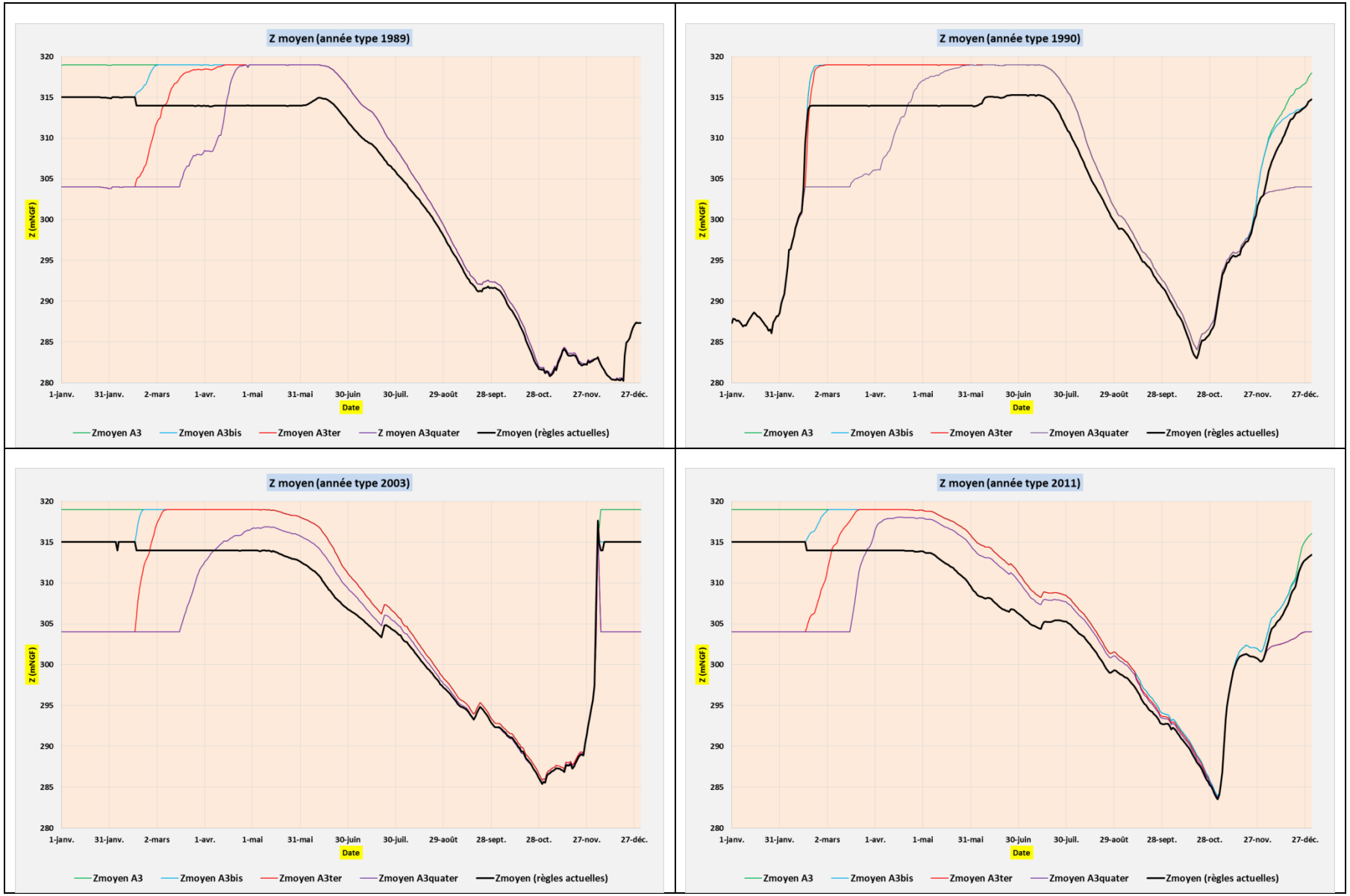

Figure 38 : Z moyen dans le barrage de Villerest (A3, A3bis, A3ter, A3quater) pour des années type 1989, 1990, 2003 et 2011

5.2 EXPLOITATION DU MODELE TYPE SCB SANS APPORTS DE NAUSSAC

On constate ainsi un gain moyen du soutien d'étiage en provenance de Villerest, pour l'ensemble des scénarios de +19.8 millions de m³. Le taux de satisfaction du respect du DOE à Gien serait également en hausse passant de 93.4 à 95.1%, alors que dans le même temps le nombre de jours moyen où Z=280mNGF, serait en baisse passant de 23.9 à 17.9 jours en moyenne.

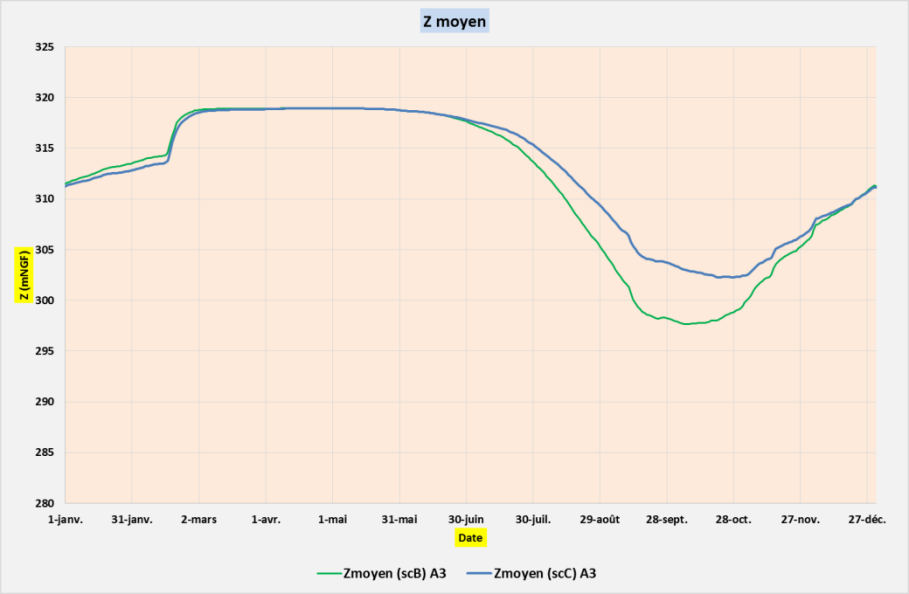

Figure 39 : Z moyen (scC A3 et scB A3)

En parallèle, on observe également une remontée du niveau le plus bas de 291.1 à 297.7mNGF, soit un différentiel de +6.6m.

GCM	Scénario scB1	scB1-A3	Gain en soutien d'étiage depuis Villerest (m³)
ccma_cgcm3	183 355 523	207 294 564	+23 939 041
cnrm_cm3	172 812 276	191 734 825	+18 922 549
csiro_mk3	120 304 689	130 332 210	+10 027 521
gfdl_cm2	196 400 208	222 401 221	+26 001 013
giss_aom	197 441 239	222 058 553	+24 617 314
giss_model	194 755 933	214 411 793	+19 655 860
ingv_echam4	129 513 623	140 259 961	+10 746 337
ipsl_cm4	171 315 154	187 502 676	+16 187 523
microc3_2_medres	192 918 922	215 726 489	+22 807 567
miub_echo	184 590 364	204 424 165	+19 833 801
mpi_echam	167 940 808	184 666 750	+16 725 942
mri_cgcm	124 042 251	133 111 491	+9 069 240
ncar_ccsm	195 790 216	220 970 249	+25 180 033
Moyenne	**171 629 324**	**190 376 534**	**+18 747 211**

Pour l'un des GCMs les plus contraignant à savoir le ncar_ccsm, on peut ainsi avancer pour des années similaires à 1989, 2003, 2005 et 2011 sous l'effet du changement climatique les volumes suivants :

Année type	Volume de Villerest pour le soutien d'étiage	
	Gestion actuelle	Gestion A3
	(millions de m³)	*(millions de m³)*
1989	**207.8**	**247.8 (+40)**
2003	**189**	**232.7 (+43.7)**
2005	**211.1**	**253.6 (+42.5)**
2011	**245.6**	**287.8 (+42.2)**

Il faut bien rappeler que dans le cadre des modélisations sans apports de Naussac, le barrage de Villerest se retrouve vide certaines années pour les GCMs les plus critiques. C'est le cas par exemple pour le GCM ncar_ccsm, et les années présentées ci-dessus.

6 CONCLUSIONS

Au-delà de proposer une courbe d'adaptation, cette dernière phase de l'étude a pour vocation d'identifier les meilleurs axes d'adaptation aux évolutions climatiques à l'horizon 2046-2065. De nombreuses contraintes existent naturellement sur un barrage, et le choix d'une courbe d'adaptation devra émerger d'un processus d'échanges entre toutes les parties prenantes, en confrontant les cotes imposées par les usages actuels, avec les cotes à privilégier pour répondre aux évolutions climatiques en termes de soutien d'étiage et de risque de crue.

Quels sont les principaux axes d'adaptation au changement climatique qui se dégagent des tests réalisés sur l'adaptation de la courbe de gestion du barrage de Villerest ?

- Les rapports précédents ont clairement mis en avant l'accroissement des besoins en termes de soutien d'étiage à Gien, au regard du DOE actuel. La saison de soutien d'étiage commence véritablement début mai. *Dès lors, plus la cote de remplissage du barrage est élevée à cette période, plus la capacité du barrage à soutenir les débits à Gien est améliorée*

  Naturellement, plusieurs autres aspects contradictoires sont à considérer, limitant la cote envisageable. En premier lieu, ce barrage qui a comme rôle l'écrêtement des crues, impose des cotes maximales qu'il s'agirait d'étudier de manière plus complète que ce qui est fait dans le présent rapport. Le barrage dispose aujourd'hui de déversoirs de crue dont le radier est calé à la cote de 320mNGF. En conséquence, en considérant une revanche de l'ordre de 1m, on comprend bien que la cote de remplissage maximale envisageable serait de 319mNGF, dans la configuration structurelle actuelle. Cette cote paraît difficilement atteignable au regard notamment du risque de crue et probablement des risques structurels sur l'ouvrage, *liés à une augmentation de l'intensité et de la fréquence des sollicitations mécaniques.*
  D'autre part, les usages aujourd'hui présents sur le barrage nécessitent de limiter cette cote de remplissage.

  ⇨ L'adaptation consistera donc à relever le niveau d'eau dans le barrage le plus haut possible avant le 1er mai, en arbitrant entre sécurité, usages et besoins en soutien d'étiage.

  Les scénarios A2 intègrent le relèvement d'1m par rapport à la cote actuelle (de 315.3mNGF). Ces tests ne constituent pas une proposition finalisée d'adaptation, mais ont vocation à quantifier les gains obtenus avec cette modification des cotes de gestion du barrage.

- En parallèle, les différents tests réalisés ont montré l'importance de la date à laquelle la cote de remplissage est fixée.

  ⇨ On constate ainsi qu'une optimisation semble se produire pour l'atteinte de la cote de remplissage, entre le 15 février et le 15 mars.

- Enfin, il ne faut pas négliger le risque de crue qui amène naturellement des règles contradictoires au soutien d'étiage. Tout d'abord, il paraît difficile de faire abstraction des 2 plus fortes crues historiques qui se sont produites en automne *(septembre 1866 et octobre 1846)*, en augmentant la cote actuelle fixée à 304 dès le 11/09.

> ⇨ Les tests réalisés en décalant la cote de remplissage au-delà de cette date, ont montré naturellement une légère amélioration à soutenir les étiages depuis Villerest. Les gains obtenus ne semblent toutefois pas justifier la transgression de cette règle.

Une adaptation dans la gestion actuelle de l'ouvrage pourrait par contre concerner la prise en compte du décalage du risque de crue sur la période hivernale. L'exploitation des chroniques de débits à l'horizon 2046-2065 a en effet conclut à la survenue de moins de crues en automne mais plus en hiver. Sans pouvoir véritablement apprécier l'évolution des intensités de ces crues, liées probablement aux limites des projections actuelles et également au pas de temps de calcul utilisé, il est apparu judicieux de tester la prolongation d'une cote à 304mNGF sur la période hivernale.

> ⇨ Les simulations réalisées ont ainsi mis en avant la possibilité de prolonger cette cote de gestion jusqu'au 15 février sans toutefois mettre en défaut l'atteinte de l'objectif de remplissage, fixé début mai.

		A1	A1bis	A1ter	A1quater	A1quinter	A2	A2bis	A2ter	A2quater	A2quinter	A3	A3bis	A3ter	A3quater
Courbes de gestion		Décalage des dates de remontée ou de descente de la cote de gestion, sans modifier les valeurs à atteindre actuellement					Augmentation de la cote maximale de remplissage à 316.30mNGF au lieu de 315.30mNGF actuellement + décalage des dates de remontée et de descente de la cote					Cote de gestion à 319mNGF toute l'année avec une variante intégrant un abaissement à 304 ou 315mNGF durant la période hivernale (septembre à février)			
Description du scénario		Scénario actuel décalé pour conserver le stock et favoriser la mobilisation des évènements de début d'automne pour le soutien d'étiage, et intégrer le risque de crue vers l'hiver, en maintenant la cote à 304mNGF du 01/11 au 31/12.	Descente plus tardive à 304mNGF.	Maintien d'une cote à 304mNGF jusqu'au 15/02.	Prolongation de la cote 304mNGF jusqu'au 15/03.	Scénario actuel avec le maintien de la cote à 304mNGF jusqu'au 15/02.	Relèvement de la cote de remplissage fixé à 316.3mNGF.	Cote à 316.30mNGF dès le 15/02.	Maintien d'une cote à 304mNGF jusqu'au 15/02 pour mieux intégrer le décalage du risque de crue en hiver.	Abaissement de la cote de gestion à 304mNGF comme aujourd'hui dès le 15/09.	Prolongation d'une cote à 304mNGF jusqu'au 15/03.	Cote de gestion à 319mNGF toute l'année.	Baisse de la cote 319mNGF à 315mNGF sur la période la plus à risque pour les crues (du 11/09 au 15/02).	Baisse de la cote 319mNGF à 304mNGF sur la période la plus à risque pour les crues (du 11/09 au 15/02).	Maintien de la cote 304mNGF jusqu'au 15/03.
Résultats	**Gain moyen pour le soutien d'étiage par rapport au scénario actuel**	**+0.5 Mm³**	**+0.5 Mm³.**	**+0.5 Mm³.**	**-1.2 Mm³**	**+0 m³**	**+3.2 Mm³**	**+7.4 Mm³**	**+7.4 Mm³**	**+6.6 Mm³**	**+4.7 Mm³**	**+21.3 Mm³**	**+21.3 Mm³**	**+18.6 Mm³**	**+15.2 Mm³**
	Autres commentaires	/	Le **décalage de la date de descente à 304mNGF au-delà du 15/10** comporte **peu d'intérêts.**	**Atteinte en moyenne du niveau de remplissage** à 315.3mNGF avant la période de soutien d'étiage.	**Baisse** du **niveau moyen de remplissage** de **-0.20m.** **Optimisation entre le 15/02 et le 15/03.**	**Pas d'impact sur l'atteinte de la cote de remplissage** avant le début du soutien d'étiage.	Maintien de la **cote 314mNGF jusqu'au 31/05** = **non atteinte** en moyenne **de la cote de remplissage** de 316.30mNGF.	**316.30mNGF atteint dès le 27/02.**	**Possibilité de maintenir une cote à 304mNGF sur la période hivernale.**	/	**Cote de remplissage** à 316.3mNGF **non atteinte.** **Optimisation entre le 15/02 et le 15/03.**	/	**Atteinte du même niveau de remplissage dès début mars.**	**Pas d'incidence sur l'atteinte d'un stock à 319mNGF** avant la période de soutien d'étiage.	**Non atteinte de l'objectif de remplissage.** **Optimisation entre le 15/02 et le 15/03.**

Tableau 40 : Tableau de synthèse des résultats obtenus avec les différentes de courbes de gestion de type A1, A2 et A3