
ETUDE DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE DES AQUIFÈRES DANS UN MODÈLE GLOBAL DE CLIMAT : ANALYSE DES RÉSULTATS DE CNRM-CM6 ET CNRM-ESM2 DANS LES SIMULATIONS CMIP6

RAPPORT DE STAGE

6 AVRIL 2020 - 11 SEPTEMBRE 2020



Maîtres de stage :

Dr. Bertrand DECHARME

Dr. Jeanne COLIN

Centre National de Recherches Météorologiques
42, Boulevard Coriolis, 31300 TOULOUSE

Stagiaire :

Maya COSTANTINI

maya.costantini@etu.univ-lyon1.fr

Master 2 Sciences de l'Océan, de l'Atmosphère
et du Climat (SOAC) Année 2019-2020



Sommaire

Sommaire	1
Remerciements	0
1 Introduction	1
2 Modèles	3
1 CNRM-CM6 et CNRM-ESM2	3
2 ISBA-CTrip	4
3 Aquifères	6
3 Données	8
1 Expériences	8
2 Variables	10
4 Méthodologie	11
1 Traitement des données en amont avec <i>cdo</i>	11
2 Traitement des données en aval avec Python	12
2.1 Les Masques	12
2.2 Test de Faste Discovery Rate	13
2.3 Méthodes d'analyses	14
5 Résultats et Discussion	15
6 Conclusion	23
ANNEXES	30
A Modèles	30
B Données	33
C Méthodologie	36
D Résultats	38

Remerciements

Avant toutes choses, je tiens à remercier tout particulièrement les Drs. Bertrand DECHARME et Jeanne COLIN, mes maîtres de stage, pour la confiance, la bienveillance et la sympathie qu'ils m'ont témoigné durant ces cinq mois. Ils ont tout mis en place pour que mon stage puisse se dérouler dans les meilleures conditions possibles, malgré les circonstances spéciales liées au confinement et au coronavirus. Grâce à leurs explications et nombreux conseils, j'ai pu progresser sereinement dans l'accomplissement de mes missions. Je voudrais aussi les remercier pour tout le temps et l'énergie qu'ils ont investi pour me préparer au concours de l'école doctorale, ceci afin que je puisse obtenir une bourse de thèse. Opération qui fut un succès, ce qui me permet avec joie de continuer en thèse sous leur direction l'année prochaine. J'aimerais remercier spécialement Jeanne pour m'avoir accompagnée aux urgences, un jour fatidique où je m'étais blessée en dehors du cadre du stage. Mes remerciements s'adressent aussi à toute l'équipe du laboratoire qui m'a extrêmement bien accueillie une fois que j'ai enfin pu rejoindre Toulouse.

Durant la période embrumée et restrictive due au covid-19, garder la motivation nécessaire pour travailler efficacement n'était pas simple, surtout lorsqu'il n'était pas possible d'aller au labo. C'est pourquoi, il me tient à coeur de remercier ceux qui m'ont permis de continuer d'avancer dans une ambiance joyeuse et productive. Bien sûr, Lisa, qui me prêta son logement durant le confinement, m'offrant de bonnes conditions de travail. Mais aussi, ma camarade de promo Natacha (princesse du ping-pong), qui m'a accueillie chez elle un certain temps. Sans oublier Théodore, qui nous invita (Natacha, Maxence, Baptiste et moi) à télétravailler chez lui. Ce qui nous permit d'avancer nos stages respectifs dans la bonne humeur et en mangeant beaucoup de cerises. Les gars, merci.

Je souhaite aussi remercier l'équipe de Mroc, qui durant le stage (mais aussi tout au long de l'année scolaire), m'a permis de travailler tout en passant de bons moments dans cette salle (devenue aujourd'hui une deuxième maison). Ils ont supporté avec courage, malice et bienveillance (relative) la présence quotidienne des étudiantes du Master SOAC : Sophonie La Normande (dite Sophofluide) et moi-même. J'aimerais remercier plus particulièrement Albin, pour toutes les fois où nous avons pu déguster sa cuisine (surtout les bananabreads) et pour son hébergement salvateur. Mais aussi Teddy, pour tous les chocolats chauds fait avec amour et Mumu, pour tous les cafés offerts à ma collègue Sophonie. Pour finir, bien sûr, merci Adrien, pour toutes les parts de gâteaux que tu m'as gentiment données et surtout, pour m'avoir sauvée en me remontant chez moi malgré l'absence d'ascenseur, le jour funeste où je me suis blessée.

J'adresse mes derniers remerciements à Ange, qui l'année passée, lors d'un précédent stage, vécu avec moi dans un monde sans fenêtres. Quelques heures après ma blessure, j'ai pu compter sur lui pour venir me chercher et me ramener à bon port afin que je puisse rentrer à Toulouse en toute sécurité et continuer mon stage. Ce qui n'est pas négligeable.

1 Introduction

L'eau est un élément primordial et nécessaire à l'apparition et au développement de la vie. Présente sur Terre, elle recouvre plus de 70 % de sa surface et se trouve à l'état liquide, solide et gazeux. Environ 97,5 % de l'eau sur Terre compose les mers et océans [1]. L'eau douce ne représente que 2,5 % de l'eau disponible à la surface de la Terre. Les glaciers correspondent à environ 68 % de cette eau douce et les eaux souterraines à 30 % [2]. Environ un tiers de l'eau douce utilisée par l'Homme est puisé dans les nappes phréatiques. Cela correspond à 36 % de l'eau destinée à un usage domestique, 42 % de l'eau utilisée pour l'agriculture et 27 % des besoins en eau de l'industrie [3]. Le volume des eaux souterraines est estimé à approximativement 4,2 millions de km³ dans les 2,5 premiers kilomètres de profondeur [2]. Ces eaux souterraines sont majoritairement stockées dans des aquifères.

Les aquifères sont définis comme l'ensemble des éléments géologiques permettant de contenir une nappe phréatique [4]. Ils sont assimilables à de gros réservoirs d'eaux souterraines. Perméables, l'eau y pénètre par infiltration des sols superficiels non saturés (zone vadose). La recharge en eau des aquifères peut s'effectuer par exemple via l'infiltration d'eaux fluviales, de plaines inondées, de la fonte du manteau neigeux, ou simplement de ruissellements dus aux précipitations. Les aquifères permettent un stockage de l'eau évoluant avec le temps [5, 6]. La diminution du niveau d'eau dans les aquifères peut être liée à des échanges avec les cours d'eau dans les plaines alluviales, à des remontées capillaires vers la zone vadose ou à des puisements anthropiques. Les aquifères sont caractérisés par les types de roches qui les composent, par leur perméabilité, porosité, capacité de stockage, profondeur et potentielles communications avec des milieux différents comme des fleuves, d'autres aquifères ou même les racines de la végétation. Lors de périodes de sécheresse, les aquifères peuvent entretenir le lit des fleuves. Les aquifères sont une composante importante du cycle hydrogéologique. Ce cycle faisant partie du système climatique global, les aquifères sont sensibles aux modifications du climat et jouent un rôle dans la dynamique du système climatique [7].

L'impact du changement climatique peut prendre de nombreuses formes. Ces modifications de l'équilibre du système créent des boucles de rétroactions qui entremêlent plusieurs paramètres à différentes échelles spatiales et temporelles [8]. L'hydrologie fait partie des domaines grandement modifiés par le réchauffement global [3, 9]. La question de la ressource en eau étant un enjeu mondial pour les activités humaines ainsi que pour la biodiversité des écosystèmes, il est primordial de pouvoir estimer précisément la réponse des réservoirs d'eau face au changement climatique [10]. La recharge en eau des aquifères repose majoritairement sur les précipitations, l'évapotranspiration des plantes et sur l'utilisation anthropique des nappes phréatiques [11]. Ces différents paramètres sont interconnectés et interagissent avec d'autres variables atmosphériques et de surface. De ce fait, l'utilisation de modèles globaux de circulation générale est appropriée à l'étude de l'évolution des variables hydrologiques, notamment des aquifères [6 7]. Ces modèles permettent en effet de prendre en compte les rétroactions liées à la surface, mais aussi à l'atmosphère et à l'océan.

La figure 1.1 présente la profondeur de la ligne piézométrique (i.e. surface de l'eau) des aquifères simulés en climat présent (moyenne de 1985 à 2014) par les modèles de circulation générale du CNRM. La plupart des aquifères sont à moins de 5 mètres du sol. Les quelques aquifères ayant des profondeurs comprises entre 5 et 10 mètres se trouvent généralement dans des régions désertiques ou avec du pergélisol.

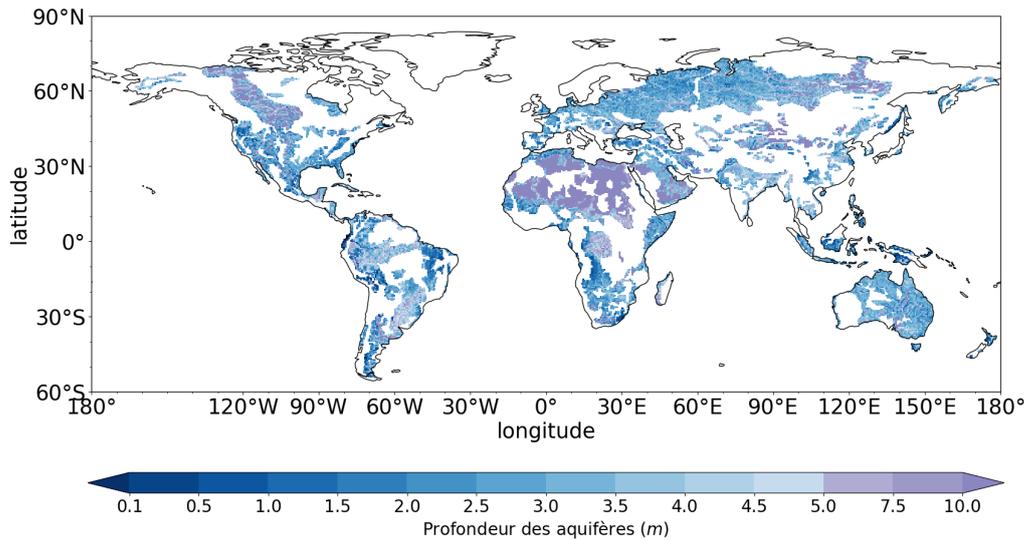


Figure 1.1: Profondeurs des aquifères en climat présent selon CNRM-CM6 et CNRM-ESM2

Avec le changement climatique, cette distribution des profondeurs des aquifères sera modifiée. Les aquifères étant les plus gros réservoirs d'eau douce continentaux, ils ont un rôle très important pour la biodiversité des écosystèmes, mais aussi pour l'Homme. L'augmentation de la variabilité des précipitations, de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration va perturber notre gestion des ressources en eau. Dans le but de minimiser ces perturbations, l'utilisation de l'eau stockée dans les aquifères deviendra un enjeu majeur [3, 10]. Certaines régions semi-arides subviennent majoritairement à leurs besoins en eau (agriculture, industrie et utilisation domestique) en soutirant de l'eau aux aquifères. Le danger est qu'une augmentation constante des besoins en eau (liée au développement des activités anthropiques et au renforcement des sécheresses), combinée à une raréfaction de la recharge de ces aquifères, risque de mettre en péril ces ressources souterraines [12]. Dans d'autres régions, l'augmentation des températures engendre une augmentation de l'évaporation des eaux disponibles pour recharger les aquifères. Cela entraîne une diminution non négligeable du taux de recharge des aquifères et les soumet à un fort risque de surexploitation [13]. La surexploitation est définie par un taux de pompage supérieur au taux de recharge des aquifères et peut mener à une diminution non négligeable des réserves des aquifères [14]. Ce scénario serait catastrophique pour les régions où les ressources en eau reposent en grande partie sur les aquifères. De plus, une diminution du niveau des aquifères impacterait aussi la biodiversité. Cela s'exprimerait entre autre par un assèchement des cours d'eau et des lac pendant les périodes plus arides, mais aussi une diminution de l'eau disponible pour les différents écosystèmes [2].

La connaissance de l'évolution des aquifères avec le changement climatique est donc très importante. Elle permettrait la mise en place de mesures efficaces afin de lutter contre les futures diminutions régionales des réserves d'eau.

Quelle est la variabilité climatique des aquifères dans un modèle global de climat ?

Telle est la question à laquelle les travaux effectués lors de ce stage tentent de répondre. Cette étude est réalisée via l'analyse des résultats des modèles couplés de circulation générale du CNRM¹ dans les simulations CMIP6². Dans une première partie, ce rapport présente les deux modèles utilisés, ainsi que leur module ISBA³-CTrip⁴ qui modélise l'hydrologie (dont les aquifères) de manière physique et réaliste. Ensuite, les données exploitées pour cette étude sont détaillées dans une seconde partie, puis la méthodologie suivie est décrite dans une troisième partie. Pour finir, les résultats obtenus sont présentés et discutés dans la quatrième et dernière partie.

¹Centre National de Recherches Météorologiques ²Climate Model Intercomparaison Project 6

³Interaction Soil-Biosphere-Atmosphere ⁴version CNRM du modèle Total Runoff Integrating Pathways

2 Modèles

1 CNRM-CM6 et CNRM-ESM2

Le modèle de climat CNRM-CM6² (<http://www.umr-cnrm.fr/cmip6/spip.php?article11>) [15] et le modèle du système-Terre CNRM-ESM2³ (<http://www.umr-cnrm.fr/cmip6/spip.php?article10>) [16] ont été utilisés lors de cette étude. Développés au CNRM, ces modèles de circulation générale couplent l’océan, l’atmosphère et les surfaces continentales. Leur développement permet au laboratoire de participer à la sixième phase du projet d’inter-comparaison des modèles de climat : CMIP6 [17]. Ceci assure la contribution du CNRM au sixième rapport du GIEC⁴.

CNRM-CM6 résulte du couplage de différents modèles (cf. figure 2.1). La composante océanique est représentée par NEMO⁵ qui modélise la thermodynamique des océans [18]. A NEMO est associé le modèle GELATO⁶ dont le but est de représenter l’évolution de la glace de mer en Arctique et Antarctique [19]. C’est le modèle ARPEGE-Climat⁷ qui représente la physique atmosphérique [20]. Il est lui même couplé avec la plateforme SURFEX⁸ qui permet les échanges de flux surfaciques atmosphère-océan, atmosphère-hydrologie continentale et atmosphère-glace [21, 22]. Implémentée dans SURFEX, la composante FLake⁹ modélise la thermique des lacs [23]. A cela s’ajoute le coupleur OASIS¹⁰ permettant d’interpoler les échanges synchronisés entre les différents modèles [21, 24]. Pour finir, le serveur XIOS¹¹ gère les sorties des modèle.

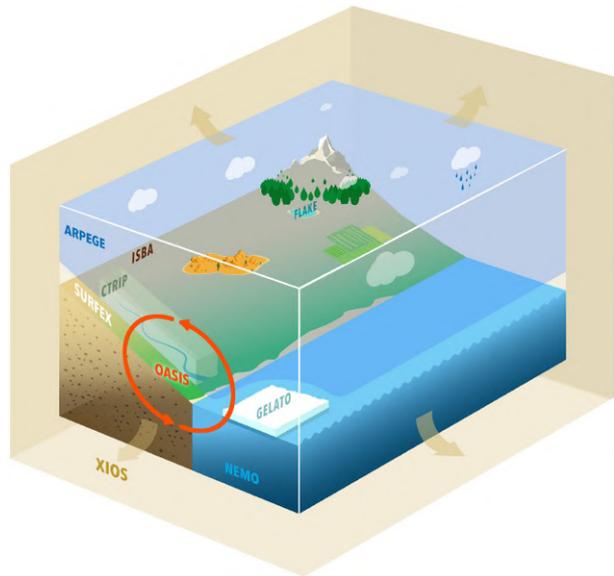


Figure 2.1: Représentation schématique de CNRM-CM6 [15]

CNRM-ESM2 est une déclinaison plus complexe de CNRM-CM6. Il comprend une implémentation des cycles biogéochimiques (i.e. le cycle du carbone), la chimie atmosphérique et les aérosols [16] (cf. annexe A figure 2 et figure 3). Ainsi, le schéma interactif d’aérosols TACTIC¹² [25] et le modèle chimique de transport REPROBUS¹³ [26] sont implémentés dans ARPEGE-Climat. PISCESv2¹⁴-gas, compris dans NEMO, modélise la biogéochimie marine [27].

Dans ces deux modèles, le module ISBA-CTrip est implémenté via SURFEX (cf figure 2.1). Il permet de modéliser l’hydrologie continentale de manière réaliste et physique [28]. C’est dans ce module que

²Climate Model 6 ³Earth System Model 2 ⁴Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Evolution du Climat

⁵(Nucleus for European Modelling of the Ocean ⁶Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean

⁷Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle - Climat ⁸SURface EXternalisée ⁹Freshwater Lake

¹⁰Ocean Atmosphere Sea Ice Soil ¹¹Xml configurable Input/Output Server

¹²Tropospheric Aerosols for Climate In CNRM ¹³Reactive Processes Ruling the Ozone Budget in the Stratosphere

¹⁴Pelagic Interactions Scheme for Carbon and Ecosystem Studies volume 2

sont modélisés les aquifères.

2 ISBA-CTRIP

ISBA-CTRIP (<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1092>) est un modèle de surface continentale. ISBA calcule l'évolution temporelle des bilans d'eau et d'énergie continentaux. Sa résolution est de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ en latitude/longitude. Il fournit à CTRIP des écoulements à partir desquels sont simulés les débits des rivières et des fleuves sur tous les continents jusqu'à l'océan. Couplés, ces deux modèles permettent la représentation des processus hydrologiques complexes tels que les aquifères ou les zones inondées. OASIS dans SURFEX autorise leur utilisation avec des projections et des grilles différentes. ISBA-CTRIP, couplé avec un modèle climatique de circulation générale permet ainsi de fermer le cycle hydrologique global et d'étudier les rétroactions liées à l'hydrologie continentale. Ce modèle possède un schéma d'inondations dynamiques des fleuves ainsi qu'un schéma d'aquifères diffusif bidimensionnel. La figure 2.2 présente une schématisation du modèle et des principaux processus physiques qu'il simule. ISBA-CTRIP a été évalué à l'échelle globale avec succès [28]. Lors de cette évaluation, les résultats de simulations du modèle pour différentes variables (e.g. débit des fleuves, couverture de neige, profondeur de couche active, humidité du sol, profondeur des aquifères) ont été comparés à des mesures et/ou des estimations. Néanmoins, certains processus liés aux barrages et à l'irrigation ne sont pas pris en compte.

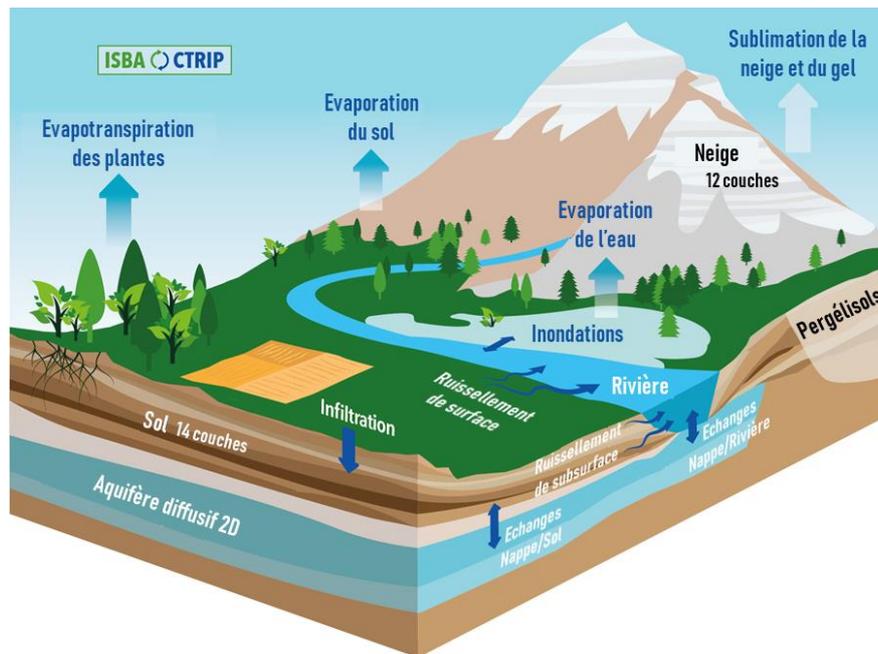


Figure 2.2: Représentation schématique de ISBA-CTRIP [28]

Paramètres de surface

Afin de modéliser les différents procédés physiques, ISBA-CTRIP intègre une paramétrisation de la couverture de surface continentale. L'occupation biophysique du sol et ses propriétés sont fournies par la base de données physiographiques ECOCLIMAP¹-II via des cartes à 1 km de résolution sur les continents [29]. ECOCLIMAP-II permet de déterminer un type de surface parmi 3 types de sols et 9 types de végétation (cf. annexe A figure 6 et figure 7). A chaque surface sont associés différents paramètres tels que la profondeur du sol, des racines, la hauteur des arbres, l'albédo de surface et le cycle annuel moyen de la couverture foliaire (LAI²) [29, 30]. Ces paramètres sont utilisés pour déterminer les propriétés des mailles. Une moyenne pondérée est réalisée à partir de la fraction

¹ECOSystem CLimate MAPs ²Leaf Annual Index

de chaque type de couverture de surface présent sur la maille [31, 32]. De la même manière qu’avec ECOCLIMAP, les propriétés des sols (i.e. textures et contenus en matière organique) sont déterminées à partir de la base de données globale HWSD¹. Quand à la topographie, elle est dérivée à partir des bases de données GMTED2010² [33] et HYDRO1K [28].

Diffusion de la chaleur et de l’humidité

Dans ISBA, le sol est discrétisé en 14 couches (cf. figure 2.2) allant de 0 à 12 m de profondeur. Les 8 premières couches sont comprises dans le premier mètre. L’équation de la chaleur (loi de Fourier) y est utilisée pour modéliser les transferts verticaux d’énergie. La profondeur des aquifères sert de limite inférieure à la colonne d’humidité du sol. La simulation de la diffusion verticale de l’humidité est rendue possible via l’équation de Richards et la loi de Darcy [34, 35]. Ces modélisations tiennent compte des propriétés thermiques et hydrauliques des parties minérales et organiques du sol. La diffusion de l’humidité n’est modélisée que sur les couches comprenant des racines [36]. Elle est ensuite extrapolée dans les couches inférieures via les forces de gravité et de capillarité appliquées à la loi de Darcy. Néanmoins, dans les régions avec du pergélisol, la diffusion de l’humidité est modélisée dans toutes les couches pour prendre en compte la forte inertie thermique liée aux horizons de sol constamment gelés en profondeur.

Représentation du manteau neigeux

Le manteau neigeux est modélisé en utilisant 12 couches de neige d’épaisseurs variables (cf. figure 2.2). Cela permet de bien représenter les profils d’énergie dans la neige et de faciliter son couplage avec le sol superficiel. La quantité de neige au sein du manteau augmente lors des épisodes neigeux et lorsque la pluie est interceptée par la neige déjà présente. Elle diminue avec le ruissellement d’eau liquide quittant la base du manteau neigeux. Ce ruissellement est dû à la fonte de la neige des couches supérieures qui s’écoule de couche en couche jusqu’au sol [28]. Les propriétés physiques macroscopiques du manteau neigeux (e.g. absorption et transmission de l’énergie solaire, compaction, densité, fonte, percolation et gel de l’eau) sont modélisées dans chaque couches [37].

Evapotranspiration

L’évapotranspiration est une variable représentant l’eau qui quitte la surface continentale pour aller dans l’atmosphère (hors évaporation directe des lacs et cours d’eau). Elle est la somme de l’évaporation de l’eau interceptée par la canopée, de l’évaporation ou de la sublimation du contenu en eau du sol nu, de la transpiration des plantes, de la sublimation de la neige et de l’évaporation des eaux des plaines inondées [28].

Cycle du carbone

Le carbone est très présent sur la surface continentale que ce soit dans les sols (e.g. tourbières, pergélisols) ou les plantes. En moyenne, la biosphère continentale absorbe environ 12 Gt de CO₂ par an [38]. Ce qui fait de la représentation du cycle du carbone dans les modèles de surface un enjeu majeur pour la compréhension et les prévisions du changement climatique [39]. Ainsi, la version d’ISBA utilisée dans CNRM-ESM2 comprend une représentation du cycle du carbone dans la végétation et les sols. ISBA modélise l’assimilation du carbone par la photosynthèse [40]. Grâce à cela, la respiration des plantes et l’évolution de la biomasse et de la couverture foliaire (responsable de la transpiration des plantes) sont simulées de manière interactive à partir du bilan carbone des feuilles. Elles évoluent donc avec le climat au cours du temps. Dans les sols, le carbone est distribué dans trois réservoirs représentatifs de son état de décomposition via l’approche Century [41]. Le carbone peut aussi être transporté via la lixiviation des sols vers les fleuves puis les océans [42].

¹Harmonized World Soil Database ²Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010

Plaines d'inondations

Les plaines d'inondations sont des réservoirs d'eau libre. Elles sont créées lors de la submersion d'une plaine par une partie de l'eau des fleuves lorsque la hauteur du fleuve est supérieure à la hauteur critique de son lit. Dans ce cas, cette eau peut s'infiltrer dans le sol, s'évaporer, ruisseler ou capter des précipitations. Une schématisation de ce processus est présentée annexe A figure 4. La prise en compte de ces plaines est donc importante pour étudier le cycle hydrologique continental et ses rétroactions. C'est pourquoi, le modèle comprend une paramétrisation de ce phénomène [28]. Elle est basée sur un schéma dynamique qui permet de modéliser l'évaporation des eaux de crue et leur ré-infiltration dans les sols en prenant en compte la topographie des sols [43, 44]. Les débits des fleuves entrants et sortants des plaines inondables sont modélisés grâce à l'équation de Manning [45]. ISBA-CTRIP est le seul modèle qui prend en compte les plaines inondées.

Débit des fleuves

CTRIP est un modèle de routage des écoulements d'eau des fleuves. Sa résolution est de $0,5^\circ$ (environ 50 km) sur tout le globe. Il résout la vitesse de l'écoulement de l'eau de manière dynamique. Les caractéristiques géomorphologiques des fleuves (hauteur, largeur et rugosité du lit) ont été déterminées via des relations empiriques. Le ruissellement total calculé par ISBA est transféré à CTRIP à l'exutoire des bassins versants. Il vient ainsi alimenter le débit des fleuves. Comme pour les plaines inondables, ce débit est calculé à partir de l'équation de Manning [45] à partir de la hauteur d'eau et de la masse d'eau contenue dans le fleuve. La hauteur d'eau du fleuve étant déterminée grâce à l'assimilation du lit du fleuve à un réservoir rectangulaire [46]

ISBA-CTRIP est le seul modèle capable de simuler les impacts des inondations et des aquifères sur le système climatique à l'intérieur d'un modèle de climat.

3 Aquifères

Paramétrisation

Lors de la modélisation des processus simulés dans ISBA-CTRIP, les précipitations non interceptées par la canopée, les eaux des rivières, des plaines inondables et résultantes de la fonte du manteau neigeux peuvent s'infiltrer dans la zone vadose des sols (zone non-saturée). Ainsi, elles permettent de recharger les bassins aquifères. Dans ce modèle, les aquifères sont répartis selon 218 bassins hydrogéologiques (cf. annexe A figure 5). La paramétrisation des aquifères se fait via l'équation (2.1). Cette équation diffusive 2D simule l'évolution de la profondeur des aquifères en fonction de la diffusion latérale de l'eau et des échanges bidirectionnels entre les aquifères et les rivières ou sols superficiels. L'équation est en coordonnées sphériques pour pouvoir prendre en compte la sphéricité de la Terre et être résolue selon une grille de latitude/longitude [47].

$$\omega_{eff} \frac{\partial h_w}{\partial t} = \frac{1}{r^2 \cos(\varphi)} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{T_\theta}{\cos(\varphi)} \frac{\partial h_w}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(T_\varphi \cos(\varphi) \frac{\partial h_w}{\partial \varphi} \right) \right] + \frac{1}{\rho_w} [Q_{sb} + Q_{sg} + Q_{ice} - Q_{riv}] \quad (2.1)$$

Avec h_w (m) la hauteur piézométrique ; ω_{eff} (m^3/m^3) la porosité effective de l'aquifère ; θ et φ respectivement la longitude et la latitude T_θ et T_φ (m^2/s) les transmitivités selon la longitude et la latitude, ; Q_{ice} ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) le ruissellement des glaciers ; Q_{riv} ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) le flux d'échange d'eau entre les aquifères et les rivières ; Q_{sg} ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) le flux d'échange d'eau entre les aquifères et les sols superficiels ; Q_{sb} ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) le flux de diffusion latérale de l'eau sous la surface et r (m) la distance au centre de la Terre.

Cette paramétrisation, développée lors de la thèse de Jean-Pierre Vergnes [4], est basée sur un modèle reconnu : le modèle hydrogéologique régional MODCOU développé à l'école des mines de Paris dans

les années 80 [48]. Seuls les aquifères non-confinés (non-recouverts par une couche peu perméable) sont pris en compte. Ces aquifères sont souvent présents dans les plaines alluviales ou dans des bassins sédimentaires composés de roches perméables. Pour la modélisation des aquifères, les données lithographiques utilisées pour estimer la porosité et la transmissivité des roches sont extraites d'une carte de lithologie continentale [49]. Les données des ressources en eau souterraine mondiales sont extraites de la carte hydrogéologique WHYMAP¹ et sont combinées avec les données topographiques (qui viennent de GMTED2010² [33]) pour délimiter les contours des aquifères [50]. L'eau contenue dans les aquifères peut remonter dans les sols superficiels par capillarité. Ces déplacements verticaux sont modélisés la plupart du temps près des rivières, dans les plaines alluviales et les basses terres [51].

Validation du schéma d'aquifères

Le schéma d'aquifères utilisé a été testé et validé à l'échelle régionale et globale. La validation à l'échelle régionale s'est faite sur la France et avec deux résolutions différentes [50]. La figure 2.3 (a) présente la modélisation de 4 bassins aquifères sur la France avec une résolution de $1/12^\circ$. Tandis que la figure 2.3 (b) présente la même chose mais à une résolution de $0,5^\circ$. Les résultats des différentes simulations avec et sans aquifères sont comparés à des observations. Quel que soit la résolution utilisée, les résultats obtenus en prenant en compte les aquifères représentent mieux la réalité [50]. La figure 2.3 (c) présente les séries temporelles des débits observés et modélisés pour la Seine à Poses. Avec en noir les observations, en rouge les débits modélisés sans le schéma d'aquifères et en bleu les débits modélisés avec les aquifères.

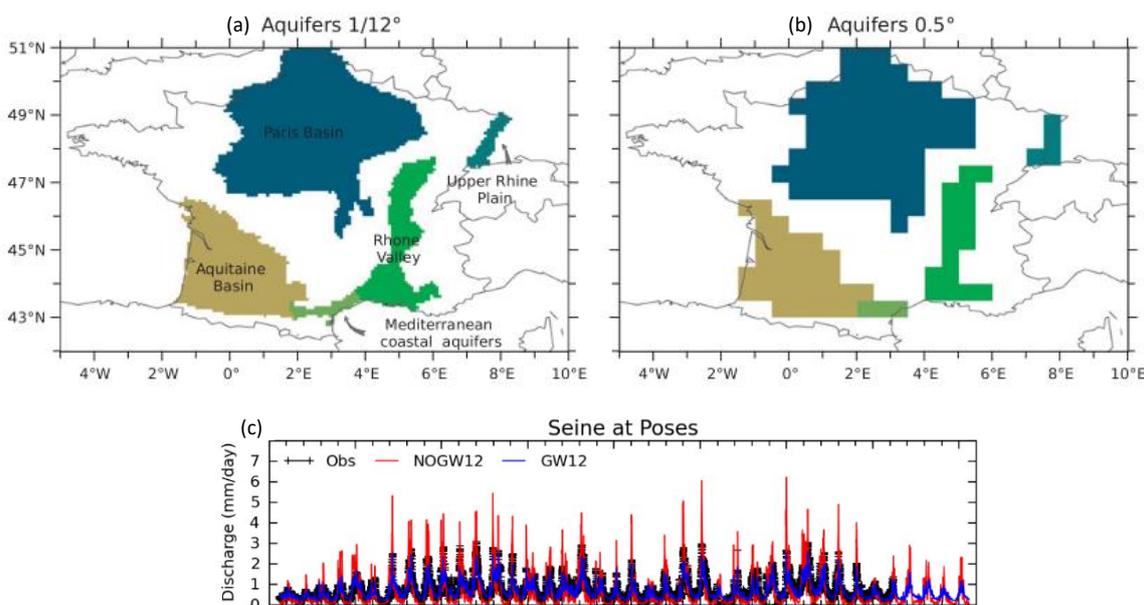


Figure 2.3: Validation du schéma d'aquifères. (a) : modélisation des aquifères à $1/12^\circ$. (b) : modélisation des aquifères à $0,5^\circ$. (c) : Séries temporelles des débits observés (noir), simulés par CTRIP à $1/12^\circ$ avec (GW12, bleu) et sans (NOGW12, rouge) aquifères sur la période 1970-2010 aux stations proches des embouchures de la Seine et de la Loire. Figures extraites de [50]

La prise en compte des aquifères donne une simulation des débits plus proche de la réalité. La paramétrisation des aquifères dans ISBA-CTRIP est robuste car elle améliore de manière générale la simulation des débits et des variations du stock d'eau continentale [50]. Cela justifie l'importance de modéliser les aquifères dans les modèles de surface continentale.

¹World-wide HYdrogeological Mapping and Assessment Programme

²Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010

3 Données

Les données utilisées pour réaliser cette étude sont issues des simulations réalisées pour CNRM-CM6 et CNRM-EMS2 dans le cadre de CMIP6. Ces simulations sont réalisées avec différents forçages (i.e. perturbations imposées au système) qui permettent de modéliser l'évolution des variables climatiques en passé, présent et futur. Ces données sont publiques et disponibles sur le site de ESGF² (<https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cmip6-ipsl/>) [52]. Elles sont distribuées au format NetCDF³ sous la forme demandée par CMIP6 [53]. Ce format très complet est auto-descriptif et permet de stocker des champs multidimensionnels et des métadonnées.

1 Expériences

Les résultats des expériences *piControl*, *historical* et *ssp* sont analysés. Elles permettent d'étudier l'évolution de variables respectivement sur la période pré-industrielle, sur la période allant de la révolution industrielle à notre époque et pour le futur. Le protocole de réalisation de ces expériences est basé sur les directives de CMIP6 [17].

Période pré-industrielle

L'expérience *piControl* fait partie du DECK⁴ de CMIP6. Elle est basée sur la période pré-industrielle. Elle permet l'évaluation de la variabilité climatique sans forçage anthropique. L'année 1850 est utilisée comme année de référence pour définir les forçages de *piControl*. Néanmoins, il est possible de considérer que le début de la révolution industrielle soit antérieure à 1850 [54]. En effet, cette année-là, le forçage radiatif anthropique a déjà atteint $+ 0.25 \text{ W.m}^{-2}$ [8] et les changements d'utilisation des sols ont émis $+ 0.6 \text{ Pg C.yr}^{-1}$ [55]. Les forçages utilisés ne sont donc pas totalement exempts d'effets anthropiques même s'ils en sont extrêmement proches. Lors de ces simulations, tous les forçages restent constants dans le temps.

La durée de *piControl* est de plusieurs siècles. Cette longue simulation permet de rendre compte de la variabilité naturelle du climat soumis à des forçages anthropiques constants. Avant de lancer les simulations, le modèle doit tourner jusqu'à ce que ses conditions climatiques soient à l'équilibre. Cette étape est nommée *spin-up* et doit durer quelques siècles (cf. figure 3.1) [17].

Période historique

L'expérience *historical*, dite historique, va de 1850 à 2014. Elle permet de simuler le climat présent. Contrairement à *piControl*, les forçages utilisés ne sont pas constants dans le temps. Ils ont été déterminés par des observations et des estimations. Il y a parmi les entrées du modèle, des forçages pour les émissions de gaz à effet de serre [56], pour le rayonnement solaire [57], pour les aérosols volcaniques stratosphériques [58], pour l'AOD⁵ des aérosols troposphériques [25, 59] et pour l'ozone [60].

²Earth System Grid Federation ³Network Common Data Form

⁴Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima ⁵Aerosol Optical Depth

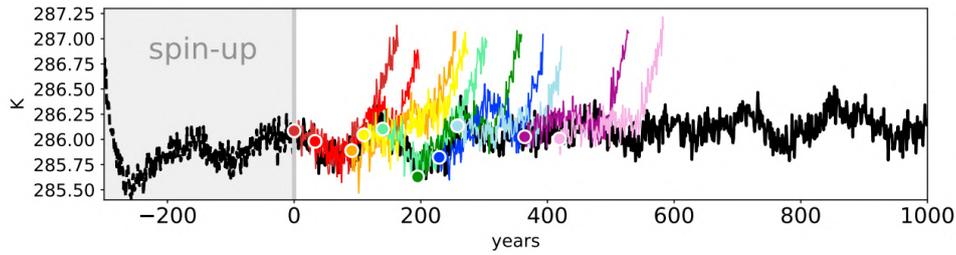


Figure 3.1: Températures globales moyennes pour *piControl* dans CNRM-CM6. Les points colorés correspondent à l'année de départ des différentes réalisations de simulations historiques. Figure extraite de [15].

La simulation historique est reliée à *piControl*. Cela est possible car *piControl* est forcée par les mêmes conditions que la première année de la période historique (i.e. 1850). La simulation historique est réalisée plusieurs fois avec une année de départ dans *piControl* différente à chaque fois (cf. les points colorés figure 3.1). Chaque réalisation de l'expérience *historical* constitue un "membre". L'ensemble des membres d'une expérience est appelé "ensemble". La réalisation de ces ensembles permet de rendre compte de la variabilité du système climatique soumis à des forçages anthropiques évoluant dans le temps. Cette variabilité est obtenue en réalisant la moyenne des membres d'un ensemble. Lors de cette étude, toutes les réalisations disponibles ont été utilisées. Cela correspond à un ensemble de 30 membres pour CNRM-CM6 et de 11 membres pour CNRM-ESM2.

Futur

Les scénarii futurs s'étendent de 2015 à 2100. Ils ont pour objectif de faciliter l'étude de l'impact de plusieurs voies d'évolution de développement de la société. Nommés *ssp*¹, ils correspondent à cinq voies d'évolutions socio-économiques plausibles pour la société et les éco-systèmes à l'échelle du siècle (*ssp1*, *ssp2*, *ssp3*, *ssp4* et *ssp5*) [61]. Leurs principales caractéristiques sont présentées figure 3.2. Ces cinq projections sont ensuite associées à des forçages liés aux scénarii RCP² [62, 63] qui avaient été utilisés pour le précédent exercice d'intercomparaison CMIP5 (ayant servi au le cinquième rapport du GIEC [8]).

Ssp1 est le scénario le plus optimiste. La société se développe positivement économiquement, socialement et environnementalement grâce à une forte collaboration internationale. *Ssp2* décrit un monde qui reste dans la dynamique actuelle. Dans *ssp3*, le monde s'axe sur des politiques régionalistes et nationalistes. Les fractures sociales augmentent et peu d'attention est attribuée à la préservation de l'environnement. *Ssp4* décrit un monde fracturé entre une élite et le reste de la population laissée de côté. Il y a de fortes problématiques sociétales mais un bon développement de la technologie permet de prendre des mesures pour préserver l'environnement. Dans le dernier scénario, *ssp5*, tous les pays se développent bien et la pauvreté diminue de manière globale. L'augmentation du niveau de vie engendre une augmentation de la consommation et des émissions de carbone. Les actions pour lutter contre le réchauffement climatique sont très faibles [64]. Plus de

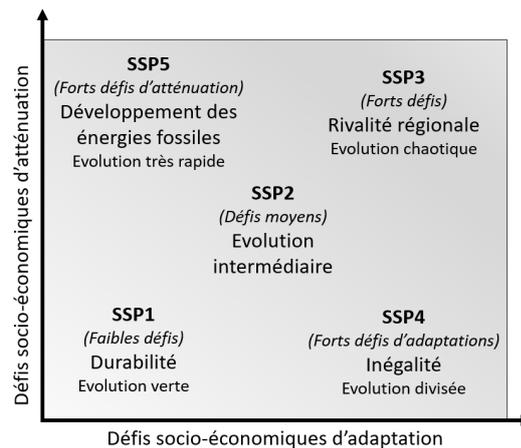


Figure 3.2: Représentations des défis d'adaptation et d'atténuation des différents ssp [64]

¹shared socioeconomic pathways ²Representative Concentration Pathways

détails sur les hypothèses des différents *ssp* sont disponibles annexe B figure 8, figure 9 et figure 10.

A chacune des cinq projections est associée une valeur d'augmentation du forçage radiatif entre 1850 et 2100. Ainsi, par exemple, le scénario *ssp585* correspond au cinquième scénario socio-économique (*ssp5*) auquel est attribuée une augmentation du forçage radiatif de $8,5 \text{ W.m}^{-2}$. De la même manière que pour les simulations historiques, plusieurs réalisations sont disponibles et elles ont toutes été utilisées pour ce projet. Cela correspond à 6 membres pour CNRM-CM6 et 5 membres pour CNRM-ESM2. Pour le futur, quatre scénarii sont étudiés : *ssp126*, *ssp245*, *ssp370* et *ssp585*.

2 Variables

Cette étude portant sur l'évolution des aquifères avec le changement climatique, les variables de profondeur des aquifères, de précipitations et d'évapotranspiration sont utilisées. Elles sont présentées sous forme de moyennes mensuelles. La profondeur des aquifères (appelée *wtd*¹) est issue de ISBA-CTRIP. Sa résolution est de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ en latitude/longitude sur une grille régulière. Elle s'exprime en mètres et représente le niveau atteint par l'eau dans l'aquifère par rapport au sol (i.e. sa hauteur piézométrique), comme représenté figure 3.3.

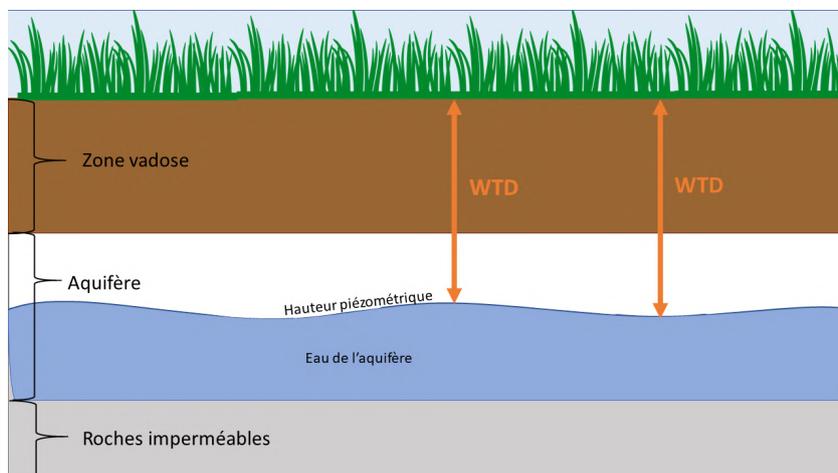


Figure 3.3: Représentation schématique de la variable *wtd*

La résolution des précipitations et de l'évapotranspiration est la même que celle de la grille atmosphérique de CNRM-CM6 et CNRM-ESM2, c'est-à-dire environ $1,4^\circ \times 1,4^\circ$ en latitude/longitude sur une grille de Gauss. Sur cette grille, l'écart entre les longitudes est constant alors que celui entre les latitudes varie selon la quadrature de Gauss [65]. Ces deux variables sont données en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Elles sont converties en mm.day^{-1} ($1 \text{ mm.day}^{-1} = 86400 \times 1 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Le nom de la variable correspondant aux précipitations est *pr*. Les précipitations représentent l'arrivée de pluies pouvant s'infiltrer dans les sols et alimenter les aquifères. La variable correspondant à l'évapotranspiration est nommée *evspsbl*. Elle correspond au flux d'eau quittant la surface et la végétation pour entrer dans l'atmosphère.

Des variables non climatiques mais liées aux modèles sont aussi récupérées afin de pouvoir procéder au traitement des données. Ces variables sont l'aire des mailles sur la grille atmosphérique (*areacella*) et sur la grille de ISBA-CTRIP (*areacellr*). La fraction de terre par rapport à la fraction d'océan sur une maille (*sftlf*) est également utilisée. Les aires des mailles sont données en m^2 et *sftlf* en pourcentage de surface continentale présente sur une maille. Une valeur de 100% équivaut à une maille avec uniquement de la surface continentale et 0% à une maille avec uniquement de l'océan. Une visualisation de ces trois variables est disponible annexe B figure 11, figure 12 et figure 13.

¹Water Table Depth

4 Méthodologie

Pour étudier l'évolution des aquifères avec le changement climatique, il faut comparer les variables simulées en climat présent, futur et passé. Pour chaque époque, la valeur des variables est évaluée à travers une moyenne de 30 ans. Une autre moyenne est ensuite effectuée sur tous les membres des simulations *historical* et des scénarii futurs. Les valeurs sont prises sur la période 01/1985-12/2014 pour le présent (avec 41 membres) et sur la période 01/1971-12/2100 pour le futur (avec 11 membres) (cf. figure 4.1). La période *piControl* (passé) ne comprend qu'une seule longue réalisation. Comme elle est comparée au présent, les 30x30 (30 ans x 30 membres) dernières années de *piControl* pour CNRM-CM6 et les 30x11 (30 ans x 11 membres) dernières années de *piControl* pour CNRM-ESM2 sont prises en compte. Chaque groupe de 30 ans est assimilé à un membre. Ceci est possible car le forçage anthropique constant dans *piControl* permet de considérer que les variables climatiques y sont à l'équilibre. Cela permet d'avoir le même nombre de membres pour *piControl* que pour *historical*. Les données sont d'abord pré-traitées avec les commandes *cdo*² puis analysées grâce à un langage de programmation (ici Python).

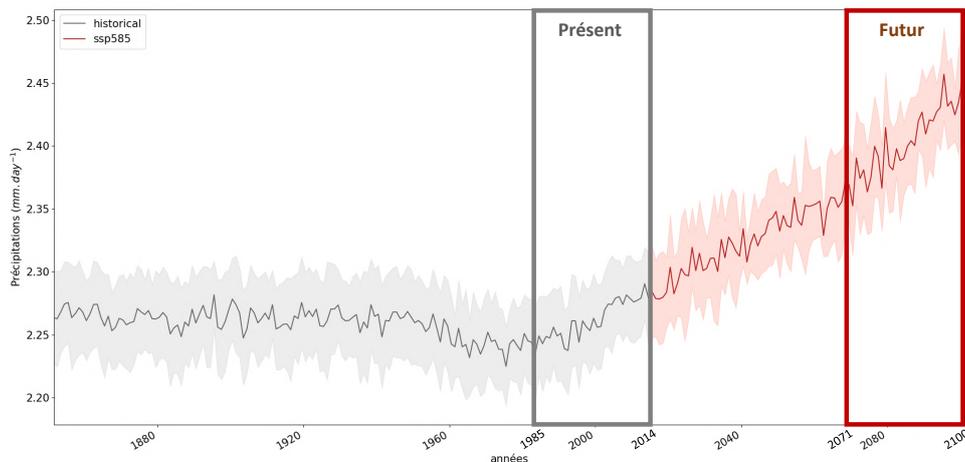


Figure 4.1: Série temporelle des précipitations de 1850 à 2100 dans CNRM-CM6 et CNRM-ESM2. En gris : scénario historique - en rouge : *ssp585*. Les zones en transparence correspondent à la dispersion inter-membres des modèles.

1 Traitement des données en amont avec *cdo*

Avant de pouvoir analyser les données, elles subissent un premier traitement via *cdo*. *Cdo* est composé de nombreux opérateurs faits pour manipuler et analyser les sorties des modèles climatiques [66]. Il est totalement adapté au traitement des sorties netCDF des modèles utilisés ici. Ces premiers traitements permettent de mettre en forme les données et ainsi de diminuer drastiquement le temps de calcul des scripts Python. J'ai donc rédigé des scripts shell afin de lancer les commandes *cdo*.

²Climate Data Operator

Moyennes

Dans un premier temps, pour chaque expérience (passé, présent et futur), *cdo* regroupe tous les membres dans un seul fichier netCDF (commande *cdo mergetime*). Ensuite, il sélectionne exclusivement les périodes voulues (commande *cdo selyear*). Puis, en chaque point de la grille, il réalise la moyenne de tous les membres et des 30 années sélectionnées (commande *cdo timmean*). Des moyennes annuelles sont faites pour réaliser des graphiques d'évolution temporelle des variables (commande *cdo yearmean*). Les mêmes opérations ont été effectuées en séparant chaque saison (commande *cdo selmon*). Cela permet l'évaluation saisonnière d'une variable.

Regriddage

Pour étudier l'évolution des aquifères avec le climat, les variables de précipitations et d'évapotranspiration sont comparées à celle de la profondeur des aquifères. Or, elles n'ont pas la même résolution. Il faut donc les projeter sur la même grille. *Cdo* met à disposition plusieurs commandes pour le faire. Un regriddage de la grille avec la plus faible résolution (grille atmosphérique : $\sim 1,4^\circ \times 1,4^\circ$) vers celle avec la plus forte résolution (grille des aquifères : $0,5^\circ \times 0,5^\circ$) est réalisé. Ce choix a été fait car une projection des aquifères sur la grille atmosphérique donnait des résultats moins fidèles aux valeurs initiales de *wtd*. Une explication serait que contrairement aux précipitations et à l'évapotranspiration qui sont représentées sur tout le globe, les aquifères ne sont situés qu'à certains endroits et ainsi comprennent un nombre très important de *NaN*¹ (absence de valeur numérique sur une maille) dans leurs données. Parmi la dizaine de commandes de regriddage proposée par *cdo*, celle nommée *remapcon* a été sélectionnée pour effectuer les projections des variables atmosphériques sur la grille des aquifères. C'est une méthode de regriddage conservative au premier ordre [66]. Elle a été choisie car elle donne des résultats plus fidèles que les autres commandes testées. Un exemple de regriddage est présenté annexe C figure 14.

2 Traitement des données en aval avec Python

Une fois les données pré-traitées, elles sont analysées avec Python. Ces analyses se font via la création de cartes d'évolution des variables entre les différentes périodes (sur tout le globe et par latitudes), de fonctions de densités de probabilités, de séries temporelles d'évolution des variables et de scatter plots (ou nuages de points).

2.1 Les Masques

Les données des variables sont fournies en tous points d'une grille représentant les latitudes et longitudes de la Terre. Comme expliqué précédemment, les précipitations et l'évapotranspiration sont définies sur toutes les mailles de la grille, alors que les aquifères ne sont présents que sur les bassins hydrogéologiques modélisés dans ISBA-CTRIIP. Par exemple, afin de comparer les précipitations avec les aquifères, il est nécessaire de ne garder que les mailles où les deux variables sont définies. Pour cela, j'ai créé un masque permettant de garder uniquement les mailles comprenant les aquifères. Ce masque est défini à partir des données de *wtd* en climat présent et remplace par des *NaN* toutes les données des variables atmosphériques non-superposées avec les aquifères. J'ai ensuite créé d'autres masques fonctionnant sur le même principe pour sélectionner d'autres zones géographiques. Il y a par exemple un masque ne gardant que les aquifères peu profonds (i.e. pour *wtd* inférieur à 10 m). Mais aussi un masque pour ne pas prendre en compte les océans. Deux versions de ce dernier sont réalisées. La première est à la résolution de la grille atmosphérique et est obtenue à partir de la variable *sftlf* en considérant qu'il n'y a pas d'océan sur une maille si *sftlf* > 95 %. La seconde est réalisée à partir de la variable *areacellr* car les aires des mailles n'y sont définies que sur les continents (cf. annexe B figure 13). Le dernier masque permet de garder uniquement les données sur l'Europe. Il s'étend en

¹Not a Number

latitude de 70°N à 30°N et en longitude de -15°E à 50°E. Tous ces masques sont superposables. Une visualisation des différents masques est disponible annexe C figure 15.

2.2 Test de Fausse Discovery Rate

Les variables simulées par les modèles évoluent avec le temps. Pour évaluer les effets du changement climatique sur une variable, il faut donc comparer deux périodes (e.g. présent et futur). Néanmoins, toutes les zones ne présentent pas forcément une évolution significativement attribuable au changement climatique. J'ai ainsi utilisé un test de significativité permettant de déterminer les mailles où le signal en changement climatique est réel. Ce test est le test FDR¹ (aussi appelé test de Wilks). Il est basé sur le principe d'un test de Student mais il est plus strict. Son but est de limiter les inventions de signal en réduisant le nombre de fausses détections de signal significatif [67]. Pour le test FDR, dans un premier temps, la p-value de chaque maille est calculée via un test de Student [68]. La p-value représente le risque (ou probabilité) de se tromper en attribuant de la significativité en changement climatique à une maille. Un simple test de Student considère que toutes les mailles pour lesquelles la p-value est inférieure à une valeur seuil arbitraire α (souvent égale à 0,05) sont significatives. Le test FDR, lui, détermine sa valeur seuil (p_{FDR}) en fonction de toutes les p-values de la grille. Pour cela, les p-values sont d'abord triées par ordre croissant. Ensuite, la valeur seuil est déterminée par l'équation (4.1) [68].

$$p_{FDR} = \max_{i=1, \dots, N} [p_{(i)} : p_{(i)} \leq (i/N)\alpha_{FDR}] \quad (4.1)$$

Avec N le nombre de points sur la grille, $p_{(i)}$ la p-value de chaque point et α_{FDR} le niveau de contrôle du test (égal à 0,1). La figure 4.2 illustre la réalisation d'un test FDR.

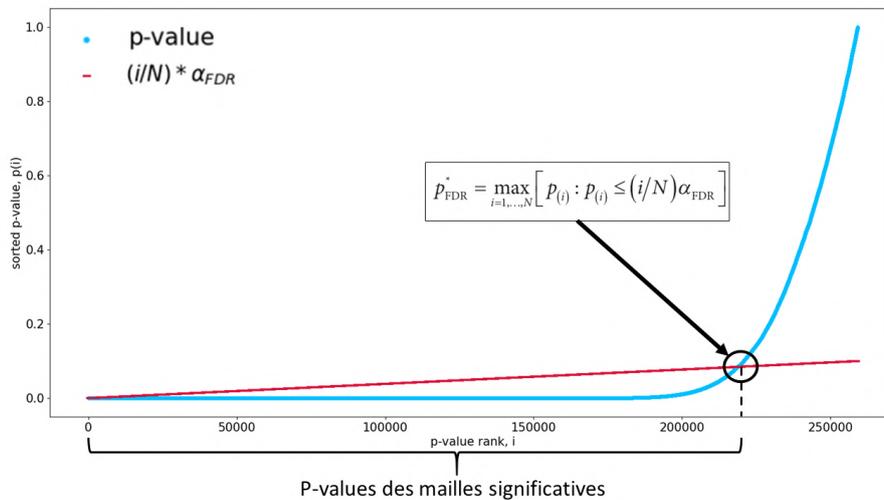


Figure 4.2: Illustration du test FDR sur des données d'évolution de précipitations entre le présent et *ssp245*. Courbe bleue : p-values calculées pour chaque maille et triées par ordre croissant. Droite rouge : $(i/N)\alpha_{FDR}$. Le seuil p_{FDR} est défini à l'intersection des deux courbes.

Malheureusement, en contrepartie de diminuer le signal "inventé", ce test augmente le signal "loupé". Néanmoins, il est possible de contrecarrer cet effet en utilisant des ensembles comprenant de nombreux membres. Ici, les ensembles contiennent autant de membres que les expériences en climat présent (41 membres) et en futur (11 membres).

¹False Discovery Rate

2.3 Méthodes d'analyses

Pour pouvoir analyser les données, j'ai réalisé plusieurs codes Python. Afin de déterminer l'évolution des aquifères avec le changement climatique, les pourcentages d'évolution des variables entre deux dates sont étudiés. Ces pourcentages d'évolution sont calculés entre le passé et le présent ou entre le présent et le futur. L'évolution des aquifères est étudiée sur la totalité des aquifères et sur ceux dont *wtd* est inférieur à 10 m (aquifères peu profonds). Celle des précipitations et de l'évapotranspiration est étudiée sur tout le globe et sur les continents, mais aussi au-dessus des aquifères et-au dessus des aquifères peu profonds. Cela permet de comparer les variables atmosphériques aux aquifères. L'étude peut aussi être restreinte à l'Europe. Toutes ces possibilités sont rendues possibles grâce à l'application des masques (cf. section 2.1). Les données de CNRM-CM6 et CNRM-ESM2 sont étudiées simultanément. Pour cela, une moyenne des résultats des deux modèles est calculée. L'évolution des variables est présentée sous la forme de cartes du monde pour lesquelles chaque maille est associée à un pourcentage de changement entre deux périodes. Ce pourcentage est calculé d'après l'équation (4.2).

$$\% = (ssp - historique)(100/historique) \quad (4.2)$$

Un pourcentage positif représente *wtd* se rapprochant de la surface (l'aquifère se remplit) ou une augmentation des précipitations ou de l'évapotranspiration. Inversement pour un pourcentage négatif. Les moyennes globales sont aussi calculées. Elles sont pondérées par l'aire des mailles pour ne pas fausser les résultats. En effet, toutes les mailles n'ont pas la même aire (cf. annexe B figure 13). Le pourcentage moyen d'évolution est calculé en faisant le ratio des moyennes globales. Les évolutions des variables sont aussi étudiées via des moyennes zonales (par latitudes). Les représentations graphiques des moyennes zonales permettent d'afficher la dispersion inter-membres du modèle. Cette dispersion est égale à l'écart-type de l'ensemble des membres multiplié par $\pm 1,64$. Elle peut être assimilable à l'incertitude liée aux modèles. Pour une meilleure visualisation de la tendance des résultats, une moyenne glissante sur 5 points est appliquée aux moyennes zonales. Les évolutions temporelles des variables sont aussi faites. Dans ce cas, les variables sont moyennées annuellement sur toute la période historique (1850 à 2014) et sur toute la période des projections futures (2015 à 2100). La dispersion inter-membres apparaît aussi sur ces représentations.

Afin d'analyser plus en détail l'évolution des variables, des fonctions de densité de probabilités et des scatter plots sont mis en place. Les fonctions de densité de probabilité représentent la fraction d'aire totale occupée par soit des bins de 1 mm.day^{-1} (pour les variables atmosphériques) et de 1 m (pour *wtd*), soit par des bins de 1 % pour l'étude de l'évolution des variables. Ces densités de probabilité seront appelées densité de fraction d'aire dans la suite du rapport. De la même manière que pour les moyennes zonales, une moyenne glissante sur 5 points a été effectuée. Pour les scatter plots, les pourcentages d'évolution des précipitations sont regroupés en bins de 3 %. La moyenne de l'évolution en pourcentage des aquifères correspondant aux mailles comprises dans chaque bin est ensuite calculée. Par exemple, si 5 mailles correspondent à une évolution de précipitations comprise entre 10 et 13 % et si les pourcentages d'évolution des aquifères sur ces mêmes mailles sont de 1%, 10 %, 12 %, 2 % et 5 %, au bin de 10 à 13 % de précipitations sera attribué à une augmentation de 7 % de *wtd* ($(1 + 10 + 12 + 2 + 5)/5 = 7$).

L'étude des différentes variables ne se fait que sur les zones significatives. Lorsque deux variables sont comparées, seules les zones de significativité communes entre ces deux variables sont prises en compte.

5 Résultats et Discussion

Un monde plus humide

Dans le cadre de ce rapport, seuls les résultats pour les aquifères peu profonds (i.e. wtd inférieur à 10m) sont présentés. Ce sont les aquifères capables de se mettre le plus facilement à l'équilibre avec le climat et ainsi ceux ayant une réponse claire au changement climatique. Les résultats des variabilités saisonnières ne seront pas non plus présentés. La figure 5.1 (a) présente l'évolution temporelle des profondeurs des aquifères en moyennes globales (i.e. sur tout le globe) de 1850 à 2100. Quel que soit le scénario futur, la profondeur des aquifères (wtd) moyenne diminue. Cela signifie qu'ils se rapprochent de la surface, donc qu'ils se remplissent. Cette constatation peut sembler paradoxale au premier abord. En effet, d'ici 2100, la température moyenne à la surface de la Terre pourrait augmenter de 1,5 à 5°C selon les différentes projections [8]. Ainsi, intuitivement, un monde globalement plus chaud devrait aller de pair avec un assèchement des aquifères. Mais, ce n'est pas le cas. Effectivement, le monde sera plus chaud, mais aussi, plus humide. La figure 5.1 (b) présente la même évolution mais pour les précipitations (pr). Ici aussi, quelles que soient les projections, la variable augmente avec les années. Les précipitations s'infiltrent dans les sols superficiels et participent à la recharge des aquifères. Cette augmentation globale des précipitation explique donc l'élévation globale du niveau de wtd . Ces figures présentent les moyennes globales de wtd et de pr . Il se peut donc qu'elles diminuent dans certaines régions.

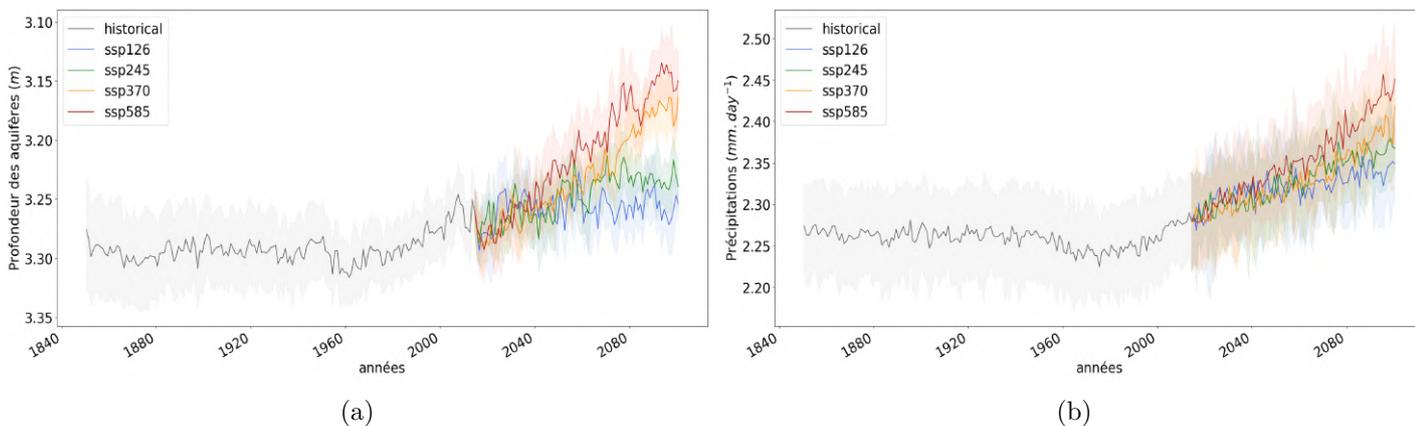
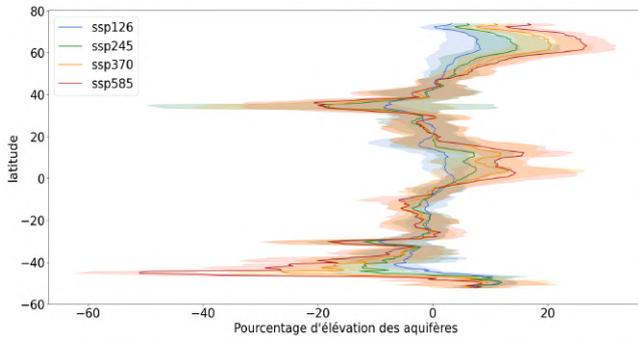


Figure 5.1: Séries temporelles de 1850 à 2100 selon plusieurs projections. (a) : Profondeur des aquifères. (b) : Précipitations. Gris : simulation historique - Bleu : $ssp126$ - Vert : $ssp245$ - Orange : $ssp370$ - Rouge : $ssp585$. Les zones en transparence correspondent à la variance inter-membre.

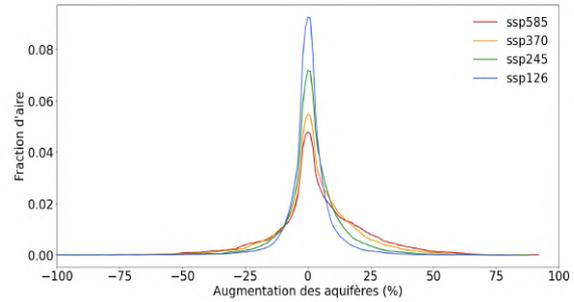
D'après la figure 5.1, pr et wtd semblent grandement impactées par les changements climatiques à venir. En effet, sur la période historique, elles sont quasiment constantes jusqu'en 1970 où elles commencent à augmenter. Cette augmentation (due majoritairement à l'augmentation des températures [69]), se poursuit avec les projections $ssp126$ et $ssp245$ et s'intensifie nettement avec $ssp370$ et $ssp585$. La réponse est différente en fonction de chaque scénario futur. Afin d'étudier la réponse des aquifères au changement climatique, il est nécessaire de déterminer l'impact des projections.

Les scénarii futurs

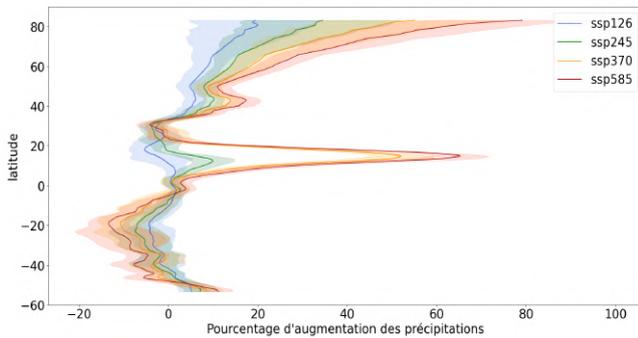
Les figures 5.2 (a) à (f) présentent les évolutions moyennes zonales et les densités de fraction d'aire des variables wtd , pr et $evspsbl$, selon les différentes projections.



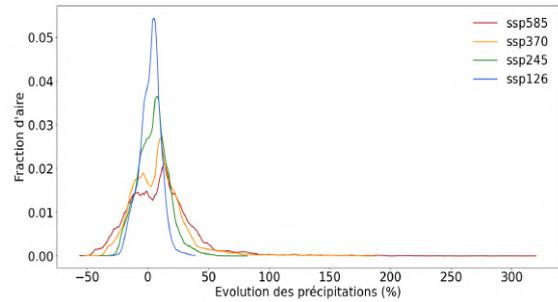
(a) Evolution de wtd en moyenne zonale



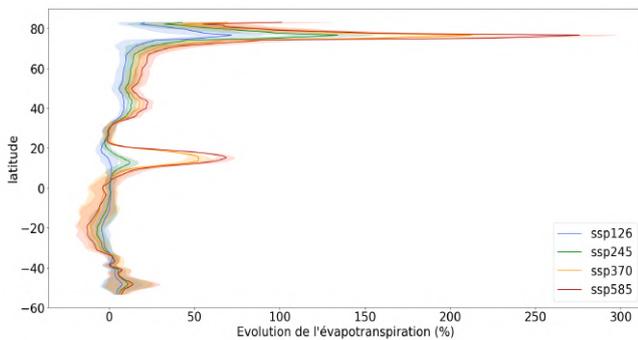
(b) Densité de fraction d'aire par pourcentage d'évolution de wtd



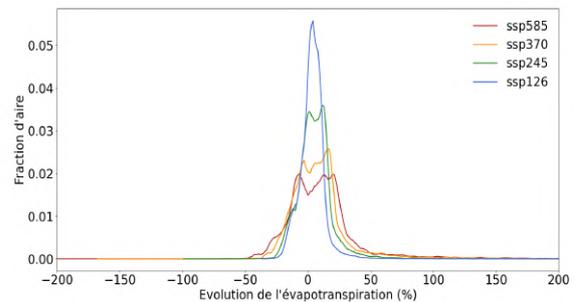
(c) Evolution de pr en moyenne zonale



(d) Densité de fraction d'aire par pourcentage d'évolution de pr



(e) Evolution de $evspsbl$ en moyenne zonale



(f) Densité de fraction d'aire par pourcentage d'évolution de $evspsbl$

Figure 5.2: Bleu : $ssp126$ - Vert : $ssp245$ - Orange : $ssp370$ - Rouge : $ssp585$. Les zones en transparence correspondent à la variance inter-membres.

Les densités de fraction d'aire (cf. figures 5.2 (b), (d) et (f)) permettent de constater que plus le scénario est sévère, plus de forts pourcentages d'évolution sont atteints au détriment des faibles pourcentages. Cela signifie que les changements sont globalement plus marqués pour les projections les plus pessimistes. De même, les moyennes zonales (cf. figures 5.2 (a), (c) et (e)) montrent que l'amplitude des changements augmente avec la sévérité du scénario, mais aussi que les tendances restent les mêmes entre les différentes projections. Il n'y a pas de zones où un scénario prévoit la diminution d'une variable, tandis qu'un autre scénario prévoit une nette augmentation. Ainsi, bien que l'amplitude des changements augmente avec la sévérité du scénario, le comportement des variables est sensiblement le même en fonction des différentes projections. C'est pourquoi, dans la suite du rapport, seuls les résultats obtenus avec le scénario le plus sévère ($ssp585$) sont présentés. Les

résultats obtenus pour les autres projections (disponibles annexe D de figure 16 à figure 27) montrent la même tendance que *ssp585* mais moins marquée et avec moins de signal significatif.

Représentation à l'échelle globale

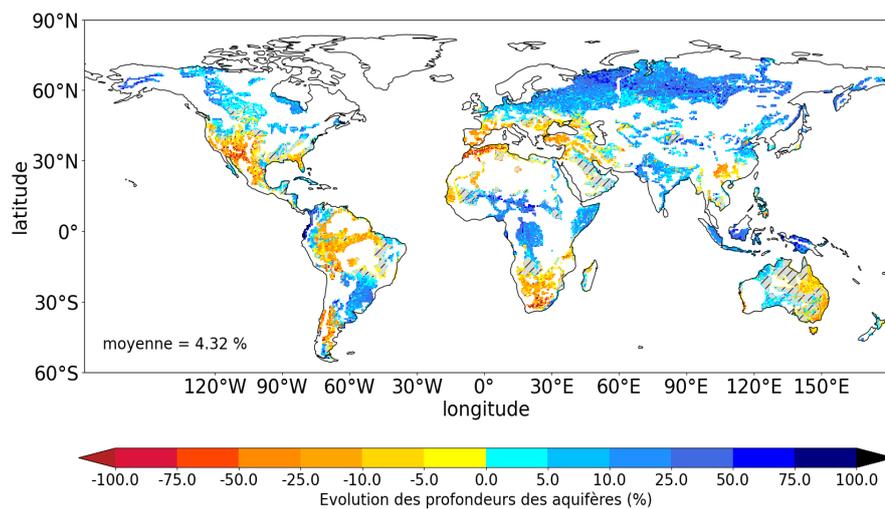
La figure 5.2 présente des pourcentages positifs comme négatifs. Ainsi, contrairement à la figure 5.1, elle permet de voir directement que dans certaines régions, les aquifères peuvent se vider et que les précipitations et l'évapotranspiration peuvent diminuer. Afin de pouvoir mieux visualiser les évolutions de ces variables à l'échelle globale, les figures 5.3 (a), (b) et (c), les représentent sur des cartes du monde. Des cartes d'évolution des variables obtenues avec la différence entre *ssp585* et *historical*, ainsi que les valeurs des variables dans *ssp585* et *historical* sont fournies en complément d'information respectivement annexe D figure 28 et annexe D de figure 29 à figure 31.

Ces cartes mettent en évidence l'impact du changement climatique sur les variables dans différentes régions. Les zones grisées et hachurées correspondent aux endroits où le signal n'est pas significatif en changement climatique. En général, ces régions sont caractérisées par de très faibles taux d'évolution. Ce sont des zones de transition entre l'augmentation et la diminution des variables. Dans l'hémisphère nord, une limite se démarque entre le nord de l'hémisphère (approximativement à la latitude 45°N) et le sud de l'hémisphère. Cette zone de transition passe par exemple au milieu de la France et coupe en deux l'Amérique du Nord. Au dessus de cette limite, les précipitations et l'évapotranspiration augmentent en moyenne entre 25% et 50% et les aquifères se rapprochent de la surface de 5% à 20% de leur *wtd* initial. En dessous, les précipitations et l'évapotranspiration diminuent de 10% à 25% et les aquifères s'éloignent de la surface de 10% à 20% de leur *wtd* initial. Dans l'hémisphère sud, les mêmes phénomènes se retrouvent. En Amérique du Sud, les pourcentages diminuent sur le Brésil et le sud ouest du continent et augmentent ailleurs. En Afrique, toutes les variables diminuent fortement excepté sur le Sahara où elles excèdent 200% d'augmentation. Ce comportement sur le Sahara pourrait laisser penser que les projections prévoient que cette région devienne très humide. Ce n'est en réalité pas du tout le cas. Le Sahara est une des régions les plus sèches du monde avec des précipitations en moyenne bien inférieures à $0,2 \text{ mm.day}^{-1}$ (cf. annexe D figure 30). Dans le scénario *ssp585*, cette région va connaître une augmentation de précipitations comprise entre 0,1 et $0,3 \text{ mm.day}^{-1}$. Cette très faible augmentation de précipitations associée à une valeur de départ quasi-nulle, explique les très forts pourcentages représentés sur la carte.

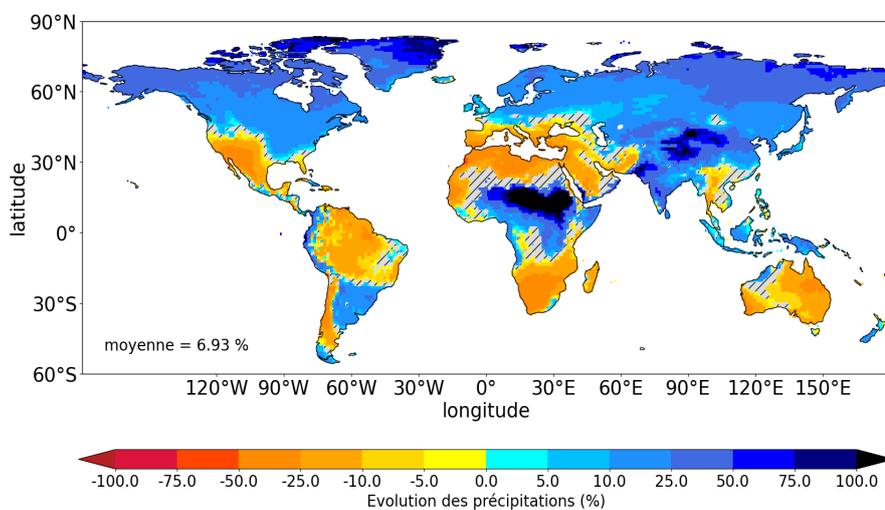
Pour étudier l'évolution des aquifères de manière plus complète, il faudrait le faire en multi-modèles (i.e. en prenant en compte les sorties de tous les modèles de CMIP6). Malheureusement, les modèles du CNRM sont les seuls à représenter l'évolution des aquifères de manière physique et réaliste. Une solution serait de dériver un lien statistique entre une variable simulée par tous les modèles et *wtd*, afin de transformer l'information de la variable simulée en multi-modèles en information sur la profondeur des aquifères. Cela permettrait de réaliser une cartographie de l'évolution des aquifères et de l'incertitude associée.

Lien entre les variables

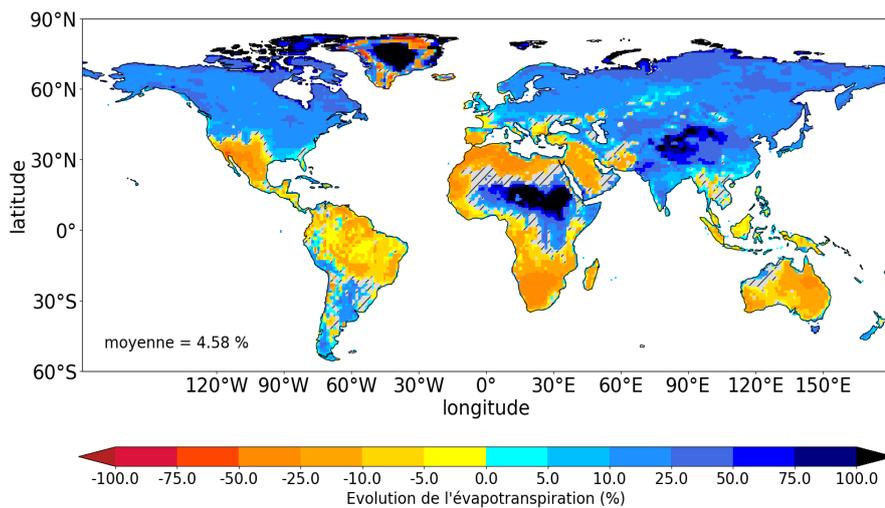
Avec la figure 5.3, le lien entre *pr*, *evspsbl* et *wtd* apparaît assez distinctement. En effet, de manière générale, lorsque les précipitations augmentent, l'évapotranspiration aussi et les aquifères se remplissent (en bleu sur les cartes). L'inverse se produit lorsque les précipitations diminuent (en rouge sur les cartes). L'augmentation de l'évapotranspiration est liée à l'augmentation des précipitations. En effet, plus il pleut, plus la quantité d'eau disponible à l'évapotranspiration augmente (l'évapotranspiration augmente aussi avec la hausse des températures). Les précipitations permettent de recharger les aquifères. Ainsi, l'évolution de *wtd* apparaît comme majoritairement corrélée à celle de *pr*. Il existe pourtant une autre variable qui pourrait influencer encore plus sur *wtd*. Cette variable est la soustraction de l'évapotranspiration aux précipitations (*pr - et*). Elle représente l'eau des précipitations disponible pour alimenter les aquifères, une fois que l'évapotranspiration a eu lieu (cf. annexe D de figure 32 à figure 34).



(a)



(b)



(c)

Figure 5.3: Scénario *ssp585* : Evolution des variables (%). (a) profondeur des aquifères (b) précipitations (c) évapotranspiration. Gris : zones non-significatives

Afin de déterminer qui de pr ou $pr - et$ influe le plus sur les aquifères, leurs évolutions moyennes zonales sont comparées (cf. figure 5.5). Cette comparaison se fait sur la région de l'Europe (cf. figure 5.4). Cette zone a été choisie car elle présente une évolution continue des profondeurs des aquifères entre le sud (diminution du niveau d'eau) et le nord (augmentation du niveau d'eau). Cette sélection empêche aussi de se retrouver avec des moyennes d'évolutions zonales proches de 0 % alors que des valeurs fortement négatives et positives se trouvent sur la même latitude (e.g. sur la latitude 30°S), ce qui donnerait la fausse impression que les variables ont peu évolué entre *historical* et *ssp585*.

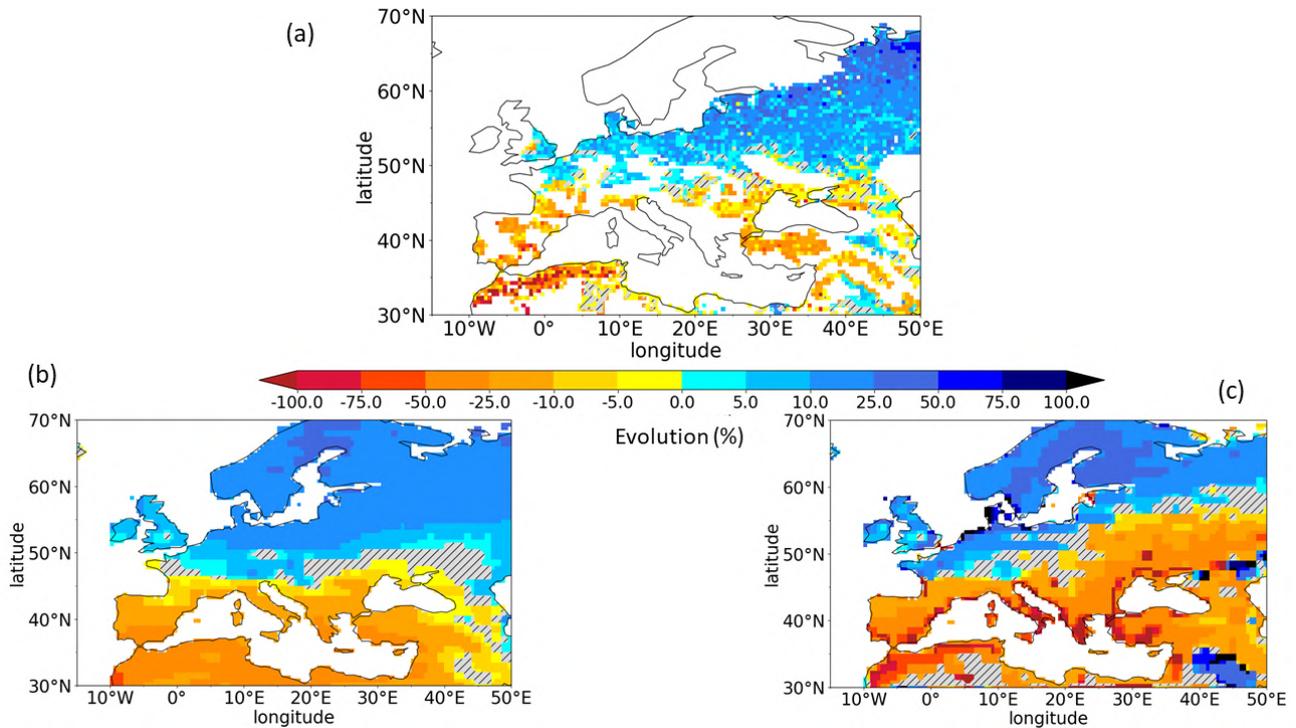
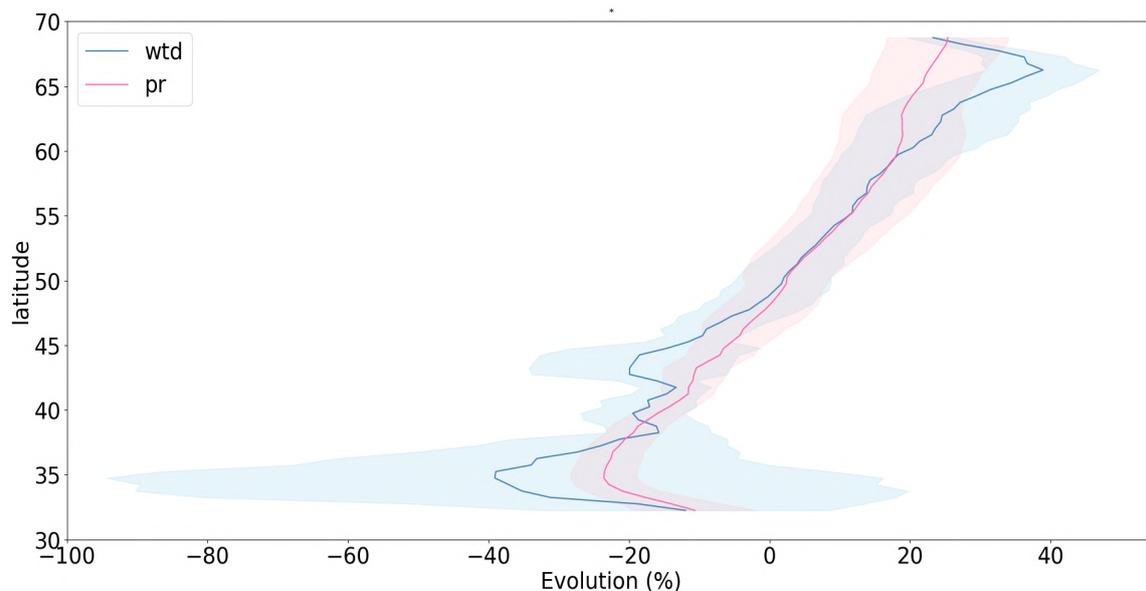
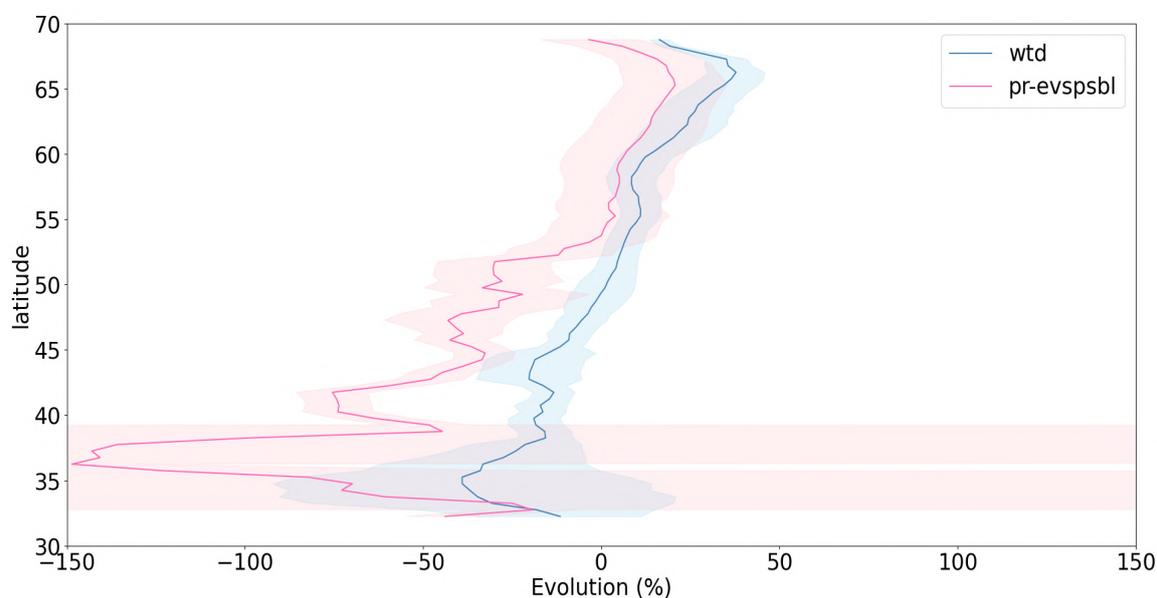


Figure 5.4: Evolution en (%) (a) de wtd , (b) de pr et (c) de $pr-et$. Les zones grisées sont non significatives en changement climatique.

De 55°N à 70°N, la figure 5.5 montre que les évolutions des précipitations et de $pr - et$ suivent celles des aquifères. En dessous de 55°N, les valeurs de $pr - et$ s'éloignent de plus en plus de celles des aquifères, alors que les précipitations en restent assez proches. Cette déviation de $pr - et$ viendrait peut-être d'un défaut de la variable de l'évapotranspiration : $evspsbl$. En effet, sur les mailles se situant sur les côtes, cette variable prend aussi en compte l'évaporation des océans. Ce qui expliquerait la présence de pourcentages fortement négatifs (cf. figure 5.4 (c) en rouge foncé) sur tout le pourtour méditerranéen, alors que de tels résultats ne sont pas observés pour les précipitations (cf. figure 5.4 (b)). Pour pouvoir s'en assurer, il faudrait pouvoir recommencer la même étude mais avec une variable d'évapotranspiration ne prenant pas en compte les océans. Les précipitations ressortent comme la variable la plus adaptée à partir de laquelle dériver un lien statistique avec les aquifères.



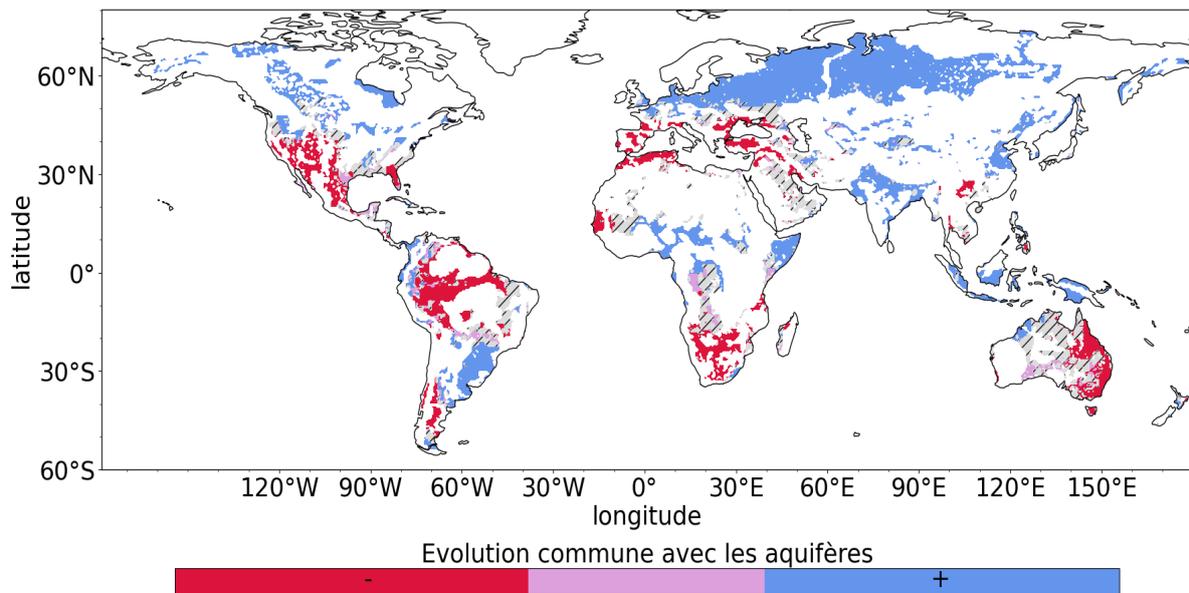
(a) *wtd* et *pr*



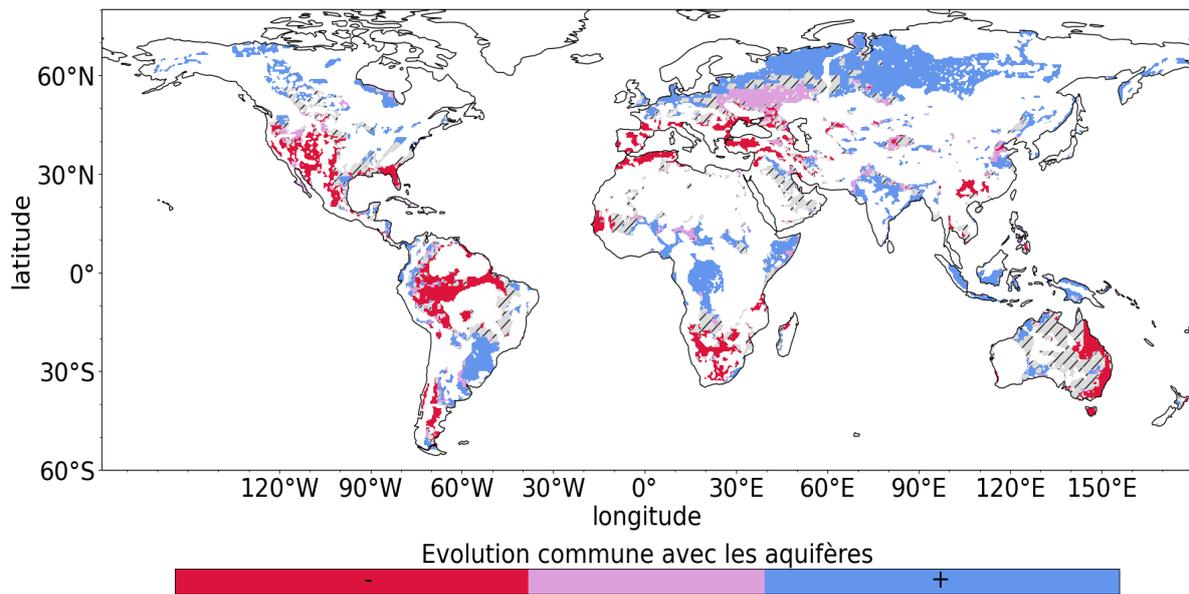
(b) *wtd* et *pr-et*

Figure 5.5: Pourcentages d'évolution zonale de *wtd* (bleu) comparés avec ceux (a) de *pr* et (b) de *pr-et*

La figure 5.6 présente une comparaison du signe de l'évolution de *pr* (figure 5.6 (a)) et de *pr-et* (figure 5.6 (b)) avec celui de *wtd*. Les zones bleues sont celles où *pr* (ou *pr-et*) augmente, tandis que les aquifères se rapprochent de la surface. Les zones rouges correspondent à une diminution de *pr* (ou *pr-et*) et des aquifères qui se vident. Les zones violettes représentent une absence de corrélation entre l'évolution de *pr* (ou *pr-et*) avec *wtd*. Dans le cas des précipitations (cf. figure 5.6 (a)), les zones violettes sont présentes sur 17,19 % des aquifères modélisés. Tandis que dans le cas de *pr-et*, les zones violettes sont présentes sur 21,59 % des aquifères. Cela renforce l'idée que *pr* est la variable la plus adaptée pour estimer l'évolution de *wtd* sur cette région.



(a) *wtd* et *pr*



(b) *wtd* et *pr-et*

Figure 5.6: Comparaison entre le signe de l'évolution de (a) *pr* (et (b) *pr - et*) et celui de *wtd*. Bleu : zones où *pr* (ou *pr - et*) augmente et *wtd* se rapproche de la surface. Rouge : le contraire. Violet : l'un augmente et l'autre diminue. Gris : zones non-significatives

A la recherche du lien statistique

La figure 5.7 présente le scatter plot¹ d'évolution du niveau des aquifères par rapport aux précipitations (bins de 3 % pour les précipitations), sur l'Europe et pour les différentes projections. Comme attendu, aux diminutions de précipitations sont associées des diminutions du niveau des aquifères et inversement. Pour une diminution de 25 à 50% de précipitations, les aquifères ne semblent pas suivre de loi particulière et présentent de forts taux de diminution. A partir d'une diminution d'environ 25% pour les précipitations et pour les aquifères, le nuage de point semble évoluer linéairement en passant par l'origine du repère. Le même scatter plot mais sur tout le globe est présenté annexe D figure 36. Son allure est similaire à celle de la figure 5.7, excepté que les précipitations atteignent des pourcentages d'évolution plus forts. Cela permet de constater qu'à partir d'une augmentation d'environ 30 % de précipitations, l'élévation des aquifères s'arrête quasiment. Cela est peut-être dû au fait que les aquifères sont arrivés à saturation et ne peuvent plus se remplir. Le scatter plot en global de l'évolution des aquifères en fonction de *pr-et* est disponible annexe D figure 37. Son allure est la même que celle des autres scatter plots pour des pourcentages d'évolution de *pr-et* supérieurs à -50 %. En dessous de cette limite, les évolutions des aquifères sont dispersées entre ± 25 % et il ne semble plus y avoir de lien statistique clair entre *pr-et* et *wtd*. Seules les projections *ssp370* et *ssp585* présentent des augmentations de précipitations bien au delà de 50 %. Comme souligné dans les précédentes parties, plus le scénario est sévère, plus les pourcentages d'augmentation et de diminution atteints sont élevés.

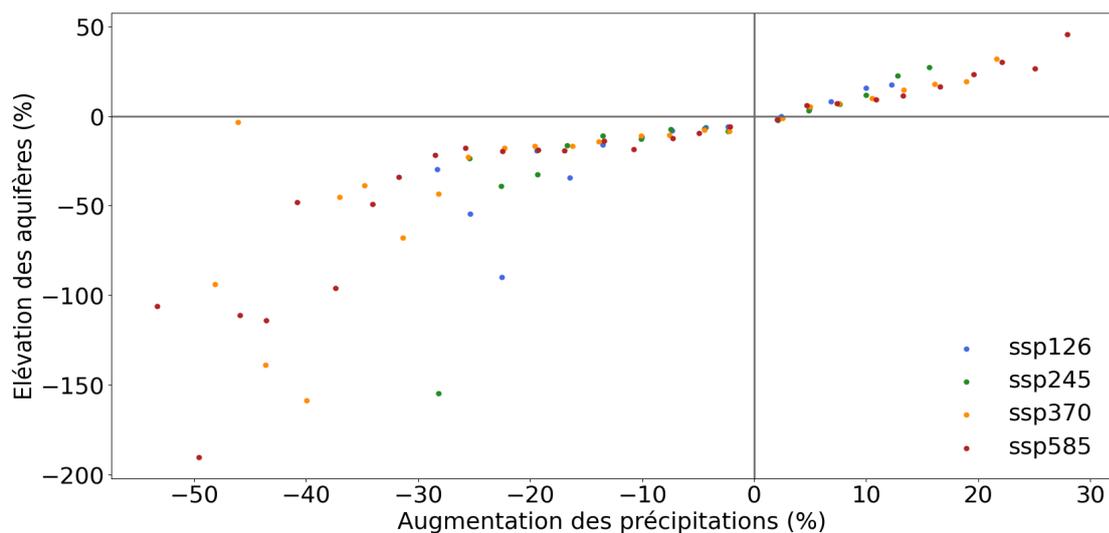


Figure 5.7: (a) : Scatter plot de l'évolution des profondeurs des aquifères en fonction de celle des précipitations (bins de 3 %) pour les différentes projections

Pour aller plus loin, il faudrait trouver un lien statistique entre les précipitations et les aquifères de ce scatter plot. Ce lien statistique entre les deux variables pourrait ensuite être appliqué sur de l'analyse multi-modèles afin d'étudier de manière plus complète l'évolution des aquifères avec le climat. Ce travail n'a pas pu être effectué durant le stage par manque de temps, mais je le poursuivrai plus tard en thèse.

¹nuage de points

6 Conclusion

Pour conclure, ce stage a permis l'amélioration de la compréhension de la réponse des aquifères face au changement climatique selon plusieurs projections futures. Cette étude permet de prendre en compte les rétroactions du climat sur les aquifères, mais aussi celle des aquifères sur le climat. Cela est possible car les modèles couplés de circulation générale du CNRM sont les seuls à être capables de simuler la réponse des aquifères de manière réaliste et physique.

L'évolution des aquifères est similaire selon les quatre projections futures, mais les changements sont plus marqués pour les scénarii les plus sévères. Selon le scénario *sps585* appliqué aux expériences des modèles du CNRM, d'ici l'année 2100, le niveau des aquifères peu profonds augmenterait en moyenne de 4,32 % (i.e. un rapprochement de la surface de 0,14m) (cf. figure 5.3 (a)). En effet, l'augmentation de température liée au réchauffement entraînerait une intensification globale du cycle hydrologique [69]. Cela se traduisant entre autre par une augmentation globale des précipitations et ainsi une intensification de la recharge des aquifères (via l'infiltration de l'eau de pluie dans les sols superficiels). Néanmoins, cette augmentation globale du niveau des aquifères n'est pas homogène sur tout le globe. En effet, la figure 5.3 (a) montre une disparité entre les différentes régions du monde. Là où certaines zones voient leurs aquifères se remplir (e.g. la partie nord de l'hémisphère Nord), d'autres seront victimes d'une forte diminution de leur eaux souterraines. C'est le cas par exemple du sud des Etats-Unis, du Mexique, de certaines régions d'Amérique du Sud, du sud de l'Afrique, de l'est de l'Australie, du sud de l'hémisphère Nord et du Maghreb. La figure 6.1 donne l'état des profondeurs des aquifères en climat futur selon *sps585*. Les aquifères présentés sont ceux qui étaient à moins de 10m de la surface dans *historical*. Le niveau de certains aquifères a tellement baissé par rapport à l'expérience *historical*, qu'il est passé sous les 10m de profondeur (cf. points rouges sur la figure 6.1). Cette diminution est surtout visible au Maghreb, au Mexique et en Afrique du Sud. Dans d'autres régions, certains aquifères déjà proches de la surface (moins de 2m de profondeur) s'en sont beaucoup rapprochés (jusqu'à quelques dizaines de centimètres). Ce cas de figure est très présent en Russie. Entre les régions caractérisées par une forte augmentation du niveau des aquifères et celles caractérisées par une forte diminution, se trouvent des zones de transitions. Elles peuvent être interprétées comme des démarcations permettant de déterminer une limite entre les régions qui seront plus humides et celles qui seront en proie à la sécheresse. La détermination précise de cette limite est un enjeu important. Sa connaissance permettrait la mise en place de mesures de gestion des eaux souterraines dans le but d'anticiper les potentielles futures pénuries d'eau [70]. Dans l'hémisphère Nord, cette limite se situe aux alentours de 45°N d'après les modèles du CNRM.

Cette analyse est basée uniquement sur les deux modèles du CNRM : CNRM-CM6 et CNRM-ESM2. Pour étudier de manière plus complète la réponse des aquifères face au changement climatique et l'incertitude associée, il faudrait réaliser une analyse multi-modèles. Cette analyse est possible en dérivant un lien statistique entre l'évolution des précipitations et celle de la profondeur des aquifères. En effet, les précipitations semblent être la variable la plus adaptée pour suivre l'évolution des aquifères (cf. figure 5.5 et figure 5.6). Ce lien statistique pourrait être déduit du scatter plots présenté figure 5.7. Malheureusement, il n'a pas encore pu être établi par manque de temps. Cependant, ce travail sera effectué ultérieurement. Cela permettra l'élaboration d'une cartographie plus complète de l'évolution des aquifères et de l'incertitude associée. Une fois l'analyse multi-modèles terminée, il serait intéressant de coupler la cartographie des aquifères avec une cartographie des besoins en eau de l'humanité [2]. Cela permettrait de déterminer avec précision les régions risquant de souffrir drastiquement de la diminution des stocks d'eaux souterraines et ainsi de commencer à mettre en place des solutions.

Ces solutions peuvent consister par exemple en une répartition différentes des cultures [71, 72], une amélioration des technologies agro-alimentaires et de gestion de l'eau [73] ou encore des modifications de régimes alimentaires. La mise en place de ce genre de mesures sera nécessaire pour éviter les épisodes de pénurie d'eau, mais elles demandent un fort investissement économique que tous les pays ne pourraient pas se permettre [2].

Bien que ISBA-CTRIP permette une simulation physique et réaliste des aquifères en réponse au changement climatique, certains paramètres ne sont pas pris en compte. C'est le cas par exemple des barrages et de l'irrigation. Ces deux processus anthropiques peuvent modifier les flux d'eau entre la surface, l'atmosphère et les océans. Ainsi, cela peut mener à des erreurs sur l'analyse de l'évolution des aquifères, mais aussi des autres ressources en eau [74]. Il serait donc important de pouvoir les prendre en compte. Le CNRM travaille actuellement sur l'implémentation de ces processus au sein de ISBA-CTRIP. A l'issue de ce stage, dans la thèse que j'effectuerai au CNRM, je serai amenée à continuer le travail commencé durant ces cinq mois. En effet, la thèse s'inscrit dans la continuité du ce stage et porte sur l'étude de l'évolution des ressources en eau et zones humides avec le changement climatique global. Elle comprend une partie dédiée à l'implémentation d'une paramétrisation simplifiée de l'irrigation dans ISBA-CTRIP.

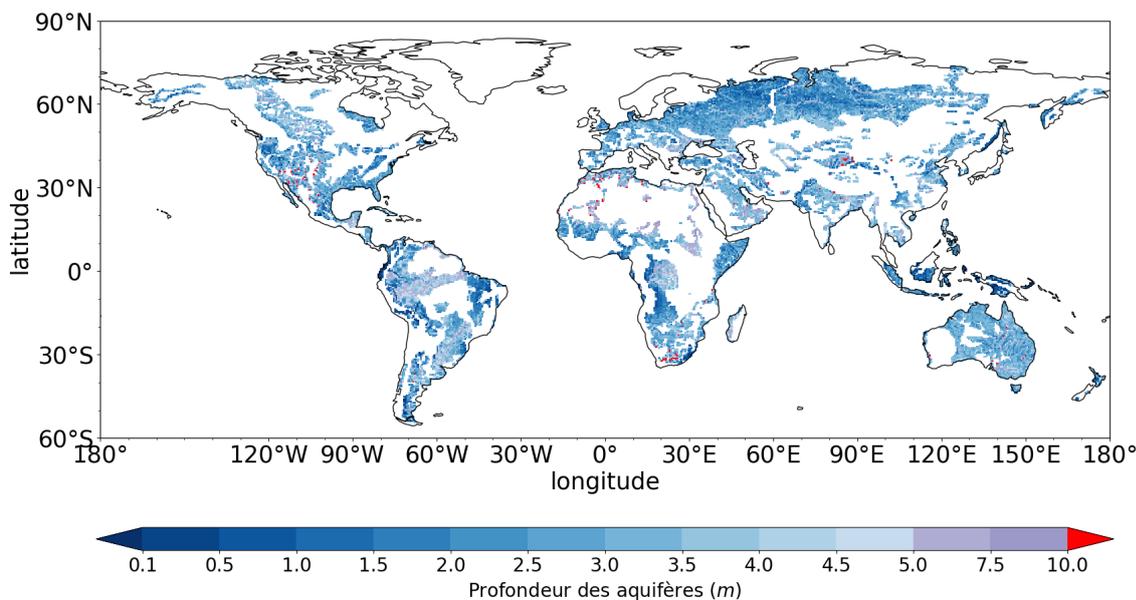


Figure 6.1: Profondeur des aquifères selon le scénario futur ssp585

Bibliography

1. Hornberger, G., Wiberg, P., Raffensperger, J. & D’Odorico, P. *Elements of Physical Hydrology* ISBN: 9781421413969 (Nov. 1998).
2. Wada, Y. *Impacts of Groundwater Pumping on Regional and Global Water Resources* **May 2016**, 337. ISBN: 3319324497 (2016).
3. Taylor, R. G. *et al.* Ground water and climate change. *Nature Climate Change* **3**, 322–329. ISSN: 1758678X (2013).
4. Vergnes, J. P. *Développement d’une modélisation hydrologique incluant la représentation des aquifères : évaluation sur la France et à l’échelle globale* PhD thesis (Institut National Polytechnique de Toulouse, May 2014).
5. Manga, M. On the timescales characterizing groundwater discharge at springs. *Journal of Hydrology* **219**, 56–69. ISSN: 00221694 (1999).
6. Aeschbach-Hertig, W. & Gleeson, T. Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion. *Nature Geoscience* **5**, 853–861. ISSN: 17520894. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo1617> (2012).
7. Seneviratne, S. I. *et al.* Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews* **99**, 125–161. ISSN: 00128252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004> (2010).
8. Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M. C., Frame, D., Mahowald, N., and Winther, J.-G.: Introduction, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
9. Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y. & Mann, M. E. Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature Communications* **11**, 1–10. ISSN: 20411723. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w> (2020).
10. Döll, P. Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: A global-scale assessment. *Environmental Research Letters* **4**. ISSN: 17489326 (2009).
11. Green, T. R. *et al.* Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology* **405**, 532–560. ISSN: 00221694 (2011).
12. Scanlon, B. R. *et al.* Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **109**, 9320–9325. ISSN: 00278424 (2012).
13. Konikow, L. F. & Kendy, E. Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal* **13**, 317–320. ISSN: 14312174 (2005).
14. Famiglietti, J. S. The global groundwater crisis. *Nature Climate Change* **4**, 945–948. ISSN: 17586798. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2425> (2014).

15. Voldoire, A. *et al.* Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **11**, 2177–2213. ISSN: 19422466 (2019).
16. Séférian, R. *et al.* Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth System Processes in Present-Day and Future Climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **11**, 4182–4227. ISSN: 19422466 (2019).
17. Eyring, V. *et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development* **9**, 1937–1958. ISSN: 19919603 (2016).
18. Bourdallé-Badie, R. *et al.* Nucleus for European Modelling of the Ocean – NEMO ocean engine (2019).
19. Salas Mélia, D. A global coupled sea ice-ocean model. *Ocean Modelling* **4**, 137–172. ISSN: 14635003 (2002).
20. Roehrig, R. *et al.* The CNRM Global Atmosphere Model ARPEGE-Climat 6.3: Description and Evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **12**, 1–53. ISSN: 19422466 (2020).
21. Voldoire, A. *et al.* SURFEX v8.0 interface with OASIS3-MCT to couple atmosphere with hydrology, ocean, waves and sea-ice models, from coastal to global scales. *Geoscientific Model Development* **10**, 4207–4227. ISSN: 19919603 (2017).
22. Masson, V. *et al.* The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development* **6**, 929–960. ISSN: 1991959X (2013).
23. Le Moigne, P. *et al.* The Latest Improvements in SURFEX v8.0 of the Safran-Isba-Modcou Hydrometeorological Model over France. *Geoscientific Model Development Discussions*, 1–32 (2020).
24. Craig, A., Valcke, S. & Coquart, L. Development and performance of a new version of the OASIS coupler, OASIS3-MCT-3.0. *Geoscientific Model Development* **10**, 3297–3308. ISSN: 19919603 (2017).
25. Michou, M., Nabat, P. & Saint-Martin, D. Development and basic evaluation of a prognostic aerosol scheme (v1) in the CNRM Climate Model CNRM-CM6. *Geoscientific Model Development* **8**, 501–531. ISSN: 19919603 (2015).
26. Michou, M. *et al.* A new version of the CNRM Chemistry-Climate Model, CNRM-CCM: description and improvements from the CCMVal-2 simulations. *Geoscientific Model Development* **4**, 873–900. ISSN: 1991-9603 (2011).
27. Aumont, O., Ethé, C., Tagliabue, A., Bopp, L. & Gehlen, M. PISCES-v2: An ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies. *Geoscientific Model Development* **8**, 2465–2513. ISSN: 19919603 (2015).
28. Decharme, B. *et al.* Recent Changes in the ISBA-CTRIP Land Surface System for Use in the CNRM-CM6 Climate Model and in Global Off-Line Hydrological Applications. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **11**, 1207–1252. ISSN: 19422466 (2019).
29. Faroux, S. *et al.* ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models. *Geoscientific Model Development* **6**, 563–582. ISSN: 1991-9603 (2013).
30. Masson, V., Champeaux, J. L., Chauvin, F., Meriguet, C. & Lacaze, R. A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *Journal of Climate* **16**, 1261–1282. ISSN: 08948755 (2003).
31. Decharme, B. & Douville, H. Introduction of a sub-grid hydrology in the ISBA land surface model. *Climate Dynamics* **26**, 65–78. ISSN: 09307575 (2006).
32. Beven, K. J. & Kirkby, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* **24**, 43–69. ISSN: 03036936 (1979).

33. Danielson, J.J., Gesch, D.B. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010). *U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1073* **2010**, 26. http://eros.usgs.gov/%7B%5C#%7D/Find%7B%5C_%7DData/Products%7B%5C_%7Dand%7B%5C_%7DData%7B%5C_%7DAvailable/GMTED2010 (2011).
34. Boone, A., Masson, V., Meyers, T. & Noilhan, J. The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a soil-vegetation-atmosphere transfer scheme. *Journal of Applied Meteorology* **39**, 1544–1569. ISSN: 08948763 (2000).
35. Decharme, B., Boone, A., Delire, C. & Noilhan, J. Local evaluation of the Interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedotransfer functions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **116**, 1–29. ISSN: 01480227 (2011).
36. Decharme, B., Martin, E. & Faroux, S. Reconciling soil thermal and hydrological lower boundary conditions in land surface models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **118**, 7819–7834. ISSN: 21698996 (2013).
37. Decharme, B. *et al.* Impacts of snow and organic soils parameterization on northern Eurasian soil temperature profiles simulated by the ISBA land surface model. *Cryosphere* **10**, 853–877. ISSN: 19940424 (2016).
38. Decharme, B., Delire, C. & Boone, A. La représentation des surfaces continentales dans la modélisation du climat à Météo-France. *La Météorologie* **108**, 67–76. https://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/decharme%7B%5C_%7Ddelire%7B%5C_%7Dboone%7B%5C_%7D2020.pdf (2020).
39. Friedlingstein, P., BOPP, L. & CADULE, P. Changement climatique et cycle du carbone. *La Météorologie* **8**, 21. ISSN: 0026-1181 (2007).
40. Calvet, J. C. *et al.* An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology* **92**, 73–95. ISSN: 01681923 (1998).
41. Parton, W. J., Stewart, J. W. B. & Cole, C. V. Dynamics of C, N, P and S in Grassland Soils: A Model. *Biogeochemistry* **5**, 109–131. ISSN: 01682563, 1573515X. <http://www.jstor.org/stable/1468632> (1988).
42. Gedney, N. *et al.* Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature* **439**, 835–838. ISSN: 14764687 (2006).
43. Decharme, B., Douville, H., Prigent, C., Papa, F. & Aires, F. A new river flooding scheme for global climate applications : Off-line evaluation over South America. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **113**, 1–11. ISSN: 01480227 (2008).
44. Decharme, B. *et al.* Global off-line evaluation of the ISBA-TRIP flood model. *Climate Dynamics* **38**, 1389–1412. ISSN: 09307575 (2012).
45. Manning, R. *On the flow of water in open channels and pipe* 161–207 (1891).
46. Decharme, B., Alkama, R., Douville, H., Becker, M. & Cazenave, A. Global evaluation of the ISBA-TRIP continental hydrological system. Part II: Uncertainties in river routing simulation related to flow velocity and groundwater storage. *Journal of Hydrometeorology* **11**, 601–617. ISSN: 1525755X (2010).
47. Vergnes, J. P. & Decharme, B. A simple groundwater scheme in the TRIP river routing model: Global off-line evaluation against GRACE terrestrial water storage estimates and observed river discharges. *Hydrology and Earth System Sciences* **16**, 3889–3908. ISSN: 10275606 (2012).
48. Ledoux E., Girard G., de Marsily G., Villeneuve J.P., Deschenes J. *Spatially Distributed Modeling: Conceptual Approach, Coupling Surface Water And Groundwater* (1989).
49. Dürr, H. H., Meybeck, M. & Dürr, S. H. Lithologic composition of the Earth’s continental surfaces derived from a new digital map emphasizing riverine material transfer. *Global Biogeochemical Cycles* **19**, 1–23. ISSN: 08866236 (2005).
50. Vergnes, J. P. *et al.* A simple groundwater scheme for hydrological and climate applications: Description and offline evaluation over France. *Journal of Hydrometeorology* **13**, 1149–1171. ISSN: 1525755X (2012).

51. J.-P. Vergnes¹, B. Decharme² & Habets¹, F. Introduction of groundwater capillary rises using subgrid spatial variability of topography into. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* **119**, 6196–6206 (2014).
52. Meehl, G. A. *et al.* Climate model intercomparisons: Preparing for the next phase. *Eos* **95**, 77–78. ISSN: 23249250 (2014).
53. Taylor, K. E. *et al.* CMIP6 Global Attributes , DRS , Filenames , Directory Structure , and CV ' s. **2018**, 1–28. https://www.earthsystemcog.org/site%7B%5C_%7Dmedia/projects/wip/CMIP6%7B%5C_%7Dglobal%7B%5C_%7Dattributes%7B%5C_%7Dfilenames%7B%5C_%7DCVs%7B%5C_%7Dv6.2.6.pdf (2017).
54. Verley, P. *La révolution industrielle* (Gallimard, 1997).
55. Houghton, R. How well do we know the flux of CO₂ from land-use change? *Tellus B* **62**, 337–351 (Nov. 2010).
56. Meinshausen, M. *et al.* Historical greenhouse gas concentrations for climate modelling (CMIP6). *Geoscientific Model Development* **10**, 2057–2116. ISSN: 19919603 (2017).
57. Matthes, K. *et al.* Solar forcing for CMIP6 (v3.2). *Geoscientific Model Development* **10**, 2247–2302. ISSN: 19919603 (2017).
58. Thomason, L. W. *et al.* A global space-based stratospheric aerosol climatology: 1979-2016. *Earth System Science Data* **10**, 469–492. ISSN: 18663516 (2018).
59. Watson, L., Michou, M., Nabat, P. & Saint-Martin, D. Assessment of CNRM coupled ocean-atmosphere model sensitivity to the representation of aerosols. *Climate Dynamics* **51**, 2877–2895. ISSN: 14320894. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-017-4054-6> (2018).
60. Monge-Sanz, B. M., Chipperfield, M. P., Cariolle, D. & Feng, W. Results from a new linear O₃ scheme with embedded heterogeneous chemistry compared with the parent full-chemistry 3-D CTM. *Atmospheric Chemistry and Physics* **11**, 1227–1242. ISSN: 16807316 (2011).
61. O'Neill, B. C. *et al.* A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change* **122**, 387–400. ISSN: 01650009 (2014).
62. Moss, R. H. *et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* **463**, 747–756. ISSN: 00280836. <http://dx.doi.org/10.1038/nature08823> (2010).
63. Van Vuuren, D. P. *et al.* The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change* **109**, 5–31. ISSN: 01650009 (2011).
64. O'Neill, B. C. *et al.* The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change* **42**, 169–180. ISSN: 09593780. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004> (2017).
65. *Documentation NCL* https://www.ncl.ucar.edu/Document/Functions/sphpk_grids.shtml.
66. For Meteorology, U. S. M. CDO User Guide (2019).
67. Wilks, D. S. On "field significance" and the false discovery rate. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **45**, 1181–1189. ISSN: 15588424 (2006).
68. Wilks, D. S. "The stippling shows statistically significant grid points": How research results are routinely overstated and overinterpreted, and what to do about it. *Bulletin of the American Meteorological Society* **97**, 2263–2273. ISSN: 00030007 (2016).
69. Huntington, T. G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology* **319**, 83–95. ISSN: 00221694 (2006).
70. Vörösmarty, C. J. *et al.* Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* **467**, 555–561. ISSN: 14764687 (2010).
71. Kummu, M., Gerten, D., Heinke, J., Konzmann, M. & Varis, O. Climate-driven interannual variability of water scarcity in food production potential: A global analysis. *Hydrology and Earth System Sciences* **18**, 447–461. ISSN: 10275606 (2014).

72. Elliott, J. *et al.* Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **111**, 3239–3244. ISSN: 00278424 (2014).
73. Gleick, P. H. Roadmap for sustainable water resources in southwestern North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **107**, 21300–21305. ISSN: 00278424 (2010).
74. Pokhrel, Y., Hanasaki, N., Wada, Y. & Kim, H. Recent Progresses in Incorporating Human Land-Water Management into Global Land Surface Models Toward Their Integration into Earth System Models. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* **3**, 548–574 (2016).
75. *Site internet du CNRM* <http://www.umr-cnrm.fr/cmip6/spip.php?article10>.

A Modèles

CNRM-ESM2

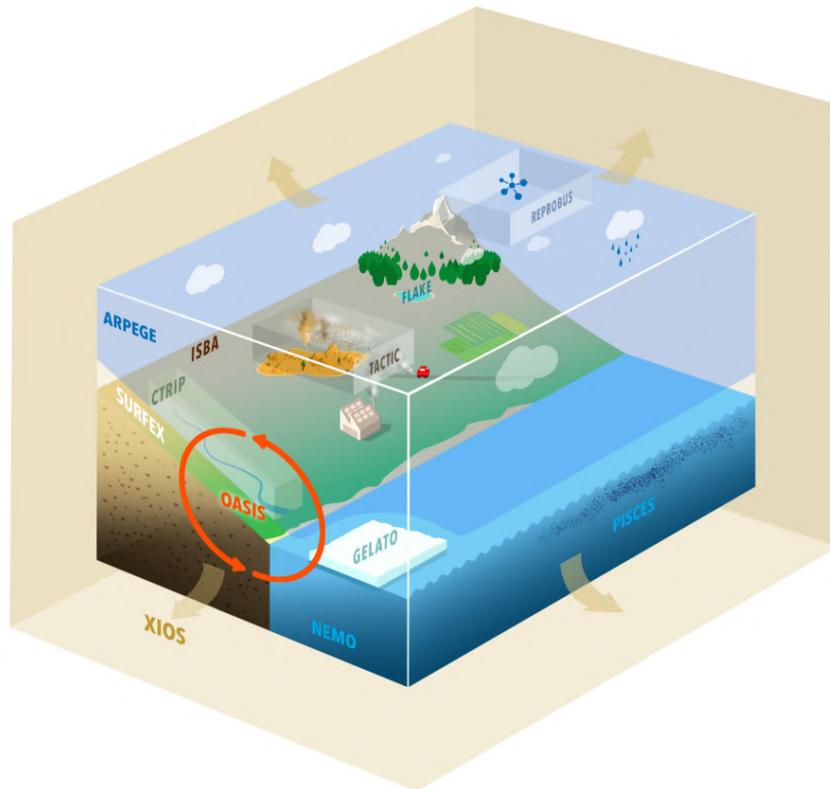


Figure 2: Représentation schématique de CNRM-ESM2 [75]

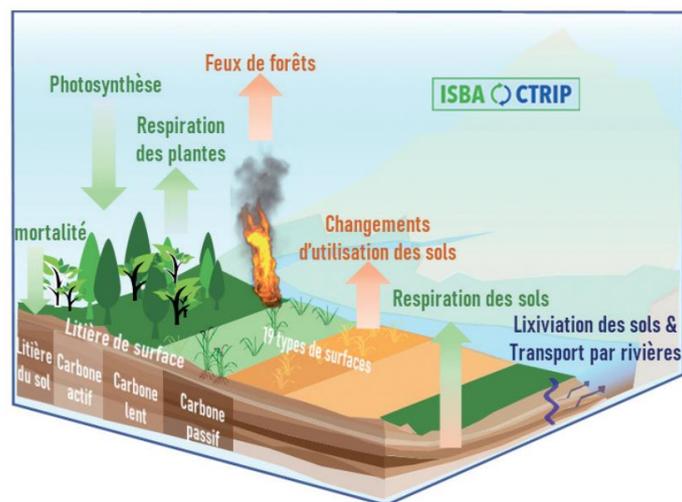


Figure 3: Schématisation du cycle continental du carbone dans CNRM-ESM2 [38]

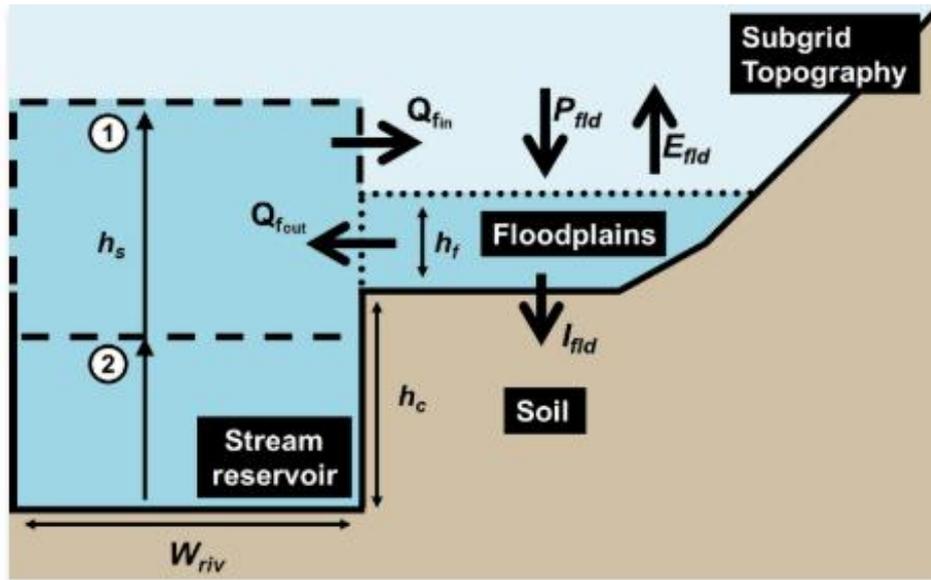


Figure 4: Schématisation de la dynamique des inondations simulées dans ISBA-CTRIP. (1) Le niveau de la rivière (h_s) devient supérieur à son lit (h_c) et la crue (flux Q_{fin}), commence. (2) Après l'inondation h_s redevient inférieur à la hauteur d'inondation (h_f) lorsque l'inondation diminue, h_s devient plus bas que la hauteur d'inondations (h_f) et la décrue commence (flux Q_{fout}). Le captage des pluies par la pleine inondée (P_{fld}), sa ré-évaporation vers l'atmosphère (E_{fld}) et sa ré-infiltration dans le sol (I_{fld}) sont aussi pris en compte [44]

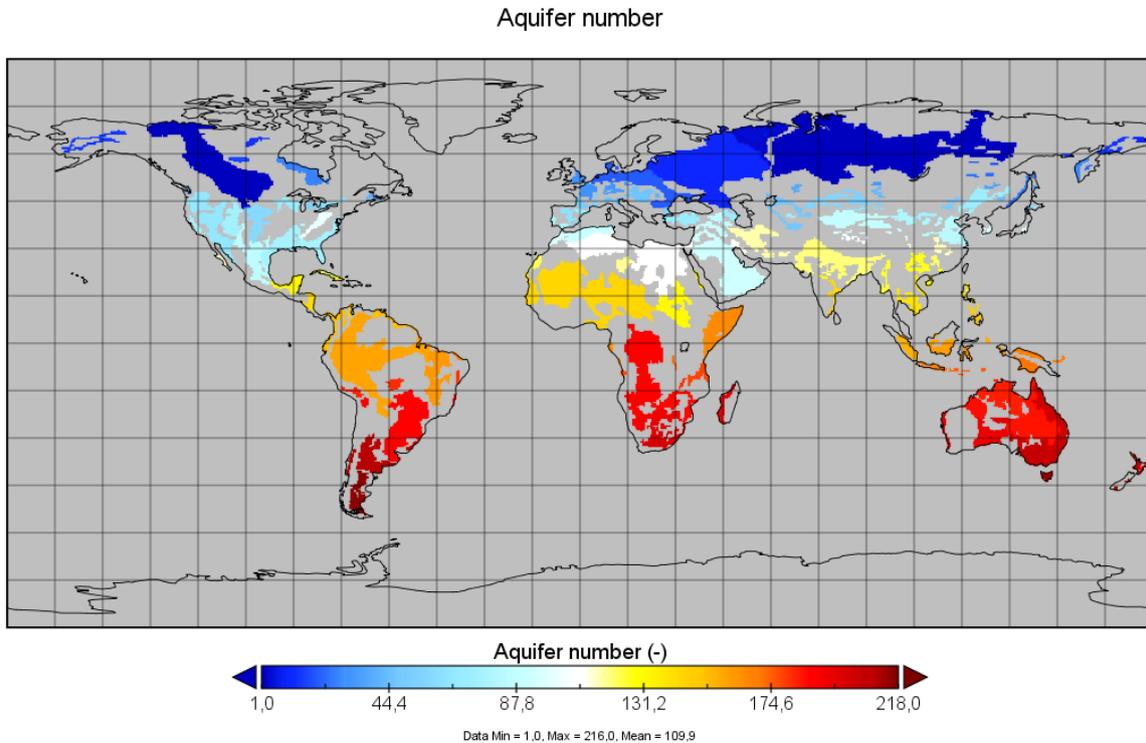


Figure 5: Représentation des 218 bassins hydrogéologiques simulés dans ISBA-CTRIP. Visualisation via *Panoply*

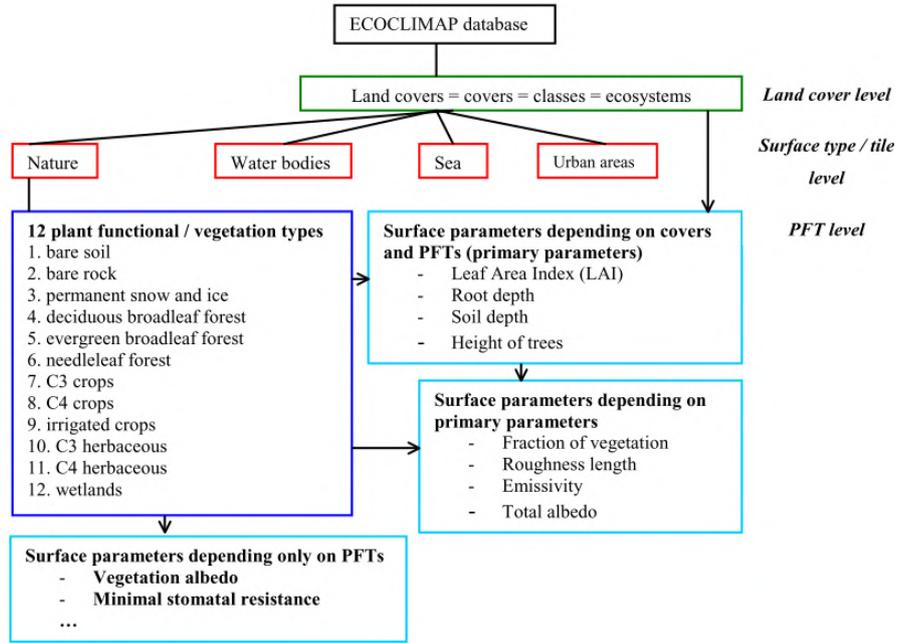


Figure 6: Organisation de la base de données ECOCLIMAP [29]

Table 1
The 12 sub-grid land tiles derived from the 1-km ECOCLIMAP-II database

Tiles	Land types	Δz_2	Δz_3	f_{veg}	n_i
1	Bare Soil & Desert	0.5–1.0	0.5	–	0.035
2	Rocks & Urban area	0.2	0.0	–	0.035
3	Permanent Snow & Ice	0.2	0.0	–	0.035
4	Temperate Broadleaf Deciduous	1.5–4.0	0.0–2.0	0.95	0.075
	Tropical Broadleaf Deciduous				
	Temperate Broadleaf Evergreen				
	Boreal Broadleaf Deciduous				
5	Shrub	1.5–3.0	0.5–1.0	0.95	0.100
	Boreal Needleleaf Evergreen				
	Temperate Needleleaf Evergreen				
6	Boreal Needleleaf Deciduous	3.0–8.0	0.0–1.0	1.0	0.100
	Tropical Broadleaf Evergreen				
7	C3 crops	1.0–1.5	0.5	$f(LAI)$	0.050
8	C4 crops	1.0–1.5	0.5	$f(LAI)$	0.050
9	Irrigated crops	1.5	0.5	$f(LAI)$	0.050
10	C3 Grassland	0.5–1.5	0.5	0.95	0.050
	Boreal Grassland (Tundra)				
11	C4 grassland	0.5–1.5	0.5	0.95	0.075
12	Peat, bogs and Irrigated grass	1.0–3.0	0.0–0.5	0.95	0.075

Note. Some values or ranges are given for each tile: Δz_2 (m) the depth of the root, Δz_3 (m) the deep soil thickness under the roots for the *sfc5* version, f_{veg} the dimensionless grid cell vegetation fraction where $f(LAI) = 1 - e^{-0.6LAI}$, and the floodplain roughness coefficient, n_i .

Figure 7: Différentes occupations des sols d’après ECOCLIMAP-II [28]

B Données

ScénarioMIPs

SSP element	SSP1			SSP2			SSP3			SSP4			SSP5		
	<i>Country fertility groupings for demographic elements</i>														
	High fert.	Low fert.	Rich-OECD	High fert.	Low fert.	Rich-OECD	High fert.	Low fert.	Rich-OECD	High fert.	Low fert.	Rich-OECD	High fert.	Low fert.	Rich-OECD
Demographics															
<i>Population</i>															
Growth	Relatively low			Medium			High			Low			Relatively high		
Fertility	Low	Low	Med	Medium			High	High	Low	High	Low	Low	Low	Low	High
Mortality	Low			Medium			High			High	Med	Med	Low		
Migration	Medium			Medium						Medium			High		
<i>Urbanization</i>															
Level	High			Medium			Low			High	High	Med	High		
Type	Well managed			Continuation of historical patterns			Poorly managed			Mixed across and within cities			Better mgmt. over time, some sprawl		
Human development															
Education	High			Medium			Low			V.low/uneq.	Low/uneq.	Med/uneq.	High		
Health investments	High			Medium			Low			Unequal within regions, lower in LICs, medium in HICs			High		
Access to health facilities, water, sanitation	High			Medium			Low			Unequal within regions, lower in LICs, medium in HICs			High		
Gender equality	High			Medium			Low			Unequal within regions, lower in LICs, medium in HICs			High		
Equity	High			Medium			Low			Medium			High		
Social cohesion	High			Medium			Low			Low, stratified			High		
Societal participation	High			Medium			Low			Low			High		

Figure 8: Hypothèses relatives au développement humain pour les *ssp* [64]

SSP element	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Economy & lifestyle					
Growth (per capita)	High in LICs, MICs; medium in HICs	Medium, uneven	Slow	Low in LICs, medium in other countries	High
Inequality	Reduced across and within countries	Uneven moderate reductions across and within countries	High, especially across countries	High, especially within countries	Strongly reduced, especially across countries
International trade	Moderate	Moderate	Strongly constrained	Moderate	High, with regional specialization in production
Globalization	Connected markets, regional production	Semi-open globalized economy	De-globalizing, regional security	Globally connected elites	Strongly globalized, increasingly connected
Consumption & Diet	Low growth in material consumption, low-meat diets, first in HICs	Material-intensive consumption, medium meat consumption	Material-intensive consumption	Elites: high consumption lifestyles; Rest: low consumption, low mobility	Materialism, status consumption, tourism, mobility, meat-rich diets
Policies & institutions					
International Cooperation	Effective	Relatively weak	Weak, uneven	Effective for globally connected economy, not for vulnerable populations	Effective in pursuit of development goals, more limited for envt. goals
Environmental Policy	Improved management of local and global issues; tighter regulation of pollutants	Concern for local pollutants but only moderate success in implementation	Low priority for environmental issues	Focus on local environment in MICs, HICs; little attention to vulnerable areas or global issues	Focus on local environment with obvious benefits to well-being, little concern with global problems
Policy orientation	Toward sustainable development	Weak focus on sustainability	Oriented toward security	Toward the benefit of the political and business elite	Toward development, free markets, human capital
Institutions	Effective at national and international levels	Uneven, modest effectiveness	Weak global institutions/ natl. govts. dominate societal decision-making	Effective for political and business elite, not for rest of society	Increasingly effective, oriented toward fostering competitive markets

Figure 9: Hypothèses relatives à l'économie, à la politique, aux institutions et au mode de vie pour les *ssp* [64]

SSP element	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Technology					
Development	Rapid	Medium, uneven	Slow	Rapid in high-tech economies and sectors; slow in others	Rapid
Transfer	Rapid	Slow	Slow	Little transfer within countries to poorer populations	Rapid
Energy tech change	Directed away from fossil fuels, toward efficiency and renewables	Some investment in renewables but continued reliance on fossil fuels	Slow tech change, directed toward domestic energy sources	Diversified investments including efficiency and low-carbon sources	Directed toward fossil fuels; alternative sources not actively pursued
Carbon intensity	Low	Medium	High in regions with large domestic fossil fuel resources	Low/medium	High
Energy intensity	Low	Uneven, higher in LICs	High	Low/medium	High
Environment & natural resources					
Fossil constraints	Preferences shift away from fossil fuels	No reluctance to use unconventional resources	Unconventional resources for domestic supply	Anticipation of constraints drives up prices with high volatility	None
Environment	Improving conditions over time	Continued degradation	Serious degradation	Highly managed and improved near high/middle-income living areas, degraded otherwise	Highly engineered approaches, successful management of local issues
Land Use	Strong regulations to avoid environmental tradeoffs	Medium regulations lead to slow decline in the rate of deforestation	Hardly any regulation; continued deforestation due to competition over land and rapid expansion of agriculture	Highly regulated in MICs, HICs; largely unmanaged in LICs leading to tropical deforestation	Medium regulations lead to slow decline in the rate of deforestation
Agriculture	Improvements in ag productivity; rapid diffusion of best practices	Medium pace of tech change in ag sector; entry barriers to ag markets reduced slowly	Low technology development, restricted trade	Ag productivity high for large scale industrial farming, low for small-scale farming	Highly managed, resource-intensive; rapid increase in productivity

Figure 10: Hypothèses relatives à l'évolution de la technologie, de l'environnement et des ressources naturelles pour les *ssp* [64]

Variables

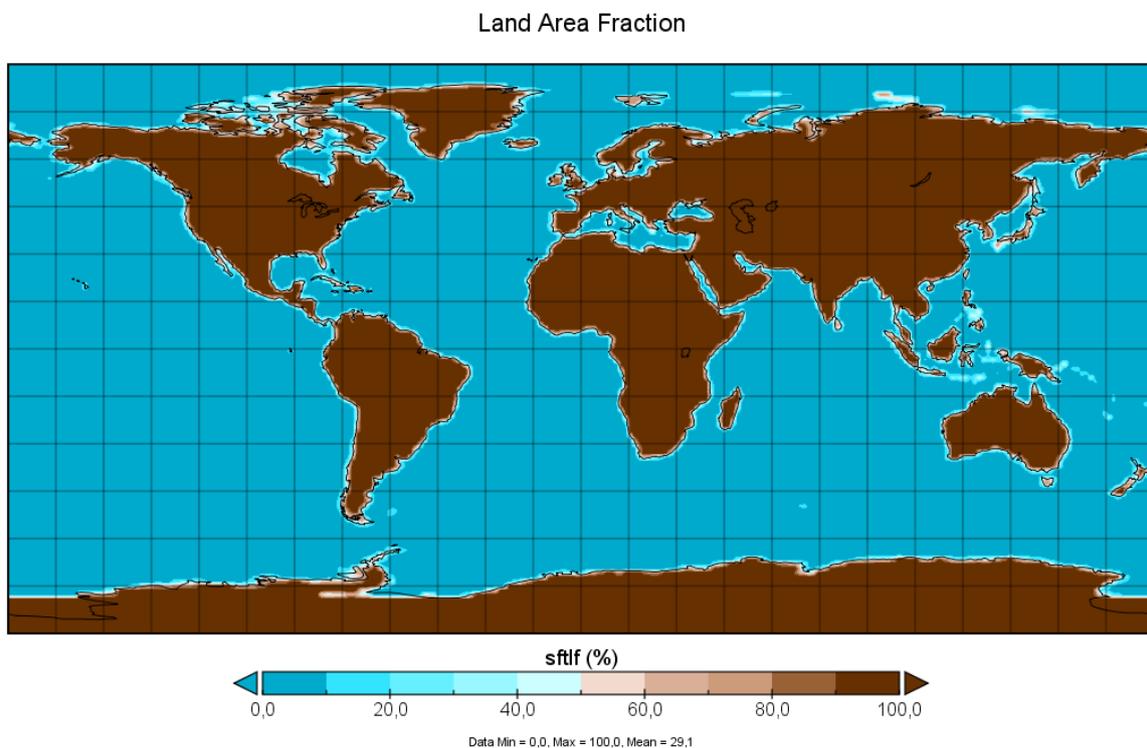


Figure 11: Variable *sflf* : Fraction (%) de la maille occupée par la surface continentale. Visualisation via *Panoply*

Grid-Cell Area for Atmospheric Variables

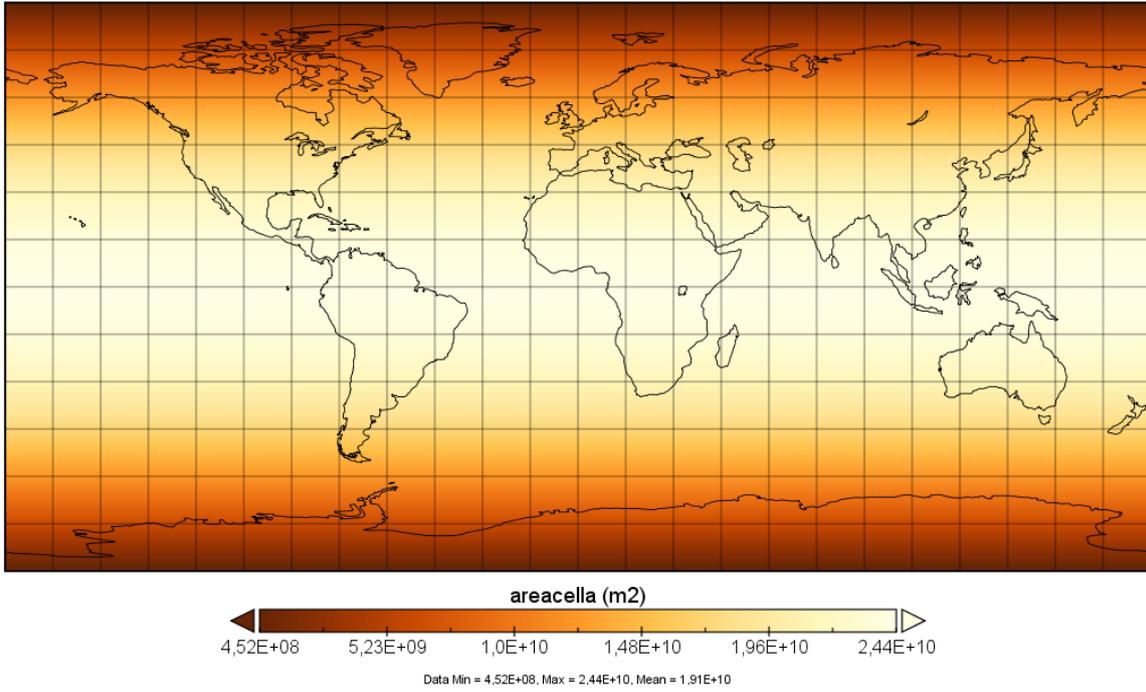


Figure 12: Variable *areacella* : Aire des mailles sur la grille atmosphérique (m²). Visualisation via *Panoply*

Grid-Cell Area for River Model Variables

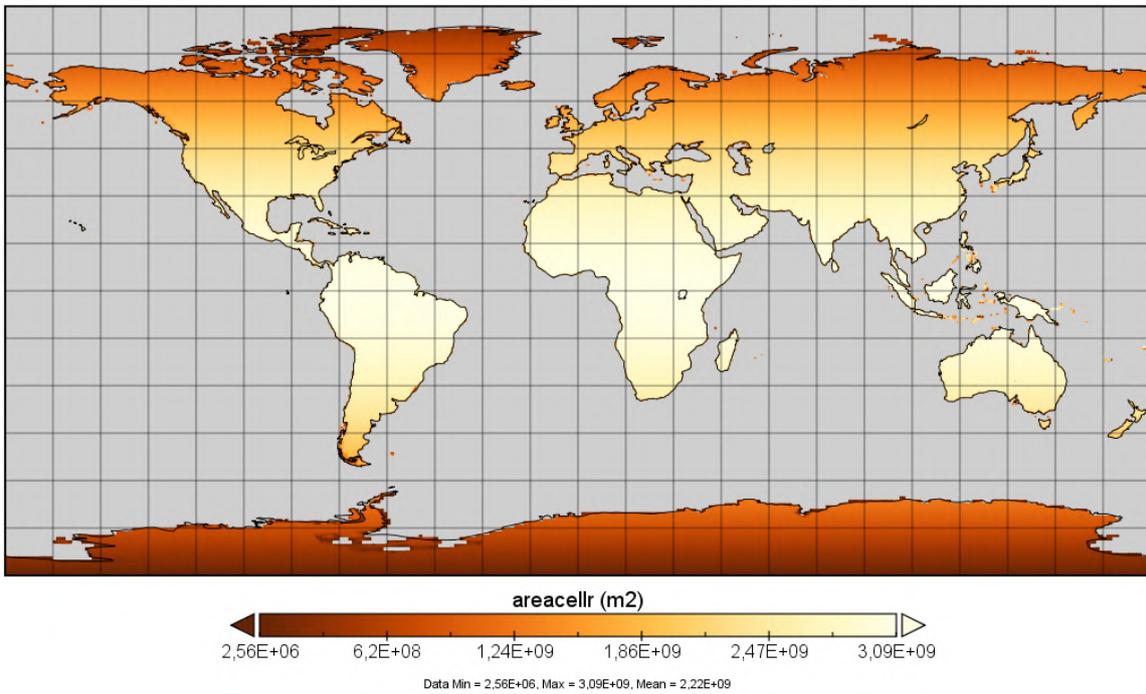
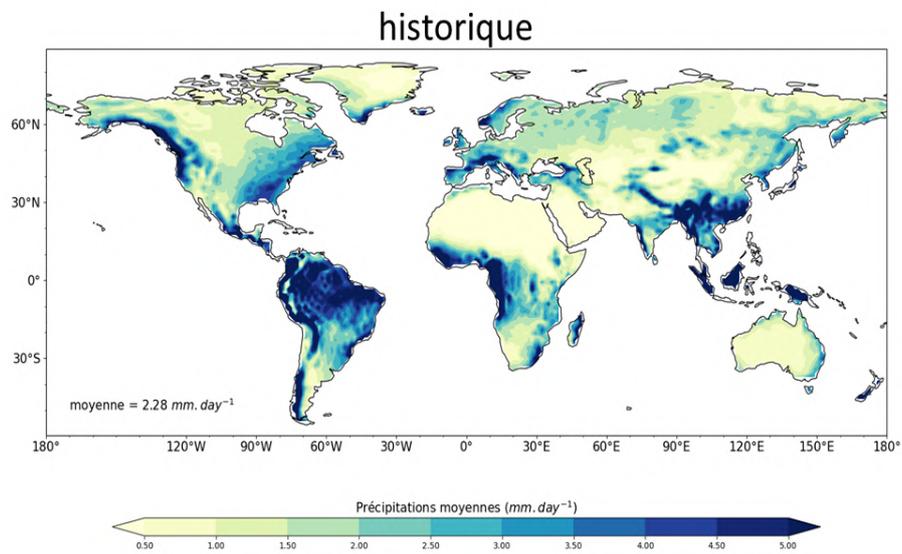


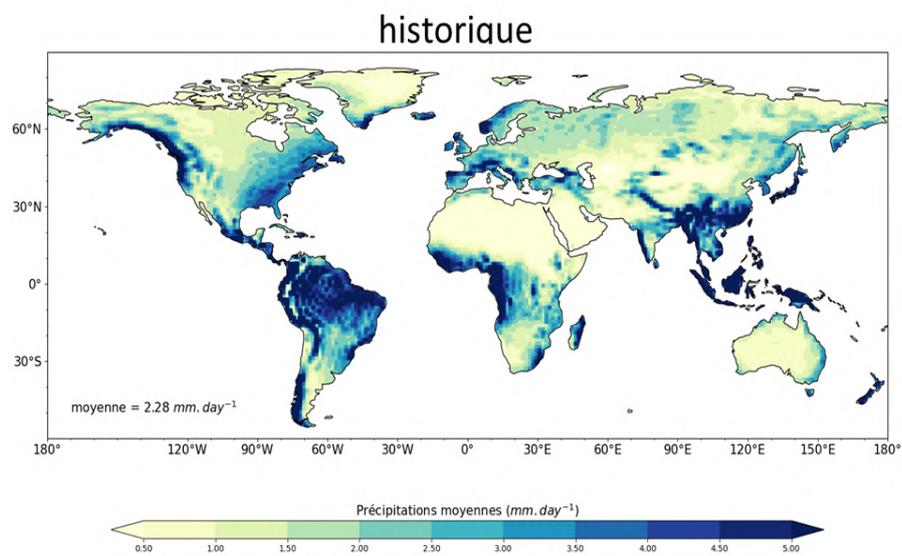
Figure 13: Variable *areacellr* : Aire des mailles sur la grille de ISBA-CTRIIP (m²). Les océans ne sont pas représentés. Visualisation via *Panoply*

C Méthodologie

Regriddage



(a)



(b)

Figure 14: Précipitations en présent pour CNRM-CM6. (a) : Sur la résolution de la grille atmosphérique - (b) : Sur la grille des aquifères après un regriddage. La moyenne globale est conservée.

Masques

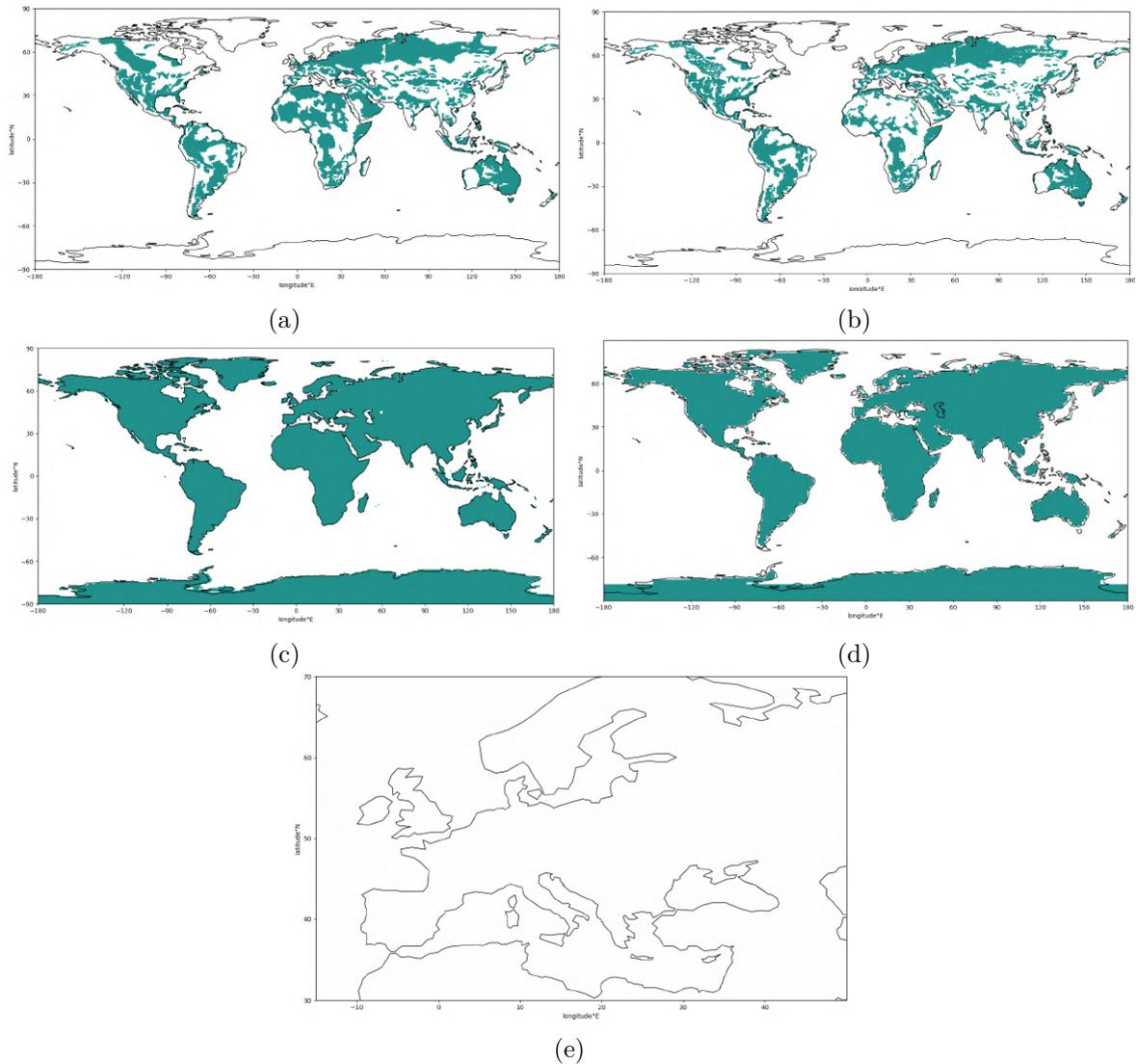


Figure 15: Représentation des différents masques utilisés. (a) : sélection des aquifères. (b) : sélection des aquifères avec *wtd* inférieur à 10m. (c) : Sélection des océans sur la grille des aquifères. (d) : sélection des océans sur la grille atmosphérique. (e) : sélection de l'Europe.

D Résultats

ssp126

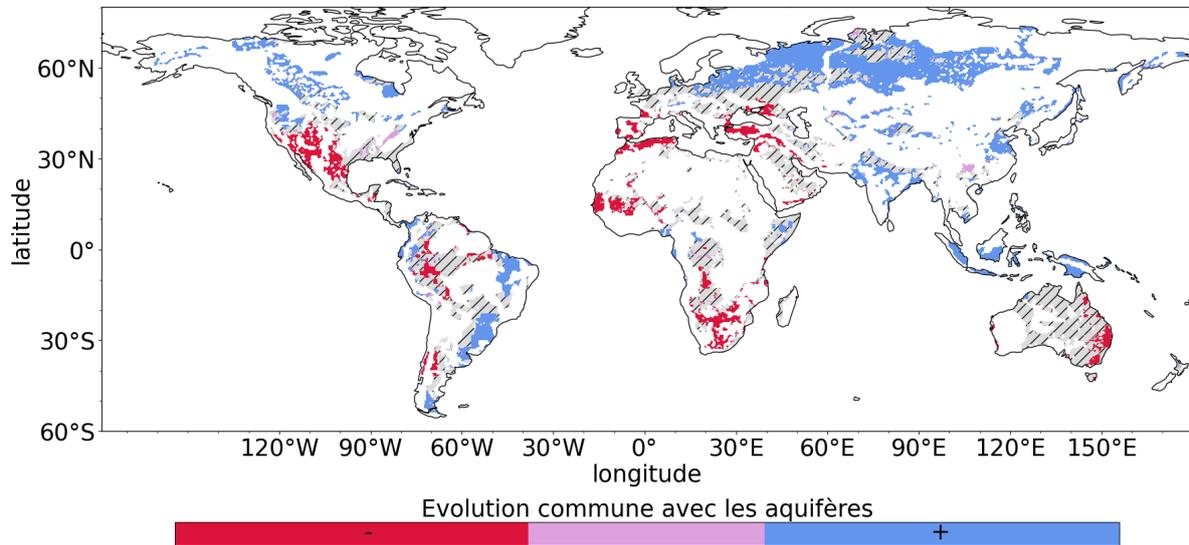
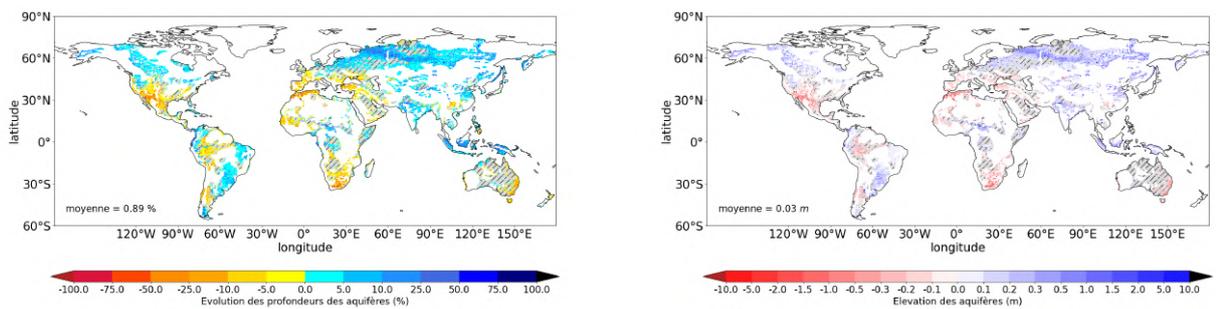


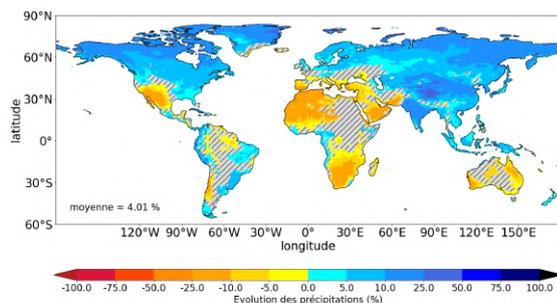
Figure 16: Comparaison entre le signe de l'évolution de pr et celui de wtd . Bleu: zones où pr augmente et wtd se rapproche de la surface. Rouge : le contraire. Violet : l'un augmente et l'autre diminue. Gris : zones non-significatives



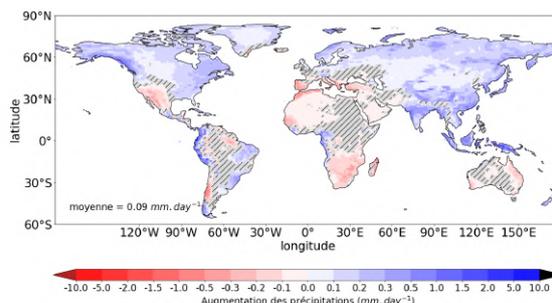
(a) Evolution des profondeurs des aquifères (%)

(b) Evolution des profondeurs des aquifères (m)

Figure 17: Evolutions des profondeurs des aquifères

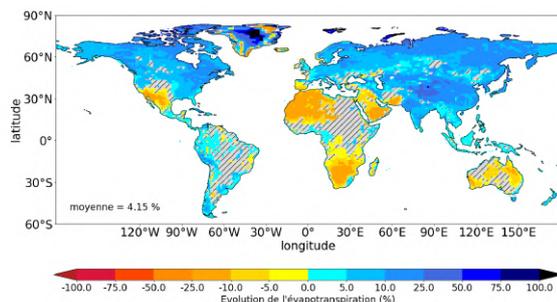


(a) Evolution des précipitations (%)

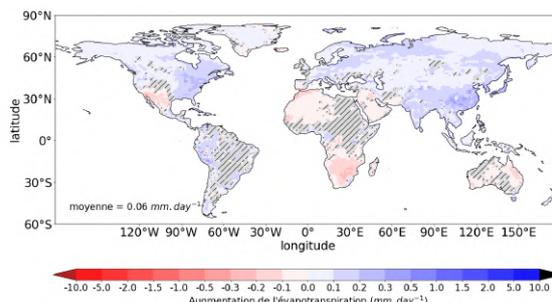


(b) Evolution des précipitations ($mm.day^{-1}$)

Figure 18: Evolutions des précipitations



(a) Evolution de l'évapotranspiration (%)



(b) Evolution de l'évapotranspiration ($mm.day^{-1}$)

Figure 19: Evolutions de l'évapotranspiration

ssp245

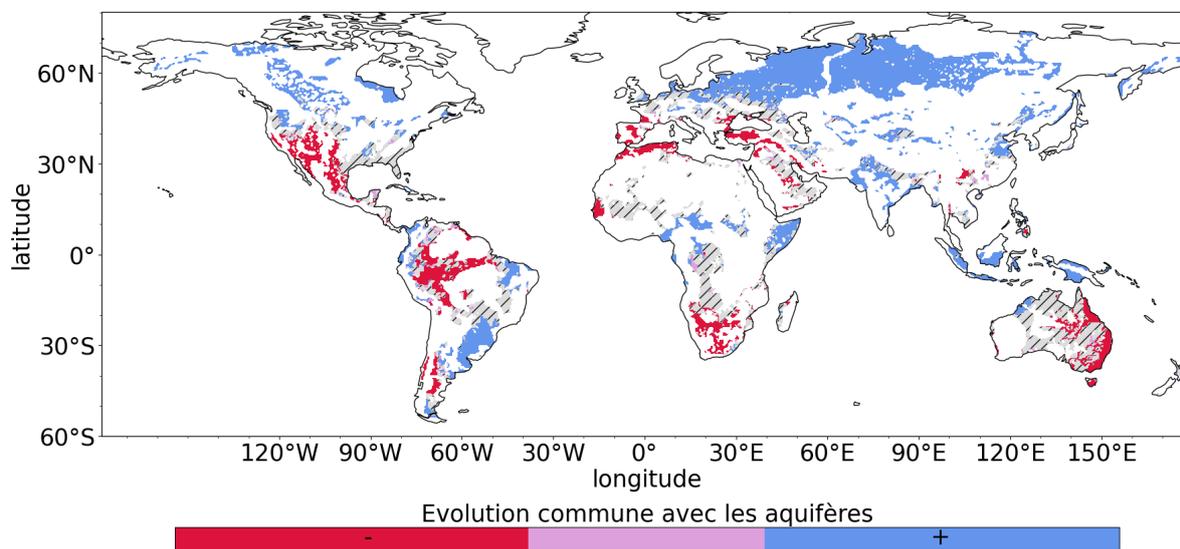
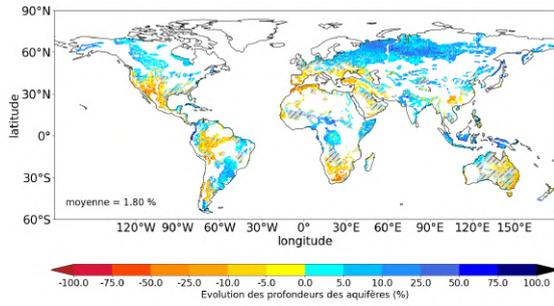
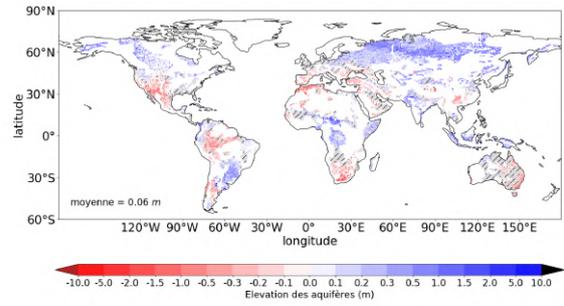


Figure 20: Comparaison entre le signe de l'évolution de *pr* et celui de *wtd*. Bleu: zones où *pr* augmente et *wtd* se rapproche de la surface. Rouge : le contraire. Violet : l'un augmente et l'autre diminue. Gris : zones non-significatives

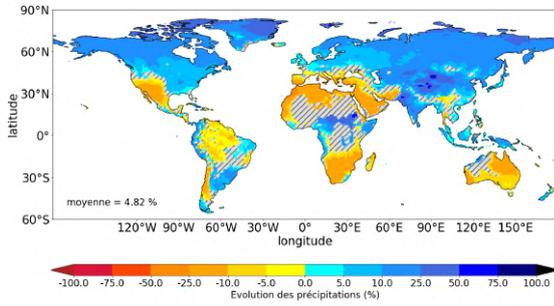


(a) Evolution des profondeurs des aquifères (%)

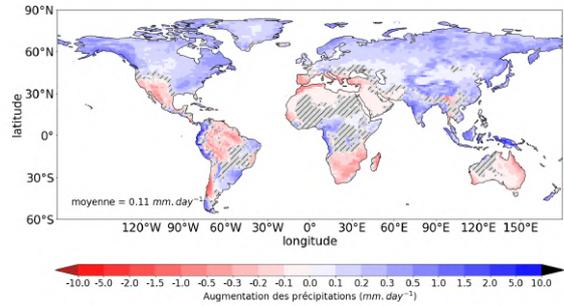


(b) Evolution des profondeurs des aquifères (m)

Figure 21: Evolutions des profondeurs des aquifères

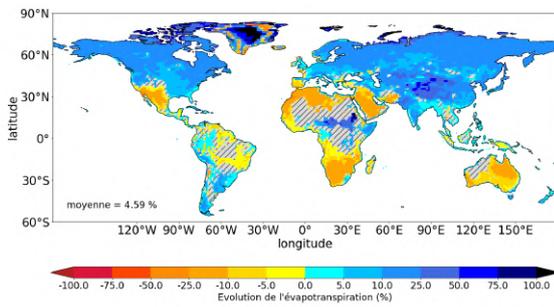


(a) Evolution des précipitations (%)

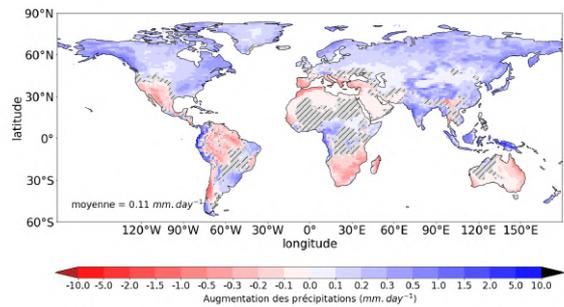


(b) Evolution des précipitations ($mm.day^{-1}$)

Figure 22: Evolutions des précipitations



(a) Evolution de l'évapotranspiration (%)



(b) Evolution de l'évapotranspiration ($mm.day^{-1}$)

Figure 23: Evolutions de l'évapotranspiration

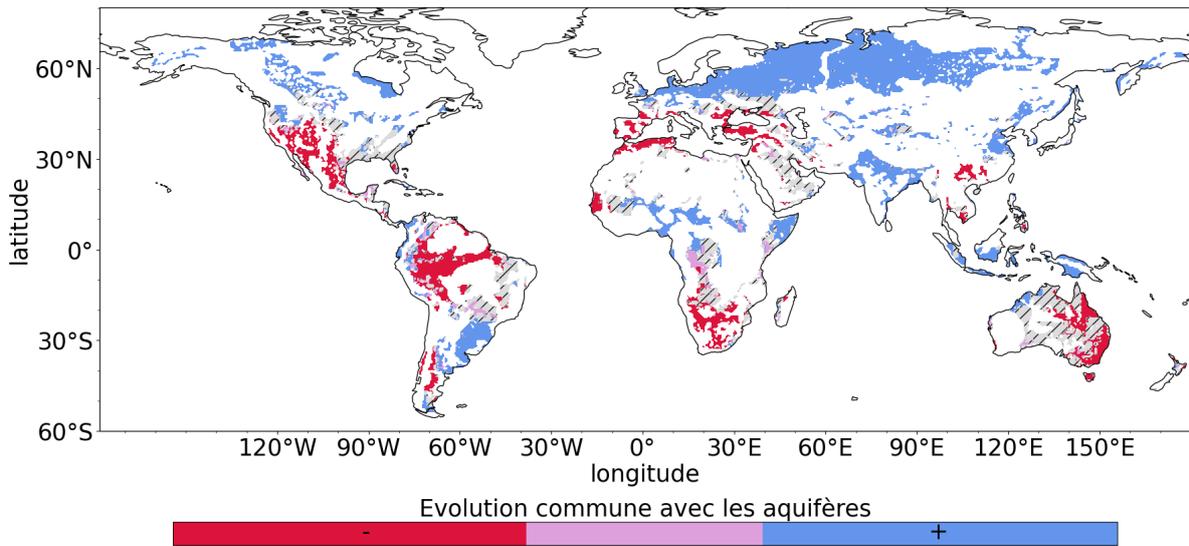
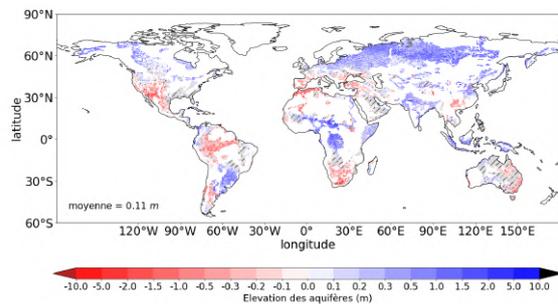
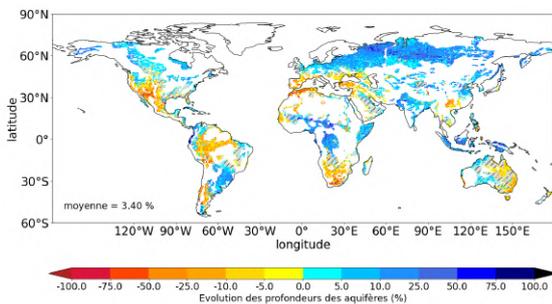


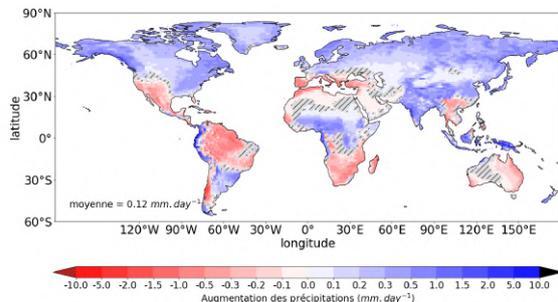
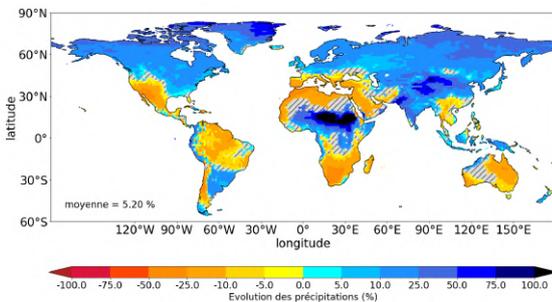
Figure 24: Comparaison entre le signe de l'évolution de *pr* et celui de *wtd*. Bleu: zones où *pr* augmente et *wtd* se rapproche de la surface. Rouge : le contraire. Violet : l'un augmente et l'autre diminue. Gris : zones non-significatives



(a) Evolution des profondeurs des aquifères (%)

(b) Evolution des profondeurs des aquifères ($mm.day^{-1}$)

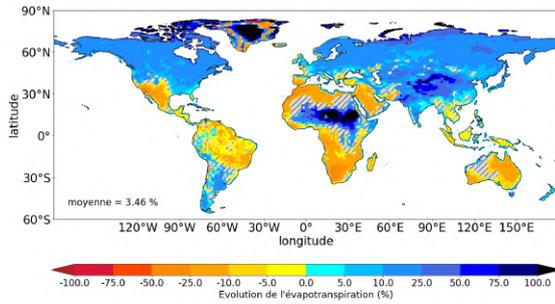
Figure 25: Evolutions des profondeurs des aquifères



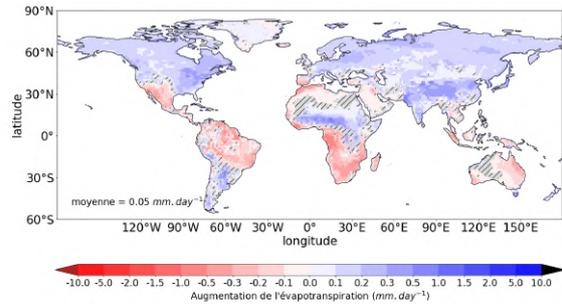
(a) Evolution des précipitations (%)

(b) Evolution des précipitations (m)

Figure 26: Evolutions des précipitations



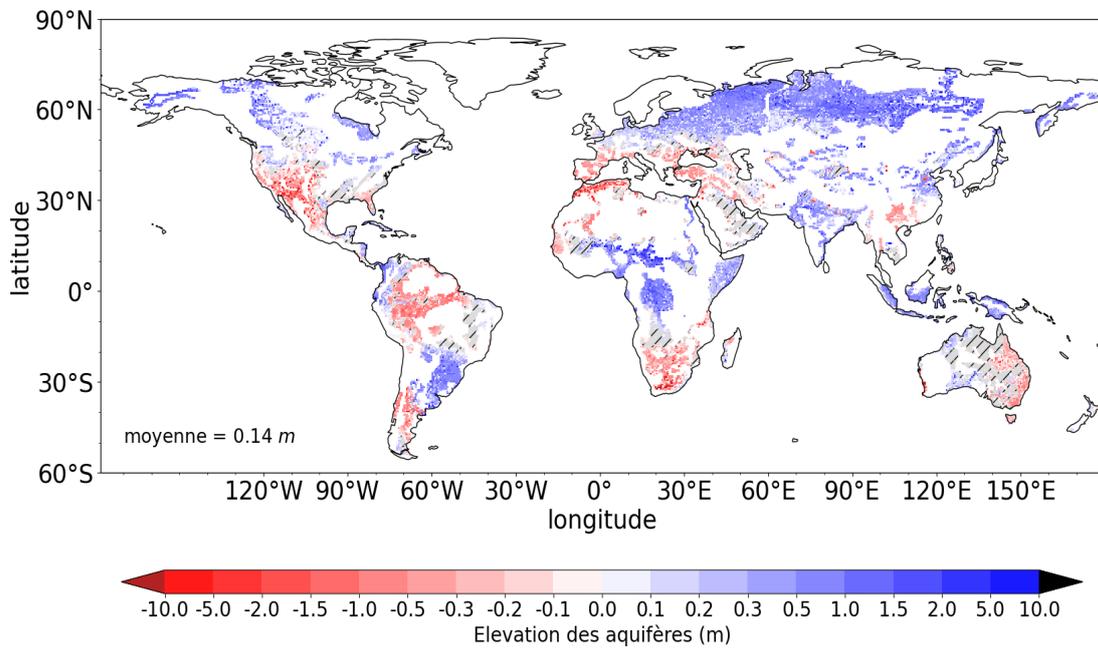
(a) Evolution de l'évapotranspiration (%)



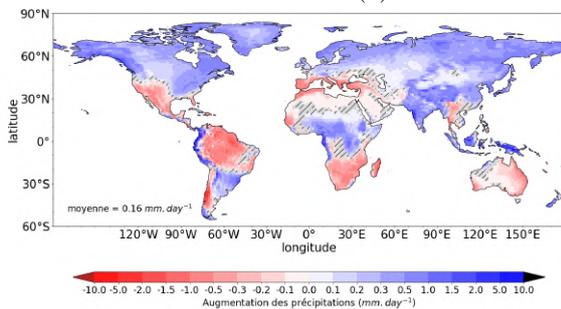
(b) Evolution de l'évapotranspiration ($mm.day^{-1}$)

Figure 27: Evolutions de l'évapotranspiration

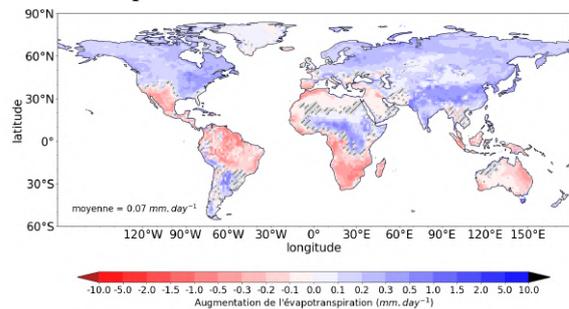
Ssp585 moins historical



(a) Evolution des profondeurs des aquifères



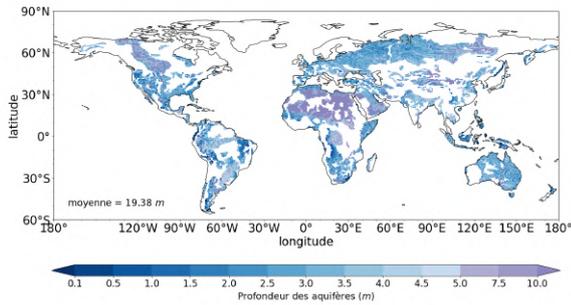
(b) Evolution des précipitations



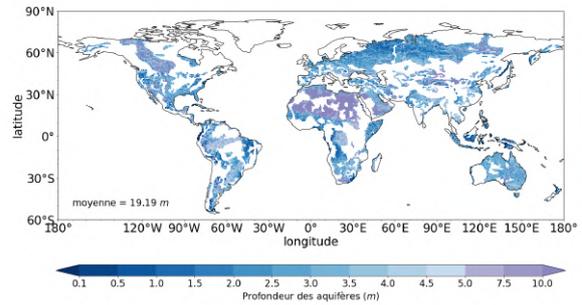
(c) Evolution de l'évapotranspiration

Figure 28: *Ssp585 moins historical* : (a) *wtd* (b) *pr* et (c) *evpsbl*

Historical et ssp585

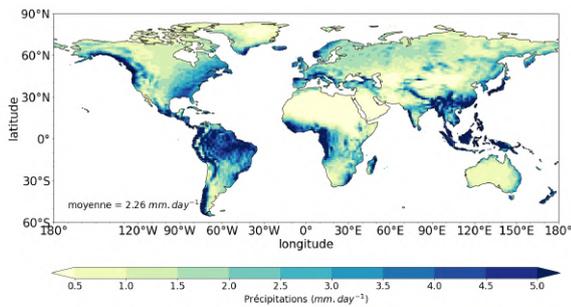


(a) *historical*

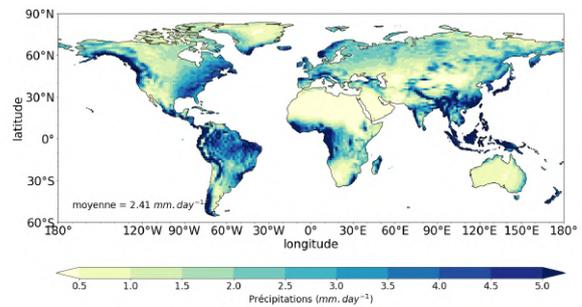


(b) *ssp585*

Figure 29: Valeur des profondeurs des aquifères en (a) *historical* et en (b) *ssp585*

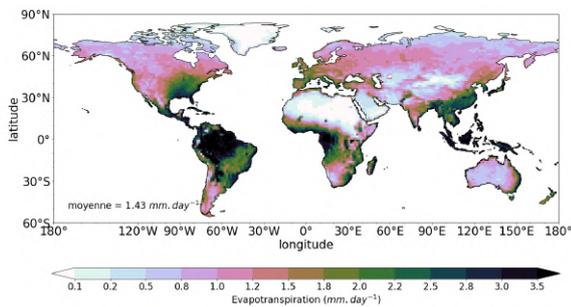


(a) *historical*

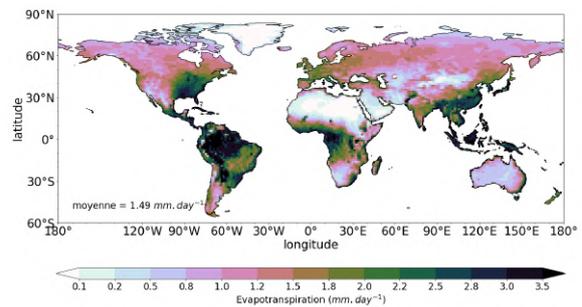


(b) *ssp585*

Figure 30: Valeur des précipitations en (a) *historical* et en (b) *ssp585*



(a) *historical*



(b) *ssp585*

Figure 31: Valeur de l'évapotranspiration en (a) *historical* et en (b) *ssp585*

Précipitations moins Evapotranspiration

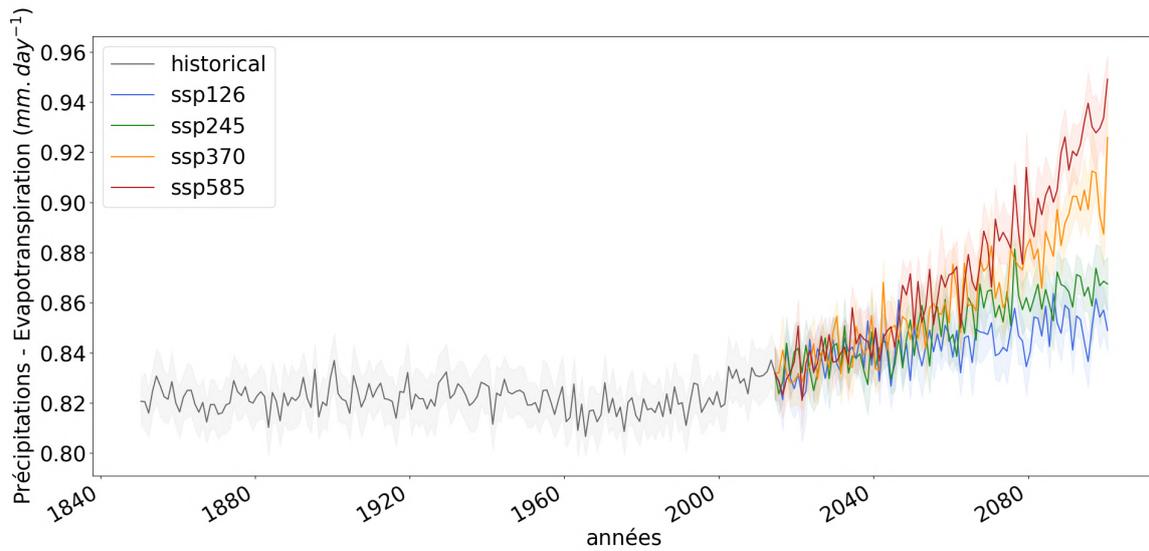
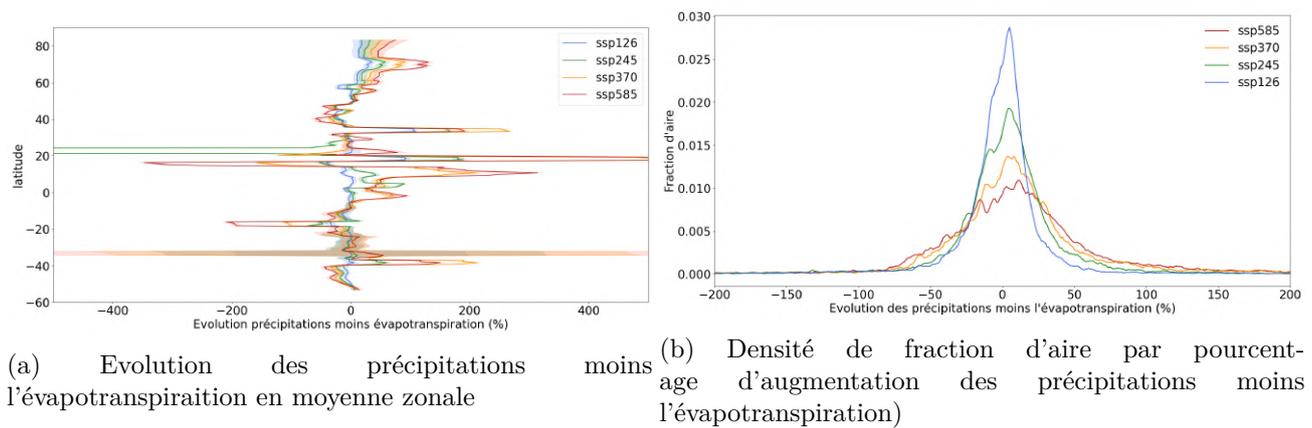
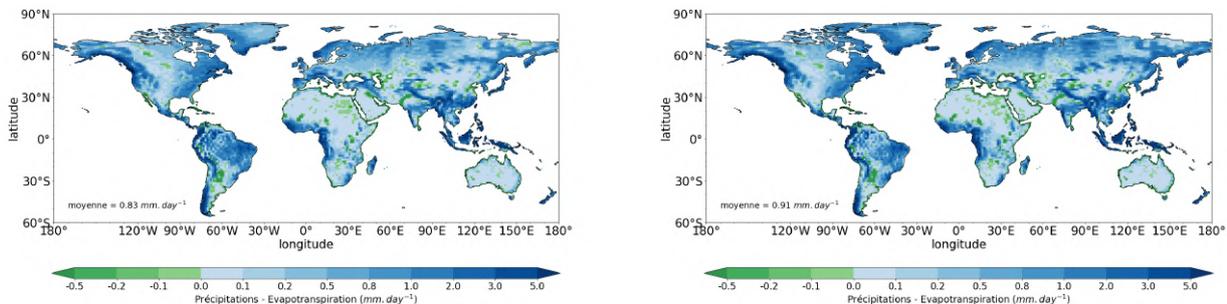


Figure 32: Séries temporelles de 1850 à 2100 selon plusieurs projections des précipitations moins l'évapotranspiration. Gris : simulation historique - Bleu : *ssp126* - Vert : *ssp245* - Orange : *ssp370* - Rouge : *ssp585*. Les zones en transparence correspondent à la variance inter-membre.



(a) Evolution des précipitations moins l'évapotranspiration en moyenne zonale (b) Densité de fraction d'aire par pourcentage d'augmentation des précipitations moins l'évapotranspiration)

Figure 33: (a) : Evolution moyenne zonale - (b) : densité de fraction d'aire



(a) *historical* : précipitations moins évapotranspiration (b) *ssp585* précipitations moins évapotranspiration

Figure 34: Valeur des précipitations moins l'évapotranspiration en (a) *historical* et en (b) *ssp585*

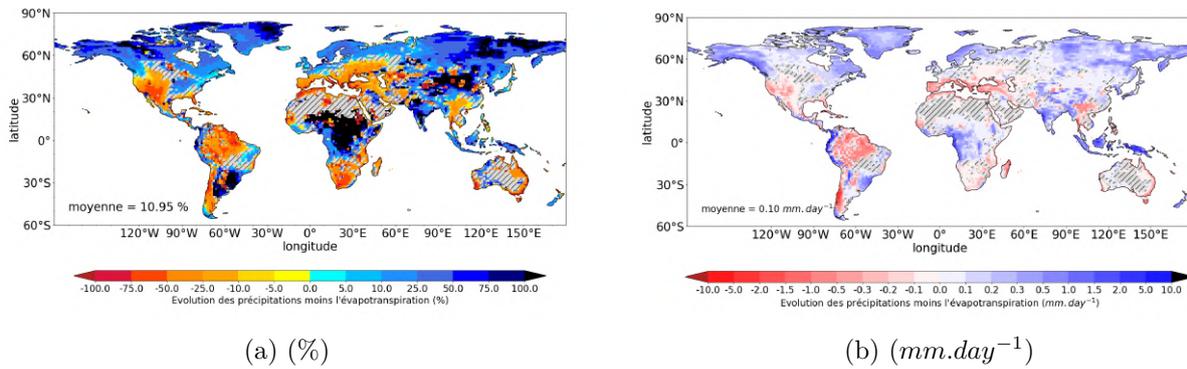


Figure 35: *ssp585* : Evolution des précipitations moins l'évapotranspiration en (a) % et en (b) $mm.day^{-1}$

Scatter plots en global

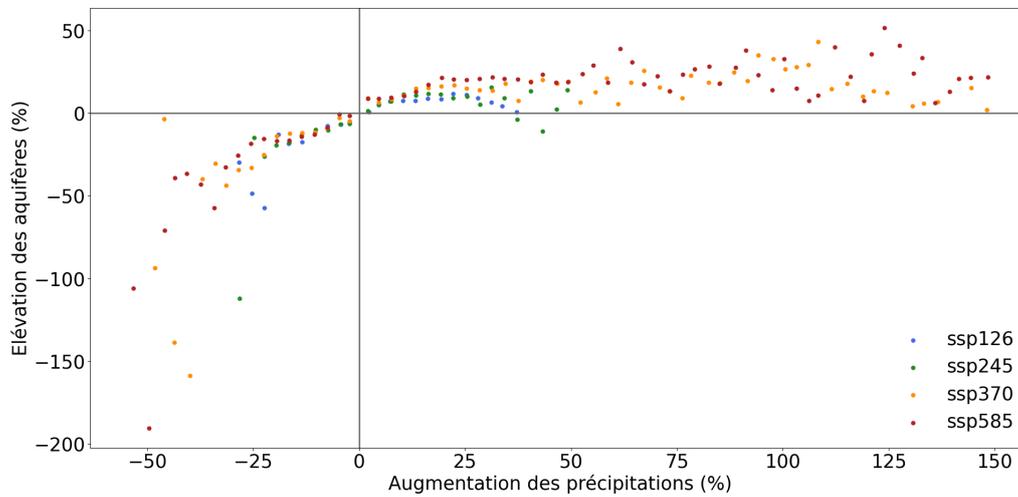


Figure 36: Scatter plot de l'évolution des profondeurs des aquifères en fonction de celle des précipitation (bins de 3 %) pour les différentes projections.

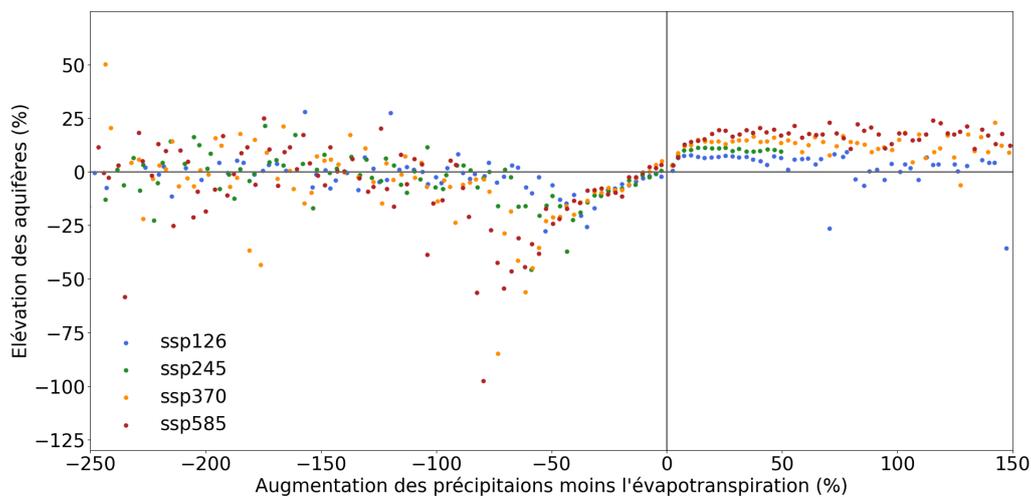


Figure 37: Scatter plot de l'évolution des profondeurs des aquifères en fonction de celle des précipitation moins l'évapotranspiration (bins de 3 %) pour les différentes projections.