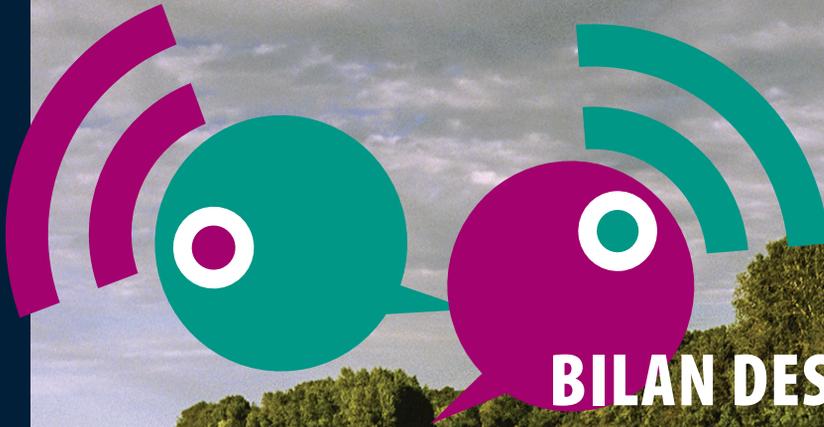


■ Régions • Auvergne-Rhône-Alpes • Bourgogne-Franche-Comté • Centre-Val de Loire • Nouvelle-Aquitaine • Occitanie • Pays de la Loire ■ Départements • Allier • Ardèche • Cher • Creuse • Indre-et-Loire • Loir-et-Cher • Loire • Haute-Loire • Loire-Atlantique • Loiret • Lozère • Maine-et-Loire • Nièvre • Puy-de-Dôme • Saône-et-Loire • Haute-Vienne ■ Villes, Agglos et Métropoles • Agglomération de



Nevers • Angers Loire Métropole • Blois • Bourges • Châteauroux • Clermont Communauté • Limoges • Montluçon • Moulins Communauté • Nantes Métropole • Orléans • Roannais Agglomération • Saint-Etienne-Métropole • Saint-Nazaire • Saumur Val de Loire • Tour(s)plus • Vichy • Vierzon ■ SICALA • Allier • Cher • Indre-et-Loire • Haute-Loire • Maine-et-Loire • Nièvre • Saône-et-Loire



BILAN DES CONNAISSANCES DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE SAGE VAL DHUY LOIRET

Avril 2017



SOMMAIRE

1 SOURCE DES DONNEES RESTITUEES 3

2 L’EVOLUTION DU CLIMAT 8

3 LES IMPACTS SUR LES DEBITS DES COURS D’EAU 10

3.1 PRINCIPAUX RESULTATS 11

4 LES IMPACTS SUR LES EAUX SOUTERRAINES 14

5 LES IMPACTS SUR LA TEMPERATURE DE L’EAU 19

6 FICHER EXCEL DE SYNTHESE 21

Table des illustrations

Figure 1 : Cascade d’incertitudes (source : Thèse J. Boé, 2007) 6

Figure 2 : Réchauffement mondial en surface / moyennes des différents modèles d’émission (source : 4^{ème} rapport du GIEC, 2007) 7

Figure 3 : Evolutions de la Pluie et l’ETP pour les 7 projections climatiques à l’horizon du Milieu du Siècle (source : Explore 2070)... 9

Figure 4 : Evolution des débits moyens mensuels pour les 7 projections climatiques – la Loire à Gien (source : Explore 2070) 11

Figure 5 : Evolution du module pour les 7 projections climatiques (source : Explore 2070) 12

Figure 6 : Comparaison des indicateurs hydrologiques Explore 2070 vs ICC Hydroqual (en Milieu du Siècle)..... 13

Figure 7 : % Evolution des débits moyens à la station de Gien sur la Loire (source : Explore 2070 et ICC Hydroqual) 13

Figure 8 : Exemples de chroniques piézométriques pour une simulation avec ARPEGE 2009 à 2100 (source : Thèse de Céline Monteil) 15

Figure 9 : Projections climatiques utilisées (source : Thèse de Céline Monteil) 16

Figure 10 : Evolution des échanges entre les aquifères et la Loire lors du calcul des VCN30 en Temps Présent (1981-2000), Milieu du Siècle (2046-2065) et Fin du Siècle (2081-2100) pour des forçages ARPEGE (source : Thèse de Céline Monteil) 17

Figure 11 : Zone d’infiltration dans le Val d’Orléans : impact du changement climatique (source : Thèse d’Emmanuelle Joigneaux) 17

Figure 12 : Profils longitudinaux des dates de dépassement du seuil thermique 16°C (source : ICC Hydroqual) 19

Figure 13 : Extrait de quelques graphiques présents dans le fichier Excel..... 21

Figure 14 : Synthèse des évolutions des principaux indicateurs en Milieu du Siècle (source : Explore 2070) 23

Le présent document s'intègre dans une démarche plus globale visant à faciliter la restitution des données relatives aux impacts du changement climatique disponibles sur les territoires des 9 procédures SAGE dont l'Etablissement public Loire assure l'animation (Loire en Rhône-Alpes, Haut-Allier, Allier aval, Sioule, Cher amont, Yèvre-Auron, Cher aval, Val Dhuy Loiret, Loir).

Des présentations orales de ces éléments ont ainsi été réalisées au cours du mois d'avril 2017. A l'échelle de chaque territoire, un fichier Excel synthétise les données scientifiques relatives aux impacts du changement climatique disponibles et accessibles.

Les lecteurs pourront utilement consulter les sites internet du SAGE et de l'Etablissement public Loire pour accéder à ces informations :

www.eptb-loire.fr/

www.sage-val-dhuy-loiret.fr/

1 SOURCE DES DONNEES RESTITUEES

Ce document a pour objectif de **faire un bilan des connaissances disponibles en termes d'impacts au changement climatique sur le périmètre du SAGE.**

Cette synthèse s'appuie **principalement sur 2 études** :

- Explore 2070 (portée par le Ministère de l'Environnement) : à l'échelle de la France et Outre-Mer,
- ICC Hydroqual (portée par l'Université de Tours) : à l'échelle du bassin de la Loire et ses affluents.

Des thèses ou documents complémentaires ont pu être également exploités afin de restituer des données au plus proche des territoires ciblés.

Explore 2070 (2010-2012)

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 l'évaluation des changements possibles des eaux de surface à l'horizon Milieu du Siècle (MS) 2046-2065, par rapport à un état de référence (1961-1990/2000). Ces travaux ont été menés à partir d'un scénario d'émission de gaz à effet de serre (A1B) et d'un ensemble de modèles climatiques et hydrologiques. Une chaîne de modélisation a été mise en place afin de produire des simulations de débits journaliers en Temps

Présent (PST - 1962-1991) et en temps futur (2046-2065) au droit de 1522 points de calcul sur le réseau hydrographique de la métropole.

- 7 modèles climatiques globaux forcés par le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B (médiann en termes d'évolution thermique) ont été utilisés pour simuler le climat présent et futur au droit des points de calcul sous la forme de précipitations, température et évapotranspiration potentielle (ETP).

Nom Modèle	Nomenclature Explore 2070	Centre climatique
CCCMA_CGCM3	CCMA	CCCMA (Canada)
ECHAM5/MPI	ECHAM5	MPI (Allemagne)
ARPEGE V3+	ARPV3	Météo-France (France)
GFDL-CM2.0	GFDL20	GFDL (USA)
GFDL-CM2.1	GFDL21	GFDL (USA)
GISS_MODEL_ER	GISS	GISS (USA)
MRI-CGCM2.3.2	MRI	MRI (Japon)

⇒ Ces projections climatiques sont issues du 4^{ème} rapport du GIEC¹ (2007).

Ces sorties des modèles climatiques ont été ensuite utilisées en entrée de 2 modèles hydrologiques (un modèle de type conceptuel : GR4J et un modèle à base physique : Isba-Modcou), afin de simuler les débits présents et futurs possibles aux exutoires des bassins, et donc d'appréhender les changements hydrologiques possibles en ces points.

ICC-HYDROQUAL (2009-2010)

Le projet de recherche (ICC-HYDROQUAL pour Impact du Changement Climatique sur l'hydro système Loire : HYDROlogie, Régime thermique, QUALité des eaux), porté par l'Université de Tours dans le cadre du plan Loire III, a permis d'étudier à l'échelle du bassin versant de la Loire et de ses affluents, les impacts du changement climatique :

- Sur les débits des cours d'eau,
- Sur la température de l'eau.

Les modèles de circulation globale (ou GCMs) exploités dans le cadre du projet ICC-HYDROQUAL sont présentés ci-après. Ils correspondent aux projections climatiques de différents laboratoires ou organismes de recherche nationaux ou internationaux, produites dans le cadre du GIEC.

1. CCMA CGCM3 (Canada)
2. MRI CGCM (Japon)
3. MPI-ECHAM (Allemagne)

¹ GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

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)*
14. *ARPEGE (France Météo-France)*

Nota : deux de ces organismes sont français, l'institut Pierre et Simon Laplace et Météo France.

A noter que dans le cadre de l'étude ICC-HYDROQUAL, les données climatiques utilisées correspondent aux scénarii dénommés SCRATCH2010 (différence par rapport à Explore 2070 de la méthode statistique de descente d'échelle).

Les incertitudes associées aux projections climatiques :

Il est important de bien garder à l'esprit que les **sources d'incertitude sont nombreuses**, liées d'une part au processus de calcul par modélisation (scénarios futurs d'émission des gaz à effet de serre, connaissance imparfaite des phénomènes physiques notamment des rétroactions, variabilité naturelle du climat,...) qui reste une représentation de la réalité, et d'autre part aux nombreuses étapes de calcul inhérentes au processus de quantification de l'impact du changement climatique.

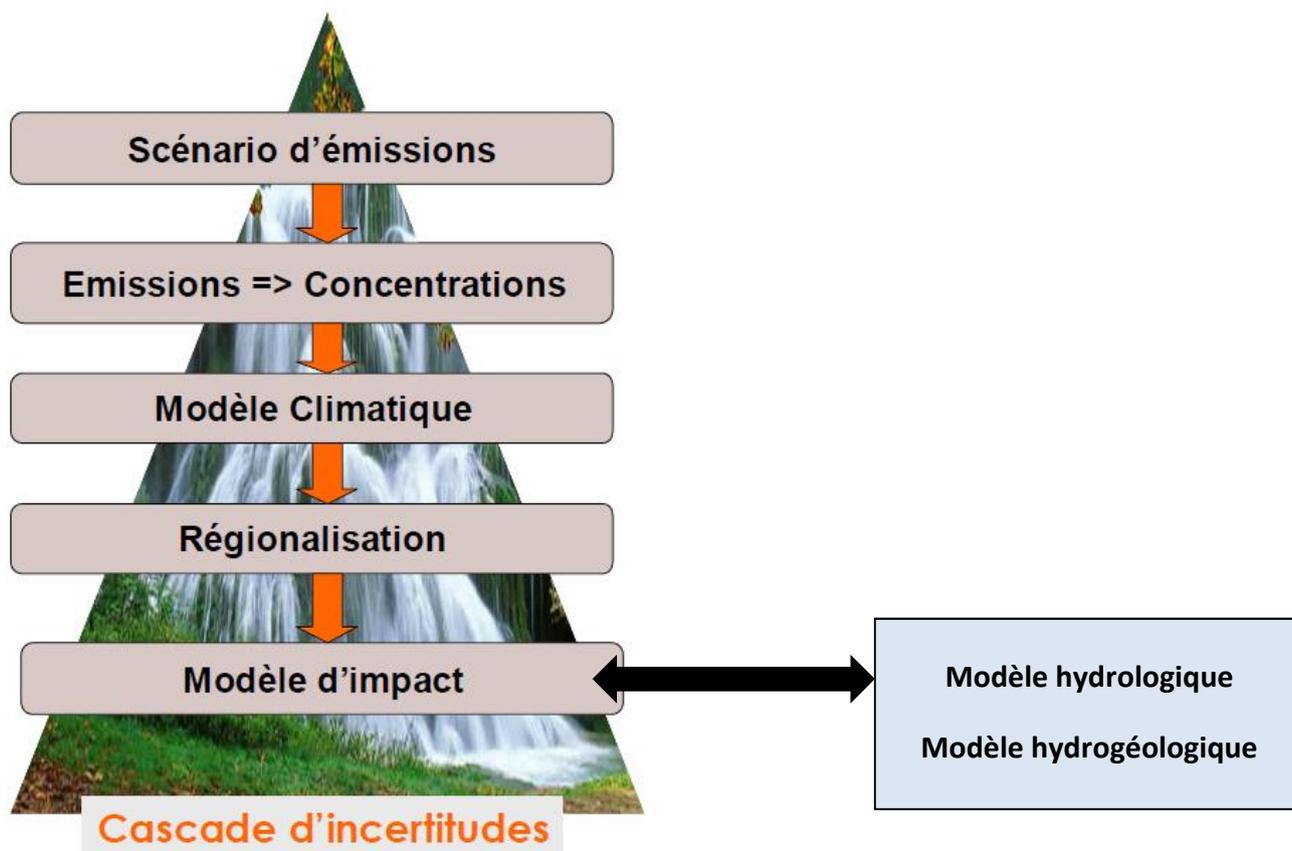


Figure 1 : Cascade d'incertitudes (source : Thèse J. Boé, 2007)

L'utilisation de plusieurs projections climatiques reste donc à ce jour le meilleur moyen de caractériser ces incertitudes, et de définir in fine une stratégie d'adaptation robuste.

Ce qu'il faut retenir

- Les projections climatiques utilisées dans le cadre des projets de recherche Explore 2070 et ICC Hydroqual sont issues des modèles climatiques du 4^{ème} rapport du GIEC (2007). **Les différences en termes de production des données concernent la méthode de descente d'échelle utilisée qui a évolué entre 2008 et 2010 (cf. publications du CERFACS).**
- L'ensemble des résultats présentés ici ont été obtenus à l'aide de scénarios issus de l'AR4 (2007) du GIEC. En 2014, un nouveau rapport AR5, a été publié. Ce rapport se base sur de nouveaux scénarios climatiques obtenus avec une méthode différente et avec une nouvelle génération de modèles climatiques. **Néanmoins les scénarios de l'AR4 ne sont pas obsolètes car il a été montré que ces scénarios produisent des projections climatiques très similaires sur le territoire français (Boé et Terray 2014, Jouzel et al. 2014).**
- Les **résultats présentés** ci-après sont majoritairement issus des projections climatiques sous le **scénario d'émission de gaz à effet de serre et aérosols A1B (médian en termes d'évolution thermique).**

Ce scénario est basé sur un équilibre entre les différentes sources d'énergie (fossiles et autres). Il prévoit donc une baisse des émissions à partir de 2050. Cependant les concentrations continuent à augmenter tout au long du siècle malgré cette diminution des émissions. Ce scénario constitue une évolution intermédiaire par rapport aux différents scénarios établis en termes d'émissions et à une augmentation projetée de la température moyenne mondiale de 2.8°C.

Nota : Les impacts du changement climatique sur les eaux de surface correspondent au scénario d'émission A1B. Les impacts du changement climatique sur les eaux souterraines peuvent intégrer le scénario d'émission A2.

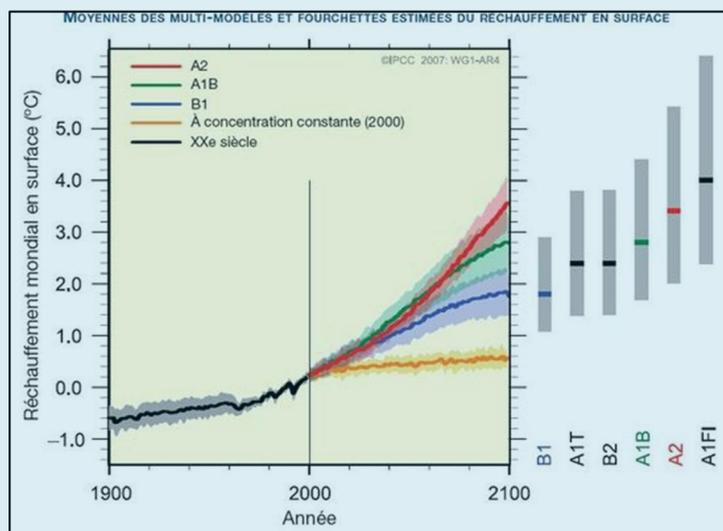


Figure 2 : Réchauffement mondial en surface / moyennes des différents modèles d'émission (source : 4^{ème} rapport du GIEC, 2007)

Les différents scénarios ont été élaborés en 2005. On peut donc les comparer avec la trajectoire effective des émissions des 10 dernières années. **En dépit des effets ponctuels de la crise économique mondiale observés en 2009, les émissions récentes de CO2 suivent le scénario de poursuite des rejets conduisant à une hausse de la température globale de 5° (± 1°) d'ici 2100. Elles s'écartent du scénario d'atténuation qui correspond à la cible + 2°.**

Les chapitres suivants font état des données existantes en termes de transcription des impacts du changement climatique :

- Evolution des précipitations, températures de l'air, ETP (données restituées à l'échelle mensuelle),
- Evolution des eaux de surface (calcul de l'impact sur les débits),
- Des éléments sur les eaux souterraines, avec l'évolution du **taux de recharge** (à l'échelle du bassin versant),
- Evolution de la température de l'eau (à l'échelle du bassin de la Loire et ses affluents).

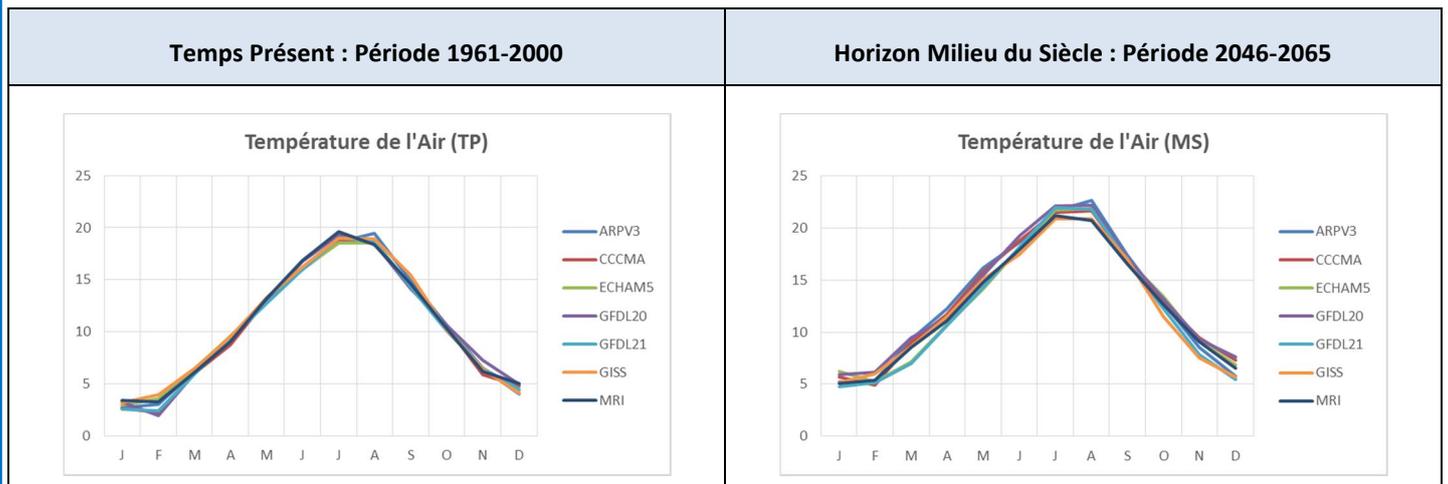
2 L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

Les données d'Explore 2070 accessibles permettent de disposer d'une **évolution mensuelle** pour les **principaux indicateurs climatiques** :

- **Température de l'air**
- **Pluie**
- **ETP (Evapotranspiration)**

Ces données sont accessibles dans le fichier Excel pour l'ensemble des points de calcul Explore 2070. Ces dernières correspondent aux valeurs moyennes de ces 3 variables climatiques agglomérées à l'échelle du bassin versant correspondant à chaque point de calcul.

Les graphiques suivants correspondent au **point de calcul Explore 2070 n°129, le Dhuy à St-Cyr-en-Val**.



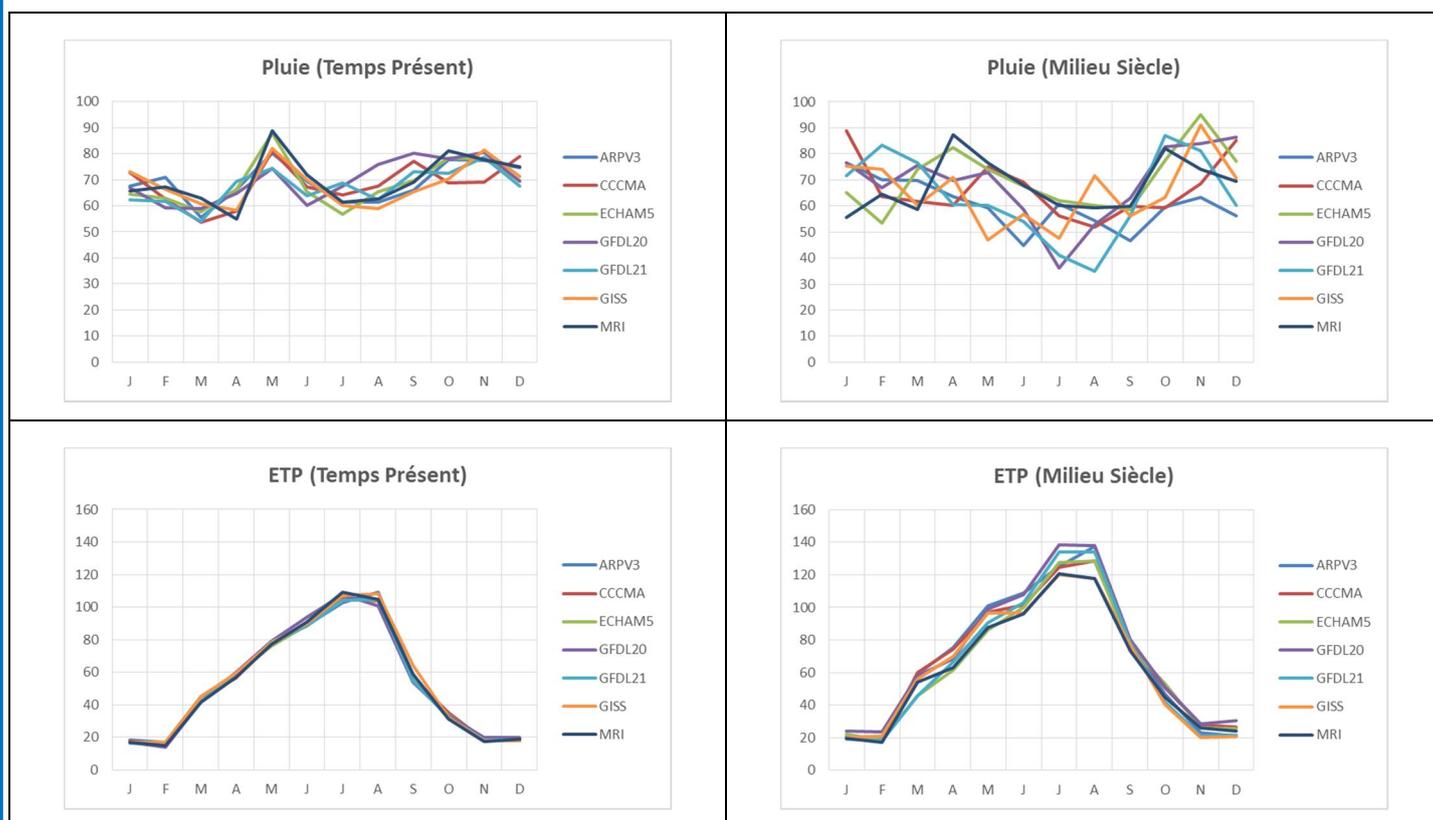


Figure 3 : Evolutions de la Pluie et l'ETP pour les 7 projections climatiques à l'horizon du Milieu du Siècle (source : Explore 2070)

- **Evolution des températures de l'air :**

- Réchauffement de l'ordre de +2.3°C en Milieu du Siècle,
- Plus important en été et début d'automne,
- Plus prononcé en 2100 avec +4°C en août.

- **Evolution des pluies :**

- Légère baisse du cumul annuel pour le scénario médian (-4.3 à -2.7%) en Milieu du Siècle,
- Une plus grande variabilité dans la répartition des pluies dans l'année, avec globalement un premier semestre peu impacté et un second semestre déficitaire (en termes de cumul),
- Baisse des précipitations au printemps et en été en Milieu du Siècle.

- **Evolution de l'ETP :**

- Forte augmentation de l'ETP sur l'année (+22.1 à +22.5%),
- Augmentation très marquée en automne.

3 LES IMPACTS SUR LES DEBITS DES COURS D’EAU

Dans le cadre des 2 projets de recherche, des modèles hydrologiques ont été mis en place pour traduire l’effet du changement climatique en intégrant notamment les projections climatiques à l’horizon du Milieu du Siècle (MS) : période 2046 à 2065.

Les modèles hydrologiques (à réservoirs) mis en œuvre, ont été calibrés à partir d’une comparaison entre les débits simulés obtenus avec les données d’entrée SAFRAN et les débits enregistrés aux stations hydrométriques. Ces modèles intègrent donc une influence anthropique plus ou moins marquée selon leur localisation. *On pense naturellement aux points situés en aval des barrages pour lesquels le biais de cette hypothèse n’est pas quantifié.*

⇒ Les **données sur l’évolution des débits** sont ainsi **accessibles au niveau de 3 stations (1 sur le bassin versant / 2 sur la Loire à Gien et à Orléans)** pour l’**horizon Milieu du Siècle**.

EXPLORE.ID	Code Hydro	Station
129		Le Dhuy à St-Cyr-en-Val
737	K4350010	La Loire à Orléans [Pont Royal]
736	K4180010	La Loire à Gien

Les évolutions pour les indicateurs statistiques suivants sont accessibles pour chaque projection climatique :

- Module
- Débit moyen mensuel
- QMNA5
- QJ10ans

3.1 PRINCIPAUX RESULTATS

Un signal baissier convergent à l'échelle du bassin versant (scénario médian) :

- **Baisse généralisée des débits moyens mensuels (scénario médian) :**
 - o juin à octobre : baisse robuste
 - o novembre à mars : signal plus dispersé
 - o juillet à novembre : baisse maximale
 - o Etiages plus sévères et prolongés sur la période automnale
- **Pour les autres indicateurs statistiques :**
 - o Baisse du module : -20.9 à -17.5 %
 - o Baisse du QMNA5 : -20 à -11.8 %
 - o Baisse du QJ10ans (*) : -10.9 à -8.5%

(*) Les modèles climatiques tentent à reproduire des tendances moyennes, et ont donc plus de difficultés à restituer la variabilité naturelle du climat et son caractère aléatoire, notamment pour les extrêmes climatiques à l'origine des crues. **Le niveau de confiance sur les tendances pour les crues est donc moindre.** Les données produites ainsi que les outils de modélisation utilisés, ne permettent pas d'anticiper correctement l'évolution des crues.

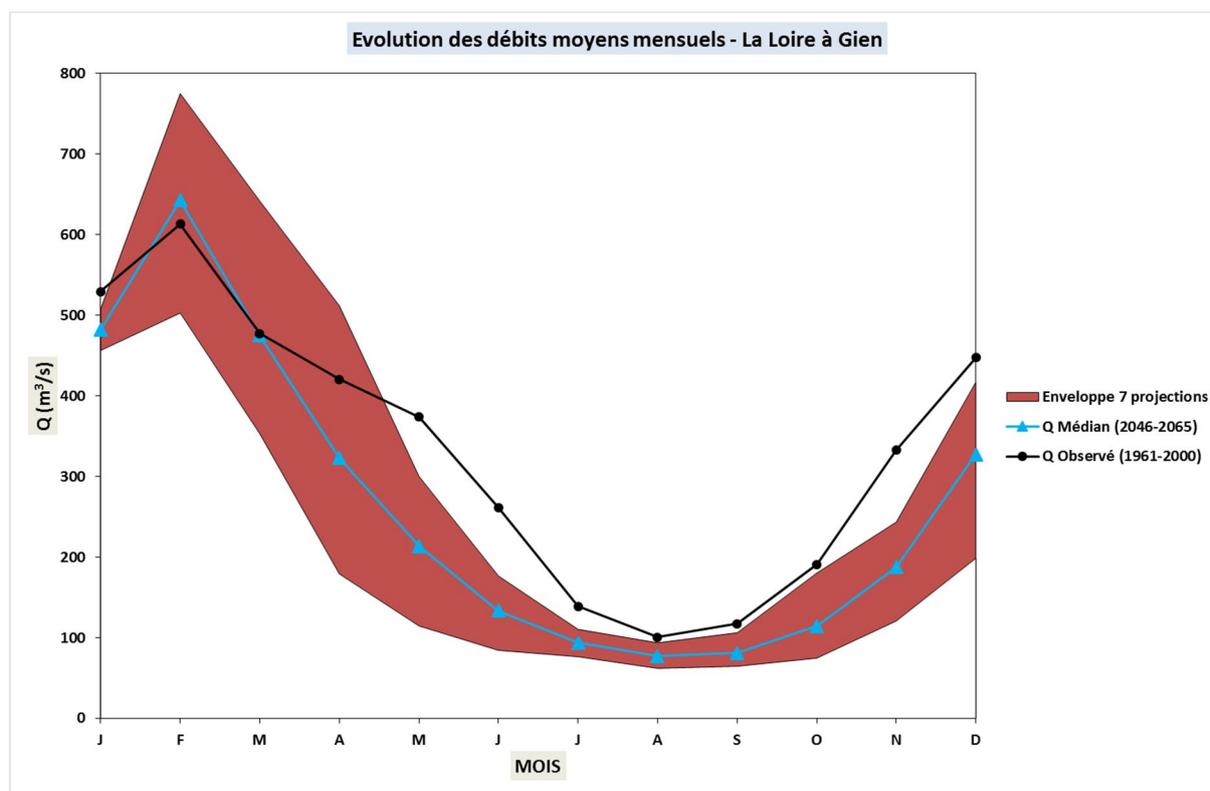


Figure 4 : Evolution des débits moyens mensuels pour les 7 projections climatiques – la Loire à Gien (source : Explore 2070)

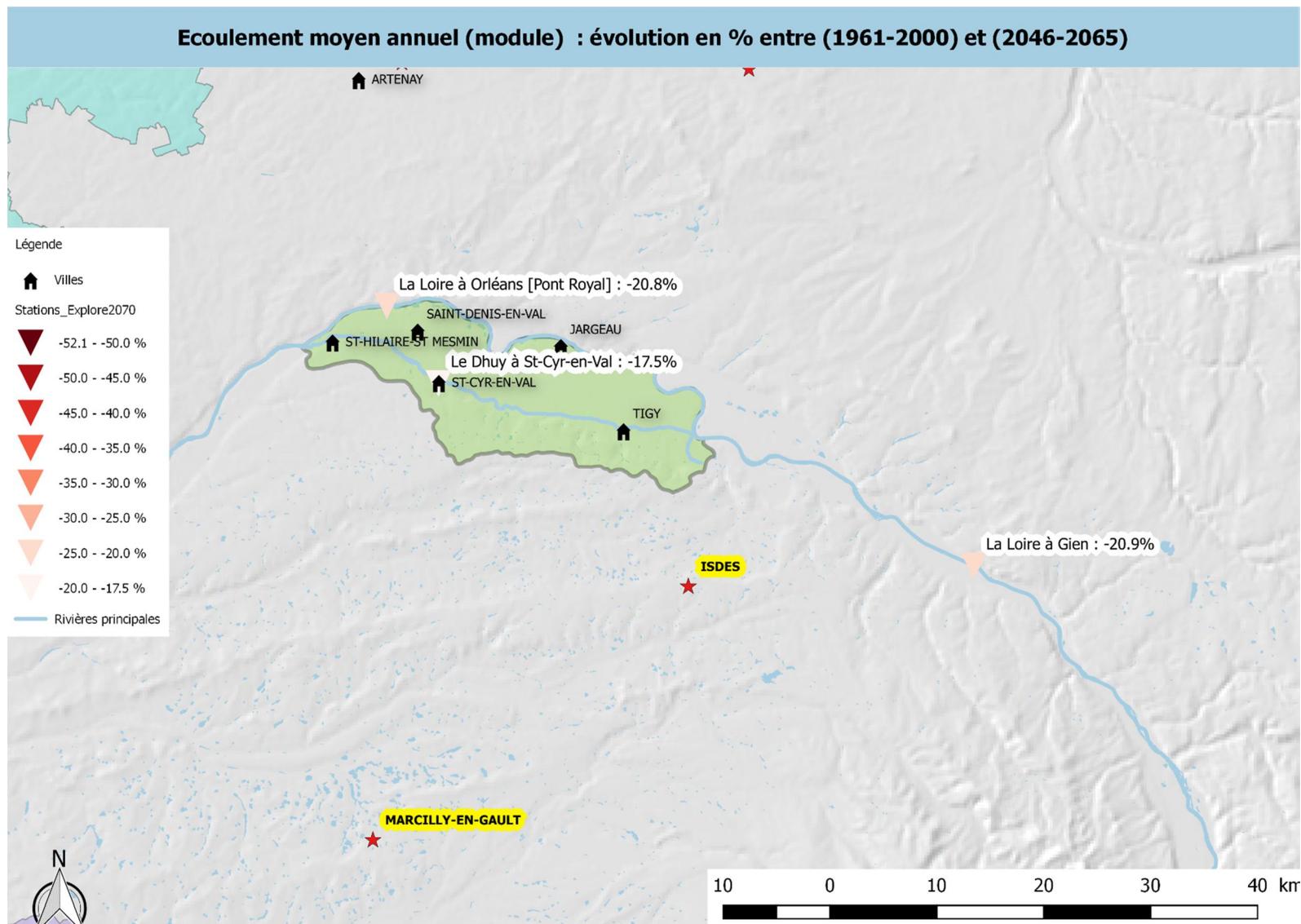


Figure 5 : Evolution du module pour les 7 projections climatiques (source : Explore 2070)

Des projections au niveau de la **station de Gien sur la Loire** ont également été produites par le projet **ICC Hydroqual**. Pour rappel, la **principale différence** entre les 2 programmes de recherche concerne le **nombre de projections climatiques** pris en compte (**7 pour Explore 2070 et 14 pour ICC-Hydroqual**) :

Indicateur hydrologique	Explore 2070 (7 projections)	ICC Hydroqual (14 projections)
Module	-20.9% [-31% à -14%]	-21.0% [-36.2% à -9.6%]
QMNA 5	-11.8% [-17.5% à -6.9%]	-34.9% [-58.0% à -11.5%]
QJ10ans	-10.9% [-13.3% à +32.9%]	-4.3% [-17.3% à +24.6%]

Figure 6 : Comparaison des indicateurs hydrologiques Explore 2070 vs ICC Hydroqual (en Milieu du Siècle)

On notera les différences de tendance entre les résultats d'Explore 2070 et ICC Hydroqual, surtout marquées pour la période de juillet à octobre. Une baisse moins marquée est en effet restituée dans Explore 2070 notamment sur la période d'été. Cette différence pourrait être liée d'une part à la typologie des modèles hydrologiques utilisés et à leurs calages, et d'autre part au nombre de projections climatiques considérées.

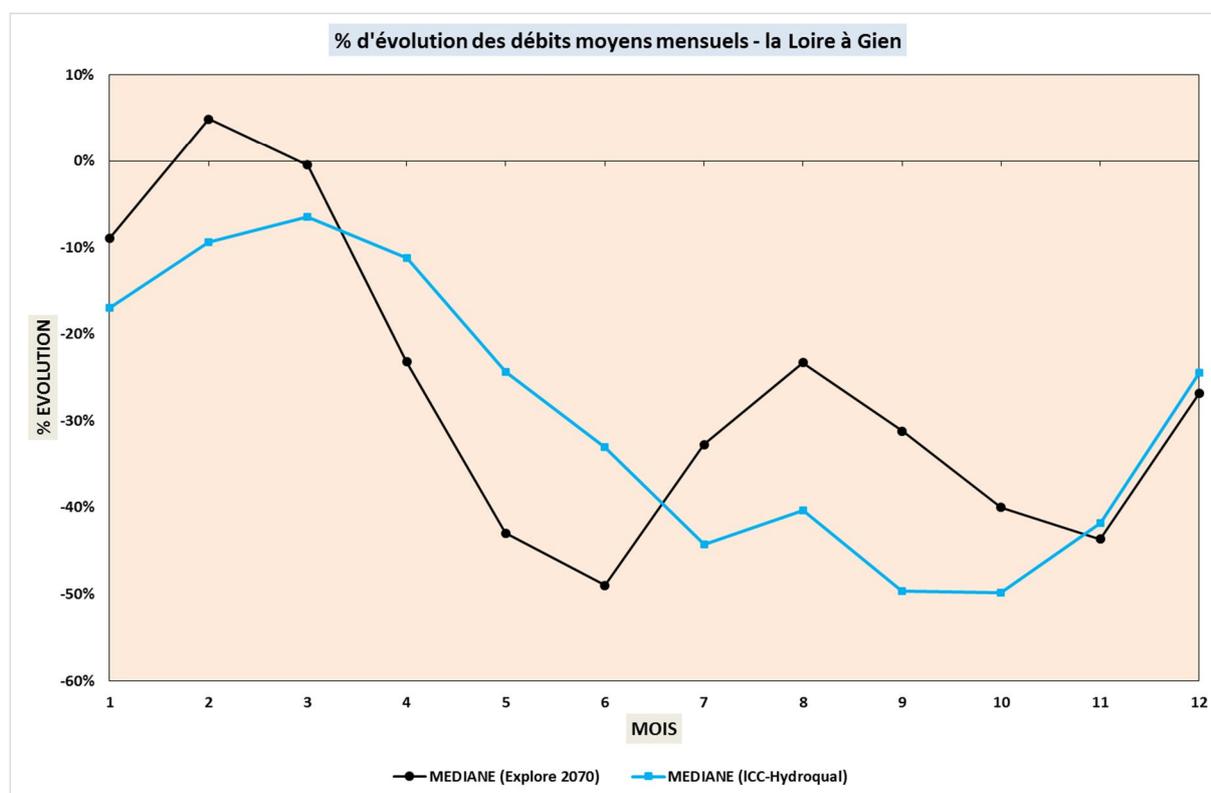
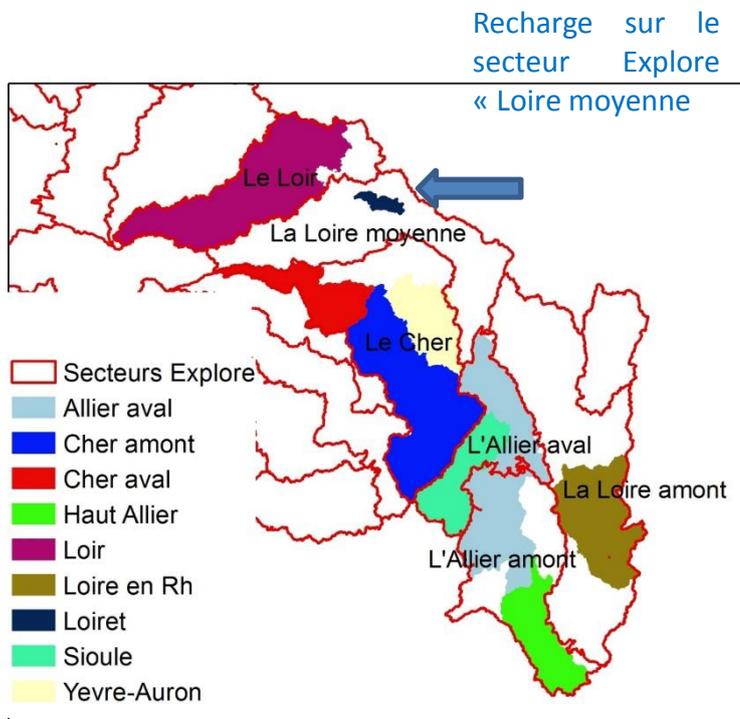


Figure 7 : % Evolution des débits moyens à la station de Gien sur la Loire (source : Explore 2070 et ICC Hydroqual)

4 LES IMPACTS SUR LES EAUX SOUTERRAINES

Un **indice global d'évolution du taux de recharge** au niveau du sous-bassin versant intitulé Loire moyenne est accessible dans Explore 2070. Cette information est issue de la transcription des projections climatiques en pluies efficaces



Une baisse de la recharge des eaux souterraines est attendue :

Min	-26.3%
Médiane	-25.2%
Max	-24.1%

Des **résultats complémentaires** sont également accessibles dans la **Thèse de Céline Monteil** « Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage - Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris (2011) ».

« Les bilans de milieu du siècle et fin de siècle sont calculés sur la simulation avec la projection ARPEGE effectuée entre 1^{er} août 1974 et le 31 juillet 2100, avec les pompages estimés à partir des précipitations. Avant de commenter les résultats obtenus, il est intéressant de rappeler qu'Arpège est la projection pour laquelle la baisse des précipitations en fin de siècle est la plus marquée.

Pour les trois aquifères (calcaires de Beauce, craie du Séno-Turonien, et sables du Cénomaniens), une majorité des piézomètres indique une tendance à la baisse des hauteurs d'eau bien en deçà des niveaux minimaux historiques. Cette baisse est plus marquée à partir des années 2050-2070. Le Cénomaniens présente aussi une baisse des niveaux piézométriques mais les niveaux obtenus peuvent rester supérieurs aux valeurs mesurées en temps présent qui étaient mal reproduites. »

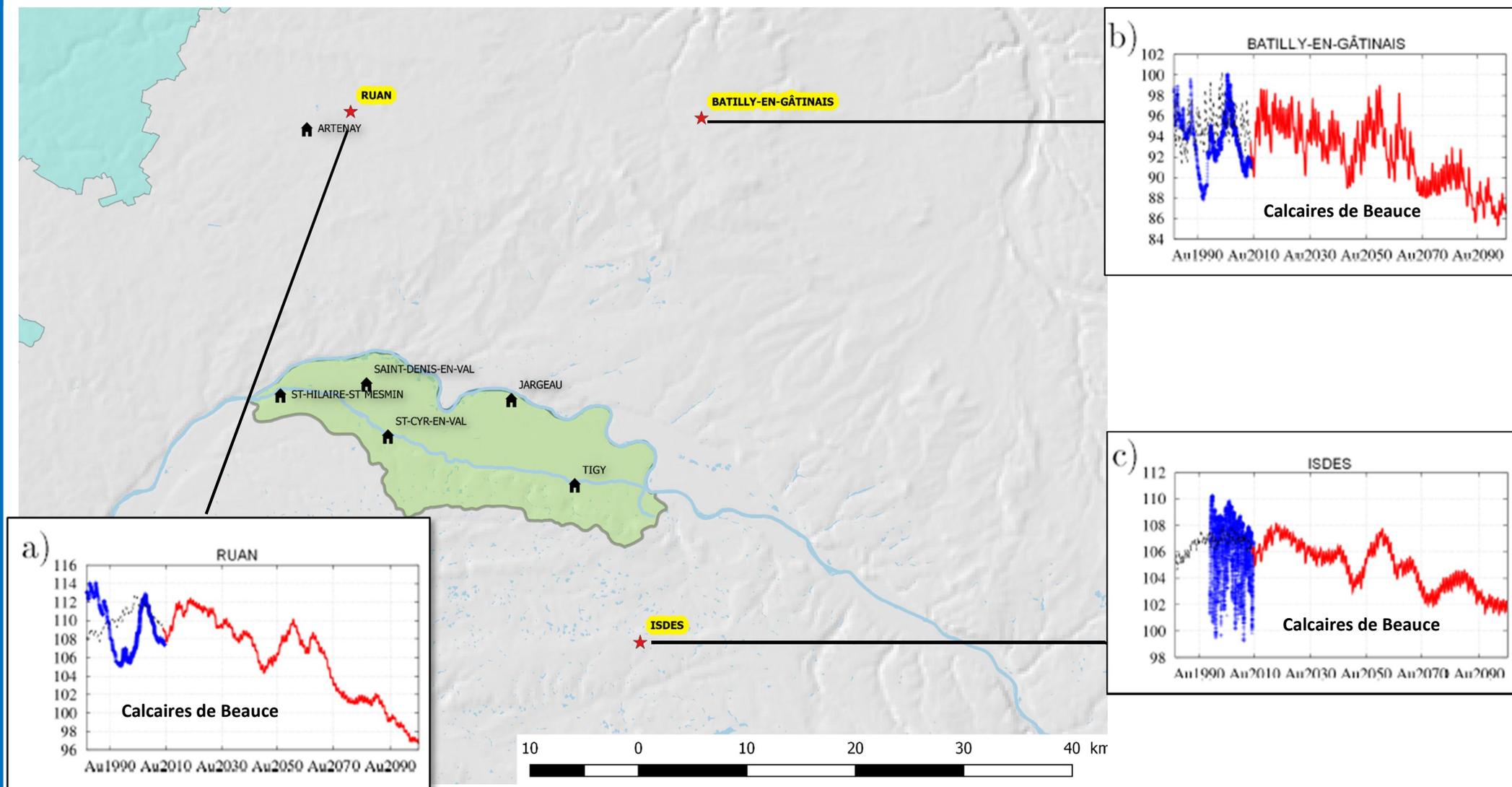


Figure 8 : Exemples de chroniques piézométriques pour une simulation avec ARPEGE 2009 à 2100 (source : Thèse de Céline Monteil)

Dans le cadre de sa thèse, Céline Monteil a également évalué l'évolution des échanges nappe/rivière notamment sur le tronçon entre Gien et Orléans, sous changement climatique. Cette zone d'infiltration est importante pour le bassin versant Dhuy/Loiret puisqu'elle contribue à une grande partie des débits.

Pour rappel, ces travaux se sont appuyés sur un modèle hydrogéologique distribué (Eau-Dyssée, développé au Centre Géosciences MINES Paris Tech et à l'UMR Sisyphé), qui couple 5 modules simulant respectivement le bilan hydrique en surface, le routage de l'eau sur les versants, le routage en rivière, le transfert en zone non-saturée et les écoulements souterrains.

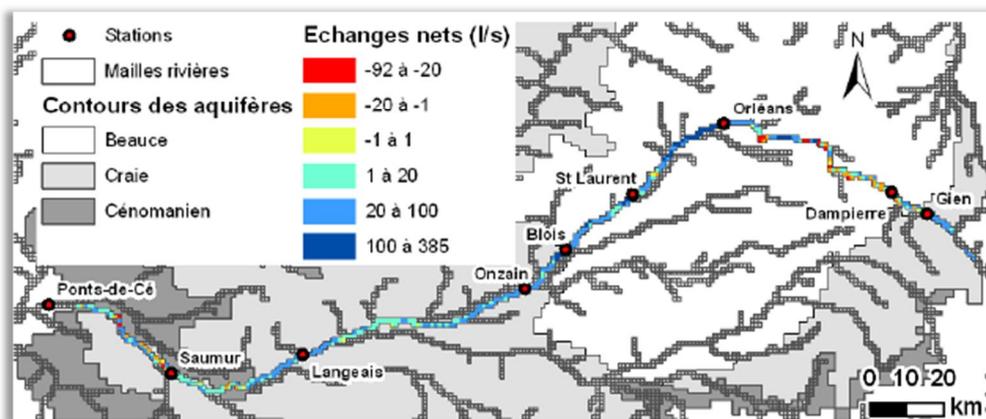
Le modèle ajusté permet de simuler les débits et piézomètres. 4 projections climatiques ont été appliquées comme forçage du modèle.

Modèle	Nom court	Périodes traitées	Provenance
ARPEGE A1B	ARPEGE	1950 - 2100	Centre National de Recherche Météorologique (France)
GFDL-CM2-0	GFDL	1960-2000 ; 2046-2065 2081-2100	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Etats-Unis)
MPI-ECHAM5	MPI	1960-2000 ; 2046-2065 2081-2100	Max Planck Institut für Meteorologie (Allemagne)
MRI-CGCM2-3-2A	MRI	1960-2000 ; 2046-2065 2081-2100	Meteorological Research Institute (Japon)

TABLE 11.1 – Modèles de climat forcés par un scénario d'émission de gaz à effet de serre et aérosols de type A1B puis régionalisés par la méthode des régimes de temps pour être utilisés comme projections sur le bassin de la Loire.

Figure 9 : Projections climatiques utilisées (source : Thèse de Céline Monteil)

L'infiltration de l'eau de la Loire vers le domaine souterrain a essentiellement lieu entre Dampierre et Orléans et le modèle n'en simule pas entre Orléans et Langeais. Cette ré-infiltration est calculée du fait des différences de charge entre Loire et les aquifères indépendamment de circulations karstiques qui ne sont pas prises en compte par le modèle. La distribution des échanges nets confirme les apports importants des aquifères en aval d'Orléans.



Des disparités apparaissent en fin de siècle notamment pour les biefs Gien-Dampierre et Dampierre-Orléans où les échanges nets deviennent négatifs pour les projections ARPEGE et GFDL.

- Baisse des apports des nappes à la Loire à l'étiage : -50 à -8% (Fin de Siècle vs Temps Présent)
- Ré infiltration des cours d'eau (+36% au total en Fin de Siècle) entre Dampierre et Orléans

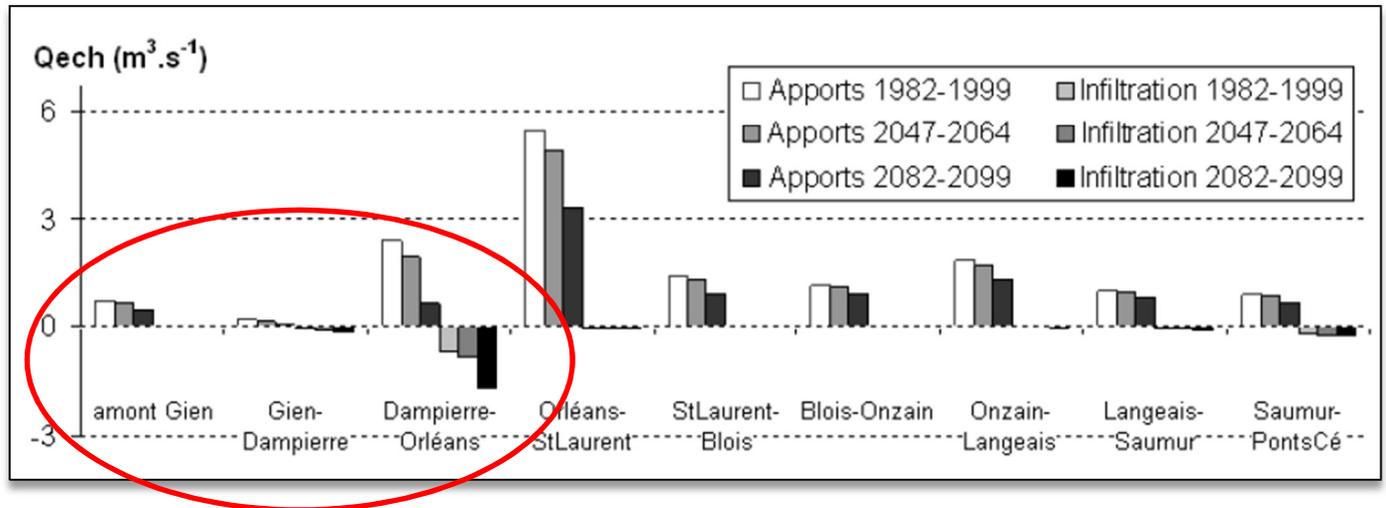


Figure 10 : Evolution des échanges entre les aquifères et la Loire lors du calcul des VCN30 en Temps Présent (1981-2000), Milieu du Siècle (2046-2065) et Fin du Siècle (2081-2100) pour des forçages ARPEGE (source : Thèse de Céline Monteil)

Cette baisse des débits ré infiltrés (moyenne des 4 projections climatiques) traduit l'impact du changement climatique. Il faut rappeler que les débits à Gien sont soutenus une partie de l'année par les barrages de Villerest et Naussac. La capacité des barrages à soutenir les débits à Gien pourrait donc permettre de limiter cette baisse projetée.

Une autre thèse intitulée « Etat qualitatif des eaux de la nappe du val d'Orléans : impact du changement climatique et gestion durable de la ressource - Emmanuelle Joigneaux » (Université d'Orléans, 2011), évoque également le lien entre la zone d'infiltration sur la Loire et le bassin du Loiret. L'auteur s'est notamment intéressé à l'évolution du risque d'inversion des débits entre ces 2 secteurs.

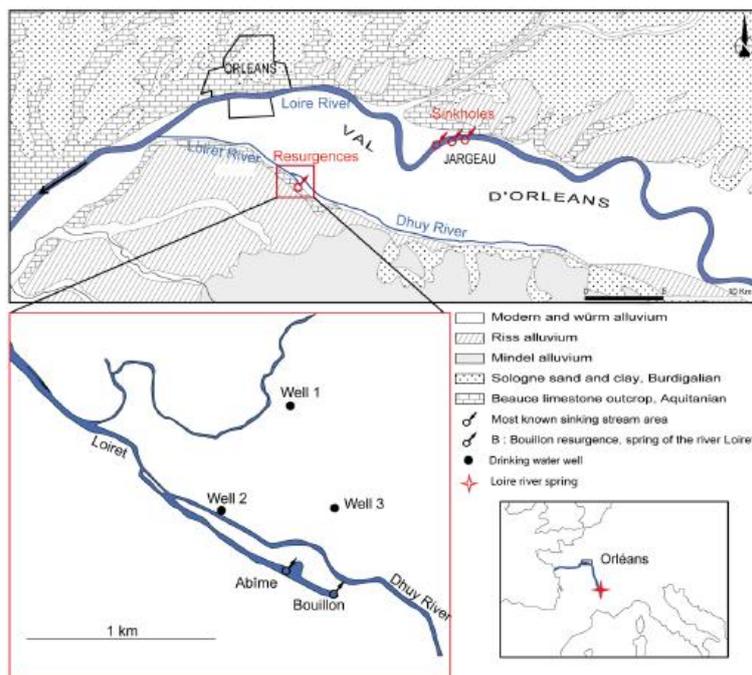


Figure 11 : Zone d'infiltration dans le Val d'Orléans : impact du changement climatique (source : Thèse d'Emmanuelle Joigneaux)

Les inversions ne peuvent se produire que lorsque la Loire est à l'étiage, et que par conséquent les Sources de l'Abîme et du Bouillon n'émettent que très peu d'eau provenant du karst. Le niveau du Loiret est alors à son minimum. Au niveau de la confluence entre le Loiret et le Dhuy, si la hauteur de celui-ci est très élevée, les eaux du Dhuy vont alors remonter le long du Loiret et s'infiltrer dans les Sources du Bouillon et de l'Abîme.

Basés sur une série de projections de modèles climatiques, les changements simulés pour l'occurrence des types de temps pour la fin du siècle suggèrent une possible diminution de la fréquence des événements de backflooding en 2075-2099. Si cette prédiction a lieu, alors le risque potentiel pour la qualité de l'eau dans la zone d'étude serait grandement, diminué comparé à la situation actuelle (source : article publié dans Hydrology and Earth System Sciences en 2011 / Impact of climate change on groundwater point discharge backflooding of karstic springs).

5 LES IMPACTS SUR LA TEMPERATURE DE L'EAU

Dans le cadre du projet ICC Hydroqual, les équipes de l'Université de Tours ont évalué l'impact du changement climatique sur les températures de l'eau à l'échelle du bassin de la Loire et de ses affluents :

- Réchauffement **moyen** : **+2.1°C en Milieu Siècle** à **+2.9°C en Fin Siècle**
- **2 pics au printemps et en automne**
- **Dépassements du seuil 16°C** :
 - Plus précoces : +25 à 35 jours (Milieu du Siècle)
 - Milieu du Siècle : mi-avril
- Sur la Loire Moyenne, moins de 60 jours dans l'année avec $T_{\text{eau}} < 10^{\circ}\text{C}$ dès le Milieu du Siècle.

Nota : Les poissons sédentaires des parties basses et moyennes appartiennent en majorité à la famille des Cyprinidae (carpes) et à des espèces plutôt eurythermes. Pour une grande partie de ces espèces le seuil de reproduction est de 16°C. Ce seuil de 16°C est également le seuil de reproduction de la grande alose, poisson migrateur anadrome qui se reproduit en eau douce.

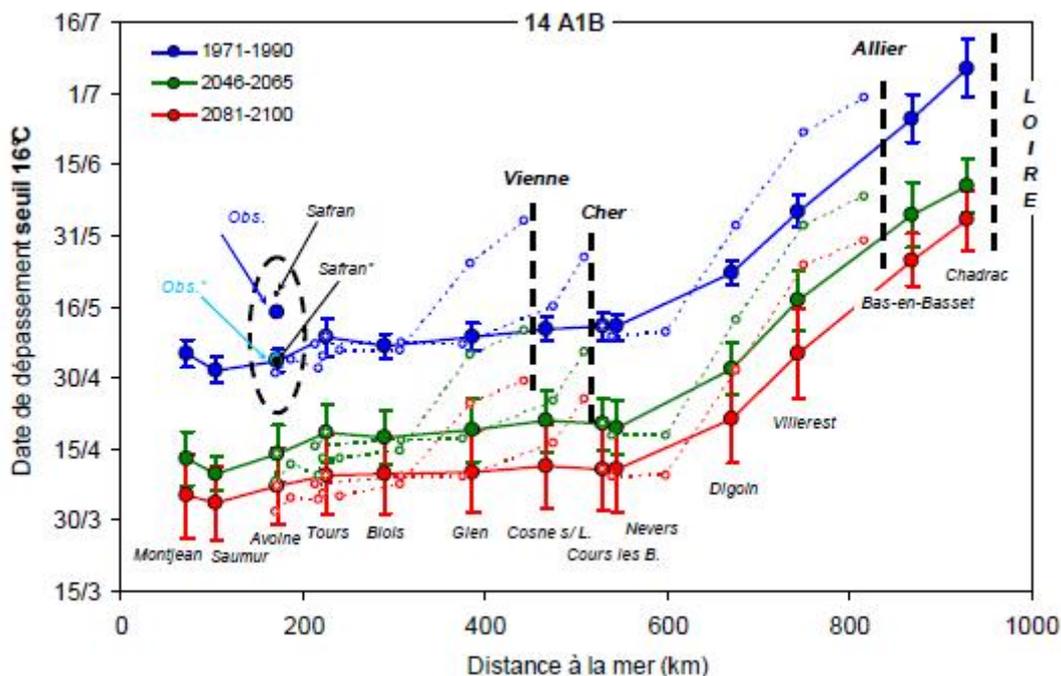
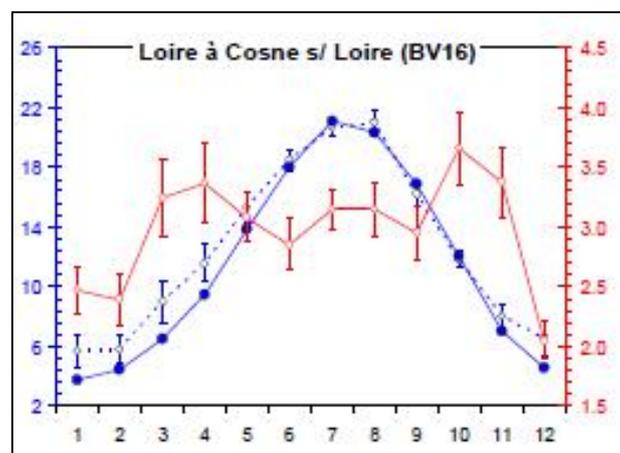


Figure 12 : Profils longitudinaux des dates de dépassement du seuil thermique 16°C (source : ICC Hydroqual)

Une restitution de l'évolution de la température de l'eau est disponible au niveau de la Loire à Cosne/Loire en amont de Gien:



-○- 14 A1B-TP
 -○- 14 A1B-FS
 ● Safran

En rouge : Evolution T° eau modélisée Fin de siècle

En bleu : T° eau modélisée – Temps Présent

Milieu Siècle :

- Moyenne : +2.2°C
- Min : +0.8°C
- Max : +3.0°C

- Janvier : +1.9°C
- Avril : +2.5°C
- Juillet : +2.3°C
- Octobre : +2.7°C

Fin Siècle:

- Moyenne : +3.1°C
- Min : +2.1°C
- Max : +4.6°C

- Janvier : +2.5°C
- Avril : +3.5°C
- Juillet : +3.2°C
- Octobre : +3.8°C

6 FICHER EXCEL DE SYNTHÈSE

Afin d'en faciliter leur réutilisation, un fichier Excel regroupe l'ensemble des données d'Explore 2070 disponibles sur le périmètre du SAGE. Celles-ci sont organisées dans différents onglets, avec des codes couleurs qui permettent de distinguer la nature de l'objet :

- **En bleu**, des onglets généraux reprecisant les points de calcul Explore 2070 retenus sur le territoire du SAGE, les résultats des critères Nash pour le calage des modèles hydrologiques ainsi que la dénomination des 7 projections climatiques utilisées.
- **En orange**, des onglets regroupant les données climatiques brutes.
- **En rouge**, un onglet de synthèse des principaux indicateurs hydrologiques : Synthèse_stations.
- **En violet** des graphiques propres aux différents résultats restitués.

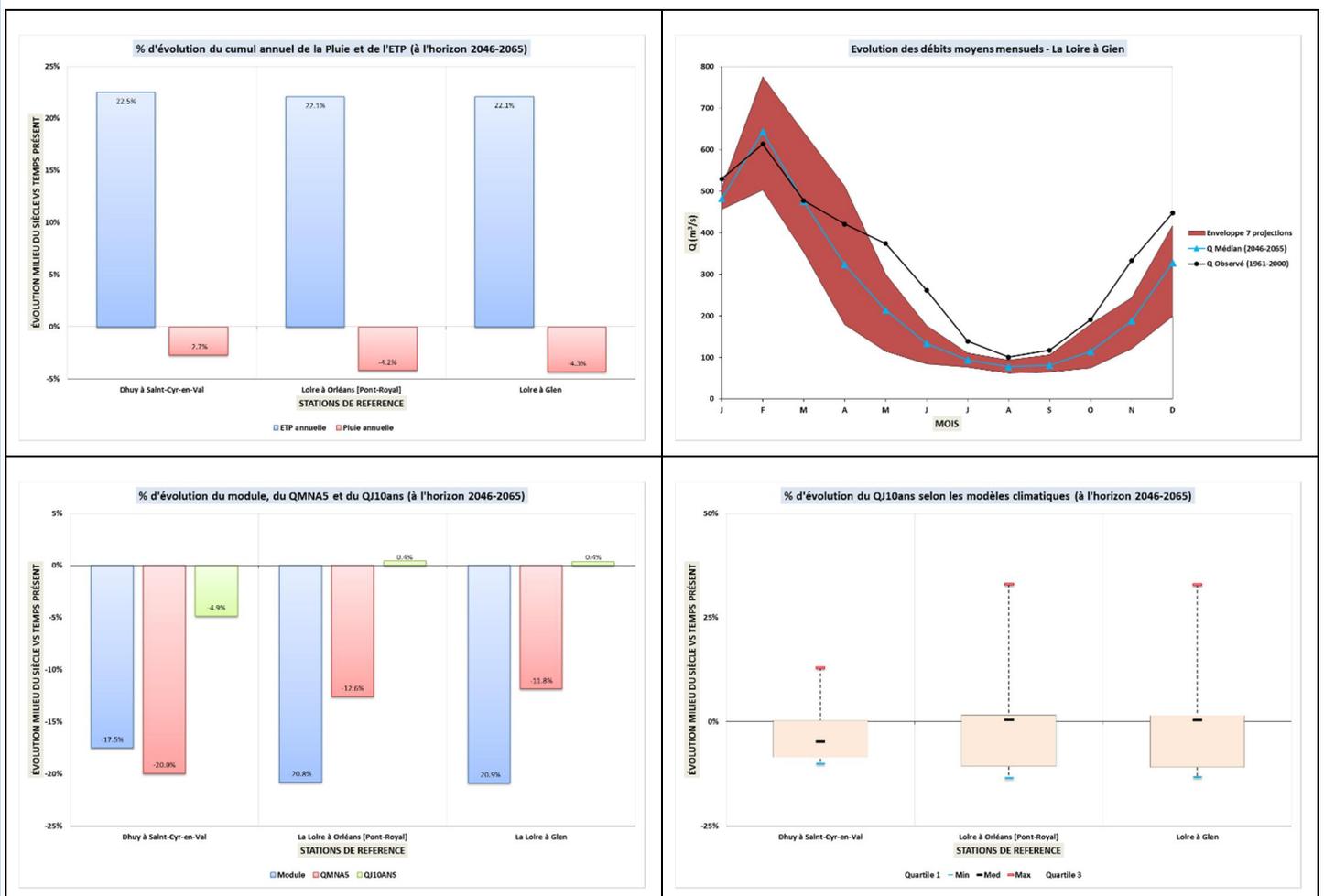


Figure 13 : Extrait de quelques graphiques présents dans le fichier Excel

Les onglets en **bleu clair** :

- **Master** : liste des points de calcul Explore accessibles
- **Critères** : valeurs des critères de Nash pour les points de calcul ayant fait l'objet d'un calage du modèle hydrologique

- **Projections_clim** : Rappel des 7 modèles climatiques utilisés dans Explore 2070.

Les onglets **en orange** regroupent les données climatiques brutes de chaque variable climatique (pour la période de référence PST et l'horizon du Milieu du Siècle noté FUT) :

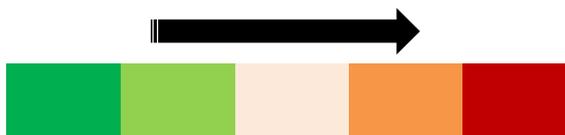
- **TEMP** : Température de l'air au pas de temps mensuel et annuel pour chaque point de calcul
- **Temp_2** : Température de l'air au pas de temps mensuel à l'échelle de l'unité Explore 2070 intitulée Loire moyenne
- **ETP** : Evapotranspiration au pas de temps mensuel et annuel pour chaque point de calcul
- **ETP_2** : Evapotranspiration au pas de temps mensuel et annuel à l'échelle de l'unité Explore 2070 intitulée Loire moyenne
- **PREC** : Précipitation au pas de temps mensuel et annuel pour chaque point de calcul
- **Prec_2** : Précipitation au pas de temps mensuel à l'échelle de l'unité Explore 2070 intitulée Loire moyenne
- **Recharge** : évolutions du taux de recharge des eaux souterraines pour les 7 projections à l'échelle de l'unité Explore 2070 intitulée Loire moyenne (minimum, maximum et médiane)

Les onglets en **bleu foncé** regroupent les indicateurs hydrologiques accessibles dans Explore 2070 pour chaque point de calcul :

- **Crués (en bleu foncé)** : débit moyen journalier maximum d'occurrence 2, 10 et 20 ans
- **Qmoyen_CC (en bleu foncé)** : débit moyen mensuel
- **Q5secs** : quinquennales sèches ou débit moyen minimal d'occurrence 5 ans
- **Etiages** : QMNA5 ou débit moyen mensuel minimal d'occurrence 5 ans
- **Tetiages** : mois d'apparition des débits les plus bas

L'onglet de synthèse **en rouge** regroupe par station les principales tendances qui se dégagent du scénario médian des résultats des 7 projections climatiques à l'horizon Milieu du Siècle (2046-2065) :

Importance de l'évolution entre le Milieu du Siècle et le Temps Présent



Un **code couleur** du **vert** vers le **rouge** permet d'apprécier visuellement l'**importance de l'évolution**.

- **QMx** : Débit moyen mensuel (évolution en %)
- **Module** (évolution en %)
- **QMNA5** (évolution en %)
- **Décalage de l'étiage** (évolution en mois)

- Tmoy : Température moyenne de l'air à l'échelle du bassin versant considéré (évolution en °C)
- P/an : Précipitation annuelle (évolution en %)
- ETP/an : Evapotranspiration annuelle (évolution en %)
- Recharge/an : Evolution du taux de recharge des eaux souterraines (évolution en %)

Indicateurs statistiques												
Station	QM1	QM2	QM3	QM4	QM5	QM6	QM7	QM8	QM9	QM10	QM11	QM12
Dhuy à Saint-Cyr-en-Val	↓ -13.3%	↔ 0.6%	↔ -9.4%	↓ -18.5%	↓ -44.0%	↓ -39.4%	↓ -24.6%	↓ -23.7%	↓ -32.3%	↓ -37.4%	↓ -45.7%	↓ -31.7%
	MODULE	QMNA5	Décalage étiage (en mois)		QJ10ans	Tmoy. (°C)		P / an	ETP / an		Recharge (%)	
	↓ -17.5%	↔ -20.0%	↔ +0.2		↓ -8.5%	↑ +2.3		↔ -2.7%	↑ +22.5%		↓ -25.2%	
Indicateurs statistiques												
Station	QM1	QM2	QM3	QM4	QM5	QM6	QM7	QM8	QM9	QM10	QM11	QM12
Loire à Orléans (Pont-Royal)	↓ -8.8%	↔ 3.0%	↔ 0.2%	↓ -44.7%	↓ -37.7%	↓ -44.7%	↓ -32.8%	↓ -27.5%	↓ -31.0%	↓ -41.5%	↓ -42.5%	↓ -21.9%
	MODULE	QMNA5	Décalage étiage (en mois)		QJ10ans	Tmoy. (°C)		P / an	ETP / an		Recharge (%)	
	↓ -20.8%	↔ -12.6%	↔ +0.0		↓ -10.7%	↑ +2.3		↔ -4.2%	↑ +22.1%		↓ -25.2%	
Indicateurs statistiques												
Station	QM1	QM2	QM3	QM4	QM5	QM6	QM7	QM8	QM9	QM10	QM11	QM12
Loire à Gien	↓ -9.7%	↔ 2.3%	↔ 1.1%	↓ -19.6%	↓ -37.2%	↓ -45.4%	↓ -32.9%	↓ -28.3%	↓ -32.6%	↓ -41.4%	↓ -42.6%	↓ -20.3%
	MODULE	QMNA5	Décalage étiage (en mois)		QJ10ans	Tmoy. (°C)		P / an	ETP / an		Recharge (%)	
	↓ -20.9%	↔ -11.8%	↔ +0.0		↓ -10.9%	↑ +2.3		↔ -4.3%	↑ +22.1%		↓ -25.2%	

Figure 14 : Synthèse des évolutions des principaux indicateurs en Milieu du Siècle (source : Explore 2070)