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 2 :

Analyse de l'impact combiné des évolutions socio-économiques et du changement climatique sur le fonctionnement 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		11/03/2016						
V2	SONNET		25/03/2016						
V3	SONNET		15/04/2016						

Historique des modifications

Indice	Date	Paragraphes modifiés / Objet
V2	25/03/2016	Prise en compte des observations de l'EPTB Loire et recherches complémentaires sur le canal de Forez.
V3	15/04/2016	Prise en compte d'un scénario contradictoire pour les prélèvements en amont du barrage (volume de 30 Mm^3).

Diffusion

Destinataire(s)	Nb
ETABLISSEMENT PUBLIC LOIRE	1

SOMMAIRE

1 PREAMBULE 5

2 LES RESULTATS A L'ECHELLE DU BASSIN DE LA LOIRE 7

3 EVOLUTION EN AMONT ET EN AVAL DE VILLEREST (HORIZON 2065) 11

3.1 SECTEUR EN AMONT DE VILLEREST 14

3.1.1 LE CANAL DE FOREZ 14

3.1.1.1 Les usages 14

3.1.1.2 Prélèvement du canal dans la Loire 16

3.1.1.3 Le scénario d'évolution 20

3.1.2 EVALUATION DE L'IMPACT DE L'EVOLUTION DES PRELEVEMENTS EN AMONT DU BARRAGE DE VILLEREST 24

3.1.2.1 A partir des projections d'Explore 2070 (scC1a) 24

3.1.2.2 A partir d'un scénario contradictoire (scC1b) 28

3.2 SECTEUR EN AVAL DE VILLEREST 32

4 CONCLUSIONS 36

Table des illustrations

Figure 1 : Sous-bassins versant traités dans Explore 2070 6

Tableau 2 : Prélèvements en milliers de m³ sur le bassin de la Loire pour l'année 2006 (source : Explore 2070) 7

Figure 3 : Evolution des prélèvements par usage à l'échelle du bassin de la Loire 8

Figure 4 : Répartition des usages sur le bassin de la Loire (année 2006) 9

Figure 5 : Répartition des usages sur le bassin de la Loire (Horizon 2070) 9

Tableau 6 : Prélèvements en milliers de m³ sur le bassin de la Loire pour l'année 2070 (source : calculs réalisés à partir des valeurs d'Explore 2070 – source BIPE) 10

Figure 7 : Secteurs amont et aval de Villerest (points de prélèvements considérés) 12

Figure 8 : Synoptique des périmètres irrigués en Plaine de Forez 14

Figure 9 : Vue de la branche principal du canal de Forez 14

Figure 10 : Répartition des consommations par usage de 2002 à 2006 (source : SMIF) 15

Figure 11 : Répartition des cultures (source : SMIF) 15

Figure 12 : Volume introduit dans le canal / Consommation par pompage sur le canal de 2002 à 2006 (source : SMIF) 17

Tableau 13 : Volume introduit dans le canal / Consommation par pompage sur le canal de 2002 à 2006 (source : SMIF) 18

Figure 14 : Evolution des volumes d'eau déversés dans le canal – moyenne interannuelle 2002 à 2006 (source : SMIF) 19

Figure 15 : Volumes d'eau déversés mensuellement dans le canal 2002 à 2006 (source : SMIF) 19

Tableau 16 : Volumes prélevés impactant les eaux de surface sur le secteur en amont de Villerest de 2002 à 2009 (source : Agence de l'Eau Loire Bretagne) 20
Tableau 17 : Volumes prélevés à l'horizon 2065 pour les usages AEP et Industries 20
Figure 18 : Evolution des volumes prélevés 2006 à 2065 21
Figure 19 : Répartition des usages (2006) 22
Figure 20 : Répartition des usages (2065) 22
Figure 21 : Evolution des prélèvements mensuels en termes de débits (en m^3/s) à l'horizon 2065 22
Tableau 22 : Evolution des prélèvements mensuels en termes de débits (en m^3/s) à l'horizon 2065 23
Figure 23 : Evolution des prélèvements mensuels en termes de débits (en m^3/s) à l'horizon 2065 23
Figure 24 : Des besoins en eau croissants (source : SMIF) 24
Figure 25 : Z moyen dans le barrage de Villerest pour le scénario scC1 et le scénario scC1a 25
Tableau 26 : Evolution du nombre de jours où Z(t)=280mNGF (scC1a vs scC1) 26
Figure 27 : nombre de jours où Z<=280mNGF 26
Figure 28 : nombre de jours où Z<312mNGF 26
Figure 29 : Soutien d'étiage de Villerest (t) 26
Figure 30 : Soutien d'étiage de Naussac (t) 26
Figure 31 : Soutien d'étiage du barrage de Villerest (scC1 et scC1a) 27
Figure 32 : Soutien d'étiage du barrage de Naussac (scC1 et scC1a) 27
Figure 33 : Impact des débits en amont du barrage (scC1a et scC1b) 28
Figure 34 : Z moyen dans le barrage de Villerest pour le scénario scC1a et le scénario scC1b 29
Figure 35 : Soutien d'étiage de Villerest (t) 30
Figure 36 : Soutien d'étiage de Naussac (t) 30
Figure 37 : Soutien d'étiage du barrage de Villerest (scC1a et scC1b) 30
Figure 38 : Soutien d'étiage du barrage de Naussac (scC1a et scC1b) 31
Tableau 39 : Volumes prélevés impactant les eaux de surface sur le secteur en aval de Villerest (2002 à 2009) 32
Figure 40 : Prélèvements pour les centrales électriques (2002 à 2009) sur la Loire 33
Tableau 41 : Evolution des prélèvements et des débits moyens prélevés à l'étiage impactant les eaux de surface à l'horizon 2065 (secteur aval) 33
Figure 42 : Evolution des volumes prélevés annuellement 35
Figure 43 : Evolution des débits moyens prélevés à l'étiage 35
Figure 44 : Répartition des volumes prélevés annuellement (actuel) 35
Figure 45 : Répartition des volumes prélevés annuellement (2065) 35
Figure 46 : Répartition des débits moyens prélevés à l'étiage (actuel) 35
Figure 47 : Répartition des débits moyens prélevés à l'étiage (2065) 35

1 PREAMBULE

Le présent rapport s'intéressera à la phase 2, et cherche à évaluer l'évolution des prélèvements sur les eaux de surface de la Loire. En effet, aujourd'hui les barrages de Villerest et de Naussac assurent un soutien d'étiage avec un objectif de 60 m^3/s, qui peut être descendu en cas de période déficitaire à 50 m^3/s.

Les objectifs

Pour cette deuxième phase de l'étude, nous avons donc évalué l'impact des évolutions socioéconomiques sur :

- Les prélèvements en aval de Villerest sur la Loire (en bordure de la Loire et dans la nappe alluviale), permettant ainsi d'apprécier l'évolution des besoins en soutien d'étiage. Des usages tels que les centrales nucléaires (refroidissement), l'irrigation ou la fourniture d'eau potable sont ainsi dépendant des apports des 2 barrages en période d'étiage.
- Les prélèvements en amont de Villerest sur l'ensemble du bassin versant capté par le barrage, afin d'apprécier dans quelles mesures les débits d'apport sont susceptibles d'évoluer et impacter le fonctionnement du barrage.

La méthode de travail

Pour ce faire, aucun travail de prospective complémentaire n'a été réalisé dans la présente étude, le cadre fixé consistant à exploiter les projections réalisées dans le cadre du projet Explore 2070. Pour rappel, le projet Explore 2070 s'est déroulé de juin 2010 à octobre 2012, et a été porté par la direction de l'eau et de la biodiversité du MEDDE. Plusieurs volets ont été abordés, dont un axe concernant « la prospective socio-économique et démographique ». Ce sont donc les éléments de ce volet, que nous allons présenter et exploiter par la suite. L'objectif était ainsi de quantifier les pressions anthropiques et les besoins en eau en fonction des évolutions démographiques, socioéconomiques, à partir de plusieurs scénarios incluant ou non l'influence du changement climatique et des mesures d'adaptation.

Les résultats produits dans le cadre de cette démarche prospective relève de nombreuses hypothèses, sur la croissance économique, l'évolution démographique, l'évolution des surfaces irriguées,… qui sont nécessaires mais naturellement discutables. Il faut donc bien garder à l'esprit qu'il s'agit d'un travail réalisé sur l'ensemble du territoire français, qui n'a peut-être pas intégré de tendances fines à l'échelle des bassins versant. Les chiffres produits mêlent des évolutions tendancielles et des stratégies d'adaptation.

Nous avons exploité uniquement les chiffres d'évolutions tendancielles dans le présent rapport.

Les travaux réalisés par le BIPE ont abouti à proposer des projections pour les prélèvements sur les eaux surfaces et souterraines pour 4 grandes classes d'usage à l'horizon 2070. L'année 2006 est prise comme point de départ pour la démarche prospective. Les projections ont été réalisées à l'échelle de sous-bassins versant. Le bassin de la Loire a ainsi été découpé en 17 sous-bassins versant.

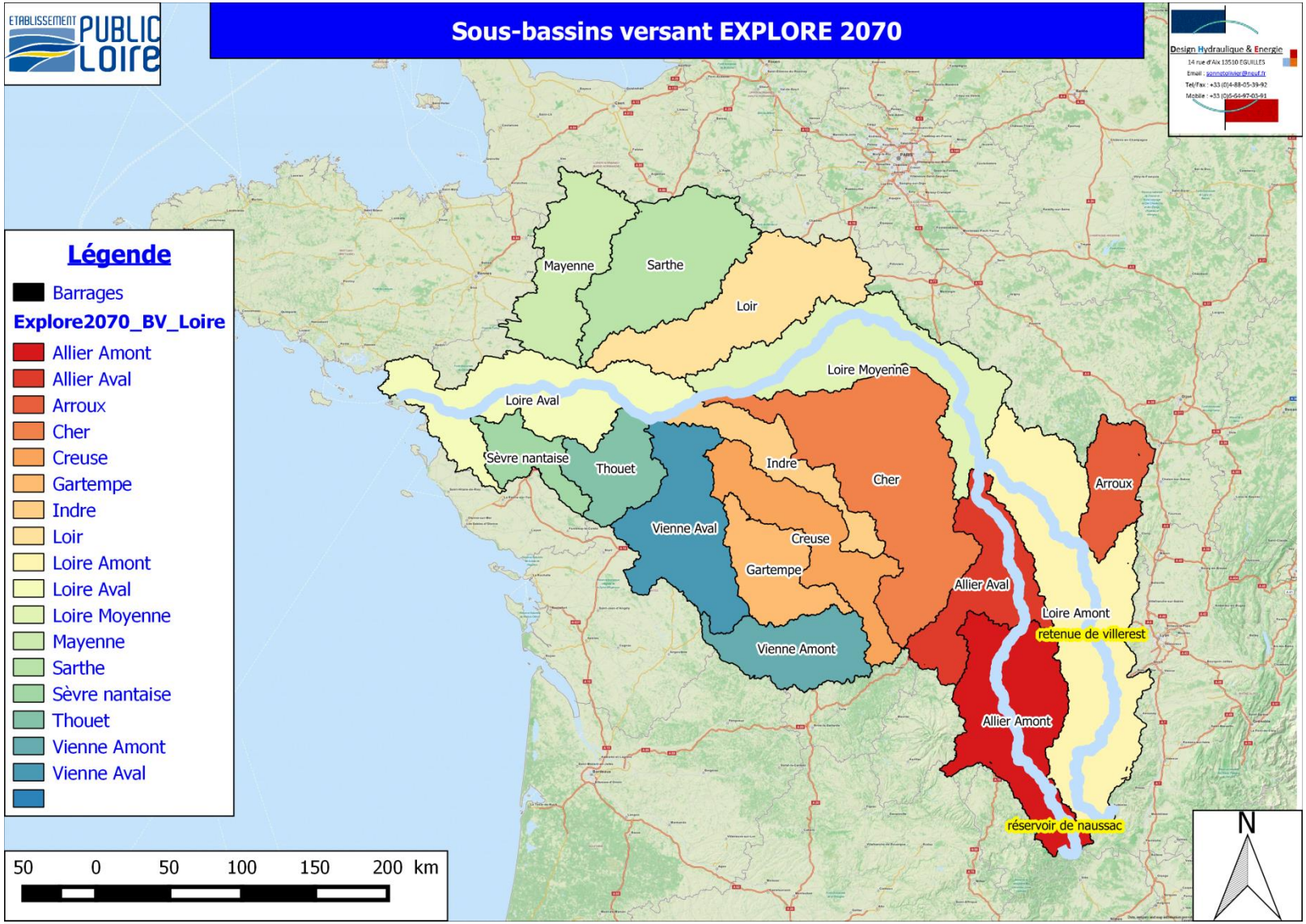


Figure 1 : Sous-bassins versant traités dans Explore 2070

2 LES RESULTATS A L'ECHELLE DU BASSIN DE LA LOIRE

Comme évoqué précédemment, le BIPE s'est attaché à produire des évolutions tendancielles sur 4 grands usages :

- Energie (donc principalement les centrales produisant de l'électricité pour notamment les besoins en refroidissement),
- Industrie,
- AEP (ou l'eau potable),
- Irrigation.

Les principales hypothèses fondatrices des travaux réalisés sur le bassin de la Loire sont rappelées ci-dessous :

- 2 scénarios pour l'AEP et l'Agriculture selon notamment la répartition de l'habitat : un scénario de concentration et un scénario d'étalement.
- Une baisse des prélèvements industriels basés sur les progrès technologiques.
- Un maintien des productions énergétiques à l'horizon 2070 sur le bassin de la Loire à partir des centrales.

On pourra se reporter au rapport « Prospective socio-économique et démographique Pressions anthropiques », pour aller plus loin dans la compréhension des processus de calculs.

http://www.developpement-durable.gouv.fr/Evaluation-des-strategies-d.html

	Année 2006 (prélèvements en Milliers de m^3)					
	AEP	INDUSTRIE	ENERGIE	AGRICULTURE	Transferts inter-bassins	TOTAL
Mayenne	29 100	4 356	0	5 576	0	39 032
Loire Aval	**95 232**	**85 524**	**0**	**120 076**	**0**	**300 832**
Sevre nantaise	24 144	1 092	0	20 825	0	46 061
Thouet	18 288	1 440	0	49 341	480	69 549
Indre	20 400	7 044	0	18 776	0	46 220
Loir	26 832	8 880	0	101 437	0	137 149
Loire Moyenne	**87 636**	**588**	**505 128**	**58 914**	**624**	**652 890**
Vienne Aval	36 588	5 208	271 572	98 560	0	411 928
Creuse	12 984	2 484	0	13 396	0	28 864
Gartempe	16 956	120	0	746	7 752	25 574
Arroux	17 892	996	0	877	360	20 125
Loire Amont	**88 872**	**15 060**	**0**	**16 086**	**0**	**120 018**
Allier Aval	32 184	3 612	0	23 190	10 404	69 390
Vienne Amont	14 592	1 764	0	1 287	0	17 643
Allier Amont	54 108	12 660	0	19 154	0	85 922
Cher	51 096	19 380	0	56 391	0	126 867
Sarthe	58 044	13 008	0	77 221	4 692	152 965
	684 948	183 216	776 700	681 853	24 312	2 351 029

Tableau 2 : Prélèvements en milliers de m^3 sur le bassin de la Loire pour l'année 2006 (source : Explore 2070)

Ainsi, en 2006 les **prélèvements sur l'ensemble du bassin de la Loire** (eaux de surface et eaux souterraines) ont été évalués à 2 351 029 millions de m^3 se répartissant en :

- 684 948 milliers de m^3 pour l'AEP,
- 183 216 milliers de m^3 pour l'Industrie,
- 776 700 milliers de m^3 pour l'énergie,
- 24 312 milliers de m^3 pour les transferts interbassins.

Valeurs issues d'Explore 2070 (source : BIPE)

Les valeurs proposées pour l'usage énergétique sont surprenantes, et ne semblent inclure que les 4 centrales nucléaires. Autrement dit, la centrale de Cordemais ne semble pas incluse dans l'évaluation du BIPE. Cette centrale est située au niveau de l'estuaire de la Loire, ce qui pourrait éventuellement expliquer le choix de ne pas l'intégrer.

⇨ *Nous intègrerons par la suite dans les calculs présentés ci-après, la valeur de cette centrale thermique.*

En termes d'évolution, à l'horizon 2065 les prélèvements globaux à l'échelle du bassin versant de la Loire seraient en hausse de +8.7% par rapport à 2006, soit une augmentation moyenne par an de +0.12 à 0.13% selon le scénario de répartition de l'habitat considéré. On estime ainsi qu'il passerait de 2.35 milliards de m^3 en 2006 à 2.55 milliards de m^3 à l'horizon 2065, soit de l'ordre de +204 millions de m^3 en prélèvement complémentaires sur l'année. **A l'instar de la remarque précédente, il est préférable de conserver les prélèvements complémentaires et de ne pas se fixer sur la valeur absolue du prélèvement.**

Nota : nous avons réajusté les projections réalisées par le BIPE à l'horizon 2070 à l'année 2065 pour conserver une cohérence avec les projections climatiques de milieu du siècle qui couvrent la période 2046-2065.

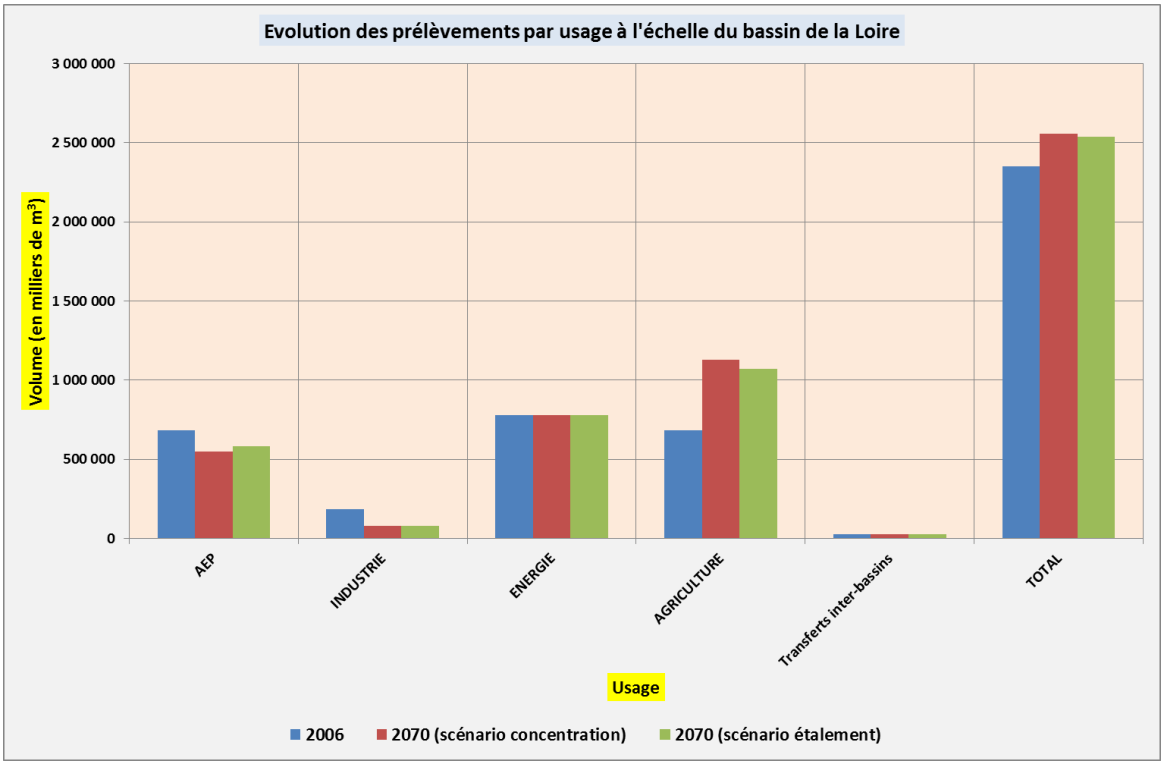


Figure 3 : Evolution des prélèvements par usage à l'échelle du bassin de la Loire

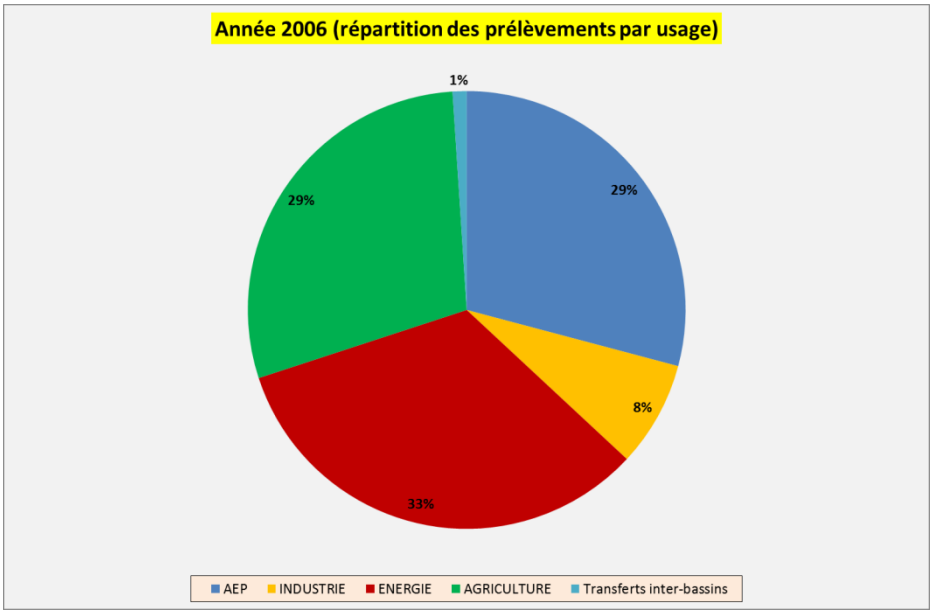


Figure 4 : Répartition des usages sur le bassin de la Loire (année 2006)

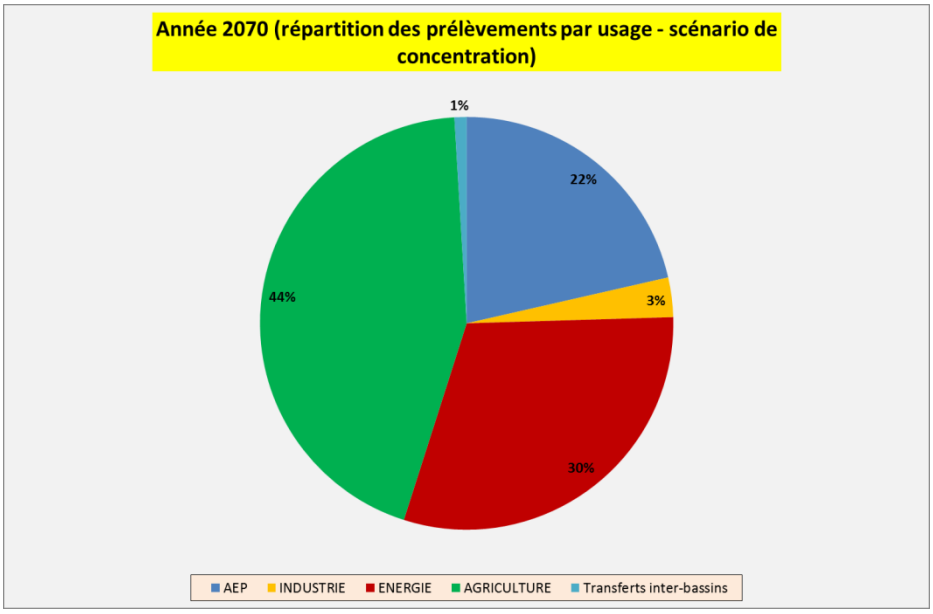


Figure 5 : Répartition des usages sur le bassin de la Loire (Horizon 2070)

Les évolutions annoncées par usage sont beaucoup plus contrastées que le total le laisserait supposer avec pour le scénario de concentration de l'habitat :

- **-20.1% pour l'AEP** (soit un taux moyen annuel de -0.35%),
- **-56.8% pour l'Industrie** (soit un taux moyen annuel de -1.30%),
- **+65.4% pour l'Agriculture** (soit un taux moyen annuel de +0.79%),
- **Pas d'évolutions** pour les prélèvements **au niveau des centrales électriques**,
- **Pas d'évolutions** pour les **transferts interbassins.**

Nota : le taux moyen annuel évoqué précédemment est calculé à partir de la formule suivante. On utilisera par la suite la notation t_{moyen}, pour le taux moyen annuel entre 2006 et 2070.

$$t_{moyen} = [(Vol.\ 2070 / Vol.\ 2006) \wedge (1 / (2070-2006))] - 1$$

En d'autres termes, on a la relation : Vol. 2070 = Vol. 2006 x (1+ t_{moyen}) ^ (2070-2006).

	Tendanciel 2070 (prélèvements en Milliers de m³) - scénario de concentration						Tendanciel 2070 (prélèvements en Milliers de m³) - scénario d'étalement					
	AEP	INDUSTRIE	ENERGIE	AGRICULTURE	Transferts inter-bassins	TOTAL	AEP	INDUSTRIE	ENERGIE	AGRICULTURE	Transferts inte	TOTAL
Mayenne	22 404	1 932	0	10 472	0	34 808	23 772	1 932	0	10 263	0	35 967
Loire Aval	**99 276**	**35 940**	**0**	**175 636**	**0**	**310 852**	**105 612**	**35 940**	**0**	**164 717**	**0**	**306 269**
Sevre nantaise	28 464	492	0	31 823	0	60 779	31 152	492	0	30 099	0	61 743
Thouet	10 704	636	0	71 302	480	83 122	11 340	636	0	67 833	480	80 289
Indre	16 188	3 120	0	32 262	0	51 570	17 208	3 120	0	30 382	0	50 710
Loir	21 684	3 924	0	163 993	0	189 601	23 580	3 924	0	156 830	0	184 334
Loire Moyenne	**79 548**	**216**	**505 128**	**100 366**	**624**	**685 882**	**83 592**	**216**	**505 128**	**96 178**	**624**	**685 738**
Vienne Aval	36 600	2 304	271 572	149 300	0	459 776	38 388	2 304	271 572	143 073	0	455 337
Creuse	8 268	1 104	0	25 066	0	34 438	8 856	1 104	0	24 020	0	33 980
Gartempe	13 416	48	0	1 422	7 752	22 638	13 812	48	0	1 352	7 752	22 964
Arroux	8 244	432	0	2 280	360	11 316	8 616	432	0	2 276	360	11 684
Loire Amont	**44 508**	**6 660**	**0**	**35 982**	**0**	**87 150**	**48 108**	**6 660**	**0**	**34 143**	**0**	**88 911**
Allier Aval	25 380	1 596	0	46 171	10 404	83 551	26 232	1 596	0	43 125	10 404	81 357
Vienne Amont	8 580	744	0	3 281	0	12 605	10 236	744	0	3 255	0	14 235
Allier Amont	47 556	5 604	0	38 012	0	91 172	50 100	5 604	0	35 319	0	91 023
Cher	31 164	8 580	0	104 704	0	144 448	33 552	8 580	0	100 798	0	142 930
Sarthe	45 612	5 748	0	135 575	4 692	191 627	47 976	5 748	0	129 437	4 692	187 853
	547 596	79 080	776 700	1 127 647	24 312	2 555 335	582 132	79 080	776 700	1 073 100	24 312	2 535 324
Taux global	**-20.1%**	**-56.8%**	**0.0%**	**65.4%**	**0.0%**	**8.7%**	**-15.0%**	**-56.8%**	**0.0%**	**57.4%**	**0.0%**	**7.8%**
Taux moyen/an	**-0.35%**	**-1.30%**	**0.0%**	**0.79%**	**0.0%**	**0.13%**	**-0.25%**	**-1.30%**	**0.0%**	**0.71%**	**0.0%**	**0.12%**

Tableau 6 : Prélèvements en milliers de m³ sur le bassin de la Loire pour l'année 2070 (source : calculs réalisés à partir des valeurs d'Explore 2070 – source BIPE)

Le taux global d'évolution sur la période 2006 à 2070 se calcule de la manière suivante : (Vol. 2070 – Vol. 2006) / Vol. 2006. *Le volume total pris en référence pour l'année 2006 est 2 351 029 milliers de m³.*

⇨ On constate ainsi pour le scénario de concentration un taux global d'évolution sur la période considérée de +8.7%, soit une croissance moyenne par an de +0.13% des prélèvements à l'échelle du bassin de la Loire.

3 EVOLUTION EN AMONT ET EN AVAL DE VILLEREST (HORIZON 2065)

En préambule, nous précisions que les valeurs qui sont présentées par la suite, sur le secteur aval, intègrent le prélèvement de la centrale de Cordemais *(cf. remarque précédente à ce sujet).*

Nous allons désormais nous intéresser plus spécifiquement à 2 secteurs *(cf. carte suivante)* :

- Un secteur en amont de Villerest, à savoir le bassin versant capté par le barrage.
- Un secteur en aval de Villerest, à savoir la Loire en aval du barrage.

Nota : les volumes prélevés annuellement sont déclarés et disponibles, pour tous les utilisateurs, dans les bases de données redevances de l'Agence de l'eau.

Les données de prélèvements *(à partir des données redevances)* ont été fournies par l'Agence de l'eau Loire Bretagne, et ont été exploitées par la suite pour retenir uniquement les prélèvements impactant les eaux de surface. Ne seront donc pris en compte que les prélèvements dans les cours d'eau et les nappes libres. En effet, à l'étiage, le débit des cours d'eau est fortement soutenu par les apports des nappes souterraines. Les prélèvements effectués dans les nappes exercent donc une pression significative sur le débit d'étiage.

- Pour le secteur amont, une sélection géographique a été réalisée sur l'intégralité du bassin versant et in fine nous avons retenu uniquement les points de prélèvement dans les eaux de surface et les nappes alluviales.
- Pour le secteur aval, une sélection géographique a été réalisée à partir d'une zone tampon autour de la Loire, pour ne retenir in fine que les points prélèvements dans la Loire et la nappe alluviale du fleuve.

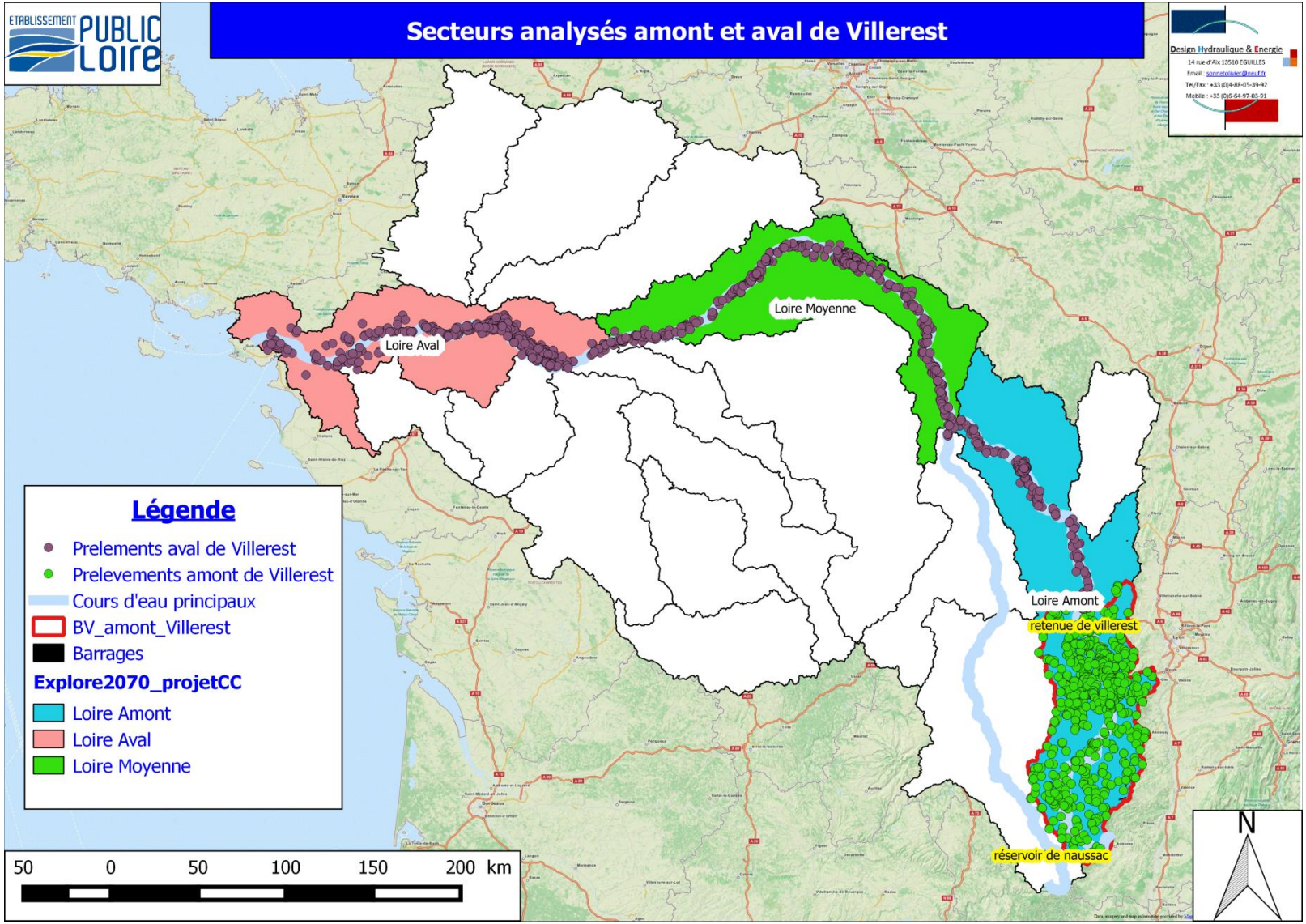


Figure 7 : Secteurs amont et aval de Villerest (points de prélèvements considérés)

Les hypothèses de travail

Pour passer de volumes prélevés annuellement à des débits prélevés à l'étiage, plusieurs hypothèses « macro » sont formulées. Elles s'inspirent des hypothèses utilisées dans « l'Etat des lieux des pressions réalisées par l'Agence de l'eau en 2013 ».

- pour **l'eau potable et l'industrie**, les volumes sont répartis de manière homogène sur l'année **(répartition linéaire sur 12 mois du volume annuel).**
- pour **l'énergie**, les volumes sont répartis de manière homogène sur l'année, et notamment sur les centrales nucléaires présentes sur le bord de la Loire **(répartition linéaire sur 12 mois).**
- pour **l'irrigation** on considère le volume **réparti sur une période de 3 mois** : l'essentiel sur l'ensemble du bassin est prélevé en juillet / août mais il faut tenir compte d'une partie de prélèvements effectués au printemps et, plus rarement, en septembre. Cette hypothèse est naturellement très réductrice, mais permet une première estimation.
  Nota : on le verra par la suite pour le secteur amont, elle apparaît probablement comme peu représentative de l'usage qui s'organise autour d'un canal principal, et a donc été adaptée.

Il nous est apparu important de détailler les principaux prélèvements pour l'énergie considérés. Au niveau de la Loire moyenne, plusieurs centrales nucléaires utilisent l'eau du fleuve pour le refroidissement. Près de Nantes, la centrale thermique de Cordemais, l'une des principales sources d'électricité de la Bretagne, fonctionne au charbon et au fuel. Les 4 centrales nucléaires présentes sur la Loire – Chinon et Dampierre, avec quatre tranches de 900 MW chacune, Saint-Laurent-des-Eaux (2 x 900 MW), Belleville-sur-Loire (2 x 1 300 MW) sont refroidies. L'eau de refroidissement des condenseurs cède ses calories dans de grandes tours où circule un courant d'air permanent. L'eau à refroidir tombe en pluie et s'évapore en partie. C'est cette vapeur d'eau qui contribue à former les panaches.

Dans le cadre du projet Explore 2070, les besoins futurs en eau pour l'énergie et notamment l'activité nucléaire sont évalués avec **l'hypothèse d'un maintien de la production d'électricité** dans le scénario tendanciel. Ainsi, en 2070 la capacité (ou puissance) globale des centrales nucléaires sera la même que celle de 2006. 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.

Sur la Loire, les travaux ont abouti à un maintien des capacités actuelles avec des installations moins nombreuses :

- « 2 centrales nucléaires suffiront à produire l'équivalent de l'électricité produite actuellement par les 4 centrales en bord de Loire.
- Les centrales de Belleville-sur-Loire et de Saint-Laurent-Nouan seront effacées, alors que les centrales de bord de Loire, Chinon et Dampierre seront renouvelées. »

3.1 SECTEUR EN AMONT DE VILLEREST

En amont du barrage de Villerest, les prélèvements impactant les eaux de surface, sont estimés entre 34.6 et 57.1 millions de m^3 sur la période 2002 à 2009. Les prélèvements pour l'industrie n'ont cessé de décroître de 2002 à 2009, ce qui pourrait être en lien avec des fermetures d'usine ou des évolutions des processus de fabrication. L'irrigation constitue l'usage le plus fluctuant, marquée par la **présence du canal de Forez.**

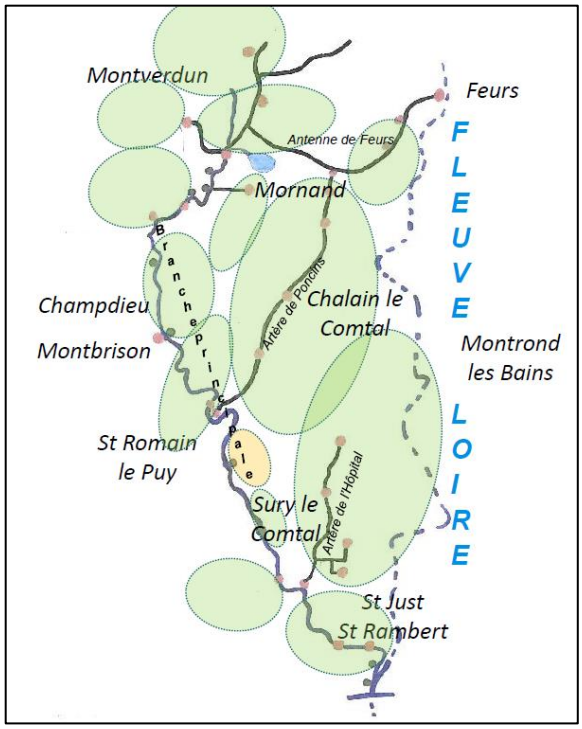


Figure 8 : Synoptique des périmètres irrigués en Plaine de Forez

Figure 9 : Vue de la branche principal du canal de Forez

⇨ **Le canal représente en moyenne près de 80% des prélèvements *(d'après les données de redevance).***

3.1.1 LE CANAL DE FOREZ

3.1.1.1 LES USAGES

Ce canal permet d'assurer plusieurs usages, dont le principal reste l'irrigation :

- Irrigation,
- Eau potable (station du Pleuvey, Feurs, syndicat du Bonson)
- Industriels,
- Etangs,
- Dessertes des irrigants et collectivités (gravitaire),

- Autres.

Des données de consommation sur la période 2002 à 2006 permettent de dresser une répartition du poids de ces différents usages :

- **Irrigation = 86.1%**
- AEP = 13.4%
- Industriels = 0.5%

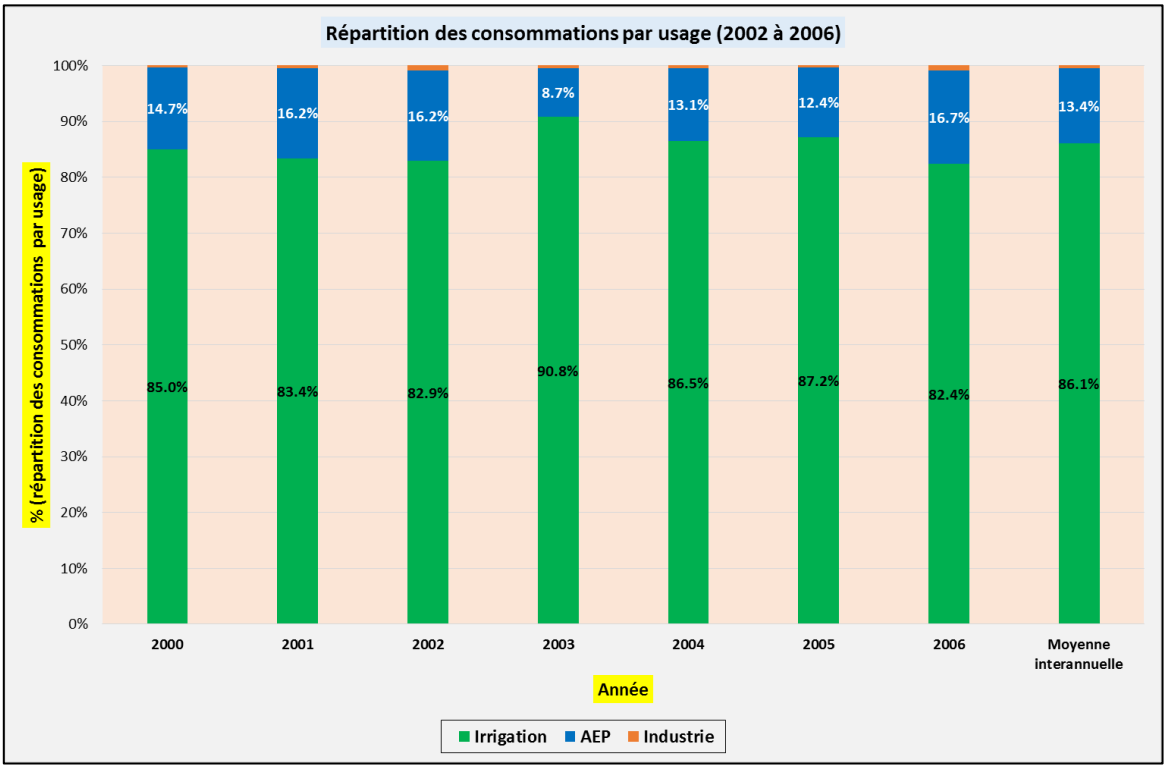


Figure 10 : Répartition des consommations par usage de 2002 à 2006 (source : SMIF)

Si l'on fait maintenant un focus sur l'irrigation. A l'origine du canal, l'eau était amenée par des canaux non étanches et à ciel ouvert, et distribuée aux usagers par gravité. De nombreux travaux ont donc été mis en œuvre, avec notamment l'installation de réseaux d'aspersion.

⇨ L'irrigation se fait donc désormais essentiellement par des systèmes sous-pression (avec 17 stations de pompage et 500 km), via des canalisations étanches. Il semble ainsi que 6000 ha soient irrigués par aspersion, que 200 ha soient encore irrigués en submersion.

Les exploitations de la plaine du Forez sont tournées principalement vers la polyculture et l'élevage. Le graphique suivant qui présente la répartition des cultures pratiquées dans la plaine du Forez, laissent à penser que les irrigations concernent essentiellement des cultures fourragères et des céréales à paille.

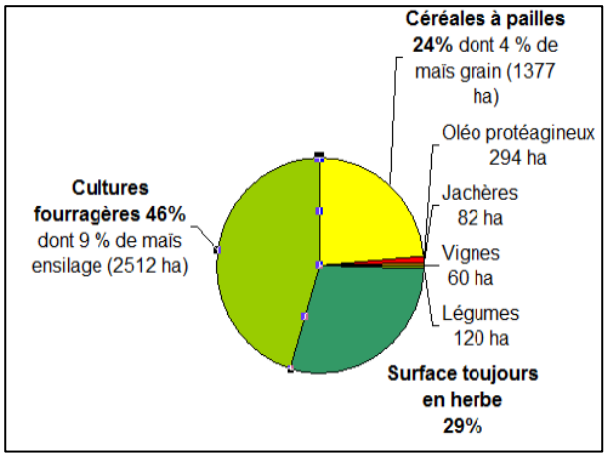
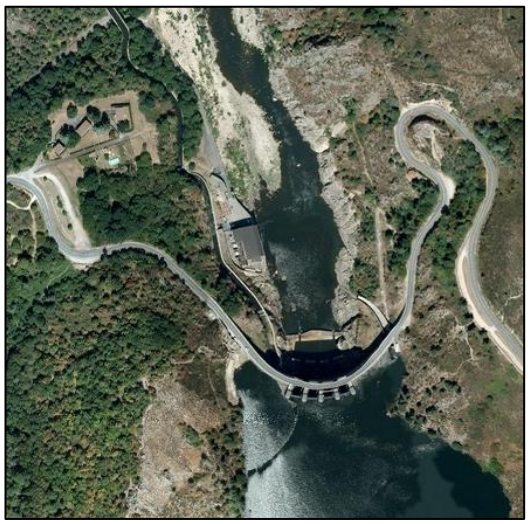


Figure 11 : Répartition des cultures (source : SMIF)

3.1.1.2 PRELEVEMENT DU CANAL DANS LA LOIRE

Depuis 1958, l'alimentation est assurée par le barrage de Grangent. Le droit d'eau du canal est de 5 m^3/s, accord du 8 octobre 1953 entre EDF et le Département de la Loire. Le fonctionnement du Canal est donc très lié au règlement d'eau de Grangent. Le canal de Forez fonctionne en régulation par excès, c'est à dire qu'un certain volume d'eau est introduit de manière journalière en tête du canal, les débits excédentaires étant rejetés vers des exutoires naturels (Lignon, Mare,..).

⇨ En pratique, ce droit d'eau de 5 m^3/s n'est pas pleinement utilisé.



Les **dispositions du SAGE** (schéma d'aménagement et de gestion des eaux) :

- 3.5 à 4.5 m^3/s minimum dans la Loire
- 2.5 à 3.5 m^3/s dans le Canal du Forez
- Possibilité d'abaissement du plan d'eau de Grangent

⇨ On retiendra un **débit maximal autorisé entre 2,5 et 3,5 m^3/s dans le canal du Forez**, fixé en fonction du débit de la Loire, du niveau d'eau dans le Barrage de Grangent et de la période de l'année.

Pour le canal du Forez, il existe en pratique deux régimes d'alimentation :

- Juin à septembre : débit continu. *Du 1er juin au 15 septembre, en pratique, les batardeaux dans le canal sont supprimés, et le débit ne peut jamais être nul en raison de sa fonction d'alimentation en eau potable. Le canal reçoit donc 2 m^3/s au minimum en continu.*

➢ Scénario « année normale » (9 années /10)

Débits en m^3/s	Janvier → février	mars → mai	Juin → 15 septembre	15 septembre → décembre
Qmin Loire	4.0	4.5	3.5	4.0
Qcanal	3.0	2.5	3.5	3.0

- Le droit d'eau du canal perdure mais son usage est restreint.
- Du 01/06 au 15/09, les pointes non consommées par le canal sont restituées à la Loire pour atteindre 4 m^3/s ;
- Ce scénario entraine un marnage d'un mètre du plan d'eau entre le 01/06 et le 15/09.

➢ Scénario « gestion de crise » (1 année/10) en fonction de la cote du plan d'eau et du débit de la Loire à Bas-en-Basset

Débits en m^3/s du 01/06 au 15/09	Situation 1 419<Zb<420		Situation 2 418<Zb<419		Situation 3 Zb<418	
Q Bas-en-Basset	< 5,4	> 5,4	< 5,4	> 5,4	< 5,4	> 5,4
Qmin aval barrage	4		3.5	3.5	3.5	3.5
Qcanal	3.5		2.5	3	2.5	2.5
Total	7.5		6	6.5	6	6

- Octobre à juin : éclusées de 5 m³/s (utilisation du 1er bief de régulation).

Le SMIF ou le Syndicat Mixte d'Irrigation et de Mise en Valeur du Forez, gestionnaire du Canal du Forez estime que sur les 20 dernières années que le volume prélevé par le canal en moyenne est de 38 millions de m³/an (*source : document de présentation du SMIF datant de 2014).*

On prendra d'ailleurs par la suite bien soin de distinguer les prélèvements pour alimenter le canal ou encore appelés « volume introduit dans le canal » *(prise d'eau dans Grangent)* et les consommations d'eau sur le canal qui sont nettement inférieurs aux volumes transités.

Plusieurs explications à cela. Tout d'abord, on comprend bien que pour alimenter les dispositifs de pompage, un débit technique peut-être nécessaire afin d'assurer l'écoulement gravitaire et disposer d'une hauteur d'eau suffisante. En outre, il existe des pertes le long du canal :

- Des pertes par infiltration le canal du Forez étant un ouvrage principalement en terre.
- Des pertes dues au système de régulation du canal et des artères à ciel ouvert, qui dans ce cas rejoignent les rivières (Loire, Lignon, Mare,…).
- Des pertes par évaporation.

Une comparaison des données de l'Agence de l'eau avec les données présentées ci-après (source : SMIF), confirment qu'elles représentent les consommations d'eau sur le canal et non les volumes introduit dans le canal. *Nous allons par la suite travailler à partir de ces données qui traduiront donc une évolution des consommations d'eau sur le canal.*

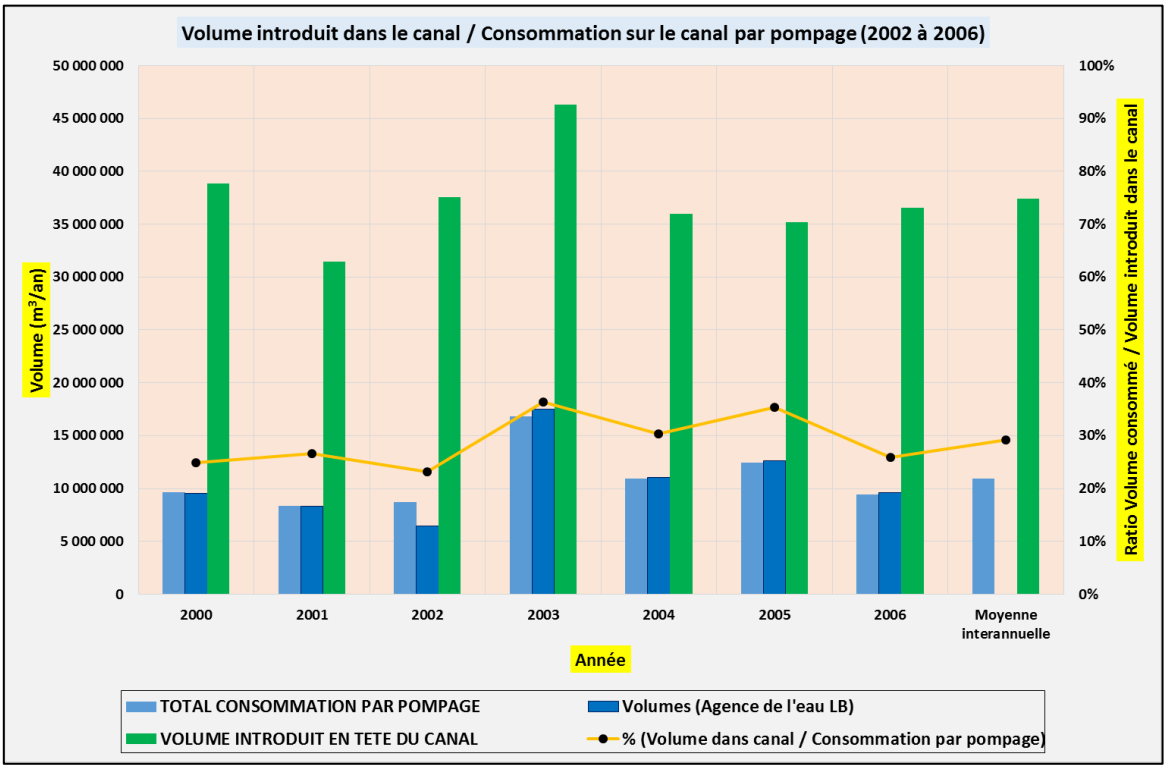


Figure 12 : Volume introduit dans le canal / Consommation par pompage sur le canal de 2002 à 2006 (source : SMIF)

USAGE		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Moyenne interannuelle
Irrigation		8 203 814	6 976 655	7 214 873	15 296 131	9 455 178	10 864 264	7 774 619	9 397 933
Eau potable	station du Pleuvey	249 944	255 004	276 614	301 886	267 398	293 934	285 513	275 756
Eau potabilisable	Feurs (pompage et gravitaire)	866 470	796 040	835 250	867 350	862 390	951 400	987 800	880 957
	Syndicat du Bonson (estimation)	300 000	300 000	300 000	300 000	300 000	300 000	300 000	300 000
Industriels		30 699	34 313	72 477	80 066	44 822	48 865	85 678	56 703
Etangs		Alimentation de 500ha							
dessertes des irrigants et collectivités (gravitaire)		Non estimées							
Autres		Non estimées							
TOTAL CONSOMMATION PAR POMPAGE (m^3/an)		**9 650 927** +part non estimée	**8 362 012** +part non estimée	**8 699 214** +part non estimée	**16 845 433** +part non estimée	**10 929 788** +part non estimée	**12 458 463** +part non estimée	**9 433 610** +part non estimée	**10 911 350** +part non estimée

VOLUME INTRODUIT EN TETE DU CANAL (m^3/an)	**38 866 680**	**31 427 910**	**37 578 780**	**46 281 960**	**35 975 340**	**35 191 440**	**36 515 880**	**37 405 427**

Tableau 13 : Volume introduit dans le canal / Consommation par pompage sur le canal de 2002 à 2006 (source : SMIF)

On sait qu'une partie des volumes mobilisés dans le canal est restituée, avec un rendement *(rapport entre les consommations et les volumes introduit)* compris entre 23.1% et 36.4%. Ce rapport a tendance à croître pour les années les plus déficitaires. On constate ainsi pour 2003 (année de la canicule où l'été a été très sec et chaud), une augmentation des consommations pour l'irrigation (16.9 millions de m^3) et donc des volumes introduit (46.3 millions de m^3), mais également un meilleur rendement du canal (+36.4%).

Nous avons également pu mobiliser un graphique décrivant l'évolution des volumes moyens introduit dans le canal de 2002 à 2006.

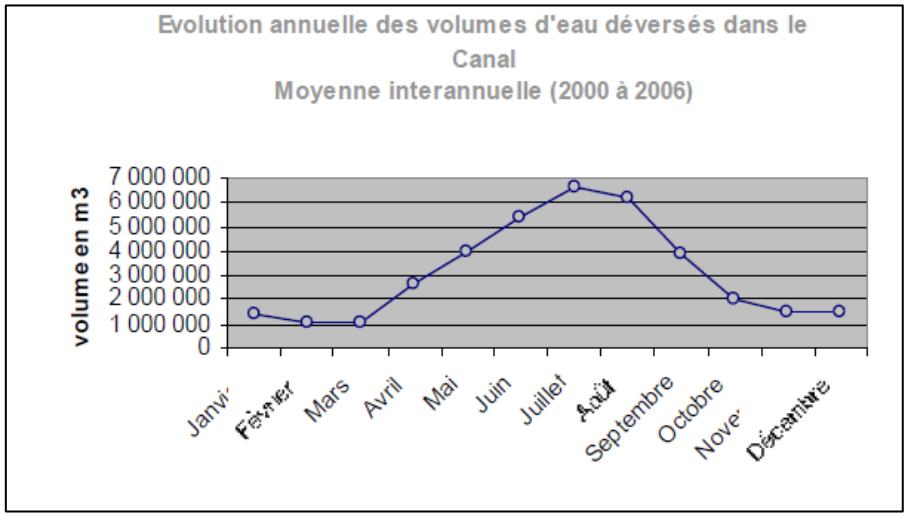


Figure 14 : Evolution des volumes d'eau déversés dans le canal – moyenne interannuelle 2002 à 2006 (source : SMIF)

Nous avons en avons déduit une répartition mensuelle prélèvements. On note de grandes variations de volumes d'eau transférés du barrage au canal entre la période hivernale et la période estivale :

- Les mois de mai, juin, juillet, août et septembre concentrent près de 70% des volumes annuels en moyenne sur la période 2002 à 2006.
- Les mois de juillet et août enregistrent les plus grands volumes d'eau, correspondant à des temps d'alimentation bien plus longs (34% des volumes annuels en moyenne pour ces 2 mois).
- Les mois d'octobre, novembre, décembre, janvier, février et mars sont les moins demandeurs en eau, du fait de l'absence d'irrigation marquée.

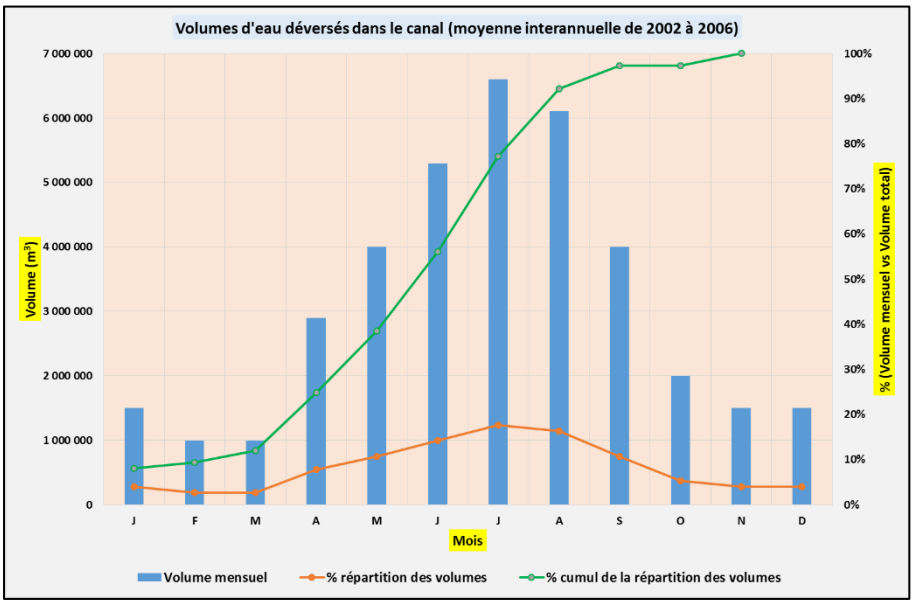


Figure 15 : Volumes d'eau déversés mensuellement dans le canal 2002 à 2006 (source : SMIF)

3.1.1.3 LE SCENARIO D'EVOLUTION

Nous avons tout d'abord distingué les prélèvements par usage : AEP, Industries et Irrigation.

Usage	V2002_M3	V2003_M3	V2004_M3	V2005_M3	V2006_M3	V2007_M3	V2008_M3	V2009_M3	min	max	moy
CENTRALE											
INDUS	7 200 400	6 050 200	5 603 500	5 463 200	5 095 000	4 243 100	4 745 400	3 742 187	3 742 187	7 200 400	5 267 873
AEP	28 714 000	28 785 400	28 296 800	28 761 700	26 571 000	24 278 700	23 957 300	25 142 882	23 957 300	28 785 400	26 813 473
IRR	8 888 200	22 249 100	14 320 100	15 767 100	11 799 800	6 029 900	7 081 290	20 584 015	6 029 900	22 249 100	13 339 938
Total	**44 802 600**	**57 084 700**	**48 220 400**	**49 992 000**	**43 465 800**	**34 551 700**	**35 783 990**	**49 469 084**	**34 551 700**	**57 084 700**	**45 421 284**

Tableau 16 : Volumes prélevés impactant les eaux de surface sur le secteur en amont de Villerest de 2002 à 2009 (source : Agence de l'Eau Loire Bretagne)

En rouge les valeurs maximales constatées.

En bleu, les valeurs minimales constatées.

Les données du BIPE sur le bassin « Loire amont » ont été exploitées pour apprécier les évolutions des prélèvements selon les différents usages.

On retiendra ainsi que les taux de croissance annuels suivants ont été appliqués pour le calcul des volumes à l'horizon 2065 :

- AEP : -1.07% / an.
- Industries : -1.27% / an.
- Agriculture : +1.27% / an.

Pour les usages AEP et industries, nous avons pris l'année 2006 en référence, jugée comme une année moyenne. Nous avons alors calculé à partir des tendances d'Explore 2070, les prélèvements annuels propres à ces usages à l'horizon 2065 en année moyenne.

	2006		2065		Variation entre 2006 et 20065	
Usage	**en m³/an**	**en m³/s**	**en m³/an**	**en m³/s**	**en m³/an**	**en m³/s**
CENTRALE	/	/	/	/	/	/
INDUS	5 095 000	0.16	2 401 470	0.08	-2 693 530	-0.09
AEP	26 571 000	0.84	14 045 722	0.45	-12 525 278	-0.40

Tableau 17 : Volumes prélevés à l'horizon 2065 pour les usages AEP et Industries

Pour l'usage irrigation, nous avons distingué le canal de Forez et les autres prélèvements. La moyenne des données de l'Agence de l'eau LB de 2002 à 2009 a été considérée pour constituer la donnée de départ. Cette moyenne intègre la variabilité des prélèvements liés à l'irrigation avec des années sèches comme 2003 et des années plus humides comme 2007 ou 2008.

Pour le canal de Forez, il faut rappeler que cette donnée représente des consommations sur le canal. Afin de reconstituer les prélèvements réels sur la ressource *(en l'occurrence sur le barrage de Grangent)*, nous nous sommes appuyées sur les rendements évoqués précédemment. Nous avons tout d'abord calculé à partir des tendances d'Explore 2070 les consommations sur le canal l'horizon 2065 en année moyenne. On passerait ainsi d'un volume de 10.7 millions de m^3 actuellement à un volume à l'horizon 2065 de 22.5 millions de m^3.

- ⇨ Nous avons ensuite considéré une efficience du canal de l'ordre de 40% prenant en compte les tendances observées de 2002 à 2006 *(croissance du rendement avec le volume prélevé ou consommé)*, ce qui nous conduit à un volume introduit dans le canal en année moyenne de 56.4 millions de m^3, à l'horizon 2065.

Le travail prospectif réalisé sur les autres irrigations s'est basé sur le même processus de calcul, passant d'un volume en année moyenne de 2.6 à 5.5 millions de m^3 en 2065.

- ⇨ Au final, l'exploitation des données prospectives sur le bassin de la Loire amont, conduirait à une légère diminution du volume global passant de 45 à 44.5 millions de m^3.
- ⇨ Des baisses marquées seraient ainsi constatées pour l'AEP et les industries, alors qu'une augmentation significative des prélèvements pour l'irrigation est attendue. Les consommations calculées en année moyenne sur le canal de Forez en 2065 seraient supérieures à ce qui aux valeurs observées en 2003.
- ⇨ On peut s'attendre à une nouvelle distribution des débits dans l'année, avec probablement un besoin plus fort en eau sur la saison des irrigations (de juin à septembre).

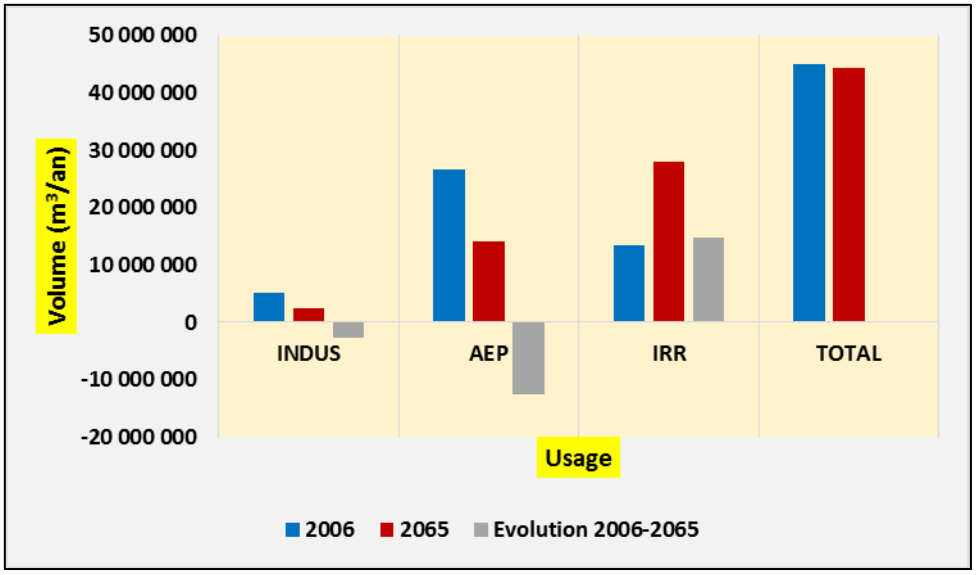


Figure 18 : Evolution des volumes prélevés 2006 à 2065

Nota : attention ce sont les données de l'Agence de l'eau LB qui ont été exploitées pour réaliser ces graphiques. L'usage irrigation semble ainsi intégrer les prélèvements par pompage sur le canal de Forez et non l'intégralité du prélèvement du canal sur le barrage.

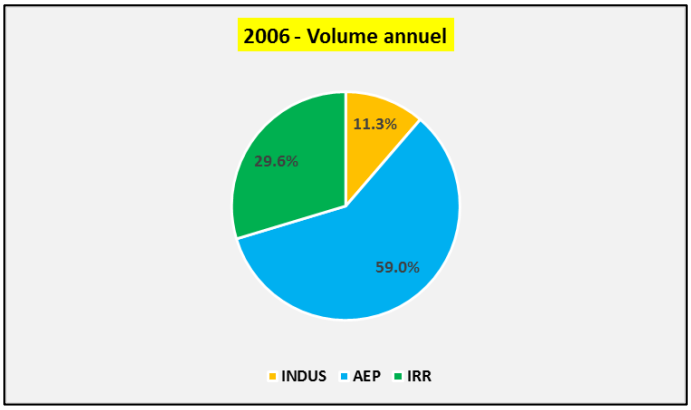


Figure 19 : Répartition des usages (2006)

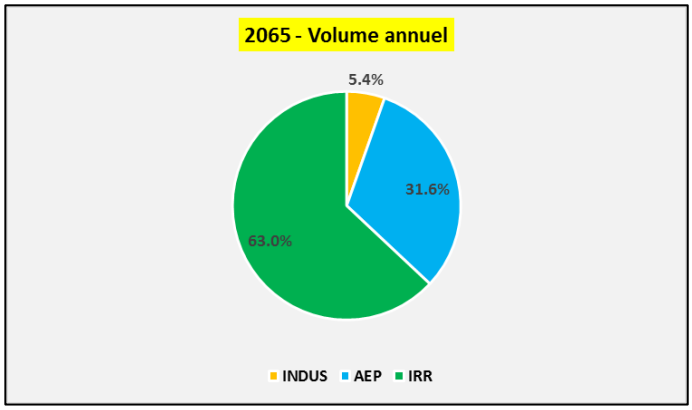


Figure 20 : Répartition des usages (2065)

Les prélèvements ont ensuite été traduits à un pas de temps mensuel, à partir des règles suivantes :

- Pour les usages AEP et industries, une règle de répartition linéaire a été appliquée pour calculer le débit moyen mensuel correspondant et en déduire l'évolution attendue.
- Canal de Forez : Le volume annuel a été traduit en volume mensuel à partir des règles de répartition sur la période 2002 à 2006.

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
4.0%	2.7%	2.7%	7.8%	10.7%	14.2%	17.6%	16.3%	10.7%	5.3%	4.0%	4.0%

Nota : cette hypothèse mériterait d'être affinée pour valider la règle de répartition à retenir pour une année où les consommations seraient supérieures à 2003.

- Autres irrigations : Nous avons considéré que ces irrigations étaient essentiellement assurées par des systèmes sous-pressions, et se concentraient sur les 3 mois de l'année juillet, août et septembre.

Les travaux réalisés sur le canal de Forez aboutissent à une hausse significative des prélèvements en année moyenne, avec des débits mensuels en juillet supérieurs au seuil maximum du scénario de crise.

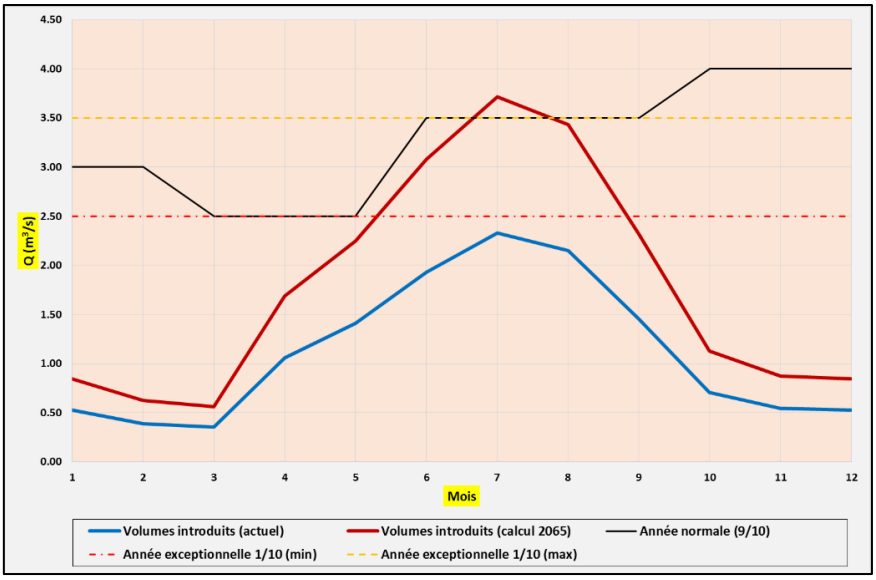


Figure 21 : Evolution des prélèvements mensuels en termes de débits (en m³/s) à l'horizon 2065

On constate ainsi une baisse des prélèvements d'octobre à mars, dominée par des baisses des usages AEP et industries.

A contrario, les prélèvements seraient renforcés de mai à septembre, commandés par une augmentation des besoins en eau pour l'irrigation.

⇨ **On estime ainsi que des prélèvements complémentaires de l'ordre de 1.2 m³/s seraient nécessaires pour les mois de juillet et août.**

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
INDUSTRIES	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09
AEP	-0.40	-0.40	-0.40	-0.40	-0.40	-0.40	-0.40	-0.40	-0.40	-0.40	-0.40	-0.40
CANAL DE FOREZ	+0.31	+0.23	+0.21	+0.63	+0.84	+1.15	+1.39	+1.28	+0.87	+0.42	+0.33	+0.31
AUTRE IRRIGATION	/	/	/	/	/	/	+0.36	+0.36	+0.36	/	/	/
Bilan	**-0.17**	**-0.25**	**-0.27**	**+0.15**	**+0.36**	**+0.67**	**+1.26**	**+1.16**	**+0.75**	**-0.06**	**-0.16**	**-0.17**

Tableau 22 : Evolution des prélèvements mensuels en termes de débits (en m³/s) à l'horizon 2065

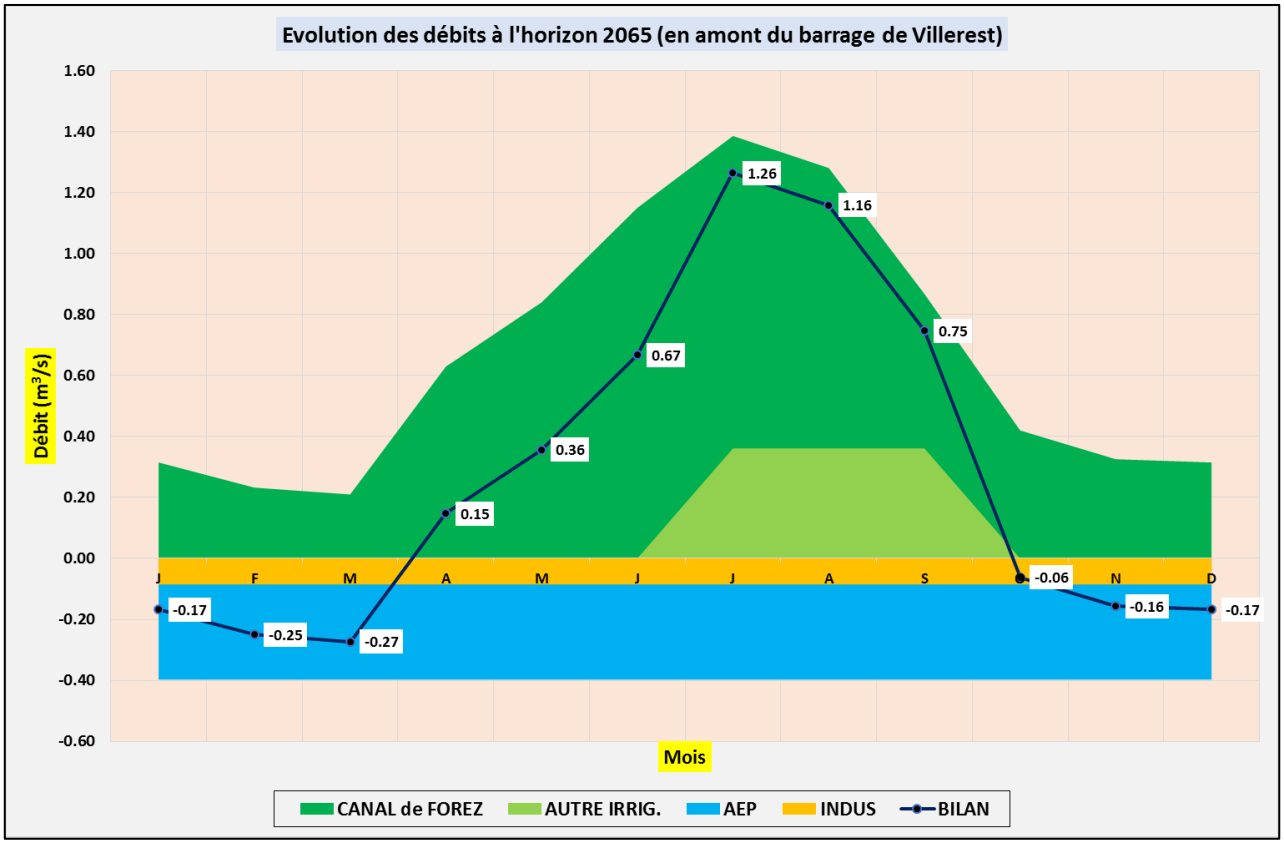
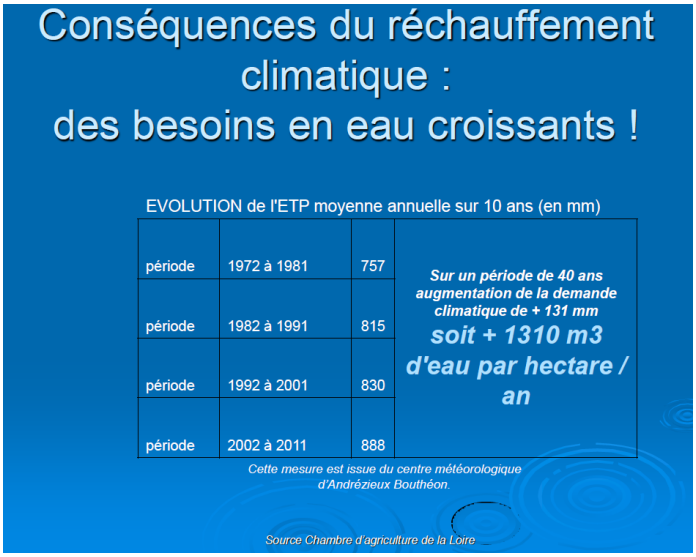


Figure 23 : Evolution des prélèvements mensuels en termes de débits (en m³/s) à l'horizon 2065

Ces résultats doivent naturellement être analysés avec du recul, eu égard aux nombreuses hypothèses formulées (hypothèse sur les valeurs de prospective, hypothèse sur le rendement du canal de Forez, hypothèse sur les répartitions mensuelles des volumes annuels,…).

Ces résultats doivent donc être appréciés comme une première évaluation, qui nécessiterait pour aller plus loin une analyse plus fine des possibles évolutions des besoins pour l'irrigation en lien avec le canal de Forez. La plaine de Forez irriguée par le canal semble ainsi constituer le principal facteur d'évolution des débits de prélèvements notamment à l'étiage pour le bassin versant amont du barrage. *On peut par exemple s'interroger sur les marges de manœuvre des prélèvements d'eau au niveau de la prise de Grangent eu égard au règlement de l'eau, aux règles du SDAGE et aux limites techniques propres au canal.*

Cette problématique d'augmentation des besoins en eau semble par ailleurs tout à fait appréhendée par les gestionnaires du canal. Les deux diapositives ci-jointes sont extraites d'une présentation du syndicat en charge de la gestion du canal du Forez, matérialisant une tendance à la hausse de l'ETP depuis 1972.



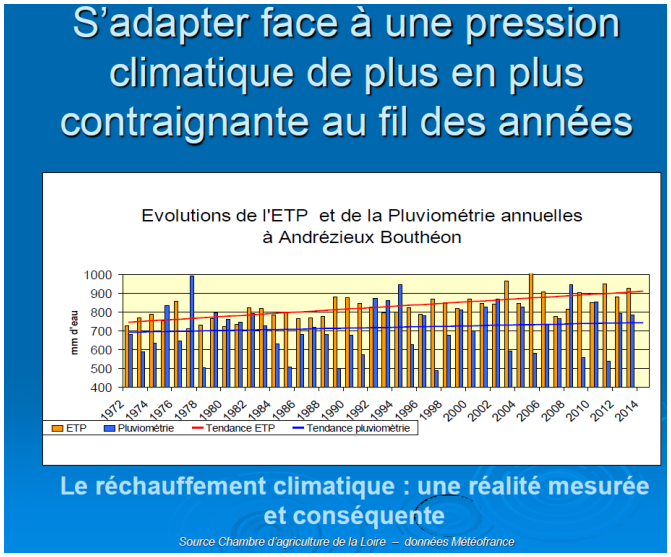


Figure 24 : Des besoins en eau croissants (source : SMIF)

3.1.2 EVALUATION DE L'IMPACT DE L'EVOLUTION DES PRELEVEMENTS EN AMONT DU BARRAGE DE VILLEREST

3.1.2.1 A PARTIR DES PROJECTIONS D'EXPLORE 2070 (SCC1A)

Afin d'apprécier l'impact du scénario d'évolution des prélèvements proposés à l'horizon 2065, les évolutions mensuelles ont été intégrées aux débits d'entrée du barrage en complément de l'impact du changement climatique.

⇨ **La chronique des débits d'entrée a ainsi été modifiée en intégrant les variations pour chaque mois de l'année.**

Les simulations de type scC1 ont été exploitées pour mener cette analyse, considérant qu'elles sont les plus représentatives de la gestion actuelle des barrages.

⇨ **On notera par la suite les simulations propres à ce nouveau scénario scC1 a.**

Les indicateurs présentés précédemment dans le cadre de la phase 1 sont exploités pour comparer l'impact de l'évolution des prélèvements en amont du barrage :

- En rouge, les résultats du scénario scC1a.
- En bleu, les résultats du scénario scC1.

On constate une légère baisse des niveaux d'eau dans le barrage à partir de début juillet, liée naturellement à une baisse des débits entrant dans le barrage depuis le mois de mai.

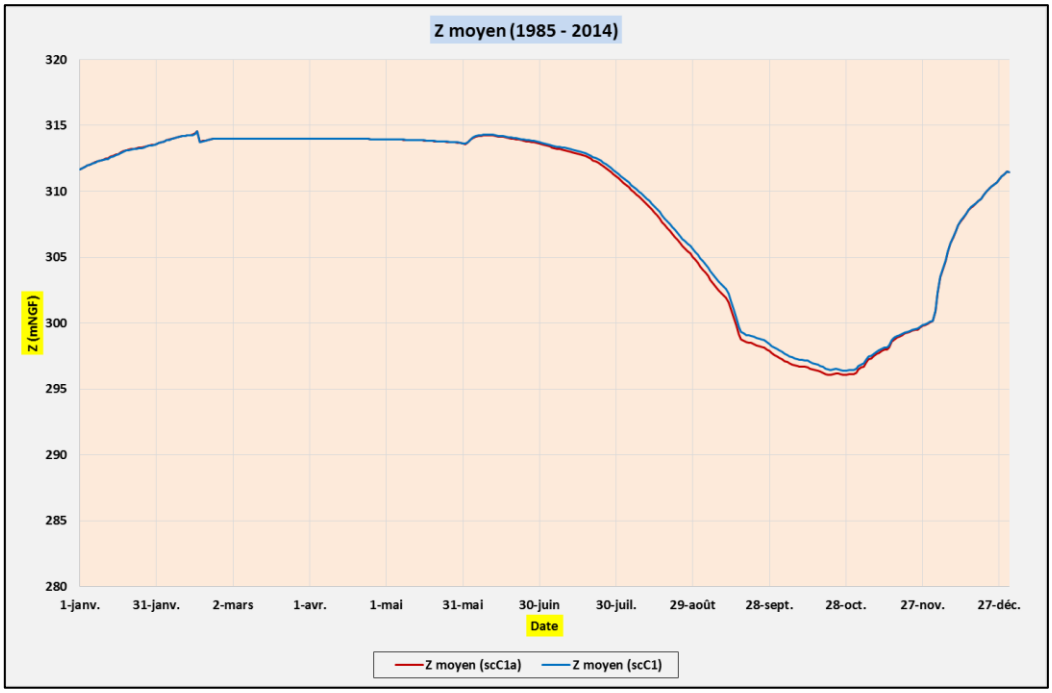


Figure 25 : Z moyen dans le barrage de Villerest pour le scénario scC1 et le scénario scC1a

Nombre de jours où Z(t) = 280mNGF			
GCM	ScC1a	ScC1	Evolution
ccma_cgcm3	4.3	3.8	+0.5
cnrm_cm3	1.0	0.7	+0.3
csiro_mk3	0.2	0.2	0.0
gfdl_cm2	1.5	1.2	+0.3
giss_aom	1.6	1.4	+0.2
giss_model	0.7	0.5	+0.2
ingv_echam4	0.2	0.3	0.0
ipsl_cm4	0.9	0.7	+0.2
microc3_2_medres	1.2	1.1	+0.2
miub_echo	1.6	1.4	+0.3
mpi_echam	1.3	1.0	+0.3
mri_cgcm	0.2	0.1	0.0
ncar_ccsm	3.9	2.6	+1.2

Le nombre de jours où le barrage serait vide, augmenterait légèrement pour la plupart des GCMs (+0.2 jours en moyenne), lié au fait que le barrage serait vide plus rapidement avec des apports en baisse sur la période estivale notamment.

Même constat pour le nombre de jours où Z < 312mNGF, qui serait en légèrement augmentation (voir graphe ci-dessous).

Le nombre de jours où le barrage de Villerest exercerait un soutien d'étiage à Gien serait toutefois identique entre les 2 scénarios scC1 et scC1a, avec 105 jours en moyenne du 01/06 au 30/11.

Tableau 26 : Evolution du nombre de jours où Z(t)=280mNGF (scC1a vs scC1)

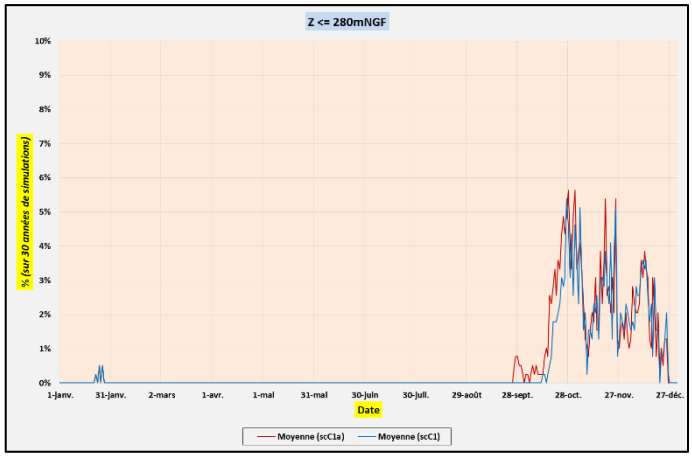


Figure 27 : nombre de jours où Z<=280mNGF

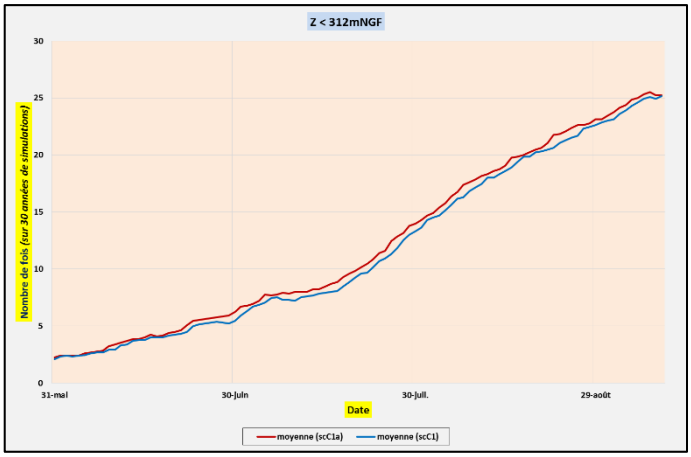


Figure 28 : nombre de jours où Z<312mNGF

Les volumes moyens en provenance de Villerest pour le soutien d'étiage à Gien seraient en légère baisse, compensés par une augmentation des volumes issus de Naussac.

On le voit très nettement sur les 2 graphiques suivant qui représentent respectivement l'évolution du soutien d'étiage en provenance de Villerest et de Naussac dans le temps. On retrouve effectivement sur le premier graphique la courbe rouge matérialisant le scénario scC1a en baisse par rapport à la courbe bleue matérialisant le scénario scC1. Sur le second graphique, la configuration est inversée.

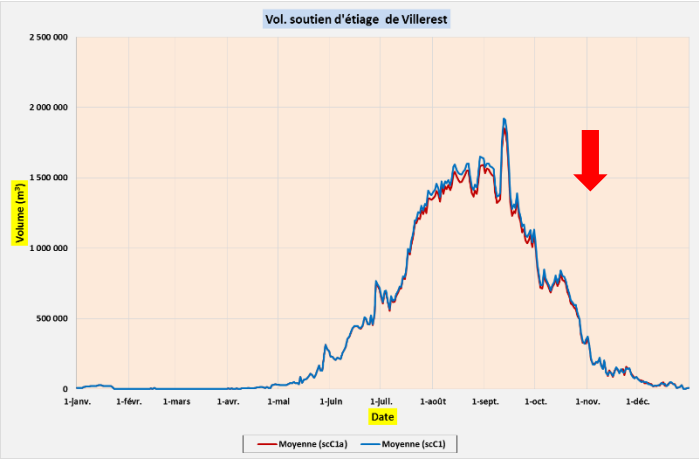


Figure 29 : Soutien d'étiage de Villerest (t)

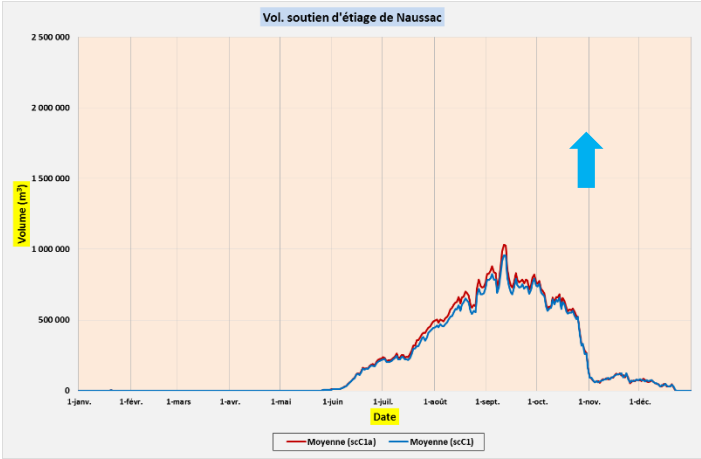


Figure 30 : Soutien d'étiage de Naussac (t)

Le nombre de jours où le barrage de Villerest serait vide, étant en légère augmentation, il exercerait un soutien d'étiage légèrement moins important. Le scénario scC1a conduit à un apport moindre depuis Villerest, en moyenne de l'ordre de -4.2 millions de m^3, la baisse la plus marquée atteignant -5.8 millions de m^3 pour le GCM ncar_ccsm.

⇨ **Cette baisse correspondrait à 2.6% du volume moyen provenant de Villerest pour le scénario scC1.**

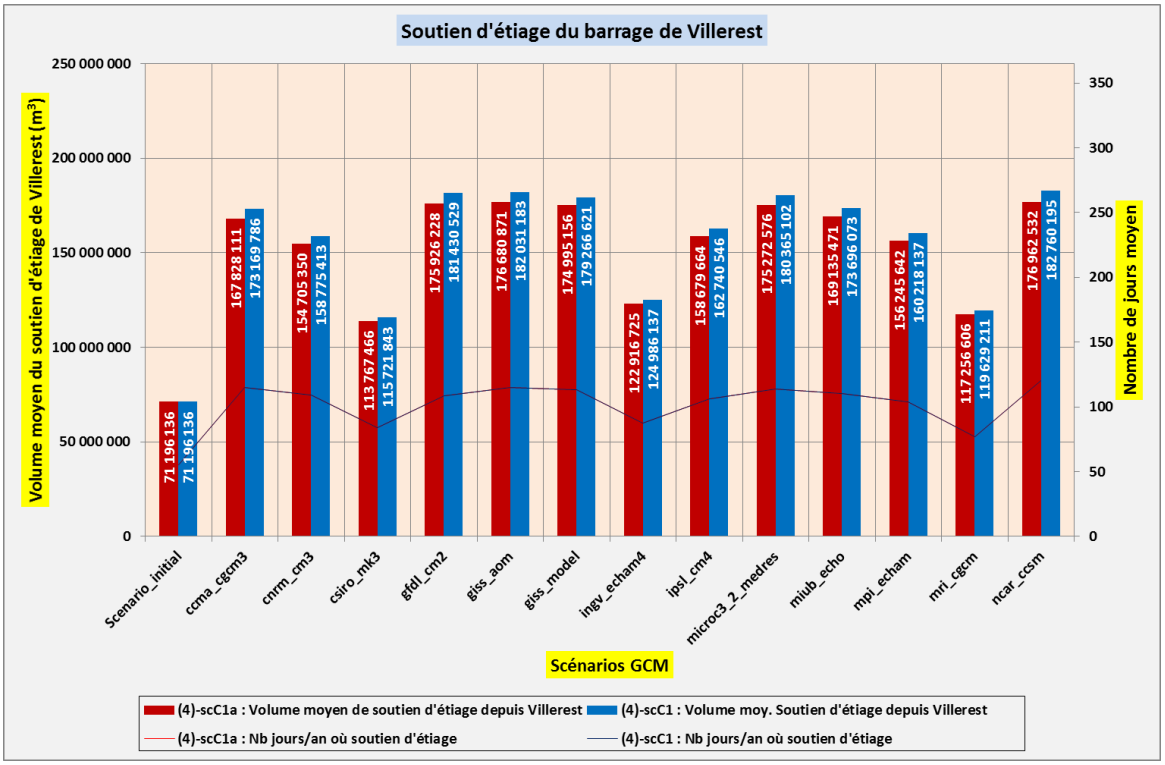


Figure 31 : Soutien d'étiage du barrage de Villerest (scC1 et scC1a)

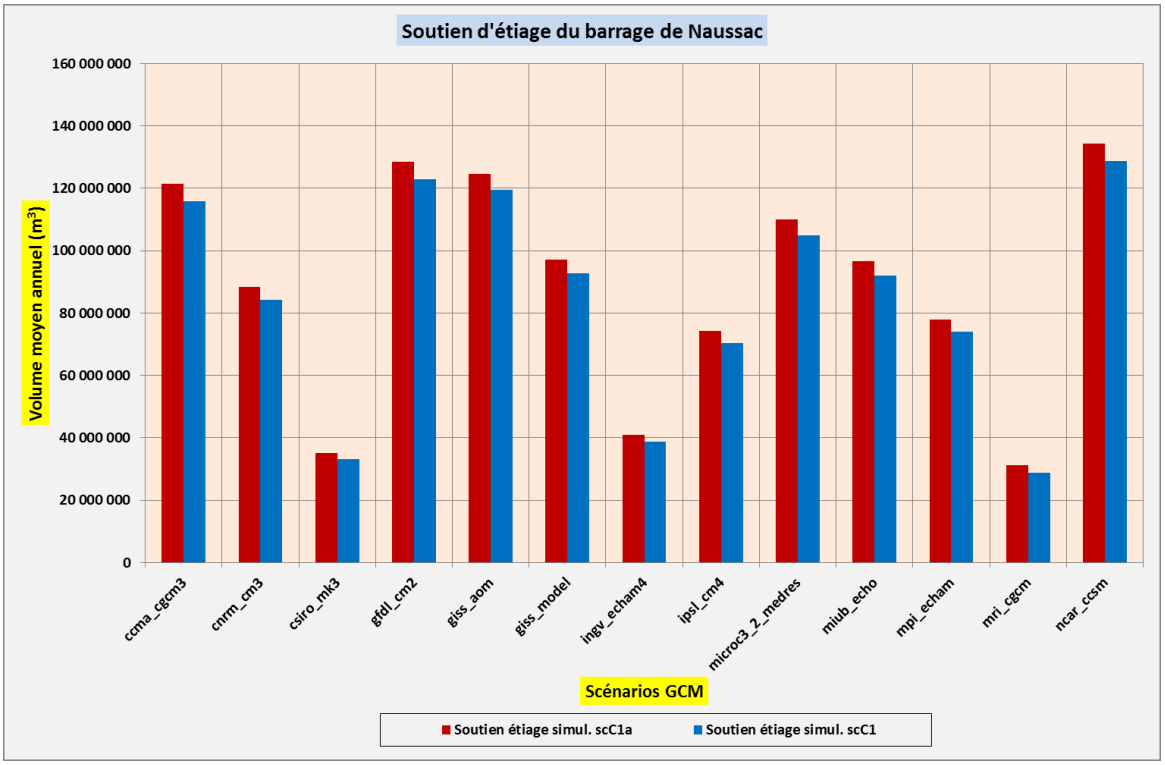


Figure 32 : Soutien d'étiage du barrage de Naussac (scC1 et scC1a)

3.1.2.2 A PARTIR D'UN SCENARIO CONTRADICTOIRE (SCC1B)

Afin de disposer d'un scénario contradictoire des prélèvements en amont du barrage, il a été décidé de tester un scénario d'impact de prélèvements de 30 millions de m^3/an

Actuellement le scénario construit à partir de d'Explore 2070 conduit à 11.5 millions de m^3 d'avril à septembre. Le scénario contradictoire représente ainsi un prélèvement près de 3 fois supérieur aux résultats obtenus à partir d'Explore 2070.

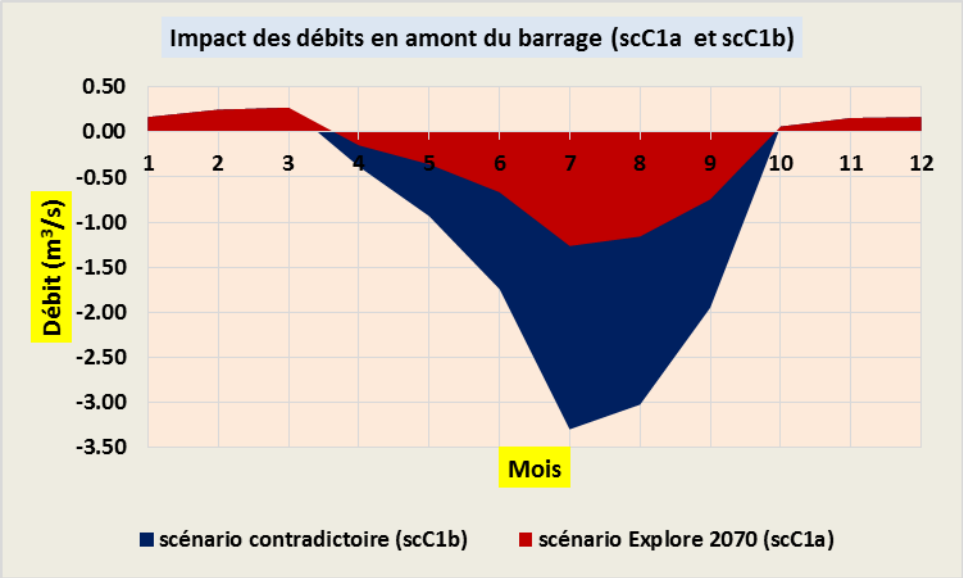


Figure 33 : Impact des débits en amont du barrage (scC1a et scC1b)

⇨ **On notera par la suite les simulations propres à ce nouveau scénario scC1 b.**

Les indicateurs présentés précédemment dans le cadre de la phase 1 sont exploités pour comparer l'impact de l'évolution des prélèvements en amont du barrage :

- En rouge, les résultats du scénario scC1a.
- En bleu foncé, les résultats du scénario scC1b.

On constate une légère baisse des niveaux d'eau dans le barrage à partir de début juillet, liée naturellement à une baisse des débits entrant dans le barrage depuis le mois de mai.

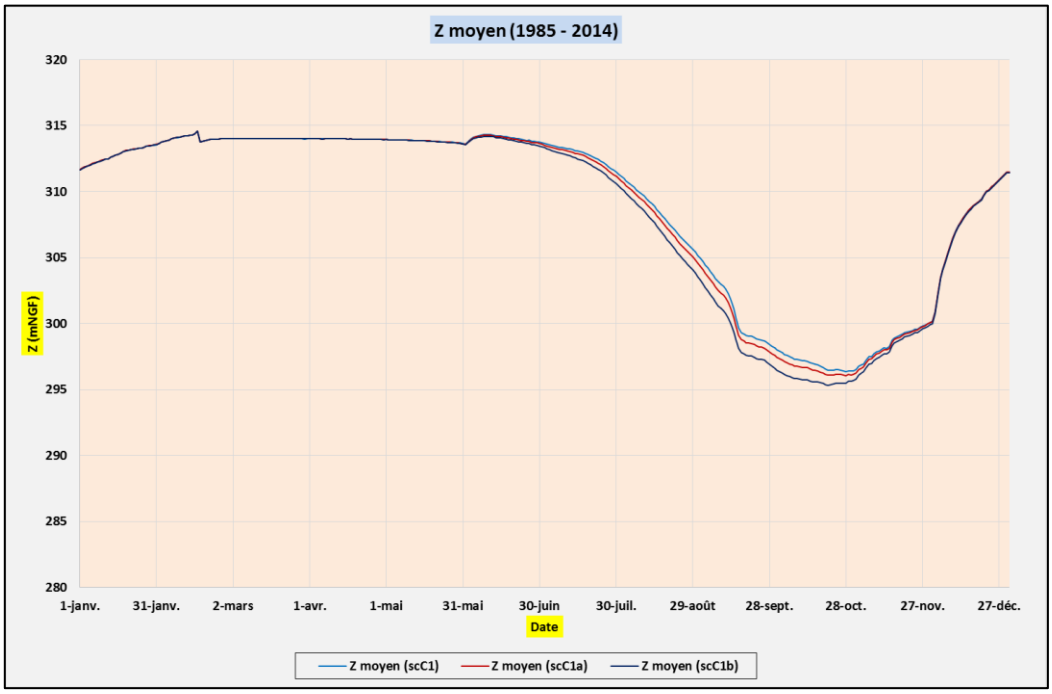


Figure 34 : Z moyen dans le barrage de Villerest pour le scénario scC1a et le scénario scC1b

Nombre de jours où Z(t) = 280mNGF			
GCM	ScC1a	ScC1b	Evolution
ccma_cgcm3	4.3	5.4	+1.1
cnrm_cm3	1.0	2.5	+1.5
csiro_mk3	0.2	0.2	+0.0
gfdl_cm2	1.5	2.2	+0.7
giss_aom	1.6	2.3	+0.7
giss_model	0.7	2.6	+1.9
ingv_echam4	0.2	0.3	+0.1
ipsl_cm4	0.9	1.2	+0.3
microc3_2_medres	1.2	2.0	+0.8
miub_echo	1.6	2.2	+0.6
mpi_echam	1.3	2.0	+0.7
mri_cgcm	0.2	0.2	+0.0
ncar_ccsm	3.9	6.2	+2.3

Le nombre de jours où le barrage serait vide, augmenterait pour la plupart des GCMs (+0.8 jours en moyenne), lié au fait que le barrage serait vide plus rapidement avec des apports en baisse sur la période estivale notamment.

Les volumes moyens en provenance de Villerest pour le soutien d'étiage à Gien seraient en légère baisse (+156 951 723 pour le scénario scC1a / +150 396 383 m^3 pour le scénario scC1b), compensés par une augmentation des volumes issus de Naussac.

On le voit très nettement sur les 2 graphiques suivant qui représentent respectivement l'évolution du soutien d'étiage en provenance de Villerest et de Naussac dans le temps. On retrouve effectivement sur le premier graphique la courbe rouge matérialisant le scénario scC1b en baisse par rapport à la courbe bleue matérialisant le scénario scC1a.

Sur le second graphique, la configuration est inversée.

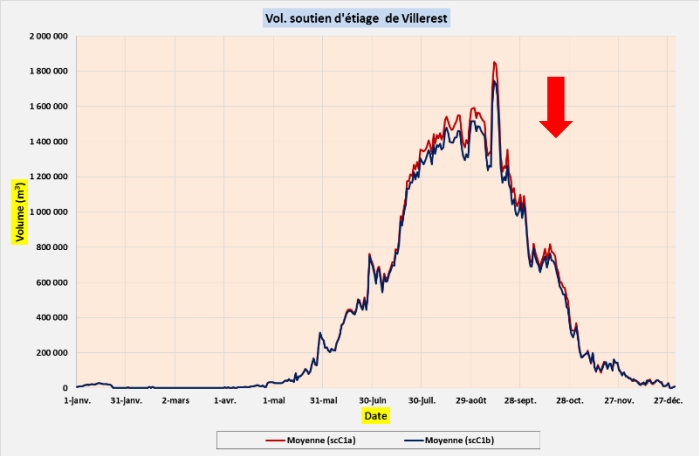


Figure 35 : Soutien d'étiage de Villerest (t)

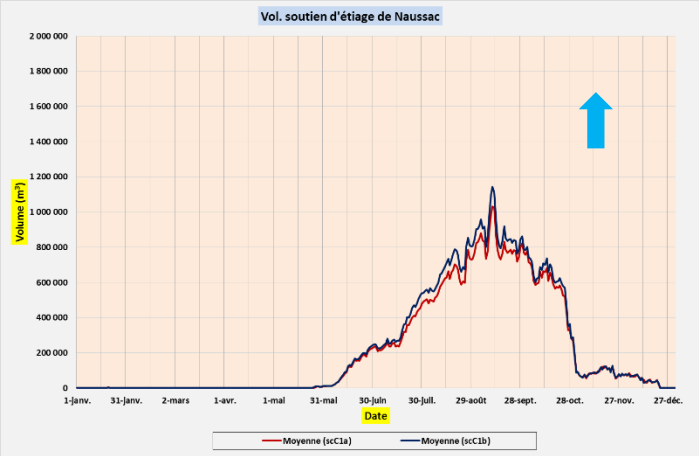


Figure 36 : Soutien d'étiage de Naussac (t)

Le nombre de jours où le barrage de Villerest serait vide, étant en légère augmentation, il exercerait un soutien d'étiage légèrement moins important. Le scénario scC1b conduit à un apport moindre depuis Villerest, en moyenne de l'ordre de -6.6 millions de m^3, la baisse la plus marquée atteignant -8.4 millions de m^3 pour le GCM gfdl_cm2.

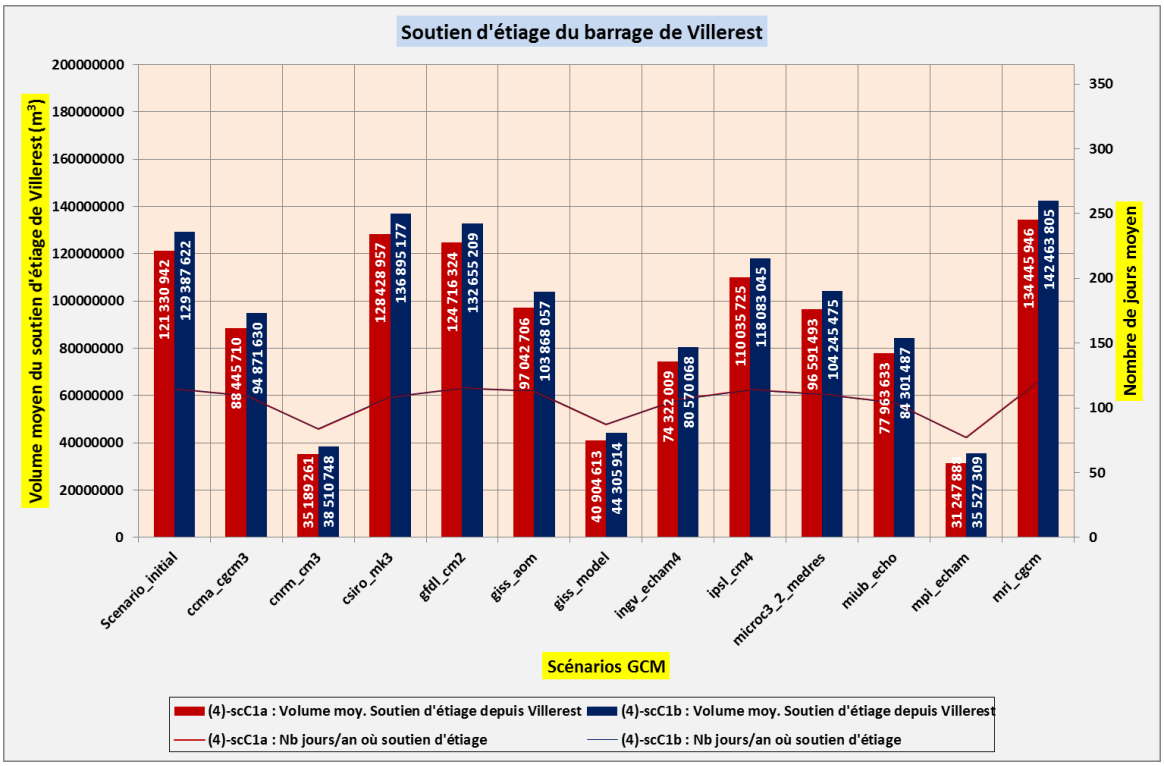


Figure 37 : Soutien d'étiage du barrage de Villerest (scC1a et scC1b)

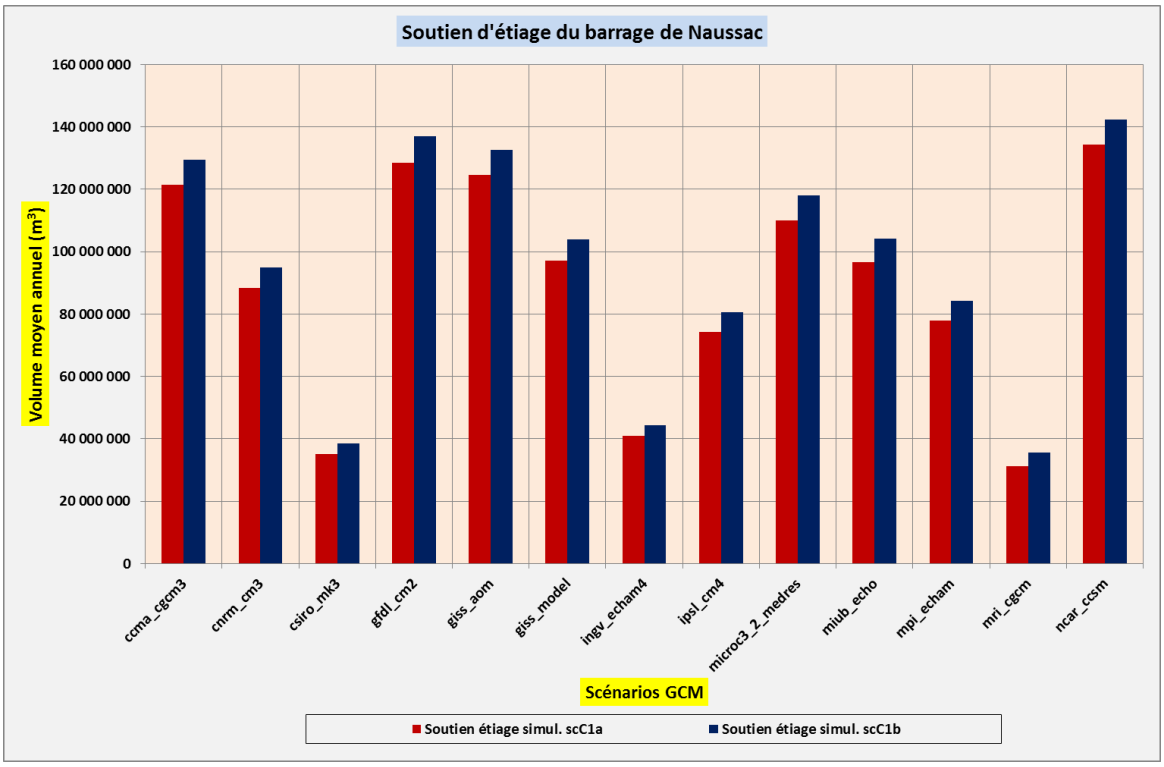


Figure 38 : Soutien d'étiage du barrage de Naussac (scC1a et scC1b)

3.2 SECTEUR EN AVAL DE VILLEREST

Les prélèvements impactant les eaux de surface *(uniquement sur la Loire et sa nappe alluviale dans notre calcul)*, sont estimés entre 1.6 et 2.1 milliards de m^3 sur la période 2002 à 2009.

Usage	V2002_M3	V2003_M3	V2004_M3	V2005_M3	V2006_M3	V2007_M3	V2008_M3	V2009_M3	min	max	moy
CENTRALE	1 883 835 576	1 887 752 999	1 426 372 003	1 887 294 725	1 828 241 322	1 908 155 324	1 727 403 200	1 915 861 092	1 426 372 003	1 915 861 092	1 808 114 530
INDUS	21 231 500	17 269 400	16 817 100	15 533 900	20 753 000	14 104 200	16 098 200	14 126 156	14 104 200	21 231 500	16 991 682
AEP	165 284 100	157 673 100	157 023 900	164 439 600	161 062 900	149 117 500	150 983 270	154 696 201	149 117 500	165 284 100	157 535 071
IRR	13 750 200	17 554 300	15 532 300	18 567 400	16 704 100	8 038 600	12 424 141	15 310 555	8 038 600	18 567 400	14 735 200
Total	**2 084 101 376**	**2 080 249 799**	**1 615 745 303**	**2 085 835 625**	**2 026 761 322**	**2 079 415 624**	**1 906 908 811**	**2 099 994 004**	**1 615 745 303**	**2 099 994 004**	**1 997 376 483**

Tableau 39 : Volumes prélevés impactant les eaux de surface sur le secteur en aval de Villerest (2002 à 2009)

En rouge les valeurs maximales constatées.

En bleu, les valeurs minimales constatées.

Les prélèvements concernent en majorité ceux réalisés pour le refroidissement des centrales électriques (nucléaires ou thermiques). Ils varient entre 1.4 et 1.9 milliards de m^3/an sur la période 2002 à 2009, avec un minimum en 2004 et un maximum en 2009. L'année 2006 constitue à ce titre une année moyenne de prélèvement.

Nota : on conservera par la suite la moyenne des prélèvements de 2002 à 2009, comme valeur de départ pour la projection à l'horizon 2065. En l'occurrence, on considèrera un maintien des prélèvements.

La centrale thermique de Cordemais représente près de 63% en moyenne de l'ensemble des prélèvements liés aux centrales électriques.

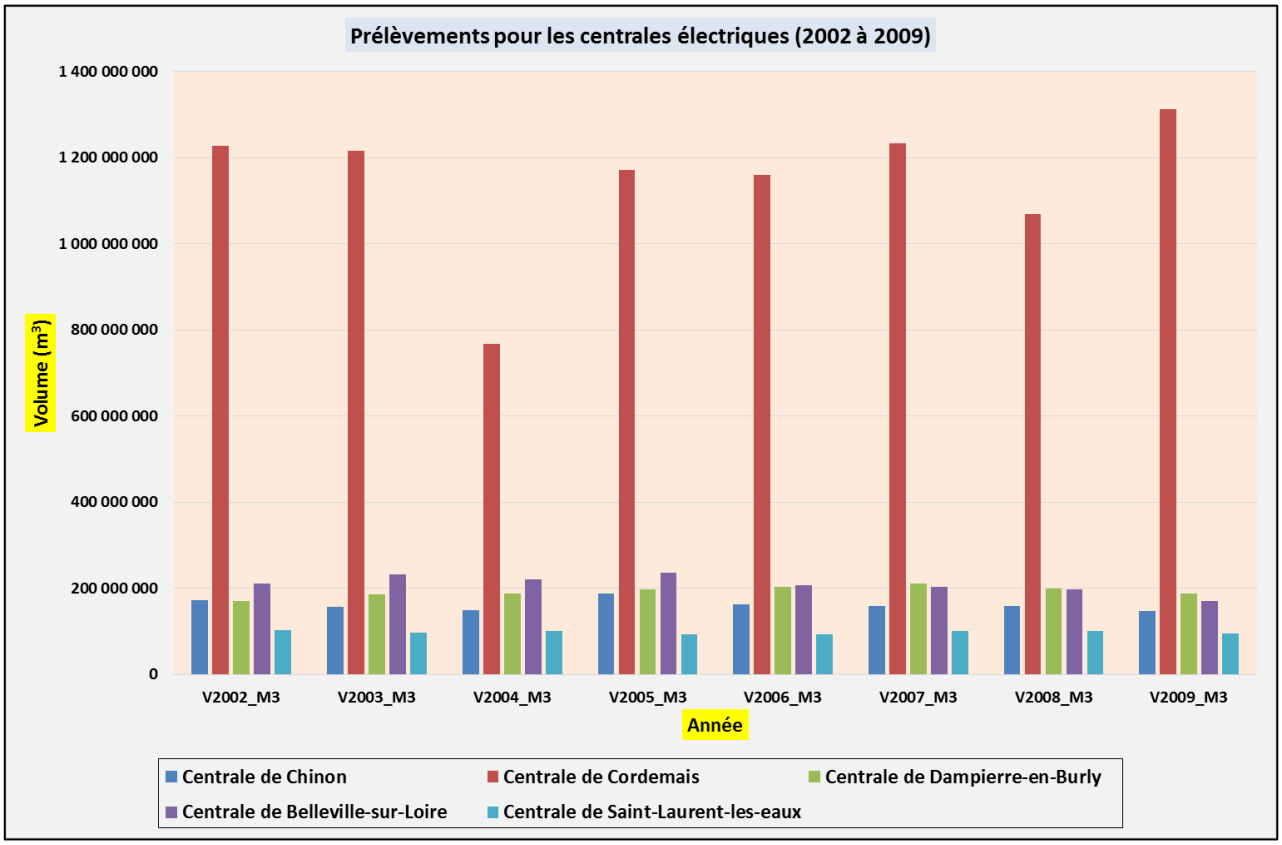


Figure 40 : Prélèvements pour les centrales électriques (2002 à 2009) sur la Loire

L'alimentation en eau potable constitue le second poste le plus important, largement devant l'irrigation. Les prélèvements varient entre 149 et 157.5 millions de m^3/an sur la période 2002 à 2009, avec un minimum en 2007 et un maximum en 2002.

Nota : on conservera par la suite la moyenne des prélèvements de 2002 à 2009, pour la projection à l'horizon 2065.

L'irrigation représente environ 8% des prélèvements globaux annuels impactant les eaux de surface. Ils varient entre 8 et 18.6 millions de m^3/an sur la période 2002 à 2009, avec un minimum en 2007 et un maximum en 2005 (année sèche sur l'ouest de la France).

	2006		2065	
Usage	**en m^3**	**en m^3/s**	**en m^3**	**en m^3/s**
CENTRALE	1 828 241 322	58.0	1 828 241 322	58.0
INDUS	20 753 000	0.66	7 632 866	0.30
AEP	161 062 900	5.11	148 260 032	4.80
IRR	16 704 100	2.08	23 570 260	3.32
TOTAL	**2 026 761 322**	**65.8**	**2 007 704 480**	**66.4**

Tableau 41 : Evolution des prélèvements et des débits moyens prélevés à l'étiage impactant les eaux de surface à l'horizon 2065 (secteur aval)

Le volume moyen pour l'irrigation passerait ainsi à une valeur supérieure aux prélèvements de 2005, évalués à 23.6 millions de m^3 en année moyenne à l'horizon 2065. *Cette projection conduirait à une augmentation du débit de prélèvement moyen à l'étiage de l'ordre de 1.2 m^3/s pour cet usage.*

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).

Au final, 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 m^3/s**.

On comprend bien que l'incertitude est importante, et corrélée aux évolutions des besoins en eau pour les sites de production énergétique. Dans le cadre du projet Explore 2070, le devenir de la centrale thermique de Cordemais n'est pas évoqué et constitue une variable d'ajustement difficile à cerner. Un élément de contexte intéressant, issu d'un document d'EDF semble attester de sa pérennité dans l'échiquier énergétique de la région : « Elle se situe sur l'estuaire de la Loire entre Nantes et St Nazaire, et semble jouer en région ouest, un rôle stratégique dans la Transition énergétique en accompagnant le développement des énergies renouvelables intermittentes (source : EDF) ».

En conclusion, il nous semblait intéressant d'intégrer des éléments de contexte supplémentaires, décrivant des débits « seuils » pour les centrales nucléaires *(source : Les atouts énergétiques du bassin de la Loire Vincent Bouchot, Philippe Calcagno, Albert Genter).* Le document est daté d'août 2014. Au-delà de valeurs sur les prélèvements moyens d'eau liés aux centrales, des débits techniques sur la Loire semblent exister pour garantir le pompage.

« Les caractéristiques des dispositifs de pompage qui assurent une hauteur manométrique suffisante à l'aspiration des pompes des différents sites, associées à la présence d'un seuil (sauf à Chinon), ***permettraient de fonctionner jusqu'à des débits de 25 à 35 m^3/s****, la sûreté des réacteurs étant assurée au moins jusqu'à 14 m^3/s, voire jusqu'à 7 m^3/s pour les centrales les plus en amont (probablement Saint-Laurent les Eaux, Dampierre-en-Burly et Belleville-sur-Loire).*

Chinon est un cas particulier : la construction d'un seuil en enrochement est prévue si le débit de la Loire devait descendre en dessous de 42 m^3/s. »

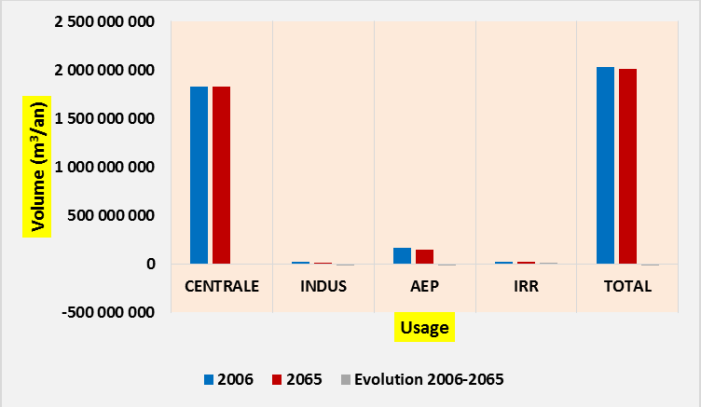


Figure 42 : Evolution des volumes prélevés annuellement

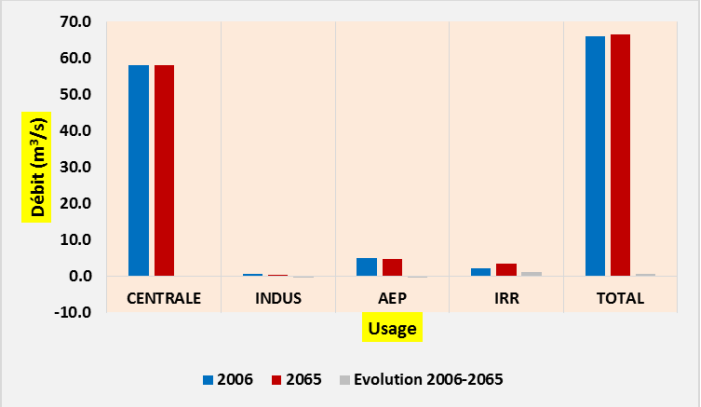


Figure 43 : Evolution des débits moyens prélevés à l'étiage

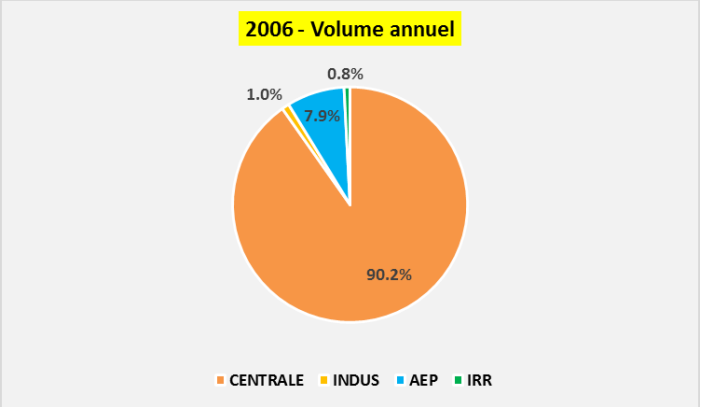


Figure 44 : Répartition des volumes prélevés annuellement (actuel)

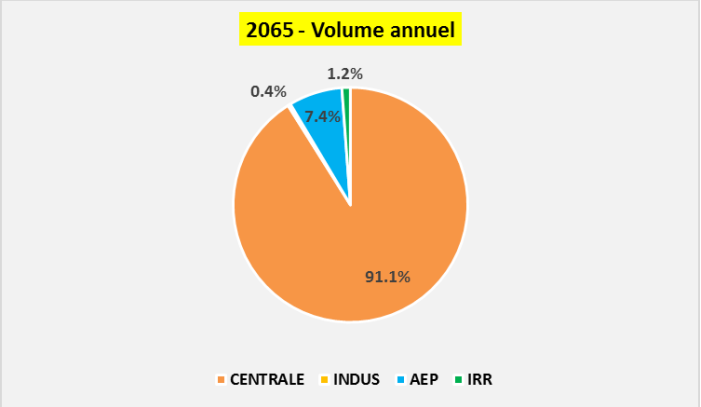


Figure 45 : Répartition des volumes prélevés annuellement (2065)

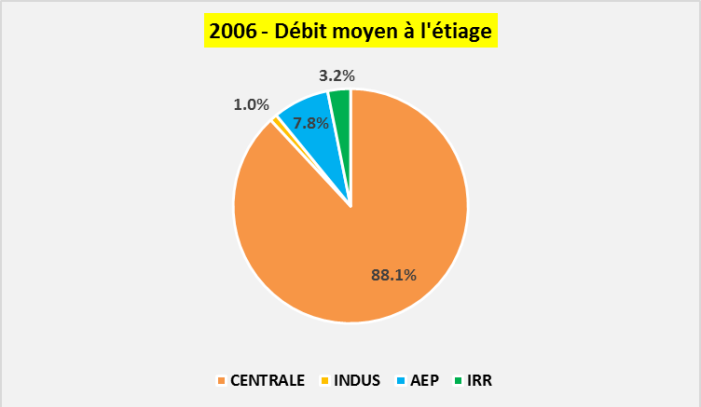


Figure 46 : Répartition des débits moyens prélevés à l'étiage (actuel)

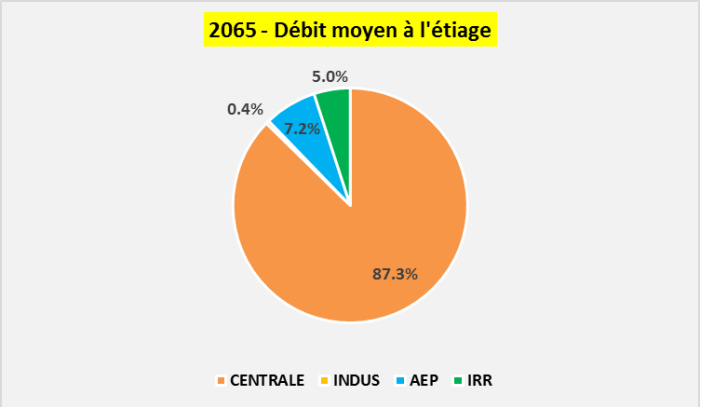


Figure 47 : Répartition des débits moyens prélevés à l'étiage (2065)

4 CONCLUSIONS

Les évaluations réalisées pour les prélèvements sur le secteur amont impactent faiblement la gestion du barrage de Villerest et notamment sa capacité à concourir au soutien d'étiage à Gien. L'impact du changement climatique reste de très loin le principal facteur de changement à intégrer. En l'état actuel, le canal de Forez semble constituer le principal facteur de changement à suivre pour l'évolution des prélèvements. Des anticipations entre l'augmentation des besoins en eau d'irrigation et les capacités d'alimentation depuis Grangent semblent ainsi nécessaires.

Le secteur aval est marqué par un statuquo des besoins en soutien d'étiage, fortement conditionné par l'hypothèse de maintien des capacités de puissance énergétique existantes *(87% des besoins en eau à l'étiage)*. Il est évident que l'évolution des politiques publiques et notamment les choix de maintien des centrales nucléaires, ainsi que les développements technologiques en matière de production énergétique sont de nature à remettre en cause cette hypothèses conservative. Les demandes sociales en matière de production nucléaire et les dernières orientations de la loi de transition énergétique, sont de nature à favoriser un mix énergétique plus important à l'avenir, et s'orienter donc vers moins de nucléaire. L'intégration de plus d'énergies renouvelables pourrait nécessiter en parallèle, des capacités de régulation plus importantes pour stocker notamment l'énergie par le biais par exemple du développement de STEP (station de stockage d'énergie par pompage-turbinage) adaptées aux besoins locaux. Le gestionnaire doit garder à l'esprit qu'en l'état actuel le débit moyen de prélèvement sur la Loire aval correspond au QMNA5 actuel à Gien (soit de l'ordre de 65 m^3/s).

Les sites de production nucléaire semblent pouvoir continuer à assumer leur production pour des débits moins importants, avec probablement des restrictions sur la récurrence de ce type de fonctionnement en mode dégradé. Dans une tendance baissière des débits d'étiage sous l'effet du changement climatique, sans un fort soutien des barrages de Villerest et de Naussac, il semble donc primordial de s'assurer de la bonne cohérence, des évolutions des besoins en eau des sites de production ou régulation énergétique sur le bassin de la Loire aval, avec les capacités de soutien d'étiage des barrages de Villerest et de Naussac.