ETABLISSEMENT PUBLIC LOIRE

22NHF024
Février 2024

Etude « Hydrologie, Milieux, Usages, Climat » (HMUC) sur le bassin versant de l'Argance

Phase 1 | Volet « Climat »

CONSULTING

SAFEGE
Parc de L'Ile
15-27, Rue du Port
92022 NANTERRE cedex

SAFEGE SAS - SIÈGE SOCIAL
Parc de l'Ile - 15/27 rue du Port
92022 NANTERRE CEDEX
www.safege.com

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

agence de l'eau Loire-Bretagne

suez

Maître d'ouvrage : **Etablissement public Loire**

Numéro du projet : **22NHF024**

Intitulé du projet : **Etude « Hydrologie, Milieux, Usages, Climat » (HMUC) sur le bassin versant de l'Argance**

Intitulé du rapport : Phase 1 | Volet « Climat »

Version	Rédacteur	Vérificateur	Date d'envoi	Commentaires
V 1.0	Raphaël ZYLBERMAN	Max MENTHA	07/12/2023	Version initiale
V 2.0	Raphaël ZYLBERMAN	Max MENTHA	13/02/2024	Version révisée suite aux remarques des membres du COTECH

SOMMAIRE

1 PREAMBULE 7
1.1 Contexte de l'étude 7
1.2 Objectifs visés 8
1.3 Déroulement de la mission 9
2 DEFINITIONS PREALABLES 10
3 PERIMETRE DE L'ETUDE 20
4 ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DES PERSPECTIVES D'EVOLUTION DU CLIMAT ET DE LA RESSOURCE EN EAU 21
4.1 Climat HD – Synthèse d'évolutions climatiques à l'échelle des Pays de la Loire 22
4.2 Etude Explore 2070 (2010-2012) 23
4.3 Évolution du cycle hydrologique continental sur la France (thèse de Gildas Dayon, 2015) 26
4.4 Plan d'adaptation au changement climatique pour le bassin Loire-Bretagne 27
4.5 Etude ICC-Hydroqual 31
4.6 Etude de l'université de Tours sur la température des cours d'eau du bassin de la Loire 32
4.7 Projet AQUI-FR 33
4.8 Ressources à venir 34
4.9 Synthèse 34
5 ANALYSE DE L'EVOLUTION DES PARAMETRES CLIMATIQUES A L'HORIZON 2050 ... 36
5.1 Données climatiques considérées 36
5.2 Perspectives d'évolution du climat 40
5.3 Synthèse sur l'évolution du climat 46
6 CONCLUSION ET PERSPECTIVE 47
7 ANNEXES 48
7.1 Annexe 1 : Scénarios climatiques du GIEC 48
7.2 Annexe 2 : Explore 2070 – Fiches des stations 52

7.3 Annexe 2 : Analyse des modèles climatiques 56
7.4 Annexe 3 : Indice de sécheresse en termes d'humidité du sol 66

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Périmètre de l'étude HMUC (Source : EP Loire, IGN, DDT49, DDT72) 20
Figure 2 : Evolutions relatives possibles (en %) du Qjxa10 (a), du module (b) et du QMNA5 (c) entre 1961-90 et 2046-65. Résultats moyens établis sur 14 simulations (2 modèles hydrologiques et 7 modèles climatiques). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations. (Source : Explore 2070). L'Argance se situe dans la partie gauche de la forme ovale 24
Figure 3 : Ecart minimal, moyen et maximal de la recharge temps futur/temps présent (source : Explore 2070) 25
Figure 4 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs (%) au milieu du siècle (2035-2065) relatifs à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP sur le réseau hydrographique de Modcou. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet- Août SON : Septembre-Octobre-Novembre. Source : (Dayon, 2015) 26
Figure 5 : En haut : Moyenne d'ensemble des changements relatifs du débit mensuel minimal d'une période de retour de 5 ans (QMNA5, %) pour la période 2070-2100 par rapport à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. En bas : Moyenne d'ensemble de la probabilité que le débit mensuel minimal sur la période 2070-2100 soit inférieur ou égale au QMNA5 de la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. (Source : Dayon 2015) 27
Figure 6 : Projections d'évolution du QMNA2 sur le bassin Loire-Bretagne (Source : Agence de l'eau Loire-Bretagne 2017) 28
Figure 7 : Projections d'évolution du rapport (1+ΔETP) / (1+ΔPR) sur le bassin Loire-Bretagne (Source : Agence de l'eau Loire-Bretagne 2017) 29
Figure 8 : (a) Méthode de calcul du score d'exposition ; (b) Projections d'évolution du score d'exposition de la biodiversité liée aux cours d'eau et du niveau trophique des eaux sur le bassin Loire-Bretagne (Source : Agence de l'eau Loire-Bretagne 2017) 30
Figure 9 Evolution de la (a) température atmosphérique moyenne mensuelle en °C, (b) des précipitations totales moyennes mensuelles (en %), (c) des précipitations solides (neige) moyennes mensuelles (en % - en gris là où aucune neige n'a été simulée) à l'horizon de mi-siècle (MS) et de fin de siècle (FS) par rapport à la période 1971-2000 (Source : Hydroqual 2010) 31
Figure 10 : Température moyenne interannuelle des cours d'eau superficiels simulée en (a) période actuelle (1994-2011) et (b) à la fin du 21e siècle (2082-2099) 32
Figure 11 : Cartes de la moyenne multi-modèle sur la période2070-2099 des indices standardisés piézométriques (haut) et des débits (bas) pour le scénario RCP8.5 (gauche) et RCP2.6 (droite) (Source : projet AQUI-FR) 33
Figure 12 : Illustration des principales sources d'incertitudes des projections climatiques selon l'horizon considéré (Source : DRIAS) 38
Figure 13 : Evolution (%) des cumuls mensuels moyens, à travers le bassin versant, entre la période de référence (2000-2021) et l'horizon 2050 (2039-2060), selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 41
Figure 14 : Evolution (%) du nombre de jours de pluie mensuels moyens, à travers le bassin versant, entre la période de référence (2000-2021) et l'horizon 2050 (2039-2060), selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 41
Figure 15 : Evolution de l'ETP mensuelle moyenne entre la période de référence (2000-2021) et l'horizon 2050 (2039-2060), selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 42
Figure 16 : Indice de sécheresse agricole (SSWI) moyen annuel et saisonnier pour la période de référence et aux horizons futurs (2035 et 2055) pour le scénario RCP 4.5 (Source : DRIAS) 44
Figure 17 : Indice de sécheresse agricole (SSWI) moyen annuel et saisonnier pour la période de référence et aux horizons futurs (2035 et 2055) pour le scénario RCP 8.5 (Source : DRIAS) 45
Figure 18 : Scénarios SRES - Principales hypothèses prises pour les différents scénarios (Source : Portail DRIAS) 48
Figure 19 : Comparaison des évolutions du forçage radiatif associé aux différents scénarios climatiques 50
Figure 20 : Émissions de dioxyde de carbone (CO2) selon les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) (Source : Rapport de synthèse de l'AR5 du GIEC) 50
Figure 21 : Émissions de dioxyde de carbone (CO2) selon les trajectoires socioéconomiques partagées (SSP) (Source : Rapport de synthèse à l'attention des décideurs, AR6 du GIEC) 51
Figure 22 : Echelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle (d'après S. Planton) 57
Figure 23 : Exemple de restitution d'un modèle climatique global de 250 km de résolution (source : (Boé, 2014)) 59
Figure 24 : Schématisation d'un modèle de climat régional (source : (Boé, 2014)) 60

Figure 25 : Mise en perspective des résultats par saison des différents modèles climatiques disponibles sur le portail DRIAS (Source : DRIAS - Note d'aide à la sélection des modèles pour le scénario d'émission RCP4.5) 66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Etudes et projets pour l'analyse bibliographique des perspectives d'évolution de la ressource en eau 21

Tableau 2 : Synthèse sur l'évolution du climat 46

Tableau 3 : Avantages et inconvénients des méthodes statistiques de désagrégation (Source : (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011) d'après Terray et al 2010) 61

Tableau 4 : Avantages et inconvénients des méthodes statistiques de désagrégation (Source : (DRIAS)) 62

1 PREAMBULE

1.1 Contexte de l'étude

Le bassin versant de l'Argance, qui est l'un des derniers affluents rive droite du Loir, s'étend sur un territoire rural partagé entre les départements de la Sarthe et du Maine-et-Loire. Une étude de *Caractérisation de l'état quantitatif du bassin versant du Loir et de détermination des volumes prélevables (2017)* a permis de rendre compte de problématiques variées rencontrées sur ce bassin versant.

Les ressources en eau présentes sont fortement sollicitées pour un principal usage : **l'irrigation**. Si les étiages de l'Argance et ses affluents peuvent être **naturellement prononcés** notamment en raison des **précipitations relativement faibles** qui s'y abattent, **les prélèvements** et **les aménagements** (drainage, plans d'eau, recalibrage, …) **accentuent les étiages observés** sur le réseau hydrographique.

Des **tensions quantitatives** sur le bassin ont été caractérisées lors de l'étude de 2017. En effet, il ressort que l'Argance subit des **perturbations fréquentes de ses écoulements en période d'étiage**. De plus, le déficit quantitatif est avéré tant en période de basses eaux qu'en dehors de celle-ci. D'après l'étude de 2017, **l'Argance est la seule unité de gestion du Loir concernée par cette problématique sur l'intégralité du cycle hydrologique.** Pour autant, **aucune contrainte réglementaire n'empêche aujourd'hui l'autorisation de nouveaux prélèvements en période hivernale** en eaux superficielles.

Il est aujourd'hui communément admis que ces **tensions devraient s'aggraver avec le contexte de changement climatique**. Une telle situation appelle à la mise en œuvre d'une démarche d'amélioration de la gestion des ressources en eau. Cependant, l'étude menée en 2017 a mis en évidence de nombreuses lacunes et ses résultats n'ont pas pu, de ce fait, être intégrés au SAGE.

L'objectif de la présente étude est de réaliser une **analyse « Hydrologie, Milieux, Usages, Climat » (HMUC)** qui vise à compléter et actualiser l'étude réalisée en 2017, en s'appuyant sur de **nouvelles sources de données** et d'informations, ainsi que sur des projets menés en parallèle sur le territoire, afin de combler les lacunes identifiées et aboutir, *in fine* à des **ajustements des documents du SAGE Loir pour le bassin de l'Argance**.

Le principal cadre réglementaire de la gestion quantitative est donné par le chapitre 7 du SDAGE Loire-Bretagne 2022-2027, qui pose la maîtrise des prélèvements en eau comme un élément essentiel à la reconquête du bon état des cours d'eau et à la préservation des écosystèmes qui leur sont liés, dans un contexte de changement climatique. Les décrets n°2021-795 et n°2022-1078 encadrent également la réalisation d'études d'évaluation de volumes prélevables dans les milieux naturels en période basses eaux et hors période de basses eaux.

Ainsi, la gestion de la ressource en période d'étiage repose en grande partie sur la fixation d'objectifs aux points nodaux (disposition 7A-1), que ce soit pour les rivières ou les nappes souterraines, portant d'une part sur l'équilibre entre la ressource en eau et les besoins et d'autre part sur la gestion de crise.

Par ailleurs, un rôle particulier est donné dans ce chapitre aux SAGE, qui peuvent, sur la base d'une analyse HMUC propre à leur territoire, portée et validée par la Commission Locale de l'Eau (CLE), proposer des ajustements à certaines dispositions du SDAGE, en particulier :

- Ajuster les débits et/ou les niveaux d'objectifs d'étiage et définir des conditions de prélèvements mieux adaptées à leur territoire (disposition 7A-2),
- En fonction des caractéristiques hydrologiques de leur territoire, proposer au préfet de retenir une période de référence différente pour l'étiage, période qui sera prise en compte pour la délivrance des autorisations de prélèvements à l'étiage et la mise en place des mesures de gestion de crise (disposition 7B-1).

Le territoire du bassin de l'Argance est soumis à la disposition 7B-2 qui permet une augmentation limitée des prélèvements à l'étiage.

Dans un contexte de tension quantitative, la CLE a estimé nécessaire d'élargir les connaissances acquises lors de l'étude précédente. Aussi, cette nouvelle étude a pour objectifs principaux :

- D'étendre les connaissances de l'état quantitatif des eaux superficielles et souterraines sur la période 2000-2021 ;
- Proposer un débit objectif qui tiendrait compte du débit écologique à estimer et des besoins en eau pour la satisfaction des usages ;
- De disposer de données factuelles comme des volumes prélevables pour prendre en compte l'enjeu quantitatif ;
- De proposer de nouvelles règles ou dispositions dans le SAGE.

1.2 Objectifs visés

L'étude vise à améliorer l'état de connaissance et de compréhension du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du bassin, le but étant à terme d'obtenir des règles de gestion cohérentes, mais surtout acceptables par les acteurs locaux en s'appuyant sur des choix d'indicateurs et la fixation de seuils parfaitement argumentés.

Sur la base de cette étude, la CLE devra donc être en mesure de définir des volumes prélevables et de définir les valeurs d'objectifs d'étiage. Si cela apparait justifié, un ajustement des débits d'alerte et de crise et le renforcement des suivis existants sera également proposé.

L'étude devra répondre aux **objectifs suivants** :

- **Synthétiser, actualiser et compléter les connaissances** et analyses déjà disponibles sur le bassin versant de l'Argance, au regard des 4 volets « H.M.U.C. » ;
- **Rapprocher et croiser les 4 volets « H.M.U.C. »** afin d'établir un diagnostic hydrologique permettant de caractériser la nature et les causes des problématiques quantitatives relevées sur le bassin ;
- **Elaborer des propositions d'actions** pour une gestion équilibrée et durable des ressources en eau dans un contexte de changement climatique ;
- En fonction des résultats, proposer et permettre un choix explicite de la CLE sur les **adaptations possibles à apporter aux dispositions du SDAGE** (suivi hydrologique, conditions de prélèvement, valeurs de DOE/DSA/DCR, etc.).

1.3 Déroulement de la mission

L'étude se décompose en **3 phases** :

- **Phase 1 : Etat des lieux / Synthèse et actualisation des éléments « HMUC »**
  - **Hydrologie :** Appréhender le fonctionnement des différents cours d'eau et nappes souterraines du périmètre, reconstitution du régime hydrologique naturel (non influencé par les actions anthropiques)
  - **Milieux** : Connaissance de l'état et analyse des besoins des milieux, identification de débits écologiques du cours d'eau
  - **Usages :** Connaître les prélèvements et rejets réalisés sur le périmètre, en leur appliquant individuellement un degré d'incertitude
  - **Climat :** Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique
- **Phase 2 : Croisement des quatre volets « HMUC »**
  - Connaître l'état des ressources (souterraines ou superficielles)
  - Affiner les débits seuils superficiels réglementaires proposés dans le cadre de la précédente étude
  - Définir des volumes d'eaux superficielles (ou souterraines en lien avec ces dernières) prélevables par période ;
- **Phase 3 : Proposition d'actions et d'adaptation du SAGE**
  - Répartition des volumes prélevables par usage
  - Affiner les débits seuils superficiels réglementaires proposés dans le cadre de la précédente étude
  - Disposer de recommandations pour réaliser des économies d'eau

Le présent document constitue le **rapport du volet « Climat »** de l'étude H.M.U.C.

L'objectif de ce volet est de :

- Identifier les perspectives d'évolution du climat et ses conséquences sur la ressource en eau à partir des études les plus récentes, en rapportant les analyses à l'échelle du périmètre d'étude (L'évolution passée du climat et des débits a été présentée dans le rapport du volet Hydrologie)
- Analyser l'évolution des paramètres climatiques directement à l'aide des données Météo France (plus précisément, issues du jeu de données de projection DRIAS2020) à l'horizon 2050

2 DEFINITIONS PREALABLES

Le tableau suivant fournit les définitions et les acronymes associés aux différents termes techniques employés dans le présent rapport :

Terme	Acronyme	Définition	Source
Agence de l'eau Loire-Bretagne	AELB	Les agences de l'eau, établissements publics de l'État, sont les opérateurs de la politique de l'eau sur ces grands bassins. Elles définissent leur cadre d'action en fonction des spécificités de leur territoire, des orientations nationales ou engagements européens, et en tenant compte de la stratégie de l'eau et des milieux aquatiques élaborée et validée par des « parlements locaux de l'eau », appelés des comités de bassin. Depuis la loi sur l'eau de 1964, l'eau est gérée en France par grands bassins hydrographiques qui correspondent aux territoires des grands fleuves. Il y ainsi en France 6 agences de l'eau. L'Agence de l'Eau Loire-Bretagne est l'une d'entre elles.	lesagencesdeleau.fr
Aquifère	-	Formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau et constituée de roches perméables et capable de la restituer naturellement et/ou par exploitation.	Actu-Environnement
Bassin versant	BV	Le bassin versant est un territoire géographique bien défini : il correspond à l'ensemble de la surface recevant les eaux qui circulent naturellement vers un même cours d'eau ou vers une même nappe d'eau souterraine.	OFB
Chambre d'Agriculture	CA	Les Chambres d'agriculture, créées en 1924, sont des établissements publics dirigés par des élus.Elles représentent l'ensemble des acteurs du monde agricole, rural et forestier : exploitants, propriétaires, salariés, groupements professionnels…Le réseau des Chambres d'agriculture est investi de 3 missions, issues du Code rural et amendées par Loi d'avenir de l'agriculture du 13 octobre 2014 :Contribuer à l'amélioration de la performance économique, sociale et environnementale des exploitations agricoles et de leurs filièresAccompagner dans les territoires, la démarche entrepreneuriale et responsable des agriculteurs ainsi que la création d'entreprise et le développement de l'emploiAssurer une fonction de représentation auprès des pouvoirs publics et des collectivités territoriales	chambres-agriculture.fr

Terme	Acronyme	Définition	Source
Communauté de Commune	CC	Une communauté de communes est une catégorie d'établissement public de coopération communale (EPCI) à fiscalité propre créée en 1992. Elle regroupe généralement plusieurs communes sur un territoire d'un seul tenant et sans enclave. Elle exerce des compétences sur ce territoire à la place des communes dans des domaines comme l'aménagement de l'espace, le développement économique, ou encore la gestion des déchets.	vie-publique.fr
Débit	Q	Le débit représente un volume d'eau écoulé par unité de temps, généralement exprimé en m3/s.	Actu-Environnement
Débit de base	-	Le débit de base est une partie du débit fluvial qui n'est pas directement générée par les précipitations excessives. Il s'agit du débit qui existerait dans le cours d'eau sans la contribution du ruissellement direct des précipitations. Le niveau d'eau le plus bas correspond à l'étiage. Le débit de base est la contribution du débit des eaux souterraines qui alimente de nombreuses rivières pérennes.	Aquaportail
Débit d'étiage quinquennal	QMNA5	Le QMNA5 correspond au débit moyen mensuel minimum de période de retour 5 ans, c'est-à-dire ayant une chance sur cinq de ne pas être dépassé pour une année donnée.Le QMNA5 est également mentionné dans la circulaire du 3 août 2010 du ministère en charge de l'écologie (NOR : DEVO1020916C) : « Le débit de l'année quinquennale sèche correspond, en se référant aux débits des périodes de sécheresse constatés les années précédentes, à la valeur la plus faible qui risque d'être atteinte une année sur cinq. La probabilité d'avoir un débit supérieur à cette valeur est donc de quatre années sur cinq ». Le QMNA5, dont on peut considérer qu'il reflète indirectement un potentiel de dilution et un débit d'étiage typiques d'une année sèche, est utilisé dans le traitement des dossiers de rejet et de prélèvement en eau en fonction de la sensibilité des milieux concernés. Le QMNA5 sert en particulier de référence aux débits objectifs d'étiage (DOE - voir ce terme).Le QMNA5 est une valeur règlementaire qui présente l'inconvénient d'être soumise à l'échelle calendaire. Les débits d'étiage peuvent en effet être observés durant une période chevauchant deux mois, induisant une surestimation du débit d'étiage par le QMNA. Pour cette raison, même si le QMNA5 reste une valeur réglementaire, l'évaluation des niveaux de débit en période d'étiage s'appuie préférentiellement sur des données journalières.	SUEZ Consulting

Terme	Acronyme	Définition	Source
Débit mensuel interannuel quinquennal sec	QMN5	Le débit mensuel interannuel quinquennal sec correspond pour un mois considéré, au débit mensuel qui a une probabilité de 4/5 d'être dépassé chaque année. Il permet de caractériser un mois calendaire de faible hydraulicité.	SUEZ Consulting
Débit minimum de l'année calculé sur d jours consécutifs	VCNd	Les VCNd sont des valeurs extraites annuellement en fonction d'une durée fixée « d ». - Le VCN3 permet de caractériser une situation d'étiage sévère sur une courte période (3 jours). - Les VCN7 et VCN10 correspondent à des valeurs réglementaires dans de nombreux pays et sont très utilisés d'une manière générale dans les travaux portant sur les étiages. Nota : Il est intéressant de comparer le QMNA au VCN30. Le VCN30 correspond à la moyenne mobile la plus faible de l'année calculée sur 30 jours consécutifs, car il se rapproche en termes de durée de l'échelle mensuelle. Ces deux grandeurs devraient être proches, mais dans certains contextes des écarts importants peuvent apparaître, notamment lors d'années pluvieuses et dans le cas de bassins imperméables qui ont une réponse rapide aux impulsions pluviométriques.	SUEZ Consulting
Débit moyen mensuel	QMM	Moyenne, pour un mois donné, des débits moyens journaliers.	Glossaire Eau
Débit moyen mensuel minimum de l'année	QMNA	Il s'agit de la variable usuellement employée par les services gestionnaires pour caractériser les étiages d'un cours d'eau. Il s'agit, pour une année donnée, du débit moyen mensuel (= moyenne des débits journaliers sur un mois) le plus bas de l'année.	SUEZ Consulting
Débit ruisselé	-	Le débit ruisselé est, au sein du débit total d'un cours d'eau, la part complémentaire au débit de base	SUEZ Consulting
Débit seuil d'alerte	DSA	À l'échelle du bassin Loire-Bretagne, le DSA est un débit moyen journalier en dessous duquel une des activités utilisatrices d'eau ou une des fonctions du cours d'eau est compromise. Le DSA est donc un seuil de déclenchement de mesures correctives. La fixation de ce seuil tient également compte de l'évolution naturelle des débits et de la nécessaire progressivité des mesures pour ne pas atteindre le DCR. Le DSA constitue, en tant que seuil d'alerte, un seuil de déclenchement de restrictions et de mesures associées, en référence à l'Instruction du 27 juillet 2021 (NOR: TREL2119797J) relative à la gestion des situations de crise liées à la sécheresse hydrologique	SDAGE Loire-Bretagne 2022-2027

Terme	Acronyme	Définition	Source
Direction Départementale des Territoires	DDT	Les directions départementales des territoires (et de la mer) sont le relai des DREAL pour le déploiement de la politique du ministère.Les DDT veillent au développement équilibré et durable des territoires, tant urbains que ruraux, par le biais des politiques agricole, d'urbanisme, de construction, d'aménagement et de transport.	Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des TerritoiresMinistère de la Transition Energétique
Directive Cadre sur l'Eau	DCE	Ce texte définit la notion de « bon état des eaux », vers lequel doivent tendre tous les États membres, dont la France. La DCE poursuit plusieurs objectifs : la non-dégradation des ressources et des milieux ; le bon état des masses d'eau, sauf dérogation motivée ; la réduction des pollutions liées aux substances ; le respect de normes dans les zones protégées.	Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires Ministère de la Transition Energétique
Etablissements publics de coopération intercommunale	EPCI	Les établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) sont des structures administratives permettant à plusieurs communes d'exercer des compétences en commun. Ils sont soumis à des règles communes, homogènes et comparables à celles de collectivités locales. Les communautés urbaines, communautés d'agglomération, communautés de communes, syndicats d'agglomération nouvelle, syndicats de communes et les syndicats mixtes sont des EPCI.	INSEE
Evapotranspiration potentielle	ETP	Une évapotranspiration potentielle ETP est la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée par évapotranspiration sous un climat donné par un couvert végétal continu bien alimenté en eau. Elle comprend donc l'évaporation du sol/substrat et la transpiration de la végétation d'une région donnée pendant le temps considéré. Elle s'exprime en hauteur d'eau.	Aquaportail
Exutoire	-	Les exutoires hydrologiques sont des passages par lesquels s'écoule le débit sortant d'un réservoir ou d'un cours d'eau, comme un estuaire.	Aquaportail
Gestion conjoncturelle ou de crise	-	La gestion conjoncturelle ou gestion de crise s'intéresse à des déséquilibres ponctuels (période de sécheresse). Elle vise à définir des seuils de surveillance du milieu et à prendre les mesures nécessaires pour anticiper leur franchissement.	SUEZ Consulting

Terme	Acronyme	Définition	Source
Gestion structurelle	-	La gestion structurelle regroupe toutes les initiatives permettant de restaurer l'équilibre durable entre besoins et ressources. Il s'agit de limiter les pressions de prélèvement, à travers notamment le respect de volumes prélevables et l'encadrement des prélèvements. L'équilibre structurel de la ressource s'observe à travers les indicateurs de Débit et de Piézométrie Objectif d'Etiage (DOE, POE)	SDAGE Loire-Bretagne 2022-2027
Hydrogéologie	-	L'hydrogéologie est la science des eaux souterraines. Cette science étudie les interactions entre les structures géologiques du sous-sol (nature et structures des roches, des sols) et les eaux souterraines ainsi que les eaux de surface.	Futura Sciences
Hydrogramme	-	Un hydrogramme est une courbe graphique représentative du débit d'un cours d'eau en fonction du temps, montrant une représentation, graphique ou non, de la variation temporelle des débits.	Aquaportail
Hydrographie	-	Branche de la géographie ayant pour objet l'étude et la description des mers, des lacs et des cours d'eau présents à la surface du globe. Dans le cadre de la présente étude, on s'intéresse en particulier au tracé des cours d'eau	cnrtl
Hydrologie	-	L'hydrologie est l'étude du mouvement, de la distribution, et la qualité de l'eau sur Terre et d'autres planètes du point de vue hydrologique, y compris le cycle hydrologique, les ressources en eau et le développement durable du bassin versant de l'environnement.	Aquaportail
Hydrologie influencée et désinfluencée	-	L'hydrologie influencée correspond à l'hydrologie observée aujourd'hui, influencée par l'activité anthropique. L'hydrologie désinfluencée correspond à celle qui serait observée en l'absence de prélèvements et rejets anthropiques d'eau.	SUEZ Consulting
Hydrosystème	-	Un hydrosystème est composé d'eau et de tous les milieux aquatiques associés dans un secteur géographique délimité, notamment un bassin versant. Le concept d'hydrosystème insiste sur la notion de biosystème et sur son fonctionnement hydraulique et biologique qui peuvent être modifiés par les actions de l'homme.	Aquaportail
Indice d'humidité des sols	SSWI	En anglais : Standardized Soil Wetness Index, est un indice permettant d'évaluer l'état de la réserve en eau d'un sol, par rapport à sa réserve optimale (réserve utile).	Météo France
Institut national de la statistique et des études économiques	INSEE	L'Institut national de la statistique et des études économiques collecte, produit, analyse et diffuse des informations sur l'économie et la société françaises	INSEE

Terme	Acronyme	Définition	Source
LoiEau	LoiEau	La base de données Web LoiEau fournit des chroniques hydrologiques simulées de 1958 à 2018 au pas de temps journalier, à partir desquelles de multiples indicateurs hydrologiques sont extraits, permettant de caractériser la ressource en eau dans son ensemble (étiage, saisonnalité, bilan).	La Houille Blanche
Masse d'eau	ME	Portion de cours d'eau, canal, aquifère, plan d'eau ou zone côtière homogène. Il s'agit d'un découpage élémentaire des milieux aquatiques destinée à être l'unité d'évaluation de la directive cadre sur l'eau 2000/60/CE.	EauFrance
Masse d'Eau Souterraine	MESOU	Une masse d'eau souterraine est un volume distinct d'eau souterraine à l'intérieur d'un ou de plusieurs aquifères.	EauFrance
Masse d'Eau Superficielle	MESU	Une masse d'eau de surface est une partie distincte et significative des eaux de surface, telles qu'un lac, un réservoir, une rivière, un fleuve ou un canal, une partie de rivière, de fleuve ou de canal, une eau de transition ou une portion d'eaux côtières. Pour les cours d'eau la délimitation des masses d'eau est basée principalement sur la taille du cours d'eau et la notion d'hydro-écorégion. Les masses d'eau sont regroupées en types homogènes qui servent de base à la définition de la notion de bon état.	EauFrance
Modélisation hydrologique	-	Un modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit, est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique).	Wikipédia
Module	-	Débit moyen interannuel Le module est la moyenne des débits moyens annuels calculés sur une année hydrologique et sur l'ensemble de la période d'observation de la station. Ce débit donne une indication sur le volume annuel moyen écoulé et donc sur la disponibilité globale de la ressource d'un bassin versant. Il doit être calculé sur une période d'observations suffisamment longue pour être représentative des débits mesurés ou reconstitués. Il a valeur de référence réglementaire, notamment dans le cadre de l'article L214-18 du code de l'environnement et de sa circulaire d'application du 5 juillet 2011 fixant au dixième du module désinfluencé la valeur plancher du débit à laisser en aval d'un ouvrage dans le lit d'un cours d'eau.	OFB

Terme	Acronyme	Définition	Source
Nappe d'accompagnement	-	Nappe d'eau souterraine voisine d'un cours d'eau dont les propriétés hydrauliques sont très liées à celles du cours d'eau. L'exploitation d'une telle nappe induit une diminution du débit d'étiage du cours d'eau, soit parce que la nappe apporte moins d'eau au cours d'eau, soit parce que le cours d'eau se met à alimenter la nappe (Source : Glossaire Eau et Biodiversité) ; Les nappes d'accompagnement sont des nappes libres en lien très étroit avec les cours et s'articule ainsi le long de ces derniers.	EauFrance
Période de basses eaux	BE	La période de basses eaux est la période de l'année pendant laquelle le débit des cours d'eau atteint ses valeurs les plus faibles. Cette période est prise en compte par le préfet pour délivrer les autorisations de prélèvement en période de basses eaux et pour mettre en place des mesures de gestion de crise (orientation 7E). En Loire-Bretagne, la période de basses eaux conjuguant sensibilité pour les milieux aquatiques et impact accru des prélèvements s'étend du 1er avril au 31 octobre. La CLE peut, à la suite d'une analyse HMUC, proposer au préfet de retenir une période de basses eaux différente. Elle ne peut pas être inférieure à une durée de 7 mois. La période hors période de basses eaux, définie comme étant le pendant de la période de basses eaux, est également modifiée en conséquence.	SDAGE Loire-Bretagne 2022-2027
Période d'étiage	-	L'étiage d'un cours d'eau, c'est la période de l'année pendant laquelle les niveaux d'eau sont les plus bas.	Les Agences de l'Eau
Période hors basses eaux	HBE	Période de l'année pendant laquelle les valeurs les plus hautes des débits des cours d'eau, sont observées. Elle est définie aux dispositions 7B-1 et 7D-3 du Sdage. Elle s'étend du 1er novembre au 31 mars. C'est au cours de cette dernière que sont autorisés les prélèvements visant à alimenter les réserves de substitution. Cette période est complémentaire de la période de basses eaux.	SDAGE Loire-Bretagne 2022-2027
Piézométrie objective d'Etiage	POE	Par analogie au DOE, à l'échelle du bassin et en référence au II de l'article 6 de l'arrêté modifié du 17 mars 2006 relatif au contenu des Sdage, le POE (piézométrie d'objectif d'étiage) est le niveau piézométrique (niveau de l'aquifère) « permettant de satisfaire l'ensemble des usages en moyenne huit années sur dix et d'atteindre le bon état des eaux ».	Article 6 de l'arrêté modifié du 17 mars 2006 relatif au contenu des Sdage

Terme	Acronyme	Définition	Source
Point nodal	-	Point clé pour la gestion des eaux défini en général à l'aval des unités de références hydrographiques pour les Schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) et/ou à l'intérieur de ces unités dont les contours peuvent être déterminés par les Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE). A ces points peuvent être définies en fonction des objectifs généraux retenus pour l'unité, des valeurs repères de débit et de qualité. Leur localisation s'appuie sur des critères de cohérence hydrographique, écosystémique, hydrogéologique et socio-économique	Glossaire eau
Prélèvement net	-	Le prélèvement net correspond à la soustraction des rejets aux prélèvements, sur un territoire donné. Il permet de rendre compte de la quantité d'eau réellement soustraite à un bassin versant, au niveau de son exutoire.	SUEZ Consulting
Projection climatique	-	Désigne la prévision de la réaction du système climatique en réponse à des scénarios d'émissions ou de concentration de gaz à effet de serre, d'aérosols, ou de forçage radiatif. Ces projections reposent fréquemment sur des simulations générées par des modèles climatiques, offrant ainsi des aperçus anticipés des évolutions climatiques potentielles en fonction des différentes variables et des conditions spécifiques envisagées.	Météo France
Projet de territoire pour la gestion de l'eau	PTGE	Un PTGE est une démarche reposant sur une approche globale et coconstruite de la ressource en eau sur un périmètre cohérent d'un point de vue hydrologique ou hydrogéologique. Il aboutit à un engagement de l'ensemble des usagers d'un territoire (eau potable, agriculture, industries, navigation, énergie, pêche, usages récréatifs, etc.) permettant d'atteindre, dans la durée, un équilibre entre besoins et ressources disponibles en respectant la bonne fonctionnalité des milieux aquatiques, en anticipant le changement climatique et en s'y adaptant. Il s'agit de mobiliser à l'échelle du territoire des solutions privilégiant les synergies entre les bénéfices socio-économiques et les externalités positives environnementales, dans une perspective de développement durable du territoire. Le PTGE doit intégrer l'enjeu de préservation de la qualité des eaux (réductions des pollutions diffuses et ponctuelles).	Guide d'élaboration et de mise en œuvre des Projets de Territoire pour la Gestion de l'Eau
Rang de Strahler	-	Rang d'un cours d'eau déterminé d'après la méthode de Strahler, méthode communément retenue car simple à mettre en oeuvre. Dans cette méthode, les cours d'eau issus d'une source sont notés de rang 1, puis chaque fois que deux tronçons de même ordre confluent, ils forment un tronçon d'ordre supérieur, tandis qu'un cours d'eau qui reçoit un affluent d'ordre inférieur conserve le même ordre.	Glossaire Eau

Terme	Acronyme	Définition	Source
Réserve utile du Sol	R ou RU	La réserve utile (RU) correspond à la fraction de la réserve qui est exploitable par la plante, c'est-à-dire la fraction accessible par les racines et absorbable par leur succion.	INRAE
Réserve utile maximale du Sol	RUmax	Valeur maximale atteignable de la réserve utile dans un sol donné	SUEZ Consulting
Résurgence	-	En hydrographie, une résurgence consiste en l'apparition des eaux en surface au terme d'une circulation entièrement souterraine dans le karst ; elle est une réapparition à l'air libre, au terme de son parcours souterrain, d'un écoulement de surface qui avait disparu en amont.	Aquaportail
Retenue	-	Une retenue d'eau est un plan d'eau confiné dans une enceinte, comme un réservoir. Elle est un lac, un étang ou un plan d'eau réservoir, créé artificiellement par la construction d'un barrage, digue, vanne ou autre type de barrière. La retenue d'eau est une étendue d'eau formée par accumulation, par exemple en amont d'un barrage.	Aquaportail
Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux	SAGE	Le schéma d'aménagement et de gestion de l'eau (SAGE) est un outil de planification, institué par la loi sur l'eau de 1992, visant la gestion équilibrée et durable de la ressource en eau. Déclinaison du SDAGE à une échelle plus locale, il vise à concilier la satisfaction et le développement des différents usages (eau potable, industrie, agriculture, ...) et la protection des milieux aquatiques, en tenant compte des spécificités d'un territoire. Délimité selon des critères naturels, il concerne un bassin versant hydrographique ou une nappe. Il repose sur une démarche volontaire de concertation avec les acteurs locaux.	Gesteau
Sécheresse	-	On distingue trois grands types de sécheresses : La sécheresse météorologique provoquée par un manque de pluie ; La sécheresse agricole causée par un manque d'eau dans les sols et qui nuit au développement de la végétation ; La sécheresse hydrologique lorsque les lacs, rivières, cours d'eau ou nappes souterraines ont des niveaux anormalement bas.	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires Ministère de la Transition énergétique
Surévaporation	-	Sur-évaporation d'un plan d'eau = Evaporation du plan d'eau – Evapotranspiration d'une surface naturelle équivalente	SUEZ Consulting

Terme	Acronyme	Définition	Source
Volume potentiellement mobilisable	VPM	Pour désigner le volume qui peut être mobilisé dans le milieu naturel par l'ensemble des usages au sens large, qu'ils soient réglementés ou non, on parlera de volume potentiellement mobilisable. Pour obtenir le volume prélevable, on passe par le calcul de deux métriques préalables ; le volume potentiellement mobilisable net (VPM net) et le volume potentiellement mobilisable brut (VPM brut) : - Le VPM net est le volume obtenu par soustraction du DOE à l'hydrologie désinfluencée ; - Le VPM brut est obtenu par addition des rejets moyens au VPM net.	SUEZ Consulting
Volumes prélevables	VP	Dans les bassins ciblés par la stratégie visée au II de l'article R. 213-14, on entend par volume prélevable, le volume maximum que les prélèvements directs dans la ressource en période de basses eaux, autorisés ou déclarés tous usages confondus, doivent respecter en vue du retour à l'équilibre quantitatif à une échéance compatible avec les objectifs environnementaux du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux.Ce volume prélevable correspond au volume pouvant statistiquement être prélevé huit années sur dix en période de basses eaux dans le milieu naturel aux fins d'usages anthropiques, en respectant le bon fonctionnement des milieux aquatiques dépendant de cette ressource et les objectifs environnementaux du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux.Il est issu d'une évaluation statistique des besoins minimaux des milieux sur la période de basses eaux. Il est réparti entre les usages, en tenant compte des enjeux environnementaux, économiques et sociaux, et dans les conditions définies au II de l'article R. 213-14.	Article R211-21-1 du Code de l'Environnement
Zone de Répartition des Eaux	ZRE	Zone comprenant les bassins, sous-bassins, fractions de sous-bassins hydrographiques et systèmes aquifères définis dans le décret du 29 avril 1994. Les zones de répartition des eaux (ZRE) sont des zones où est constatée une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins. Elles sont définies afin de faciliter la conciliation des intérêts des différents utilisateurs de l'eau. Les seuils d'autorisation et de déclaration du décret nomenclature y sont plus contraignants.	Glossaire Eau

3 PERIMETRE DE L'ETUDE

La masse d'eau de l'Argance concerne 19,7 km de linéaire de cours d'eau principal pour 80 km^2 de bassin versant. Ce dernier s'étend sur un territoire rural partagé respectivement à 72% et 28% entre les départements de la Sarthe et du Maine-et-Loire. Un total de 6 communes compose le territoire d'étude.

Le cours d'eau est un affluent direct du Loir et termine sa course au niveau de la commune de Durtal. Le relief du bassin est très peu marqué entre la source du cours d'eau et son exutoire dans le Loir.

Le bassin versant dispose d'une station hydrométrique, en service depuis 1992, située sur la commune de la Chapelle d'Aligné, à la frontière entre les départements de la Sarthe et du Maine-et-Loire. Le bassin est également équipé d'une station de suivi des niveaux de nappes au droit de la commune de Villaines-sous-Malicorne.

La carte ci-dessous présente le périmètre d'étude.

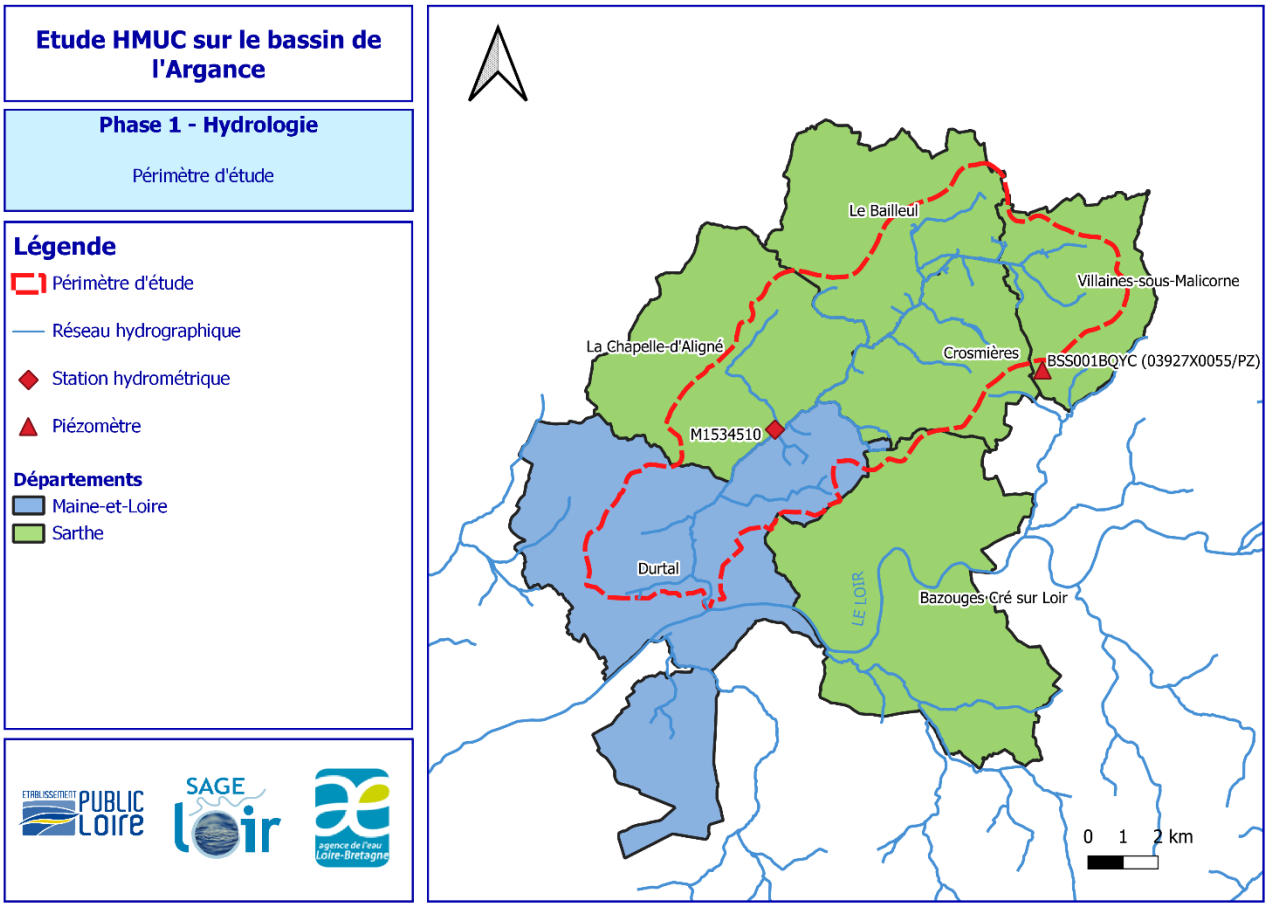


Figure 1 : Périmètre de l'étude HMUC (Source : EP Loire, IGN, DDT49, DDT72)

4 ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DES PERSPECTIVES D'EVOLUTION DU CLIMAT ET DE LA RESSOURCE EN EAU

Plusieurs études et projets ont récemment permis de caractériser le changement climatique et ses effets sur l'hydrologie des bassins de la région du territoire d'étude. Le tableau suivant présente les sources valorisées dans le cadre de cette analyse bibliographique.

Tableau 1 : Etudes et projets pour l'analyse bibliographique des perspectives d'évolution de la ressource en eau

Etude/Projet/ Document	Porteurs du projet	Dates	Périodes	Périmètre	Paramètres
Climat HD	Météo France	2021	Référence : 1976 - 2005	Pays de la Loire	Température de l'air, précipitations, humidité du sol
Explore 2070	Ministère de l'écologie	2010-2012	Référence : 1961-1990 Horizon : 2050 (2046-2065)	France entière	Température de l'air, ETP, Précipitations, Débits, Piézométrie
Thèse Gildas Dayon	Université Toulouse 3	2015	Référence : 1960-1990 Horizon : 2050 (2035-2065)	France entière	Précipitations, ETP, Ruissellement, Débits
Plan d'Adaptation au Changement Climatique	Agence de l'eau Loire-Bretagne	2018	Référence : 1961-1990 Horizon : 2055 (2046-2065)	Bassin Loire-Bretagne	Température de l'air, ETP, Précipitations, Débits (d'après les résultats d'Explore2070)
ICC-Hydroqual	Université de Tours	2010	Référence : 1971-2000 Horizons : 2050 et 2100	Bassin de la Loire en amont de Montjean	Température de l'air, ETP, Précipitations, Débits
Etude sur la température des cours d'eau	Université de Tours, OFB	2015	Référence : 1971-2000 Horizons : 2100	Bassin de la Loire en amont de Montjean	Température de l'eau des cours d'eau
AQUI-FR	OFB	2018	Référence : 1960 – aujourd'hui Horizon : 2070-2099	Loire, Poitou-Charentes, Seine-Normandie, Nord	Piézométrie, débit

Concernant les études Explore 2070 et ICC-Hydroqual présentées dans le tableau précédent, chacune d'entre elles s'appuie sur le scénario **A1B** de la gamme de scénarios **SRES** utilisée dans l'**AR4** du GIEC[1] (IPCC AR5 Synthesis Report 2014) : ce scénario privilégiait une réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement économique basé sur le schéma actuel et un équilibre des sources énergétiques. Aujourd'hui, avec l'**AR5**, des scénarios climatiques plus récents sont disponibles ; les **scénarios RCP**. Néanmoins, les scénarios SRES restent, à l'échelle de la France, en concordance avec ces derniers, ce qui permet de comparer les anciennes études aux plus récentes. Jusqu'à l'horizon 2050, le scénario **SRES A1B** est très proche des scénarios **RCP 4.5 et 6.0**. Une explication des différents scénarios climatiques existants est fournie en annexe 1 (§7.1). L'évaluation des impacts du changement climatique repose souvent sur des projections globales émises par des modèles climatiques, tels que CMIP4 ou CMIP5. Cependant, il est important de noter que des avancées ont été réalisées, et les scientifiques travaillent actuellement avec des modèles plus récents, comme CMIP6. Des distinctions significatives entre ces versions émergent, indiquant un scénario futur potentiellement plus pessimiste dans les versions plus récentes. A souligner que les analyses de l'étude Explore 2, faisant suite à l'étude Explore 2070, bien que non encore accessibles, s'appuient sur CMIP5, car CMIP6 n'est pas inclus dans les rapports du GIEC. Ce décalage entre les versions peut influencer les résultats obtenus, et il est anticipé que les travaux en cours à l'échelle régionale, ainsi que les résultats globaux publiés, pourraient présenter des divergences par rapport aux conclusions actuelles présentées ici. Cependant, ces éléments demeurent inaccessibles dans l'immédiat.

4.1 Climat HD – Synthèse d'évolutions climatiques à l'échelle des Pays de la Loire

Pour mieux appréhender le changement climatique à venir, le site ClimatHD[2] (Météo France) synthétise les derniers travaux des climatologues. Au cours du XXIe siècle, la région des Pays de la Loire devrait faire face à une poursuite du réchauffement climatique, indépendamment du scénario envisagé. Selon les projections, en cas de fortes émissions, la température moyenne annuelle pourrait augmenter de plus de 4,4°C d'ici la fin du siècle par rapport à la période de référence 1976-2005. Ce réchauffement s'accompagnera de peu d'évolution des précipitations annuelles, laissant entrevoir des conditions relativement stables sur ce paramètre. Une tendance notable est la diminution anticipée du nombre de jours de gel, conjuguée à une augmentation des journées chaudes, quel que soit le scénario climatique envisagé. Par ailleurs, un aspect préoccupant réside dans l'assèchement des sols, une tendance qui devrait s'accentuer au cours du XXIe siècle à toutes les saisons. Cette évolution peut entraîner des répercussions significatives sur la disponibilité de la ressource en eau et nécessitera une adaptation continue des politiques de gestion des ressources hydriques dans la région. Ainsi, la combinaison de ces facteurs climatiques souligne l'importance d'une planification stratégique et proactive pour atténuer les impacts potentiels du changement climatique dans les Pays de la Loire.

[1] Le GIEC est l'organisme qui fait référence en matière d'études sur le changement climatique. Il publie périodiquement (environ tous les 5 ans) des rapports d'évaluation traitant d'un large panel de questions relatives au changement climatique. Ces rapports portent L'acronyme AR (Assessment Report) suivi de leur numéro.

[2] Accessible ici : https://meteofrance.com/climathd > France métropolitaine > Climat futur > Pays de la Loire

4.2 Etude Explore 2070 (2010-2012)

4.2.1 Climat

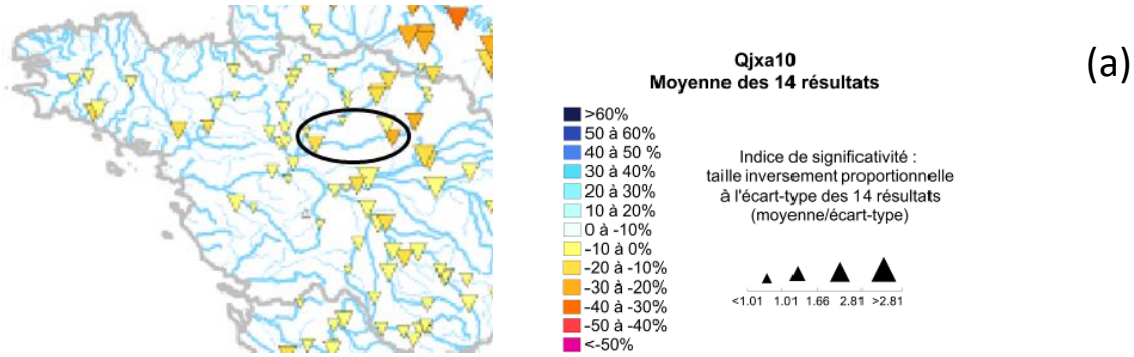
Les résultats suivants sont tirés des fiches stations présentés en annexe 2 (§7.2). On note notamment que :

- Pour les précipitations, on ne retrouve pas une bonne convergence entre les projections analysées. Toutefois une tendance plutôt nette à la diminution des précipitations au cœur de l'été (jusque -20% en août d'après la projection médiane au niveau de Durtal) peut être observée ;
- Pour les températures, on dénote une nette convergence des projections, les températures tendent à augmenter (+3°C en août pour la projection médiane) ;
- Pour l'ETP, à l'instar des température, nette convergence. Ce paramètre tend à fortement augmenter en fin d'été, début d'automne (+51% en octobre d'après la projection médiane analysée pour les 3 stations présentées)

4.2.2 Hydrologie de surface

Les résultats d'Explore 2070 concernant les eaux superficielles ne proposent pas d'analyse à l'échelle de l'Argance. On s'appuie donc sur les analyses réalisées le long du Loir et de la Sarthe, en ayant bien en tête que ces cours d'eau étant d'échelles très différentes de celle de l'Argance, les résultats obtenus ne doivent pas être directement extrapolés à cette dernière. Pour disposer d'un cours d'eau proche présentant un bassin de taille plus comparable à celle de celui de l'Argance, on analyse également la Vègre. Les fiches Explore 2070 réalisées sur ces trois cours d'eau à proximité de l'Argance sont présentées en annexe 2 (§7.2).

Les résultats, présentés sous forme de cartes (***Figure 2***), prévoient à l'horizon 2046-2065, **une diminution du débit annuel moyen comprise entre 30 et 40%**, une accentuation des étiages avec une baisse du QMNA5 allant de **30 à 40%** et une diminution possible des crues, avec une diminution du débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans (QJXA10) de **0 à 30%**, par rapport à la période de référence 1961-1990. L'étude montre également une hausse de la température de l'eau de +1,6°C à l'échelle de la France.



(a)

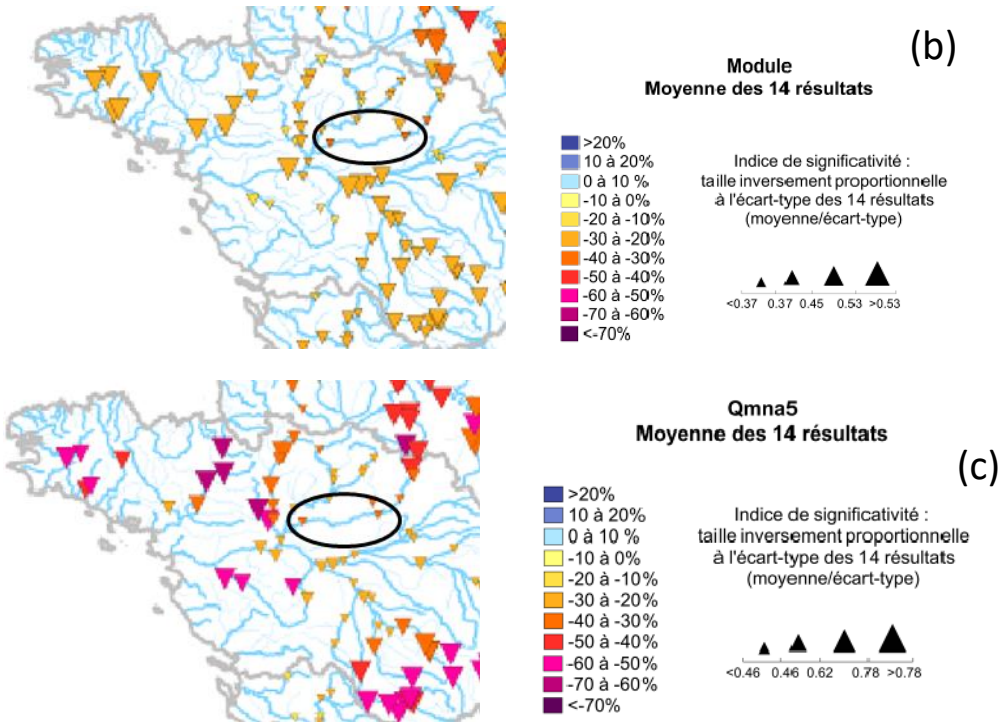


Figure 2 : Evolutions relatives possibles (en %) du Qjxa10 (a), du module (b) et du QMNA5 (c) entre 1961-90 et 2046-65. Résultats moyens établis sur 14 simulations (2 modèles hydrologiques et 7 modèles climatiques). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations. (Source : Explore 2070). L'Argance se situe dans la partie gauche de la forme ovale

L'analyse des fiches détaillées révèle des tendances divergentes en ce qui concerne les débits, avec des variations significatives entre les modèles hydrologiques. Dans le cas du modèle GR4J, une diminution généralisée des débits est observée, avec une accentuation particulièrement marquée sur le Loir à Durtal, l'une des trois stations prises en compte. En revanche, pour le modèle ISBA-MODCOU, dont les résultats ne sont pas disponibles pour la station de la Vègre, une tendance semblable mais moins prononcée se dessine, mettant en évidence principalement un allongement de la période de bas débits.

En examinant l'impact sur le QMNA5, qui représente le débit mensuel minimal de période de retour de 5 ans, les résultats obtenus varient significativement entre les deux modèles pour l'ensemble des trois stations. Selon le modèle GR4J, une diminution substantielle de l'ordre de 50 à 60 % est relevée. En revanche, pour le modèle ISBA-MODCOU, bien que les résultats ne soient pas disponibles pour la station de la Vègre, une diminution moins prononcée d'environ -5 % est suggérée sur les deux autres stations. Ces différences soulignent l'importance de prendre en compte la diversité des modèles hydrologiques et de reconnaître que les variations peuvent être significatives d'un modèle à l'autre, ce qui a des implications importantes pour la compréhension des futurs scénarios hydrologiques.

4.2.3 Perspectives pour l'hydrogéologie

Au cours de l'étude Explore 2070 rédigée en 2012 (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie 2012b), l'évolution de la recharge des nappes a été évaluée. Afin de préciser les incertitudes dérivant des différents modèles climatiques utilisés dans le cadre de cette étude, il apparaît nécessaire de fournir non seulement la valeur moyenne obtenue par l'intermédiaire des sept modèles climatiques considérés dans l'étude Explore 2070, mais également les valeurs maximales et minimales des écarts évalués entre la recharge future et la recharge actuelle par chacun de ces modèles. Trois cartes sont ainsi proposées, afin de fournir une évaluation moyenne et des évaluations minimales et maximales.

Selon l'étude Explore 2070, la recharge de nappe sur le bassin versant du Loir devrait **diminuer de 30 à 40%** en moyenne entre la période 1961-1990 et la période 2045-2065 (***Figure 3***).

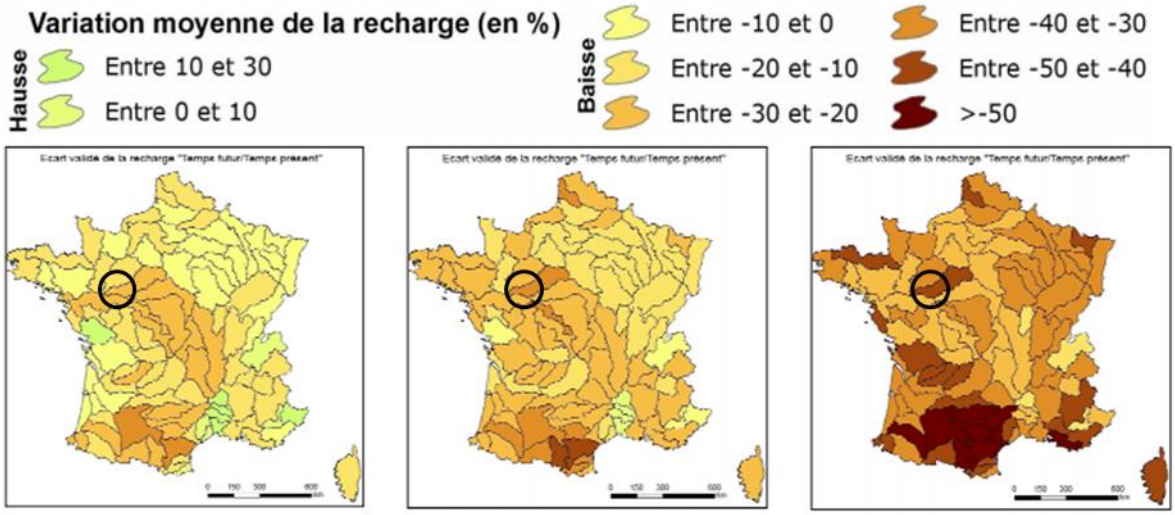


Figure 3 : Ecart minimal, moyen et maximal de la recharge temps futur/temps présent (source : Explore 2070)

4.3 Évolution du cycle hydrologique continental sur la France (thèse de Gildas Dayon, 2015)

Les travaux de thèse de Gildas Dayon (Dayon 2015) ont permis de modéliser à l'échelle de la France l'évolution probable des ressources en eau superficielles au travers du débit moyen et QMNA5. Selon cette dernière, à l'horizon 2050 :

- Les débits hivernaux stagneront ou diminueront légèrement ;
- Les débits printaniers diminueront légèrement (jusqu'à -20%) et stagneront pour les scénarios RCP 2.6 et RCP 6.0;
- Les débits estivaux et automnaux diminueront plus fortement (jusqu'à -35%) ;
- Le QMNA5 stagne pour le scénario climatique le plus optimiste (RCP 2.6) et diminue pour les autres, jusqu'à -40% environ pour le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5).

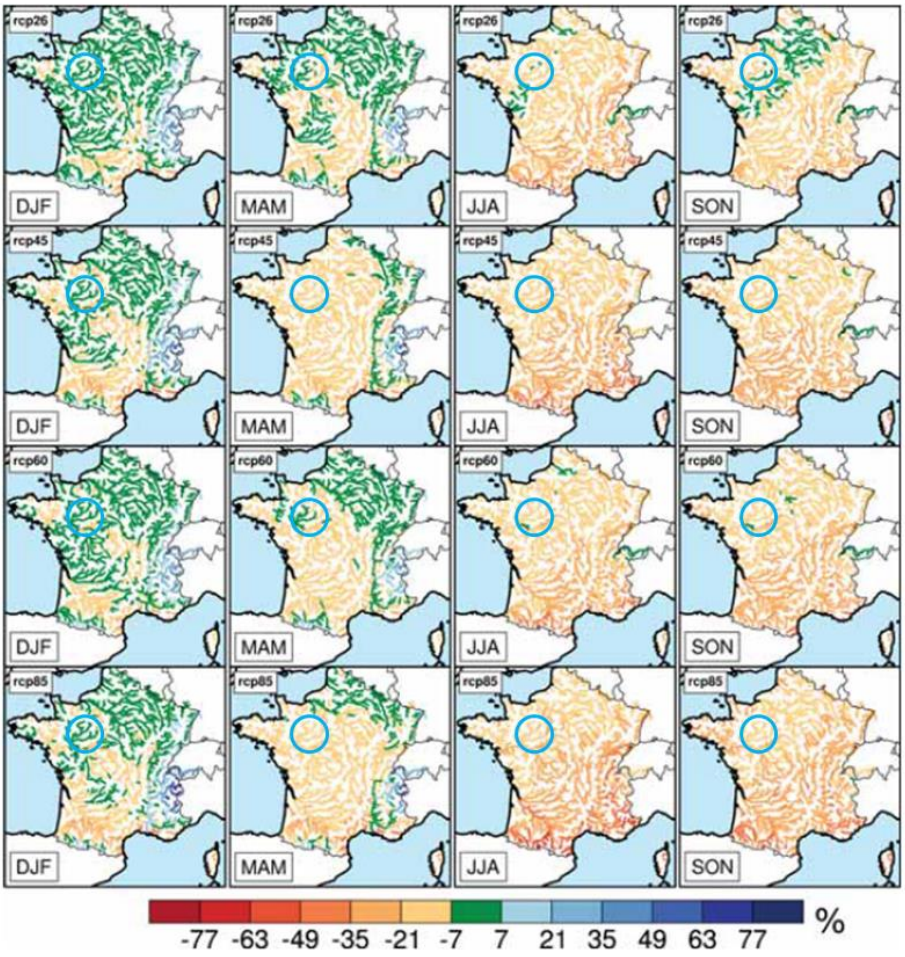


Figure 4 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs (%) au milieu du siècle (2035-2065) relatifs à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP sur le réseau hydrographique de Modcou. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet- Août SON : Septembre-Octobre-Novembre. Source : (Dayon, 2015)

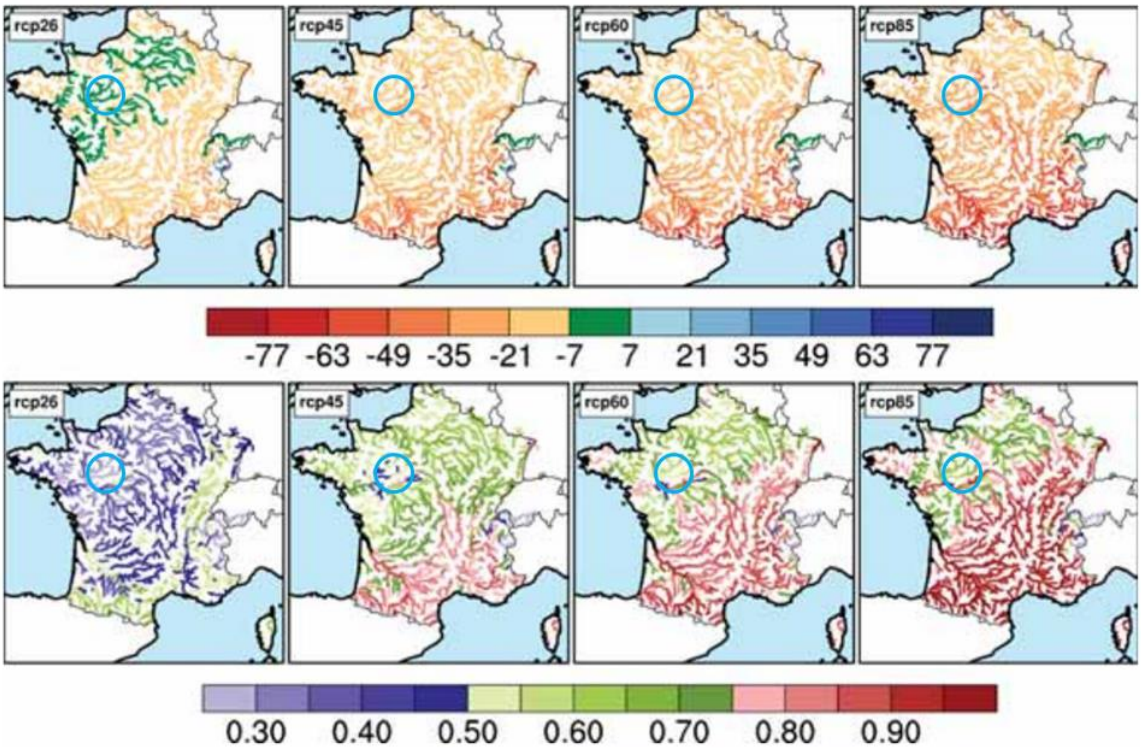


Figure 5 : En haut : Moyenne d'ensemble des changements relatifs du débit mensuel minimal d'une période de retour de 5 ans (QMNA5, %) pour la période 2070-2100 par rapport à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. En bas : Moyenne d'ensemble de la probabilité que le débit mensuel minimal sur la période 2070-2100 soit inférieur ou égale au QMNA5 de la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. (Source : Dayon 2015)

4.4 Plan d'adaptation au changement climatique pour le bassin Loire-Bretagne

Le diagnostic climatique du Plan d'adaptation au changement climatique pour le bassin Loire-Bretagne, adopté en avril 2018, s'appuie sur les conclusions de vulnérabilité produites par l'Agence de l'eau Loire-Bretagne en 2017 d'après les résultats d'Explore 2070 (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2018). La vulnérabilité y est définie comme le produit de la sensibilité (situation actuelle des milieux et usages de l'eau à partir des données utilisées pour l'état des lieux du SDAGE Loire-Bretagne 2013) et de l'exposition (caractéristiques futures possibles du climat et de l'hydrologie à partir des résultats d'Explore 2070). Elle caractérise donc les effets attendus du changement climatique sur le territoire.

La vulnérabilité du bassin Loire-Bretagne, face aux évolutions climatiques et hydrologiques, a été évaluée au travers de quatre indicateurs, obtenus par la mise en relation des évolutions des différents paramètres hydro-climatiques (précipitations, ETP, températures, débits etc.) :

- La disponibilité en eau superficielle, qui dépend de la répartition des pluies dans le temps et l'espace et des débits transitant dans les nappes ;
- Le bilan hydrique des sols qui reflète le risque de sécheresse des sols en fonction de la température et de la pluviométrie ;
- La biodiversité des milieux aquatiques (biodiversité de la ripisylve, des zones humides et niveau d'altération de l'hydromorphologie) au travers de la température, des bas débits et de l'ETP ;

- Le niveau trophique des eaux qui évalue l'incidence du changement climatique sur la capacité d'autoépuration des cours d'eau, via la température, l'ETP et la ventilation des cours d'eau (débit).

4.4.1 Disponibilité en eaux superficielles

La ***Figure 6*** présente, pour 14 scénarios d'évolution différents[3], l'exposition du bassin Loire-Bretagne pour l'indicateur de la disponibilité en eau, par l'intermédiaire des projections d'évolution du QMNA2. Les horizons temporels de référence sont les mêmes que pour l'étude Explore 2070 (2046-2065). On constate, d'après les catégories obtenues par les 14 scénarios pour le bassin du Loir, que ce dernier est exposé à une **diminution de 30% du QMNA2 en moyenne, ce qui ne le place a priori pas parmi les bassins les plus concernés par cette problématique, mais préfigure toutefois l'occurrence d'étiages sensiblement plus sévères**.

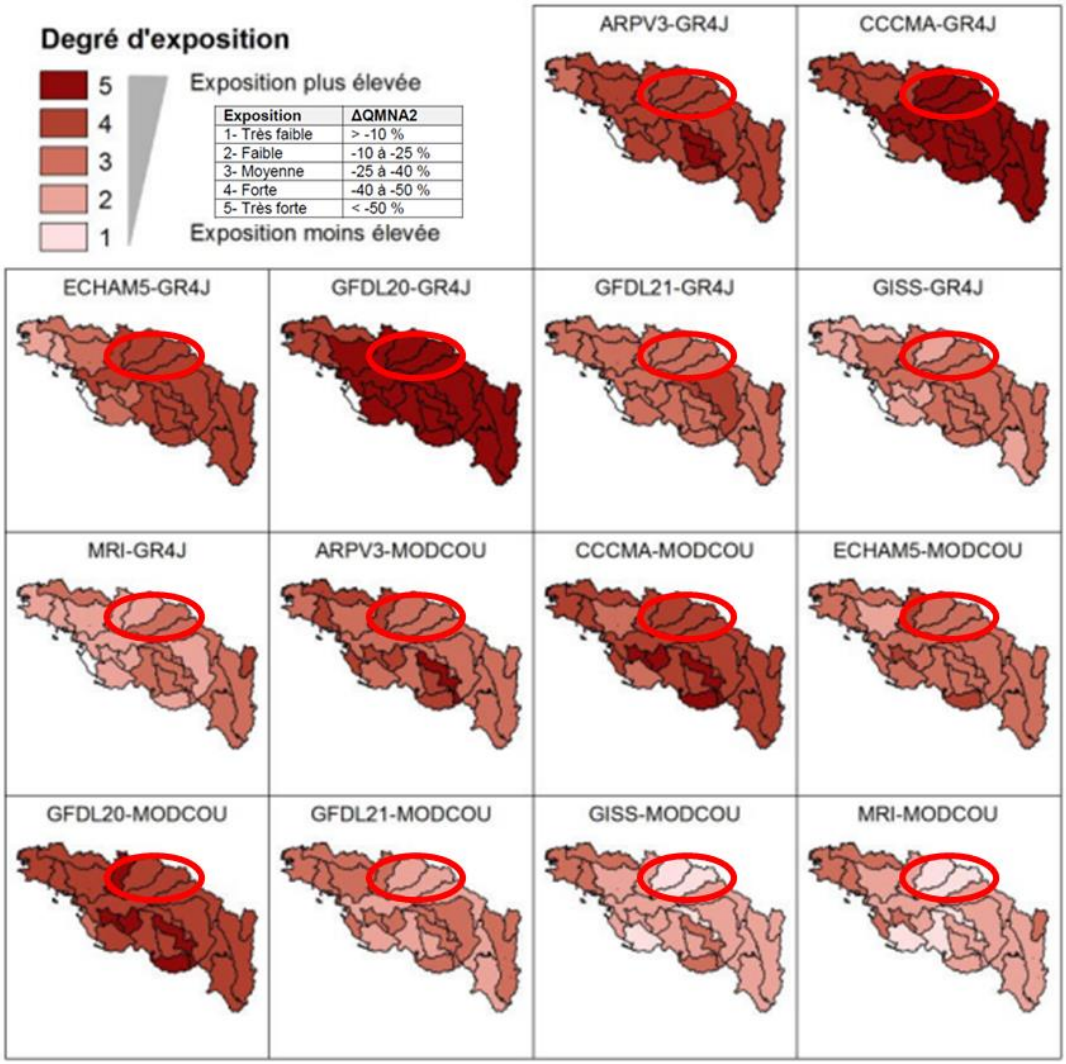


Figure 6 : Projections d'évolution du QMNA2 sur le bassin Loire-Bretagne (Source : Agence de l'eau Loire-Bretagne 2017)

[3] Les 14 scénarios différents sont obtenus par la modélisation de 7 scénarios climatiques sous 2 modèles hydrologiques différents : GR4J et MODCOU.

4.4.2 Bilan hydrique des sols en fin d'été

La figure suivante présente, pour les 7 scénarios climatiques précédents, l'exposition du bassin Loire-Bretagne pour l'indicateur du bilan hydrique des sols, par l'intermédiaire du rapport entre la hausse de l'ETP et la baisse des précipitations aux mois de printemps et d'été. Les horizons temporels de référence sont les mêmes que pour l'étude Explore 2070 (2046-2065).

On constate, sur les 7 scénarios, que le bassin du Loir présente un **degré d'exposition très faible à fort face aux sécheresses estivales des sols.**

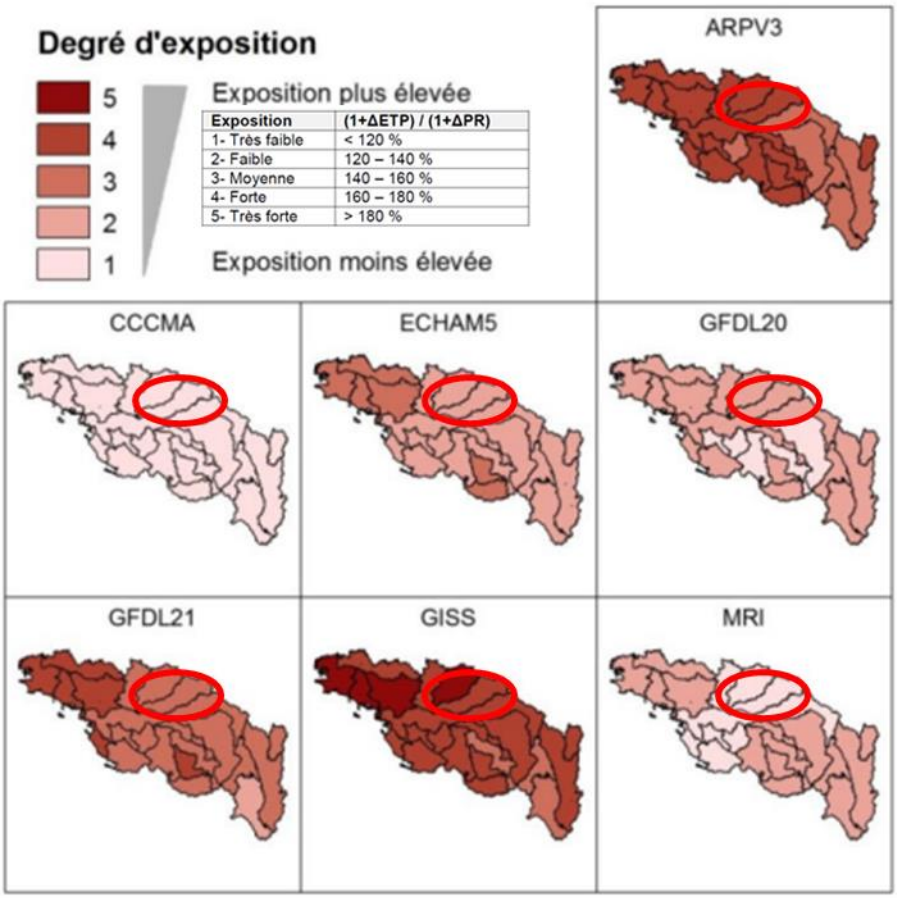


Figure 7 : Projections d'évolution du rapport (1+ΔETP) / (1+ΔPR) sur le bassin Loire-Bretagne (Source : Agence de l'eau Loire-Bretagne 2017)

4.4.3 Biodiversité des milieux aquatiques et niveau trophique

L'exposition du bassin Loire-Bretagne pour l'indicateur de la biodiversité des milieux aquatiques et du niveau trophique (qui font appel tous deux à la même méthode de calcul de score d'exposition), par l'intermédiaire d'un score est obtenu en croisant les scores associés à l'évolution des températures et à l'évolution des VCN30, selon la méthode présentée dans la ***Figure 8***. Les horizons temporels de référence sont les mêmes que pour l'étude Explore 2070. Les répartitions de ces expositions pour les 14 projections, à travers le bassin Loire-Bretagne, sont présentées. On remarque une **nette aggravation** dans la grande majorité des cas ci-dessous, pour la biodiversité des milieux aquatiques. Cette évolution néfaste peut entraîner des conséquences sur la qualité des eaux et sur la ressource.

(a)

Score	ΔT	ΔVCN30
1	< 2°C	> -5%
2	2 – 2,5°C	-5 à -30%
3	> 2,5°C	< -30%

3	3	4	5
2	2	3	4
1	1	2	3
T/ VCN	**1**	**2**	**3**

(b)

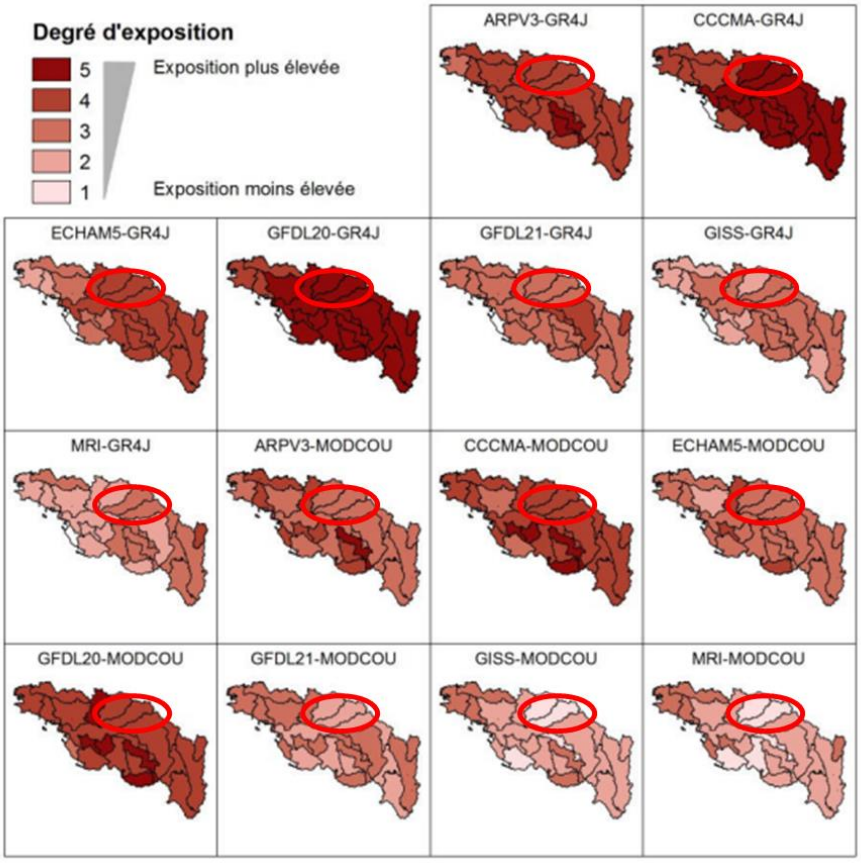


Figure 8 : (a) Méthode de calcul du score d'exposition ; (b) Projections d'évolution du score d'exposition de la biodiversité liée aux cours d'eau et du niveau trophique des eaux sur le bassin Loire-Bretagne (Source : Agence de l'eau Loire-Bretagne 2017)

4.5 Etude ICC-Hydroqual

Le rapport final de l'étude Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : Hydrologie, Régime thermique, qualité des eaux (ICC-Hydroqual) a été publié en novembre 2010 (Ducharne et al. 2010). Son objectif était de décrire l'évolution des caractéristiques du climat et de l'hydrologie du bassin hydrographique de la Loire en amont de Montjean (Mayenne, 53) à l'horizon 2100.

4.5.1 Perspectives climatiques

On observe, à la ***Figure 9***, les évolutions suivantes :

- A l'horizon 2050 :
  - Augmentation de la température d'environ 2°C en moyenne, et jusqu'à 2,5°C en août ;
  - Augmentation faible (+10% environ) des précipitations totales (neige et pluie) en février et mars. Diminution des précipitations de mai à octobre (environ -25%) ;
  - Diminution d'au moins 70% des chutes de neige sur les mois d'octobre à mai (pas de neige simulée le reste de l'année) ;
- A horizon 2100 :
  - Augmentation de la température de 3°C environ et jusqu'à 4°C en juillet et août ;
  - Augmentation d'environ 10% des précipitations totales au mois de mars et diminution du mois de mai à novembre, marquée en juillet août (-30%) ;
  - Diminution d'au moins 80% des chutes de neige sur les mois d'octobre à mai (pas de neige simulée les autres mois).

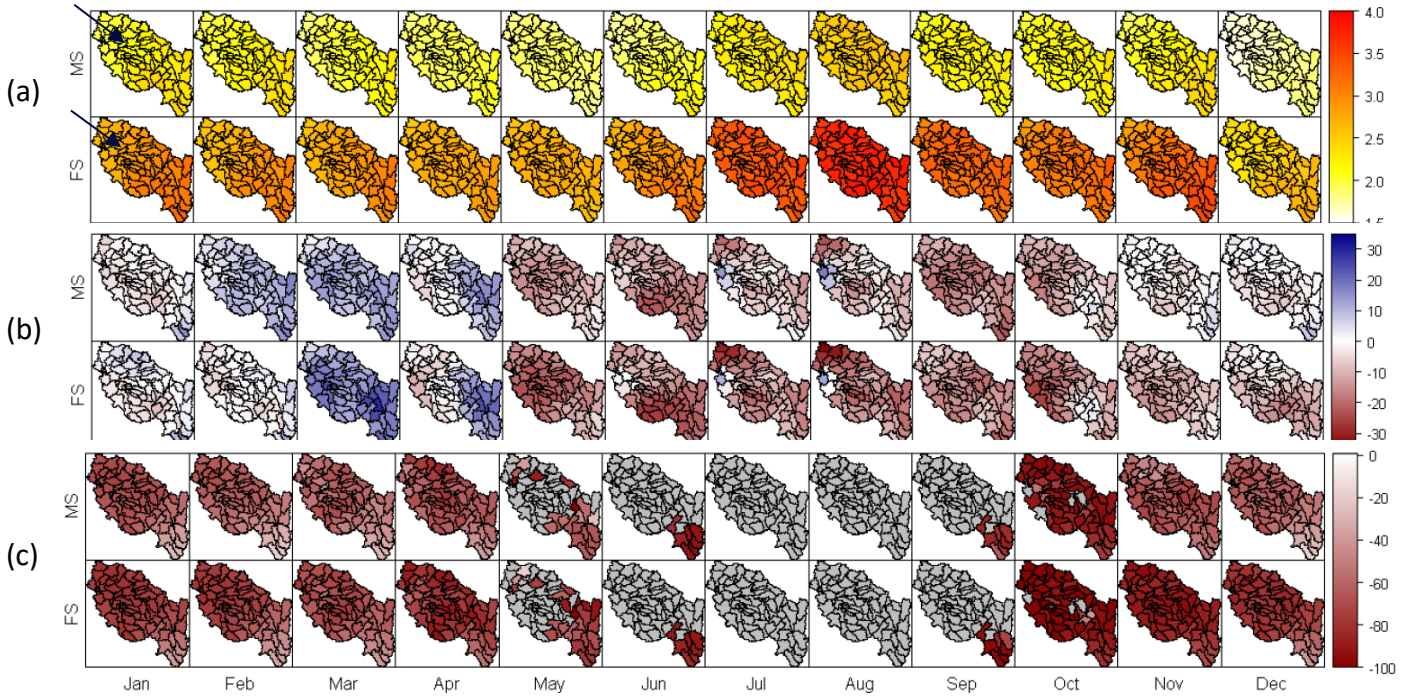


Figure 9 Evolution de la (a) température atmosphérique moyenne mensuelle en °C, (b) des précipitations totales moyennes mensuelles (en %), (c) des précipitations solides (neige) moyennes mensuelles (en % - en gris là où aucune neige n'a été simulée) à l'horizon de mi-siècle (MS) et de fin de siècle (FS) par rapport à la période 1971-2000 (Source : Hydroqual 2010)

4.5.2 Perspectives pour l'hydrologie de surface

Aucune analyse spécifique au bassin de l'Argance ou pouvant s'y rapporter n'a été menée dans le cadre de l'étude ICC-Hydroqual. Toutefois, il ressort du rapport les conclusions générales suivantes sur le bassin de la Loire :

- Tendance à la diminution de la ressource en eau : diminution du module et des volumes disponibles ;
- Etiages plus sévères et durée de basses eaux plus longues.

4.6 Etude de l'université de Tours sur la température des cours d'eau du bassin de la Loire

Cette étude[4] (Beaufort, Moatar, et Curie 2015), finalisée en 2015 et menée par l'université François-Rabelais de Tours et l'Office Français de la Biodiversité (OFB), a permis de modéliser les températures des cours d'eau du bassin de la Loire à horizon 2100. L'étude s'est appuyée sur 13 projections climatiques issues du 4ème rapport du GIEC, sur 15 projections hydrologiques et sur les résultats de l'étude ICC-Hydroqual. Les résultats montrent une augmentation de 2.9°C (+/-0.7°C) à l'horizon 2100 en moyenne sur le bassin de la Loire. Les simulations en période actuelle et à la fin du 21e siècle sont représentées sur la ***Figure 10***. On observe une augmentation (**+2°C**) de la température sur l'ensemble des cours d'eau du territoire d'étude.

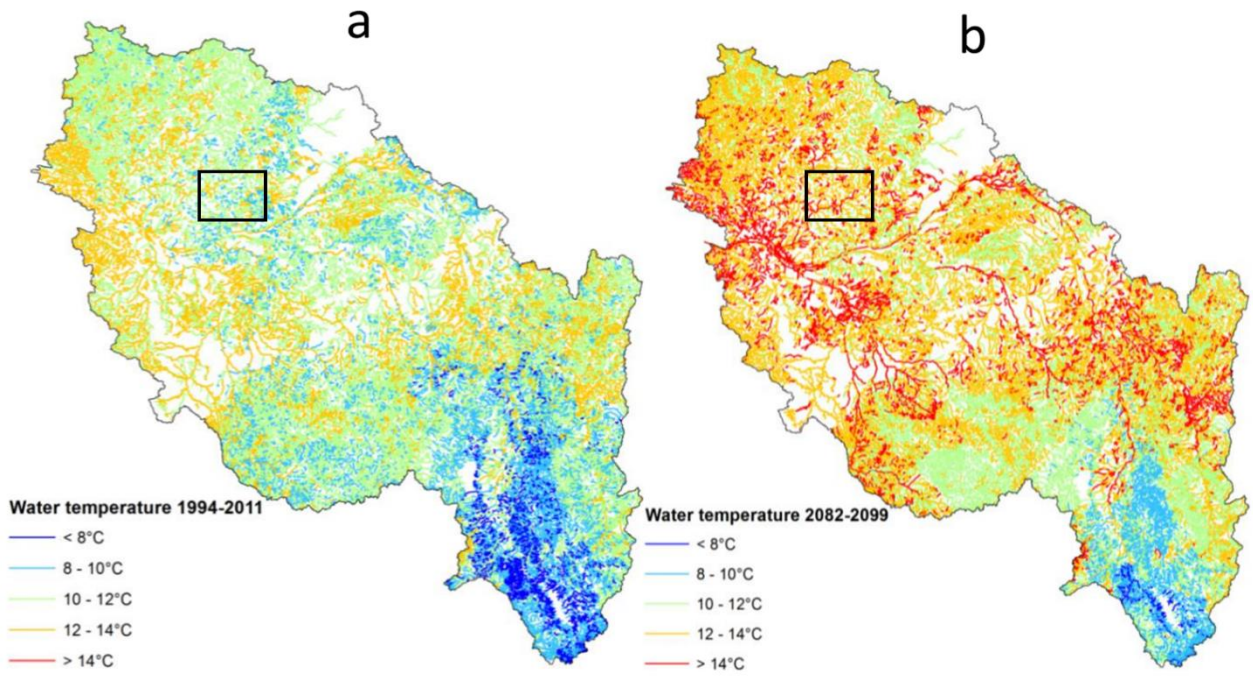


Figure 10 : Température moyenne interannuelle des cours d'eau superficiels simulée en (a) période actuelle (1994-2011) et (b) à la fin du 21e siècle (2082-2099)

[4] https://www.eaufrance.fr/sites/default/files/documents/pdf/Rapport_UnivTours_Temperature.pdf

4.7 Projet AQUI-FR

Le projet AQUI-FR rassemble sept laboratoires français dans le dessein de développer une connaissance approfondie des ressources en eau souterraine, couvrant les périodes passées, présentes et futures. Pour y parvenir, le projet met en place un suivi en temps réel et des prévisions saisonnières des aquifères, s'appuyant principalement sur des modèles hydrogéologiques et des applications déployées sur des bassins versants déjà établis et largement utilisés par les gestionnaires des ressources en eau. Le projet est en cours et le premier rapport d'étape apporte les éléments suivants sur l'impact du changement climatique sur la ressource souterraine.

Pour le moment les scénarios d'émission RCP2.6 et RCP8.5, les plus contrastés, ont été utilisés. Disposant de 8 modèles climatiques pour le scénario RCP2.6 ainsi que 10 modèles pour le RCP8.5, les résultats obtenus pour chacun de ces modèles sont moyennés sur une période de 30 ans. Les cartes suivantes sont ainsi construites à l'aide de ces résultats.

Sur le territoire du bassin de l'Argance, les niveaux de nappes devraient se situer entre la médiane des niveaux piézométriques de référence (1960 à nos jours) pour le scénario RCP2.6 et le niveau piézométrique de période de retour de 2,5 ans sec. Concernant les débits, ces derniers tendent à stagner (RCP2.6) mais sont généralement en dessous d'un débit de fréquence de retour 2,5 ans sec. Ce résultat reste contradictoire avec les autres études qui mentionnent systématiquement une diminution, il est important de rappeler que le projet AQUI-FR est principalement dédiée aux niveaux piézométriques.

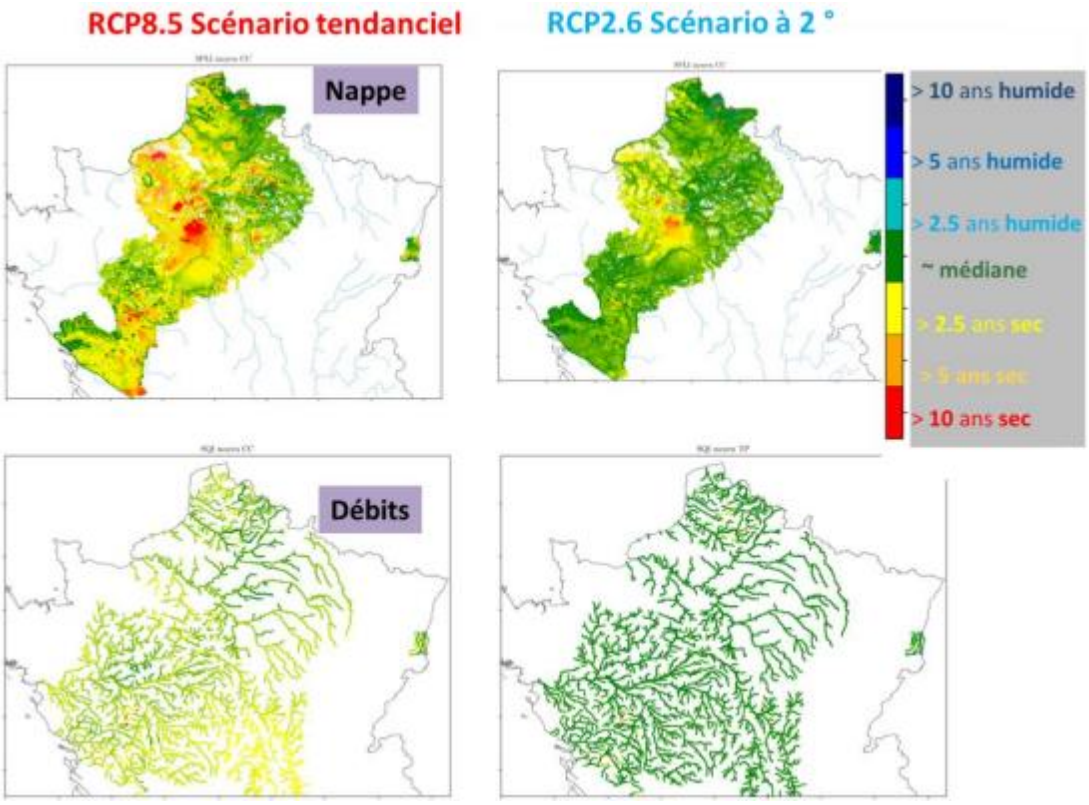


Figure 11 : Cartes de la moyenne multi-modèle sur la période2070-2099 des indices standardisés piézométriques (haut) et des débits (bas) pour le scénario RCP8.5 (gauche) et RCP2.6 (droite) (Source : projet AQUI-FR)

4.8 Ressources à venir

Plusieurs projets et études en cours pourront apporter des précisions ou des mises à jour des résultats présentés ci-dessus. Ces initiatives traduisent également l'intérêt croissant porté à la connaissance détaillée des effets du changement climatique sur les hydrosystèmes.

4.8.1 Explore 2

Dans la continuité d'Explore 2070, a été lancé en juillet 2021 le projet Explore 2 (fin prévue en 2024) pour actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie, d'après les dernières publications du GIEC (AR5 ou AR6, voir paragraphe suivant). Ce projet comportera également un volet d'accompagnement des acteurs dans les adaptations au changement climatique.

4.8.2 Projet Life Eau&Climat et portail DRIAS-Eau

Le projet Life Eau&Climat, porté par l'Office Internationale de l'eau et cofinancé par l'Union Européenne est complémentaire au projet Explore 2. Il a pour objectif d'aider les acteurs de la gestion locale des bassins partenaires à évaluer les effets du changement climatique, à les prendre en compte dans la planification et à mettre en œuvre des mesures d'adaptation. La fin de ce projet est prévue pour 2024.

Dans le cadre de ce projet, Météo France développe une extension « Eau » au portail DRIAS, dont les premières simulations hydro-climatiques sont déjà disponibles[5]. Les données disponibles, à l'échelle de la France sur une grille régulière (résolution 8km) et aux points de stations hydrométriques, utilisent le modèle hydrologique SIM2 pour un total de 42 simulations – sur la période historique et sur les scénarios RCP8.5, RCP4.5 et RCP2.6. Enfin les simulations sont réalisées à partir de 12 modèles de climat régionaux.

4.9 Synthèse

La diversité des méthodologies et modèles employés dans le cadre des différentes études et projets analysés implique une variabilité dans les résultats obtenus concernant les projections aux horizons futurs des paramètres climatiques et hydrologiques. On constate toutefois que pour les scénarios climatiques s'apparentant au scénario RCP 4.5 et que les résultats convergent vers des **tendances d'évolution similaire à l'horizon 2050.**

- **Augmentation des températures de l'air**
  - +2,2°C en en moyenne annuelle avec les mois de juillet et août plus marqués (+3,1°C) entre 1961-1990 et 2045-2065 selon Explore 2070
  - +2°C à l'année, +2.5°C en août entre 1971-2000 et l'horizon 2050 selon l'étude ICC Hydroqual

[5] http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/320

- **Augmentation de l'évapotranspiration totale annuelle mais vraiment notable en période estivale et automnale**
    - +24% d'ETP à l'année avec une augmentation particulièrement marquée en automne (+51%) entre 1961-1990 et 2045-2065 selon Explore 2070
- **Augmentation de la variabilité pluviométrique avec une diminution des précipitations estivales, une légère augmentation hivernale et une faible diminution généralisée à l'année**
    - Diminution importante en période estivale (-20%) entre 1961-1990 et 2045-2065 selon Explore 2070 ;
    - Diminution de l'ordre de -25% de mai à octobre entre 1971-2000 et 2050 selon l'étude ICC Hydroqual ;
- **Diminution généralisée des débits avec une intensification des étiages : plus fréquents, plus sévères et plus longs (prolongation sur la période automnale)**
    - Diminution de l'ordre de -30% des débits moyens à l'année, -60% du QMNA5 selon le modèle GR4J et diminution de l'ordre de 15% des débits moyens à l'année et -5% du QMNA5 selon le modèle ISBA-MODCOU analysé au cours des travaux Explore 2070
    - Diminution jusqu'à -20% des débits moyens printaniers, et jusqu'à -35% pour les débits moyens estivaux et automnaux, diminution de l'ordre de -30% pour les QMNA5 selon la thèse Gildas Dayon
- **Diminution des niveaux et de la recharge des nappes**
    - De -30 à -40% entre 1961-1990 et 2045-2065 selon Explore 2070
- **Augmentation de la température de l'eau**
    - En moyenne, +1,6°C à l'échelle de la France selon l'étude Explore 2070
    - Plus localement jusqu'à +2°C sur le bassin de l'Argance selon l'étude de l'université de Tours, et ce pour l'ensemble des cours d'eau du territoire.

Ces observations sont valables pour le bassin du Loir et plus largement à l'échelle du bassin versant de la Loire. Toutefois, des modélisations spécifiques au bassin de l'Argance permettront d'obtenir des analyses chiffrées de l'évolution des ressources en eau de ce territoire, à cet horizon.

5 ANALYSE DE L'EVOLUTION DES PARAMETRES CLIMATIQUES A L'HORIZON 2050

5.1 Données climatiques considérées

5.1.1 Sélection des données climatiques

L'estimation du climat futur, par l'intermédiaire de simulations numériques, repose sur la définition de **scénarios d'évolution de l'activité anthropique impactant le climat** et de **modèles atmosphériques** permettant, à partir des scénarios précédents, de simuler l'évolution future de paramètres climatiques tels que les précipitations, la température et l'évapotranspiration.

De nombreux laboratoires à travers le monde ont réalisé de telles modélisations, en respectant un cadre de travail établi par le **GIEC**, ce qui a permis d'harmoniser les travaux réalisés et de faciliter l'utilisation conjointe de leurs différents résultats.

Il existe donc **de multiples modèles climatiques** (voir Annexe 3 ***p.52***) décrivant chacun d'une manière différente l'évolution future du climat. Chacun de ces modèles a été exécuté sur un ou plus généralement, sur plusieurs des 4 **scénarios climatiques RCP** (voir Annexe 1, ***p.48***).

La présente étude utilise **un seul modèle exécuté sur deux scénarios climatiques**, il convient de choisir ces derniers :

- Concernant le **modèle climatique à considérer**, il est choisi de considérer le **modèle du CNRM**, dont les versions antérieures ont déjà été utilisées dans plusieurs études quantitatives menées sur le territoire national. On se servira, plus précisément, de sa version régionalisée dénommée **ALADIN63_CNRM-CM5. Les raisons de ce choix sont les suivantes :**
  - **Ce modèle a été produit par un Laboratoire Français affilié à Météo France ;**
  - **Les résultats en étant issus sont proches de la médiane de l'ensemble des résultats de modélisations climatiques inclues au portail DRIAS (annexe 4, §7.3.5)** ;
- Pour ce qui est des **scénarios climatiques**, on retiendra le scénario **RCP 4.5**, le scénario « **médian** » et le **RCP 8.5** le scénario « **sans politique climatique adéquate et d'adaptation** ».

5.1.2 Acquisition des données climatiques

En France, les climatologues ont développé le **portail internet « DRIAS, les futurs du climat ».** Ce portail a pour vocation de mettre à disposition des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM). Il permet aux utilisateurs de visualiser des projections et scénarios climatiques régionalisés sur la France à partir de modélisations issues de laboratoires du monde entier, **et de commander des données ciblées (dont notamment l'évolution des précipitations, des températures et de l'ETP).**

Une analyse intégrée des données de projection disponibles sur DRIAS a été réalisée par Météo France[6].

Les données climatiques issues de la modélisation des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 réalisée par Météo France (ALADIN63_CNRM-CM5) ont donc pu être récupérées sur l'ensemble du territoire étudié. Dans les paragraphes suivants, les analyses sont basées sur les données suivantes :

- Sur la période 2000-2005 : Données de référence issues du modèle climatique
- Sur la période 2006-2060 : Données de projection issues du modèle climatique exécuté selon les scénarios climatiques.

Le point 12342 de la grille disponible sur DRIAS, correspondant à la maille SAFRAN 2358, est utilisé pour les analyses présentées. Le choix s'est porté sur cette maille pour sa représentativité du territoire, en effet sont son centre est au sein du territoire d'étude et celle-ci en recouvre la majeure partie.

5.1.3 Précautions d'utilisation et d'interprétation

Les données obtenues grâce au portail DRIAS doivent être manipulées et interprétées en ayant conscience de certaines limites. Des préconisations sont mises en avant sur le portail DRIAS concernant le traitement ainsi que l'interprétation des données futures.

5.1.3.1 Correction des données brutes par rapport aux observations

Privilégier les jeux de données corrigées (par rapport aux observations) aux données brutes (source : DRIAS)

Les simulations issues des modèles climatiques comportent des biais plus ou moins importants selon les paramètres et les régions du monde. Il est recommandé de les corriger avant de les utiliser. Le portail DRIAS propose principalement des simulations climatiques corrigées sur la France. Ces jeux de données corrigées sont à privilégier systématiquement par rapport aux données brutes.

Les données ayant été téléchargées sur le portail DRIAS pour l'étude HMUC de l'Argance sont uniquement des données corrigées.

Les données de la période de référence ne sont pas des observations (source : DRIAS)

- Il est important de garder à l'esprit que les **données de référence** sont des **simulations numériques et non des observations**. Elles conservent toutefois la vocation de représenter correctement le climat passé dans sa globalité. Il convient simplement de ne pas les analyser « jour par jour », et de préférer une analyse différentielle passé-futur, qui constitue une utilisation beaucoup plus pertinente de ces données.

5.1.3.2 Incertitudes sur les données futures

La reconstitution, par simulation, des données climatiques futures ne peut se faire sans introduire des incertitudes. On définit une incertitude comme un degré de connaissance incomplète pouvant découler d'un

[6] Source : http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/296

manque d'information ou d'un désaccord sur ce qui est connu, voire connaissable. L'incertitude peut avoir des origines diverses et résulter ainsi d'une imprécision dans les données ou encore de projections incertaines du comportement humain. L'incertitude peut donc être représentée par des mesures quantitatives ou par des énoncés qualitatifs (reflétant par exemple l'opinion d'une équipe d'experts).

Lorsqu'on cherche à modéliser le climat futur, on est confronté à trois grands types d'incertitudes (graphiquement représentés à la ***Figure 18***) :

- L'incertitude sur la variabilité interne (naturelle) du climat, surtout impactante à court-terme (10 premières années), liée à l'occurrence irrégulière et imprévisible de phénomènes climatiques (tels qu'El Niño ou évènements extrêmes caniculaires par exemple) ;
- L'incertitude scientifique et technique (ou structurelle de modélisation), surtout impactante pour les simulations de 20 à 50 ans dans le futur. Elle est liée aux simplifications et hypothèses intrinsèques aux modèles et aux mesures réalisées. Elle peut être évaluée en comparant les différents modèles climatiques ;
- L'incertitude socio-économique (ou liée au scénario utilisé), surtout impactante pour les simulations dès 40 ans dans le futur. En effet, chaque scénario formulé prévoit différentes évolutions des comportements humains et par conséquent différents changements climatiques, dont il ne peut pas être établi que l'un est plus probable que les autres.

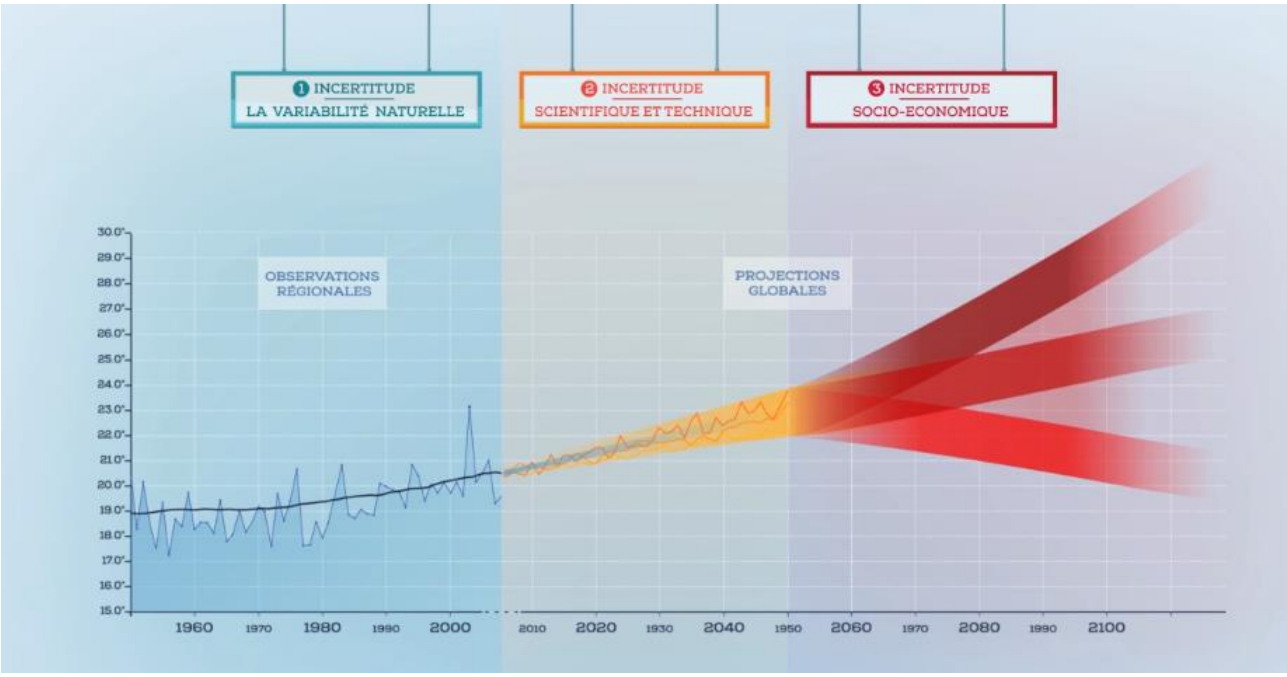


Figure 12 : Illustration des principales sources d'incertitudes des projections climatiques selon l'horizon considéré (Source : DRIAS)

La problématique des incertitudes autour des projections climatiques est encore plus prégnante à une échelle régionalisée ou à l'échelle d'un bassin, compte tenu des limites de précision pouvant être apportées aux résolutions plus élevées.

5.1.3.2.1 Interprétation des données aux horizons proches

Dans les projections climatiques à court terme (prochaines décennies), c'est l'incertitude sur la variabilité interne du climat qui est prépondérante. Par la suite, les incertitudes de modélisation et de scénario climatique prennent le dessus. **Attention à l'interprétation des résultats pour les horizons proches (période 2021-2030) (source : DRIAS)** ; En effet, pour cette période, on ne peut distinguer la variabilité climatique naturelle d'un signal qui serait dû au changement climatique.

5.1.3.2.2 Préconisations pour limiter les incertitudes associées à la modélisation des climats futurs

Utiliser systématiquement plusieurs scénarios et des produits de distribution ou plusieurs modèles (source : DRIAS) ; Il existe principalement deux sources d'incertitudes : l'incertitude « modèle » liée à la représentation des processus physiques et l'incertitude associée aux scénarios d'émission des gaz à effet de serre. La première incertitude peut être analysée en utilisant des produits de distribution issus d'un ensemble de modèles (par exemple les modèles DRIAS-2020). La deuxième peut être approchée en proposant des simulations obtenues pour plusieurs scénarios d'émission (RCP). On proposera donc systématiquement plusieurs scénarios et des produits de distribution ou plusieurs modèles, de manière à intégrer au moins une source principale d'incertitude. La concentration en gaz carbonique varie en fonction des scénarios de manière sensible à partir de 2040. Pour les études au-delà de cette période, il est donc conseillé d'utiliser plusieurs scénarios pour prendre en compte les incertitudes sur l'évolution de la concentration en gaz carbonique. Les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 constituent un ensemble qui permet de donner une idée de la dispersion des résultats et de représenter la variabilité de manière suffisante. Des calculs statistiques comme des fourchettes de durée de retour peuvent être mis en place. **Ainsi, la présente étude ne tenant compte que d'un seul modèle, une grande prudence devra être observée lors de l'interprétation des résultats obtenus.**

5.1.3.2.3 Manipulation des données aux horizons futurs

Ne pas comparer les données des simulations climatiques à une date particulière (source : DRIAS) ;

Il est important de comprendre que les situations météorologiques simulées sont virtuelles et n'ont pas pour objectif, pour une date de validité donnée, de reproduire la situation correspondante réellement observée (ou qui sera observée). Les données de référence, datées, ne doivent pas être comparées aux valeurs observées à la même date. Mais l'ensemble d'une simulation de référence a les caractéristiques du climat de la période de simulation (1950-2000 par exemple). On proposera donc de préférence des valeurs moyennes sur plusieurs années (classiquement 30 ans) ou des fréquences de phénomènes. Les analyses devront s'attacher à faire ressortir les évolutions entre deux périodes, plutôt que de caractériser les valeurs absolues observées sur une période donnée. Compte-tenu de la période d'étude et des horizons fixés pour l'étude HMUC du bassin de l'Argance, les variables hydrologiques simulées à l'aide des données météorologiques DRIAS seront calculées à partir des périodes suivantes :

- Période 2000-2021 pour la situation de référence (conformément à celle employée dans le cadre du livrable hydrologie) ;
- Moyenne sur la période 2040-2059 pour l'horizon 2050[7].

[7] L'horizon 2030 n'est pas analysé ici, du fait de la prépondérance de la variabilité climatique à cette échéance, qui ne permet pas de déceler un signal propre au changement climatique.

5.2 Perspectives d'évolution du climat

Les paragraphes suivants présentent l'évolution de **trois paramètres climatiques** déterminants pour la ressource en eau sur **deux horizons temporels** successifs, selon le **projet ALADIN63_CNRM-CM5, scénario RCP 4.5, RCP 8.5** : les précipitations, les températures, l'ETP. Les analyses sont réalisées sur l'ensemble des points contenu dans le périmètre d'étude.

Ici seront exploités les résultats moyennés pour les périodes 2000-2021 et 2039-2060 et les changements entre celles-ci.

5.2.1 Evolution des précipitations

Les figures suivantes présentent, **l'évolution des précipitations entre 2000 et 2060** en comparant la période 2000-2021 avec les données DRIAS de référence et l'horizon futur (2039-2060) d'après les projections DRIAS-2020 pour les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Plus précisément, on s'intéresse aux indicateurs suivants :

- Evolution des cumuls annuels ;
- Evolution du nombre de jours de pluie par an, pour appréhender la durée et l'intensité des pluies qui ont des implications directes sur l'hydrologie des cours d'eau ;
- Evolution des cumuls mensuels ;
- Evolution du nombre de jour de pluie mensuel.

A l'horizon futur considéré, on observe une faible baisse des précipitations annuelles moyennes et du nombre de jours de pluie moyen annuel (de l'ordre de -3%) pour le scénario RCP 4.5. En ce qui concerne le scénario RCP 8.5, on remarque une hausse des précipitations d'environ 4%, tandis que le nombre de jour de pluie a tendance à stagner. Les variations infrannuelles de ces évolutions, pour l'ensemble du périmètre d'étude, sont présentées dans les Figure 13 et Figure 14.

Malgré des changements peu marqués en moyenne interannuelle pour le scénario RCP 4.5, on constate tout de même une modification de la répartition annuelle des pluies. En effet, les pluies diminuent fortement au printemps et en fin de période estivale. Hormis les mois de novembre et janvier, les pluies se font également plus rares tout au long de l'année.

Pour le scénario RCP 8.5, les tendances s'inversent à l'année lorsque les cumuls sont comparés. A l'échelle du mois, on remarque que pour ce scénario, les pluies augmenteront en fin de période estivale à l'exception du mois de septembre.

Ces constats étant faits, il est important de garder en mémoire que les résultats présentés ne sont issus que d'un modèle climatique, ce qui ne rend pas compte de la grande incertitude qui existe en matière de projection des précipitations. Pour rappel, les fiches Explore 2070 analysées montraient que les différents modèles climatiques, pour un scénario donné, donnaient des résultats relativement variables.

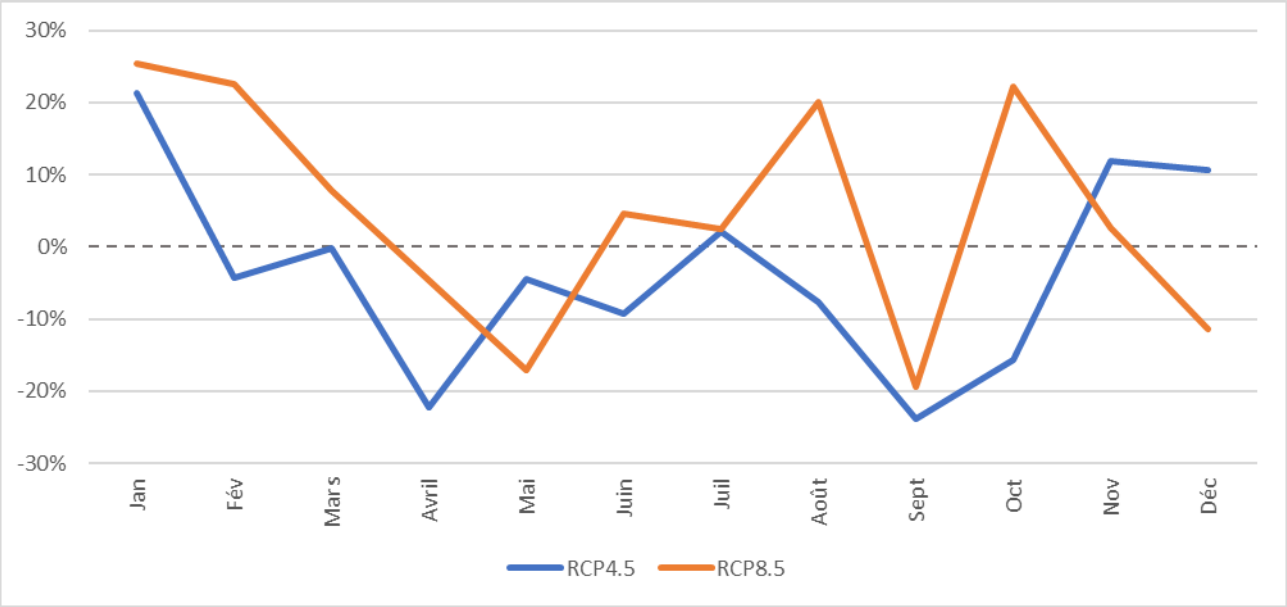


Figure 13 : Evolution (%) des cumuls mensuels moyens, à travers le bassin versant, entre la période de référence (2000-2021) et l'horizon 2050 (2039-2060), selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

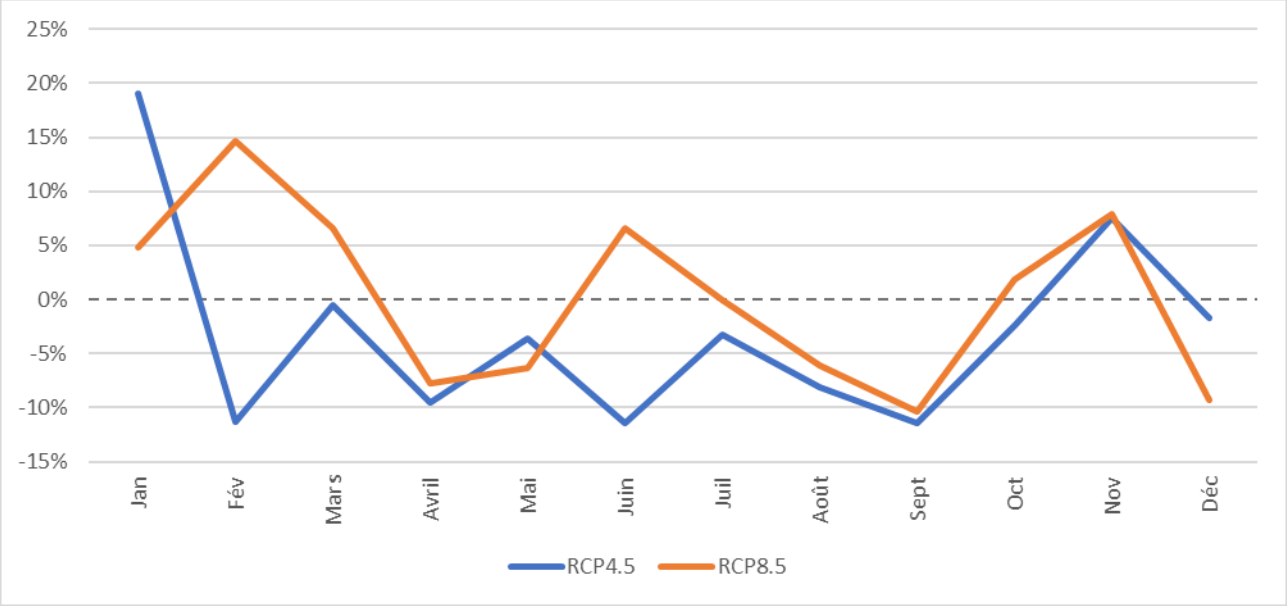


Figure 14 : Evolution (%) du nombre de jours de pluie mensuels moyens, à travers le bassin versant, entre la période de référence (2000-2021) et l'horizon 2050 (2039-2060), selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

5.2.2 Evolution de l'ETP

La figure suivante présente l'évolution de l'ETP entre 2000 et 2060 à partir des projections DRIAS 2020. On remarque sur les projections pour le scénario RCP 4.5 et pour chaque sous-unité de gestion, une augmentation annuelle moyenne de 7% de l'ETP. Pour le second scénario, l'augmentation atteint 6% pour la totalité du territoire considéré. Tenant compte de la raréfaction des épisodes pluvieux en fin d'été / début d'automne (septembre notamment), les conditions hydriques seront détériorées sur ces périodes qui pourra impliquer un allongement des périodes d'étiages dans le futur pour les deux scénarios.

Le fait d'obtenir une augmentation d'ETP plus importante pour le scénario RCP 4.5 que pour le scénario RCP 8.5 peut paraître surprenant, voire contre-intuitif. Cela peut à nouveau être rapproché de l'utilisation d'un seul modèle climatique et de la prépondérance de la variabilité climatique pour les projections réalisées sur des horizons proches. Il ne doit donc en aucun cas être considéré que la concrétisation du scénario RCP 8.5 mènerait à une augmentation plus faible de l'ETP que celle du scénario RCP 4.5. Ce qu'il faut retenir, c'est que pour ces deux scénarios, on doit s'attendre à une augmentation plutôt significative de l'ETP.

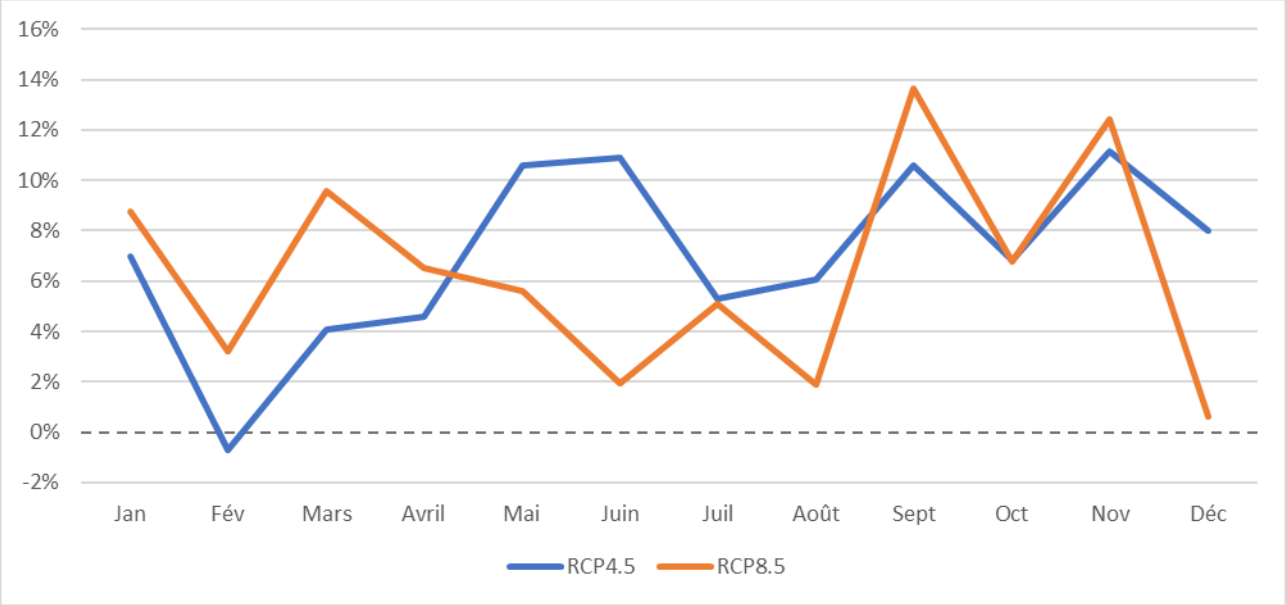


Figure 15 : Evolution de l'ETP mensuelle moyenne entre la période de référence (2000-2021) et l'horizon 2050 (2039-2060), selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

5.2.3 Evolution des sécheresses agricoles

Afin d'appréhender l'évolution des sécheresses agricoles aux horizons 2030 et 2050, on utilise les données DRIAS de projection de l'indice sécheresse en termes d'humidité du sol (Standardized Soil Wetness Index, SSWI)[8].

Le SSWI est normalisé selon une échelle allant d'extrêmement sec (SSWI < -2) à extrêmement humide (SSWI > 2) où un SSWI de 0 indique une quantité de précipitations médiane (situation « normale » de la période de référence).

[8] http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/183 et voir annexe 3

Pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5, on observe sur le bassin que, en comparaison à la période de référence, **les périodes de sécheresse agricole vont s'intensifier en moyenne annuelle aux horizons 2035 et 2055, à noter que les périodes ne sont pas exactement concomitantes avec celles présentées plus haut.** On passe d'une situation de référence en 1970 à une situation très sèche en 2035 et extrêmement sèche en 2055**. A l'échelle de la France, on observe que le territoire d'étude fait partie des bassins les plus touchés par les sécheresses agricoles à l'horizon 2035**. A l'horizon 2050, la quasi-totalité du territoire métropolitain devrait être touchée par des épisodes de sécheresse agricole intenses.

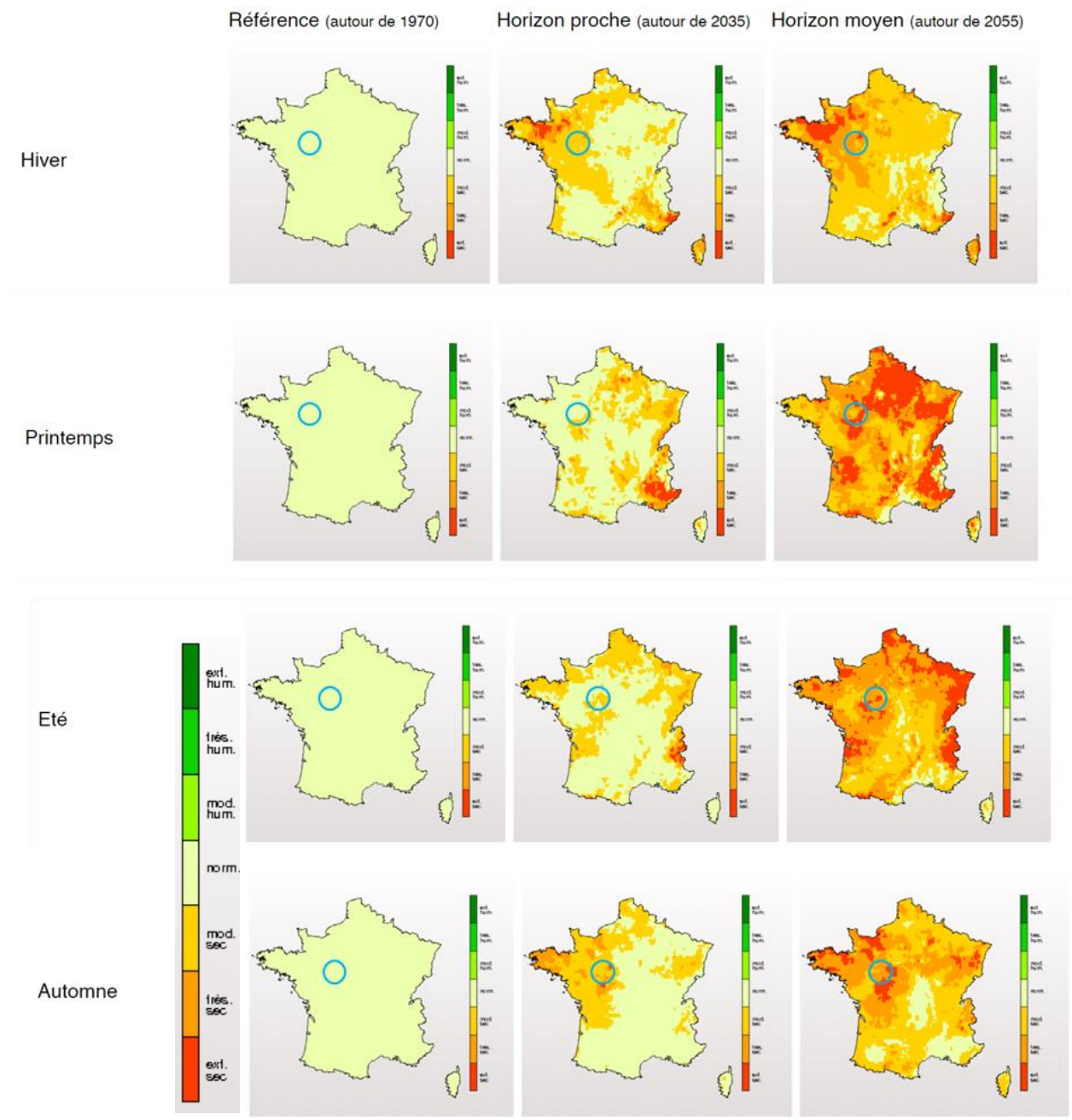


Figure 16 : Indice de sécheresse agricole (SSWI) moyen annuel et saisonnier pour la période de référence et aux horizons futurs (2035 et 2055) pour le scénario RCP 4.5 (Source : DRIAS)

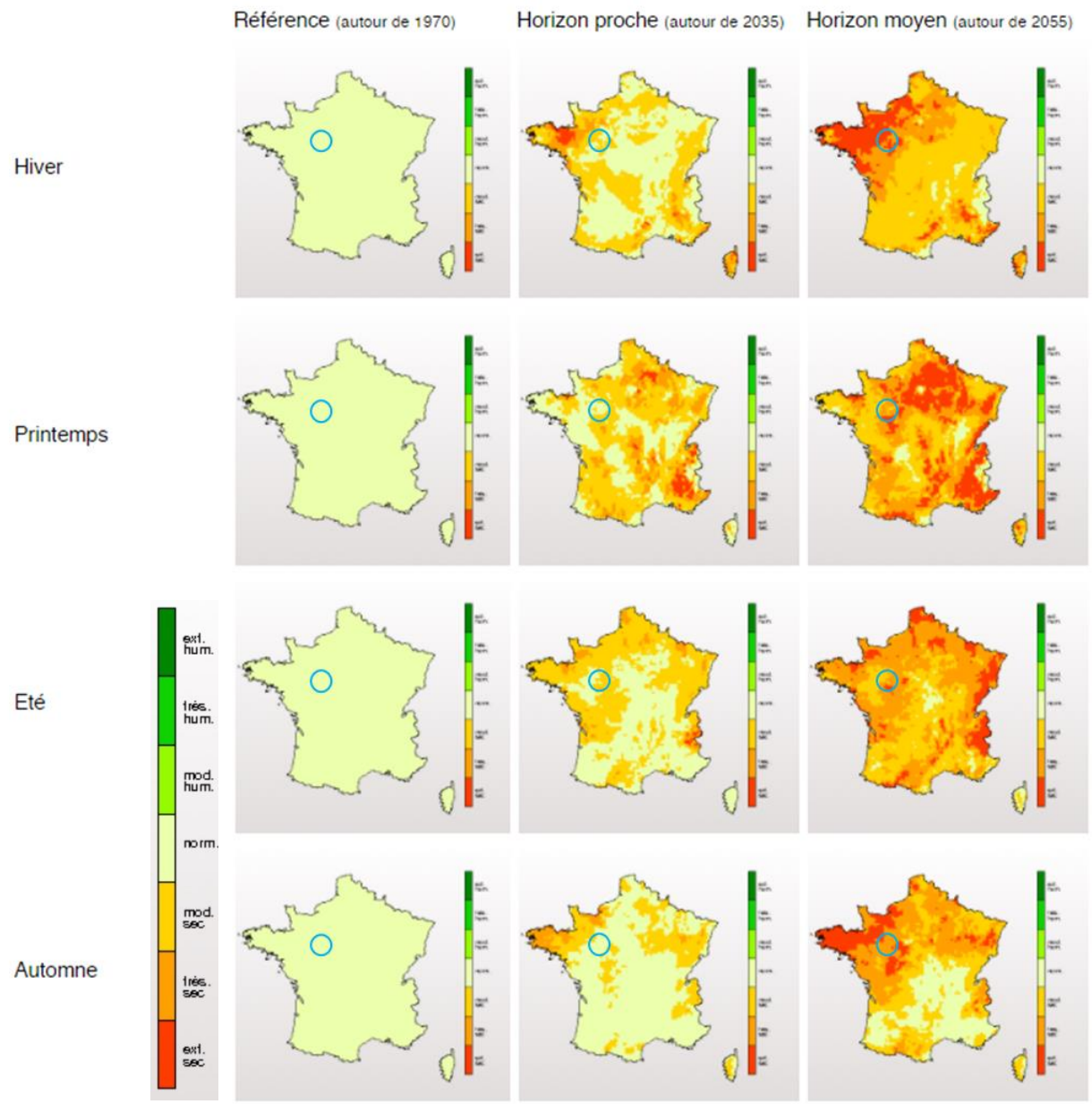


Figure 17 : Indice de sécheresse agricole (SSWI) moyen annuel et saisonnier pour la période de référence et aux horizons futurs (2035 et 2055) pour le scénario RCP 8.5 (Source : DRIAS)

5.3 Synthèse sur l'évolution du climat

Le tableau suivant synthétise les analyses des paragraphes précédents à l'horizon 2050. Les évolutions du climat aux horizons futurs impactent directement la ressource en eau, par l'augmentation de l'évapotranspiration mais également par la modification du cycle hydrologique et du cycle de recharge des nappes souterraines.

Tableau 2 : Synthèse sur l'évolution du climat

		Horizon 2050 – RCP4.5	Horizon 2050 – RCP8.5
ETP	**Cumul annuel**	+7% par rapport à la moyenne 2000-2021	+6% par rapport à la moyenne 2000-2021
	Cumul mensuel	Augmentation globale et généralisée	Augmentation globale ; mois de septembre marqué (+14%)
Pluviométrie	**Cumul annuel**	Tendance faiblement marquée à la baisse (-3%)	Tendance faiblement marquée à la hausse (+4%)
	Nombre de jours de pluie	Tendance légèrement à la baisse (-3%)	Tendance peu marquée et non significative – maintien du nombre de jours
	Saisonnalité des précipitations	Intensification en hiver (10 à 20%) – pluies plus rares toutes l'année excepté en janvier et novembre	Intensification en hiver et début d'été – pluies plus rares et moins intense aux mois de mai et septembre (-20%)
Sécheresses	**Tendance d'évolution**	Augmentation de l'intensité très marquée sur toute l'année	Augmentation de l'intensité très marquée sur toute l'année

Ces résultats sont à mettre en perspective avec les résultats obtenus avec l'analyse bibliographique (p.34). L'ETP analysée avec les données DRIAS-2020, évolue dans une moindre mesure comparée aux résultats de l'analyse bibliographique et ce pour les deux scénarios d'émissions.

Les résultats, pour le scénario RCP 4.5, de l'évolution des cumuls pluviométriques rejoignent les résultats de l'analyse bibliographique avec une légère diminution non significative généralisée à l'année mais avec une diminution en période estivale plus marquée. Pour le scénario RCP 8.5, la hausse des cumuls pluviométriques contredit l'évolution annoncée dans les résultats de l'analyse bibliographique.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Le rapport actuel offre une première approche essentielle pour évaluer les conséquences du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau. En examinant les études existantes, il a permis de cerner les grandes tendances et les facteurs influents. Cependant, l'omission des usages spécifiques de l'eau et la résolution spatiale limitée soulignent la nécessité d'une analyse plus approfondie. La prochaine phase de l'étude se concentrera sur la valorisation du modèle hydrologique élaboré dans le cadre du volet "Hydrologie" et des données climatiques prospectives discutées précédemment. Cette approche plus détaillée vise à combler les lacunes identifiées en mettant en corrélation les projections climatiques avec des scénarios prospectifs d'usages de l'eau. L'objectif est de fournir une image plus précise et complète de l'évolution future de la disponibilité en eau, en particulier pendant les périodes d'étiage.

7 ANNEXES

7.1 Annexe 1 : Scénarios climatiques du GIEC

7.1.1 Scénarios SRES (AR4)

Jusqu'à récemment, les études réalisées sur l'évolution du climat s'appuyaient largement sur **l'état de connaissance réalisé en 2007** (désigné par l'acronyme **AR4** pour « **fourth assessment report** »).

Lors de cet état de connaissance, la stratégie suivie était séquentielle. Le point de départ était une synthèse des travaux de modélisation économique qui conduisit à définir un **ensemble de scénarios d'évolution possible de nos sociétés et modes de vie**, prenant en compte des choix en matière d'énergie et de rapports à la mondialisation : développements démographiques et économiques futurs, régionalisation, production et utilisation d'énergie, technologie, agriculture, gestion forestière et occupation du sol. Ces scénarios, appelés **SRES** (du nom du rapport spécial publié en 2000 pour les présenter, **Special Report on Emissions Scenarios**) proposaient plusieurs évolutions (cf. Figure 18) :

- **Scenario A1** : Réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement économique sur le schéma actuel. La famille de scénarios A1 se scinde **en trois groupes** qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique. Les trois groupes A1 se distinguent par leur accent technologique :
  - Forte intensité de combustibles fossiles (**A1FI**),
  - Sources d'énergie autres que fossiles (**A1T**),
  - Equilibre entre les sources (**A1B**)
- **Scénario B1** : Réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable.
- **Scénario A2** : Développement hétérogène avec un développement économique sur le schéma actuel.
- **Scénario B2** : Développement hétérogène avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable.

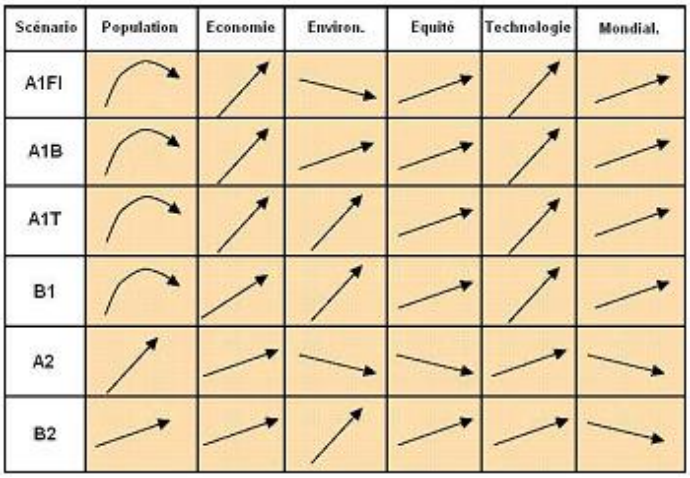


Figure 18 : Scénarios SRES - Principales hypothèses prises pour les différents scénarios (Source : Portail DRIAS)

Ces scénarios se traduisaient ensuite en termes **d'émission de gaz à effet de serre**. Ces évolutions d'émissions de GES étaient alors utilisées par les climatologues comme données d'entrée des modèles de projections climatiques. Enfin, les projections climatiques alimentent les modèles d'impact (sur l'hydrosystème, les écosystèmes, la socio-économie…).

7.1.2 Scénarios RCP (AR5)

Depuis l'AR4, les déterminants socio-économiques tels que l'économie, les technologies, les politiques publiques, et la connaissance du système climatique ont évolué.

Le GIEC a décidé de définir des **nouveaux scénarios** pour mieux prendre en compte ce nouveau contexte et permettre aux économistes et aux climatologues de ne plus travailler de manière séquentielle mais parallèle. Il s'agit de **quatre scénarii de trajectoire de forçage radiatif** dits « **RCP** » (Representative Concentration Pathways).

En comparaison avec les SRES, Les scénarios RCP présentent les caractéristiques principales suivantes :

- Ils ne sont pas nécessairement plus capables de représenter les développements futurs que les scénarios SRES (en raison des très fortes incertitudes liées à ces derniers), mais permettent une meilleure prise en compte des informations disponibles à ce jour ;
- Contrairement aux scénarios SRES, ils ne sont pas basés sur des pronostics socio-économiques. Les RCP peuvent ainsi représenter toute une gamme de politiques climatiques pour le XXIe siècle ;
- Ils intègrent une meilleure prise en compte des gaz à effet de serre de courte durée de vie et des changements de l'occupation du territoire, des évolutions démographiques, du développement des pays émergeants et des politiques climatiques envisageables ;
- Ils n'ont pas été définis par le GIEC lui-même, mais lui ont été soumis par la communauté scientifique internationale Enfin, contrairement aux scénarios SRES, ces nouveaux scénarios ne sont pas définis par le GIEC lui-même, mais ont été établis par la communauté scientifique pour répondre aux besoins du GIEC.
- Ces scenarii sont détaillés ci-dessous :
- RCP2.6 : correspond à un scénario avec une politique climatique visant à faire baisser les concentrations en CO2 afin de limiter le réchauffement planétaire à 2°C en 2100. Il exige que l'on investisse dans l'atténuation sans tarder et que l'on adopte des techniques à émissions négatives plus tard au cours du présent siècle (pic puis déclin) ;
- RCP4.5 : correspond à un scénario avec une politique climatique visant à stabiliser les concentrations en CO2 avant 2100 (stabilisation sans dépassement) ;
- RCP6.0 : correspond à un scénario avec une politique climatique visant à stabiliser les concentrations en CO2 après 2100 (stabilisation sans dépassement) ;
- RCP8.5 : Scénario sans politique climatique (concentration en CO2 croissante).

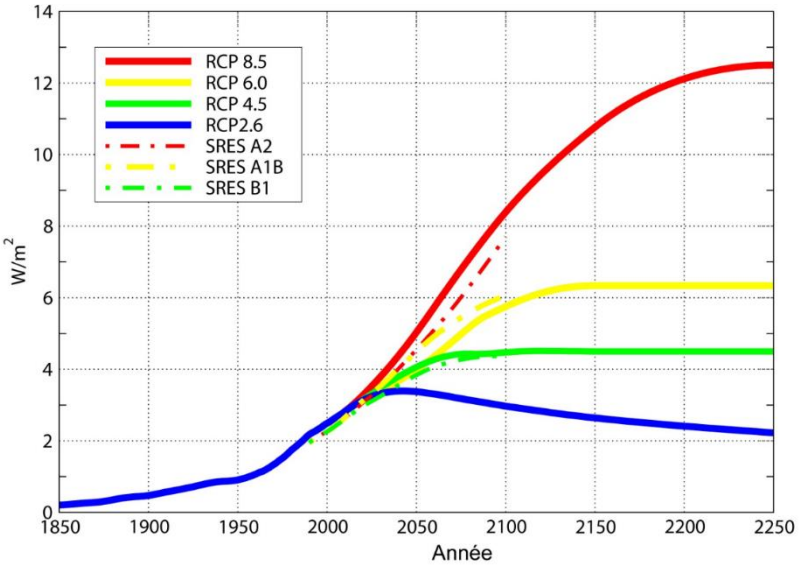


Figure 19 : Comparaison des évolutions du forçage radiatif associé aux différents scénarios climatiques

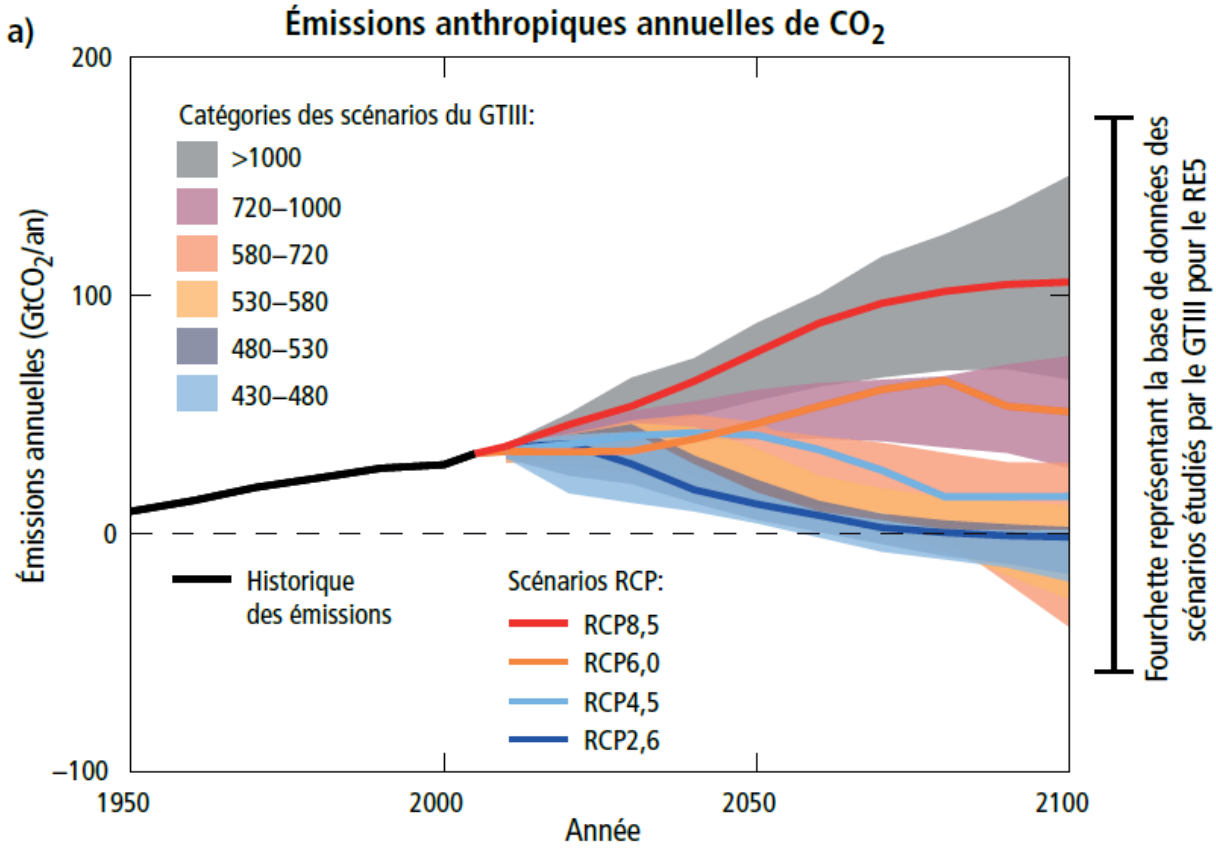


Figure 20 : Émissions de dioxyde de carbone (CO2) selon les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) (Source : Rapport de synthèse de l'AR5 du GIEC)

7.1.3 Scénarios SSP (AR6)

Source : 6ème édition du rapport du GIEC / Résumé à l'attention des décideurs

Un ensemble de cinq nouveaux scénarios d'émissions illustratifs est pris en compte de manière cohérente dans ce rapport pour explorer la réponse climatique à un éventail plus large d'avenirs en matière de gaz à effet de serre (GES), d'utilisation des terres et de polluants atmosphériques que celui évalué dans l'AR5. Cet ensemble de scénarios conditionne les projections climatiques issues des modèles. Ces projections tiennent compte de l'activité solaire et du forçage de fond des volcans. Les résultats du 21e siècle sont fournis pour le court terme (2021-2040), le moyen terme (2041-2060) et le long terme (2081-2100) par rapport à 1850-1900, sauf indication contraire.

Les scénarios commencent en 2015 et incluent des scénarios avec des émissions de GES élevées et très élevées (SSP3-7.0 et SSP5-8.5) et des émissions de CO2 qui doublent à peu près par rapport aux niveaux actuels d'ici 2100 et 2050, respectivement, des scénarios avec des émissions de GES intermédiaires (SSP2-4.5) et les émissions de CO2 restant autour des niveaux actuels jusqu'au milieu du siècle, et des scénarios avec des émissions de GES très faibles et faibles et des émissions de CO2 diminuant à zéro net vers ou après 2050, suivis de niveaux variables d'émissions nettes négatives de CO2 (SSP1-1.9 et SSP1 -2.6), comme illustré à la figure suivante. Les émissions varient entre les scénarios en fonction des hypothèses socio-économiques, des niveaux d'atténuation du changement climatique et, pour les aérosols et les précurseurs de l'ozone non méthaniques, des contrôles de la pollution atmosphérique. Des hypothèses alternatives peuvent entraîner des émissions et des réponses climatiques similaires, mais les hypothèses socio-économiques et la faisabilité ou la probabilité de scénarios individuels ne font pas partie de l'évaluation.

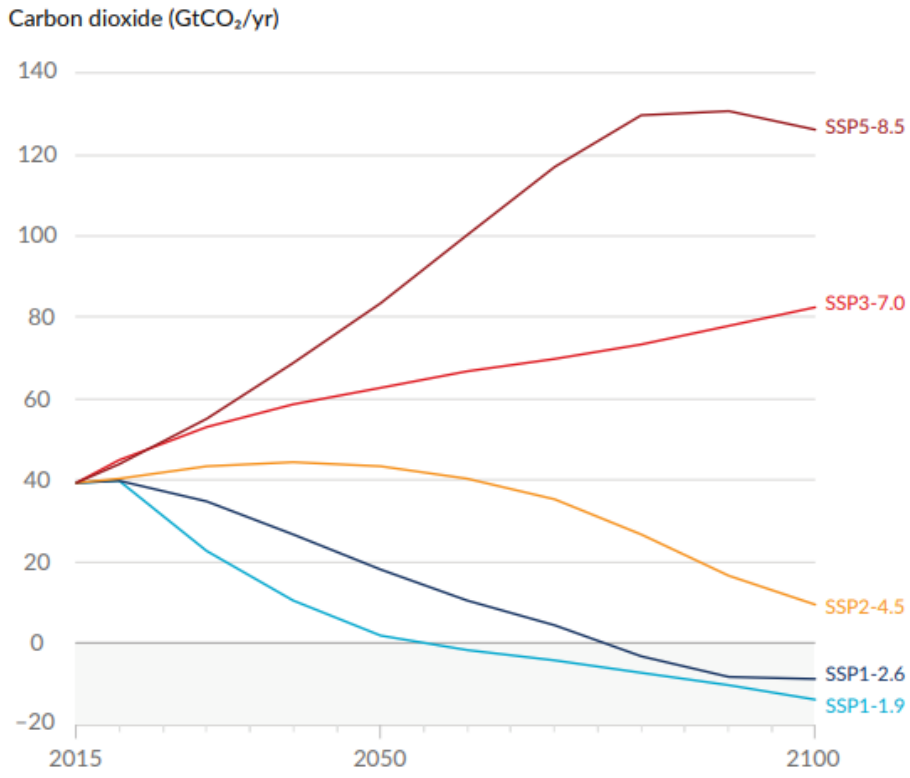


Figure 21 : Émissions de dioxyde de carbone (CO2) selon les trajectoires socioéconomiques partagées (SSP) (Source : Rapport de synthèse à l'attention des décideurs, AR6 du GIEC)

7.2 Annexe 2 : Explore 2070 – Fiches des stations

Les pages suivantes présentent les résultats de l'étude Explore 2070 aux stations suivantes :

- Le Loir à Durtal
- La Vègre à Asnières-sur-Vègre
- La Sarthe à Saint-Denis-d'Anjou [Beffes]

ORDRE DE GRANDEUR DES DÉBITS FUTURS POSSIBLES À L'HORIZON 2050-2070 SOUS SCÉNARIO A1B D'ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Avertissement : ces résultats comportent de très nombreuses incertitudes. Ils sont donnés à titre indicatif. Il ne s'agit pas de prévisions mais d'indications d'évolutions possibles. Une note d'accompagnement contient des indications de lecture et d'interprétation de la fiche. Elle détaille de plus la méthodologie utilisée ainsi que les limites de l'exercice.

Nom	Le Loir à Durtal
Identifiant Explore2070	868
Code Banque Hydro	M1531610
Surface du bassin versant	7918 km²
Période d'observation des débits	POD : 1962-1991
Période de simulation temps présent	PST : 1961-1990
Période de simulation temps futur	FUT : 2046-2065
Modèles hydrologiques utilisés	GR4J / ISBA-MODCOU

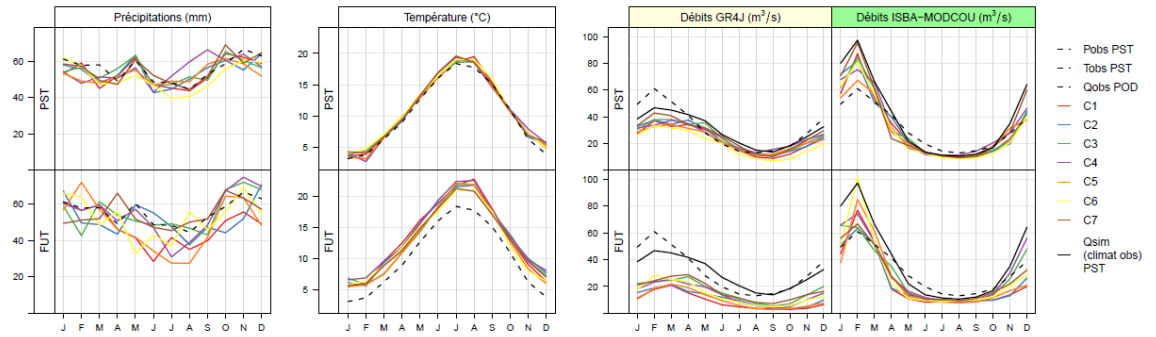
Les évolutions climatiques et hydrologiques sont calculées entre des simulations de référence en climat présent (1961-1990) et des simulations en climat futur (2046-2065) à partir de 7 modèles climatiques (C1 à C7). Les résultats sont présentés sous forme de Δ entre présent et futur : (FUT-PST) pour T, (FUT-PST)/PST pour P, ETP et Q. Δ minimum, Δ médian et Δ maximum sont calculés sur les 7 modèles climatiques. Selon les stations, un ou deux modèles hydrologiques ont été utilisés.

CLIMAT

		Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Précipitations obs PST (mm)		61	58	58	49	60	49	48	44	53	59	67	63	668
Δ	min (%)	−16	−25	+1	−17	−38	−39	−44	−44	−29	−27	−10	−17	−12
Δ	med (%)	+9	−4	+16	−4	−20	−8	−7	−20	−16	−0	+8	−7	−1
Δ	max (%)	+16	+46	+32	+39	+1	+29	+6	+37	+0	+11	+19	+22	+2
Température obs PST (°C)		3,2	3,8	6,3	9,0	12,7	16,1	18,4	17,8	15,1	11,0	6,3	3,9	10,3
Δ	min (°C)	+1,5	+1,5	+0,7	+1,1	+1,3	+1,1	+1,6	+2,0	+1,6	+1,3	+0,8	+0,8	+1,6
Δ	med (°C)	+2,2	+2,0	+2,3	+1,9	+1,8	+2,2	+2,9	+3,1	+2,7	+2,3	+1,8	+1,6	+2,2
Δ	max (°C)	+3,1	+4,3	+3,1	+2,9	+2,9	+2,7	+3,3	+3,9	+3,1	+3,1	+3,4	+2,5	+2,8
Évapotransp. potentielle obs PST (mm)		14	21	38	58	75	93	109	93	63	35	17	13	629
Δ	min (%)	−2	+3	+2	+7	+15	+7	+11	+9	+19	+30	+16	+9	+16
Δ	med (%)	+9	+11	+28	+16	+21	+12	+23	+25	+39	+51	+43	+24	+24
Δ	max (%)	+44	+55	+40	+36	+30	+22	+31	+43	+53	+64	+59	+62	+34

DÉBITS

		Jan		Fév		Mars		Avril		Mai		Juin		Juil		Août		Sep		Oct		Nov		Déc		Annuel	
moyens	Qobs POD (m³/s)	49,4		61		51,4		41,2		28		19,7		14,3		13		14,6		18		27,5		38,8		31,3	
moyens	Qsim (climat obs) POD (m³/s)	38,4	80	46,8	97,2	45	66,3	41,7	44,1	37	22	26,8	13,7	20,6	11,4	15,1	10,6	13,7	12	18,4	16,9	25	35	32,6	64,2	30,1	39,3
moyens	min (%)	−63	−30	−52	−30	−38	−23	−57	−53	−65	−48	−74	−39	−68	−23	−70	−23	−78	−34	−79	−35	−80	−47	−73	−53	−61	−26
moyens	Δ med (%)	−43	−21	−43	−12	−35	−6	−38	−18	−44	−35	−46	−21	−40	−7	−49	−10	−61	−12	−73	−30	−56	−23	−45	−41	−44	−15
moyens	max (%)	−27	+6	−15	+26	−20	+7	−16	+19	−30	−2	−31	−4	−29	−5	−30	+8	−30	+5	−31	−0	−31	+18	−24	+21	−29	−7
5 ans secs	Qobs POD (m³/s)	26,2		33,3		31,6		22,2		16,9		13,1		8,38		7,91		10,4		12,4		16,1		20,5		21,6	
5 ans secs	Qsim (climat obs) POD (m³/s)	19,4	29,1	24,7	38,6	25,6	32,2	21,2	15,4	18,6	12,4	14,8	10,5	10,2	8,51	7,41	8,23	6	8,3	6,33	9,42	9,84	12,8	14,1	19,3	17,8	24,8
5 ans secs	min (%)	−79	−36	−75	−43	−64	−30	−71	−29	−71	−28	−71	−17	−70	−16	−64	−19	−73	−27	−81	−25	−81	−30	−82	−37	−72	−33
5 ans secs	Δ med (%)	−47	−14	−50	−29	−36	−4	−42	−13	−48	−17	−45	−9	−46	−5	−52	−9	−61	−13	−67	−7	−71	−5	−64	−17	−52	−15
5 ans secs	max (%)	−38	+13	−11	+51	−15	+33	−17	+12	−24	+2	−24	−1	−32	−1	−34	−1	−35	−1	−26	+4	−34	+10	−30	+12	−26	+3



PERFORMANCE DES MODÈLES HYDROLOGIQUES sur la période POD

NSEQ		NSElnQ		NSEIQ		R-QA		R-VCN30-2		R-QMNA5		R-QJXA10	
0,72	0,46	0,58	0,42	-0,33	0,08	0,96	1,25	0,71	0,78	0,66	1,05	0,79	1,31

ÉTIAGES

		VCN10		VCN30		QMNA	
2 ans	Qobs POD (m³/s)	8,61		10,3		10,9	
2 ans	Qsim (climat obs) POD (m³/s)	6,24	7,42	7,34	8,07	8,06	8,58
2 ans	min (%)	−69	−4	−71	−10	−72	−14
2 ans	Δ med (%)	−64	−3	−66	−6	−65	−7
2 ans	max (%)	−33	−1	−32	−2	−32	−2
5 ans secs	Qobs POD (m³/s)	5,07		6,67		7,35	
5 ans secs	Qsim (climat obs) POD (m³/s)	3,88	7,21	4,44	7,5	4,83	7,74
5 ans secs	min (%)	−71	−4	−73	−5	−73	−6
5 ans secs	Δ med (%)	−63	−3	−65	−3	−62	−6
5 ans secs	max (%)	−35	−1	−35	−0	−36	−2
10 ans secs	Qobs POD (m³/s)	3,85		5,32		5,97	
10 ans secs	Qsim (climat obs) POD (m³/s)	3,03	7,11	3,41	7,22	3,7	7,34
10 ans secs	min (%)	−72	−4	−74	−4	−75	−6
10 ans secs	Δ med (%)	−63	−2	−64	−2	−60	−3
10 ans secs	max (%)	−36	−0	−36	+5	−38	+2

FORTES PRECIPITATIONS

		PJXA2	PJXA10	PJXA20
P PST (mm)		23	33	37
Δ	min (%)	−11	+9	−5
Δ	med (%)	+2	+9	+11
Δ	max (%)	+6	+19	+23

CRUES

	QJXA2		QJXA10		QJXA20	
Qobs POD (m³/s)	160		275		318	
Qsim (climat obs) POD (m³/s)	115	222	218	360	257	413
min (%)	−60	−27	−47	−26	−46	−26
Δ med (%)	−42	−1	−38	+2	−37	+3
max (%)	−26	+8	−20	+12	−16	+15

OCCURENCE DES ÉTIAGES

Qobs POD	sept.	
Qsim (climat obs) POD	oct.	sept.
min (jours)	+4	−15
Δ med (jours)	+24	+3
max (jours)	+39	+21

DÉBITS CLASSÉS

	Q95		Q10	
Qobs POD (m³/s)	8,3		61	
Qsim (climat obs) POD (m³/s)	5,22	7,36	62	109
min (%)	−74	−6	−58	−40
Δ med (%)	−62	−2	−40	−21
max (%)	−32	+0	−32	−11

OCCURENCE DES CRUES

Qobs POD	févr.	
Qsim (climat obs) POD	mars	févr.
min (jours)	−16	−13
Δ med (jours)	−3	+0
max (jours)	+44	+23

ORDRE DE GRANDEUR DES DÉBITS FUTURS POSSIBLES À L'HORIZON 2050-2070 SOUS SCÉNARIO A1B D'ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Avertissement : ces résultats comportent de très nombreuses incertitudes. Ils sont donnés à titre indicatif. Il ne s'agit pas de prévisions mais d'indications d'évolutions possibles. Une note d'accompagnement contient des indications de lecture et d'interprétation de la fiche. Elle détaille de plus la méthodologie utilisée ainsi que les limites de l'exercice.

Nom	La Vègre à Asnières-sur-Vègre
Identifiant Explore2070	855
Code Banque Hydro	M0583020
Surface du bassin versant	401 km²
Période d'observation des débits	POD : 1980-1991
Période de simulation temps présent	PST : 1961-1990
Période de simulation temps futur	FUT : 2046-2065
Modèles hydrologiques utilisés	GR4J / ISBA-MODCOU

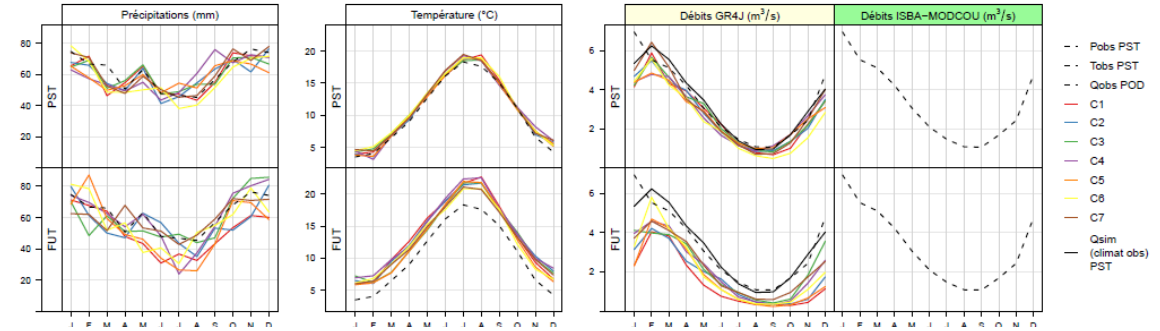
Les évolutions climatiques et hydrologiques sont calculées entre des simulations de référence en climat présent (1961-1990) et des simulations en climat futur (2046-2065) à partir de 7 modèles climatiques (C1 à C7). Les résultats sont présentés sous forme de Δ entre présent et futur : (FUT-PST) pour T, (FUT-PST)/PST pour P, ETP et Q. Δ minimum, Δ médian et Δ maximum sont calculés sur les 7 modèles climatiques. Selon les stations, un ou deux modèles hydrologiques ont été utilisés.

CLIMAT

		Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Précipitations obs PST (mm)		**75**	**67**	**66**	**51**	**63**	**48**	**47**	**45**	**57**	**68**	**76**	**74**	**737**
Δ	min (%)	−16	−30	−8	−13	−34	−35	−52	−50	−34	−28	−15	−16	−14
Δ	med (%)	+8	−6	+17	−5	−22	−0	−20	−25	−16	−4	+4	−4	−2
Δ	max (%)	+18	+51	+38	+41	+13	+37	+1	+25	+6	+12	+20	+29	+1
Température obs PST (°C)		**3,5**	**4,1**	**6,5**	**9,1**	**12,7**	**16,1**	**18,3**	**17,6**	**15,1**	**11,1**	**6,6**	**4,3**	**10,4**
Δ	min (°C)	+1,4	+1,4	+0,6	+1,1	+1,3	+1,0	+1,6	+1,9	+1,6	+1,2	+0,8	+0,8	+1,6
Δ	med (°C)	+2,1	+2,0	+2,1	+1,8	+1,8	+2,1	+3,0	+3,1	+2,6	+2,2	+1,8	+1,6	+2,2
Δ	max (°C)	+3,0	+4,1	+3,0	+2,9	+2,9	+2,6	+3,2	+4,0	+3,0	+3,0	+3,3	+2,4	+2,8
Évapotransp. potentielle obs PST (mm)		**15**	**21**	**38**	**57**	**75**	**94**	**106**	**89**	**60**	**34**	**17**	**14**	**618**
Δ	min (%)	−4	+3	+2	+9	+16	+4	+10	+7	+20	+27	+13	+6	+15
Δ	med (%)	+7	+9	+30	+18	+20	+9	+20	+23	+38	+51	+37	+17	+23
Δ	max (%)	+40	+43	+43	+38	+32	+17	+29	+44	+53	+60	+53	+56	+33

DÉBITS

		Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
moyens	Qobs POD (m³/s)	**6,94**	**5,53**	**5,11**	**4,22**	**3,06**	**2,1**	**1,47**	**1,09**	**1,07**	**1,69**	**2,44**	**4,76**	**3,29**
moyens	Qsim (climat obs) POD (m³/s)	5,84	5,32	5,2	4,84	3,8	2,11	1,58	0,951	0,845	1,94	2,26	4,1	3,23
moyens	Δ min (%)	−47	−31	−20	−40	−57	−66	−56	−67	−77	−81	−80	−67	−46
moyens	Δ med (%)	−25	−23	−11	−8	−28	−33	−38	−46	−50	−70	−47	−37	−24
moyens	Δ max (%)	−3	+4	−1	+1	−6	−10	−21	−13	−21	−26	−16	+3	−18
5 ans secs	Qobs POD (m³/s)	**3,3**	**3,08**	**3,23**	**2,13**	**1,5**	**1,24**	**0,814**	**0,686**	**0,727**	**0,965**	**1,2**	**1,95**	**2,16**
5 ans secs	Qsim (climat obs) POD (m³/s)	3,11	3,03	3,62	2,7	1,72	1,27	0,908	0,494	0,392	0,424	0,564	1,47	2,03
5 ans secs	Δ min (%)	−72	−64	−48	−55	−58	−54	−54	−51	−62	−72	−78	−80	−58
5 ans secs	Δ med (%)	−41	−28	−26	−27	−28	−33	−33	−42	−51	−61	−66	−46	−32
5 ans secs	Δ max (%)	−17	+9	−2	−8	−14	−24	−24	−31	−20	−14	−27	−22	−18



PERFORMANCE DES MODÈLES HYDROLOGIQUES sur la période POD

NSEQ		NSElnQ		NSEiQ		R-QA		R-VCN30-2		R-QMNA5		R-QJXA10	
0,84	—	0,75	—	-0,59	—	0,98	—	0,55	—	0,50	—	0,77	—

ÉTIAGES

		VCN10		VCN30		QMNA	
2 ans	Qobs POD (m³/s)	**0,77**		**0,866**		**0,915**	
2 ans	Qsim (climat obs) POD (m³/s)	0,405	-	0,472	-	0,526	-
2 ans	Δ min (%)	−62	-	−66	-	−67	-
2 ans	Δ med (%)	−52	-	−54	-	−53	-
2 ans	Δ max (%)	−23	-	−24	-	−25	-
5 ans secs	Qobs POD (m³/s)	**0,526**		**0,608**		**0,647**	
5 ans secs	Qsim (climat obs) POD (m³/s)	0,26	-	0,292	-	0,321	-
5 ans secs	Δ min (%)	−57	-	−60	-	−60	-
5 ans secs	Δ med (%)	−46	-	−49	-	−51	-
5 ans secs	Δ max (%)	−23	-	−25	-	−27	-
10 ans secs	Qobs POD (m³/s)	**0,431**		**0,506**		**0,54**	
10 ans secs	Qsim (climat obs) POD (m³/s)	0,206	-	0,226	-	0,248	-
10 ans secs	Δ min (%)	−58	-	−61	-	−60	-
10 ans secs	Δ med (%)	−43	-	−46	-	−49	-
10 ans secs	Δ max (%)	−24	-	−26	-	−28	-

FORTES PRECIPITATIONS

		PJXA2	PJXA10	PJXA20
P PST (mm)		**26**	**35**	**39**
Δ	min (%)	−5	+12	−3
Δ	med (%)	+5	+12	+14
Δ	max (%)	+11	+16	+19

CRUES

	QJXA2		QJXA10		QJXA20	
Qobs POD (m³/s)	**23**		**34**		**38**	
Qsim (climat obs) POD (m³/s)	17	-	26	-	30	-
Δ min (%)	−40	-	−34	-	−35	-
Δ med (%)	−16	-	−2	-	+1	-
Δ max (%)	−13	-	+7	-	+14	-

OCCURENCE DES ÉTIAGES

Qobs POD		sept.	
Qsim (climat obs) POD		oct.	—
Δ	min (jours)	−0	-
Δ	med (jours)	+18	-
Δ	max (jours)	+30	-

DÉBITS CLASSÉS

	Q95		Q10	
Qobs POD (m³/s)	**0,576**		**7**	
Qsim (climat obs) POD (m³/s)	0,342	-	7	-
Δ min (%)	−61	-	−37	-
Δ med (%)	−49	-	−21	-
Δ max (%)	−25	-	−13	-

OCCURENCE DES CRUES

Qobs POD		févr.	
Qsim (climat obs) POD		févr.	—
Δ	min (jours)	−12	-
Δ	med (jours)	−1	-
Δ	max (jours)	+27	-

ORDRE DE GRANDEUR DES DÉBITS FUTURS POSSIBLES À L'HORIZON 2050-2070 SOUS SCÉNARIO A1B D'ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Avertissement : ces résultats comportent de très nombreuses incertitudes. Ils sont donnés à titre indicatif. Il ne s'agit pas de prévisions mais d'indications d'évolutions possibles. Une note d'accompagnement contient des indications de lecture et d'interprétation de la fiche. Elle détaille de plus la méthodologie utilisée ainsi que les limites de l'exercice.

Nom	La Sarthe à Saint-Denis-d'Anjou [Beffes]
Identifiant Explore2070	856
Code Banque Hydro	M0680610
Surface du bassin versant	7523 km²
Période d'observation des débits	POD : 1971-1991
Période de simulation temps présent	PST : 1961-1990
Période de simulation temps futur	FUT : 2046-2065
Modèles hydrologiques utilisés	GR4J / ISBA-MODCOU

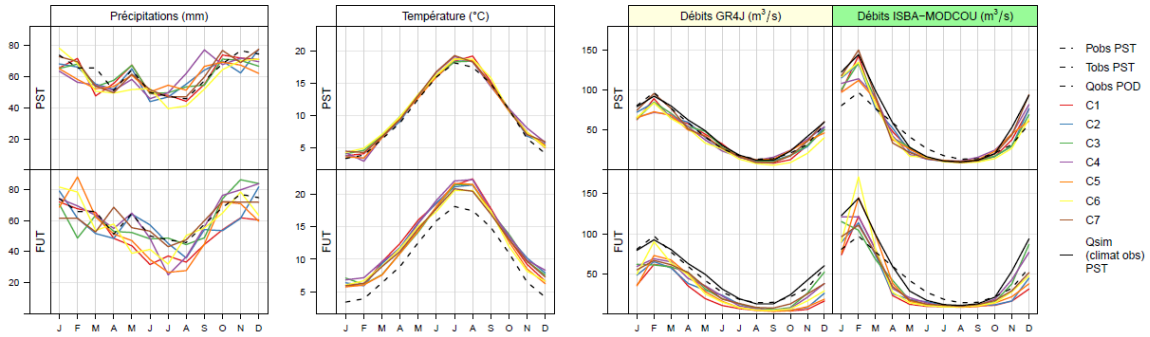
Les évolutions climatiques et hydrologiques sont calculées entre des simulations de référence en climat présent (1961-1990) et des simulations en climat futur (2046-2065) à partir de 7 modèles climatiques (C1 à C7). Les résultats sont présentés sous forme de Δ entre présent et futur : (FUT-PST) pour T, (FUT-PST)/PST pour P, ETP et Q. Δ minimum, Δ médian et Δ maximum sont calculés sur les 7 modèles climatiques. Selon les stations, un ou deux modèles hydrologiques ont été utilisés.

CLIMAT

		Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Précipitations obs PST (mm)		**74**	**66**	**66**	**51**	**64**	**50**	**47**	**46**	**57**	**68**	**77**	**75**	**741**
Δ	min (%)	−16	−29	−7	−13	−35	−36	−51	−46	−33	−27	−14	−15	−14
Δ	med (%)	+8	−6	+16	−5	−23	−2	−19	−25	−16	+0	+5	−4	−3
Δ	max (%)	+17	+51	+37	+37	+11	+30	−2	+22	+6	+12	+22	+25	+1
Température obs PST (°C)		**3,4**	**3,9**	**6,4**	**8,9**	**12,6**	**15,9**	**18,1**	**17,5**	**14,9**	**11,0**	**6,5**	**4,2**	**10,3**
Δ	min (°C)	+1,4	+1,5	+0,6	+1,1	+1,3	+1,0	+1,6	+1,9	+1,6	+1,2	+0,8	+0,8	+1,6
Δ	med (°C)	+2,1	+2,0	+2,1	+1,8	+1,8	+2,1	+2,9	+3,1	+2,6	+2,2	+1,8	+1,6	+2,2
Δ	max (°C)	+3,0	+4,2	+3,0	+2,8	+2,9	+2,6	+3,2	+4,0	+3,0	+3,0	+3,3	+2,4	+2,8
Évapotransp. potentielle obs PST (mm)		**14**	**20**	**37**	**56**	**73**	**92**	**104**	**87**	**59**	**33**	**17**	**13**	**605**
Δ	min (%)	−3	+2	+2	+9	+16	+4	+11	+8	+20	+27	+15	+8	+15
Δ	med (%)	+8	+9	+30	+17	+20	+10	+21	+23	+39	+51	+37	+18	+24
Δ	max (%)	+41	+48	+43	+37	+32	+18	+29	+44	+54	+61	+54	+58	+34

DÉBITS

			Jan		Fév		Mars		Avril		Mai		Juin		Juil		Août		Sep		Oct		Nov		Déc		Annuel	
moyens	Qobs POD (m^3/s)		**80,6**		**97,1**		**77,1**		**59,2**		**41,5**		**26,8**		**18**		**13,6**		**14,3**		**21,2**		**31,9**		**57,4**		**44,8**	
	Qsim (climat obs) POD (m^3/s)		73,1	116	89,5	144	78,5	94,6	63,3	62,3	51	31	31,3	17,4	20,1	11,9	12	9,81	10,1	11,6	21	19,6	31,3	38,2	53,8	85,1	44,5	53,3
	Δ	min (%)	−47	−25	−31	−26	−21	−23	−40	−53	−58	−55	−69	−44	−60	−29	−68	−24	−80	−35	−84	−43	−83	−58	−69	−60	−46	−30
	Δ	med (%)	−27	−22	−23	−14	−9	−5	−7	−26	−28	−24	−35	−22	−41	−16	−45	−15	−53	−11	−73	−27	−47	−34	−38	−39	−25	−12
	Δ	max (%)	−3	+14	+7	+30	−2	+11	−0	+3	−8	+3	−8	+9	−25	−2	−17	−1	−26	+3	−31	−5	−17	+24	+3	+25	−16	−5
5 ans secs	Qobs POD (m^3/s)		**42,8**		**53,7**		**48,5**		**30,2**		**21,9**		**15,3**		**11,4**		**8,88**		**11,5**		**13**		**17,9**		**27,2**		**31,4**	
	Qsim (climat obs) POD (m^3/s)		36,3	47,6	50,7	62,6	46,7	45,5	30,9	20	22,4	13,1	14,9	10,9	9,65	9,18	5,67	8,2	4,7	8,84	5,4	9,75	8,16	13,1	21,2	25	28,9	35
	Δ	min (%)	−76	−49	−66	−41	−48	−34	−59	−32	−61	−32	−59	−18	−58	−13	−52	−17	−66	−28	−76	−26	−83	−36	−84	−53	−59	−39
	Δ	med (%)	−45	−27	−30	−26	−25	−14	−30	−14	−26	−12	−33	−8	−34	−10	−45	−11	−53	−12	−66	−4	−72	−10	−54	−22	−36	−15
	Δ	max (%)	−15	+25	+9	+63	+5	+44	−7	+2	−14	−6	−25	−0	−26	+1	−32	−1	−23	+4	−21	+6	−33	+1	−28	−4	−19	−2



PERFORMANCE DES MODÈLES HYDROLOGIQUES sur la période POD

NSEQ		NSElnQ		NSEiQ		R-QA		R-VCN30-2		R-QMNA5		R-QJXA10	
0,90	0,42	0,69	0,21	-2,85	-1,88	0,99	1,19	0,51	0,74	0,44	0,93	0,98	1,14

ÉTIAGES

		VCN10		VCN30		QMNA	
2 ans	Qobs POD (m^3/s)	**9,31**		**11**		**11,7**	
	Qsim (climat obs) POD (m^3/s)	4,77	7,63	5,54	8,11	6,29	8,49
	Δ min (%)	−66	−5	−69	−11	−70	−17
	Δ med (%)	−56	−3	−59	−6	−57	−7
	Δ max (%)	−27	−1	−28	−1	−28	−2
5 ans secs	Qobs POD (m^3/s)	**6,55**		**8,16**		**8,58**	
	Qsim (climat obs) POD (m^3/s)	3,04	7,47	3,4	7,76	3,76	7,98
	Δ min (%)	−62	−5	−64	−4	−64	−7
	Δ med (%)	−52	−3	−54	−3	−56	−5
	Δ max (%)	−28	−1	−29	+0	−32	−1
10 ans secs	Qobs POD (m^3/s)	**5,46**		**7**		**7,28**	
	Qsim (climat obs) POD (m^3/s)	2,41	7,38	2,64	7,58	2,87	7,72
	Δ min (%)	−63	−4	−65	−3	−66	−7
	Δ med (%)	−48	−1	−51	−1	−54	−2
	Δ max (%)	−28	+1	−30	+6	−34	+2

FORTES PRECIPITATIONS

		PJXA2	PJXA10	PJXA20
P PST (mm)		**25**	**33**	**37**
Δ	min (%)	−5	+11	−2
Δ	med (%)	+4	+11	+12
Δ	max (%)	+12	+16	+17

CRUES

	QJXA2		QJXA10		QJXA20	
Qobs POD (m^3/s)	**281**		**416**		**467**	
Qsim (climat obs) POD (m^3/s)	252	312	407	476	467	538
Δ min (%)	−41	−24	−38	−26	−40	−27
Δ med (%)	−19	+1	−2	+5	−0	+8
Δ max (%)	−10	+9	+11	+21	+18	+24

OCCURENCE DES ÉTIAGES

Qobs POD		sept.
Qsim (climat obs) POD		oct.	sept.
Δ	min (jours)	−1	−16
Δ	med (jours)	+18	+9
Δ	max (jours)	+27	+27

DÉBITS CLASSÉS

	Q95		Q10	
Qobs POD (m^3/s)	**9,39**		**100**	
Qsim (climat obs) POD (m^3/s)	4,19	7,63	104	159
Δ min (%)	−65	−5	−35	−35
Δ med (%)	−54	−2	−21	−13
Δ max (%)	−30	−1	−11	−1

OCCURENCE DES CRUES

Qobs POD		févr.
Qsim (climat obs) POD		févr.	févr.
Δ	min (jours)	−13	−9
Δ	med (jours)	+4	+7
Δ	max (jours)	+14	+12

7.3 Annexe 2 : Analyse des modèles climatiques

7.3.1 Eléments introductifs

7.3.1.1 Définition des différents types de modèles climatiques

Sources : (DRIAS), (Boé, 2014)

Les différents types de modèles climatiques (par résolution décroissante) sont présentés ci-après :

- Modèles climatiques globaux = (Global Climate Models, GCM) :

Il s'agit de modèles climatiques à large échelle généralement conçus pour être utilisés à l'échelle du globe. Leur résolution horizontale est typiquement de 100 à 300 km ;

- Modèles climatiques régionaux= (Regional Climate Models, RCM) :

Il s'agit de modèles climatiques à résolution horizontale élevée (typiquement 10 – 50 km), obtenus par désagrégation[9] dynamique, statistique ou par une combinaison des deux méthodes, à partir de modèles climatiques globaux. Une correction de biais (s'apparentant à une méthode de désagrégation statistique) peut compléter cette approche. Ces modèles sont généralement appliqués à une région délimitée et les conditions à leurs limites sont déterminées à l'aide de modèle climatiques globaux ;

- Modèles d'impact :

Il peut s'agir de modèles environnementaux de différents types (hydro(géo)logiques, de rendement agricole…) qui ont pour objectif de restituer les effets du changement climatique sur différents types de systèmes.

[9] Ou encore descente d'échelle ou régionalisation

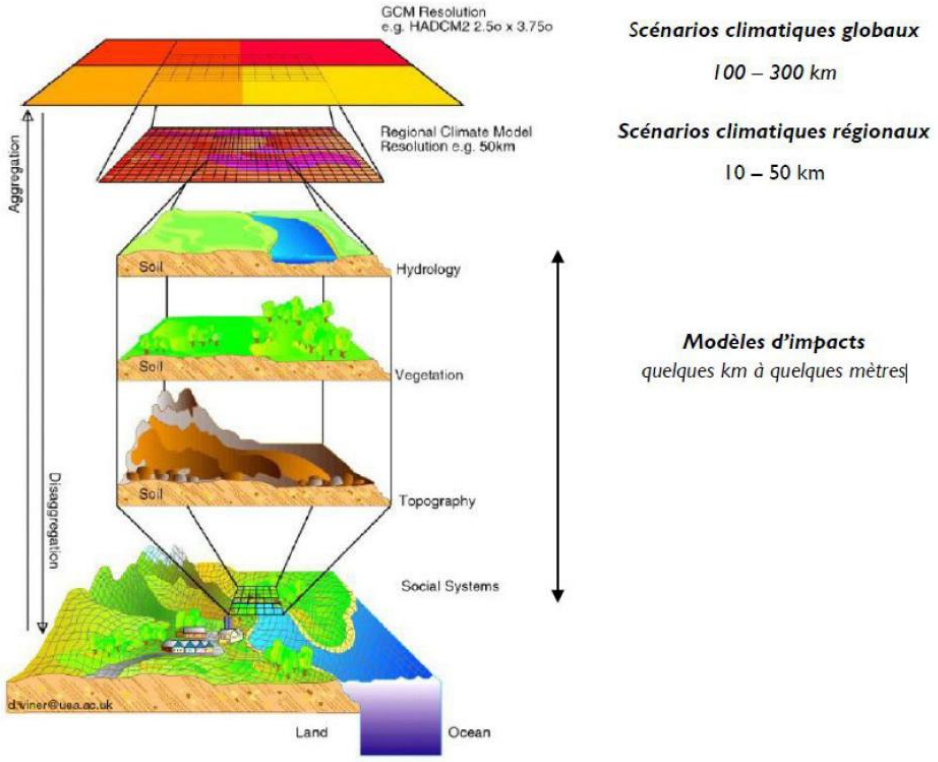


Figure 22 : Echelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle (d'après S. Planton)

7.3.1.2 Evolutions récentes des modèles climatiques

Sources : (DGEC/SCEE/Onerc, 2013)

Alors que seuls 23 modèles ont été exploités pour le 4e rapport d'évaluation, le GIEC s'appuie sur une cinquantaine de modèles pour le 5e (AR5).

Les modèles utilisés par les scientifiques pour les simulations associées aux RCP, ont été affinés. Ces modèles progressent continuellement en intégrant de manière toujours plus complète les mécanismes qui régissent le climat (connaissance et représentation des phénomènes) et en bénéficiant des progrès des techniques numériques (puissance de calcul, algorithmes, optimisation des calculs).

Par exemple, certaines simulations pour le futur Rapport d'évaluation (AR5) prennent mieux en compte les contributions de la banquise et de la végétation, ou l'impact de la chimie des aérosols. Néanmoins aucun de ces outils n'intègre actuellement les effets de l'augmentation des feux de forêts qui dégagent du CO2 ou le dégel des pergélisols qui dégagent du méthane (CH4), puissant gaz à effet de serre. Au fur et à mesure que de nouveaux processus ou traitements sont ajoutés au modèles, ces derniers sont évalués et comparés aux observations disponibles.

La résolution spatiale des modèles a, elle aussi, été significativement améliorée. Certains modèles présentent un nombre de niveaux verticaux plus important, mais la plupart progressent surtout en résolution horizontale. Cette évolution est essentielle pour la régionalisation des projections, les modèles

globaux ont classiquement une résolution de 100 à 300 km ne permettant pas d'obtenir des projections détaillées pour anticiper localement des impacts.

7.3.1.3 Modèles climatiques existants et mise à disposition de leurs résultats

Sources: (DGEC/SCEE/Onerc, 2013), (GICC, 2011)

Pour le rapport GIEC AR5, les simulations climatiques globales sont réalisées dans le cadre d'un projet CMIP5 coordonné au niveau international (Coupled Model Intercomparison Project, phase 5). Grâce à ce projet, les résultats des simulations du climat passé et futur sont rendus directement accessibles dans une base de données distribuée au niveau international :

https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip5-ipsl/

Parmi les modèles disponibles, deux sont développés et utilisés par la communauté scientifique française :

- **CNRM-CM5 (MétéoFrance et CERFACS) ;**
- **IPSL-CM5 (Institut Pierre Simon Laplace).**

Aujourd'hui, la sixième phase du projet est en cours (CMIP6) et des résultats de nouvelles modélisations sont déjà disponibles :

https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/

Ces nouvelles modélisations sont basées sur de nouveaux scénarios qui n'ont encore fait l'objet d'aucune publication par le GIEC.

Un programme complémentaire, nommé Cordex (Coordinated Regional Downscaling Experiment), définit le cadre général pour la régionalisation des simulations climatiques et l'inter-comparaison des résultats à petite échelle sur des domaines limités. Il s'appuie sur les modélisations du CMIP5.

En France, une volonté similaire a conduit les climatologues à développer le portail internet « DRIAS, les futurs du climat ». Ce dernier permet aux utilisateurs de visualiser des projections et scénarios climatiques régionalisés sur la France à partir de modélisations issues notamment de CMIP5 et CORDEX, et de commander des données ciblées.

7.3.2 Problématique de la descente d'échelle et de la correction de biais

Sources : (DGEC, 2014)

La descente d'échelle (que l'on nomme également régionalisation ou désagrégation spatiale) est un processus permettant, à partir de simulations climatiques de grande échelle (de l'ordre de 300 à 50 km), de descendre à des échelles fines de l'ordre de la dizaine de kilomètres, et/ou (cas de la correction de biais) de corriger les résultats des simulations à partir d'observations.

Le présent paragraphe a pour objectif de présenter les principes généraux des méthodes de descente d'échelle. De plus amples détails sur ces dernières sont donnés par (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011).

7.3.2.1 Importance de la descente d'échelle

Sources : (Boé, 2014)

Les modèles climatiques globaux recensés dans la base de données du CMIP fournissent d'importantes informations sur l'évolution du climat à l'échelle mondiale. Cependant leur basse résolution ne permet pas de réaliser des analyses locales, d'où l'importance de la descente d'échelle.

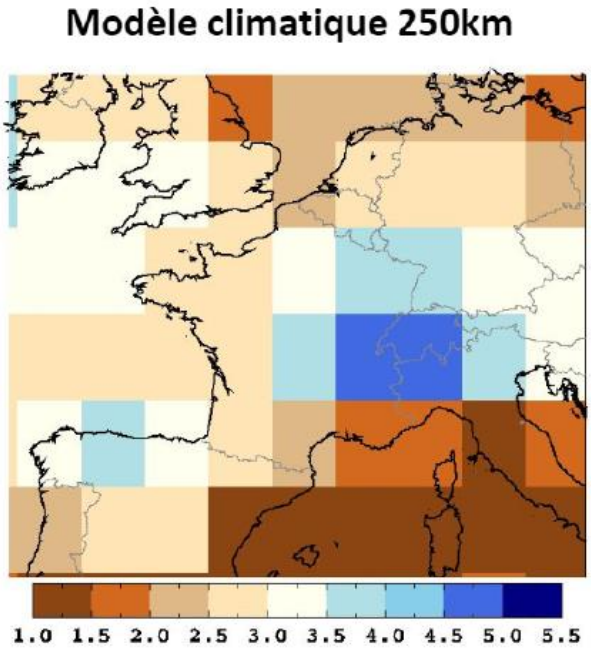


Figure 23 : Exemple de restitution d'un modèle climatique global de 250 km de résolution (source : (Boé, 2014))

7.3.2.2 Approche dynamique

Sources : (DGEC, 2014), (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011), (Boé, 2014)

L'approche dynamique consiste à résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional. Elle utilise pour cela des modèles climatiques régionaux, qui sont de même nature que les modèles atmosphériques ou océaniques utilisés pour les simulations du GIEC, mais ils ont l'avantage de décrire des phénomènes de plus petites dimensions grâce à leur résolution spatiale plus fine sur la région d'intérêt.

Cette solution souffre cependant d'un problème pratique important : plus la résolution est fine, plus le temps de calcul et les moyens numériques à mettre en place sont importants. Afin de réduire ces coûts numériques, une solution couramment adoptée est d'augmenter la résolution spatiale sur le domaine d'intérêt uniquement. On utilise pour cela des modèles de climat régionaux (RCM). Ce système impose l'utilisation d'un modèle global qui fournit les conditions aux limites.

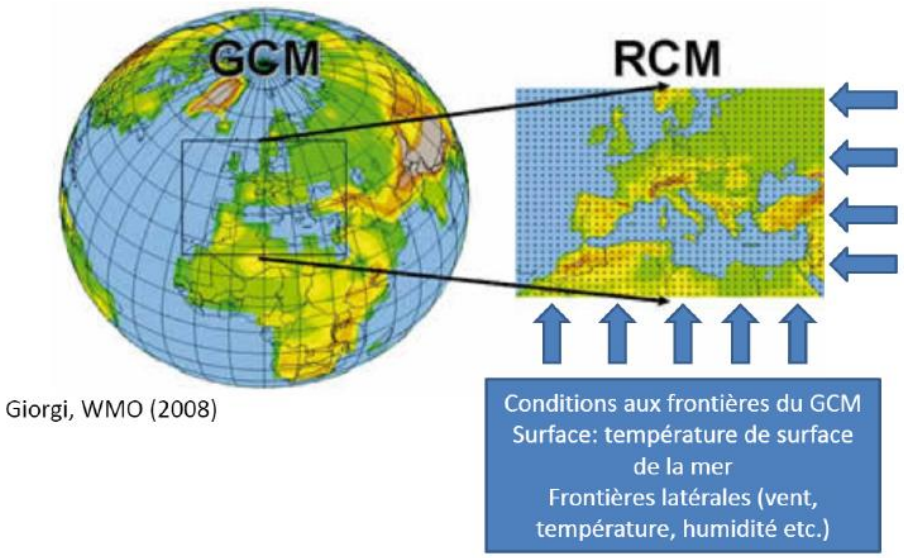


Figure 24 : Schématisation d'un modèle de climat régional (source : (Boé, 2014))

Cette méthode est nommée « méthode dynamique », la solution apportée se basant sur la résolution des équations de la dynamique atmosphérique du modèle régional.

Bien que les modèles de climats régionaux permettent une meilleure représentation des caractéristiques régionales, ils ne sont pas parfaits et souffrent également de certains biais. Ainsi, avant d'utiliser les simulations des modèles de climat régionaux pour les études d'impact, ils doivent subir également une correction de biais qui fait alors partie des désagrégations statistiques que nous allons évoquer ci-dessous.

7.3.2.3 Approche statistique

Sources : (DGEC, 2014), (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011), (DRIAS)

L'approche statistique repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables de grande échelle et les variables locales de surface. Elle se base sur le fait que le climat régional dépend de deux facteurs : le climat de grande échelle et les caractéristiques locales ou régionales telles que la topographie, le type de surface, la couverture de végétation...

En mettant en relation les variables de grande échelle issues de simulations et les variables locales de surface, l'approche statistique permet de réaliser deux améliorations :

- **La descente d'échelle : En effet, la résolution des données issues de l'approche statistique est identique à celles des observations sur lesquelles elle se base. Ainsi, dès lors que la résolution de ces observations est plus fine que celle des simulations à grande échelle, une descente d'échelle a lieu ;**
- **La correction de biais :** Si l'on compare sur une période donnée, sur un espace donné, pour un paramètre donné, la moyenne de simulations climatiques à celle d'observations, on constate de manière générale un assez bon accord. Cependant l'accord n'est pas parfait. Non seulement il existe des erreurs systématiques sur les moyennes, mais encore certains extrêmes sont assez mal

reproduits. Il est donc nécessaire dans certaines applications de corriger à posteriori les variables du modèle pour rendre la distribution statistique des données quotidiennes identique à la distribution observée en chaque point. Il s'agit de la correction de biais réalisée par une approche statistique de descente d'échelle.

Les méthodes statistiques se déroulent en deux phases : une phase d'analyse ou d'apprentissage durant laquelle on va estimer les erreurs du modèle de climat et mettre en place une méthode visant à les corriger, et une phase d'application.

Ainsi, la phase d'apprentissage fait appel à la période de recouvrement entre les simulations climatiques et les observations. On parle alors de « temps présent modèle », afin de préciser qu'il s'agit d'une réalisation d'un modèle de climat sur le temps présent, c'est-à-dire sur le climat présent. La phase d'application peut comporter une période présente et une projection dans le futur.

Trois méthodes principales sont fréquemment rappelées dans la littérature :

- Une méthode relativement simple, appelée méthode des anomalies qui consiste à prendre en compte les variations moyennes simulées par le modèle de climat ;
- Une méthode plus affinée, prenant en compte les variations de la moyenne mais également de la distribution des variables simulées. Cette méthode est appelée quantile-quantile ;
- Une méthode prenant en compte les caractéristiques de grande échelle qui sont bien reproduites par les modèles de climat. Cette méthode est appelée méthode des régimes de temps (ou DSClim).

Le tableau suivant présente les avantages et inconvénients des trois méthodes statistiques présentées. Ce qu'il faut retenir, c'est que les méthodes des régimes de temps et des quantiles-quantiles permettent d'appréhender l'évolution des phénomènes extrêmes dans le futur alors que la méthode des anomalies n'est pas adaptée pour cela.

Tableau 3 : Avantages et inconvénients des méthodes statistiques de désagrégation (Source : (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011) d'après Terray et al 2010)

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Anomalies ou AN	Simple et mise en œuvre facile et rapide	Hypothèses très fortes et très peu réalistes sur les modifications de variabilité : la variabilité journalière et interannuelle est considérée invariante entre le futur et le passé.
Régime de temps ou RT	Applicable facilement à un grand nombre de projections climatiques Utilisable pour la quantification des incertitudes	Les liens grande échelle – échelle locale sont considérés invariants entre le futur et le passé. Non prise en compte d'événements extrêmes journaliers d'amplitude supérieure à ceux de l'archive passée (sauf pour la température).
Dynamique quantile-quantile ou QQ	La plus complète pour la prise en compte des rétroactions et les modifications des extrêmes	Très coûteuse en temps calcul. Les erreurs du modèle pour la correction quantile-quantile sont considérées invariantes entre le futur et le passé.

Il apparaît que la méthode quantile-quantile constitue la meilleure des trois approches présentées, si l'on omet la problématique des temps de calcul (qui pose de moins en moins problème avec l'amélioration continue des capacités computationnelles).

Son inconvénient principal est qu'elle fait l'hypothèse de la stationnarité (entre le présent et le futur) de la relation entre les fonctions de distribution des variables du climat simulées et observées. Pour remédier à cela, des améliorations de la méthode quantile-quantile ont été développées, avec notamment la méthode Adamont et la méthode CDF-t. Leurs particularités principales sont les suivantes :

- Adamont : Cette méthode applique la correction quantile-quantile de manière personnalisée sur 4 types de temps pour chaque saison de l'année. Ainsi, l'hypothèse de stationnarité ne s'applique plus pour l'ensemble de l'année, mais pour chaque type de temps de chaque saison. On considère alors que le changement climatique se traduit par un changement de fréquence des types de temps ;
- CDF-t : cette méthode permet de prendre en compte l'évolution des propriétés statistiques des données désagrégées avec le changement climatique, par la prise en compte des modifications de la fonction de distribution, côté simulations, entre le climat présent et le climat futur.

Un tableau complet des méthodes statistiques recensées sur le site DRIAS est présenté ci-dessous :

Tableau 4 : Avantages et inconvénients des méthodes statistiques de désagrégation (Source : (DRIAS)*)*

Méthodes	Avantages	Inconvénients
DSClim *(CERFACS)*	– Préserve la cohérence spatiale et inter-paramètres. – Permet d'accéder au pas de temps infra-quotidiens. – Élimine les biais efficacement.	– Problèmes de transférabilité de la méthode du passé au climat futur. – La classification par saison crée des limites artificielles entre les jours analogues possibles. – Ne tient pas compte des rétro-actions entre le sol (humidité et couverture de neige) et les variables.
Quantile-Quantile *(M. Déqué)*	– Prise en compte des rétroactions et des modifications des extrêmes. – Permet d'éliminer les biais dans les deux premiers moments statistiques. Il peut saisir l'évolution et la variabilité de la moyenne du modèle tout en faisant correspondre tous les moments statistiques.	– Les erreurs du modèle et les paramétrisations physiques sont considérées invariantes entre le futur et le passé. – Aucun ajustement n'est apporté à la structure temporelle des précipitations quotidiennes. – Impossible de capturer les durées des périodes de sécheresse et d'humidité modélisées. – Il n'est pas en mesure de générer une variabilité interannuelle des précipitations.
CDF-t *(IPSL)*	– Prise en compte de l'évolution des propriétés statistiques des données désagrégées avec le changement climatique. – Ajustement de la fréquence des précipitations. – Capable de simuler la durée des périodes d'humidité et de sécheresse.	– Dépendance inter-variables du modèle climatique n'est pas corrigée mais est préservée. – Les données sont désaisonnalisées et la tendance retirée. – N'est pas développée spécifiquement pour les événements extrêmes.
ADAMONT *(Météo-France)*	– Permet d'accéder au pas de temps infra-quotidiens. – L'hypothèse de stationnarité a de meilleures chances d'être vérifiée au sein d'un même types de temps de la même saison. Le changement climatique se traduit par un changement de fréquence des types de temps.	– La classification par saison crée des limites artificielles entre les jours analogues possibles. – La consistance entre les variables n'est plus assurée au terme de la chaîne de traitement.

7.3.2.4 Recommandations sur l'utilisation des méthodes de descente d'échelle

(Boé, 2014) indique que les approches dynamique et statistiques sont complémentaires et qu'il y a un intérêt à utiliser les deux (en général, désagrégation dynamique d'abord, puis statistique ensuite avec correction de biais).

Il rappelle également que la désagrégation n'est qu'une étape dans la modélisation du climat futur. En raison de la large gamme de résultats obtenus par les modèles climatiques globaux, il est considéré plus judicieux de chercher à appréhender les incertitudes en appliquant une unique méthode de descente d'échelle sur plusieurs modèles climatiques globaux plutôt que d'appliquer plusieurs méthodes de descente d'échelle sur un seul modèle.

7.3.3 CMIP – Modélisation climatique globale

Sources : (WCRP), (Hausfather, 2019)

Le CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) est un projet continu démarré en 1995 mené par le WGCM (Working Group on Coupled Modeling) qui est lui-même une entité du WCRP (World Climate Research Program).

L'objectif principal de ce projet est de permettre aux scientifiques de partager et comparer leurs modèles climatiques. Pour ce faire, des standards et des protocoles d'expérimentation sont définis par le projet, avec par exemple les scénarios climatiques RCP. Le respect par les modélisateurs de ces lignes directrices permet d'analyser collectivement les résultats de modélisation, ce qui permet d'obtenir de meilleures projections du climat. Pour concrétiser cela, le projet inclut la création d'une base de données intégrée, dans laquelle les résultats de toutes les modélisations inclues au projet sont stockées selon un standard commun, ce qui améliore leur accessibilité et la possibilité de les comparer.

La 5ème phase du projet, CMIP5, a été utilisée par le GIEC pour la rédaction de son 5ème état de connaissance.

Actuellement, la 6ème phase du projet, CMIP6, est en préparation. Elle inclura les améliorations suivantes :

- Modèles exécutés avec une résolution plus fine ;
- Les modèles incluent des processus additionnels non inclus aux simulations précédentes ;
- De nouveaux outils d'analyse facilitent le traitement des données ;
- Infrastructure et documentation améliorées ;
- De nouveaux scénarios climatiques sont inclus pour compléter les RPC existants.

Le CMIP6 constitue un projet beaucoup plus ambitieux que le CMIP5, ce qui a provoqué des retards. Actuellement, le CMIP6 est affecté par un retard d'au moins un an. Alors que l'AR6 du GIEC est en cours de rédaction, seul un ensemble limité de modèles sont disponibles, et il paraît improbable que les simulations du CMIP6 seront exécutées à temps pour la version finale de l'AR6.

7.3.4 CORDEX – Modélisation climatique régionalisée

Sources : (EURO-CORDEX), (DRIAS)

L'initiative international CORDEX est un programme soutenu par le WRCP pour organiser une structure intégrée internationale ayant pour but de produire des projections régionales de changement climatique améliorées pour toutes les régions du monde. Les résultats de CORDEX ont notamment servi d'intrant aux

études d'impact et d'adaptation au changement climatique réalisées dans le contexte du 5ème rapport d'évaluation (AR5) du GIEC.

EURO-CORDEX est la branche européenne du programme CORDEX. Dans le cadre du projet européen EUROCORDEX, des projections climatiques ont été réalisées sur toute l'Europe jusqu'à une résolution de 12 km. Ces modèles régionaux sont forcés par différents modèles de circulation générale du projet CMIP5 utilisés pour l'exercice du GIEC (2013). L'ensemble des projections peuvent être acquises sur le site du projet EURO-CORDEX à l'adresse suivante : https://www.euro-cordex.net/060378/index.php.en

7.3.5 DRIAS – Modélisation climatique régionalisée pour la France

Sources : (DRIAS), (DRIAS), (DRIAS)

Le projet DRIAS a permis de donner un accès privilégié aux simulations climatiques régionalisées disponible à l'échelle du territoire français. Sur le portail internet de DRIAS, on retrouve les résultats des simulations issues du projet EURO-CORDEX, parmi lesquelles figurent celles réalisées par les laboratoires français (CNRM et IPSL).

Pour chacune des simulations, on dispose de données journalières sur une grille spatiale de 8km de côté, pour les périodes 1950-2005 (référence) et 2006-2100 (Projections).

Hiver

RCP4.5 : ECART DE TEMPÉRATURES

DJF [2071-2100] - [1976-2005]

Modèles	Delta
HadGEM2 / CCLM4-8-17	2,8 °C
IPSL-CM5A / WRF381P	2,2 °C
NorESM1 / HIRHAM5	2,0 °C
IPSL-CM5A / RCA4	2,0 °C
EC-EARTH / RCA4	1,9 °C
EC-EARTH / RACMO22E	1,9 °C
CNRM-CM5 / RACMO22E	1,6 °C
CNRM-CM5 / ALADIN63	1,6 °C
MPI-ESM / CCLM4-8-17	1,6 °C
MPI-ESM / REMO2009	1,5 °C
5e centile	1,5 °C
Médiane	1,9 °C
95e centile	2,5 °C

Modèles qui réchauffent le plus

Modèles qui réchauffent le moins

RCP4.5 : ECART DE PRÉCIPITATIONS

DJF [2071-2100] - [1976-2005]

Modèles	Delta
MPI-ESM / REMO2009	9 %
CNRM-CM5 / RACMO22E	11 %
EC-EARTH / RACMO22E	12 %
EC-EARTH / RCA4	12 %
CNRM-CM5 / ALADIN63	13 %
MPI-ESM / CCLM4-8-17	15 %
NorESM1 / HIRHAM5	19 %
HadGEM2 / CCLM4-8-17	25 %
IPSL-CM5A / WRF381P	27 %
IPSL-CM5A / RCA4	28 %
5e centile	10 %
Médiane	14 %
95e centile	28 %

Plus de précipitations

Beaucoup plus de précipitations

RCP4.5 : ECART DE TEMPÉRATURES

SON [2071-2100] - [1976-2005]

Modèles	Delta
HadGEM2 / CCLM4-8-17	3,3 °C
IPSL-CM5A / RCA4	2,7 °C
EC-EARTH / RCA4	2,4 °C
NorESM1 / HIRHAM5	2,4 °C
EC-EARTH / RACMO22E	2,4 °C
CNRM-CM5 / ALADIN63	2,3 °C
IPSL-CM5A / WRF381P	2,1 °C
CNRM-CM5 / RACMO22E	1,9 °C
MPI-ESM / CCLM4-8-17	1,8 °C
MPI-ESM / REMO2009	1,8 °C
5e centile	1,8 °C
Médiane	2,3 °C
95e centile	3,1 °C

Modèles qui réchauffent le plus

Modèles qui réchauffent le moins

RCP4.5 : ECART DE PRÉCIPITATIONS

SON [2071-2100] - [1976-2005]

Modèles	Delta
HadGEM2 / CCLM4-8-17	-7 %
IPSL-CM5A / RCA4	-6 %
MPI-ESM / CCLM4-8-17	-3 %
EC-EARTH / RCA4	0 %
MPI-ESM / REMO2009	1 %
NorESM1 / HIRHAM5	2 %
CNRM-CM5 / RACMO22E	6 %
CNRM-CM5 / ALADIN63	7 %
EC-EARTH / RACMO22E	7 %
IPSL-CM5A / WRF381P	11 %
5e centile	-7 %
Médiane	1 %
95e centile	9 %

Moins de précipitations

Plus de précipitations

Automne

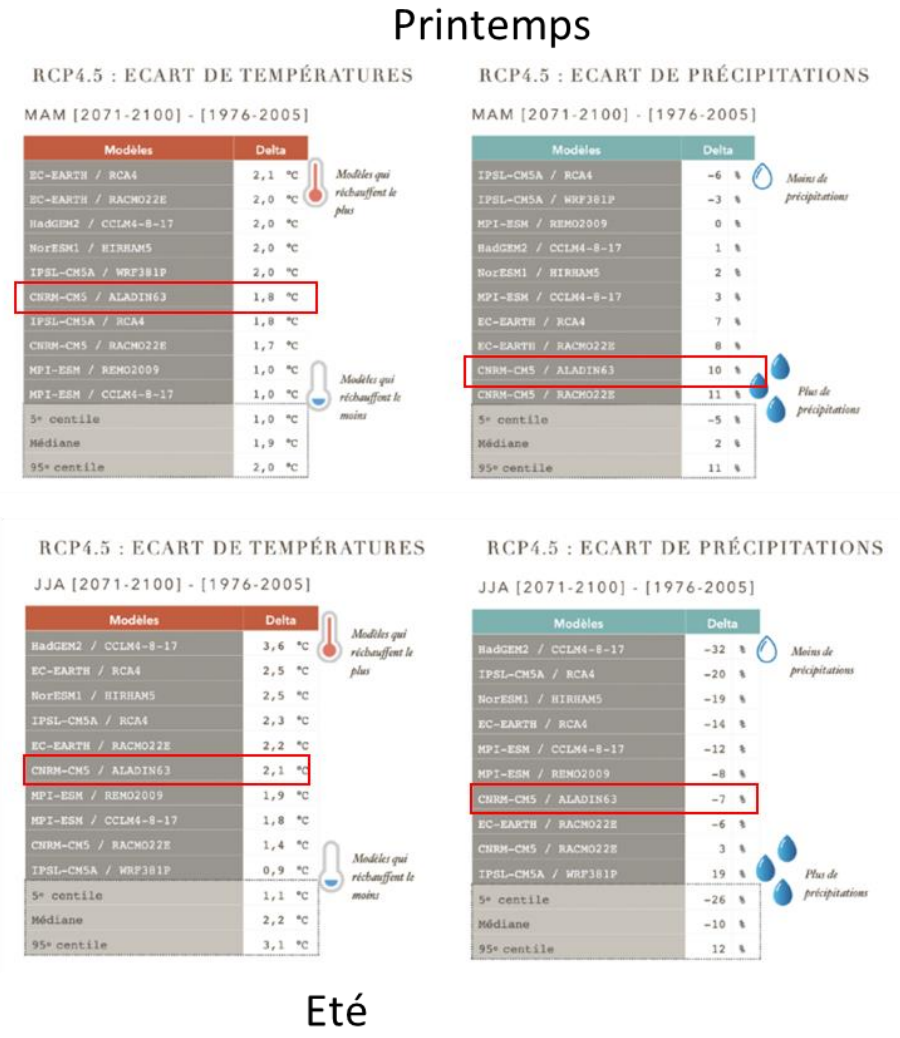


Figure 25 : Mise en perspective des résultats par saison des différents modèles climatiques disponibles sur le portail DRIAS (Source : DRIAS - Note d'aide à la sélection des modèles pour le scénario d'émission RCP4.5)

7.4 Annexe 3 : Indice de sécheresse en termes d'humidité du sol

L'indice de sécheresse en termes d'humidité du sol, ou SSWI, est un indicateur statistique basé sur la moyenne des SWI (indice d'humidité des sols) sur une période donnée et permet de déterminer la fréquence d'une sécheresse agricole.

Le SWI se définit comme suit :

$$SWI = (W - W_{wilt}) / (W_{fc} - W_{wilt})$$

Où W est le contenu intégré en eau du sol, W_{wilt} le contenu en eau au point de flétrissement et W_{fc} le contenu en eau du sol à la capacité au champ.