

Projet de Fin d'Études (PFE) 2023-2024

Influence du changement climatique sur la dynamique sédimentaire des cours d'eau sableux et sablo-graveleux

Sous la direction de :

Stéphane Rodrigues

Jules Le Guern

Pierrick Louet

5^{ème} année Polytech Tours

Département Aménagement et Environnement (DAE)

Filière Ingénierie des Milieux Aquatiques (IMA)

**Influence du changement climatique sur la dynamique sédimentaire
des cours d'eau sableux et sablo-graveleux : application de loi de
tarages solides à des débits liquides modélisés à l'horizon 2100 en
Loire moyenne**

Sous la direction de :

Stéphane Rodrigues

Jules Le Guern

2023/2024

Auteur : Pierrick Louet

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Dans un premier temps, je tiens à remercier vivement mes encadrants, Stéphane Rodrigues et Jules Le Guern. Vos conseils et partage d'expériences m'ont énormément fait progresser tout au long de ce projet !

Puis, je remercie également Hanieh Seyedhashemi et Florentina Moatar pour la transmission des données de projections climatiques, indispensables à ce travail.

Je n'oublie pas Alex et Corentin pour leur regard extérieur à mon travail et à leur précieux conseils, buleurs forever !

TRUGAREZ

Da gentañ-penn e fell din trugarekaat a-greiz kalon ma sternerien, Stéphane Rodrigues evit e alioù war ar neuial ha Jules ar Gwern evit e zarempred a entan evit moger bras Sina !

Ha neuze e trugarekaan ivez Hanieh Seyedhashemi ha Florentina Moatar evit treuzkas ar roadennoù evit rakweladennoù an hin, ret-holl evit al labour-se.

Ne zisoñjan ket Alex ha Kaourantin abalamour d'o sell diavaez eus ma labour hag o alioù prizius giz Savoia ha strolladoù punkoù !

“The rock n’roll, and the rock will roll !” (Louet et al., 2024)

Sommaire

1.	Introduction.....	10
2.	Matériel et méthode	11
2.1.	La Loire et sites d'études	11
2.1.1.	Présentation du bassin-versant de la Loire	11
2.1.2.	Caractéristiques de la Loire moyenne	11
2.1.3.	Sites d'études en Loire moyenne	12
2.2.	Matériel.....	13
2.2.1.	Débits liquides et solides entre 1990 et 2020	13
2.2.2.	Prévisions de débits 2020-2100 sur la base de scénarios GCM et RCP	14
2.3.	Méthode	16
2.3.1.	Mise en forme des données des projections de débits liquides	16
2.3.2.	Création de données	17
3.	Résultats.....	20
3.1.	Gien.....	20
3.1.1.	Etude des débits liquides.....	20
3.1.2.	Flux solides totaux.....	21
3.1.3.	Débit efficace.....	21
3.1.4.	Pourcentage du débit solide inframodule	22
3.1.5.	Distribution globale des débits solides en fonction des classes de débits	23
3.2.	Langeais.....	23
3.2.1.	Etude des débits liquides.....	23
3.2.2.	Flux solides totaux.....	24
3.2.3.	Débit efficace.....	25
3.2.4.	Pourcentage du débit solide inframodule	25
3.2.5.	Distribution globale des débits solides en fonction des classes de débits	26
3.3.	Pont de Cé.....	26
3.3.1.	Etude des débits liquides.....	26
3.3.2.	Flux solides totaux.....	27
3.3.3.	Débit efficace.....	28
3.3.4.	Pourcentage du débit solide inframodule	29
3.3.5.	Distribution globale des débits solides en fonction des classes de débits	29
4.	Discussion	30
4.1.	Impact du changement climatique sur les flux solides en Loire moyenne	30
4.1.1.	Flux liquides et solides d'un point de vue général.....	30
4.1.2.	Flux solides à l'échelle des classes de débits liquides	31
4.2.	Impacts sur la morphodynamique en Loire moyenne	32
4.3.	Incertitudes et limites	33
5.	Conclusion et perspectives.....	34
6.	Bibliographie	35

Table des figures

Figure 1 : bassin-versant de la Loire découpée en secteurs (d'après Latapie, 2011).	11
Figure 2 : exemples de styles fluviaux	12
Figure 3 : scénarios RCP et ses impacts.....	14
Figure 4 : compartiments du modèle EROS	16
Figure 5 : base de données brutes des débits liquides projetés à l'horizon 2100	16
Figure 6: architecture et organisation des données	17
Figure 7 : distribution de débits solides sur le site de Saint Mathurin sur Loire de 1990 et 2020 (d'après Le Guern 2021, modifié).....	19
Figure 8 : Effectif des classes de débit liquide sur le site de Gien en fonction de scénarios GCM sous un RCP 8.5 sur la période 2040 ; 2069	20
Figure 9 : Evolution du module sur la station de Gien à l'horizon 2100 en fonction des scénarios GCM sous un RCP 8.5	21
Figure 10: débit solide en fonction des classes de débits liquides entre 2040 et 2069, site de Gien...	23
Figure 11 : Effectif des classes de débit liquide sur le site de Langeais en fonction des scénarios GCM sous un RCP 8.5 sur la période 2040 ; 2069	24
Figure 12 : Evolution du Q _{mod} sur la station de Langeais à l'horizon 2100 en fonction des scénarios GCM sous un RCP 8.5	24
Figure 13 : Effectif des classes de débits sur le site des Ponts-de-Cé sous des scénarios GCM, sous un RCP 8.5 entre 2040 et 2069.....	27
Figure 14 : Evolution du Q _{mod} sur la station des Ponts-de-Cé à l'horizon 2100 en fonction des scénarios GCM sous un RCP 8.5	27
Figure 15 : flux total annuel moyen sur les sites de Gien, Langeais et des Ponts de Cé entre 1990 et 2100.....	31
Figure 16 : distribution des débits solides en fonction des classes de débits liquides entre 2040 et 2069 sur la station de Langeais	32

Table des tableaux

Tableau 1 : Correspondance des stations	12
Tableau 2 : Courbes de tarage solides relatives à chaque station d'étude	14
Tableau 3 : flux totaux annuels (t/an) sur le site de Gien	21
Tableau 4 : débit efficace (m^3/s).....	22
Tableau 5 : pourcentage du débit inframodule sur le site de Gien.....	22
Tableau 6 : Flux totaux annuels (t/an) sur le site de Langeais	25
Tableau 7 : Débit efficace sur le site de Langeais.....	25
Tableau 8 : Pourcentage du débit solide inframodule (%) sur le site de Langeais.....	26
Tableau 9 : flux totaux annuels (t/an) sur le site des Ponts-de-Cé	28
Tableau 10 : Débit efficace sur le site des Ponts-de-Cé	28
Tableau 11 : Pourcentage du débit solide inframodule (%) sur le site des Ponts-de-Cé	29

Table des annexes

Annexe 1 : Effectif des classes de débit liquide sur le site de Langeais en fonction de scénarios GCM sous un RCP 8.5 sur la période 2070 ; 2099	37
Annexe 2: Effectif des classes de débit liquide sur le site de Gien en fonction de scénarios GCM sous un RCP 8.5 sur la période 2070 ; 2099	37
Annexe 3: Débit solide en fonction du débit liquide, station des Ponts-de-Cé, 2040 ; 2069, sous un RCP 8.5.....	38
Annexe 4 : Effectif des classes de débits sur le site des Ponts-de-Cé sous des scénarios GCM, sous un RCP 8.5 entre 2070 et 2099.....	38
Annexe 5: Débit solide en fonction du débit liquide, station de Langeais entre 2070 ; 2099, RCP 8.5	39
Annexe 6: Débit solide en fonction du débit liquide, station des Ponts-de-Cé sur la période 2070 ; 2099, sous un RCP 8.5	39
Annexe 7: Evolution du débit efficace sur les sites de Langeais, Gien et des Ponts-de-Cé entre 1990 et 2099.....	40
Annexe 8: Débit solide en fonction des classes de débits liquides, station de Gien entre 2070 ; 2099 sous un RCP 8.5	40
Annexe 9: Evolution du module sur les stations de Gien, Langeais et des Ponts de Cé entre 1990 et 2099.....	41
Annexe 10: Evolution du rapport Q_{eff} / Q_{mod} sur les stations de Gien, Langeais et des Ponts-de-Cé de 1990 et 2099.....	41
Annexe 11: Evolution du débit solide max sur les stations de Gien, Langeais et des Ponts de Cé entre 1990 et 2099.....	42
Annexe 12: Evolution du pourcentage de transport solide inframodule sur les stations de Gien, Langeais et des Ponts de Cé de 1990 et 2099	42

1. Introduction

Les émissions de gaz à effet de serre depuis les années 1850 ont mené à un changement climatique globalisé, se matérialisant par une hausse des températures de 1 °C. L'ensemble des trois compartiments interdépendants de l'environnement, à savoir l'air, l'eau et le sol, sont impactés, tant sur la composante abiotique que biotique (IPCC, 2023).

Les bassins versants, unité fonctionnelle la plus grande pour un hydrosystème donné (Wintenberger, 2015), sont caractérisés par des variables de forçage qui vont influencer les deux variables de contrôle majeures des cours d'eau : le débit solide et le débit liquide. Le climat, constituant l'une des variables de forçage, va conditionner le cycle hydrologique de l'eau (Bates et al., 2008), ainsi que les caractéristiques des bassins versants (Praskievicz, 2015 ; Baartman *et al.*, 2012). Cela va modifier les apports en eau et en sédiments, et donc avoir un impact sur le débit solide et liquide des cours d'eau.

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a proposé en 2014 quatre scénarios (Representative Concentration Pathways, RCP) permettant différentes projections de hausse de température en fonction de l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre (IPCC, 2014). Ces scénarios RCP sont ensuite utilisés comme variables d'entrée à des modèles simulant l'évolution climatique globale (Global Climate Models, GCM) (Seyedhashemi, 2022), qui eux-mêmes permettent des projections de débits liquide (Moatar *et al.*, 2010 ; Seyedhashemi, 2022). A partir de ces projections, des valeurs de débits solides peuvent être déterminées, grâce notamment à des courbes de tarage solides (Le Guern, 2021 ; Claude, 2012 ; Wolman *et Miller*, 1960).

Avec l'appui d'une modélisation de débits liquide de 2020 à 2100 (Seyedhashemi, 2022) et de lois de tarage (Le Guern, 2021) obtenues sur la Loire, ce travail s'attachera à 1) montrer que les caractéristiques des scénarios climatiques GCM et RCP engendreront différents taux de transports de charge de fond selon les classes de débits liquide, 2) mettre en évidence une modification du débit efficace au regard des différents scénarios, et enfin 3) établir que les scénarios RCP et GCM produisent une variation des taux de transport de charge de fond pour les classes de débits inférieures au module.

2. Matériel et méthode

2.1. La Loire et sites d'études

2.1.1. Présentation du bassin-versant de la Loire

La Loire est le plus long fleuve de France, cumulant un total d'environ 1012 km. Sa source se situe dans le Massif central au niveau du Mont Gerbier de Jonc (07), et le fleuve se jette dans l'océan Atlantique à St-Nazaire (44) (figure 1). La trajectoire spatiale de la Loire, dans le sens de l'écoulement, peut être définie comme nord-ouest et s'infléchit dans l'Orléanais pour poursuivre un cours orienté ouest jusqu'à l'embouchure. Les principaux affluents sont, de l'amont vers l'aval, l'Allier, le Cher, l'Indre, la Vienne, ainsi que la Maine (Rodrigues, 2004). La Loire peut être découpée selon trois secteurs, à savoir : la Loire amont (de la source au bec d'Allier (58)), la Loire moyenne (du bec d'Allier au bec de Maine (49)), ainsi que la Loire aval (du bec de Maine à l'embouchure (44)).

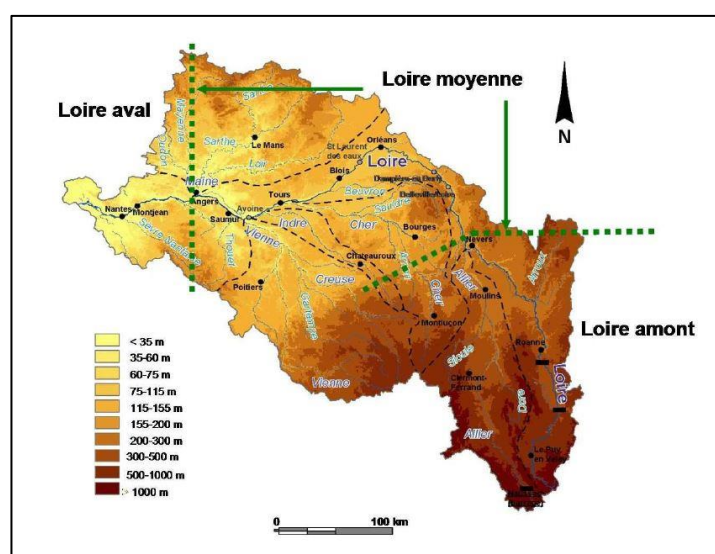


Figure 1 : bassin-versant de la Loire découpée en secteurs (d'après Latapie, 2011).

2.1.2. Caractéristiques de la Loire moyenne

2.1.2.1. *Caractéristiques hydrologiques et climatiques*

L'hydrologie de la Loire est liée aux variabilités climatiques et topographiques de son bassin-versant. Les précipitations importantes au caractère parfois soudain localisées en amont du bassin, associées aux fortes pentes provoquent des crues dites cévenoles. Les crues pouvant survenir en Loire moyenne sont plutôt liées aux pluies provenant de l'Ouest (Dacharry, 1996), à hauteur de 813 mm/an (Moatar *et al.*, 2010). Concernant la température atmosphérique moyenne annuelle sur la période 1985 – 2012 en Loire moyenne, elle s'élève à 11,2 °C, ce qui est assez doux et typique d'un climat océanique (Beaufort, 2015).

Le module (débit médian, m³/s) en Loire moyenne varie de 180 m³/s à Nevers (58) à 670 m³/s à Saumur (49) (Le Guern, 2021). Le régime hydrologique de la Loire moyenne est marqué par une variabilité intermensuelle et interannuelle (Dacharry, 1974), avec une alternance d'étiages très prononcés et de crues de grande ampleur. Par exemple, il a été relevé sur la station de Blois (41) 19 m³/s en 1949, et 6000 m³/s à l'occasion de la crue de 1866 (Latapie, 2011).

2.1.2.2. Caractéristiques morphologiques et sédimentaires

La morphologie fluviale de la Loire moyenne évolue entre le bec d'Allier et le bec de Maine. Le style fluvial est anabranché après la confluence avec l'Allier, puis il devient de plus en plus rectiligne à l'aval de Briare (45) jusqu'aux environs de Tours (37) (figure 2). Puis, le style fluvial redevient de type anabranché, du fait de la confluence avec le Cher et la Vienne, avec une pente d'environ 0,4% (Rodrigues, 2004). Les sédiments en Loire moyenne prennent la forme d'un mélange de sable et de graviers (Le Guern, 2021).



Figure 2 : exemples de styles fluviaux

a) Rivière rectiligne (Isère, France), b) rivière à méandre (Allier, France), c) rivière en tresses (Tagliamento, Italie), d) rivière à chenaux multiples (Bella Coola, Canada)

2.1.3. Sites d'études en Loire moyenne

Les sites d'études ont été sélectionnés afin de représenter au mieux la variabilité amont-aval de la Loire moyenne. Ainsi, de l'amont vers l'aval, les sites de Gien (45), de Langeais (37) et des Ponts-de-Cé (49) ont été choisis, et correspondent aux stations de Seyedhashemi (2022) utilisées dans le cadre des projections climatiques des débits liquides à l'horizon 2100. Cependant, les stations employées à la fois pour déterminer les lois de tarage solides et les débits liquides sur la période 1990 ; 2020 ne sont pas les mêmes (tableau 1) :

Tableau 1 : Correspondance des stations

Stations débit liquide Seyedhashemi (2022), période 2020 ; 2100	Stations débit liquide Le Guern (2021), période 1990 ; 2020	Stations loi de tarage
Gien (45)	Givry (18)	Belleville-sur-Loire (18)
Langeais (37)	Langeais (37)	Bréhémont (37)
Ponts-de-Cé (49)	Saumur (49)	St Mathurin sur Loire (49)

Le parti pris de cette étude a été de considérer les stations de débit liquide 1990 ; 2020 et lois de tarage comme étant les mêmes que les stations de débits liquides sur la période 2020 ; 2100.

2.1.3.1. Ensemble amont

Le premier ensemble de site d'études se situe en Loire moyenne amont. Il regroupe les stations de Gien (45) pour les projections de débits liquides sur la période 2020 ; 2100, de Givry (18) pour les prises de débits liquides entre 1990 et 2020, et de Belleville-sur-Loire (18) pour l'établissement de la loi de tarage solide. Le site le plus en amont est celui de Givry, suivit de Belleville-sur-Loire 65 km en aval, et enfin on retrouve le site de Gien 29 km en aval de Belleville-sur-Loire, soit une amplitude de 94 km sur la totalité de l'ensemble Loire moyenne amont.

2.1.3.2. Ensemble médian

Le deuxième ensemble de site d'études se situe 30 km en aval de Tours (37). Les projections climatiques de débits liquides pour la période 2020 ; 2100 ont été effectuées sur le site de Langeais (37), de même pour la prise de débits liquides afin d'estimer un débit solide sur la période 1990 ; 2020. La loi de tarage pour cet ensemble a été établie à Bréhémont (37), environ 6 km en aval de Langeais. L'ensemble médian propose donc une amplitude de distance assez faible entre les stations, ce qui augmentera la crédibilité des résultats.

2.1.3.3. Ensemble aval

Enfin, le dernier ensemble se situe en aval de la Loire moyenne. Le site de Saumur a permis la prise de la chronique de débit entre 1990 et 2020. La station de Saint Mathurin sur Loire, 26 km plus loin, a permis d'établir une loi de tarage solide. Enfin, la station des Ponts de Cés, 15 km en aval, a permis la projection des débits liquides de 2020 à 2100. L'amplitude pour l'ensemble des sites aval de la Loire moyenne est donc de 41 km.

2.2. Matériel

2.2.1. Débits liquides et solides entre 1990 et 2020

La première partie des données à disposition pour réaliser cette étude sont des débits solides entre 1990 et 2020 par classe de débits liquides pour chacun des sites évoqués ci-dessus. Le Guern (2021) a pu transposer ces chroniques de débits liquides à des débits solides grâce à des lois de tarage solide. Une loi de tarage solide est une relation permettant d'estimer des flux solides à partir de chroniques de débits d'un cours d'eau. L'équation dans sa forme la plus commune fait intervenir deux paramètres (Ferguson, 1986 ; Walling, 1977 ; Gaeuman *et al.*, 2018) (Eq.1) :

$$Q_s = aQ_l^B$$

Eq.1 : forme générale d'une courbe de tarage solide

Où :

- Q_s : Débit solide
- Q_l : Débit liquide
- a et B : paramètres adimensionnels

Le paramètre a est proportionnel à la largeur active du chenal, à la taille moyenne des particules et au débit de mise en mouvement. Le paramètre B quant à lui reflète la configuration morphologique du chenal (Le Guern, 2021). Le tableau 2 présente les lois de tarages des différents sites d'études :

Tableau 2 : Courbes de tarage solides relatives à chaque station d'étude

Sites	Modalité de mise au point de la loi de tarage solide	Loi de tarage (kg/s)	Localisation des stations pour la prise de QI (chroniques effectuées entre 1990 et 2021)
Belleville-sur-Loire (18)	Modèle physique EDF (Sugny, 1979)	$Q_s = 6,3 \times 10^{-5} Q l^{2,06}$	Givry (71)
Bréhémont (37)	Issu de mesures in-situ de Claude (2012) mise à jour par la méthode de régression RMA	$Q_s = 4.10^{-2} Q l^{0,96}$	Langeais (37)
Saint-Maturin-sur-Loire (49)	Mesures réalisées par Le Guern (2021)	$Q_s = 4,5.10^{-4} Q l^{1,5}$	Saumur (49)

Ces lois de tarages seront appliquées aux prévisions de débits liquides sur la période 2020 ; 2100.

2.2.2. Prévisions de débits 2020-2100 sur la base de scénarios GCM et RCP

Le débit solide est conditionné par le débit liquide. Ainsi, pour étudier des prévisions futures de débits solides, il est nécessaire de disposer de données de débit liquides. Un tel travail a été accompli à l'occasion d'une thèse s'intitulant « Influence des retenues d'eau et du changement climatique sur la température des cours d'eau : modélisation à haute résolution et application au bassin de la Loire » (Seyedhashemi, 2022). Les débits ont été modélisés jusqu'en 2100 sur l'ensemble du bassin versant de la Loire, en utilisant des scénarios climatiques RCP et GCM, ainsi que le modèle de modélisation hydraulique EROS (Thiéry et Moutzopoulos, 1992).

2.2.2.1. Scénarios climatiques RCP et GCM

Les scénarios RCP ont été proposés par le GIEC à l'occasion d'un cinquième rapport paru en 2014. Ils traduisent le forçage radiatif ($W.m^{-2}$), ou la quantité de gaz à effet de serre jusqu'en 2100 (figure 3). Les scénarios RCP 2.6 et 8.5 sont des scénarios extrêmes, où le premier représente un monde vertueux où le réchauffement n'excède pas + 2°C, tandis que le second traduit une situation où aucune action n'est prise d'ici 2100, menant à un réchauffement allant jusqu'à + 5,4°C. Les scénarios RCP 4.5 et 6 décrivent des situations intermédiaires, où les émissions se stabilisent à la fin du siècle (Seyedhashemi, 2022).

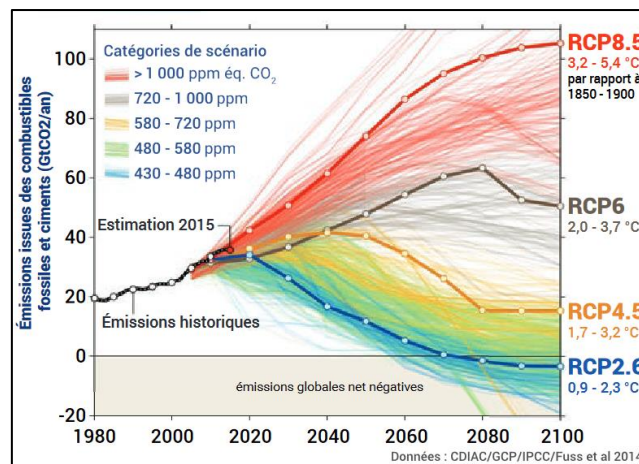


Figure 3 : scénarios RCP et ses impacts

Les scénarios GCM sont des modèles climatiques globaux issus d'une collaboration scientifique internationale nommée CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, 5ème phase). En effet, pour un scénario d'émission donné, le climat simulé diffère d'un modèle à un autre. Il est donc nécessaire de considérer de larges ensembles de projection climatiques. Cependant, ces GCM intègrent une résolution spatiale faible (150 à 200 km), ce qui a conduit la communauté à utiliser des RCM (Regional Climate Models) s'inscrivant dans un programme s'intitulant Cordex (pour l'Europe, Euro-Cordex), et dont la résolution spatiale ne dépasse pas 12 km. Chaque GCM/RCM sont développés selon un cadre commun, à savoir selon les scénarios d'émissions RCP (Soubeyroux *et al.*, 2020).

A l'échelle de la France, la DRIAS (Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement) a pour objectif de produire des scénarios climatiques à haute résolution à l'horizon 2100. Un jeu de données couvrant trois scénarios d'émissions (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5) ainsi que 12 couples GCM/RCM a été produit en 2020, quantifiant trois variables : température et humidité de l'air, précipitations solide et liquide, et vitesse du vent (Soubeyroux *et al.*, 2020).

Ce jeu de données a été utilisé par Seyedhashemi (2022) dans un objectif de modéliser les débits jusqu'à 2100 sur le bassin de la Loire. Trois couples GCM/RCM ont été sélectionnés : IPSL-CM5A/MRWF381P (chaud et humide), HadGEM2/CCLM4-8-17 (chaud et sec), ainsi que CNRMCM5-LR/ALADIN63 (intermédiaire).

2.2.2.2. *Modèle EROS : prévisions de débits*

Le modèle EROS (Écoulement dans une Rivière Organisée en Sous-bassins) (Thiéry et Moutzopoulos, 1992) a été utilisé par Seyedhashemi (2022) afin de modéliser des débits journaliers sur l'ensemble du bassin versant de la Loire. Ce modèle fonctionne selon une division en sous-bassins, où chacun est régi par des données de précipitations et d'évapotranspiration. Trois réservoirs permettent de distinguer différents types de flux liquides (figure 4) :

- Le sol, sujet à la réception de précipitations et à l'évapotranspiration.
- La zone vadose (couche souterraine non saturée en eau), qui permet d'établir la répartition entre le ruissellement et l'infiltration.
- L'aquifère souterraine, permettant de déterminer le flux solide souterrain.

Le flux liquide pour chaque sous-bassin est la somme du ruissellement, des eaux contenues dans le sol ainsi que des flux solides des sous bassins situés en amont. Le travail de Seyedhashemi (2022) a consisté en l'emploi du modèle EROS sur la base des métriques caractérisant les scénarios climatiques définis précédemment. Ainsi, sept types de débits journaliers ont pu être produits sur 368 sous bassins sur le bassin versant de la Loire, à savoir $(2 \text{ GCM/RCMs} \times 2 \text{ RCP}) + (1 \text{ GCM/RCM} \times 3 \text{ RCP})$, et ce de 2020 à 2100.

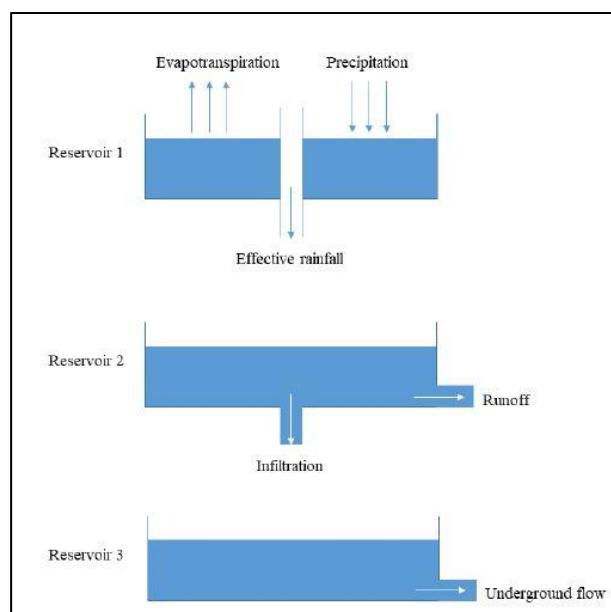


Figure 4 : compartiments du modèle EROS

2.3. Méthode

2.3.1. Mise en forme des données des projections de débits liquides

Le jeu de données transmis par Seyedhashemi (2022) est un tableau présentant des débits liquides pour chaque jour entre 2020 et 2100, pour chaque scénario RCP/GCM et pour chaque station, à savoir Gien, Langeais et les Ponts-de-Cé (figure 5).

	CODE_STAT	nom	Date	year	month	Model	rcp26	rcp45	rcp85
1	K4180001	La Loire [avant Villerest] à Gien	2020-01-01	2020	1	HadGEM2/CCLM4-8-17	NA	1407.3685	331.7324
2	K4180001	La Loire [avant Villerest] à Gien	2020-01-01	2020	1	CNRM-CM5/ALADIN63	615.4223	258.8097	156.9584
3	K4180001	La Loire [avant Villerest] à Gien	2020-01-01	2020	1	IPSL-CM5A/WRF381P	NA	1237.4163	479.0337
4	K4180001	La Loire [avant Villerest] à Gien	2020-01-02	2020	1	HadGEM2/CCLM4-8-17	NA	1471.2958	316.3979
5	K4180001	La Loire [avant Villerest] à Gien	2020-01-02	2020	1	CNRM-CM5/ALADIN63	649.3197	243.3684	153.9007
6	K4180001	La Loire [avant Villerest] à Gien	2020-01-02	2020	1	IPSL-CM5A/WRF381P	NA	1313.9475	488.9293

Figure 5 : base de données brutes des débits liquides projetés à l'horizon 2100

Pour chaque station, trois sous-ensembles correspondants aux trois scénarios GCM (IPSL, CNRM et Had) ont été extraits. Ces trois sous-ensembles ont eux-mêmes été subdivisés en trois sous-ensemble correspondant aux tranches temporelles 2020 ; 2039, 2040 ; 2069, ainsi que 2070 ; 2099 (figure 6, exemple avec le site de Gien). Ainsi, sur l'ensemble des trois stations, 27 tableaux ont été obtenus (9 par stations).

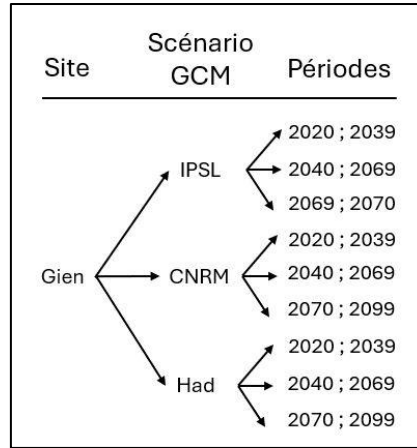


Figure 6: architecture et organisation des données

Les périodes 2040 ; 2069 ainsi que 2070 ; 2099 correspondent aux périodes sur lesquelles Seyedhashemi (2022) a basé ses analyses. Ainsi, dans un souci de comparaison, les mêmes tranches temporelles ont été choisies pour mener cette étude. La tranche 2020 ; 2039 a été rajoutée afin de faire le lien entre la période 1990 ; 2020 et les tranches temporelles 2040 ; 2069 et 2070 ; 2099, cependant le fait que le nombre d'année diffère (20 années au lieu de 30) n'a pas facilité la comparaison de résultats. Ainsi, cette période a été traitée mais les résultats issus de cette dernière ne seront pas explicités dans ce rapport. Enfin, afin de mieux cadrer les résultats, l'ensemble des analyses ont été menées sous un RCP 8.5, qui est par ailleurs le scénario le plus probable avec une augmentation de + 3,2°C à l'horizon 2100 (IPCC, 2023).

2.3.2. Création de données

2.3.2.1. Calcul d'un taux de transport moyen annuel pour chaque classe de débits

L'objectif de ce travail est de décrire l'influence du changement climatique sur le débit solide en Loire moyenne, et plus spécifiquement la distribution du débit solide en fonction de classes de débits liquides. Pour cela, la méthodologie employée par Wollman et Miller (1960) ou encore Biedenharn *et al.*, (2001) et reprise par Le Guern (2021) a été appliquée aux débits projetés à l'horizon 2100 sur trois sites d'étude. Ainsi des classes de débits ont été appliquées pour chaque jeu de données de débits journaliers projetés, et ce pour l'ensemble des périodes et des sites. Dans un souci de comparaison avec la période 1990 ; 2020, les classes de Le Guern (2021) sont reprises. Pour créer des classes sur l'ensemble des jeux de données de débits journaliers projetés, la fonction *cut* (Becker *et al.*, 1988) du langage de programmation R (R Core Team, 2021) est utilisée avec comme arguments les classes de Le Guern (2021).

Puis, l'effectif de chaque classe de débits et la médiane sont respectivement déterminés grâce aux fonctions *length* et *median*. L'effectif et la médiane de chaque classe de débits vont permettre de déterminer l'efficacité de la participation de chaque classe de débits liquides au transport solide grâce à l'équation 2 :

$$Qs_i = \frac{a * MedQL_i^B * EffQL_i * 24 * 3600}{1000 * N_{année}}$$

Eq.2 : calcul d'un taux de transport pour une classe de débit liquide i sur N année

Avec :

- Q_{si} : flux solide correspondant à la classe de débit i (t/an).
- a et B : paramètres de la loi de tarage solide relative au site étudié (tableau 2)
- $MedQ_{li}$: médiane de la classe de débit i (m^3/s).
- $EffQ_{li}$: effectif de la classe de débit i
- $N_{année}$: nombre d'année de la période étudiée. Ici, $N_{année} = 30$

La loi de tarage solide est initialement en kg/s, et l'objectif est d'obtenir un flux solide moyen annuel par classe de débit i . Ainsi, il est nécessaire de multiplier le dénominateur de l'équation 2 par $24 * 3600$ pour obtenir des kg / an, puis de diviser par 1000 pour obtenir un flux solide en t/an. Multiplier le dénominateur de l'équation 2 par le paramètre $EffQ_{li}$ va permettre d'obtenir un flux solide moyen par classe de débit i sur $N_{année}$, du fait que ce sont des débits journaliers. Enfin, diviser le tout par $N_{année}$ va permettre d'obtenir un flux solide moyen annuel par classe de débit i sur la période considérée. Cette dernière est égale à 30 pour les périodes 2040 ; 2069 et 2070 ; 2099, et à 20 pour la période 2020 ; 2039.

Afin de quantifier et qualifier l'hydrologie de chaque combinaison sites ; scénarios ; périodes, les effectifs de chaque classe de débits liquides ont été comparés entre eux.

2.3.2.2. Calcul de métriques

De cette distribution du flux solide en fonction des classes de débits, plusieurs paramètres ont été calculés (figure 7) avec l'aide du langage de programmation R (R Core Team, 2021). L'ensemble de ces paramètres ont été calculé pour chaque périodes de chaque scénario GCM, et ce pour l'ensemble des trois sites d'études.

D'un point de vue débits liquides, deux paramètres ont été extraits, tous deux exprimés en m^3/s :

- Q_{mod} : module sur l'ensemble de la période considérée. Ce paramètre a été calculé en utilisant la fonction *median* de la série de données de débit liquide sur la période considérée.
- Q_{eff} : débit efficace sur l'ensemble de la période considérée, correspond à la moyenne de la classe de débit liquide présentant le taux de transport solide le plus élevé. C'est une sorte d'optimum de participation au transport solide entre l'intensité d'un débit et sa fréquence de récurrence. La fonction *max* a été utilisée afin d'identifier le taux de transport solide maximum, suivi d'un *subset* permettant d'identifier le débit liquide correspond à ce maximum.

Puis, deux paramètres de débit solide ont été extraits :

- Q_{Stot} : le débit solide total en t/an, correspondant à la somme cumulée des taux de transport de l'ensemble des classes de débits liquide. La fonction *sum* sur l'ensemble des taux de transports solides calculés par classe de débits liquides (équation 2) a été employée afin de calculer ce paramètre.
- Q_{Smax} : le débit solide correspondant au Q_{eff} en t/an, obtenu en appliquant la fonction *max* sur l'ensemble des taux de transport de l'ensemble des classes de débits liquide.

Enfin, un paramètre adimensionnel a été calculé, il s'agit de la part de flux solide transporté pour des classes de débits liquides inférieures à Q_{mod} . Ce paramètre a été obtenu en identifiant le flux solide correspondant à Q_{mod} , en le divisant par Q_{Stot} , puis en multipliant le tout par 100 afin d'obtenir un pourcentage.

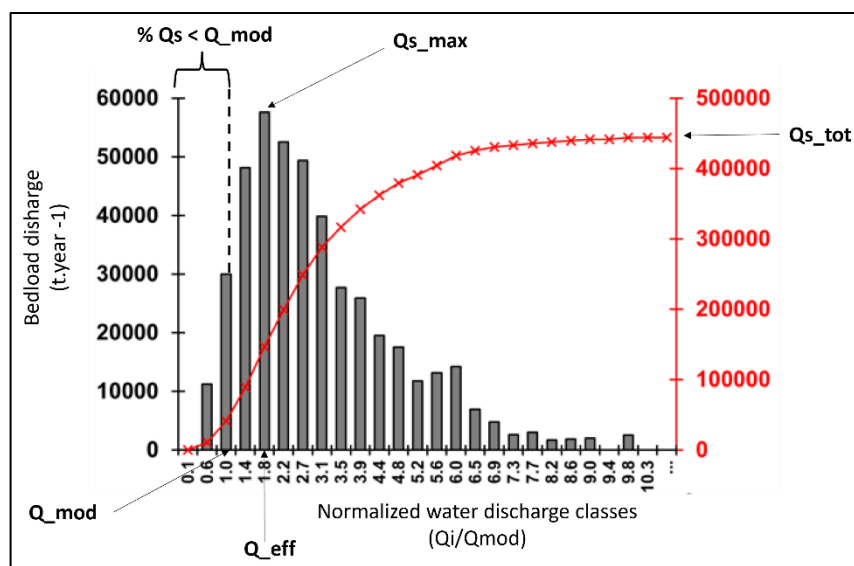


Figure 7 : distribution de débits solides sur le site de Saint Mathurin sur Loire de 1990 et 2020 (d'après Le Guern 2021, modifié)

3. Résultats

3.1. Gien

3.1.1. Etude des débits liquides

Les fréquences de chaque classe de débit définies précédemment ont été investiguées sur le site de Gien sur les périodes 2040 ; 2069 (figure 8) et 2070 ; 2099 (annexe 2). Pour la période 2040 ; 2069, il apparaît que les fréquences des débits de la période 1990 ; 2020 se concentrent beaucoup plus sur une classe, et que les fréquences des débits liquides projetés couvrent plus de classes, notamment dans les hauts débits. Il est également important de relever la fréquence des très bas débits (entre 0 et 43 m³/s) des scénarios climatiques : sur 30 ans, le scénario Had enregistre près de 1500 jours de très bas débits, soit l'équivalent de 4 ans. Les scénarios IPSL et CNRM enregistrent l'équivalent de 1,2 ans de très bas débits, tandis que la période 1990 ; 2020 n'enregistre tout simplement pas de débits inclus dans cette classe. La période 2070 ; 2099 est assez similaire à la période 2040 ; 2069, hormis le fait que le scénario Had fait augmenter les fréquences contenues dans la classe des très bas débits (de 0 à 43 m³/s), avec l'équivalent d'un peu plus de 6 ans de très bas débits.

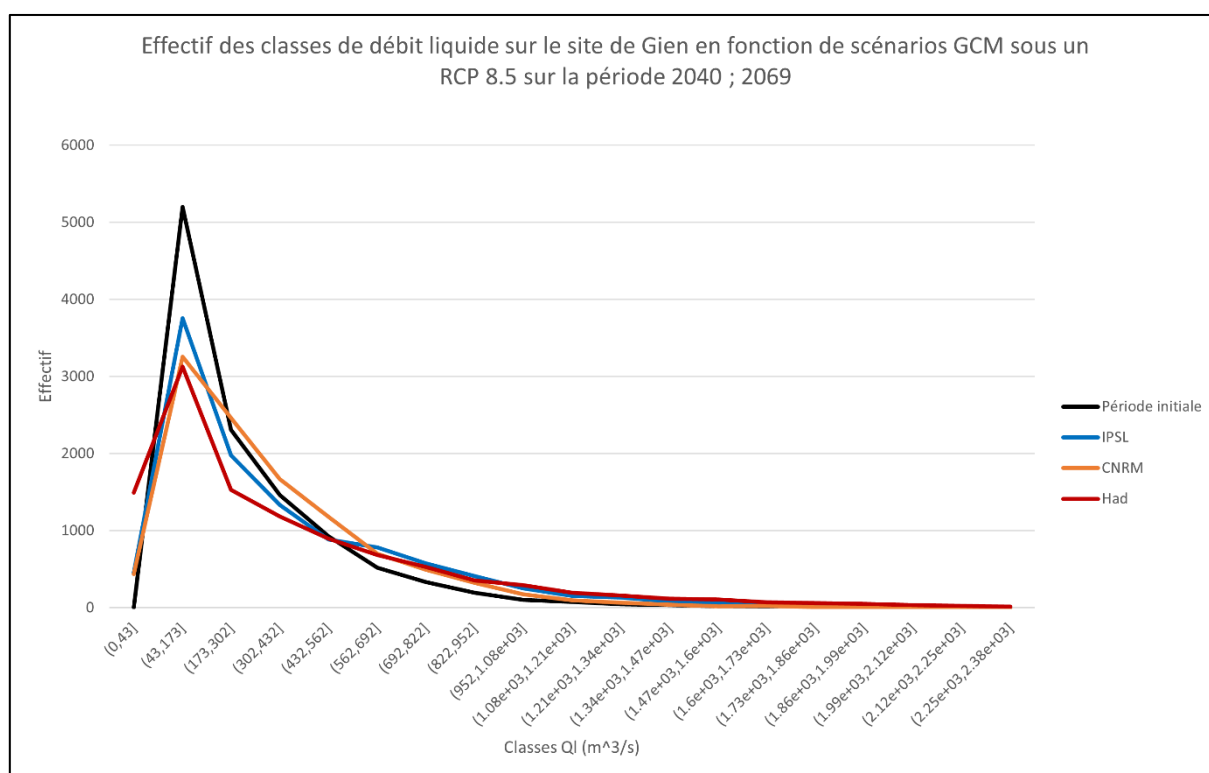


Figure 8 : Effectif des classes de débit liquide sur le site de Gien en fonction de scénarios GCM sous un RCP 8.5 sur la période 2040 ; 2069

Le module sur ce site est décroissant pour le scénario Had de 1990 à 2099, d'une valeur de 300 m³/s à 178 m³/s. Les scénarios IPSL et CNRM voient leur module stabiliser à partir de 2040 (figure 9) aux alentours de 260 m³/s.

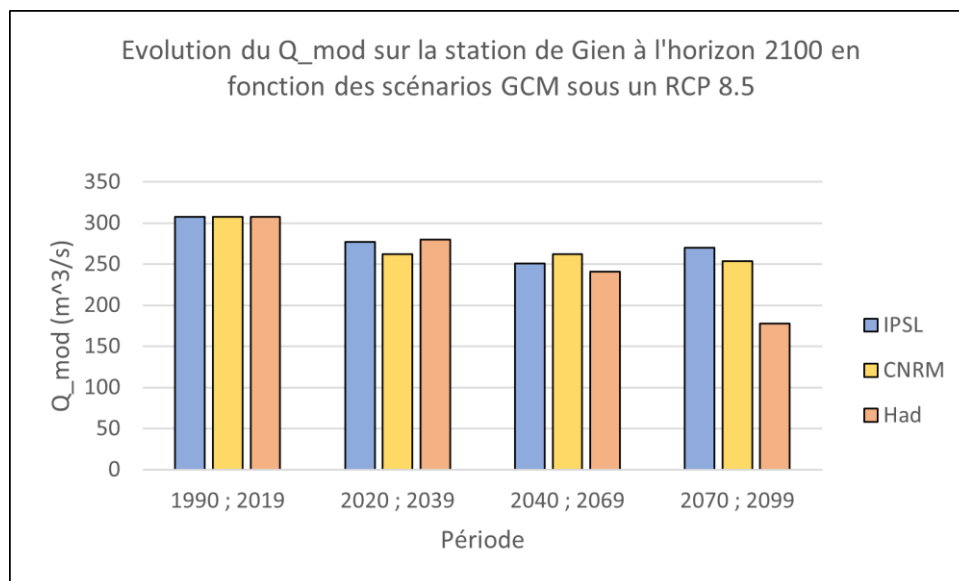


Figure 9 : Evolution du module sur la station de Gien à l'horizon 2100 en fonction des scénarios GCM sous un RCP 8.5

3.1.2. Flux solides totaux

Les flux totaux par an sur la période 2040 ; 2069 sont très différents selon les scénarios. Le scénario où l'on retrouve le taux de transport total le plus grand est le scénario le plus sec, à savoir le scénario Had (1051927 t/an) (tableau 3). A l'inverse, le scénario où le flux total par an est le plus faible est le scénario CNRM, avec 600 308 t/an. Cependant, l'ensemble des scénarios pour la période 2040 ; 2069 montrent une supériorité de flux totaux annuels par rapport à la période de référence 1990 ; 2020. En effet, celle-ci fait état de 444 218 t/an.

Les flux totaux annuels pour la période 2070 ; 2099 (tableau 3) sont assez similaires à la période 2040 ; 2069, cependant le scénario Had n'est plus le scénario où le flux total annuel est le plus important, puisqu'il s'agit du scénario IPSL avec 779 023 t/an. Comme pour la période 2040 ; 2069, l'ensemble des projections montrent des flux totaux annuels supérieurs à la période initiale 1990 ; 2020.

Tableau 3 : flux totaux annuels (t/an) sur le site de Gien

	Flux totaux annuels (t/an)		
	Période de référence (1990 ; 2020)	2040 ; 2069	2070 ; 2099
IPSL	444 218	760 410	779 027
CNRM		600 308	633 952
Had		1 051 927	738 672

3.1.3. Débit efficace

Les débits efficaces ont été calculés pour l'ensemble des scénarios de la période 2040 ; 2069. Il peut être relevé que l'ensemble des débits efficaces des projections climatiques sont supérieurs à celui de la période 1990 ; 2020 (tableau 4) excepté celui de la projection CNRM. Les débits efficaces issus des projections climatiques sont très différents selon les scénarios GCM. Ils s'étendent de respectivement 488 et 882 m³ pour les scénarios CNRM et Had, en passant par une valeur de 748 m³ pour le scénario IPSL.

Les projections de débits efficaces pour la période 2070 ; 2099 sont, comme pour la période 2040 ; 2069, tous supérieurs à celui de la période 1990 ; 2020 (tableau 4). Cependant, à l'inverse de la période mi-siècle, les débits efficaces suivent une même évolution au travers les scénarios GCM, à savoir un débit efficace maximum pour le scénario Had, minimum pour la projection CNRM, et intermédiaire pour le scénario IPSL.

Tableau 4 : débit efficace (m^3/s)

	Débit efficace (m^3/s)		
	Période de référence (1990 ; 2020)	2040 ; 2069	2070 ; 2099
IPSL	492	748	755
CNRM		488	617
Had		882	884

3.1.4. Pourcentage du débit solide inframodule

Le pourcentage du débit solide transporté pour des débits inférieurs au module pour l'ensemble des scénarios climatiques de la période 2040 ; 2069 ont été calculés (tableau 5). Il apparaît que l'ensemble des scénarios comportent des pourcentages bien en deçà de celui de la période 1990 ; 2020, quasiment d'un facteur 6. Le scénario CNRM possède le pourcentage le plus élevé (7,9 %), tandis que le scénario Had possède le pourcentage le plus faible (2,6 %). La projection IPSL adopte une position intermédiaire avec 4,8%.

La période 2070 ; 2099 adopte les mêmes trajectoires que la période 2040 ; 2069 vis-à-vis de la métrique étudiée, avec des pourcentages sensiblement similaires (tableau 5).

Tableau 5 : pourcentage du débit inframodule sur le site de Gien

	Pourcentage du débit solide inframodule (%)		
	Période de référence (1990 ; 2020)	2040 ; 2069	2070 ; 2099
IPSL	33	5	5
CNRM		8	6
Had		3	4

3.1.5. Distribution globale des débits solides en fonction des classes de débits

Les distributions des débits solides en fonction des classes de débits pour chacun des scénarios GCM ont été construites pour la période 2040 ; 2069 (figure 10) ainsi que pour la période 2070 ; 2099 (annexe 8). Ces distributions confirment les résultats décrits précédemment, à savoir que l'ensemble des scénarios, comportent un flux total annuel plus important que la période initiale 1990 ; 2020, et que les débits efficaces des scénarios extrêmes sont plus élevés que les débits efficaces de la période initiale et du scénario CNRM. La distribution du scénario Had pour la période 2040 ; 2069 se démarque car elle fait apparaître une participation beaucoup plus importante des hauts débits liquides au transport solide par rapport aux autres scénarios. Cette participation des hauts débits au transport solide baisse significativement pour la période 2070 ; 2099.

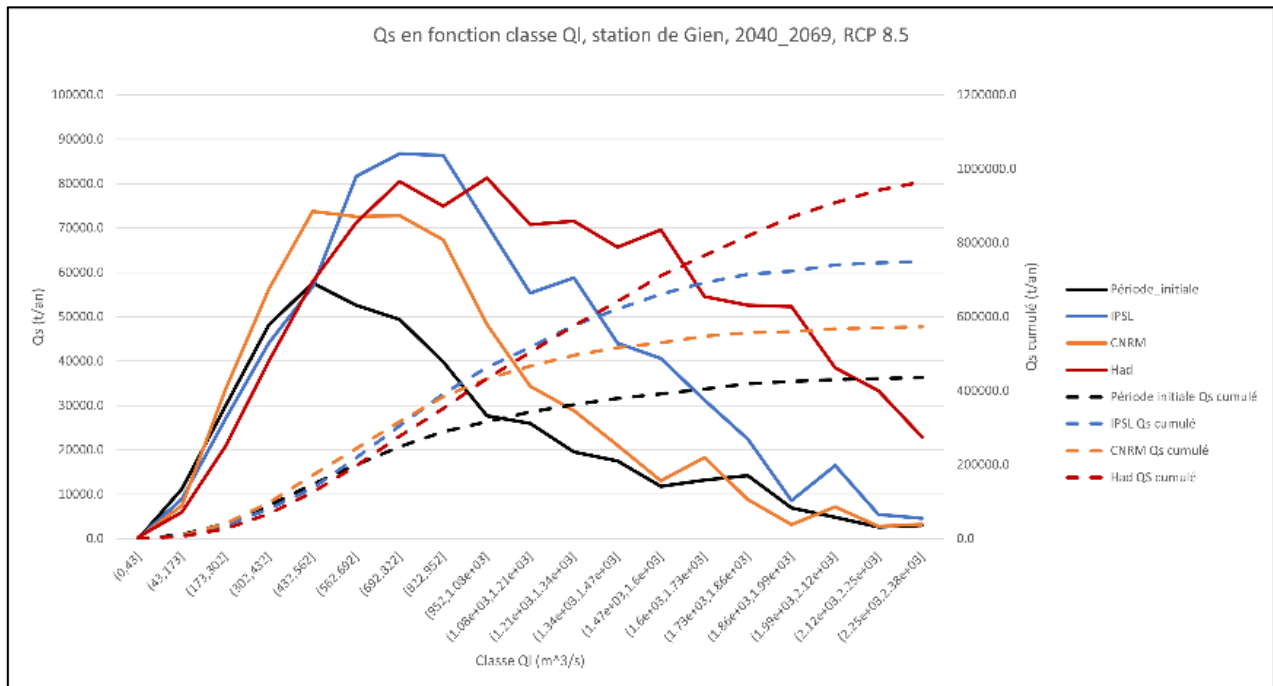


Figure 10: débit solide en fonction des classes de débits liquides entre 2040 et 2069, site de Gien

3.2. Langeais

3.2.1. Etude des débits liquides

Les courbes de fréquences des débits liquides du site de Langeais sur les périodes 2040 ; 2069 (figure 11) et 2070 ; 2099 (annexe 1) ont été étudiées. Ces courbes sont assez similaires au site de Gien dans le sens où les courbes des fréquences de classes de débits des scénarios climatiques couvrent beaucoup plus de classes de débits que celle relative à la période 1990 ; 2020, suggérant des événements de crues plus fréquents. Les étiages extrêmes, comme pour le site de Gien, sont très marqués. En effet, il est observé un équivalent de 3 ans de débits compris entre 0 et 55 m³/s pour le scénario Had de la période 2040 ; 2069, équivalent qui augmente à 5,5 ans pour la période 2070 ; 2099. Comme pour le site de Gien, les très bas débits sont moins marqués pour les scénarios IPSL et CNRM.

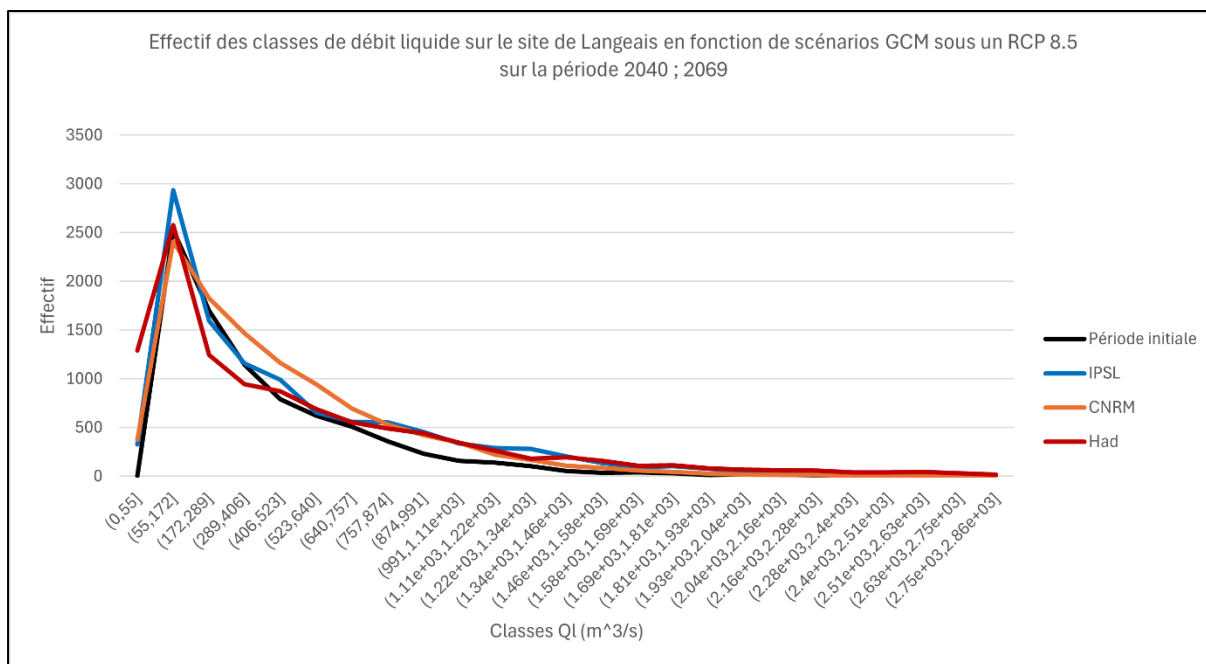


Figure 11 : Effectif des classes de débit liquide sur le site de Langeais en fonction des scénarios GCM sous un RCP 8.5 sur la période 2040 ; 2069

Le module sur ce site est décroissant pour le scénario Had de 1990 à 2099, d'une valeur de 430 m³/s à 252 m³/s. Les scénarios IPSL et CNRM voient leur module stabiliser à partir de 2040 (figure 12) aux alentours de 350 m³/s.

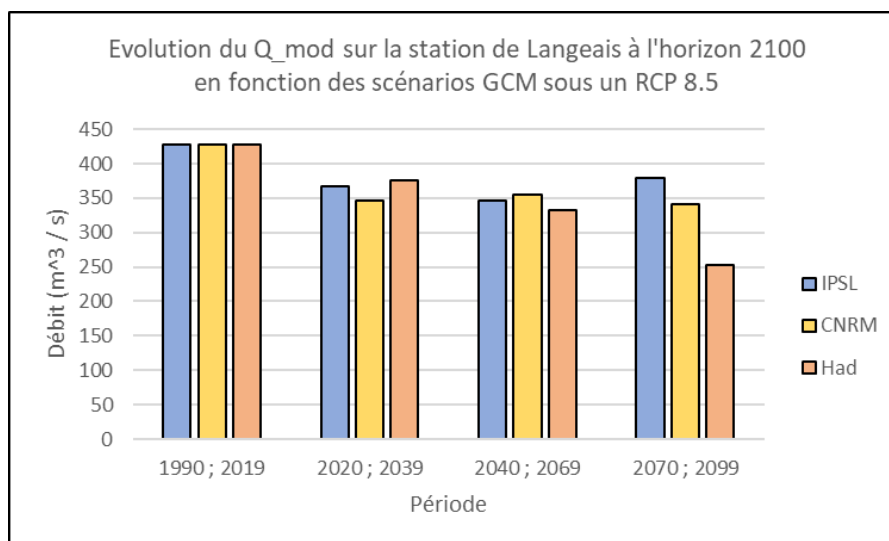


Figure 12 : Evolution du Q_{mod} sur la station de Langeais à l'horizon 2100 en fonction des scénarios GCM sous un RCP 8.5

3.2.2. Flux solides totaux

Les flux solides totaux sont calculés pour les trois périodes (tableau 6). Entre 2040 et 2069, ce sont les deux scénarios extrêmes où le flux solide total annuel est le plus important. Entre 2070 et 2099, le flux solide total annuel semble décroître en fonction du degré de sécheresse de chaque scénario. D'un point de vue inter-période, les flux solides pour les scénarios IPSL et CNRM semblent croître entre 1990 et 2099. Concernant le scénario Had, une hausse de 16 % semble s'opérer entre la période 1990 ; 2020 et 2040 ; 2069, suivi d'une baisse de 13% entre la période 2040 ; 2069 et 2070 ; 2099. Quel que soit la

période et le scénario, les flux solides totaux annuels sont supérieurs à celui de la période de référence 1990 ; 2020.

Tableau 6 : Flux totaux annuels (t/an) sur le site de Langeais

	Flux totaux annuels (t/an)		
	Période de référence (1990 ; 2020)	2040 ; 2069	2070 ; 2099
IPSL	405 897	498 817	518 969
CNRM		448 245	456 396
Had		497 461	440 057

3.2.3. Débit efficace

Les débits efficaces ont été calculés pour les trois périodes (tableau 7). Entre 2040 et 2069, c'est le scénario intermédiaire qui comporte le débit efficace le plus élevé. Cependant pour la période 2070 et 2099, les deux scénarios extrêmes comportent un débit efficace largement supérieur au scénario intermédiaire. D'un point de vue inter période, les débits efficaces des deux scénarios extrêmes ont une évolution croissante de 1990 à 2099. Le débit efficace pour le scénario CNRM augmente de la période 1990 ; 2020 à la période 2040 ; 2069 de 41 %, puis diminue de 25 % entre la période 2040 ; 2069 et 2070 ; 2099. Quelle que soit la période et le scénario, les débits efficaces sont supérieurs à celui de la période de référence 1990 ; 2020.

Tableau 7 : Débit efficace sur le site de Langeais

	Débit efficace (m ³ /s)		
	Période de référence (1990 ; 2020)	2040 ; 2069	2070 ; 2099
IPSL	342	456	813
CNRM		576	459
Had		463	930

3.2.4. Pourcentage du débit solide inframodule

Pour la période 2040 ; 2069, c'est le scénario CNRM où l'on retrouve le pourcentage du débit solide transporté pour des débits inférieurs au module le plus élevé (25%) (tableau 8). A l'inverse, un scénario Had suggère une diminution de ce pourcentage comparativement aux autres scénarios, avec 17%. Concernant la période 2070 ; 2099, ces pourcentages conservent cette même hiérarchie comparativement à la période précédente, à savoir un maximum pour le scénario CNRM (23%) et un minimum pour la projection Had (13%). D'un point de vue inter-période, la participation des classes de débits situées en deçà du module au transport solide ne fait que décroître entre 1990 et 2099. Cependant, une baisse plus forte est visible entre la période 1990 ; 2020 et 2040 ; 2069 qu'entre la période 2040 ; 2069 et 2070 ; 2099. Par exemple pour le scénario Had, ce pourcentage baisse de 82 % entre la période 1990 ; 2020 et 2040 ; 2069, et baisse de 30 % entre 2040 ; 2069 et 2070 ; 2099.

Tableau 8 : Pourcentage du débit solide inframodule (%) sur le site de Langeais

	Pourcentage du débit solide inframodule (%)		
	Période de référence (1990 ; 2020)	2040 ; 2069	2070 ; 2099
IPSL	31	21	20
CNRM		25	23
Had		17	13

3.2.5. Distribution globale des débits solides en fonction des classes de débits

La distribution des débits solides sur la station de Langeais pour l'ensemble des scénarios montrent une participation plus importante des hauts débits au transport solide par rapport à la période de référence 1990 ; 2020 (annexe 5 et figure 16). Ce qui confirme les résultats obtenus précédemment, montrant que les débits inférieurs au module participaient moins au transport solide que ceux de la période initiale. Par ailleurs, la période 2070 ; 2099 fait apparaître que le Qs_{max} (débit solide correspondant au débit efficace) de chaque scénario est inférieur au Qs_{max} de la période de référence (jusqu'à une baisse de 23 % pour le scénario Had).

3.3. Pont de Cé

3.3.1. Etude des débits liquides

Les courbes de fréquences des débits liquides du site des Ponts-de-Cé sur les périodes 2040 ; 2069 (figure 13) et 2070 ; 2099 (annexe 4) ont été étudiées. Ces courbes sont assez similaires au site de Gien et de Langeais, car les courbes des fréquences de classes de débits des scénarios climatiques couvrent beaucoup plus de classes de débits que celle relative à la période 1990 ; 2020, suggérant des événements de crues plus fréquents. Les étiages extrêmes, comme pour le site de Gien et de Langeais, sont très marqués. En effet, il est observé un équivalent de 2,3 ans de débits compris entre 0 et 80 m³/s pour le scénario Had de la période 2040 ; 2069, équivalent qui augmente à 4,5 ans pour la période 2070 ; 2099. Comme pour le site de Gien, les très bas débits sont moins marqués pour les scénarios IPSL et CNRM. A titre de comparaison, 3 jours avec un débit compris entre 0 et 80 m³/s ont été enregistré entre 1990 et 2020.

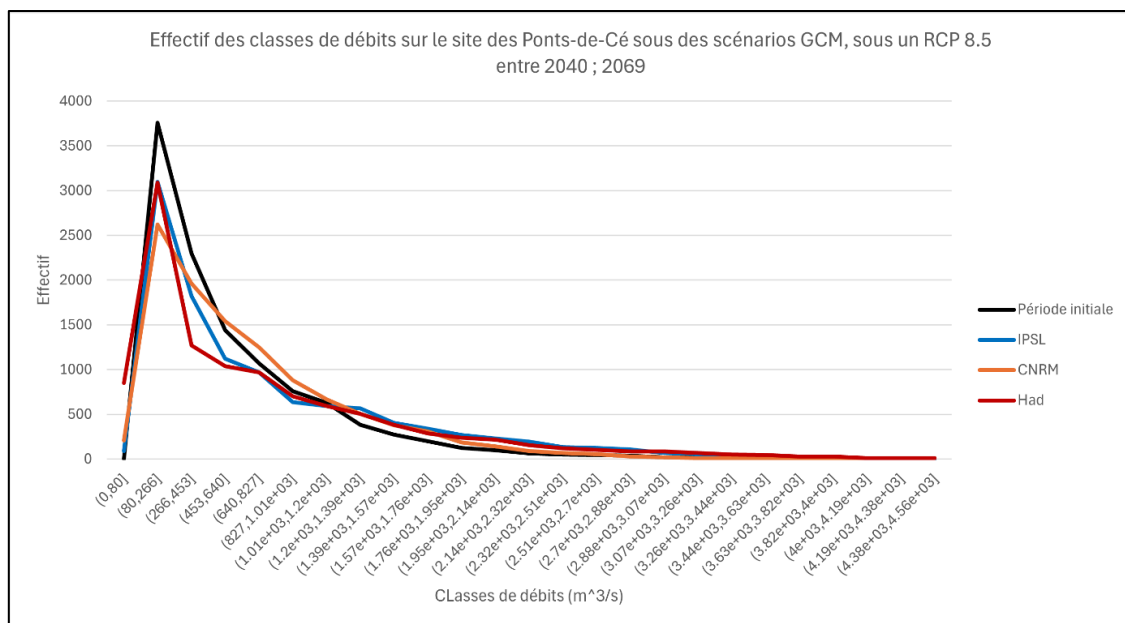


Figure 13 : Effectif des classes de débits sur le site des Ponts-de-Cé sous des scénarios GCM, sous un RCP 8.5 entre 2040 et 2069

Le module sur ce site est décroissant pour le scénario Had de 1990 à 2099, d'une valeur de 690 m³/s à 381 m³/s. Les scénarios IPSL et CNRM voient leur module stabiliser à partir de 2040 (figure 14) aux alentours de 530 m³/s.

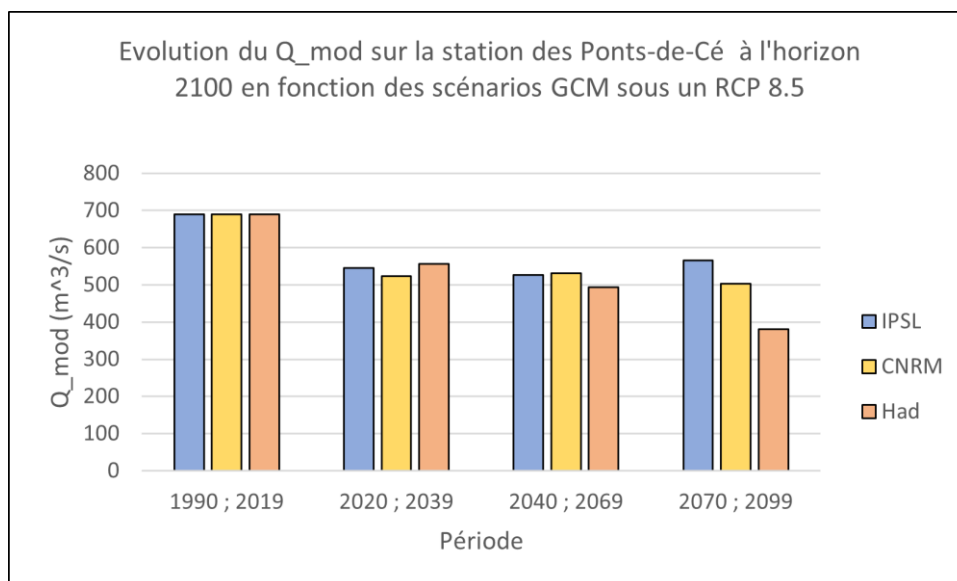


Figure 14 : Evolution du Q_mod sur la station des Ponts-de-Cé à l'horizon 2100 en fonction des scénarios GCM sous un RCP 8.5

3.3.2. Flux solides totaux

Les flux solides totaux annuels ont été calculés pour les trois périodes et pour les trois scénarios (tableau 9). La période 2040 ; 2069 est caractérisée un flux solide total annuel maximum pour le scénario IPSL (417 645 t/an), suivi de près par le scénario Had (405 122 t/an). Le scénario CNRM constitue le minimum, avec 321 742 t/an. Concernant la période 2070 ; 2099, cette hiérarchie est conservée. D'un point de vue inter période, les flux solides totaux annuels augmentent de 1990 à 2099

pour les scénarios IPSL et CNRM, respectivement de 28% et de 8%. Pour le scénario Had, ces flux augmentent jusqu'à la période 2040 ; 2069 de 18%, puis diminuent jusqu'en 2099 de 13%.

Tableau 9 : flux totaux annuels (t/an) sur le site des Ponts-de-Cé

	Flux totaux annuels (t/an)		
	Période de référence (1990 ; 2020)	2040 ; 2069	2070 ; 2099
IPSL	309 974	417 645	418 486
CNRM		321 742	334 353S
Had		405 122	359 978

3.3.3. Débit efficace

Les débits efficaces ont été calculés pour les trois périodes et pour les trois scénarios (tableau 10). Pour la période 2040 ; 2069, les deux scénarios IPSL et Had comportent le débit efficace le plus élevé (respectivement 1290 et 1291 m³/s). Le scénario CNRM quant à lui présente un débit efficace de 918 m³/s. Le débit efficace maximum de la période 2070 ; 2099 est atteint pour une projection IPSL avec 1470 m³/s. Puis on retrouve des débits efficaces assez proches pour les scénarios CNRM et Had, respectivement de 1288 m³/s et 1300 m³/s. D'un point de vue inter période, les débits efficaces suivent une évolution croissante pour les scénarios IPSL et Had (respectivement + 21% et + 15%) et une évolution croissante puis décroissante pour le scénario CNRM entre 1990 ; 2020, 2040 ; 2069 et 2070 ; 2099 (successivement - 20% et + 29%).

Tableau 10 : Débit efficace sur le site des Ponts-de-Cé

	Débit efficace (m ³ /s)		
	Période de référence (1990 ; 2020)	2040 ; 2069	2070 ; 2099
IPSL	1103	1290	1470
CNRM		918	1288
Had		1291	1300

3.3.4. Pourcentage du débit solide inframodule

Pour la période 2040 ; 2069, c'est le scénario CNRM où les débits inférieurs au module participent le plus au transport solide, de même pour la période 2070 ; 2099 (tableau 11). D'un point de vue inter période, ce pourcentage évolue globalement de manière décroissante pour l'ensemble des scénarios entre 1990 et 2099, le maximum étant une baisse de - 63% pour le scénario Had.

Tableau 11 : Pourcentage du débit solide inframodule (%) sur le site des Ponts-de-Cé

	Pourcentage du débit solide inframodule (%)		
	Période de référence (1990 ; 2020)	2040 ; 2069	2070 ; 2099
IPSL	19	10	11
CNRM		15	14
Had		8,5	7

3.3.5. Distribution globale des débits solides en fonction des classes de débits

La distribution globale des débits solides en fonction des classes de débits liquides sur la station des Ponts-de-Cé sous un RCP 8.5 montre bien que les hauts débits dans le cadre de scénarios extrêmes (IPSL et Had) participent davantage au transport solide que les hauts débits de la période 1990 ; 2020 (annexe 3 et 6). Pour des débits situés aux alentours du module ce sont les débits de la période 1990 ; 2020 qui participent le plus au transport solide.

4. Discussion

4.1. Impact du changement climatique sur les flux solides en Loire moyenne

4.1.1. Flux liquides et solides d'un point de vue général

L'influence du changement climatique sur les flux solides et liquides d'un point de vue global vont dans un premier temps être étudiés, à l'aide des métriques Q_{mod} et Q_{tot} . Les résultats étant sensiblement les mêmes pour l'ensemble des sites, la station de Langeais va surtout être évoquée, car c'est elle qui possède la plus grande cohérence de provenance des données (voir partie 2.1.3).

Il a été remarqué au cours de l'analyse des résultats que le module diminuait sur l'ensemble des sites au cours du temps, quel que soit le scénario. Le scénario où la diminution du module est la plus importante est le scénario Had, à savoir chaud et sec. La période 2040 ; 2069 n'est pas caractérisée par une différence notable de module entre les scénarios, cependant la fin de siècle (2070 ; 2099) est marquée par une très grande disparité de modules entre l'ensemble des scénarios, et respecte une même hiérarchie : plus le scénario est sec, plus le module est faible. Ainsi, le scénario Had enregistre une baisse de module de 40% entre 1990 et 2099. Par exemple, sur la station de Langeais pour la période 2040 ; 2069, les effectifs correspondants aux débits compris entre 0 et 55 m³ sont de 1291 pour le scénario Had, 378 pour le scénario CNRM et 328 pour le scénario IPSL (figure 11). Cela signifie que sur 30 ans, il y a environ 1 an d'étiages très sévères pour les scénarios CNRM et IPSL, et environ 3,5 ans d'étiages très sévères pour le scénario Had. Pour la période 2070 ; 2099, les étiages très sévères s'accroissent, puisqu'il est dénombré l'équivalent de 5,5 années d'étiages très sévères pour le scénario Had, et 1,5 an pour le scénario CNRM. Le scénario IPSL fait quant à lui état d'une baisse de la fréquence d'étiages très sévères. A titre de comparaison, sur la station de Langeais entre 1990 et 2020, un seul débit de ce type a été enregistré. Ainsi, cela rejoint les résultats menés par plusieurs études confirmant que les étiages seront plus sévères dans un climat chaud et sec (Seyedhashemi, 2022 ; Moatar *et al.*, 2010) ou encore à des travaux réalisés sur la Seine (Ducharne *et al.*, 2011).

Cependant, le constat n'est pas le même en ce qui concerne les taux de transports moyens annuels, il est même plutôt contraire à l'évolution des modules. En effet, pour les scénarios IPSL et CNRM, le taux de transport moyen annuel augmente de 1990 à 2099. Le taux de transport moyen annuel pour le scénario Had augmente entre la période 1990 ; 2020 et la période 2040 ; 2069, mais diminue jusqu'en 2099. Ce constat apparaît à première vue comme contre-intuitif, car un module inférieur suggère une énergie de mise en mouvement plus faible, et donc un taux de transport plus faible. Plus étonnant encore, il paraît assez surprenant que pour la période 2040 ; 2069, le scénario chaud et sec (Had) comporte un taux de transport équivalent voir supérieur (station de Gien) au scénario chaud et humide (IPSL) (figure 15).

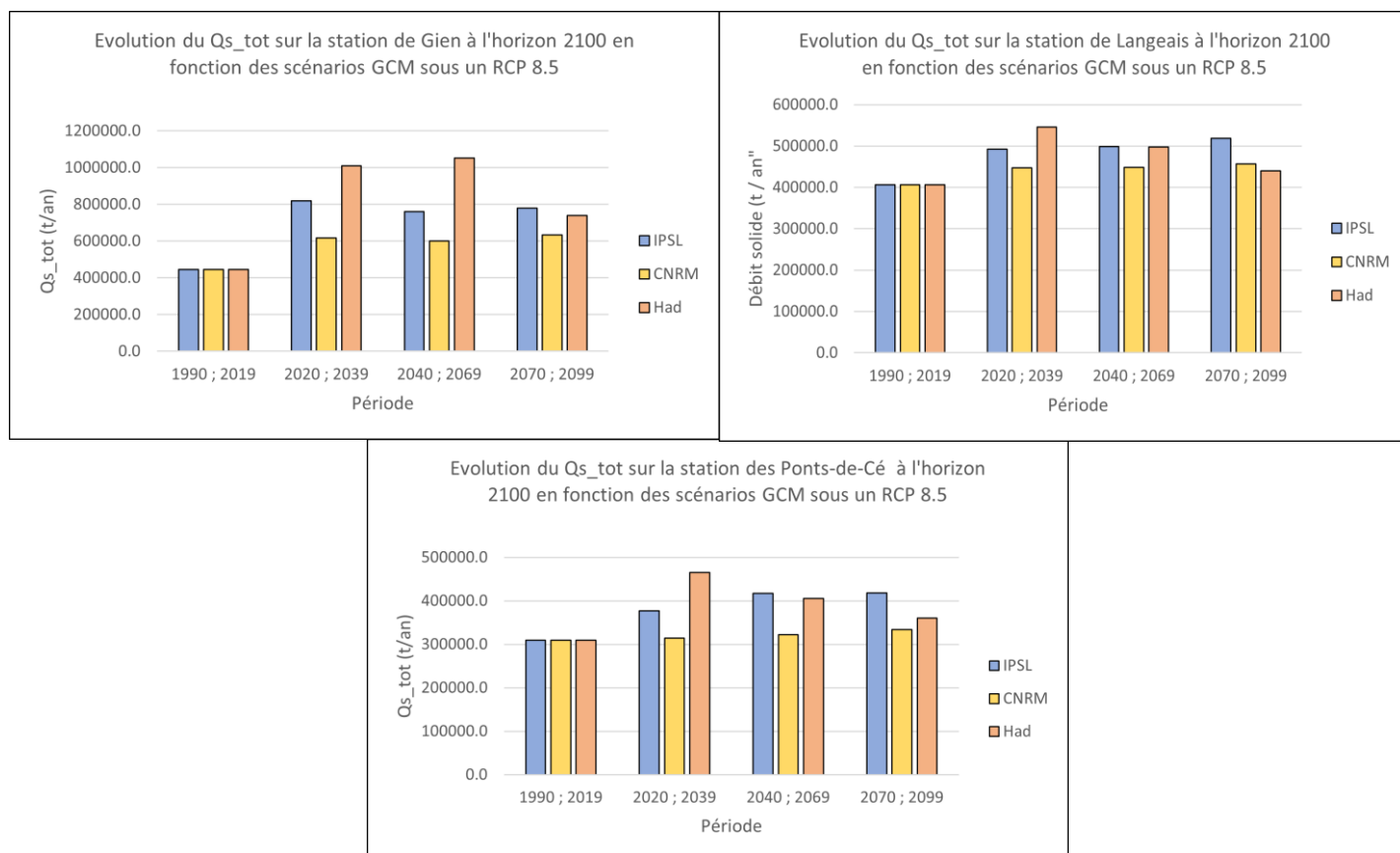


Figure 15 : flux total annuel moyen sur les sites de Gien, Langeais et des Ponts de Cé entre 1990 et 2100

4.1.2. Flux solides à l'échelle des classes de débits liquides

L'étude des paramètres de répartition des débits solides en fonction des débits liquides, plus particulièrement le pourcentage du débit solide inframodule et le débit efficace, vont permettre de comprendre la distribution globale des débits solides et d'étudier la participation de classes de débits liquides au transport solide.

Le Guern (2021) a montré au cours de ses travaux que les débits inférieurs au module contribuaient deux fois plus au transport solide annuel que les débits supérieurs à la crue biennale. Ceci montre la grande mobilité des sédiments même pour des débits inférieurs au module, car ces derniers comportent une fréquence d'occurrence plus grande que les hauts débits. Ainsi, ses travaux ont pu montrer que les débits inférieurs au module contribuaient à hauteur de 33%, 31% et 19% au flux solide moyen annuel sur respectivement les sites de Gien, Langeais et des Ponts-de-Cé. L'application des lois de tarages solides aux débits projetés à l'horizon 2100 montre une baisse importante de ce pourcentage sur l'ensemble des sites. Concernant les scénarios climatiques, c'est le scénario le plus sec (Had) où les débits inférieurs au module participent le moins au transport solide, avec une diminution de plus de 100% entre 1990 et 2099. Cette diminution de la participation des débits inférieurs au module au transport solide est moins marquée pour les scénarios IPSL et CNRM, bien qu'elle soit en aussi deçà de la période 1990 ; 2020. Cette diminution de la participation des débits inférieurs au module au transport solide se traduit par l'augmentation du débit efficace généralisée à l'ensemble des scénarios et des sites : entre 1990 et 2020, le débit efficace reste proche du module (de 0,8 à 1,6 fois le module selon le site), tandis qu'à partir de 2040, ce dernier atteint des valeurs parfois équivalentes à près de 5 fois le module pour le maximum sur le site de Gien, et de manière plus récurrente des valeurs atteignant jusqu'à 3 fois le module sur le site de Langeais et des Ponts-de-Cé.

La diminution d'une part de la participation des débits inférieurs au module au transport solide et d'autre part l'augmentation du débit efficace suggère que le changement climatique, sur globalement l'ensemble des scénarios, indique une participation plus active des classes de débits supérieures au module, là où la participation de ces dernières était limitée entre 1990 et 2020 (Le Guern, 2021). La principale explication se trouve dans les fréquences de débits liquides projetés. Sur l'ensemble des stations, à partir de la classe de débit correspondant au module de la période 1990 ; 2020 et jusqu'à des débits équivalents voir supérieurs à la crue biennale (Q2) de la période 1990 ; 2020, les fréquences de débits liquides de l'ensemble des scénarios climatiques sont supérieures aux fréquences de débits liquides de la période 1990 ; 2020 (figure 11). Ce constat suggère un surplus d'événements extrêmes pour les scénarios climatiques, et entraîne des répercussions directes sur la distribution des débits solides en fonction des classes de débits liquides. Par exemple les distributions de débits solides en fonction des classes de débits liquides sur la station de Langeais entre 2040 ; 2069 montrent que les débits solides projetés à partir du Q2 environ sont supérieurs aux débits solides de la période 1990 ; 2020 (période initiale) (figure 16), de même pour la période 2070 ; 2099.

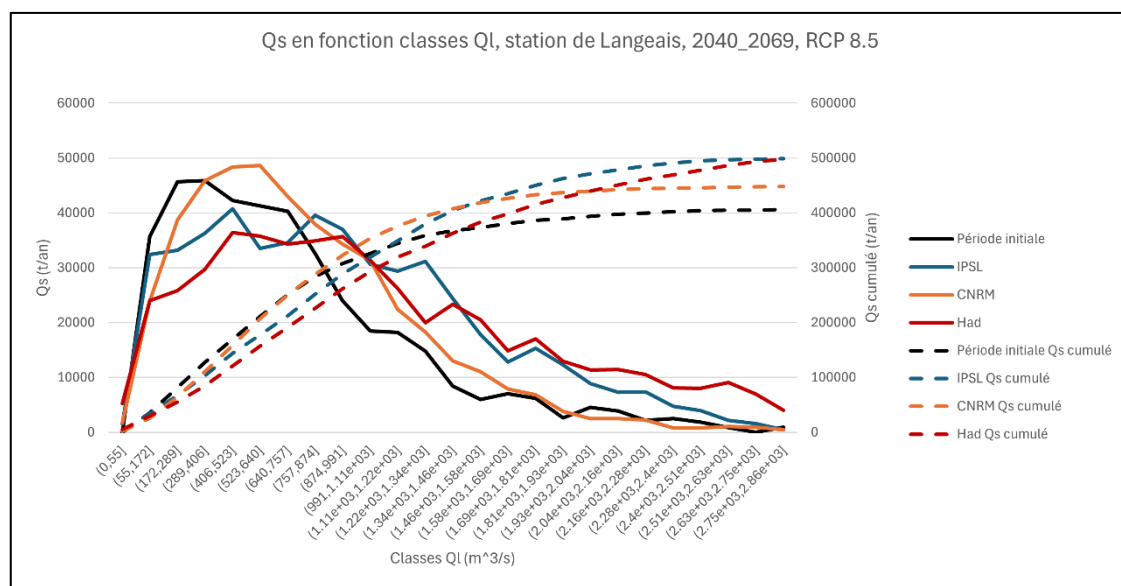


Figure 16 : distribution des débits solides en fonction des classes de débits liquides entre 2040 et 2069 sur la station de Langeais

Cependant, les écarts de fréquence observés dans les hauts débits ne paraissent pas significatifs, mais semblent avoir un grand impact sur la quantification des flux solides. Seulement, dans le cas de la station de Langeais, la loi de tarage est de la forme $Q_s = 4 \cdot 10^{-2} Q_l^{0,96}$, ce qui est quasiment linéaire. Ainsi, 100 jours à 28 m³/s ont le même impact qu'1 jour à 2800 m³/s. Certes, une fréquence importante au sein des débits d'étiage projetés est à signaler, mais les scénarios climatiques, surtout IPSL et Had, mettent en jeu des extremums dans les hauts débits. Même si ces fréquences dans les hauts débits sont moins élevées que dans les bas débits, elles contribuent beaucoup plus au transport solide par leur intensité, en résulte les distributions de débit solide obtenues. Ainsi, dans le cadre de cette modélisation et des conditions associées, le changement climatique provoquerait au sein de cours d'eau sablo-graveleux tel que la Loire une participation plus active des classes de débits supérieures au module, donc un flux solide moins concentré sur une classe comme c'était le cas jusqu'à maintenant.

4.2. Impacts sur la morphodynamique en Loire moyenne

Les étiages plus fréquents et plus sévères couplé à l'incision en cours sur certains secteurs de la Loire (Gazowski, 1994 ; Latapie, 2011), suggèrent une déconnexion progressive des annexes hydrauliques, qui en réponse se végétalisent. Cette végétalisation s'accompagne d'une diminution de la capacité

d'écoulement du cours d'eau et donc à une surélévation des lignes d'eau de crue (Cornier, 2002), pouvant provoquer des inondations, mais aussi donner lieu à un couvert végétal limitant l'érosion (et donc le dépôt) même au sein du chenal principal en cas d'étiages très sévères. Entre 2020 et 2069, le débit solide augmente, mais il peut être remarqué que ce dernier diminue jusqu'en 2100 notamment pour le scénario le plus sec (Had). Associé à cette végétalisation du lit, le transport solide va peut-être diminuer constamment, donnant lieu à une diminution de la dynamique des macroformes et à un style à chenal unique.

4.3. Incertitudes et limites

Cette étude comporte plusieurs incertitudes et limites qu'il convient d'évoquer. Tout d'abord, l'inéquation de la localisation des stations est problématique. En effet, la distribution des débits solides en fonction des classes de débits liquides provient de trois types de données différents : les débits liquides entre 1990 et 2020, la loi de tarage, ainsi que les débits liquides projetés à l'horizon 2100. A l'exception du site de Langeais, ces trois types de données proviennent de sites différents et parfois sont assez éloignés les uns des autres (jusqu'à 94 km d'amplitude pour le site de Gien). Ces amplitudes de distance élevées augmentent les incertitudes, avec par exemple la présence d'affluents entre les stations augmentant les données de débits liquides.

De plus, les lois de tarage solides sont supposées fixes d'ici 2100, ce qui suggère que la morphologie de la Loire ne change pas d'ici la fin du siècle. Or, la Loire est caractérisée par une dynamique morphologique importante, en particulier concernant la végétation (Cornier 2002), les chenaux secondaires ou encore les barres sédimentaires (Rodrigues, 2004). De plus, les lois de tarage reflètent des conditions locales d'écoulement (Le Guern, 2021), tandis que les débits projetés à l'horizon 2100 sont issus du modèle EROS (Thiéry et Moutzopoulos, 1992) et donnent des résultats de débits à grande échelle (Seyedhashemi, 2022). Enfin, ce modèle EROS fait ressortir des phénomènes crus extrêmes, cependant plusieurs travaux (Moatar *et al.*, 2010 ; Ducharne *et al.*, 2011) s'accordent sur l'incertitude quant à la prévision de ces crues extrêmes, au contraire de l'augmentation des périodes d'étiages qui sont certaines.

5. Conclusion et perspectives

Ce travail s'est donc attaché à étudier l'influence du changement climatique sur le transport solide de trois sites en Loire moyenne, sur la base de débits projetés de trois scénarios climatiques à l'horizon 2100. Il a été démontré que le changement climatique était caractérisé d'une part par une baisse du module, mais aussi par l'apparition d'événements extrêmes comme des étiages plus sévères et plus longs ainsi que des crues intenses et plus nombreuses. Ces dernières, bien que plus difficilement prédictibles que les étiages dans le cadre d'un changement climatique, vont fortement orienter la distribution des débits solides, à savoir : une plus grande participation des classes de débits supérieure au module au transport solide, entraînant un plus grand taux de transport moyen annuel, et ce malgré une diminution du module. Les études de chroniques de débits liquides pré 2020 ont montré que les débits inférieurs au module avaient une plus forte capacité de transport du fait de leur fréquence élevée, et le changement climatique semble réduire cette participation des débits inférieurs au module et augmenter la part de transport solide pour des débits supérieurs au module.

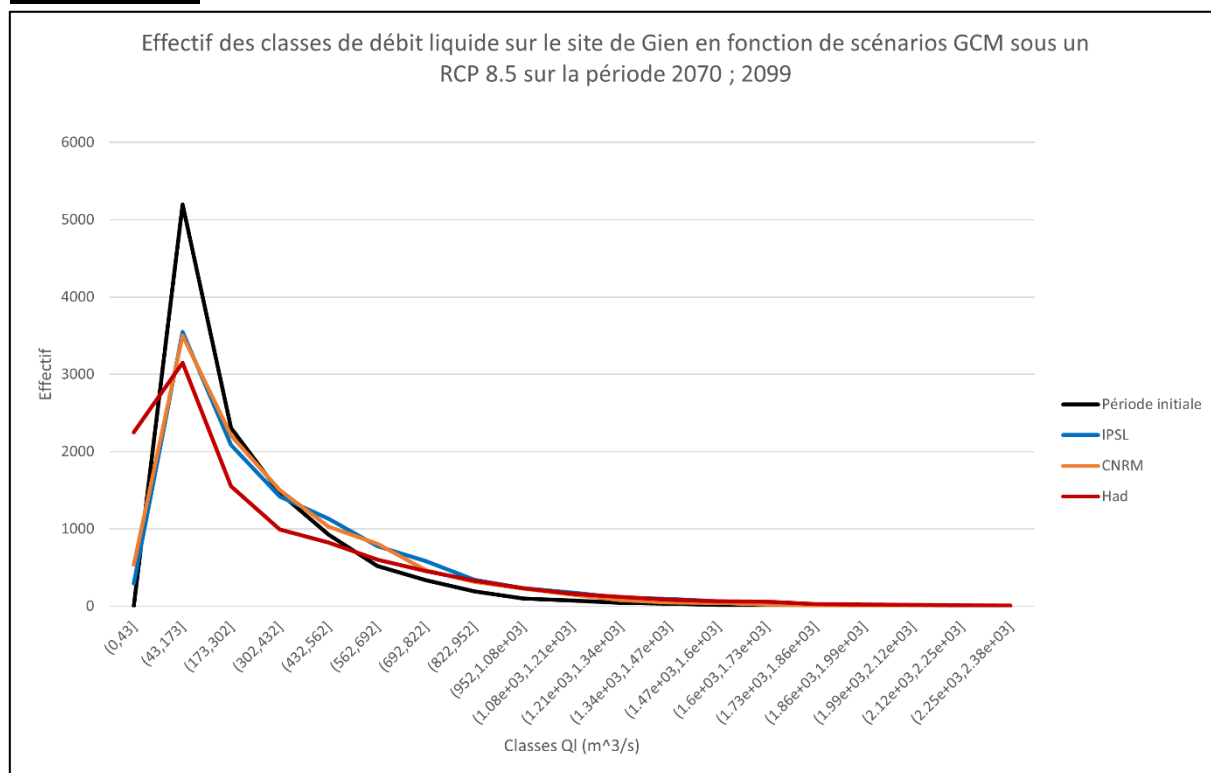
Les perspectives à ce travail pourraient être de 1) mettre à jour les lois de tarage solide (la courbe de tarage de Belleville-sur-Loire date de 1979 (Sugny, 1979)), 2) multiplier les campagnes d'établissement de courbes de tarages solides, notamment avec de nouvelles technologies moins chronophage et intrusive (hydrophone par exemple) et en prenant mieux en compte les phénomènes de végétalisation, et enfin 3) de poursuivre les recherches relatives au régime futur des crues, encore incertain mais qui influencent grandement le transport solide dans un contexte de changement climatique caractérisés par des événements extrêmes.

6. Bibliographie

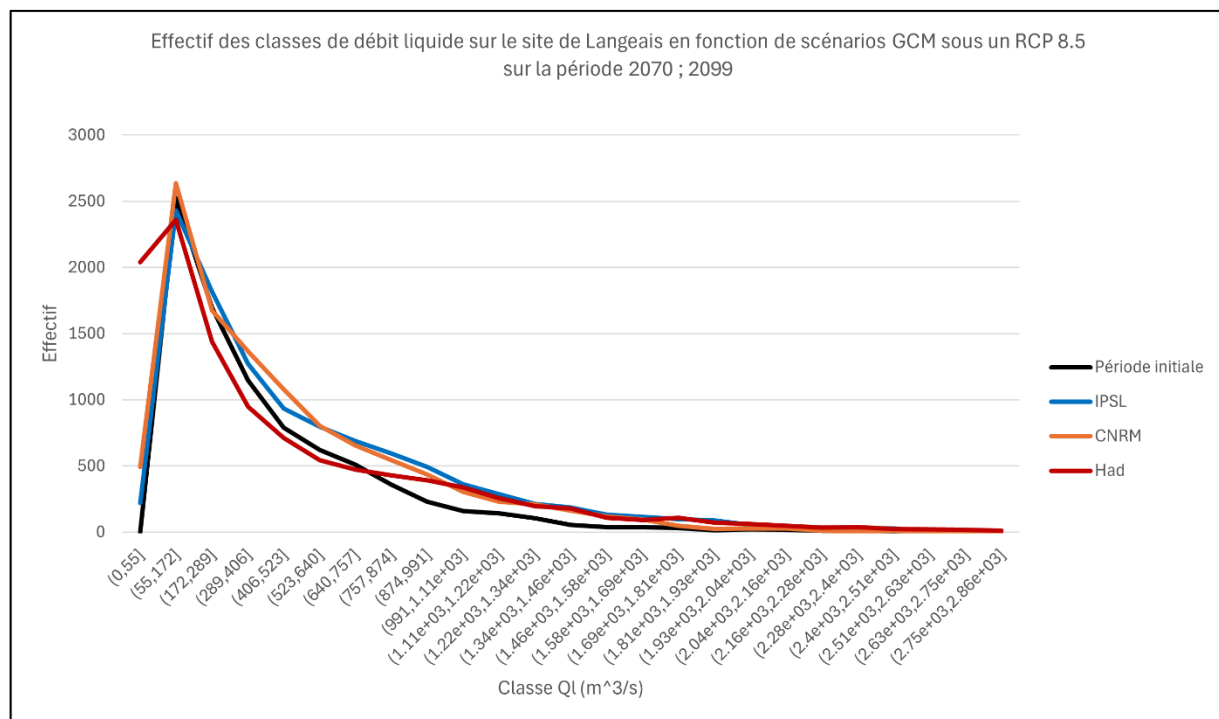
- Baartman, J. E., Van Gorp, W., Temme, A. J., & Schoorl, J. M. (2012). Modelling sediment dynamics due to hillslope–river interactions: incorporating fluvial behaviour in landscape evolution model LAPSUS. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(9), 923-935.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (2008). Le changement climatique et l'eau. Document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, éd.
- Beaufort, A. (2015). Modélisation physique de la température des cours d'eau à l'échelle régionale: application au bassin versant de la Loire (Doctoral dissertation, Tours).
- Becker, R. A., Chambers, J. M. and Wilks, A. R. (1988) *The New S Language*. Wadsworth & Brooks/Cole.
- Biedenharn, D. S., Thorne, C. R., Soar, P. J., Hey, R. D. and Watson, C. C. (2001). Effective discharge calculation guide, *Int. J. Sediment Res.*, 16 (4), 445–459.
- Claude, N. (2012). Processus et flux hydro-sédimentaires en rivière sablo-graveleuse: influence de la largeur de section et des bifurcations en Loire moyenne (France) (Doctoral dissertation, Tours).
- Cornier, T. (2002). La végétation alluviale de la Loire entre le Charolais et l'Anjou: essai de modélisation de l'hydrosystème (Doctoral dissertation, Université François Rabelais-Tours).
- Dacharry, M. (1974). Hydrologie de la Loire en amont de Gien. Nouvelles éditions latines.
- Dacharry, M. (1996). Les grandes crues historiques de la Loire. *La Houille Blanche*, (6-7), 47-53.
- Ducharne, A., Sauquet, E., Habets, F., Deque, M., Gascoin, S., Hachour, A., ... & Vienneot, P. (2011). Potential evolution of the Seine River flood regime under climate change [Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique]. *La Houille Blanche-Revue internationale de l'eau*, 1(1), 51-57.
- Ferguson, R. I. (1986). River loads underestimated by rating curves. *Water resources research*, 22(1), 74-76.
- Gaeuman, D., Stewart, R. L., & Pittman, S. (2018). Toward the prediction of bed load rating curve parameter values: the influence of scale, particle size, and entrainment threshold. *Water Resources Research*, 54(5), 3313-3334.
- Gasowski, Z. (1994). L'enfoncement du lit de la Loire/the entrenchment of the Loire's river bed. *Géocarrefour*, 69(1), 41-45.
- Latapie, A. (2011). Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial: application à la Loire moyenne (Doctoral dissertation, Université François Rabelais-Tours).
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., ... & Park, Y. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Le Guern, J. (2021). Morphodynamique d'un lit fluvial sablo-graveleux : méthodes acoustiques de quantification de la charge de fond et analyse des interactions des formes du lit dans les chenaux ligériens (Doctoral dissertation, Tours).
- Moatar, F., Ducharne, A., Thiéry, D., Bustillo, V., Sauquet, E., & Vidal, J. P. (2010). La Loire à l'épreuve du changement climatique. *Géosciences*, 12, 78-87.
- Praskievicz, S. (2015). A coupled hierarchical modeling approach to simulating the geomorphic response of river systems to anthropogenic climate change. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(12), 1616-1630.
- Rodrigues, S. (2004). Dynamique sédimentaire et végétation: évolution de chenaux fluviaux en Loire moyenne (France) (Doctoral dissertation, Tours).
- Seyedhashemi, H. (2022). Influence des retenues d'eau et du changement climatique sur la température des cours d'eau : modélisation à haute résolution et application au bassin de la Loire (Doctoral dissertation, Tours).

- Soubeyroux, J.-M. et al. (2020). Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole. Technical report, METEO FRANCE.
- Sugny, C. (1979). Centrale nucléaire de Belleville-sur-Loire : modèle sédimentologique de la Loire, essais complémentaires, rapport EDF E43/79-45.
- Team, R. C. (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2012.
- Thiéry, D., & Moutzopoulos, C. (1992, September). Un modèle hydrologique spatialisé pour la simulation de très grands bassins: le modèle EROS formé de grappes de modèles globaux élémentaires. In VIIIèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM: Régionalisation en hydrologie, application au développement (pp. 285-295). ORSTOM Editions.
- Walling, D. E. "Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin." *Water resources research* 13.3 (1977): 531-538.
- Wintenberger, C. (2015). Dynamique fluviale et végétation pionnière à la Salicaceae en rivière sablo-graveleuse: études in et ex situ de la survie des semis durant les premiers stades de la succession biogéomorphologique en Loire Moyenne (Doctoral dissertation, Tours).
- Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1960). Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *The Journal of Geology*, 68(1), 54-74.

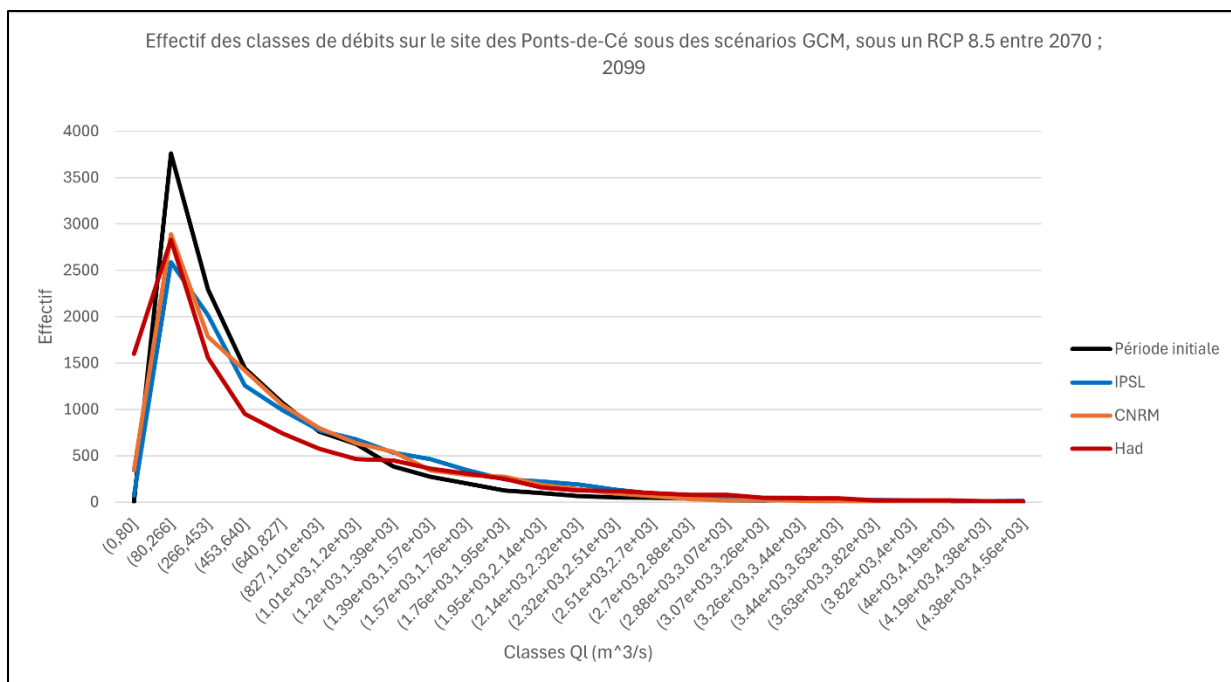
Annexes



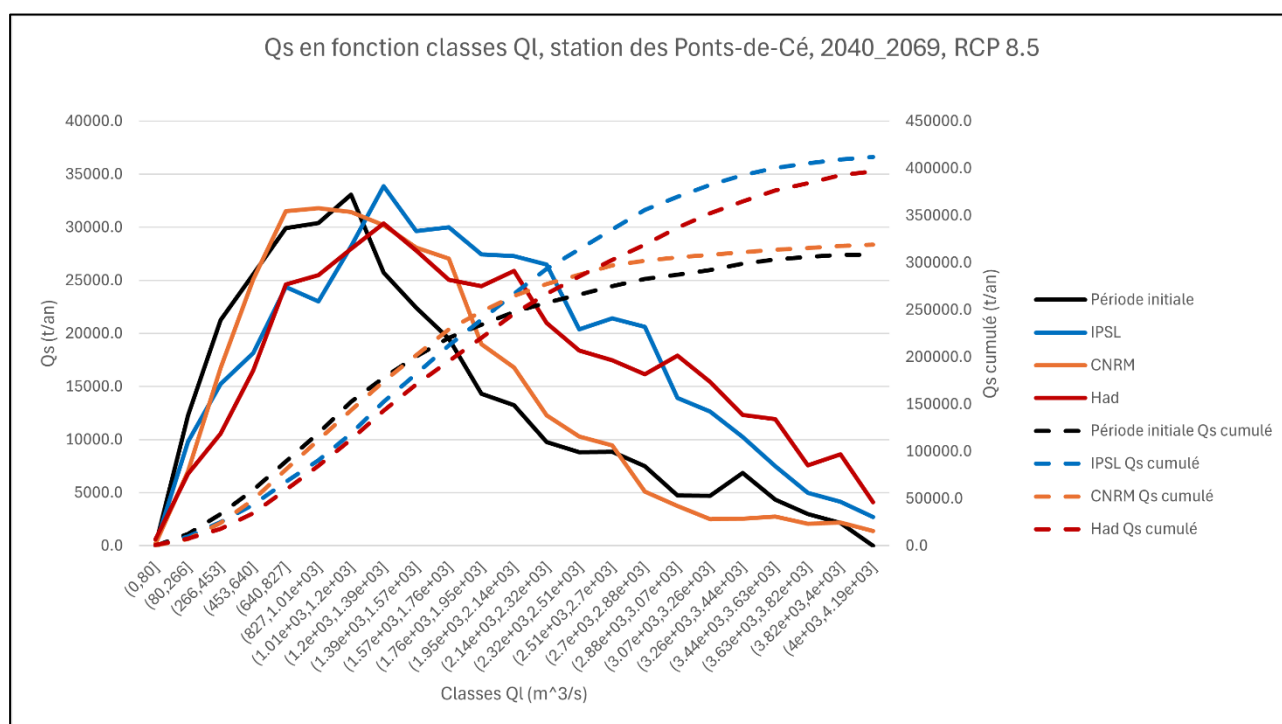
Annexe 2: Effectif des classes de débit liquide sur le site de Gien en fonction de scénarios GCM sous un RCP 8.5 sur la période 2070 ; 2099



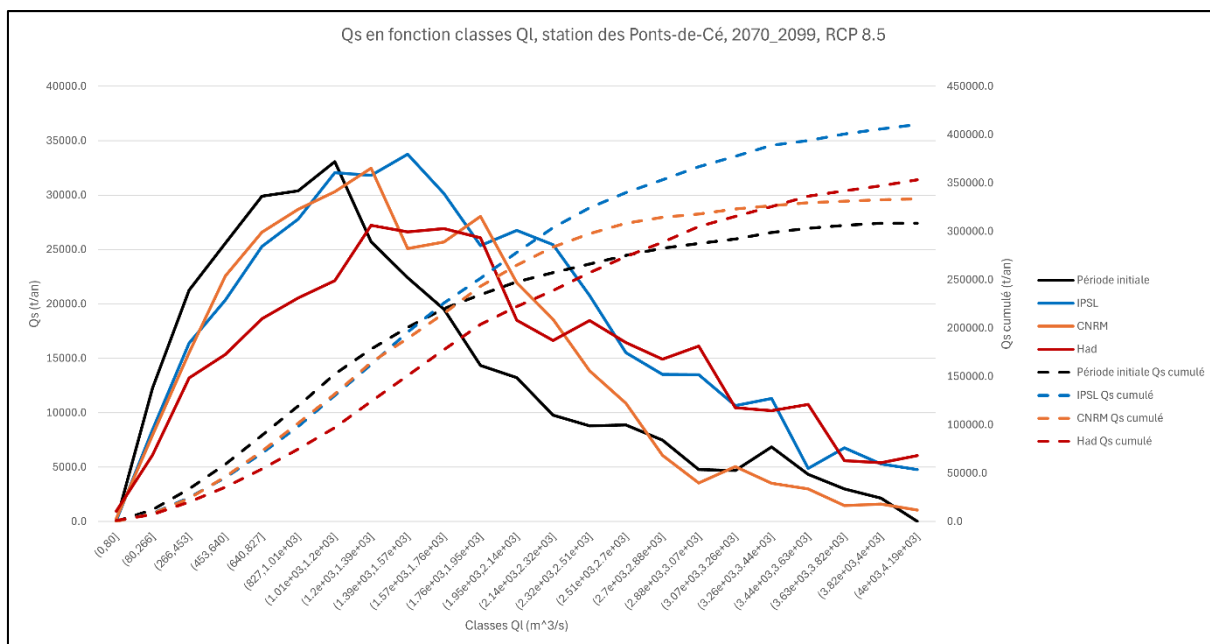
Annexe 1 : Effectif des classes de débit liquide sur le site de Langeais en fonction de scénarios GCM sous un RCP 8.5 sur la période 2070 ; 2099



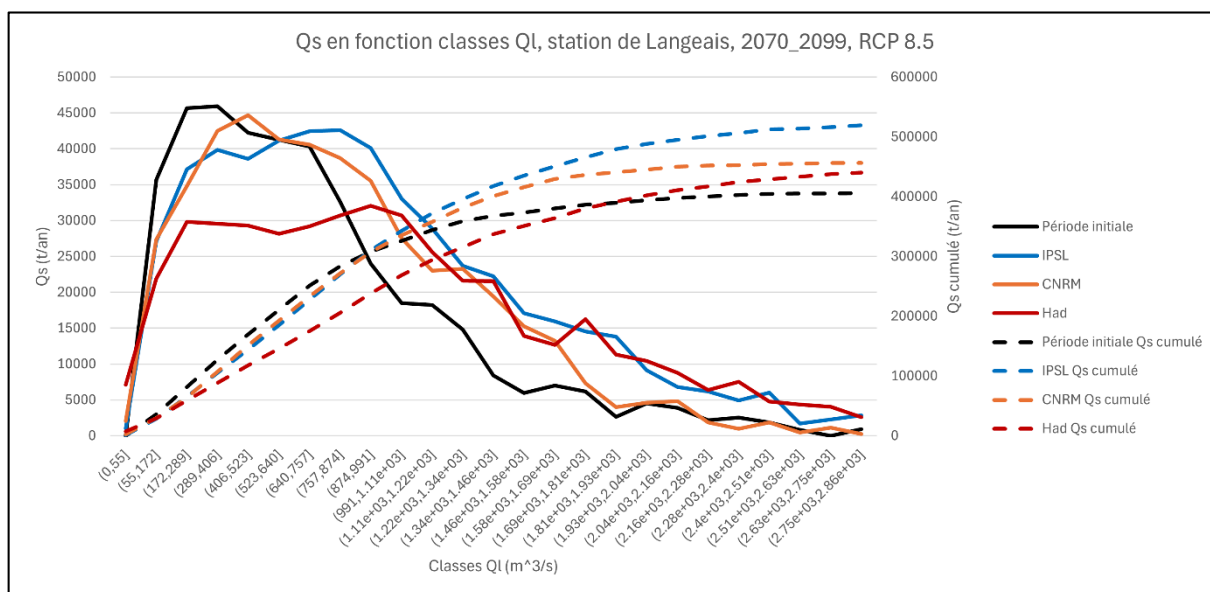
Annexe 4 : Effectif des classes de débits sur le site des Ponts-de-Cé sous des scénarios GCM, sous un RCP 8.5 entre 2070 et 2099



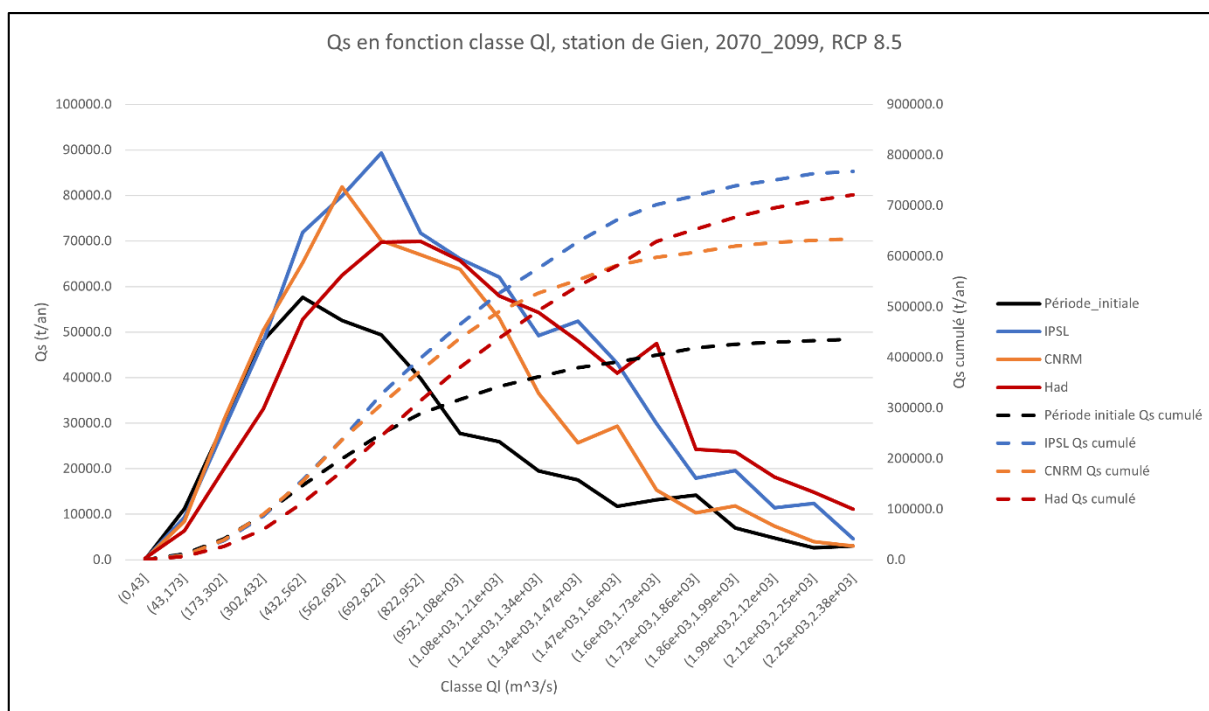
Annexe 3 : Débit solide en fonction du débit liquide, station des Ponts-de-Cé, 2040 ; 2069, sous un RCP 8.5



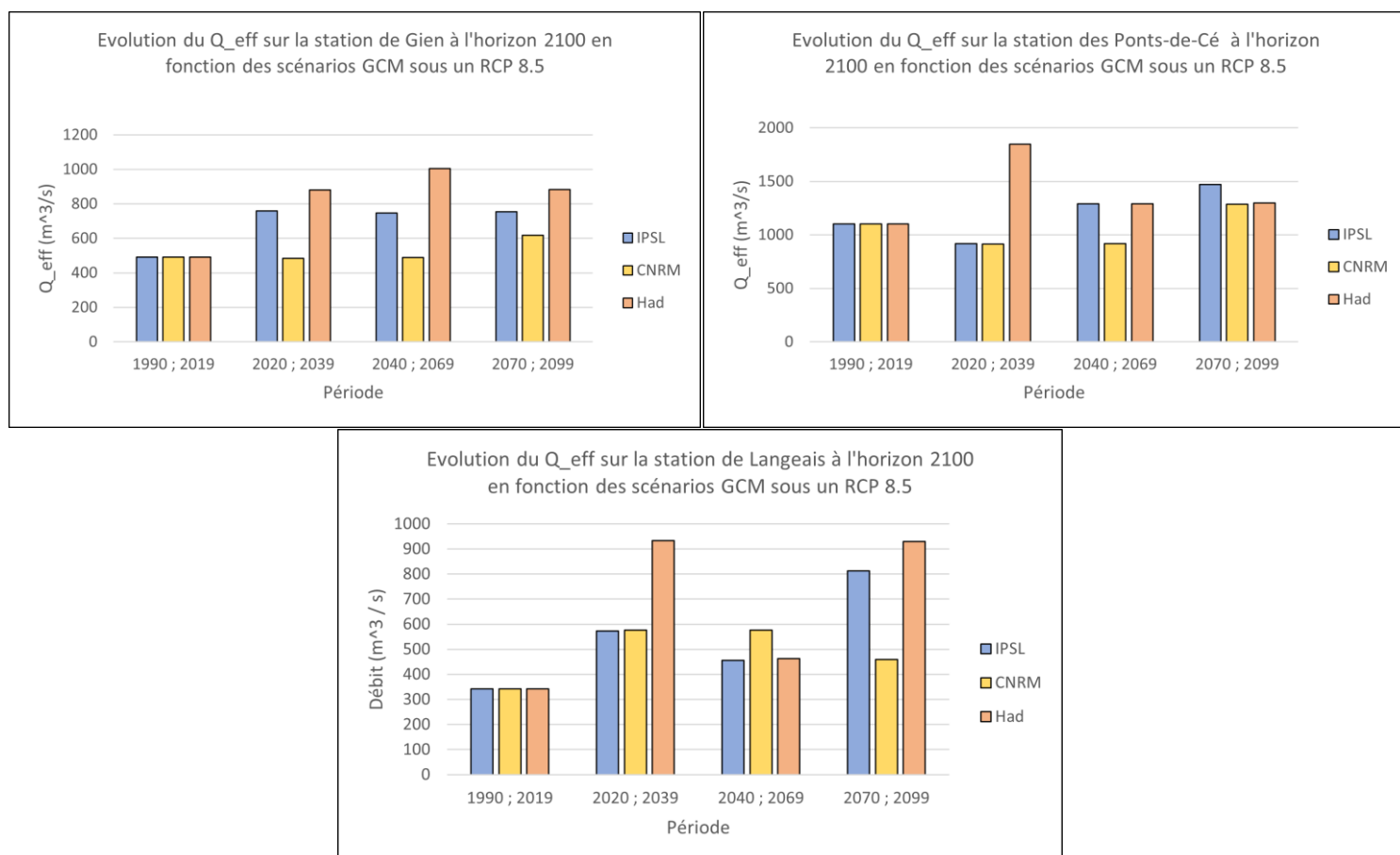
Annexe 6: Débit solide en fonction du débit liquide, station des Ponts-de-Cé sur la période 2070 ; 2099, sous un RCP 8.5



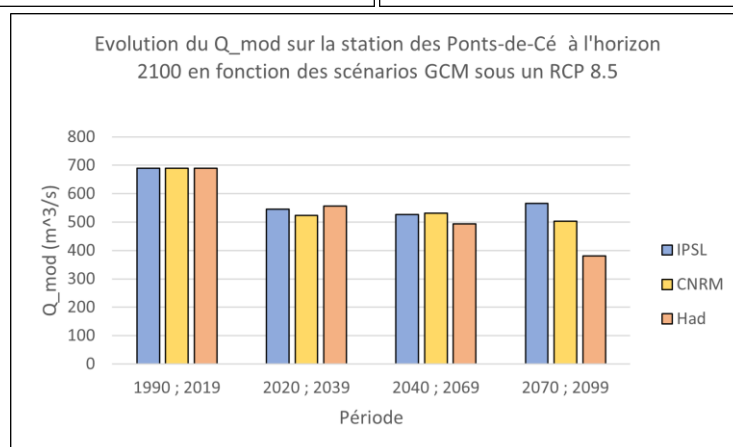
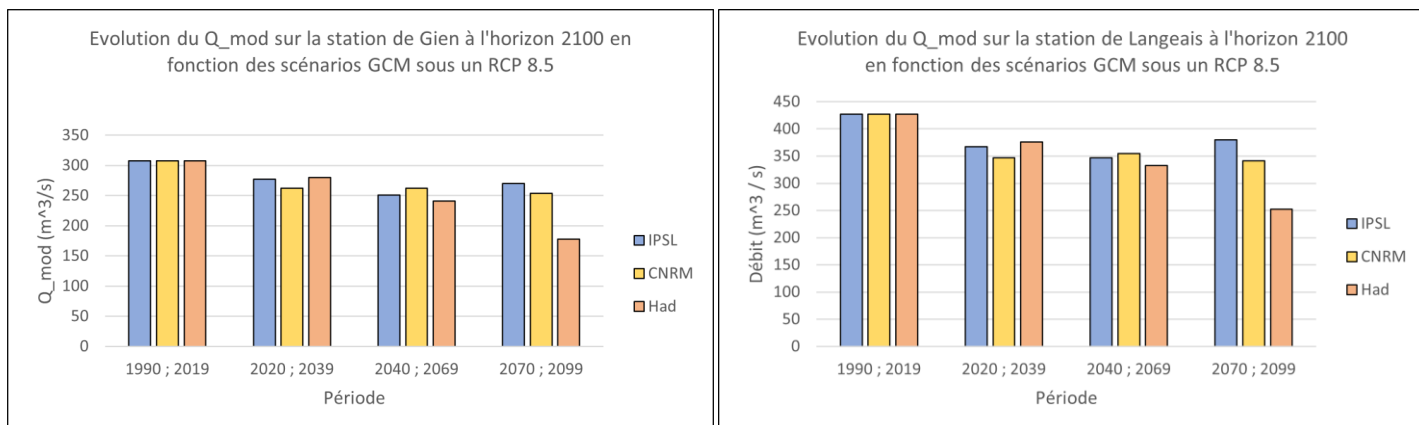
Annexe 5: Débit solide en fonction du débit liquide, station de Langeais entre 2070 ; 2099, RCP 8.5



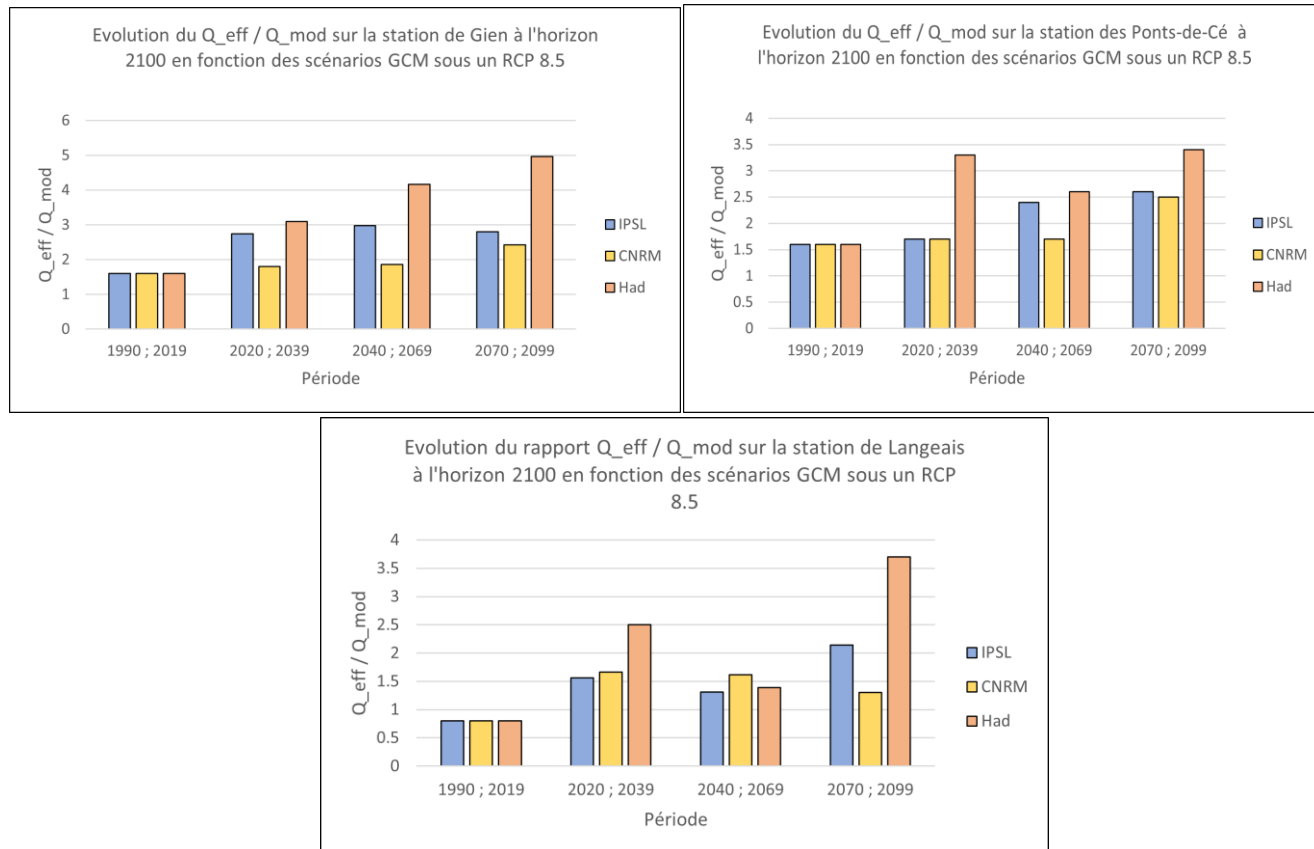
Annexe 8: Débit solide en fonction des classes de débits liquides, station de Gien entre 2070 ; 2099 sous un RCP 8.5



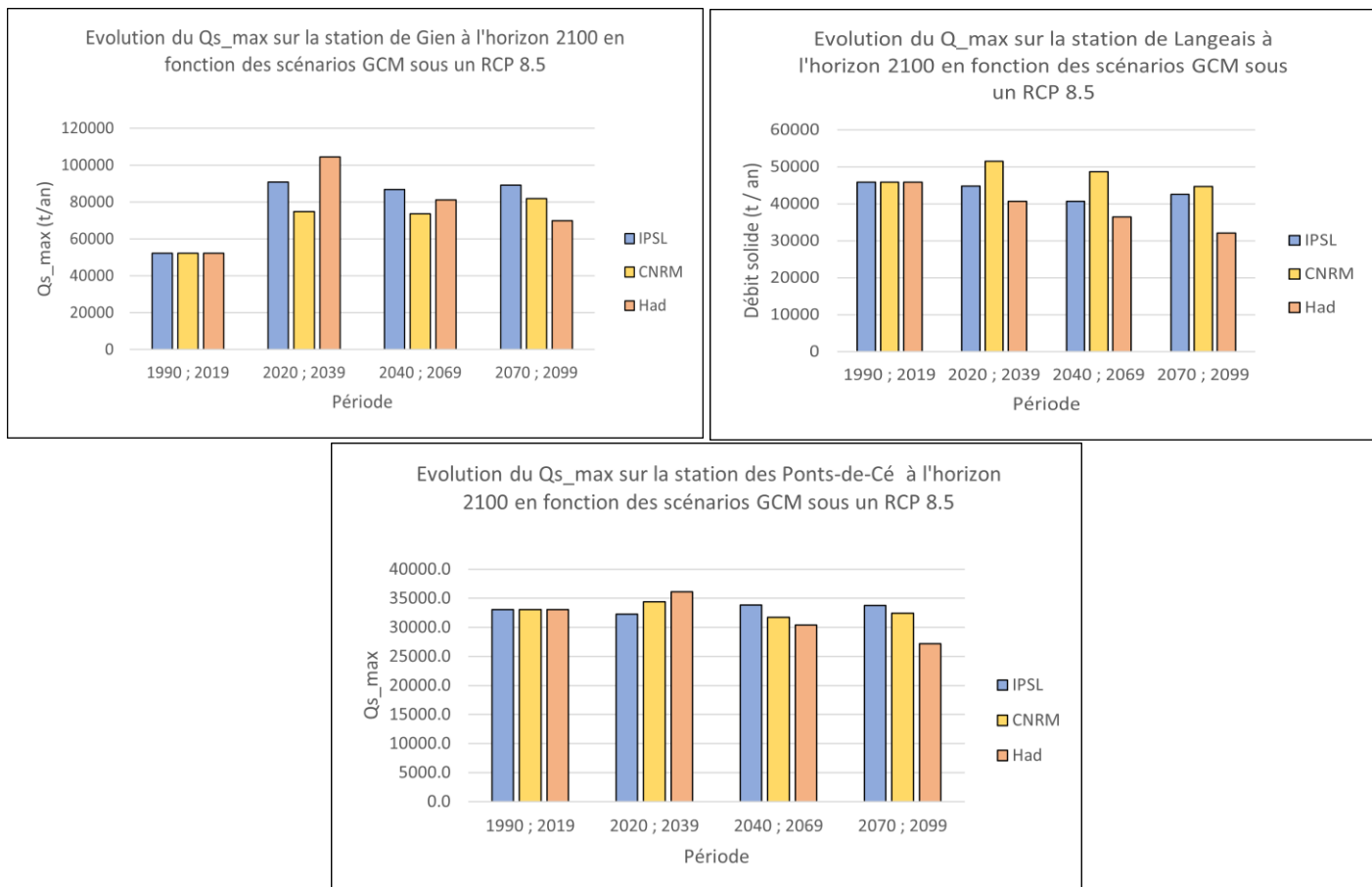
Annexe 7: Evolution du débit efficace sur les sites de Langeais, Gien et des Ponts-de-Cé entre 1990 et 2099



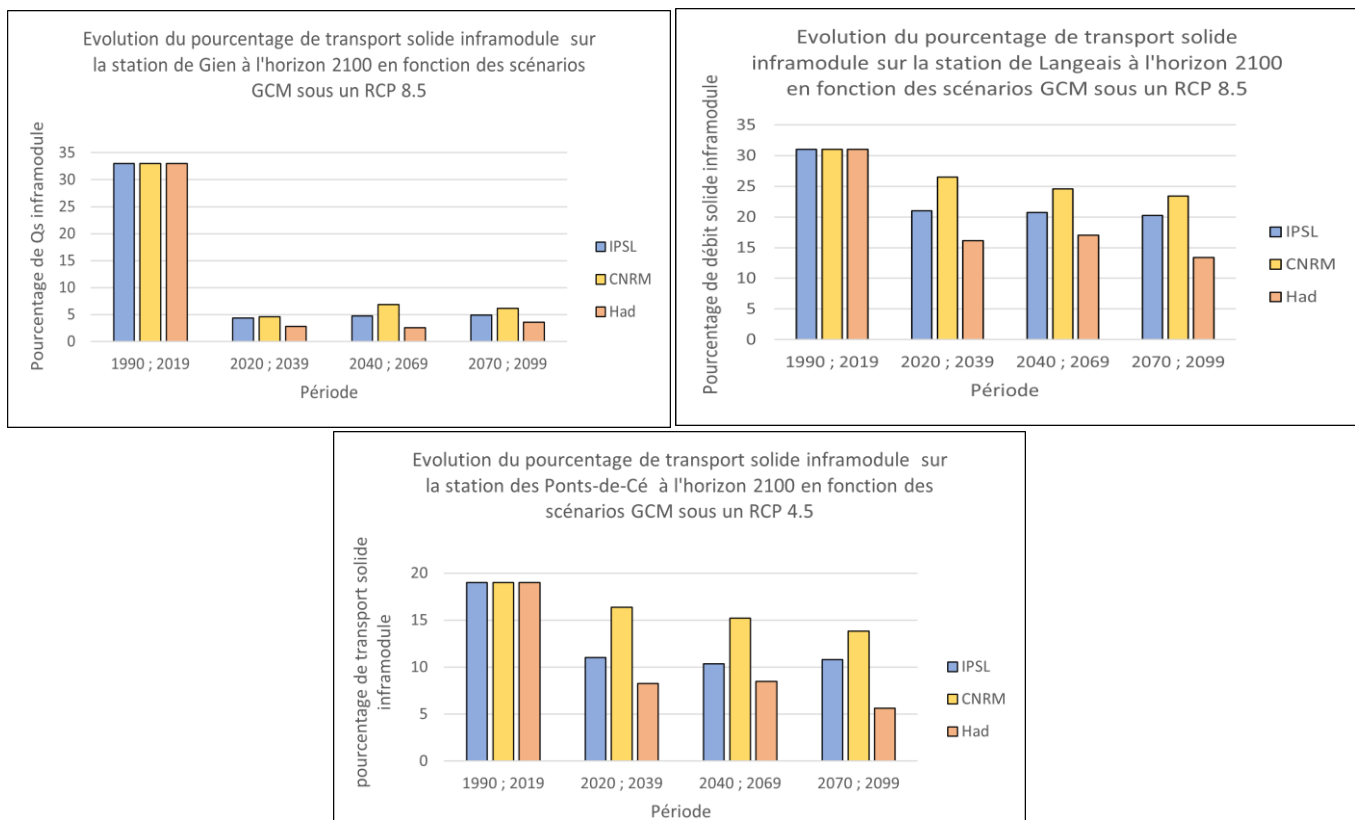
Annexe 9: Evolution du module sur les stations de Gien, Langeais et des Ponts de Cé entre 1990 et 2099



Annexe 10: Evolution du rapport Q_eff / Q_mod sur les stations de Gien, Langeais et des Ponts-de-Cé de 1990 et 2099



Annexe 11: Evolution du débit solide max sur les stations de Gien, Langeais et des Ponts de Cé entre 1990 et 2099



Annexe 12: Evolution du pourcentage de transport solide inframodule sur les stations de Gien, Langeais et des Ponts de Cé de 1990 et 2099

Auteur : Pierrick Louet, DAE 5, filière Ingénierie des Milieux Aquatiques (IMA)

Encadrants : Stéphane Rodrigues & Jules Le Guern

Sujet de recherche : Influence du changement climatique sur la dynamique sédimentaire des cours d'eau sableux et sablo-graveleux : application de lois de tarages solides à des débits liquides modélisés à l'horizon 2100 en Loire moyenne.

Résumé

Les cours d'eau sableux et sablo-graveleux sont parfois caractérisés de "rivières labiles". Le transport de leur charge de fond et l'évolution morphologique de leur lit est significative pour de faibles niveaux de contraintes et les bas débits, ce qui les différencie des systèmes graveleux. A titre d'exemple, sur la Loire dans son secteur aval, la quantité de sédiments de fond transportée pour des débits inférieurs au module représente 20% des flux annuels (Le Guern, 2021). Les émissions de gaz à effet de serre depuis les années 1850 ont mené à un changement climatique globalisé, se matérialisant par une hausse des températures. Cette hausse a de nombreux impacts sur les systèmes fluviaux, à commencer par l'apparition d'étiages sévères et récurrents (Moatar *et al.*, 2010 ; Seyedhashemi, 2022 ; Ducharne *et al.*, 2011). Cependant, l'effet du changement climatique sur les débits solides des cours d'eau est bien moins connu. Pourtant, les débits solides conditionnent, avec les débits liquides, la morphologie des systèmes fluviaux. Ainsi, ce projet de fin d'études s'est attaché à utiliser des lois de tarages solides avec des débits liquides projetés à l'horizon 2100, et ainsi émettre des hypothèses relatives à l'impact du changement climatique sur les flux solides en Loire moyenne.

Mots-clés : changement climatique ; transport solide ; cours d'eau sablo-graveleux ; loi de tarage solide ; classes de débits liquides ; fréquences de débits liquides ; flux solide annuel moyen ; scénarios climatiques ; débit efficace ; crues ; étiages