



L'école de l'aménagement durable des territoires

ENTPE

 **Cerema**



RAPPORT DE STAGE DE MISE EN SITUATION PROFESSIONNELLE

Impact du changement climatique sur la variabilité hydrologique des
bassins versants en amont de l'estuaire de la Gironde

Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et
l'Aménagement - Direction Technique Eau, Mer et Fleuves
Tutrice : Vanessa LABORIE

Membre du jury
Bernard CLEMENT

Laurence FAYET
Août 2020

Notice analytique

Auteur	Laurence FAYET	
Titre du stage	Impact du changement climatique sur la variabilité hydrologique des bassins versants en amont de l'estuaire de la Gironde	
Organisme d'accueil	Cerema Eau, Mer et Fleuves	
Maître de stage	Vanessya LABORIE	
Collation	Nombre de pages	Nombre d'annexes
	38	4
Mots clés	Changement climatique, hydrologie, modèle pluie-débit, GR4J	
Termes géographiques	Estuaire de la Gironde, Dordogne	
Résumé	<p>Ce document est le rapport du stage que j'ai effectué du 27 mai au 22 juillet 2020 (8 semaines) au sein du Cerema Eau, Mer et Fleuves.</p> <p>Dans le cadre du projet ECCLIPSE et afin d'étudier l'impact du changement climatique sur les apports fluviaux aux limites d'un modèle hydro-sédimentologique de l'estuaire de la Gironde, les débits en amont de celui-ci doivent être construits pour les projections climatiques du modèle CNRM ARPEGE ALADIN 52 et des scénarios RCP 4.5 et 8.5. Une méthodologie pour répondre à ce besoin a été construite et appliquée. Un modèle GR4J a ainsi été calé à Pessac sur la Dordogne afin de construire les chroniques de débits en réanalyse et pour les périodes futures.</p> <p>Les résultats montrent une baisse des débits moyens annuels et une aggravation des étiages. En ce qui concerne les crues, les tendances sont moins tranchées.</p> <p>Le travail devra être complété par des simulations avec d'autres modèles climatiques et à la station de La Réole sur la Garonne.</p>	
Abstract	<p>This document is the report of the internship I did from May 27 to July 22, 2020 (8 weeks) within Cerema Eau, Mer et Fleuves.</p> <p>As part of the ECCLIPSE project and in order to study the impact of climate change on river flows at the limits of a hydro-sedimentological model of the Gironde estuary, flows upstream of the Gironde estuary must be constructed for the climate projections of the CNRM ARPEGE ALADIN 52 model and the RCP 4.5 and 8.5 scenarios. A methodology to meet this need has been constructed and applied. A GR4J model has been calibrated at Pessac on the Dordogne river in order to build flow data for reanalysis and for future periods.</p> <p>The results show a decrease in mean annual flows and a worsening of low water levels. Concerning floods, the trends are less clear-cut.</p> <p>The work will have to be completed by simulations with other climate models and at La Réole on the Garonne river.</p>	

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement ma tutrice Vanessa LABORIE, Directrice d'études de recherche sur les submersions marines et le changement climatique au Cerema Eau, Mer et Fleuves, pour m'avoir offert cette opportunité de stage, pour sa disponibilité, pour le partage de son expertise et pour son aide dans la rédaction de ce rapport.

Je remercie également pour leur accueil chaleureux les agents du Laboratoire Risques Hydrauliques et Environnement et du Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant ainsi que les agents du Cerema EMF du site de Margny les Compiègne.

Je tiens aussi à remercier Guillaume THIREL de l'INRAE pour ses précieux conseils dans la mise au point de la méthodologie à mettre en œuvre.

Je remercie également Dominique OLLIVIER et Elisabeth RENWEZ du SPC Garonne-Adour-Dordogne et Arthur MARCHANDISE du SPC Garonne-Tarn-Lot pour les informations communiquées ainsi que Rémi LAMBLIN et Félicien ZUBER du SCHAPI pour les données fournies.

Table des matières

Notice analytique	3
Remerciements	4
Principaux acronymes	7
Introduction Générale	8
PARTIE I : PARTIE TECHNIQUE ET DEVELOPPEMENT DURABLE	9
Introduction.....	10
1 Matériels et outils	11
1.1 La modélisation du changement climatique	11
1.1.1. Les modèles climatiques globaux (GCM)	11
1.1.2 Les modèles climatiques régionaux (RCM)	12
1.1.3 Les scénarios d'émissions.....	12
1.2 La modélisation hydrologique	13
1.2.1 Les grands types de modèles hydrologiques.....	13
1.2.2 Modèle retenu.....	13
1.2.3 Présentation du modèle GR4J	14
1.3 La méthodologie suivie.....	15
2 Application à l'estuaire de la Gironde	16
2.1 Présentation des bassins versants alimentant l'estuaire de la Gironde	16
2.2 Calage du modèle GR4J	17
2.2.1 Critères de calage	17
2.2.2 Données utilisées pour le calage.....	17
2.2.2 Résultats du calage.....	18
2.3 Évaluation de l'impact du changement climatique.....	19
2.3.1 Hypothèses et incertitudes	19
2.3.2 Données utilisées	19
2.3.3 Résultats à l'horizon 2070 et 2100 en termes de tendance.....	20
3 Prise en compte des enjeux du développement durable	21
Conclusion	22
Bibliographie	23
ANNEXES	24
Annexe 1 : Description des équations du modèle GR4J.....	25

Principaux acronymes

AR5 : 5^{ème} Rapport d'Évaluation du GIEC

Cerema : Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

CERTU : Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques

CETE : Centre d'Études Techniques de l'Équipement

CETMEF : Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales

CMIP : Coupled Model Intercomparaison Project

CNRM : Centre National de la Recherche Météorologique

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

DtecEMF : Direction Technique Eau, Mer et Fleuves

ECCLIPSE : Évaluation du Changement CLimatique dans les Ports du Sud-ouest Européen

ETP : Évapotranspiration Potentielle

GCM : Modèle Climatique Global

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

GR4J : Modèle du Génie Rural à 4 paramètres (Journalier)

IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

LHSV : Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant

LRHE : Laboratoire Risques Hydrauliques et Environnement

QJXA10 : Débit Journalier Maximal Annuel (calculé sur une année civile), de période de retour 10 ans

QMNA5 : Débit Mensuel Minimal (calculé sur une année civile), de période de retour 5 ans

RCM : Modèle Climatique Régional

RCP : Radiative Concentration Pathway

SCHAPI : Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations

SETRA : Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements

SPC : Service de Prévision des Crues

ITPE : Ingénieur des Travaux Publics de l'État

Introduction Générale

Le stage de Mise en Situation Professionnelle (MSP), réalisé en fin de deuxième année, constitue une étape importante dans le cursus ingénieur de l'ENTPE. Il fait la transition entre le stage de première année, d'Insertion dans le Milieu Professionnel (IMP) sur une période courte et le Travail de Fin d'Études (TFE) nécessitant un besoin de problématisation de la part de l'étudiant.

Il a pour objectifs de :

- avoir une production technique adaptée et pertinente au regard d'une demande formulée par un commanditaire ;
- développer une analyse critique du contexte organisationnel de travail et de la production technique effectuée.

J'ai choisi d'effectuer mon stage au Cerema Eau, Mer et Fleuves sur une période de 8 semaines afin d'étudier l'impact du changement climatique sur la variabilité hydrologique des bassins versants en amont de l'estuaire de la Gironde et d'approfondir ma connaissance du fonctionnement des organisations.

Ce rapport est composé d'une première partie portant sur le volet technique de mon stage et la prise en compte des enjeux du développement durable dans le cadre de celui-ci et d'une seconde partie axée sur le développement de ma professionnalité.

PARTIE I : PARTIE TECHNIQUE ET DEVELOPPEMENT DURABLE

Introduction

Les ports sont des infrastructures stratégiques, car ils participent au développement économique et sont un maillon de la chaîne logistique d'approvisionnement des territoires.

Cependant, ils sont vulnérables aux submersions marines et au changement climatique (augmentation de la fréquence des tempêtes, élévation du niveau moyen de la mer) en raison de leur situation géographique. Ils doivent faire face à une variété de risques rendus d'autant plus importants avec le changement climatique. Les trois évolutions majeures qu'implique le changement climatique vis-à-vis des infrastructures portuaires sont : l'élévation du niveau moyen de la mer, la modification des débits des fleuves ainsi que la fréquence et la puissance des tempêtes. Leurs conséquences sont multiples : accroissement du risque d'inondation, modification de la dynamique hydro-sédimentaire des estuaires, érosion côtière, sollicitation plus forte des ouvrages portuaires (digues notamment) et une potentielle modification des aires de répartition de certaines espèces (C. Valero, 2020).

Il apparaît donc nécessaire de renforcer la résilience climatique des infrastructures portuaires, particulièrement dans l'espace du Sud-Ouest européen. Le projet ECCLIPSE, dans lequel le Cerema est impliqué, vise à identifier les impacts des différents aléas (élévation du niveau de la mer, érosion, inondations, tempêtes) sur les ports maritimes de cette région, afin de déterminer les éléments d'une stratégie d'adaptation et d'apporter les outils aux gestionnaires pour évaluer et gérer les risques. Mené avec des partenaires français, espagnols et portugais, ce projet de recherche inclura des expérimentations dans les ports de Bordeaux et de Valence en Espagne ainsi que dans celui d'Aveiro au Portugal. Le projet vise à développer une méthodologie commune pour analyser et quantifier les risques du changement climatique à moyen et long terme sur l'ensemble du système portuaire, et pour évaluer les impacts à court terme dans des zones spécifiques.

Le Cerema entreprend actuellement, en partenariat avec le Grand Port Maritime de Bordeaux (GPMB), la mise en place d'une méthodologie d'analyse des risques, qui aidera le port à identifier les infrastructures et les fonctionnalités vulnérables au changement climatique et à définir une stratégie de gestion et d'adaptation aux changements climatiques. Dans le cadre du projet Gironde XL3D, le Cerema a développé deux modèles hydro-sédimentologiques Telemac (l'un bidimensionnel, l'autre tridimensionnel) sur l'estuaire de la Gironde afin de déterminer l'évolution des dragages et des contraintes de navigation. La limite maritime de ces modèles est située à une quarantaine de kilomètres de l'embouchure de la Gironde (le Verdon) ; les limites amont sont localisées en limite d'influence de la marée, respectivement à Pessac sur la Dordogne et à la Réole sur la Garonne. Il est prévu dans le cadre d'ECCLIPSE de mettre en œuvre l'un de ces deux modèles. Les deux modèles sont alimentés, à l'aval, par la marée et une surcote météorologique instantanée et, à l'amont, par des chroniques de débits sur la Garonne et la Dordogne.

L'objectif de mon stage est de déterminer une méthode qui permette d'estimer l'impact du changement climatique sur la variabilité hydrologique des bassins versants en amont de l'estuaire de la Gironde. Les chroniques obtenues alimenteront le modèle hydro-sédimentologique afin de déterminer l'évolution des quantiles extrêmes pour le dimensionnement des structures de protection des inondations dans les zones vulnérables

(GPMB, ville de Bordeaux, presqu'île d'Ambès) et les tirants d'eau et volumes de dragages du futur.

Cette partie technique est composée de trois parties. La première présente les matériels et outils nécessaires à l'étude du changement climatique et à la détermination de son impact sur l'hydrologie des cours d'eau. La deuxième partie présente l'application de la méthodologie au bassin versant de la Dordogne à Pessac. Enfin, une troisième partie abordera la prise en compte des enjeux du développement durable dans le cadre de ce stage.

1 Matériels et outils

Dans cette première partie seront présentés les matériels et outils nécessaires à l'étude de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau : d'une part, les outils nécessaires à la modélisation du changement climatique, d'autre part les outils de modélisation hydrologique et enfin la méthodologie mise en œuvre.

1.1 La modélisation du changement climatique

Les travaux de recherche sur l'évolution du climat et sa modélisation sont encadrés par le Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC, WCRP en anglais) depuis 1980. Au sein de ce programme, il existe un projet d'inter-comparaison des différents modèles climatiques créés par les différents laboratoires de recherche mondiaux. Ce projet dit CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) permet de coordonner et d'homogénéiser les efforts de modélisation des laboratoires. La cinquième phase de ce projet (CMIP5) associe près de 20 centres climatiques du monde entier et près de 50 modèles climatiques. En France, deux institutions ont développé des modèles climatiques : le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) de Météo France et l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace).

Les résultats des recherches basées sur ces simulations sont pris en compte dans les rapports d'évaluation produits par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, IPCC en anglais). Le 5ème rapport d'évaluation du GIEC (AR5) basé sur les résultats des modèles du CMIP5 a été publié en 2014 et le prochain rapport du GIEC, le sixième, est prévu pour 2022.

Un modèle climatique global ou régional, en fonction de l'échelle de travail, est nécessaire pour évaluer l'impact du changement climatique à l'aide de simulations du futur. Dans ce but, des hypothèses sur l'évolution future des forçages externes au système modélisé, les scénarios d'émission, doivent être faites.

1.1.1. Les modèles climatiques globaux (GCM)

Les simulations climatiques sont réalisées à partir de modèles numériques appelés Modèles Atmosphériques de Circulation Générale. Pour étudier le climat global de la planète, les modèles atmosphériques sont couplés à des modèles représentant les autres parties du système terre : l'océan, la végétation, les fleuves, la biogéochimie marine, la chimie atmosphérique, les calottes polaires, le cycle du carbone. En particulier, les modèles atmosphériques globaux utilisés pour les simulations climatiques sont généralement couplés avec un modèle océanique, les températures de surface de l'océan étant calculées par le modèle océanique à partir des flux en surface (rayonnement, flux turbulents) fournis par le modèle atmosphérique. Les résolutions courantes des GCM sont d'environ 100 à 300 km horizontalement (<http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/39>).

1.1.2 Les modèles climatiques régionaux (RCM)

Pour étudier le changement climatique à l'échelle d'une région du globe, d'un pays ou d'un bassin versant, il est nécessaire de disposer de données climatiques simulées à une échelle plus fine que la résolution des modèles climatiques globaux. Pour cela, il existe des méthodes dites « de descente d'échelle » qui permettent de descendre à des échelles plus fines, de 10 à 50 km.

Il existe deux types de méthodes de descente d'échelle (<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/projections-climatiques>) :

-la descente d'échelle dynamique qui consiste à résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional. Elle utilise une modélisation localisée qui utilise comme conditions aux limites et comme forçage de surface les résultats des modélisations à l'échelle du globe.

-la descente d'échelle statistique qui repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables locales et les variables calculées par le modèle.

1.1.3 Les scénarios d'émissions

Le climat du futur est fonction notamment des émissions ou concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols dues aux activités humaines. Afin d'analyser l'évolution future du climat, le GIEC a eu besoin d'utiliser des scénarios d'émission de gaz à effet de serre comme forçages dans les simulations climatiques des GCM.

Jusqu'au quatrième rapport du GIEC, les projections climatiques étaient fondées sur les scénarios du SRES (Special Report on Emissions Scenarios) qui proposaient plusieurs évolutions socio-économiques. Ces scénarios socio-économiques étaient élaborés à partir d'hypothèses sur le développement économique futur et ses conséquences sur l'environnement. Ces scénarios étaient fournis par des modèles qui prenaient en compte l'évolution de facteurs dont les principaux sont la population, l'économie, le développement industriel et agricole et, de façon assez simplifiée, la chimie atmosphérique et le changement climatique (*Le climat de la France au XXI^e siècle-Volume 4*).

RCP (Radiative Concentration Pathway). Les scénarios RCP sont des scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif sur la période 2006-2100. Le forçage radiatif est une perturbation du bilan radiatif qui représente la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge réémis par la planète. Il est calculé au sommet de la troposphère (entre 10 et 16 km d'altitude). Sous l'effet de facteurs d'évolution du climat, comme, par exemple, la concentration en gaz à effet de serre, ce bilan se modifie : on parle de forçage radiatif.

Scénario	Forçage radiatif vers 2100 (W/m ²)	Concentration en CO ₂ Eq-CO ₂ vers 2100 (ppm)	Profil d'évolution de concentration des gaz à effet de serre
RCP 2.6	2.6	475	Pic puis déclin
RCP 4.5	4.5	630	Stabilisation avant 2100
RCP 6.0	6	800	Stabilisation après 2100
RCP 8.5	8.5	1313	Croissant (sans politique climatique)

Tableau 1. Les scénarios RCP (Source : *Le climat de la France au XXI^e siècle-Volume.4*)

Le tableau ci-dessous donne l'évolution de la température moyenne à la surface du globe et l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale pour chaque scénario RCP.

	Scénario	2046–2065		2081–2100	
		Moyenne	Plage probable ^c	Moyenne	Plage probable ^c
Évolution de la température moyenne à la surface du globe (°C) ^a	RCP2,6	1,0	0,4 à 1,6	1,0	0,3 à 1,7
	RCP4,5	1,4	0,9 à 2,0	1,8	1,1 à 2,6
	RCP6,0	1,3	0,8 à 1,8	2,2	1,4 à 3,1
	RCP8,5	2,0	1,4 à 2,6	3,7	2,6 à 4,8
	Scénario	Moyenne	Plage probable ^d	Moyenne	Plage probable ^d
Élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale (m) ^b	RCP2,6	0,24	0,17 à 0,32	0,40	0,26 à 0,55
	RCP4,5	0,26	0,19 à 0,33	0,47	0,32 à 0,63
	RCP6,0	0,25	0,18 à 0,32	0,48	0,33 à 0,63
	RCP8,5	0,30	0,22 à 0,38	0,63	0,45 à 0,82

Tableau 2. Évolution projetée de la température à la surface du globe et de l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale par rapport à la période 1986-2005 (Source : 5ème rapport du GIEC-2014)

1.2 La modélisation hydrologique

Pour passer des simulations climatiques aux simulations hydrologiques, il est nécessaire d'utiliser des modèles hydrologiques, c'est-à-dire des modèles qui permettent de convertir la pluie obtenue pour différents GCM ou RCM et scénarios climatiques en débit en un exutoire donné d'un bassin versant.

1.2.1 Les grands types de modèles hydrologiques

Deux grands types de modèles hydrologiques existent : les modèles à base physique et les modèles conceptuels. Un modèle à base physique représente les processus de la relation pluie-débit en utilisant les lois physiques régissant ces processus. Un modèle conceptuel cherche à représenter les principaux processus de la relation pluie-débit sans utiliser les lois physiques régissant les processus concernés. Ce type de modèle est généralement constitué de réservoirs connectés entre eux, dont les niveaux augmentent et diminuent au cours du temps et qui sont censés représenter les différents compartiments hydrologiques des bassins versants.

1.2.2 Modèle retenu

Dans un premier temps, l'utilisation des outils de prévision des crues des SPC Garonne-Adour-Dordogne et Garonne-Tarn-Lot a été envisagée. Mais cette utilisation n'est pas adaptée à la réanalyse sur les périodes passées de longues durées. Construits pour des échéances parfois très courtes, ils fournissent des prévisions à court terme compatibles avec la mission des SPC mais incompatibles avec des périodes de simulation longues comme celles utilisées dans les études d'impact du changement climatique.

Plusieurs études ou projets ont abordé la question de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau, que ce soit en France ou plus particulièrement sur le bassin Adour-Garonne. Ainsi, le projet Explore 2070 (Chauveau et al., 2013) présente une évaluation des impacts possibles du changement climatique sur les eaux de surface en France métropolitaine et sur les départements d'Outre-Mer à l'horizon 2046-2065 par rapport à une période de référence 1961-1990. Cette évaluation a été réalisée à partir de deux modèles hydrologiques : le modèle à base physique ISBA-MODCOU et le modèle conceptuel GR4J. Suite à la comparaison de performance de ces deux modèles à l'aide du critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970), il s'est avéré que le modèle GR4J était globalement plus précis, fournissant des résultats satisfaisants en temps présent (Nicolas, 2014). Cette

étude fait apparaître une diminution significative des débits moyens annuels à l'échelle du territoire, de l'ordre de 10 % à 40 %, particulièrement prononcée sur les bassins Seine-Normandie et Adour-Garonne. Il en ressort également une baisse importante des débits d'étiage sur une grande majorité des cours d'eau. En ce qui concerne les crues, il ne ressort pas de tendance précise : les évolutions sont hétérogènes et moins importantes.

De plus, les résultats de cette étude montrent que l'idée selon laquelle les modèles hydrologiques globaux comme le modèle GR4J seraient moins bien adaptés aux grands bassins est fautive. En effet, il a été constaté que plus la superficie du bassin versant augmente, plus le risque d'obtenir de faibles performances diminue. Le signal débit étant généralement plus lissé, il est plus facile à modéliser sur des grands bassins que sur des petits.

Conformément à la littérature, le modèle GR4J, accessible gratuitement via le package airGR (Coron et al., 2017 et 2020) de R, a été choisi pour modéliser les débits du futur à l'aide d'un modèle hydrologique dans le cadre de la présente étude.

1.2.3 Présentation du modèle GR4J

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres qui fonctionne au pas de temps journalier.

Bien que GR4J soit un modèle empirique, sa structure l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui permet de tenir compte des conditions antérieures et d'en assurer un fonctionnement en continu. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage, des hydrogrammes unitaires ainsi qu'une fonction d'ouverture sur l'extérieur non atmosphérique permettant de simuler le gros du comportement hydrologique du bassin.

Un schéma de la structure du modèle est résumé dans le schéma ci-dessous. Les données d'entrée sont les précipitations journalières du bassin (P) et l'évapotranspiration potentielle journalière (E).

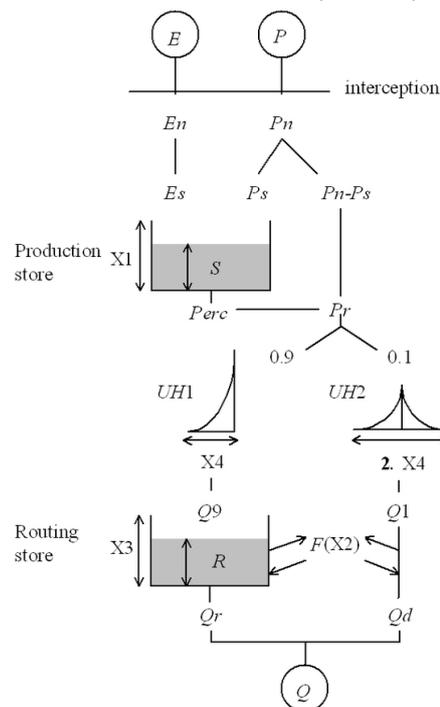


Figure 1. Schéma de fonctionnement du modèle GR4J

Les équations qui régissent le fonctionnement du modèle figurent en Annexe 1.

Il y a donc quatre paramètres à optimiser en calage :

- X1 : la capacité du réservoir de production (mm),
- X2 : le coefficient d'échanges souterrains (mm/jour),
- X3 : la capacité à un jour du réservoir de routage (mm),
- X4 : le temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (jours).

1.3 La méthodologie suivie

Pour déterminer les projections hydrologiques, une méthodologie en trois étapes a été mise en place :

Calage du modèle : à partir de données d'observations météorologiques et hydrologiques passées SAFRAN, le modèle hydrologique a été calé, c'est-à-dire qu'un 4-uplets de paramètres du modèle permettant de représenter au mieux les débits sur la période 01/09/1997-31/07/2019 a été recherché. Ce paramétrage a ensuite été réutilisé pour simuler les débits historiques et futurs.

Simulations des débits historiques et futurs : les simulations des débits historiques (1961-1990) et futurs (2041-2070 et 2071-2100), au pas de temps journalier, à partir des scénarios du modèle CNRM ARPEGE-ALADIN 52, ont été réalisées en utilisant les paramètres issus de la phase de calage précédente.

Calcul d'indicateurs et analyse statistique

Afin de caractériser les évolutions hydrologiques entre la période de référence et les périodes futures, un ensemble d'indicateurs a été calculé à partir des simulations de débits journaliers.

- Débit annuel moyen ou module : il s'agit de la moyenne des débits moyens annuels
- QJXA10 : il s'agit du débit journalier maximal annuel (calculé sur une année civile), de période de retour 10 ans. Il s'agit d'un indicateur de crues.
- Quantiles Q95 et Q99 : il s'agit des valeurs de débit sous lesquelles se trouvent respectivement 95 et 99% des débits sur une période donnée. Il s'agit d'un indicateur de crue.
- QMNA5 : il s'agit du débit mensuel minimal calculé sur une année civile, de période de retour 5 ans. Il s'agit d'un indicateur d'étiage.

Il faut noter que les tailles d'échantillon ne sont pas les mêmes selon l'indicateur statistique calculé.

2 Application à l'estuaire de la Gironde

Dans cette deuxième partie, la méthodologie précédente est mise en œuvre sur le bassin versant de la Dordogne à Pessac. Après une rapide présentation du bassin versant, le calage du modèle est présenté et l'impact du changement climatique sur les débits à Pessac est évalué à l'aide d'indicateurs statistiques.

2.1 Présentation des bassins versants alimentant l'estuaire de la Gironde

Le bassin versant de la Dordogne

Le bassin versant de la Dordogne est situé dans le sud-ouest de la France. Situé au nord-est du bassin Adour-Garonne, il couvre une superficie de 24 000 km². Il est orienté d'est en ouest. Le bassin comprend une rivière principale, la Dordogne, longue de 483 km qui prend sa source dans le Massif Central au Puy de Sancy (1 800 m d'altitude) et rejoint la Garonne au bec d'Ambès pour former l'estuaire de la Gironde. Ses principaux affluents sont en rive gauche la Maronne, la Cère, le Céou et en rive droite la Vézère et l'Isle. Le bassin de la Dordogne est équipé de plus de 30 grands barrages pour la production d'électricité, en particulier sur le bassin amont de la Dordogne.

Le débit moyen de la Dordogne est de 350 m³/s à Bergerac. Son débit en crue peut atteindre 3 500 m³/s. En étiage, il peut descendre en-dessous de 100 m³/s. La superficie du bassin versant à Pessac est de 15 000 km².

Le bassin versant de la Garonne

La Garonne prend sa source en Espagne, au Val d'Aran, dans les Pyrénées. D'une longueur de 525 km, elle est drainée par un bassin versant de 55 000 km². La Garonne coule du sud au nord. Ses principaux affluents sont le Tarn, l'Aveyron et le Lot.

Le débit moyen de la Garonne est de 650 m³/s au Bec d'Ambès.

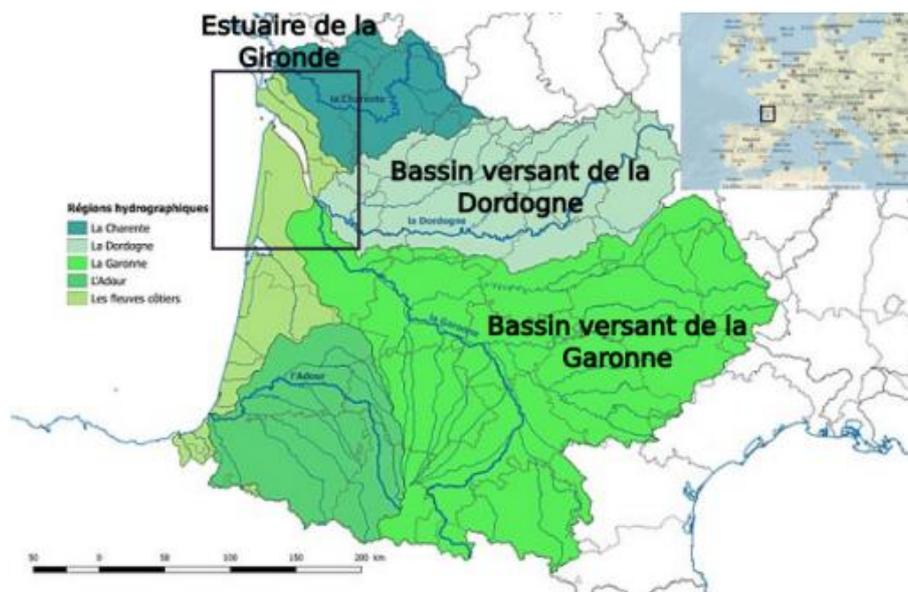


Figure 2. Localisation des bassins versants de la Dordogne et de la Garonne et de l'estuaire de la Gironde (Source : thèse V.Laborie 2020, adapté de https://fr.wikipedia.org/wiki/Bassin_Adour-Garonne)

2.2 Calage du modèle GR4J

Les paramètres du modèle GR4J n'ayant pas de signification physique a priori, leurs valeurs sont déterminées par calage sur des séries observées. Par ce calage, on cherche à minimiser l'écart entre les séries de débit observées et simulées. On cherche donc les valeurs des paramètres qui conduisent à la différence la plus faible possible entre les sorties du modèle et les débits observés. Le but du calage est de déterminer les valeurs des paramètres qui lui permettent d'obtenir les meilleures performances au sens d'un critère donné.

2.2.1 Critères de calage

Pour le calage du modèle GR4J, le critère de performance utilisé est le critère de Nash et Sutcliffe (1970) qui est couramment employé en hydrologie comme fonction objectif. Il est basé sur la somme des erreurs quadratiques et sa formule est la suivante :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

$Q_{obs,i}$: débits observés au pas de temps i ,

$Q_{calc,i}$: débits simulés au pas de temps i ,

Q_{obs} : moyenne des débits observés sur la période,

n : nombre total de pas de temps de la période d'étude.

- Si le Nash ≤ 0 : le modèle n'est pas meilleur que la moyenne des débits observés,
- Si le Nash > 0 : le modèle est meilleur que la moyenne des débits observés,
- Si le Nash = 1 : le modèle correspond parfaitement aux débits observés.

Les résultats seront d'autant meilleurs que le critère se rapproche de 1. S'il est positif, le modèle donne de meilleurs résultats qu'un modèle naïf donnant à chaque pas de temps un débit constant égal à la moyenne des débits observés ; s'il est négatif, c'est l'inverse.

2.2.2 Données utilisées pour le calage

Le calage du modèle hydrologique a nécessité des données observées de précipitations et d'ETP ainsi que des débits à la station de Pessac.

Les données de débits ont été fournies par le service hydrométrie de la DREAL Nouvelle-Aquitaine pour la période du 01/09/1996 au 31/05/2020.

Les données pluviométriques utilisées sont des données SAFRAN (Vidal et al., 2010). Il s'agit de données journalières couvrant la France à une résolution de 8 km produites par Météo-France ; elles sont agrégées par bassin versant et fournies à partir du 01/01/1959.

Les données d'ETP calculées par l'INRAE avec la formule d'Oudin à partir des températures SAFRAN sont utilisées. Elles sont fournies pour la période allant du 01/08/1958-31/07/2019.

$$ETP = \frac{R_e \cdot T_a + 5}{L\rho \cdot 100}$$

Avec R_e : Radiation extraterrestre ($MJ.m^{-2}.j^{-1}$)
 L : chaleur latente de vaporisation de l'eau ($MJ.kg^{-2}$)
 ρ : densité de l'eau
 T_a : température moyenne journalière

Une comparaison rapide des données fournies avec un calcul utilisant la formule d'Oudin et la température moyenne agrégée montre des différences. Ce point devra être approfondi dans des travaux ultérieurs.

Ainsi, l'ensemble des données nécessaires au calage (débits, pluies et ETP) est disponible sur la période allant du 01/09/1996 au 31/07/2019

2.2.2 Résultats du calage

Compte-tenu de la période d'un an de données (pluies et ETP) requise pour l'initialisation du modèle GR4J, le calage du modèle a été réalisé pour la station de Pessac sur la période du 01/09/1997 au 31/07/2019. La valeur du critère de Nash obtenue est de 0.89. Cette valeur, proche de 1, indique que le modèle est capable de simuler de manière satisfaisante les débits à Pessac.

La figure 3 montre en effet que les débits à Pessac sont assez bien restitués par le modèle.

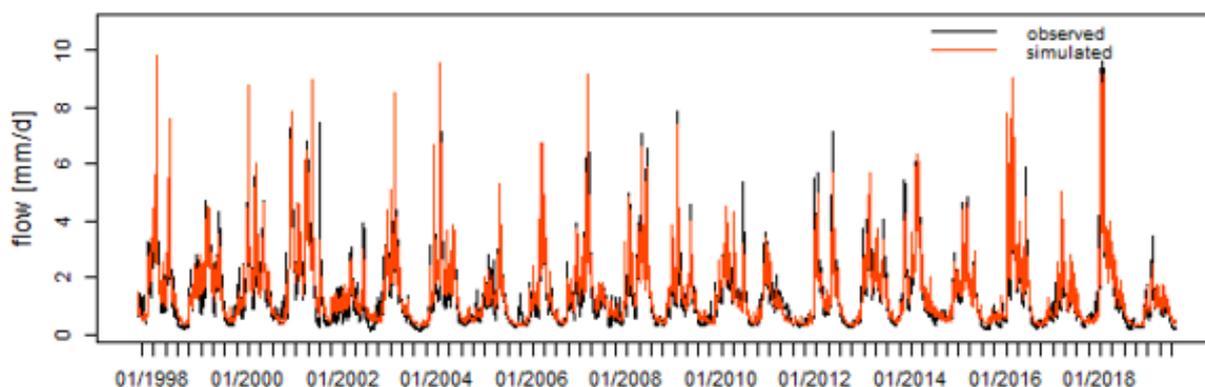


Figure 3. Débits observés (en noir) et simulés avec GR4J (en rouge) à la station de Pessac

Les valeurs obtenues pour les paramètres du modèle sont :

X1 (mm)	X2 (mm)	X3 (mm)	X4 (j)
399	0.06	179	1.44

Ces valeurs sont considérées comme stationnaires et seront donc utilisées pour les reconstitutions historiques des débits et pour le calcul des débits futurs.

Les indicateurs statistiques (module annuel, QJXA10 et QMNA5) ont été calculés pour les débits observés sur la période 1997-2018 et pour les débits reconstitués à partir des données SAFRAN. Les résultats sont fournis dans le tableau ci-dessous. Les résultats sont extrêmement satisfaisants pour les

critères QJXA10 et le module annuel ; le QMNA est bon dans l'absolu mais cet indicateur d'étiage est plus difficile à évaluer.

	Module annuel (m ³ /s)	QJAX10 (m ³ /s)	QMNA5(m ³ /s)
Q observés 1997-2018	246.4	1505	48.4
Q sim SAFRAN 1997-2018	242.9	1583.4	35.2

2.3 Évaluation de l'impact du changement climatique

2.3.1 Hypothèses et incertitudes

En hydrologie, dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique, les principales sources d'incertitude sont (Caballero et al., 2005):

- les scénarios d'émission
- le modèle climatique
- la descente d'échelle
- la paramétrisation du modèle hydrologique

Pour ce qui est de la modélisation hydrologique, nous avons fait un certain nombre d'hypothèses comme (Chauveau et al., 2013) :

- la stationnarité du bassin : nous avons supposé que le fonctionnement du bassin versant et l'occupation du sol resteront inchangés, de sorte que le paramétrage du modèle restera valable en conditions futures. Or l'évolution climatique peut avoir un impact sur la couverture végétale (naturelle ou agricole) et l'évapotranspiration ;
- le biais des modèles : nous avons supposé que le biais du modèle hydrologique pour les périodes futures est du même ordre de grandeur que le biais pour la période actuelle ;
- la capacité d'extrapolation des modèles : nous avons supposé que le modèle peut s'adapter à des conditions pas ou peu rencontrées sur la période de référence choisie pour estimer les paramètres [Coron et al., 2012].

2.3.2 Données utilisées

Les simulations climatiques du modèle du CNRM ARPEGE-ALADIN 52 disponibles sur le site du DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/>) pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 ont été utilisées et formatées. Les variables utilisées sont les précipitations et la température grâce à laquelle l'évapotranspiration potentielle (ETP) a été calculée selon la formule d'Oudin.

Choix de la période de référence

La même période de référence que celle utilisée dans l'étude Explore 2070 à savoir 1961-1990 a été choisie. En effet, elle n'empiète que de 5 à 10 ans sur la période à partir de laquelle une rapide augmentation des températures globales est constatée (observées à partir des années 1980). Il est ainsi légitime de lui attribuer un caractère relativement stationnaire.

Choix des périodes futures

Afin d'étudier l'évolution des critères statistiques caractérisant la variabilité hydrologique du bassin versant, les périodes de futur proche 2041-2070 et de futur lointain 2071-2100 ont été choisies.

2.3.3 Résultats à l'horizon 2070 et 2100 en termes de tendance

Les résultats obtenus pour le débit moyen annuel, le QMNA5 et le QJXA10 pour la station de Pessac sur la Dordogne sont présentés ci-dessous.

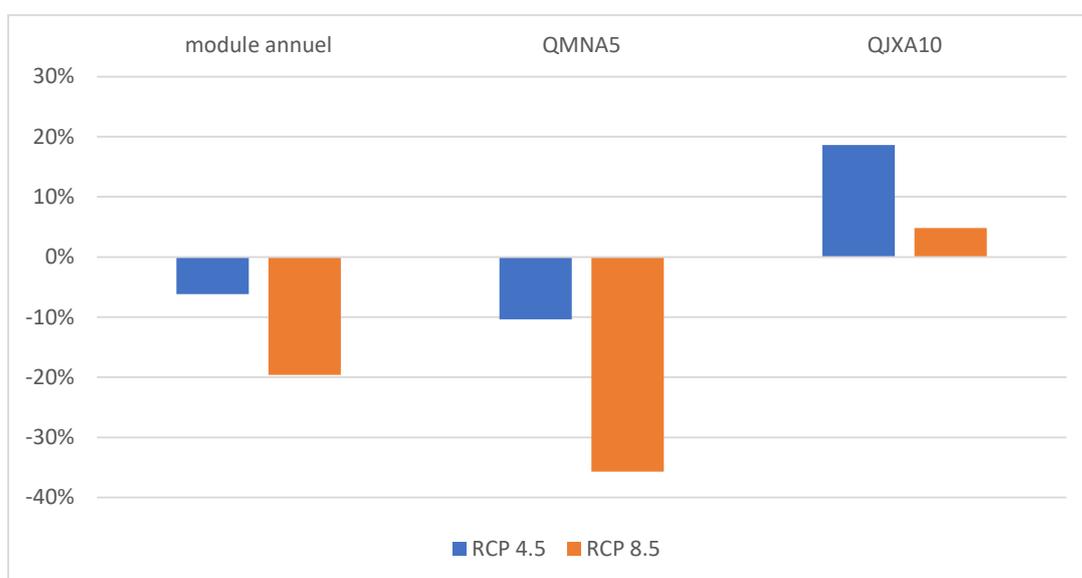


Figure 4. Évolution des indicateurs hydrologiques entre la période de référence 1961-1990 et le futur proche 2041-2070 pour les scénarios RCP 4.5 (en bleu) et RCP 8.5 (en orange)

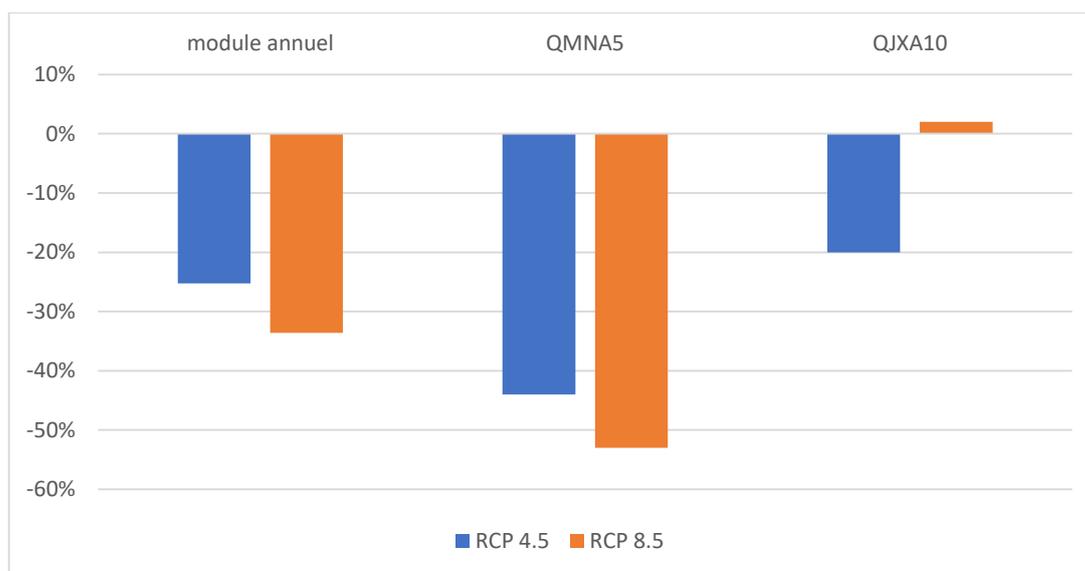


Figure 5. Évolution des indicateurs hydrologiques entre la période de référence 1961-1990 et le futur lointain 2071-2100 pour les scénarios RCP 4.5 (en bleu) et RCP 8.5 (en orange)

À l'horizon 2070, la figure 4 montre une baisse du débit moyen annuel de la Dordogne à Pessac de -6% à -20%. Cette tendance à la baisse des débits est encore plus marquée à long terme puisqu'à l'horizon 2071-2100, la baisse du débit moyen annuel varie entre -25% et -35%.

En ce qui concerne l'évolution des étiages, le modèle utilisé montre une tendance à l'aggravation des étiages sur la Dordogne à Pessac. En effet, l'indicateur des étiages, le QMNA5, connaît une baisse de -10% à -35 % à l'horizon 2041-2070. L'aggravation des étiages est encore plus importante à l'horizon 2071-2100 puisque la baisse du QMNA5 est de l'ordre de -45% à -55%.

En ce qui concerne l'évolution des crues, le modèle utilisé montre une tendance à l'aggravation des crues à l'horizon 2041-2070 puisque l'augmentation du QJXA10 varie entre +5% et +20%. À contrario, à l'horizon 2071-2100, il montre plutôt une tendance à la réduction des crues puisque le QJXA10 varie entre 2% et -20%.

Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus dans le cadre de l'étude Explore 2070 à l'exception de ceux concernant les crues. Ils doivent donc être considérés avec précaution car les indicateurs statistiques ont été calculés à partir d'un seul modèle climatique ce qui limite la taille de l'échantillon à une trentaine de données pour ce qui concerne le QMNA5 et le QJXA10. Pour avoir des résultats plus représentatifs, le même travail devrait être réalisé avec d'autres GCM-RCM.

3 Prise en compte des enjeux du développement durable

Dans le cadre de ce stage, je me suis intéressée au changement climatique et à ses impacts sur l'hydrologie des cours d'eau en amont de l'estuaire de la Gironde.

Les principales évolutions du climat attendues en France sont : une hausse des températures moyennes, une augmentation de la durée des sécheresses, le réchauffement de l'océan et l'accélération de la hausse du niveau des mers, le renforcement des épisodes de précipitations extrêmes (*Plan National d'Adaptation au Changement Climatique 2*).

L'augmentation des températures et la multiplication des périodes à fortes chaleurs, comme celles que nous avons connues cet été, ont un impact sur le bien-être de la population. Les logements et l'espace public sont rendus inconfortables par la chaleur.

Du fait de ces évolutions climatiques, de fortes modifications sur l'hydrologie sont à prévoir : des baisses annuelles de débits de toutes les grandes rivières du sud-ouest, comprises entre 20 et 40 %, pouvant atteindre - 50 % en période estivale. La dynamique des écoulements sera également fortement modifiée notamment en période de basses eaux : les étiages seront plus précoces, plus sévères et plus longs (*Garonne 2050*). Toutes ces modifications climatiques vont avoir un impact sur la disponibilité hydrique et créer ainsi une pression accrue sur les ressources en eau nécessaires aux écosystèmes et aux activités humaines, obligeant à trouver un nouvel équilibre entre ressource et besoins.

Des économies dans la consommation d'eau (eau potable, irrigation) seront rendues nécessaires par la raréfaction de la ressource. Nous devons apprendre à être plus responsables dans l'utilisation de cette ressource naturelle. Les pratiques et les productions agricoles devront être modifiées. L'eau devra être davantage stockée mais surtout économisée.

Dans l'estuaire de la Gironde, la diminution des débits et l'augmentation de la température de l'eau pourrait être un problème pour la centrale nucléaire du Blayais qui assure plus de 5% de la production

nationale et pourrait être contrainte à limiter son activité (*Panorama des effets du changement climatique et de leurs conséquences en Gironde*).

Ces évolutions climatiques auront également des impacts sur la biodiversité. En effet, moins d'eau et un réchauffement de l'eau entraîneront une raréfaction de l'oxygène dissous. Les milieux seront moins favorables aux espèces existantes. La baisse attendue du débit d'étiage des cours d'eau limitera leur capacité à diluer les pollutions diffuses (nitrates et produits phytosanitaires, eaux rejetées dans le milieu par les stations d'épuration et le ruissellement des eaux pluviales). La qualité de l'eau risque donc d'être dégradée.

Les modifications du climat auront aussi un impact sur l'augmentation de la vulnérabilité aux inondations, aux submersions marines, à l'érosion côtière. En effet, pour l'estuaire de la Gironde et les parties aval de la Dordogne et de la Garonne, la potentielle conjonction entre un fort débit des fleuves et une surcote marine, dans un secteur par ailleurs fortement urbanisé en fond d'estuaire (agglomération bordelaise) révèle une très forte sensibilité au risque de submersion (*Panorama des effets du changement climatique et de leurs conséquences en Gironde*). Les ports, comme celui de Bordeaux par exemple, pourraient, quant à eux, être contraints de redimensionner leurs structures de protection contre les inondations et connaître des problèmes de navigabilité.

L'adaptation aux effets du changement climatique, pour limiter les impacts négatifs de cette évolution du climat sur les sociétés humaines et l'environnement devient donc nécessaire. C'est pourquoi, le MTEs a publié en décembre 2018 un deuxième Plan d'Adaptation au Changement Climatique pour la période 2018-2022.

Conclusion

À l'issue de ce stage, une méthodologie, inspirée de la littérature, a été mise au point pour estimer l'impact du changement climatique sur la variabilité hydrologique des bassins versants en amont de l'estuaire de la Gironde. Elle a ensuite été appliquée au bassin versant de la Dordogne à Pessac et les premiers résultats obtenus sont conformes aux études déjà réalisées sur le sujet. Cette méthodologie a été appliquée avec un seul modèle climatique global, le modèle ARPEGE ALADIN 52 du CNRM.

Pour des résultats plus pertinents et compte-tenu des incertitudes liées aux modèles climatiques, l'usage de plusieurs GCM ou RCM est nécessaire afin de représenter la variabilité des tendances. Au moment de ce stage, les partenaires du projet ECCLIPSE n'avaient pas encore choisi les modèles climatiques qu'ils souhaitaient utiliser.

Afin d'alimenter le modèle hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Gironde, le travail réalisé devra être complété par une application de la méthode à la station de La Réole sur la Garonne.

Une fois construites, les chroniques de débits à Pessac sur la Dordogne et à la Réole sur la Garonne pourront alimenter le modèle Télémac afin de déterminer l'évolution des quantiles extrêmes pour le dimensionnement des structures de protection des inondations dans les zones vulnérables (GPMB, ville de Bordeaux, presqu'île d'Ambès) et les tirants d'eau et volumes de dragages du futur.

Bibliographie

Camille VALERO- ISEMAR Note de Synthèse N°219 - Avril 2020- L'adaptation des ports maritimes aux conséquences du changement climatique

Le climat de la France au XXI^e siècle-Volume 4-Scénarios généralisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer- G. Ouzeau, M. Déqué, M. Jouini, S. Planton, R. Vautard Sous la direction de Jean Jouzel

Caballero, Y., Voirin-Morel, S., Habets, F., Noilhan, J., LeMoigne, P., Lehenaff, A., & Boone, A. (2007). Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, 43(7).

Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P. Y., Sauquet, E., Vidal, J. P., ... & Maugis, P. (2013). Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070?. *La Houille Blanche*, (4), 5-15.

Nicolas, M. (2014). *Impact du changement climatique sur les débits du XXI^e siècle en France: Une estimation avec les nouvelles projections du GIEC (CMIP5) et le modèle hydrologique de l'Irstea (GR)* (Doctoral dissertation, Master 1 Sciences de l'univers, environnement, écologie-Spécialité Environnements continentaux et hydrosociétés, Université Pierre et Marie Curie, Paris).

Explore 2070-Hydrologie de surface-Octobre 2012-BRL ingenierie, IRSTEA, Météo France-59 p

Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C. and Andréassian, V. (2017). The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package. *Environmental Modelling and Software*, 94, 166-171. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.05.002.

Coron, L., Delaigue, O., Thirel, G., Perrin, C. and Michel, C. (2020). airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.4.3.65. DOI: 10.15454/EX11NA. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=airGR>.

Vidal, J. P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., & Soubeyroux, J. M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627-1644.

Coron, L., Andreassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., & Hendrickx, F. (2012). Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resources Research*, 48(5).

Panorama des effets du changement climatique et de leurs conséquences en Gironde-ARTELIA-Janvier 2015-84 pages

Garonne 2050 – Étude prospective sur les besoins et les ressources en eau, à l'échelle du bassin de la Garonne-Rapport final-réalisé pour l'Agence de l'Eau Adour Garonne

Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC2) – MTES - Octobre 2018

ANNEXES

Annexe 1 : Description des équations du modèle GR4J

1. Neutralisation

La première opération est la neutralisation de la pluie P par l'évapotranspiration potentielle E pour déterminer une pluie nette Pn et une évapotranspiration nette En calculée par :

Si $P \geq E$, alors $Pn = P - E$ et $En = 0$

Si $P < E$, alors $Pn = 0$ et $En = E - P$

2. Fonction de rendement

Dans le cas où Pn est différente de zéro, une partie Ps de Pn alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$Ps = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S}{X_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{Pn}{X_1} \right)}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh \left(\frac{Pn}{X_1} \right)}$$

où X_1 (mm) est la capacité maximum du réservoir de production et S le contenu du réservoir de production en début de pas de temps. Dans le cas contraire, lorsque En est différent de zéro, une quantité d'évaporation Es est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$Es = \frac{S \left(2 - \frac{S}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{En}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{En}{X_1} \right)}$$

Après actualisation du niveau du réservoir, une percolation $Perc$ issue du réservoir de production est alors calculée et alimentera ensuite l'écoulement.

3. Hydrogramme unitaire

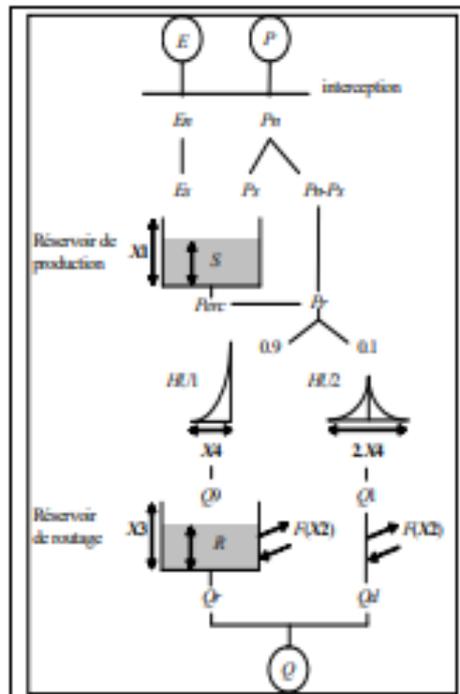
La pluie efficace totale est ensuite routée par un hydrogramme unitaire $HU2$ dépendant du temps de base X_4 , puis séparée en deux composantes, de proportions volumétriques fixes (90 % / 10 %)

4. Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2 \left(\frac{R}{X_3} \right)^{1,5}$$

où R est le niveau dans le réservoir de routage en début de pas de temps, X_3 la capacité à un jour du réservoir, X_2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul.



5. Réservoir de routage

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie $Q9$ de l'hydrogramme unitaire et F , puis sa vidange est calculée de la façon suivante :

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X_3} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\}$$

Le débit total correspond à la somme des deux composantes d'écoulement.

Le modèle comporte au final quatre paramètres optimisables :

- $X1$: capacité du réservoir de production (mm)
- $X2$: coefficient d'échanges souterrains (mm)
- $X3$: capacité à un jour du réservoir de routage (mm)
- $X4$: temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j)