Restitution des résultats de l'étude d'adaptation du mode de gestion du barrage de Villerest sous l'effet du changement climatique

A titre liminaire, il peut être rappelé l'efficacité de la gestion des ouvrages « de bassin » de Naussac et de Villerest, avec un service rendu incontestable :

- lors des étiages de 2003 (le plus sévère pour Villerest depuis 1985) ou de 2015 (le plus long pour les 2 barrages depuis 1983) ;
- lors des crues de 2003 et 2008, les deux plus intenses depuis 1907 (réduction significative des hauteurs d'eau de l'ordre de 2 m à Roanne et de 0.4 m à Tours).

Dans ce contexte, force est de considérer que le mode d'exploitation actuel a permis au barrage de Villerest de répondre aux deux sollicitations hydrologiques extrêmes que sont les crues et les étiages.

Conformément au règlement d'eau du barrage, en période normale, la retenue est gérée à une cote constante dans une plage de marnage de 50 cm. Le barrage assure un débit sortant minimal de 12 m³/s au pied de l'ouvrage.
En crue, le principe de gestion du barrage est de contrôler le débit sortant en ouvrant plus ou moins les vannes mobiles du barrage, en fonction des débits prévus et observés à l'entrée de la retenue. Ainsi, au plus fort de la crue, le débit sortant est inférieur au débit entrant, ce qui atténue les niveaux maxima qui devraient être atteints à l'aval sans le barrage.
En étiage, le barrage de Villerest participe au soutien des débits de la Loire à Roanne avec un objectif de 12 m³/s, ainsi qu'à Gien pour un objectif variant entre 50 et 60 m³/s.

Cela étant, l'Etablissement a engagé depuis 2007 l'intégration opérationnelle des connaissances scientifiques sur le changement climatique dans certaines de ses missions, dans un souci d'anticipation. A ce titre, il a notamment lancé, à l'automne 2015, une étude d'adaptation du mode de gestion du barrage de Villerest face aux effets du changement climatique à l'horizon 2065.

I. Déroulement et objectifs

L'étude a comporté trois phases :

Analyse de l'impact du changement climatique sur le fonctionnement du barrage de Villerest

Dans cette 1ère phase, l'étude adopte l'hypothèse que les évolutions socio-économiques à l'horizon 2065 n'ont pas d'effets supplémentaires sur les besoins en eau à l'amont et à l'aval du barrage de Villerest.

L'objectif est d'identifier la tendance:

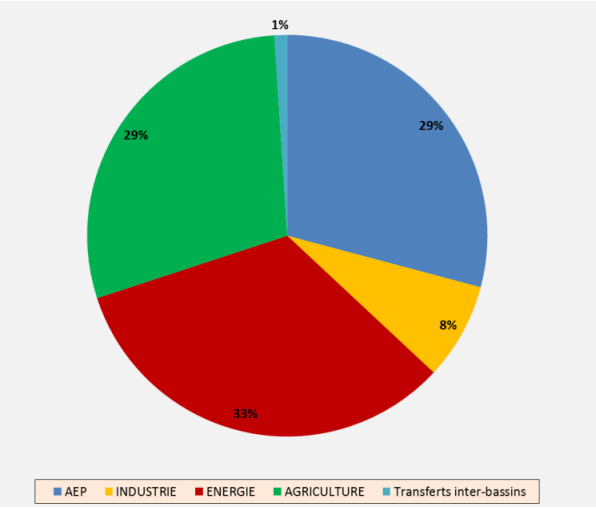
- des débits naturels d'étiage à la fois à l'amont du barrage ainsi qu'au niveau des points objectifs sur la Loire, à l'aval du barrage ;
- des évènements de crue en matière d'intensité et de fréquence, en amont du barrage.

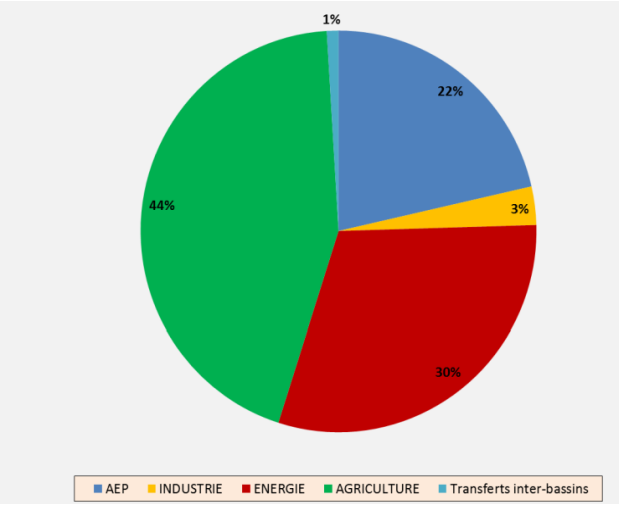
Analyse de l'impact combiné des évolutions socio-économiques et du changement climatique sur le fonctionnement du barrage de Villerest

Cette 2ème phase de l'étude cherche à quantifier l'impact des évolutions socio-économiques à l'horizon 2065 sur les capacités de l'ouvrage de Villerest à assurer l'écrêtement des crues et le soutien des étiages, en évaluant dans un premier temps l'influence seule de ces évolutions, puis en le superposant dans un second temps aux effets du changement climatique. Il est fait usage ici des projections établies dans le cadre du projet Explore 2070 sur l'ensemble du territoire français (http://www.developpement-durable.gouv.fr/Prospective-socio-economique-et.html).

Les principales hypothèses sur le bassin de la Loire, basées sur deux scénarios de répartition de l'habitat (concentration ou étalement), sont:

- une baisse des prélèvements pour l'adduction d'eau potable (AEP) et une hausse pour l'agriculture (usage le plus consommateur d'eau à l'horizon 2070 selon les projections faites du projet Explore 2070) ;
- une baisse des prélèvements industriels du fait des progrès technologiques ;
- un maintien des productions énergétiques à l'horizon 2065 sur le bassin de la Loire à partir des centrales nucléaires et thermiques. La projection s'appuie sur un échéancier de renouvellement des centrales actuellement existantes (sur la base d'une durée de fonctionnement de 50 ans par rapport à leur année de démarrage) et d'une augmentation des capacités installées.





Répartition des volumes de prélèvements annuels par usage (scénario de concentration de l'habitat) à gauche : pour l'année 2006 (2.35 milliards de m^3) – à droite : pour l'année 2070 (2.55 milliards de m^3) (source : Explore 2070)

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

A partir des constats des 2 phases précédentes, des propositions d'adaptation du schéma d'exploitation sont faites en vue d'optimiser le remplissage de la retenue et afin de satisfaire le soutien d'étiage au pied de l'ouvrage et à Gien. Cette 3ème phase de l'étude doit également permettre d'identifier les ajustements possibles afin d'optimiser la fonction d'écrêtement des crues du barrage.

II. Approche utilisée

L'étude a utilisé les données du projet de recherche ICC-HYDROQUAL (Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDROlogie, Régime thermique, QUALité des eaux), réalisée avec le soutien de l'Etablissement il y de cela plusieurs années déjà (Voir Plaquette de vulgarisation produite en annexe). Ce projet a notamment permis de produire des scénarios hydrologiques à différents horizons de temps :

- Temps Présent (TP): période de 1961 à 2000
- Milieu du Siècle (MS): 2046 à 2065
- Fin du Siècle : 2081 à 2100

13 séries de débits moyens journaliers, correspondant aux 13 modèles de circulation globale (ou GCM) ont ainsi été produites sur chaque période. Ils correspondent aux projections climatiques de différents laboratoires ou organismes de recherche nationaux ou internationaux, produites à partir du scénario d'émission intermédiaire A1B du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) :

1. CCMA CGCM3 (Canada)
2. MRI CGCM (Japon)
3. MPI-ECHAM (Allemagne)
4. MIUB ECHO (Allemagne/Corée)
5. MIROC 3.2 MEDRES (Japon Université de Tokyo)
6. IPSL CM4 (France IPSL)
7. INGV ECHAM4 (Italie)
8. GISS-ER (États-Unis NASA/GISS)
9. GISS-AOM (États-Unis NASA/GISS)
10. GFDL-CM2 (États-Unis NOAA/GFDL)
11. CSIRO-MK3 (Australie)
12. CNRM-CM3 (France Météo-France)
13. NCAR CCSM3 (États-Unis NCAR)

Les indicateurs analysés sont :

1) Pour l'étiage :

   - QMNA5 : il est défini comme étant le débit moyen mensuel sec de récurrence 5 ans.

   - Le Module : il s'agit du débit moyen interannuel calculé sur l'année hydrologique et sur l'ensemble de la période d'observation de la station. Ce débit donne une indication sur le volume annuel moyen écoulé et donc sur la disponibilité globale de la ressource. Les débits moyens mensuels ont été évalués, pour notamment apprécier l'évolution du régime hydrologique globale.

   - Le débit quinquennal sec: on appelle par convention étiage quinquennal, un étiage ayant une probabilité 1/5 de ne pas être dépassée.

2) Pour les crues :

   - QJ10 ans : Il s'agit du débit moyen journalier de période de retour 10 ans, qui a donc une chance sur 10 chaque année de ne pas être dépassée.

   - Les dates des maxima annuels de crue : il s'agit des dates des débits moyens journaliers maximum constatés pour chaque année hydrologique. Elles permettent d'apprécier des évolutions en termes de saisonnalité des crues

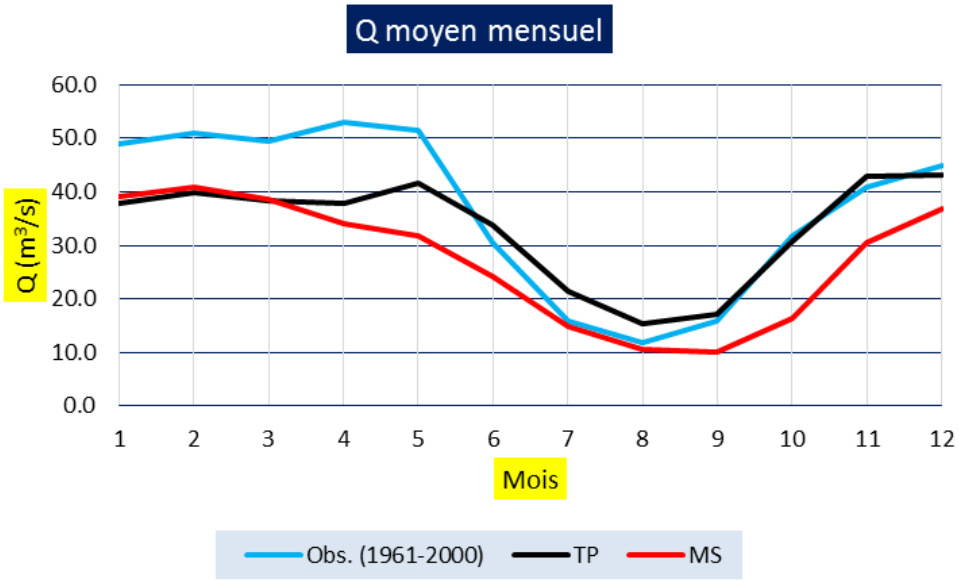
III. Résultats

III.1. Phase 1 : Analyse de l'impact du changement climatique sur le fonctionnement du barrage de Villerest

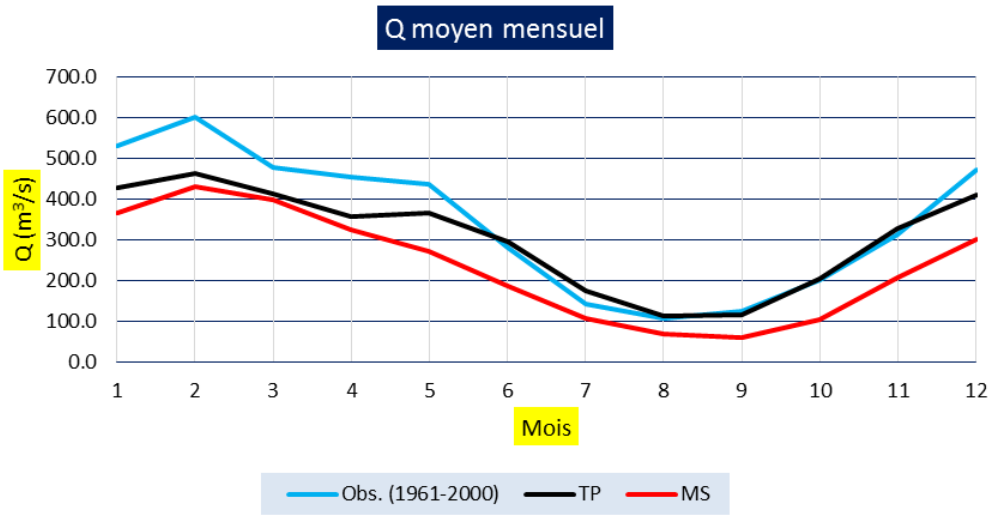
- **Tendance des débits naturels d'étiage et de crue**

L'étude a montré les évolutions suivantes :

- un **<u>décalage du mois où les débits sont les plus faibles</u>**, passant du mois d'août (pour les débits observés ou en Temps Présent) au mois de septembre en Milieu de Siècle.



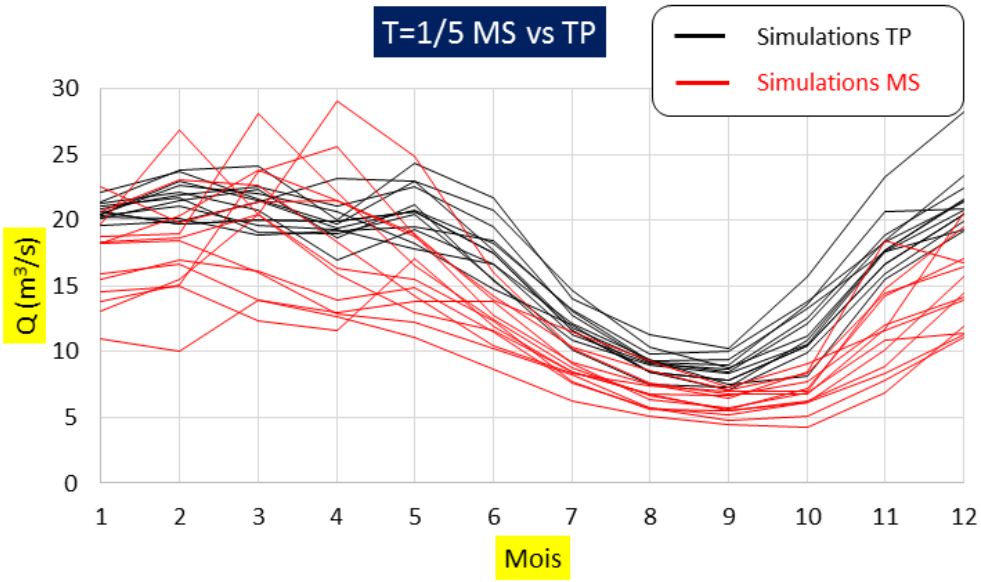
(a)



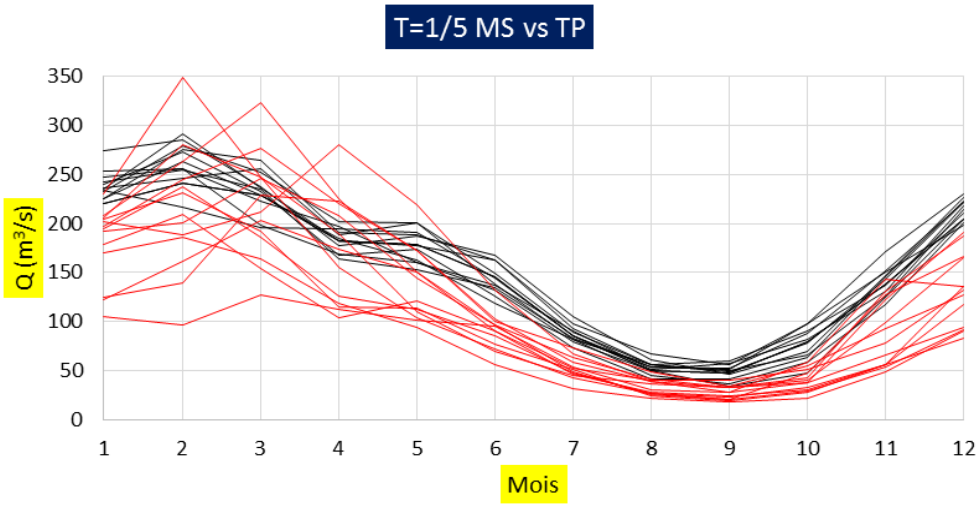
(b)

Variation du Débit moyen mensuel (Observé 1961-2000, TP et MS)
(a) : à l'amont de Villerest (Bas-en-Basset) – (b) : à l'aval de Villerest (Gien)

- une baisse généralisée du débit quinquennal sec pour tous les mois de l'année (-40 % à Villerest, -45% à Gien) ainsi qu'une **prolongation de l'étiage jusqu'au mois d'octobre**.



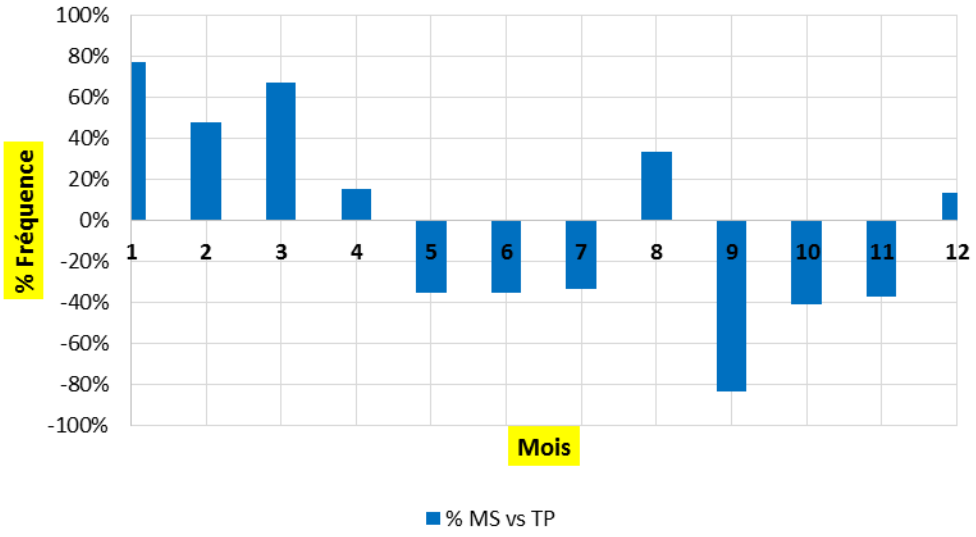
(a)



(b)

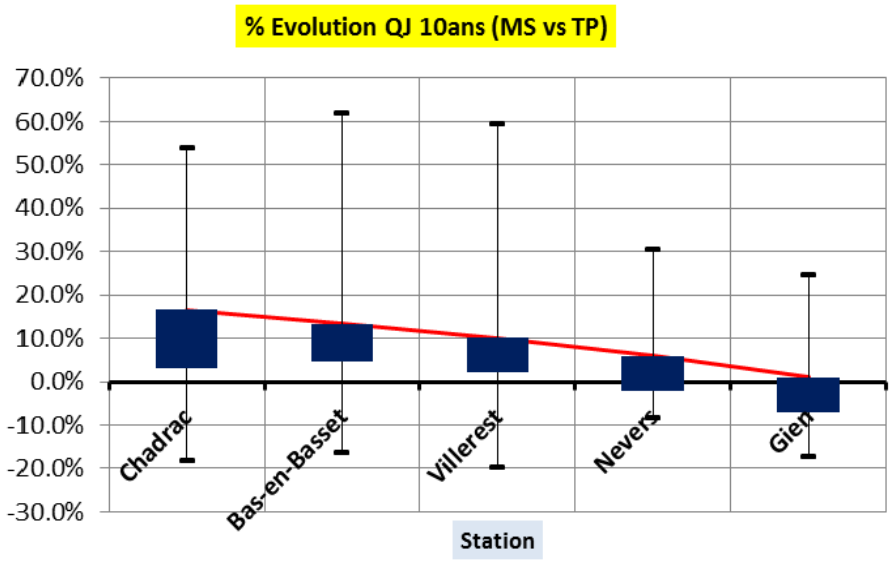
Variation du Débit quinquennal sec (TP et MS)
(a) : à l'amont de Villerest (Bas-en-Basset) – (b) : à l'aval de Villerest (Gien)

- une **augmentation de la fréquence des crues à l'amont du barrage durant les mois de janvier à mars ainsi qu'une diminution le reste de l'année**.



Variation de la fréquence des crues en amont de Villerest (Bas-en-Basset) entre « Temps Présent » et « Milieu du Siècle »

- une tendance à l'augmentation pour le QJ10ans, qui s'atténue d'amont en aval.



Evolution du débit QJ10ans à l'amont et à l'aval du barrage de Villerest entre « Temps Présent » et « Milieu du Siècle »

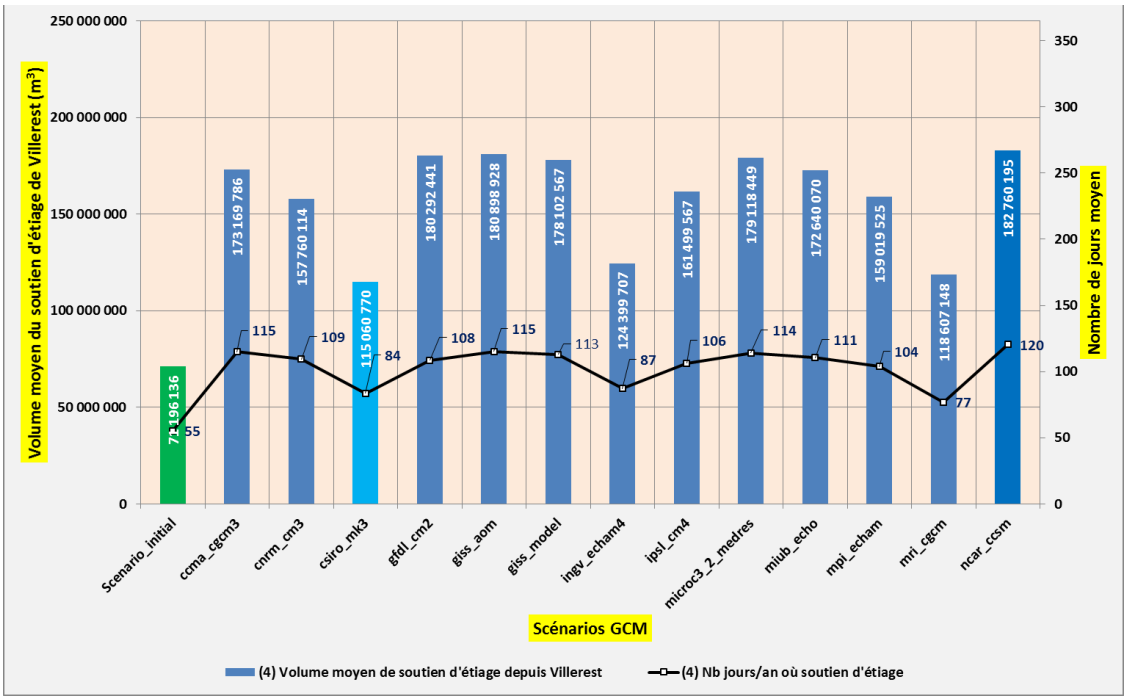
- **Impact sur la performance du barrage de Villerest**

Les simulations ont abouti aux principales conclusions suivantes :

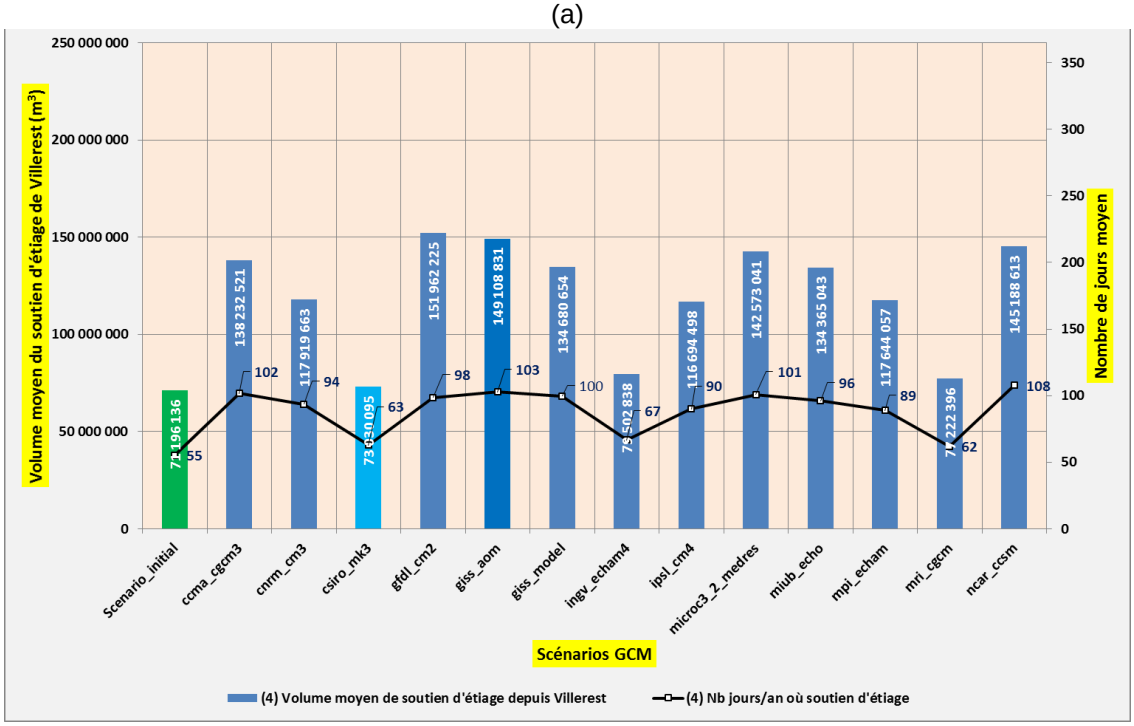
-une **diminution du nombre d'années où le barrage est plein entre le 1er juin et le 30 juin**,

-une **augmentation du nombre de jour de soutien d'étiage et du volume nécessaire depuis Villerest** (près de 50 Mm³ supplémentaires à mobiliser en plus des volumes actuels pour un objectif à 50 m³/s - 90 Mm³ supplémentaires pour un objectif à 60 m³/s) avec

l'hypothèse que le barrage de Naussac compense l'intégralité du déficit de Villerest lorsque ce dernier atteint son volume plancher.



(a)

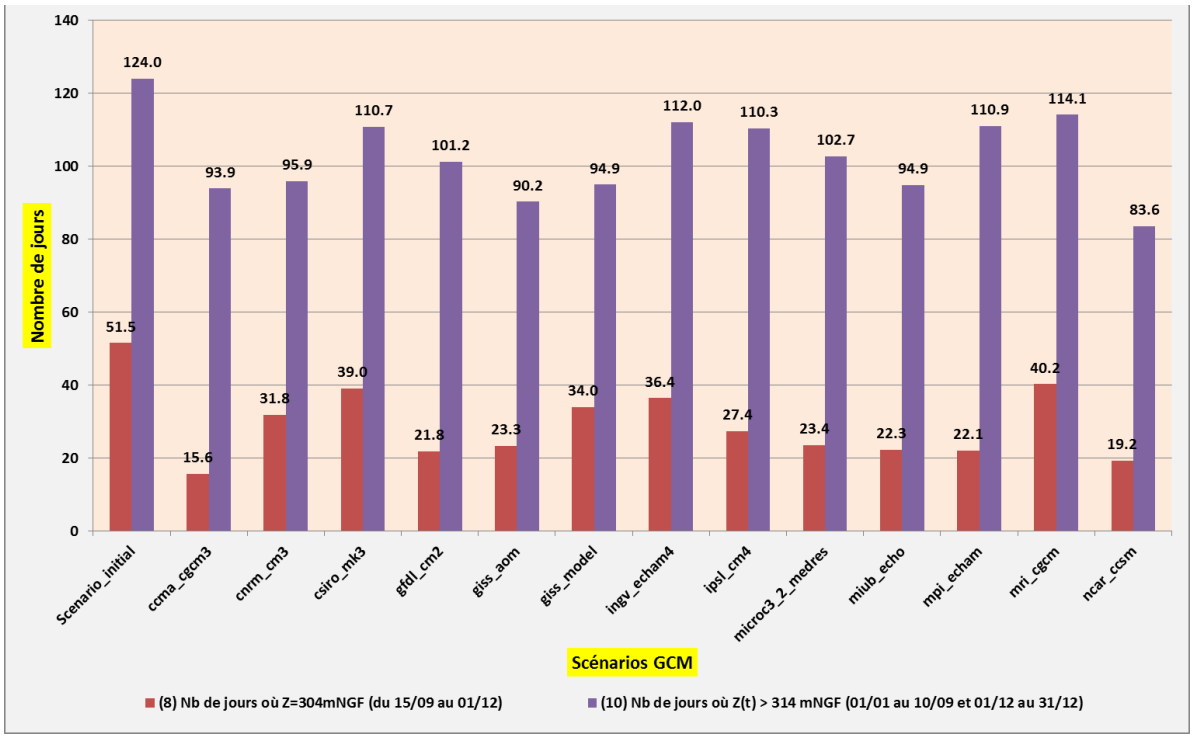


(b)

Volume et nombre de jours moyen du soutien d'étiage depuis le barrage de Villerest
(a) pour un objectif de 60 m³/s à Gien - (b) pour un objectif de 50 m³/s à Gien

-Une diminution du nombre de jours où Z(t) > 314mNGF du 01/01 au 10/09 et du 01/01 au 31/12, passant de 124 jours en l'état actuel à des valeurs comprises entre 83 à 114 jours. Cela traduit la **difficulté à remplir le barrage après l'étiage**. Cela signifie également la **baisse du**

nombre de déstockages potentiellement nécessaires en cas de risque de crue ou de crue.



Nombre de jours où la cote est supérieure à 304 mNGF (du 15/09 au 01/12) et 314 mNGF (du 01/01 au 10/09 et du 01/12 au 31/12)

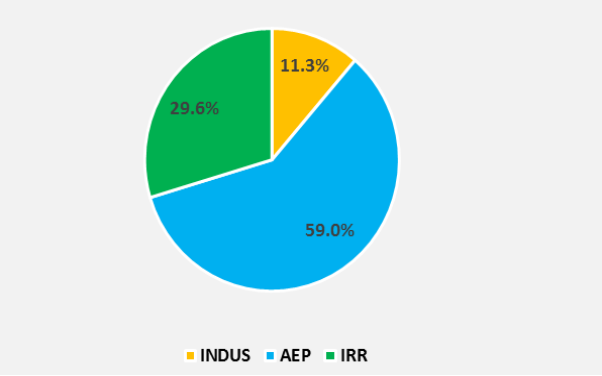
-Une baisse du nombre d'années où la cote de la retenue sera supérieure à 304 mNGF du 15/09 au 01/12, passant de 52 jours en l'état actuel à des valeurs comprises entre 19 à 45 jours, ce qui traduit encore une fois la diminution de la fréquence des crues durant cette période.

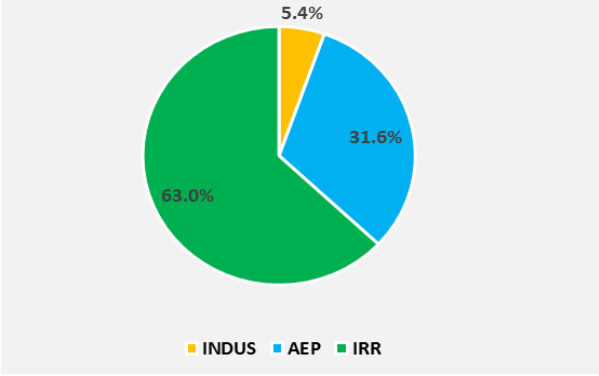
III.2. Phase 2 : impact combiné des évolutions socio-économiques et du changement climatique sur le fonctionnement du barrage de Villerest

Le cadre fixé pour l'étude a consisté à exploiter les projections réalisées dans le cadre du projet Explore 2070. Les résultats produits dans le cadre de cette démarche prospective relèvent de nombreuses hypothèses sur la croissance économique, l'évolution démographique, l'évolution des surfaces irriguées… qui n'intègrent pas de tendances fines à l'échelle des bassins versants.

La déclinaison de ces hypothèses à l'échelle du bassin en termes de volume de prélèvement annuel a donné les résultats suivants.

- A l'amont de Villerest, l'évolution des prélèvements par type d'utilisation est représentée sur les graphiques suivants :





Pourcentage des volumes annuels de prélèvement à l'amont de Villerest par type d'usage
à gauche : pour l'année 2006 (45 Mm^3) – à droite : pour l'année 2065 (44.5 Mm^3)

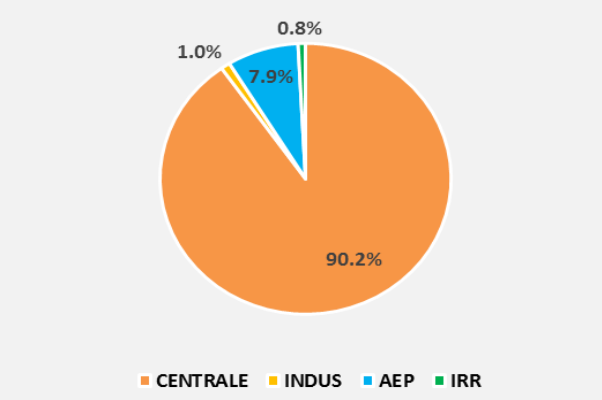
La prise en compte de ces tendances dans les projections a abouti aux conclusions suivantes :

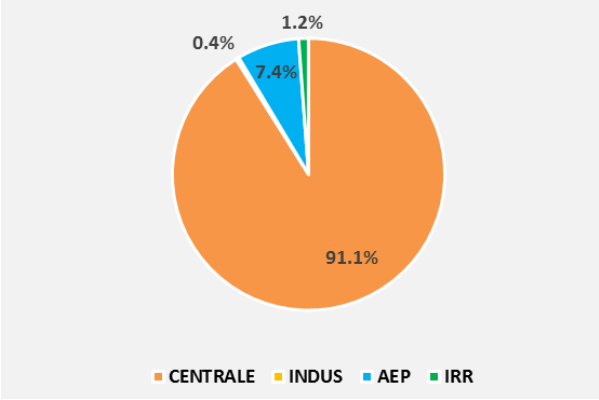
-L'ensemble des prélèvements à l'amont du barrage entraînerait à l'horizon 2065 une diminution du débit entrant au barrage inférieure à 1.3 m^3/s durant les mois les plus secs (juillet et août).

-Les volumes disponibles dans la retenue de Villerest pour le soutien d'étiage à Gien seraient en légère baisse. Le déficit moyen serait de l'ordre de -4.2 millions de m^3 par an. Cette baisse devra être compensée par une augmentation des lâchers d'eau depuis le barrage de Naussac.

-Multiplier les prélèvements à l'amont du barrage à l'horizon 2065 par 3 (30 Mm^3 contre 11.5 Mm^3 d'après les hypothèses d'Explore 2070) provoquerait une augmentation du déficit de remplissage de l'ordre de 3 Mm^3, ce qui représenterait 5.4% du volume de la retenue si la cote 315.30 mNGF est atteinte. L'impact des prélèvements à l'amont du barrage sur le remplissage reste relativement modéré.

- A l'aval de Villerest, l'évolution des prélèvements par type d'utilisation est représentée sur les graphiques suivants :





Pourcentage des volumes annuels de prélèvement à l'aval de Villerest par type d'usage
à gauche : pour l'année 2006 (2,026 Milliard de m^3) – à droite : pour l'année 2065 (2,007 Milliard de m^3)

La prise en compte de ces tendances dans les projections a abouti aux conclusions suivantes :

-Le débit de prélèvement moyen à l'étiage pour l'irrigation va augmenter de 1.2 m³/s à l'horizon 2065.

-Les prélèvements concernent en majorité le refroidissement des centrales. Ils varient entre 1.4 et 1.9 milliards de m³/an sur la période 2002 à 2009. Selon les hypothèses du projet Explore 2070, ce volume serait maintenu à l'horizon 2065.

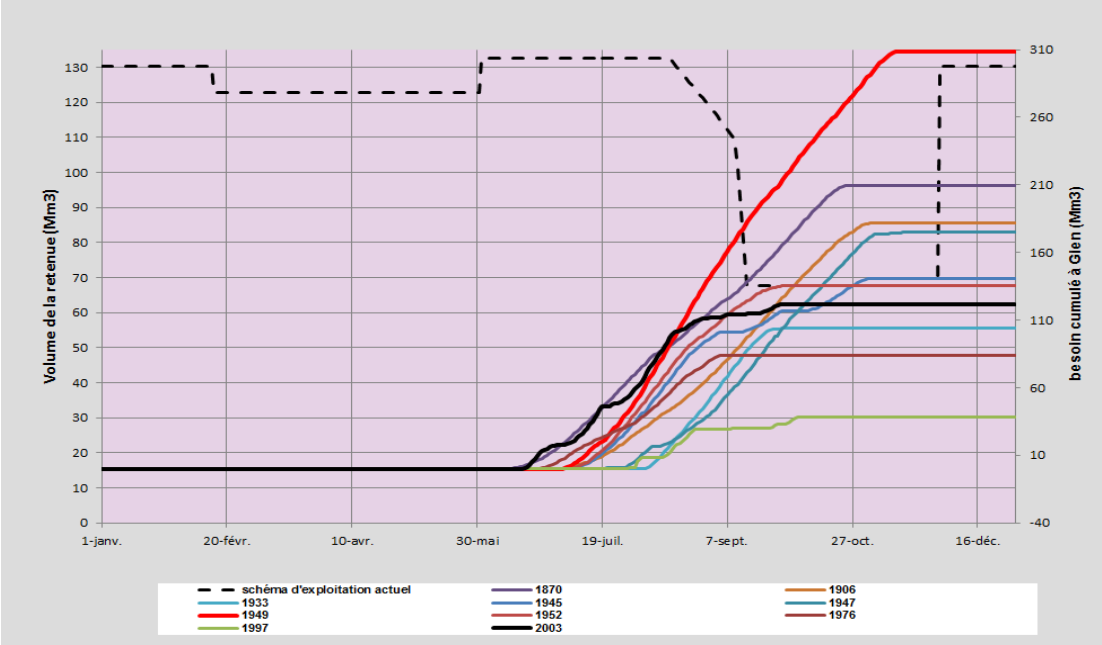
-Les prélèvements pour l'industrie et l'AEP seraient en baisse, liées à des modifications de process, des améliorations des rendements AEP et des baisses du taux de consommation (une partie des hypothèses d'Explore 2070).

-Le débit moyen de prélèvements à l'étiage sur la Loire à l'horizon 2065, conduirait donc au final à une légère augmentation du besoin de l'ordre de +0.6 m³/s. Le secteur aval est donc marqué par un **statu quo des besoins en soutien d'étiage**, en raison de l'hypothèse de maintien des capacités de puissance énergétique.

III.3. Phase 3 : Elaboration d'une stratégie d'adaptation du mode de gestion du barrage de Villerest

- **Constats de départ**

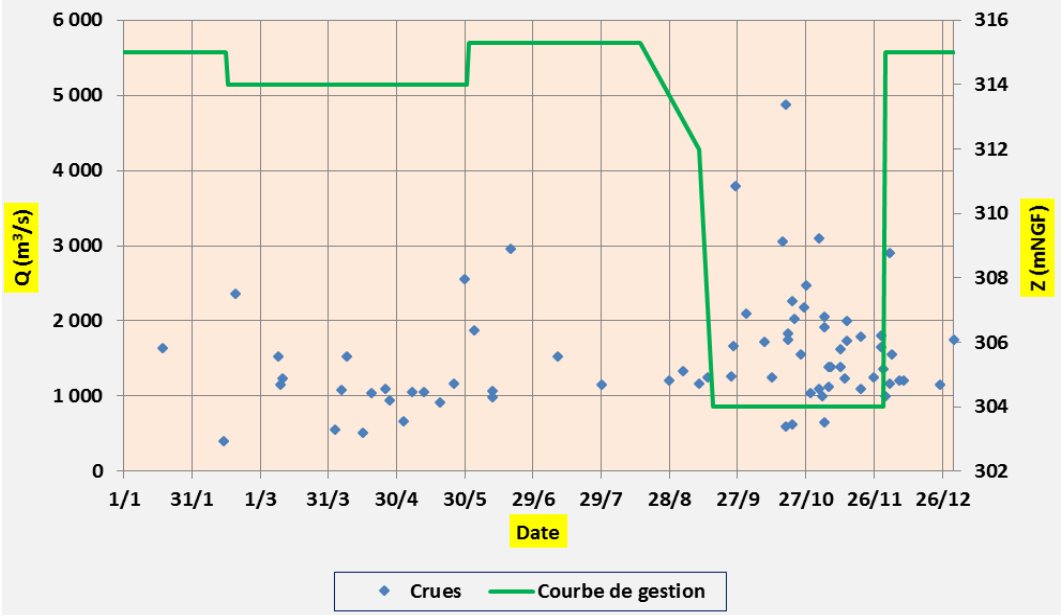
L'analyse des besoins historiques de soutien à Gien permet de constater que le soutien d'étiage commence généralement début juin et se termine fin octobre, avec des volumes inférieurs à 310 Mm³. Le schéma d'exploitation actuel de Villerest permet théoriquement de disposer d'un volume initial de 132 Mm³ au début du mois de juin (cote 315.30 mNGF), ce qui ajouté aux 190 Mm³ provenant de Naussac (remplissage maximal), devrait permettre de soutenir un objectif de 50 m³/s à Gien, même dans le cas d'un étiage très sévère du type de 1949.



Superposition des besoins en soutien d'étiage à Gien pour un objectif de 60 m³/s avec le schéma d'exploitation actuel

D'un autre côté, l'analyse des différentes crues observées sur la Loire à l'amont du barrage fait apparaître deux périodes de concentration des évènements, au cours desquelles sont notamment survenues les crues d'octobre 1846 et de septembre 1866 : la période allant du 15

février au 31 mai, ainsi que celle allant du 15 septembre au 30 novembre. Cela explique la nécessité d'abaisser la cote durant ces périodes jugées à risque.



Superposition des crues à l'amont du barrage de Villerest et du schéma d'exploitation actuel

- **Pistes d'adaptation identifiées**

Différents scénarios ont été testés afin d'adapter le schéma d'exploitation face aux impacts du changement climatique.

-Un premier groupe de scénarios a consisté à décaler simplement les dates de remontée ou d'abaissement de la cote sans modifier les valeurs à atteindre actuellement.

-Le deuxième groupe a consisté à remonter la cote maximale de remplissage au 1er juin à 316.30 mNGF au lieu de 315.30 mNGF actuellement, puis à décaler les dates de remontée et d'abaissement de la cote.

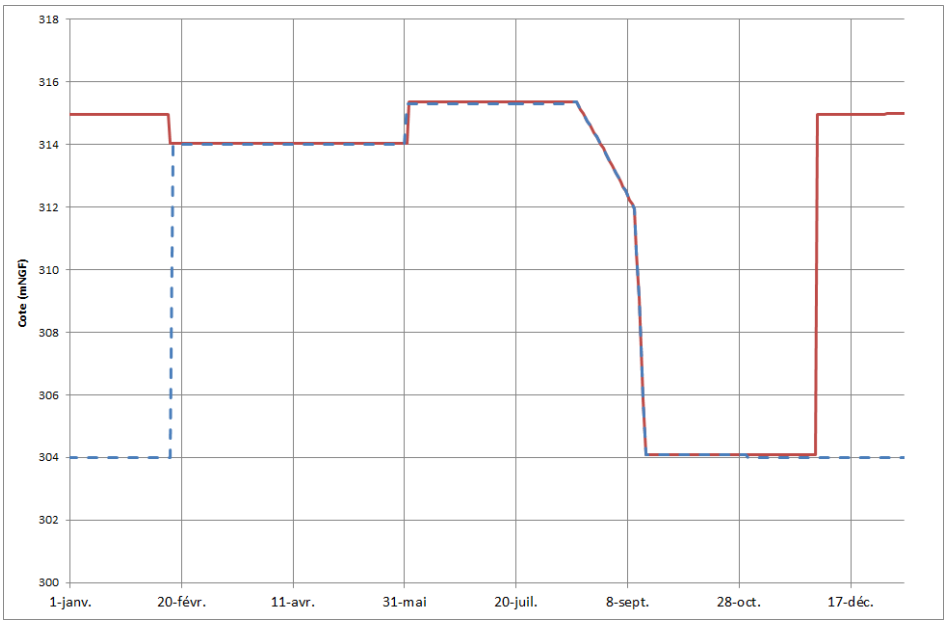
-Un troisième groupe a consisté à fixer une cote de gestion à 319 mNGF toute l'année avec une variante consistant à procéder à un abaissement à 304 ou 315 mNGF durant la période hivernale (septembre à février).

Les simulations ont abouti à différents résultats qui ne sont pas forcément convergents. Un extrait des principales conclusions est présenté dans ce qui suit.

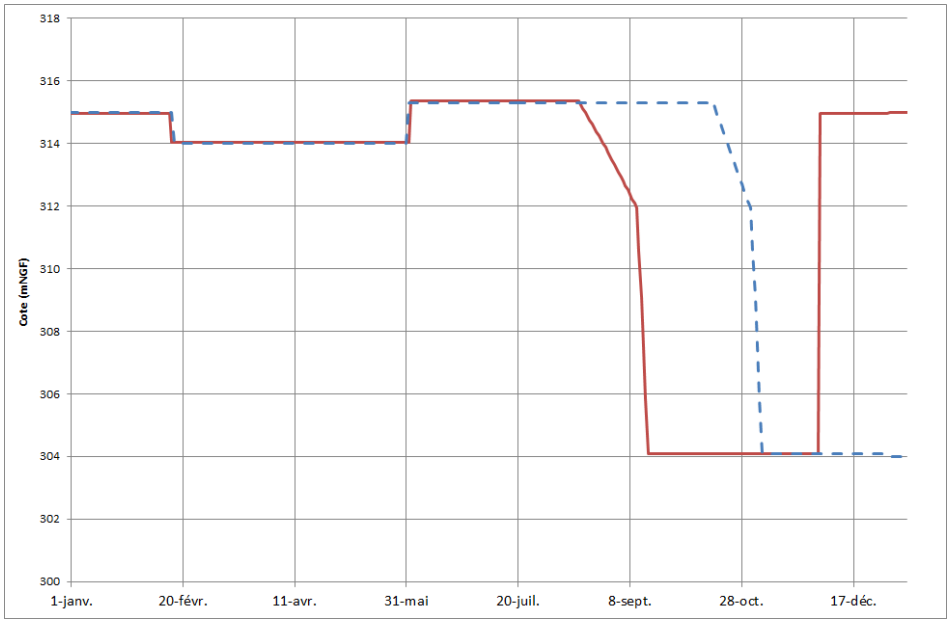
-L'exploitation des chroniques de débits à l'horizon 2046-2065 donne une tendance sur la fréquence des crues (moins de crues en automne et plus en hiver). **Le pas de temps « journalier » utilisé dans les modèles ne permet toutefois pas d'apprécier les intensités des crues nécessaires pour ajuster avec précision le schéma d'exploitation, en vue d'un écrêtement efficace par le barrage de Villerest**.

-**L'abaissement à la cote 304 mNGF doit être maintenu**, notamment du fait des 2 plus fortes crues historiques qui se sont produites en automne (septembre 1866 et octobre 1846).

- Maintenir la cote 304 mNGF jusqu'au 15 février et **retarder la remontée à la cote 314 mNGF à cette date ne mettrait pas en défaut l'atteinte de l'objectif de remplissage avant le début du soutien d'étiage**. Une remontée à partir du 15/03 abaisserait légèrement le niveau moyen de remplissage de -0.20 m, conduisant à un volume pour le soutien d'étiage moins important qu'avec la gestion actuelle (écart de –1 189 113 m^3).

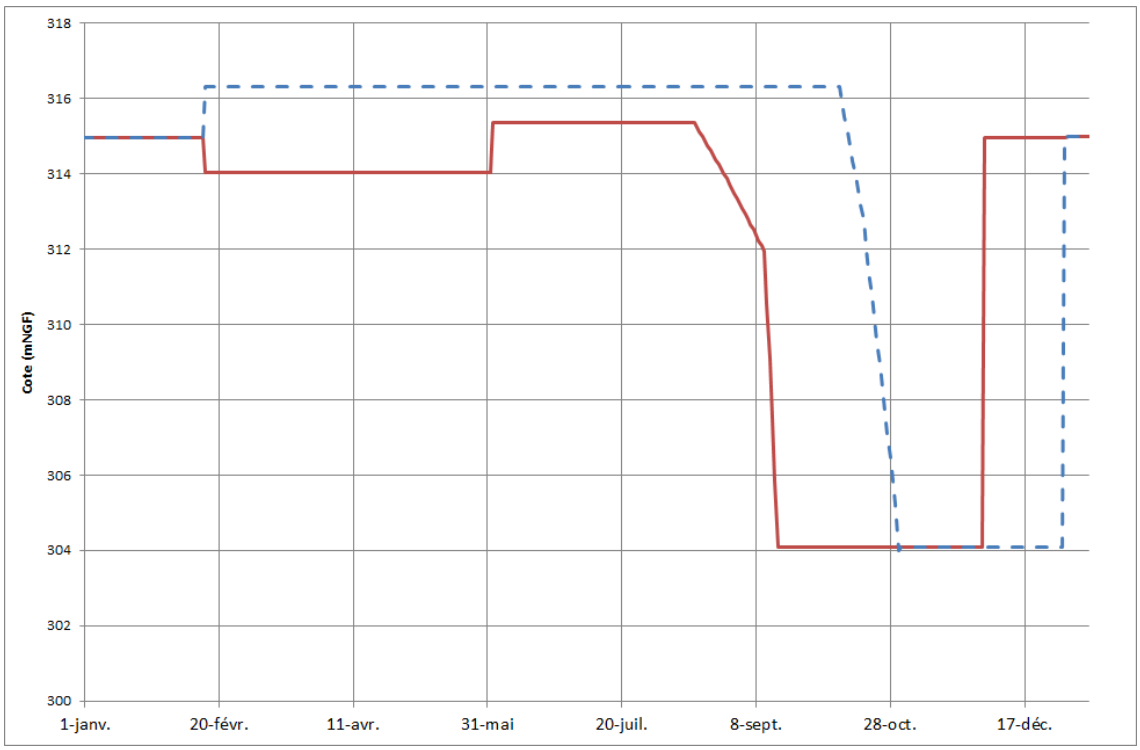


-Un maintien de la cote 315.30 mNGF jusqu'au 15 octobre (contre le 15 août actuellement), et un abaissement à 304 mNGF au 1er novembre permettraient de gagner en moyenne +545 950 m^3 pour le soutien d'étiage depuis Villerest.



-Si l'on souhaite atteindre une cote de remplissage proche de 316.30 mNGF avant la saison d'étiage, il est nécessaire de remonter la cote avant le 31 mai. Cela permettrait de disposer d'un volume mobilisable supplémentaire de l'ordre de 3.2 Mm^3 depuis Villerest. Avancer cette

remontée dès le 15 février permettrait de doubler le volume supplémentaire mobilisable (+7.4 Mm^3) par rapport au schéma actuel.



-Une gestion à la cote 319 mNGF permettrait un gain maximal pour le soutien d'étiage, avec un volume supplémentaire mobilisable pour le soutien d'étiage de l'ordre de 19 Mm^3 par rapport au schéma actuel. Néanmoins, cette cote n'a été atteinte que lors de la mise en eau du barrage. La perspective d'une telle gestion sur de nombreuses années implique une appréciation du comportement de l'ouvrage face à de telles sollicitations hydrauliques. De plus, gérer à cette cote haute permettrait certes de répondre au soutien d'étiage mais cela nécessiterait, en cas d'arrivée d'une crue, d'effectuer des lachûres importantes et potentiellement conséquentes pour l'aval.

En l'état, il est prévu de poursuivre l'enrichissement de ces éléments d'analyse sur la Loire à Villerest, en les complétant par ceux en cours de mobilisation sur l'Allier à Naussac. En parallèle, il est également envisagé l'approfondissement des échanges avec les gestionnaires à l'amont de Villerest ; on pense notamment à ceux de l'ouvrage de Grangent.