

Lire
la première partie
de la thèse

IV Résultats

Chapitre 7: Validation et tendances sur les 50 dernières années

Chapitre 8: Projections hydrologiques

« La science est l'asymptote de la vérité. Elle approche sans cesse, et ne touche jamais. Du reste, toutes les grandeurs, elle les a. Elle a la volonté, la précision, l'enthousiasme, l'attention profonde, la pénétration, la finesse, la force, la patience d'enchaînement, le guet permanent du phénomène, l'ardeur du progrès, et jusqu'à des accès de bravoure. Mais elle est série. Elle procède par épreuves superposées l'une à l'autre et dont l'obscur épaississement monte lentement au niveau du vrai. »

V.HUGO, William Shakespeare, Livre 3 : L'art et la science.

Chapitre 7 : Validation et tendances sur les 50 dernières années

Dans ce chapitre, le modèle hydrologique SWAT dont la mise en place sur le bassin versant de Garonne a été perfectionnée au cours d'étape précédente est utilisé pour mettre à jour les tendances existantes au sein du cycle hydrologique sur les 50 dernières années, à partir des données de réanalyse SAFRAN. Dans un premier temps, les performances de simulation des débits en calibration (2000-2010) sont résumées pour l'ensemble des stations hydrologiques considérées. Ces performances sont comparées aux performances obtenues en validation sur la période 1962-2010 et les bilans d'entrée et de sortie sont comparés à celle de SIM, un autre outil de modélisation. Dans un second temps, les différentes composantes météorologiques utilisées en entrée du modèle SWAT et les composantes hydrologiques modélisées sont analysées à un pas de temps annuel et mensuel sur la période 1962-2010, pour mettre à jour des tendances, dont la significativité est discutée. Pour finir, une comparaison saisonnière spatialisée est réalisée sur le bassin versant en comparant les décennies 1962-1972 et 2000-2010.

1. Rappel sur la calibration et les versions du modèle utilisées

Le processus de calibration en cascade réalisé au cours de ce projet est détaillé précédemment dans la partie méthodologie (Partie II – Chap. 3) de ce document ainsi que dans les articles présentés aux chapitres 4 et 5 de la partie III. Si le processus est resté identique tout au long de la réalisation de ce travail de recherche, des modifications ont pu être apportées, au fur et à mesure de la prise en main des outils disponibles et de la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant modélisé.

Ainsi, la calibration présentée dans cette partie se veut la version définitive de l'évolution de ce travail de raffinement et de mise en place du modèle sur le bassin versant. La valeur de chacun des paramètres calibrés – pour chaque station – pourra être trouvée en Annexe 1 de ce document.

Jusqu'ici, le travail présenté concernait la version du modèle utilisant une méthode de Penman-Monteith pour le calcul de l'ETP (SWAT-PM), qui est la version du modèle pour laquelle la calibration a été réalisée. Cette méthode de calcul requiert un nombre important de données météorologiques : les températures et précipitations, mais aussi le vent, le rayonnement solaire et l'humidité de l'air. Dans un contexte de projection climatique, il n'est pas toujours évident de pouvoir disposer de l'ensemble de ces données. Afin de nous permettre d'utiliser un plus grand nombre de données issues de modèles climatiques dans le chapitre 8 de ce document, une version du modèle utilisant la méthode de Hargreaves (SWAT-HG), ne nécessitant que les paramètres de températures et de précipitation, sera ici également discutée tout au long de ce chapitre, conjointement avec l'analyse des tendances observées sur le cycle hydrologique (voir aussi Part II- Chap. 2- section 2.1.2).

2. Calibration et Validation : Performances

2.1. Analyse générale

Un nombre relativement important de données hydrologiques et météorologiques étaient disponibles à ce projet. La longueur des chroniques hydrologiques, ayant été l'une des conditions de sélections des stations utilisées, conjuguée à l'utilisation de la

réanalyse SAFRAN, a permis une validation du modèle sur des périodes conséquentes. Le Tableau IV.1 présente les périodes de validation disponibles pour chacune des stations de mesure de débits après calibration sur la période 2000-2010.

La moitié des stations (11/21) ont été validées sur une période de 38 ans (1962-1999) avec dans ce cas de figure la météorologie comme facteur limitant puisque la réanalyse SAFRAN commence en 1959, et que les modélisations intègrent 3 années d'initialisation avant la prise en compte des résultats. La station possédant le moins de données hydrologiques est celle de la Truyère Aval, avec tout de même une période de validation de 21 ans. L'accès à de longues périodes de validation permet d'avoir une idée de la stabilité du modèle à long terme, ce qui est un paramètre essentiel en vue de l'analyse des sorties en contexte de changements climatiques.

Les Figures IV.1 et IV.2 illustrent les performances obtenues, sur l'ensemble du bassin versant pour chacune des stations considérées, et pour chacune des versions du modèle (PM et HG). Il est important de garder en tête pour la Figure IV.2 que le modèle SWAT-(HG) n'a pas été calibré et que les performances obtenues en « calibration » ne sont en fait que les performances obtenues sur la période pour laquelle le modèle a été calibré en utilisant la formule de Penman-Monteith.

Une première analyse des résultats permet de voir les bonnes performances globales des deux versions du modèle (PM et HG), que ce soit sur les périodes de calibration ou de validation. En considérant les critères Pbiais et NseSqrt, qui donnent plutôt une indication sur les volumes globaux d'eau simulés, on observe que la plupart des stations présentent des performances bonnes à très bonnes.

Tableau IV.1 : période de validation disponible pour chacune des stations

Saint-Béat	1971-1999
Valentine	1962-1999
Roquefort	1962-1999
Foix	1962-1999
Auterive	1966-1999
Portet	1962-1999
Larra	1965-1999
Verdun	1972-1999
Millau	1969-1999
Marsal	1962-1999
Villemure	1970-1999
Villefranche	1962-1999
Laguepie	1962-1999
Loubéjac	1962-1999
Lamagistère	1967-1999
Sarrans	1962-1999
Truyère Amont	1972-1999
Truyère Aval	1979-1999
Cahors	1962-1999
Nérac	1965-1999
Tonneins	1962-1999

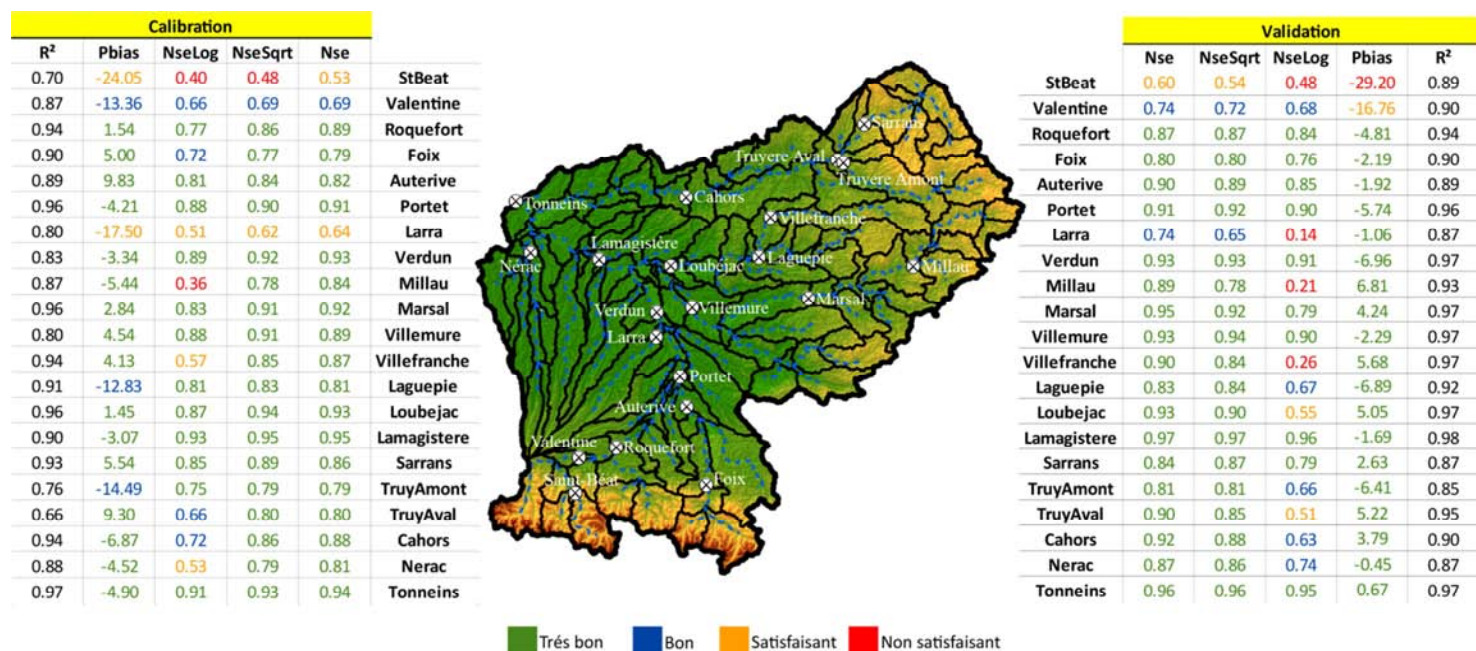


Figure IV.1 : Performance en validation et calibration de SWAT avec l'équation de Penman Monteith-(PM) au pas de temps mensuel. (Classement selon Moriasi et al. (2007))

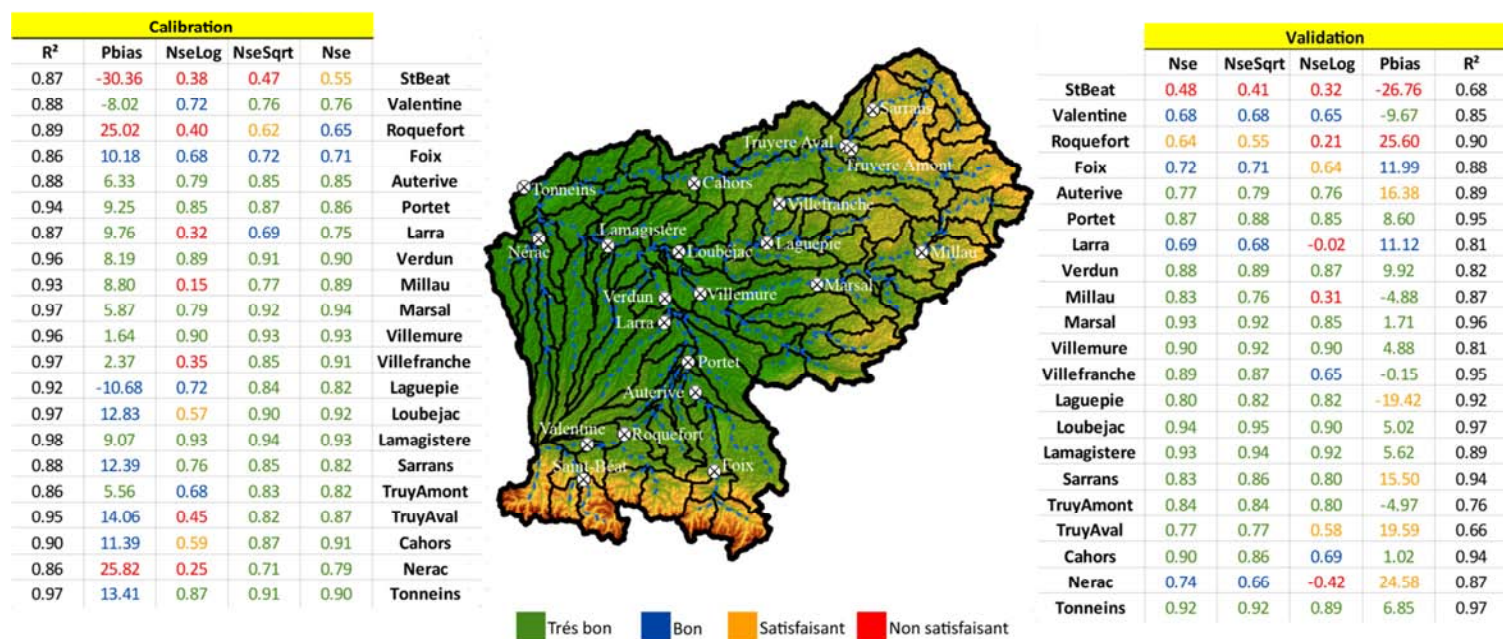


Figure IV.2 : Performance en validation et calibration de SWAT avec la méthode de Hargreaves-(HG) au pas de temps mensuel. (Classement selon Moriasi et al. (2007))

Les deux critères que sont le Nse et le NseLog donnent respectivement une indication sur les débits de pointe et les débits d'étiage.

La calibration du modèle ayant été réalisée par l'optimisation du Nse, on note une nette supériorité de ce critère, avec une grande majorité des stations présentant un très bon score. À l'inverse, le critère de NseLog est celui présentant le plus de valeurs non satisfaisantes, même si une majorité des stations présentent des performances bonnes à très bonnes.

En modélisation, la problématique de représentation à la fois des volumes globaux, des débits de pointe et des débits d'étiages reste un critère important de la qualité globale d'une simulation. Les performances de simulation peuvent être ici considérées comme bonnes à très bonne, la modélisation du bassin versant de la Garonne présentant cependant des faiblesses en ce qui concerne la représentation des débits d'étiages.

Dans un second temps, il est possible de réaliser la comparaison des différentes périodes considérées. Ainsi, une très bonne stabilité des performances du modèle entre les périodes de calibration et de validation peut être soulignée pour les deux figures. En effet, aucune perte substantielle pour les critères NseSqrt et Pbiais n'apparaît. Une légère amélioration de ce dernier est même obtenue en période de validation. Le critère Nse reste quant à lui stable, quel que soit le modèle ou la période considérée. Le critère de NseLog est là encore celui présentant le plus de variabilité. De manière surprenante, ce dernier semble connaître en validation une légère diminution dans le cas du SWAT-(PM) et une légère amélioration pour SWAT-(HG). La stabilité du modèle lors d'une validation sur plusieurs décennies vient ici renforcer l'analyse réalisée au chapitre 6 sur la robustesse de la simulation réalisée sur de longues périodes, confortant la légitimité du modèle à être utilisé pour analyser l'impact des changements climatiques.

Une dernière comparaison nous permet ici d'appréhender les différences entre le modèle utilisant la méthode de calcul de Penman-Monteith et celle de Hargreaves. Les deux versions du modèle présentent des performances équivalentes, malgré la calibration réalisée avec la version SWAT-(PM). Une légère baisse de performance est cependant à noter au regard du Pbiais et du NseLog, pour la version SWAT-(HG). Cela est d'autant plus vrai pour les stations qui semblent de plus instables, pour des raisons qui seront analysées ci-après de ce chapitre.

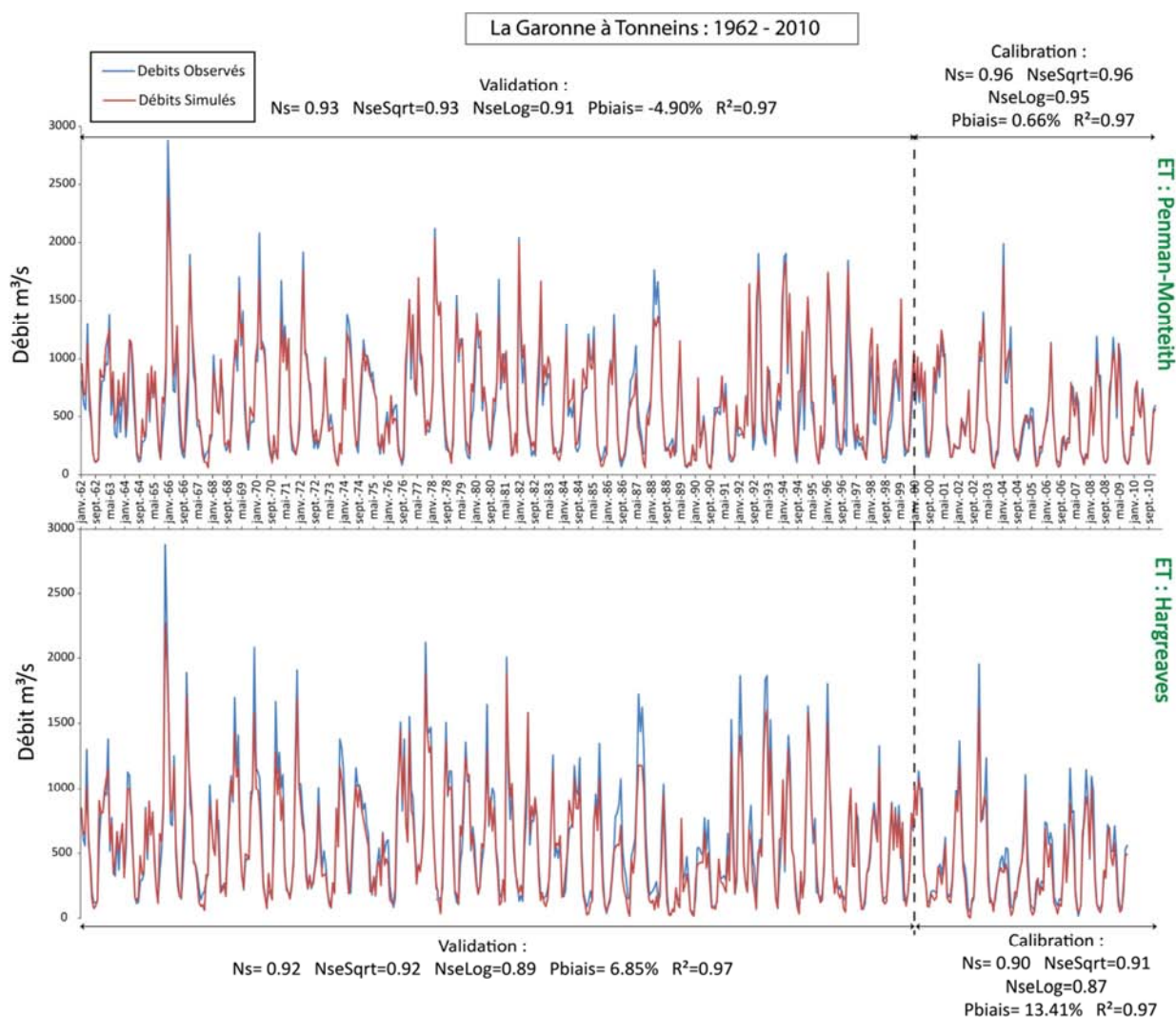


Figure IV.3 : Comparaison des hydrogrammes mensuels simulés et observés à la station de Tonneins avec la méthode PM et la méthode HG.

Ces analyses peuvent être complétées par l'étude de l'hydrogramme à Tonneins, exutoire du bassin versant modélisé (Figure IV.3). On peut y voir le peu de différence induite par le changement de méthode de calcul de l'ET sur la simulation, ainsi que la régularité de la modélisation sur l'ensemble de la période de calibration/validation.

2.2. Analyse des hydrogrammes

Sans réaliser une description station par station, il est intéressant de réaliser une rapide analyse des performances obtenues au niveau des stations. Les hydrogrammes de chaque station, obtenue avec chaque version du modèle, pourront être trouvés en Annexe 2.

L'analyse de ces hydrogrammes vient confirmer celle réalisée à partir des critères de performances pour les stations où de bonnes performances sont obtenues, de manière

stable, à savoir une homogénéité des erreurs de simulation sur l'ensemble des périodes de validation/calibration ainsi qu'une absence de différences notables entre les deux versions du modèle.

Pour les stations présentant quelques instabilités ou des performances moyennes à non satisfaisantes, cette analyse aide à la compréhension des biais existants dans la simulation des débits par le modèle, même si la plupart des stations entrant dans cette catégorie ont déjà fait l'objet d'analyse dans les travaux présentés dans la partie III.

Parmi celles-ci, les stations de Saint-Béat, Valentine, Roquefort et Foix sont celles où sont obtenues les moins bonnes performances. Ces quatre stations se situent le plus en amont du réseau hydrographique, dans la zone pyrénéenne, et ont déjà fait l'objet d'une attention particulière dans la partie III – Chapitre 4 de ce document. On voit donc que malgré le soin apporté à leurs calibrations, des erreurs de simulation persistent. L'analyse des hydrogrammes nous montre cependant que la problématique n'est pas la même pour toutes ces stations.

Saint-Béat et Valentine présentent une surestimation des débits, particulièrement visible pour les débits d'étiages, alors que les simulations aux stations de Roquefort et de Foix ont plutôt une tendance à sous-estimer les débits, ce qui se répercute de manière plus visible sur les débits de pointe. L'impact du changement de méthode de calcul de l'ET semble par ailleurs avoir une influence notable que sur ce second groupe de stations, où la sous-estimation est encore plus accentuée. Ces stations appartiennent à un territoire complexe (comme expliqué dans la partie II – Chapitre 1), où se mêlent les problématiques d'altitude (neige) et d'anthropisation (retenues). Les erreurs de simulation antagonistes observées sur chacun des deux groupes de stations, relativement proche dans l'espace, montrent bien les difficultés de modélisation pouvant exister dans cette région particulièrement complexe. Les hydrogrammes des stations en aval nous montrent par ailleurs que ces erreurs ne sont pas transmises en aval au reste du bassin versant, puisque les superficies concernées sont relativement petites et que les erreurs semblent se compenser en partie les unes les autres.

Un autre groupe de stations composé de Larra et de Nérac, situé à la sortie de la zone des coteaux de Gascogne, présente également des performances instables. Leurs hydrogrammes révèlent principalement une sous-estimation des débits de crue et des

débits d'étiage. Ces stations sont les témoins d'une région où une très forte anthropisation à petite et moyenne échelle du réseau hydrographique est présente, comme expliquées dans la partie II – Chapitre 1 (système Neste). Celle-ci reste très compliquée à prendre en compte dans un modèle conceptuel à l'échelle du bassin versant comme SWAT dont le formalisme ne permet pas, à l'heure actuelle, leurs représentations. Ainsi, le soutien d'étiage réalisé en été pour l'agriculture dans cette région rend la calibration difficile à réaliser.

La comparaison des deux versions du modèle avec une formule de l'ET différente, mais pour une même calibration faite avec SWAT-(PM) nous montre comme pour le groupe de stations Roquefort-Foix, une légère aggravation des problèmes de sous-estimation à l'étiage lors de l'utilisation de la version SWAT-(HG), particulièrement pour la station de Nérac.

Enfin, les simulations aux stations de Millau, de Villefranche et de la Truyère Aval présentent également de faibles performances au regard du critère de NseLog. Les deux premières stations présentent des débits d'étiage particulièrement faibles. L'erreur de simulation réalisée sur ces très faibles débits a alors un fort impact sur ce score puisque les écarts des valeurs logarithmiques deviennent d'autant plus importants que le débit est proche de 0. Cependant, l'étude des hydrogrammes nous permet de voir que les simulations aux stations de Millau et de Villemure semblent relativement bonnes en comparaison aux autres simulations, ce qui se reflète par ailleurs dans les très bonnes valeurs obtenues pour les autres scores. Les simulations à la station de la Truyère Aval présentent quant à elles une sous-estimation du débit particulièrement marquée sur une période distincte à savoir sur dix premières années des relevés hydrologiques (1979-1989).

3. Bilan annuel et tendances sur la période 1962 – 2010

3.1. Bilan global et comparaison avec SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU)

Si la comparaison avec d'autres outils de modélisation ne peut pas être prise comme une validation du modèle SWAT à proprement parlé, cela constitue cependant une indication précieuse sur la cohérence générale des simulations produites.

La Chaîne SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM, Noilhan and Planton (1989); Noilhan and Mahfouf (1996); Habets et al. (2008)), composée du modèle de surface ISBA (interaction sol-biosphère-atmosphère) et du modèle hydrologique distribué MODCOU (MODélisation COUplée), a cela d'intéressante, pour la comparaison avec les simulations produites dans le cadre de ce travail, qu'elle utilise également les données de la réanalyse SAFRAN comme entrées météo. L'utilisation conjointe de cette grille météo permet de supposer des intrants météo similaires et donc d'apporter plus de crédit à la comparaison des sorties des deux modèles. La comparaison avec SWAT-(PM) fait également partie d'un article actuellement en révision dans la revue *Surveys in Geophysics* (Martin et al. (2016) - voir Annexe 3). Il faut noter que les deux modèles ont des objectifs différents : SIM vise à simuler le bilan couplé d'énergie et de masse des surfaces continentales, tandis que SWAT est un modèle hydro-agro-environnementale qui est capable de simuler l'impact du climat, l'utilisation des terres et des pratiques agricoles sur l'hydrologie.

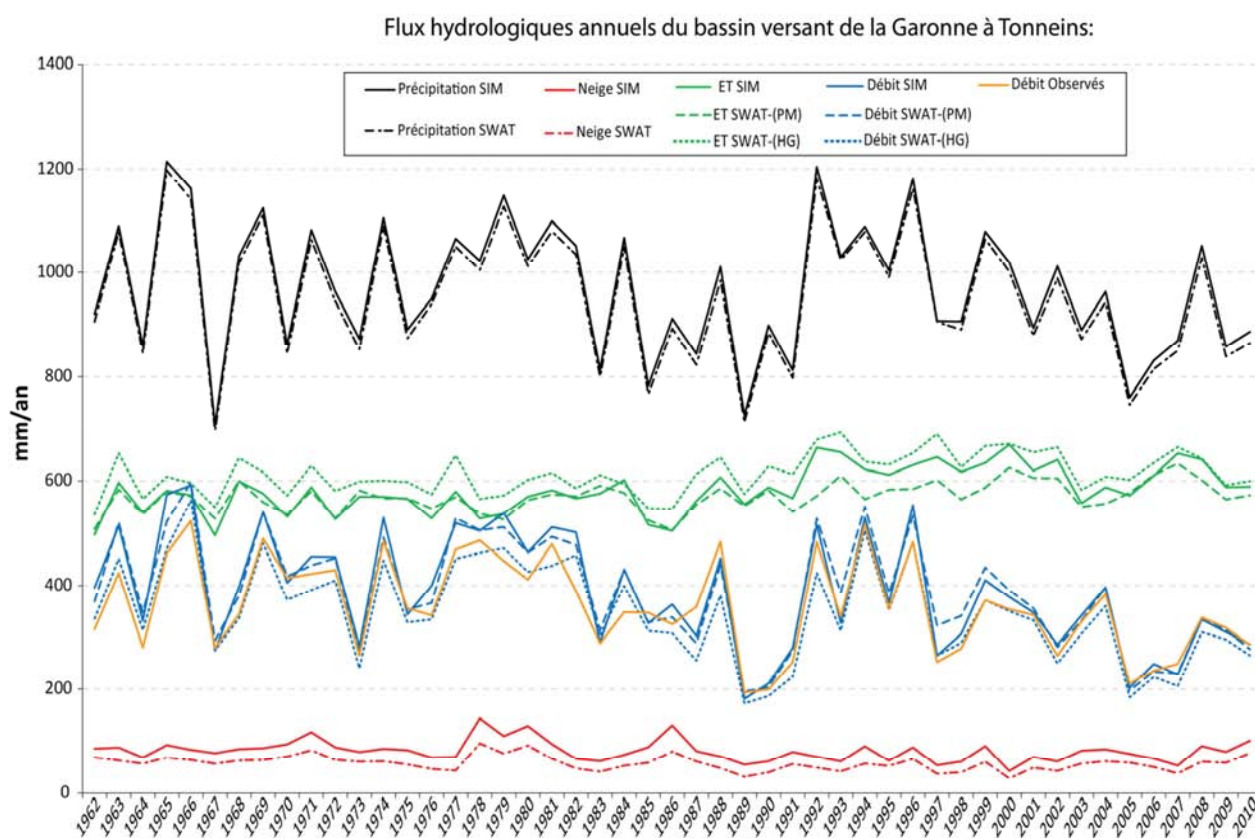


Figure IV.4 : Comparaison SIM-SWAT des flux hydrologiques annuels du bassin versant de la Garonne.

La Figure IV.4 résume cette comparaison avec les deux versions de SWAT. Les précipitations totales et solides sont bien les mêmes pour les deux versions de SWAT qui ne divergent que par la méthode de calcul de l'ET.

La légère différence de précipitations observées entre SIM et SWAT provient de la différence des points de grille pris en compte par les modèles. SIM ayant une résolution similaire à SAFRAN (8 km), il intègre l'ensemble de la grille alors que SWAT n'en intègre qu'une partie seulement en fonction du découpage en sous-bassin versant (voir Chapitre 5 pour plus d'explications). Cela vient confirmer l'analyse de l'influence spatiale de l'utilisation de la grille présentée dans la partie III-Chapitre 5, à savoir qu'il est possible, sans utiliser l'intégralité de la grille, de trouver une résolution spatiale des données météorologiques d'entrée permettant de représenter de manière satisfaisante les bilans hydrologiques.

L'écart de précipitation solide est la résultante de la prise en compte de ce paramètre de manière différente par les deux modèles. SIM utilise les précipitations solides directement issues de la réanalyse SAFRAN, basée sur l'isotherme 273.66 K (Quintana-Segui et al., 2008) alors que pour SWAT, l'ensemble des précipitations de SAFRAN est considéré liquide puisque SWAT génère lui-même les précipitations solides à partir de la température (voir partie II – Chapitre 2). De cette différence de formalisme résulte une différence de la quantité de précipitation solide prise en compte par chaque modèle.

Cependant, si une différence est notable dans le volume de précipitations solides, en effectuant une comparaison des stocks de neige au sol générés par les deux modèles (Figure IV.5), on observe que ces derniers restent très semblables. Cette comparaison vient renforcer celle faite par la comparaison avec les données satellitaires MODIS (Partie III – Chapitre 4) : une bonne simulation générale par SWAT du manteau neigeux en terme de volume et de dynamique malgré une légère surestimation de ce dernier à la fin de la saison d'enneigement. Le décalage du pic d'enneigement détecté avec MODIS ne se traduit cependant pas dans la comparaison avec MODIS où les deux maximums semblent bien coïncider.

Le fait que SIM intègre un module de neige beaucoup plus complexe que SWAT (module à 3 couches, basé sur des bilans d'énergie - voir Boone and Etchevers (2001))

vient encore appuyer l'hypothèse que SWAT est capable de simuler de manière satisfaisante la dynamique du manteau neigeux.

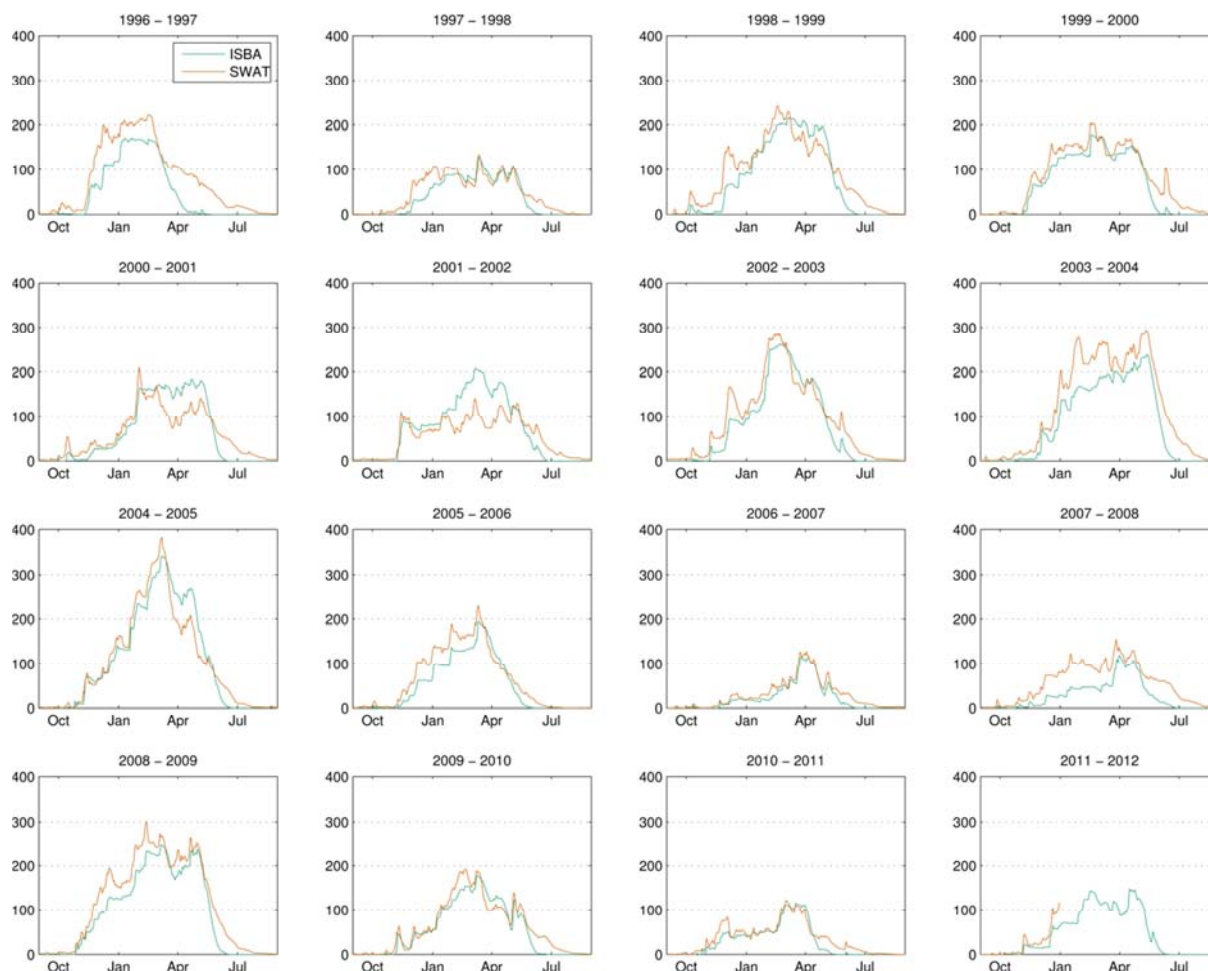


Figure IV.5 : contenu en eau de la neige (mm) simulée par SWAT et SIM sur le bassin versant en amont de Foix (voir figure II.21 pour localisation).

Les flux d'ET générés par chaque simulation (Figure IV.4) sont ceux où la plus grande dispersion est observée, résultant des différentes méthodes de calcul de l'ET. On voit cependant que, quelle que soit la méthode utilisée, cette dispersion représente toujours moins de 10 % des volumes considérés.

Là encore, la comparaison avec la méthode de calcul plus complexe de l'évapotranspiration de SIM (Noilhan and Mahfouf, 1996; Voirin-Morel, 2003) permet d'évaluer la vraisemblance de la simulation des flux d'évapotranspiration par SWAT à l'échelle annuelle. Il est en outre intéressant d'observer que les deux versions de SWAT produisent un flux d'eau verte qui encadre celui de SIM : l'ET produite par la méthode de Penman-Monteith est légèrement inférieure et celle produite par la méthode

de Hargreaves est légèrement supérieure, permettant en moyenne une représentation équivalant à celle de SIM.

Les débits générés à l'exutoire sont quant à eux relativement similaires, et aucun des modèles utilisés ne semble présenter d'amélioration notable de la simulation. Comme pour l'évapotranspiration, chacune des deux versions de SWAT produit alternativement des simulations du débit qui apparaissent comme légèrement meilleures, permettant une bonne représentation générale de ces derniers.

Enfin, des tendances significatives sont relevées par Martin et al. (2016) pour l'ensemble des flux d'entrée-sortie du bassin versant qui sont résumés dans la tableau IV.2. (pour plus de détails, voir (Martin et al., 2016) en annexe 3)

Tableau IV.2 : Tendence en mm.an⁻¹ des flux d'entrée et de sortie du bassin versant de la Garonne sur la période 1960-2010. (Pour plus d'informations concernant les variations relevées par Martin et al.(2016))

			Précipitation	ET	Débit
			mm.an ⁻¹		
Martin et al.	SIM	mm.an ⁻¹	-0.38	1.55	-3.82
	SWAT-(PM)	mm.an ⁻¹	-0.36	0.76	-3.25
	Observation	mm.an ⁻¹			-2.3
Pente de Sen	SIM	mm.an ⁻¹	-2.24	1.75	-3.92
	SWAT-(PM)	mm.an ⁻¹	-2.37	0.89	-3.64
	SWAT-(HG)	mm.an ⁻¹	-2.37	1.10	-3.20
	Observation	mm.an ⁻¹			-2.56
Test de Mann-Kendall	SIM	K (tendance)	-	+	-
		p-value	0.059	< 0.0001	0.001
	SWAT-(PM)	K (tendance)	-	+	-
		p-value	0.059	0.003	0.002
	SWAT-(HG)	K (tendance)	-	+	-
		p-value	0.059	0.004	0.001
	Observation	K (tendance)			-
		p-value			0.006

Des tests complémentaires de Mann-Kendall et du calcul de la pente de Sen ont également été réalisés (voir partie II –Chapitre 3) et viennent confirmer à la fois les taux de variations et la significativité des tendances mise à jour par Martin et al. (2016). Une nuance peut tout de même être apportée quant à la significativité de la tendance à la baisse des précipitations, qui apparait bien plus faible que celles observées pour les flux de sortie du bassin versant (p-values supérieures à 0.05).

D'un point de vue du bilan général du bassin versant, la baisse observée des débits serait donc plutôt due à l'augmentation de l'évapotranspiration qu'à une importante baisse des précipitations.

L'exploration faite dans cette section montre cependant bien la non-stationnarité du climat sur le bassin versant depuis une cinquantaine d'années, avec une baisse des précipitations et une augmentation de température qui se traduit par l'augmentation de l'évapotranspiration. Ce constat nous permet de supposer que cette non-stationnarité des paramètres climatiques devrait être transmise à l'ensemble du cycle hydrologique.

3.2. Bilan détaillé des flux et stocks d'eau verte | bleue

Au-delà du bilan d'entrée-sorties du bassin versant, ce travail vise à réaliser l'analyse des comportements de chaque flux et stock composant le cycle hydrologique simulé par le modèle. Les sections suivantes continuent l'analyse commencée précédemment au travers de la comparaison avec SIM pour l'étendre à l'ensemble des flux et des stocks d'eau verte et bleue.

Les tendances seront ici mises à jour par le calcul de la pente de Sen et leurs significativités estimées grâce à des tests de Mann-Kendall. Si seules les sorties annuelles sont montrées ici par souci de clarté, les tests de tendance ont également été réalisés sur les sorties mensuelles du modèle, pour lesquelles des tests de Mann-Kendall tenant compte de la saisonnalité ont été utilisés.

3.2.1. Eau verte

L'eau verte dans le modèle SWAT se compose essentiellement du flux d'ET (Figure IV.6) et du stock d'eau dans les sols (Figure IV.7)

La Figure IV.6 montre le flux d'ET déjà présenté en Figure IV.5. Elle est complétée avec la composante du modèle dite « Revap ». Cette composante de l'ET représente l'eau évaporée par remontées capillaires à partir de l'aquifère peu profond, lorsque cela est possible (hauteur minimum de nappe), et que le réservoir sol ne peut pas répondre à la demande évapotranspiratoire. Si elle ne correspond qu'à environ 10 % du flux total de l'ET, elle est en revanche un bon indicateur des périodes de grand stress hydrique du réservoir sol dans le modèle.

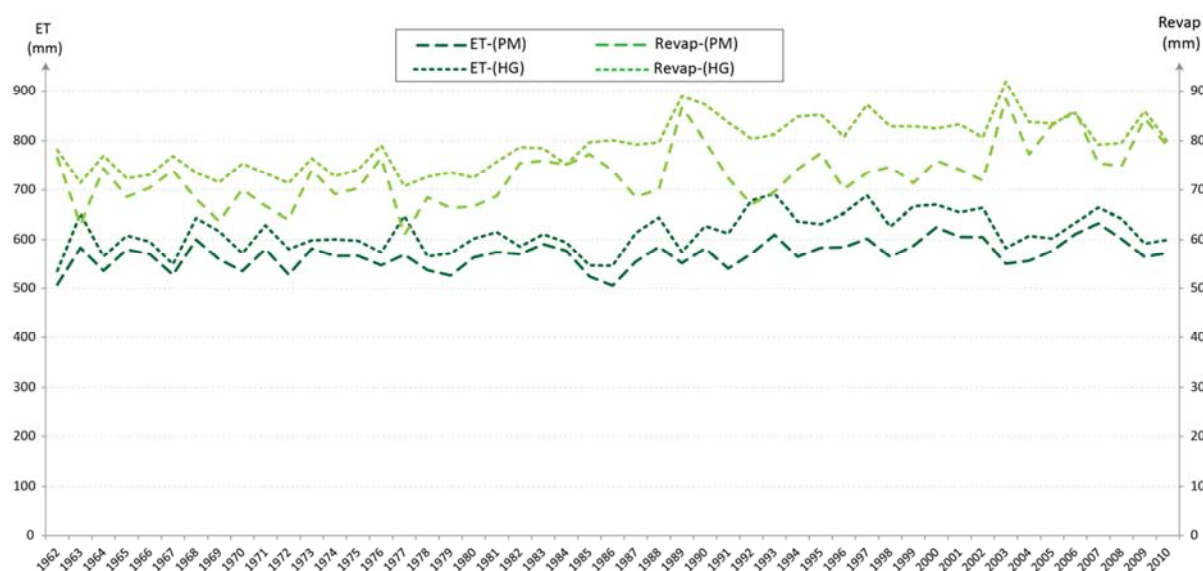


Figure IV.6 : ET et « Revap » (flux d'eau verte) simulées par SWAT sur la période 1962-2010, sur l'ensemble du bassin versant de la Garonne à Tonneins

On peut noter que cette variable « revap » présente, de manière homogène avec l'analyse faite pour l'ET au point précédent, des différences substantielles de valeur en fonction des versions du modèle utilisé ainsi qu'une probable tendance à l'augmentation au cours des 40 dernières années qui sera discutée par la suite (table IV.3).

La Figure IV.7 montre l'évolution du stock d'eau verte. Contrairement au flux d'ET, les deux versions du modèle semblent simuler des teneurs en eau du sol très similaires.

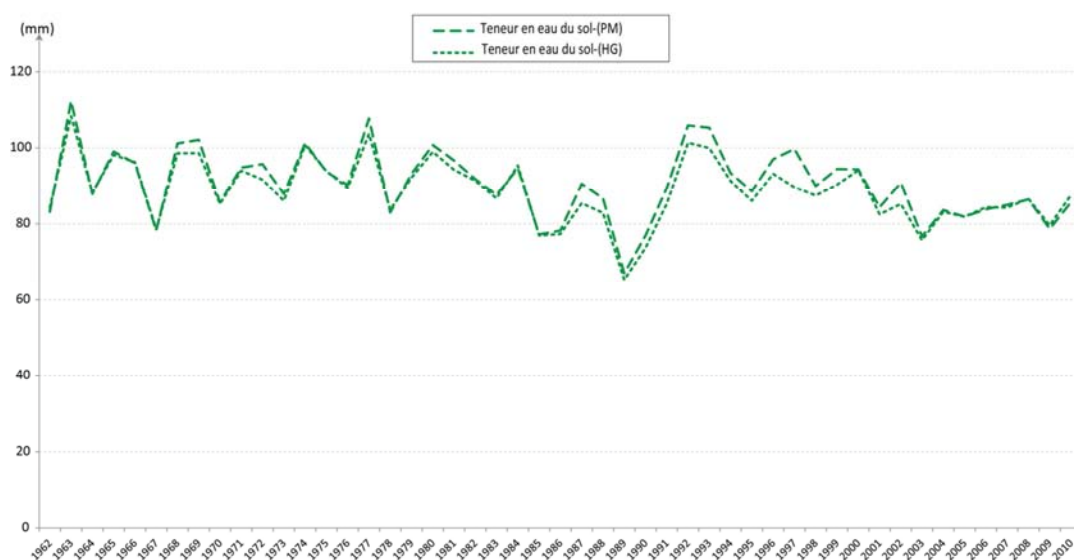


Figure IV.7 : Teneur en eau des sols (stock d'eau verte) simulée par SWAT sur la période 1962-2010, sur l'ensemble du bassin versant de la Garonne à Tonneins

À l'analyse de la Figure IV.7, une tendance à la diminution de la teneur en eau des sols depuis le milieu du XXe siècle peut être supposée. Des tests de Mann-Kendall (Table IV.3) viennent confirmer cette hypothèse ainsi que les observations de tendance faites lors de la comparaison des flux d'ET avec le modèle SIM et celles observées pour le « Revap » sur la Figure IV.6.

Comme conclu dans la section précédente pour le flux d'évapotranspiration, l'augmentation du « Revap » ($+0.25\text{mm.an}^{-1}$) et la diminution de la teneur en eau des sols (-0.25mm.an^{-1}) apparaissent comme étant plutôt faibles, mais clairement significatives avec des p-values inférieures à 0.01 dans tous les tests. La significativité de l'augmentation de la composante « Revap » est encore plus grande que celle de l'ensemble de l'évapotranspiration (p-values annuelles et mensuelles inférieures à 0.0001), pouvant laisser supposer une augmentation des périodes de sécheresse pédologiques sur la même période. Ces tendances sont, d'une manière générale, encore plus significatives lorsque l'on considère les données mensuelles sans effet de saisonnalité.

Le réservoir sol représente la principale source des flux d'évapotranspiration au sein du cycle hydrologique, les autres étant l'eau interceptée, la neige et le réseau hydrographique. L'observation de ces deux tendances opposées et significatives laisse supposer que l'augmentation des phénomènes d'évapotranspirations se répercute sur la teneur générale en eau des sols du bassin versant dont la baisse reste cependant limitée à $-0.25 \text{ \% .ans}^{-1}$

Tableau IV.3 : Résultat des tests de Mann-Kendall et pente de Sen pour les simulations annuelles et mensuelles de l'évapotranspiration et de la teneur en eau des sols sur la période 1962-2010

		ET		Revap		Eau du sol	
		SWAT-(PM)	SWAT-(HG)	SWAT-(PM)	SWAT-(HG)	SWAT-(PM)	SWAT-(HG)
Annuelle	Z (tendance)	+	+	+	+	-	-
	p-value	0.003	0.004	< 0.0001	< 0.0001	0.01	0.005
	Pente de Sen (mm.an ⁻¹)	0.89	1.20	0.23	0.27	-0.25	-0.24
Mensuelle (saisonnalisée)	Z (tendance)	+	+	+	+	-	-
	p-value	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001

3.2.2. Eau bleue

Les flux et stocks d'eau bleue sont plus nombreux. Ils sont ici présentés de la manière suivante : flux d'eau bleue de surface (ruissellement, subsurface et infiltration – Figure IV.8), les stocks d'eau bleue (aquifère et neige – Figure IV.9) et les flux d'eau bleue souterrains (recharge de la nappe et flux nappe-rivière – Figure IV.10).

a. Flux d'eau bleue de surface

Dans le modèle, le processus d'infiltration est simulé avant celui de l'évaporation. Pour cette raison, la quantité d'eau infiltrée est exactement la même pour les deux versions du modèle (Figure IV.8). Une légère différence peut être notée pour le ruissellement, car ce dernier est soumis à l'évaporation au cours de sa simulation. La plus importante différence entre les deux versions du modèle est visible pour le flux de subsurface, qui est en partie conditionné par la teneur en eau des sols, et donc, d'après l'analyse du point précédent, à celui de l'ET. Là encore, des tendances peuvent être mises en évidence (Table IV.4).

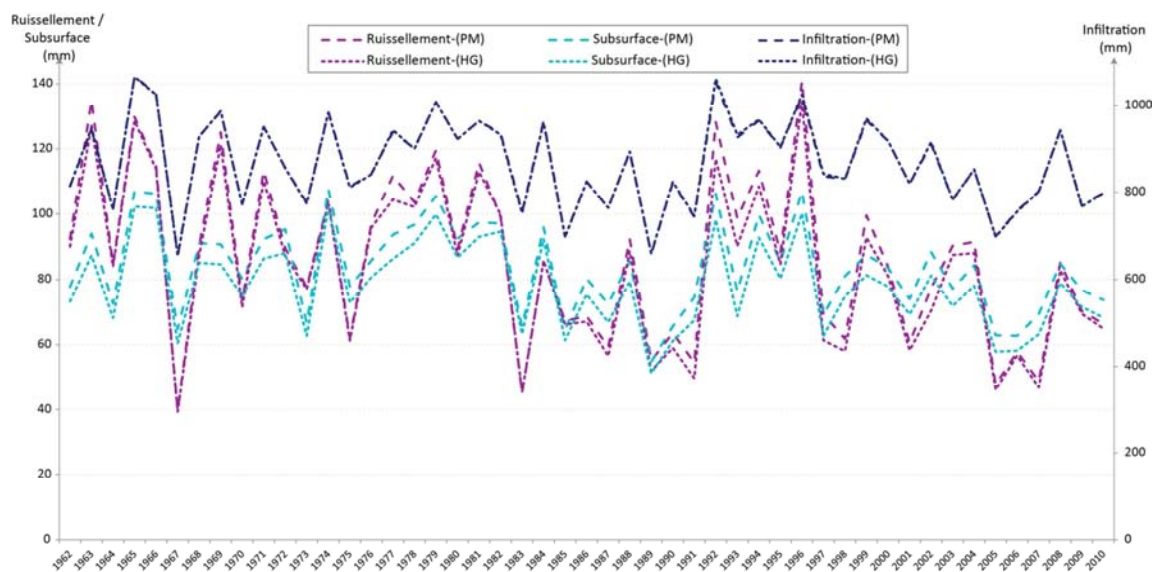


Figure IV.8 : Flux d'eau bleue de surface simulés par SWAT sur la période 1962-2010, sur l'ensemble du bassin versant de la Garonne à Tonneins

Si les trois composantes du cycle hydrologique précédemment citées semblent présenter des tendances à la diminution sur la période 1960-2010, la significativité de chacune d'entre elles est très différente. Ainsi, la diminution de l'infiltration apparaît comme non significative, avec des p-values supérieures à 0.1 pour l'ensemble des tests.

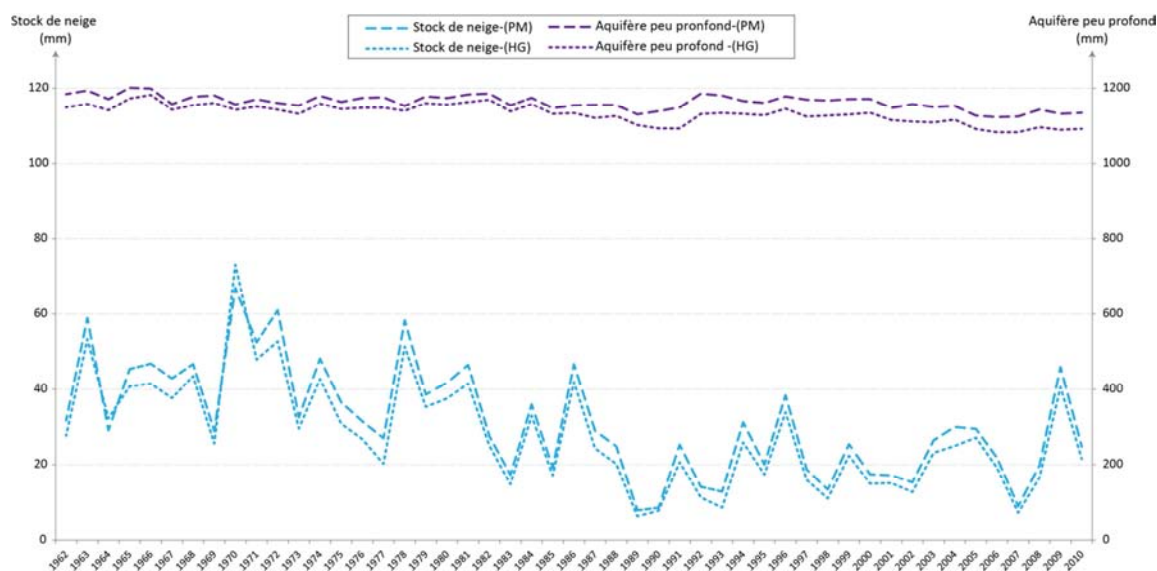
Tableau IV.4 : Résultat des tests de Mann-Kendall et pente de Sen pour les simulations annuelles et mensuelles des flux d'eau bleue de surface, sur la période 1962-2010

		Infiltration		Ruissellement		Subsurface	
		SWAT-(PM)	SWAT-(HG)	SWAT-(PM)	SWAT-(HG)	SWAT-(PM)	SWAT-(HG)
Annuelle	Z (tendance)	-	-	-	-	-	-
	p-value	0.141	0.161	0.006	0.004	0.041	0.031
	Pente de Sen (mm.an ⁻¹)	-1.49	-1.55	-0.76	-0.77	-0.34	-0.31
Mensuelle (saisonnalisée)	Z (tendance)	-	-	-	-	-	-
	p-value	0.198	0.216	0.0005	< 0.0001	0.004	0.001

La significativité des tendances du ruissellement et du flux de subsurface ressort comme plus robuste. Cependant, dans le cas des flux annuels de subsurface, une hypothèse de tendance négative acceptée uniquement au seuil de signification $\alpha = 0.05$. Le taux de variation de ce dernier est également plus faible ($-0.4 \text{ \%}.\text{an}^{-1}$) alors que celui du ruissellement est de l'ordre de $-0.9 \text{ \%}.\text{an}^{-1}$.

b. Stocks d'eau bleue

Les principaux stocks d'eau bleue simulés par le modèle sont ceux de la neige et ceux de l'aquifère peu profond et connecté.

**Figure IV.9** : Stocks d'eau bleue simulés par SWAT sur la période 1962-2010, sur l'ensemble du bassin versant de la Garonne à Tonneins

On peut voir sur la Figure IV.10 que la méthode de calcul de l'évapotranspiration utilisée impacte de manière limitée chacun de ces stocks. Les processus de sublimation, fonction de l'ET, qui s'exercent sur le stock de neige sont à l'origine des différences

observées alors que la différence de volume d'eau stocké dans l'aquifère est impactée principalement par la recharge et le transfert nappe-rivière qui seront traités au point suivant.

Le Tableau IV.5 présente les tests de Mann-Kendall réalisés sur ces quatre séries de données simulées où encore une fois, des tendances apparaissent de manière très significative. Il est en outre très intéressant de mettre en perspective les pentes de Sen calculées, car si les tendances pour les deux stocks d'eau bleue semblent significatives, les taux de variations sont très différents.

Tableau IV.5 : Résultat d'un test de Mann-Kendall et pente de Sen pour les simulations annuelles et mensuelles des stocks d'eau bleue, sur la période 1962-2010

		Stock de neige		Aquifère peu profond	
		SWAT-(PM)	SWAT-(HG)	SWAT-(PM)	SWAT-(HG)
Annuelle	Z (tendance)	-	-	-	-
	p-value	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
	Pente de Sen (mm.an ⁻¹)	-0.60	-0.57	-0.85	-1.36
Mensuelle (saisonnalisée)	Z (tendance)	-	-	-	-
	p-value	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001

Ainsi, une diminution moyenne de 1.1 mm.an⁻¹ de l'eau contenue dans l'aquifère, ne représente qu'une variation de -1 %.an⁻¹ (avec un aquifère stockant en moyenne 1100 mm d'eau), alors qu'une diminution de 0.6 mm.an⁻¹ de la neige stockant annuellement en moyenne 30mm.an⁻¹ représente une variation de -2 %.an⁻¹. La variation exercée sur le stock de neige est donc bien plus importante que celle exercée sur l'eau stockée dans l'aquifère peu profond.

c. Flux d'eau bleue souterrains

Les flux d'eau bleue souterrains simulés par le modèle sont la recharge de l'aquifère et le transfert de la nappe vers la rivière (Figure IV.9). Contrairement aux flux d'eau bleue de surface, on observe cette fois une disparité assez importante des simulations produites par les deux versions de SWAT : la version de SWAT-(PM) simulant des volumes de transfert d'eau souterraine plus importants que la version SWAT-(HG).

Ces constatations semblent cohérentes avec celles faites sur les différences de simulation d'ET par les deux versions : SWAT-(HG) génère une ET plus importante, ce qui se répercute directement sur la recharge de la nappe et par suite sur les transferts d'eau de la nappe à la rivière.

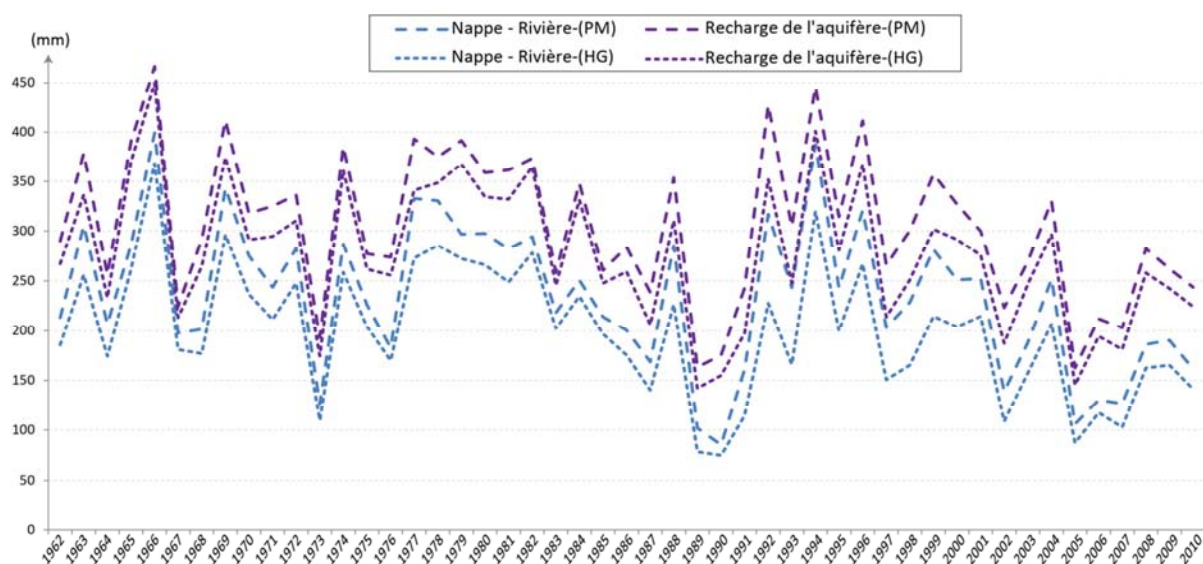


Figure IV.10 : Flux d'eau bleue souterrains simulés par SWAT sur la période 1962-2010, sur l'ensemble du bassin versant de la Garonne à Tonneins

Les tendances générales sur l'ensemble de la période apparaissent elle aussi significatives (Tableau IV.6) avec des taux de variation de l'ordre de $0.75 \text{ \%}.\text{an}^{-1}$ pour la recharge et de $0.9 \text{ \%}.\text{an}^{-1}$ pour le flux de transfert nappe-rivière.

Tableau IV.6 : Résultat d'un test de Mann-Kendall et pente de Sen pour les simulations annuelles et mensuelles des flux d'eau bleue souterrains, sur la période 1962-2010

		Recharge de l'aquifère		Flux Nappe-rivière	
		SWAT-(PM)	SWAT-(HG)	SWAT-(PM)	SWAT-(HG)
Annuelle	Z (tendance)	-	-	-	-
	p-value	0.019	0.006	0.007	0.001
	Pente de Sen (mm.an ⁻¹)	-2.00	-2.03	-1.99	-2.11
Mensuelle (saisonnalisée)	Z (tendance)	-	-	-	-
	p-value	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001

3.3. Conclusion du bilan détaillé sur la période 1962-2010

L'exercice réalisé précédemment poursuit deux objectifs : détecter les grandes tendances existantes sur les composantes du cycle hydrologique pour la période étudiée, mais également permettre la comparaison entre les deux versions du modèle SWAT, et vérifier si ces dernières mènent à des conclusions similaires concernant les variations détectées.

En réponse à la première problématique, des tendances claires ont été mises à jour, dans les séries annuelles comme dans les séries mensuelles. Les conclusions générales faites à partir des entrées/sorties d'eau du bassin versant peuvent alors être élargies à l'ensemble des flux et stocks du bassin versant :

- La baisse des précipitations n'est pas significative et par suite logique, l'infiltration ne présente aucune tendance significative.
- Une tendance à la hausse significative de l'évapotranspiration (et des périodes de sécheresses pédologiques) a été mise en évidence sur le bassin versant.
- L'augmentation du flux d'ET est transmise au reste du cycle hydrologique, et particulièrement aux flux d'eau bleue de ruissellement ($-0.9 \text{ \%} \cdot \text{an}^{-1}$), à la recharge de la nappe ($0.75 \text{ \%} \cdot \text{an}^{-1}$) et au transfert de la nappe vers la rivière ($-0.9 \text{ \%} \cdot \text{an}^{-1}$).
- L'impact sur les stocks d'eau est faible à l'exception du stock de neige qui connaît une diminution de l'ordre de $-2 \text{ \%} \cdot \text{an}^{-1}$ alors que la tendance à la baisse de la teneur en eau dans les sols n'est que de $-0.25 \text{ \%} \cdot \text{an}^{-1}$ et celle de l'aquifère peu profond de $-1 \text{ \%} \cdot \text{an}^{-1}$.
- La comparaison des deux versions de SWAT utilisées nous permet de constater que les différences les plus notables se retrouvent sur la simulation du flux d'ET, ce qui semble normal vu le changement de méthode de calcul. Cependant, cet écart reste limité à moins de 10 % du total des volumes évapotranspirés. De manière plus surprenante, cette différence se retrouve dans les flux d'eau bleue souterrains, mais beaucoup moins dans le reste des compartiments du cycle hydrologique.

Enfin, les deux versions de SWAT mènent aux mêmes résultats lors des analyses de tendances sur la période considérée, où les pentes tout comme les significativités de ces dernières concordent.

On voit donc bien ici que la non-stationnarité du climat mise en évidence dans la section précédente influe sur un grand nombre de composantes du cycle hydrologique et en premier lieu sur la répartition des flux et stock d'eau verte.

4.Variation saisonnière spatialisée 1962-1972 Vs. 2000-2010

L'utilisation pour la réalisation de ce travail d'un modèle semi-distribué, dont le découpage est basé sur la topographie et la calibration faite à différents points du réseau de drainage, a pour but de réaliser des analyses à une échelle spatiale plus fine que les considérations précédentes ne prenant en compte le bassin versant que dans sa globalité.

De même, l'analyse avec une résolution temporelle annuelle est assez vite limitée dans la mesure où la plupart des composantes du cycle hydrologique sont soumises à une forte saisonnalité et que les tendances existantes peuvent varier d'une période de l'année à une autre.

Dans la dernière partie de ce chapitre, toujours en considérant les différents flux et stocks composant le cycle hydrologique, seront présentés des résultats sous forme spatialisée à partir des sous-bassins créés lors du découpage de mise en place du modèle. Pour chaque composante hydrologique, la période 2000-2010 est prise comme période de référence puis le delta entre cette période et la période 1962-1972 est calculé, permettant de visualiser les variations en fonction du temps soit :

$$\Delta = \text{Volume}_{2000-2010} - \text{Volume}_{1962-1972}$$

Une valeur positive indique donc une hausse de l'indicateur hydrologique au court du temps. Cette analyse est réalisée pour la saison hivernale (décembre, janvier et février) et la saison estivale (juin, juillet et août), et pour les deux versions du modèle SWAT utilisées.

4.1. Eau verte

Les Figures IV.11 et IV.12 montrent les résultats de cette analyse pour le flux d'eau verte (ET) et le stock d'eau verte (teneur en eau du sol). Comme attendu, ces deux composantes du cycle hydrologique sont soumises à une forte variation saisonnière.

Sur la période 2000-2010, le volume des flux d'ET diminue d'un facteur 4 en période hivernale par rapport à la période estivale, quand à la teneur en eau des sols, elle connaît une périodicité inverse avec un taux d'humidité des sols 2 fois plus important en hiver. La périodicité contraire de ces deux composantes est consistante avec la forte influence qu'exerce le flux d'ET sur la teneur en eaux des sols mis en évidence dans la section précédente.

Il est intéressant de voir qu'au-delà de ces fortes variations saisonnières, la répartition spatiale de l'eau verte dans le bassin versant est assez homogène. Il est difficile de différencier une dynamique particulière de l'ET à la surface du bassin versant, la répartition estivale de cette dernière pour les différents sous-bassins versants étant plutôt guidée par la végétation présente or, cette dernière est relativement homogène sur l'ensemble du bassin versant, que ce soit sous forme de forêts ou de cultures. En période hivernale, la principale différence notable concerne les sous-bassins d'altitude, où la couverture de neige fait baisser le flux d'ET comme décrit dans le chapitre 4.

La teneur en eau des sols se révèle légèrement plus importante dans la zone de la moyenne Garonne et dans les plaines à l'aval du bassin versant qu'elle ne l'est en altitude, ce qui est cohérent avec les caractéristiques pédologiques de ces zones, dominées par des sols plus épais que dans les zones d'altitudes. Enfin, on peut noter le peu de disparité entre les deux modèles, qui font apparaître le même motif de répartition spatiale.

L'analyse des évolutions entre les périodes 1962-1972 et 2000-2010 nous permet d'enrichir les analyses réalisées dans la section précédente d'une composante spatiale. En saison hivernale, l'ET semble augmenter sur la majorité du territoire considéré, ce qui est consistant avec l'analyse faite à l'échelle du bassin versant. En saison estivale, l'ET n'augmente que dans les zones de coteaux et d'altitude, alors qu'elle diminue dans les zones de plaine. Il est important de garder à l'esprit que la représentation qui est proposée ici est celle de l'évapotranspiration réelle estimée par SWAT et non l'évapotranspiration potentielle. Ainsi, si la ressource vient à manquer pour combler la demande, l'ET en vient à diminuer.

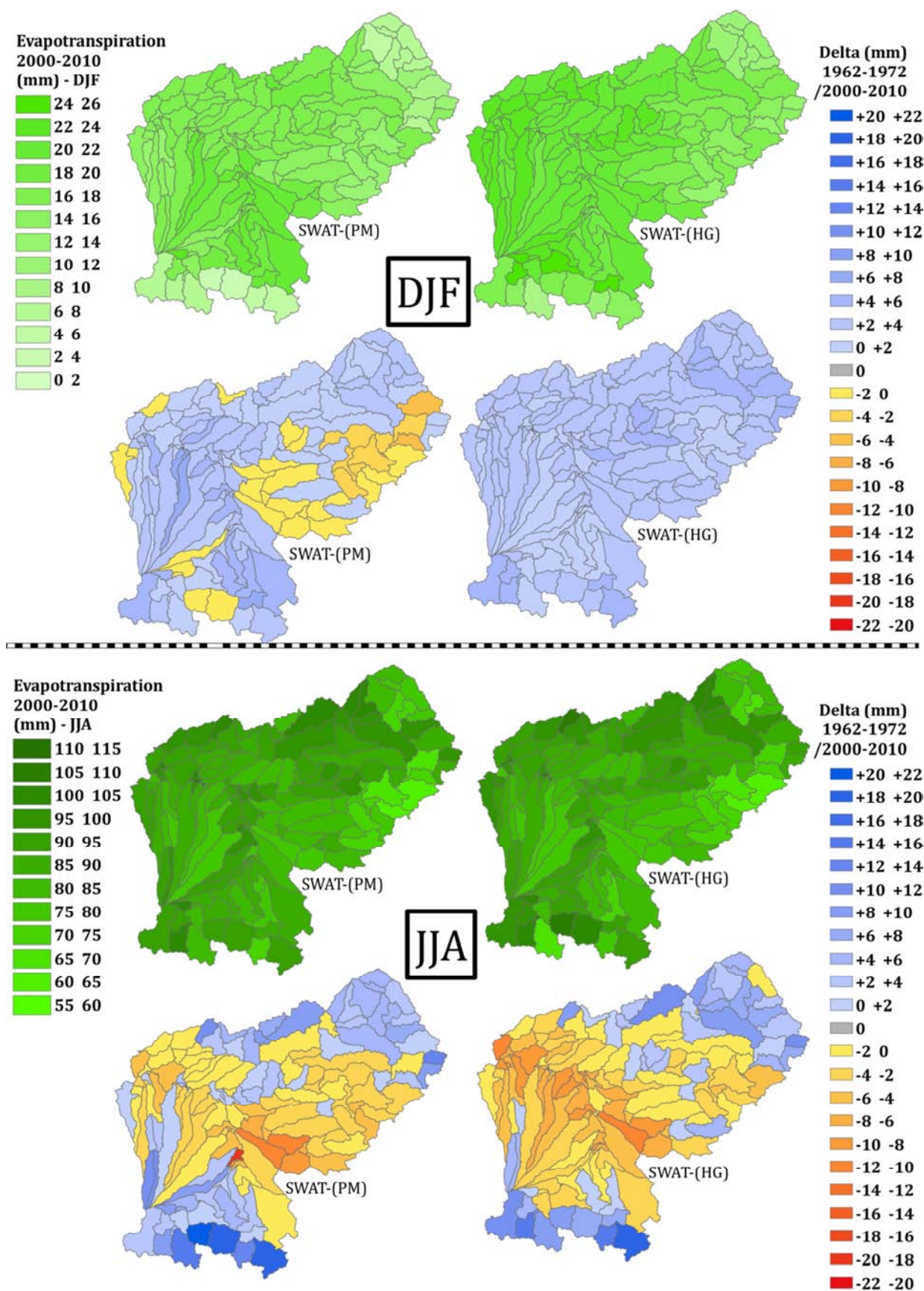


Figure IV.11 : Flux d'ET, moyennes mensuelles saisonnières, spatialisées sur la période 2000 - 2010 et variation entre les périodes 1962-1972 et 2000-2010 (DJF = décembre ; janvier ; février et JJA = juin ; juillet ; août).

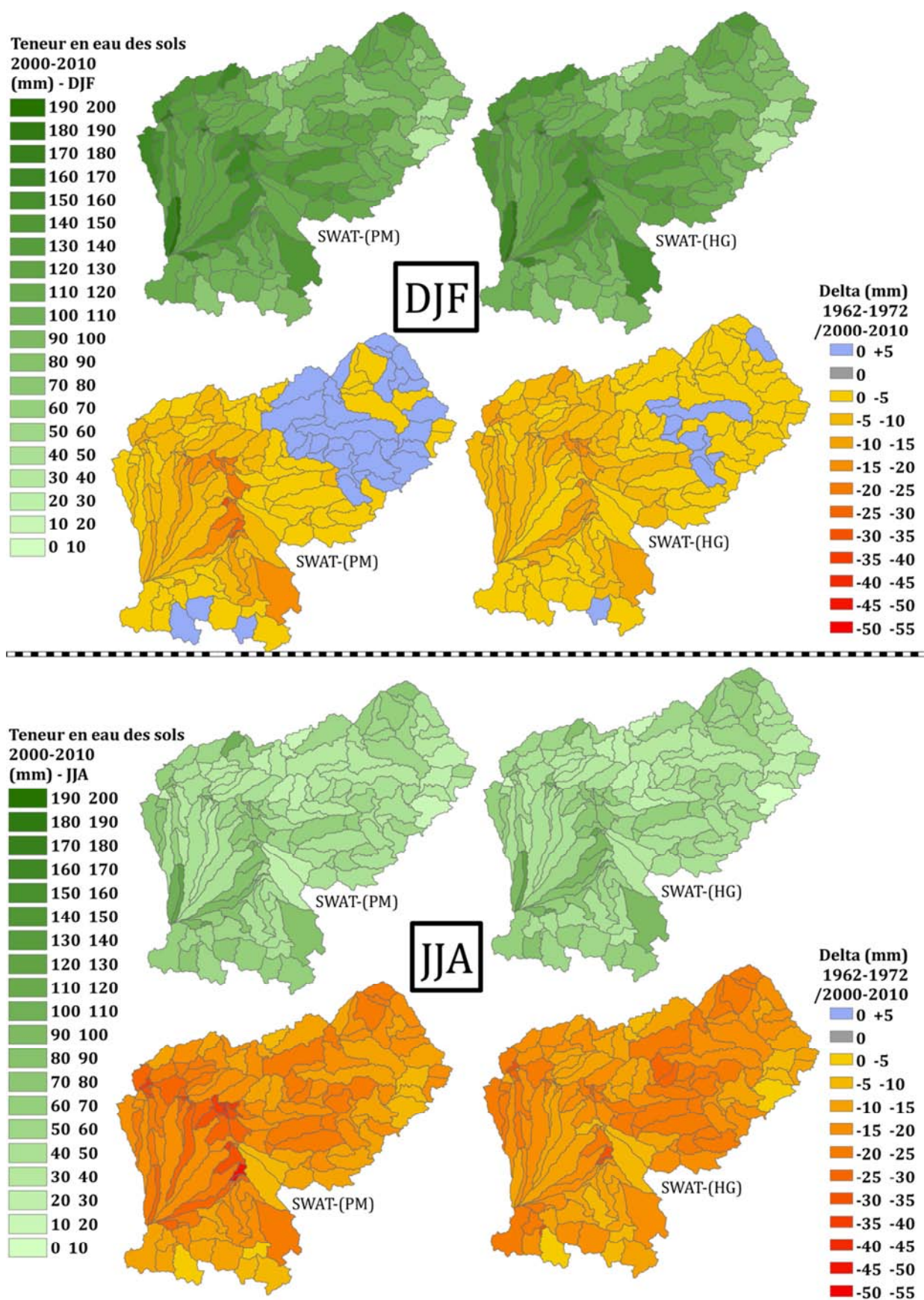


Figure IV.12 : Humidité des sols, moyennes mensuelles saisonnières spatialisées sur la période 2000 - 2010 et variation entre les périodes 1962-1972 et 2000-2010. (DJF = décembre ; janvier ; février et JJA = juin ; juillet ; août)

Cette diminution en période estivale dans la plaine du bassin versant est concordante avec l'observation de l'augmentation du « Revap » faite au point 3.2.1, qui indique une augmentation des périodes où les demandes évapotranspiratoires ne peuvent être comblées et donc où l'évapotranspiration effective peut être amenée à diminuer.

La variation de la teneur en eau des sols semble conforme à la tendance mise à jour à partir des chroniques annuelles et mensuelles à savoir qu'une diminution globale de la teneur en eau est observée sur l'ensemble du bassin versant. Cette dernière semble cependant plus modeste en hiver, où certains sous-bassins connaissent même une légère augmentation, mais elle est bien marquée sur la période estivale. Cette baisse est également plus importante dans la zone de moyenne Garonne ainsi que dans la zone aval du bassin versant où elle peut représenter une diminution relative importante pouvant atteindre 20 à 25 % du stock d'eau par rapport à la période 1962-1972.

Ces fortes diminutions du stock d'eau verte peuvent être mises en relation avec la baisse estivale d'ET dans les plaines, venant appuyer l'hypothèse que cette baisse pourrait être due à des périodes où l'eau manque pour combler les demandes évapotranspiratoires, puisque le réservoir "sol" constitue une source importante de l'ET.

4.2. Eau bleue

4.2.1. Flux d'eau bleue de surface

Le ruissellement et l'infiltration sont les premiers flux d'eau à être simulés par le modèle (« *Modified curve number method* » - *Neitsch et al. (2011)*) et sont fonction l'un de l'autre : exception faite de l'interception par les végétaux, les précipitations sont partagées entre ces deux flux. Leur répartition spatiale est donc comparable, et directement proportionnelle à la répartition des précipitations.

Pour la période 2000-2010, les volumes d'eau écoulés et infiltrés sont plus importants en altitude qu'ils ne le sont dans la plaine, ce qui est cohérent avec le gradient orographique de précipitations (Figure IV.13 et IV.14)

Ce gradient spatial est par ailleurs particulièrement visible en période hivernale. Pendant la saison estivale, la faible teneur en eau des sols du bassin, sur laquelle est

basée la méthode de séparation des précipitations, tend à favoriser l'infiltration plutôt que le ruissellement qui diminue de manière substantielle.

La variation hivernale de ces deux flux par apport à la décennie 62-72 est relativement homogène avec une diminution quasi généralisée sur l'ensemble du bassin versant, elle aussi croissante avec l'altitude. Seuls un petit nombre de sous-bassins connaissent une légère augmentation du ruissellement, dont la valeur absolue reste relativement modeste. Les baisses observées peuvent par contre se révéler relativement importantes. Comme cela a déjà été discuté dans le Chapitre 4, la présence de stock de neige sur les sous-bassins d'altitudes a une influence sur les flux d'eau bleue de surface et notamment sur l'infiltration. Ainsi, les sous-bassins présentant les variations les plus importantes de l'infiltration depuis 40 ans, sont souvent ceux où la variation du stock de neige a également été importante (voir section 4.2.2).

La comparaison des moyennes de volumes infiltrés et écoulés pour les périodes estivales de chacune des décennies mène à des tendances beaucoup moins homogènes. Ces dernières peuvent être positives ou négatives, mais restent globalement affectées de valeur assez faible. Cela est particulièrement vrai pour le ruissellement, sur la période de référence comme en variation, où les volumes apparaissent anecdotiques. Il est difficile de pouvoir expliquer clairement cette répartition des variations par des caractéristiques hydrologiques plus que par une variation locale des précipitations entre les deux périodes.

Ces deux tendances, nette diminution en hiver et peu marquée en été, sont cohérentes avec les analyses climatiques au sujet des précipitations sur le bassin versant où une diminution des pluies hivernales a été mise en évidence alors qu'aucune tendance claire n'a pu être mise à jour en saison estivale (voir partie I – Tableau I.1). Le flux de subsurface est fonction principalement de la teneur en eau de sol et à la pente topographique. La répartition spatiale de ce dernier est alors relativement facile à expliquer d'après ces deux paramètres. Sur la période 2000-2010, on voit clairement que les sous-bassins versants situés dans les zones de coteaux ou de montagnes sont ceux où le flux de subsurface est le plus important. On note également une nette différence à la comparaison des périodes d'été et d'hiver, qui est à mettre en relation avec la Figure IV.12 et la variation de teneur en eau des sols. On voit par ailleurs que pendant l'été le flux de subsurface ne concerne principalement que la zone pyrénéenne.

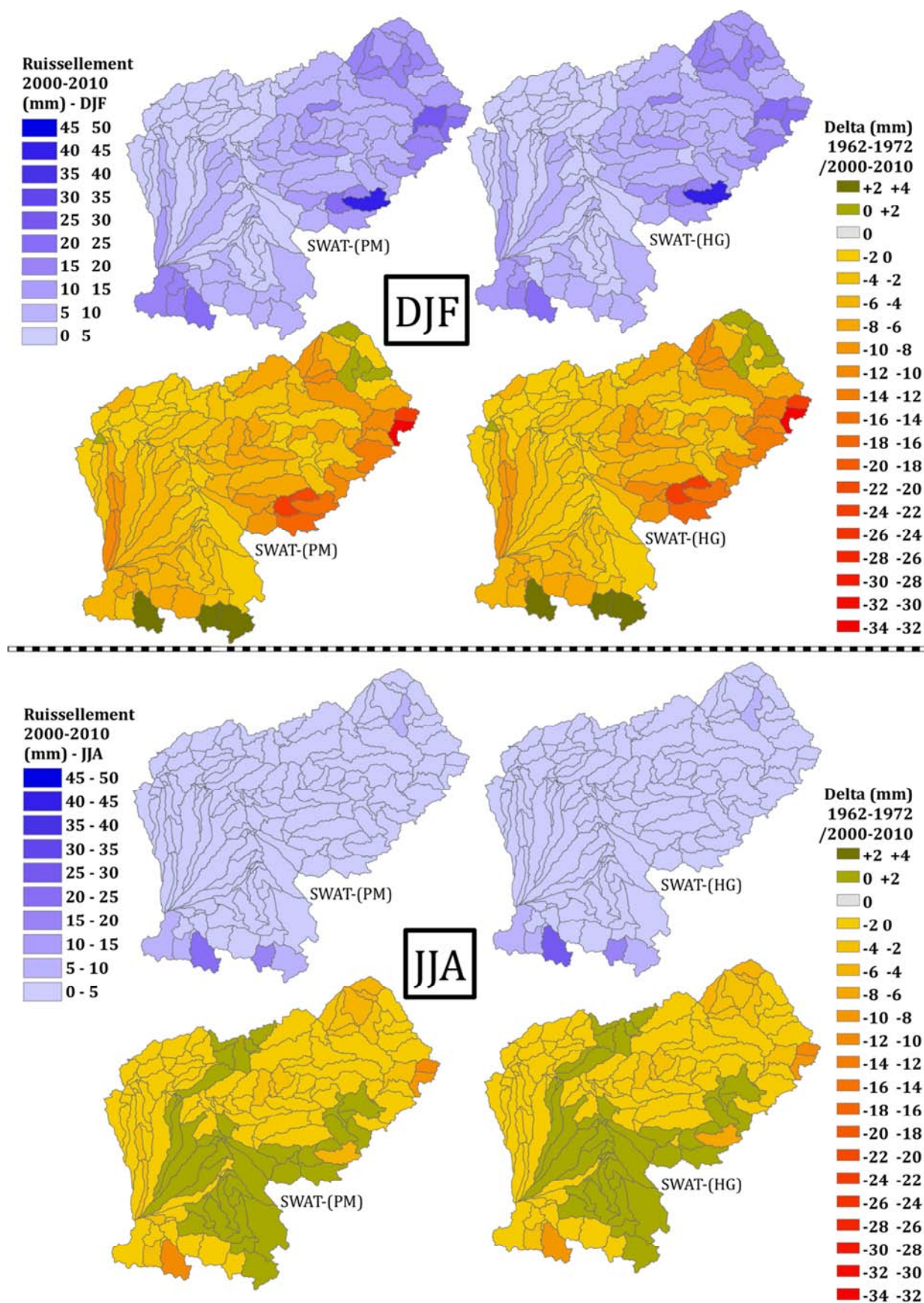


Figure IV.13 : Ruissellement, moyennes mensuelles saisonnières spatialisées sur la période 2000 - 2010 et variation entre les périodes 1962-1972 et 2000-2010. (DJF = décembre ; janvier ; février et JJA = juin ; juillet ; août)

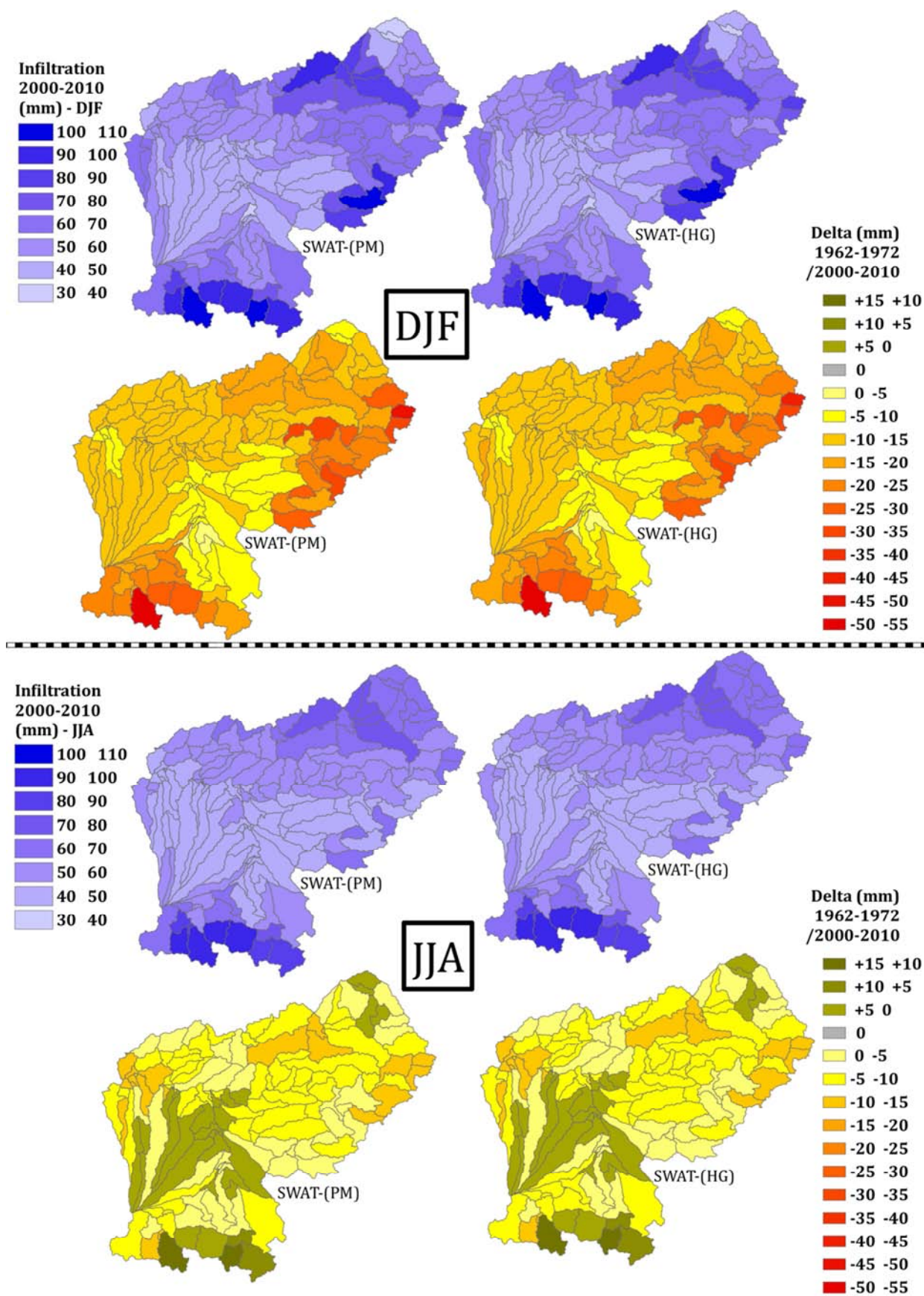


Figure IV.14 : Infiltration, moyennes mensuelles saisonnières spatialisées sur la période 2000 - 2010 et variation entre les périodes 1962-1972 et 2000-2010. (DJF = décembre ; janvier ; février et JJA = juin ; juillet ; août)

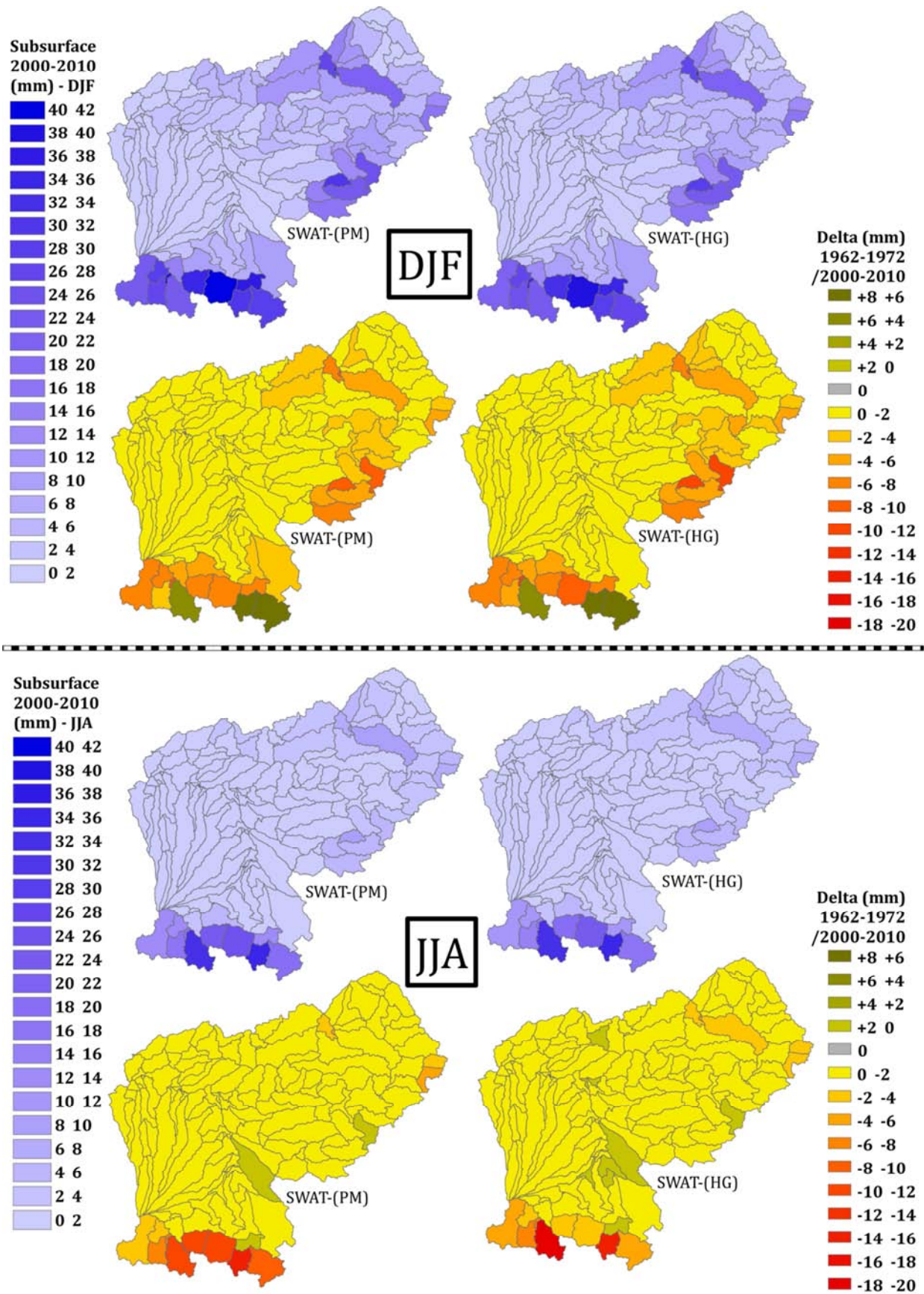


Figure IV.15 : Flux de subsurface, moyennes mensuelles saisonnières spatialisées sur la période 2000 - 2010 et variation entre les périodes 1962-1972 et 2000-2010. (DJF = décembre ; janvier ; février et JJA = juin ; juillet ; août)

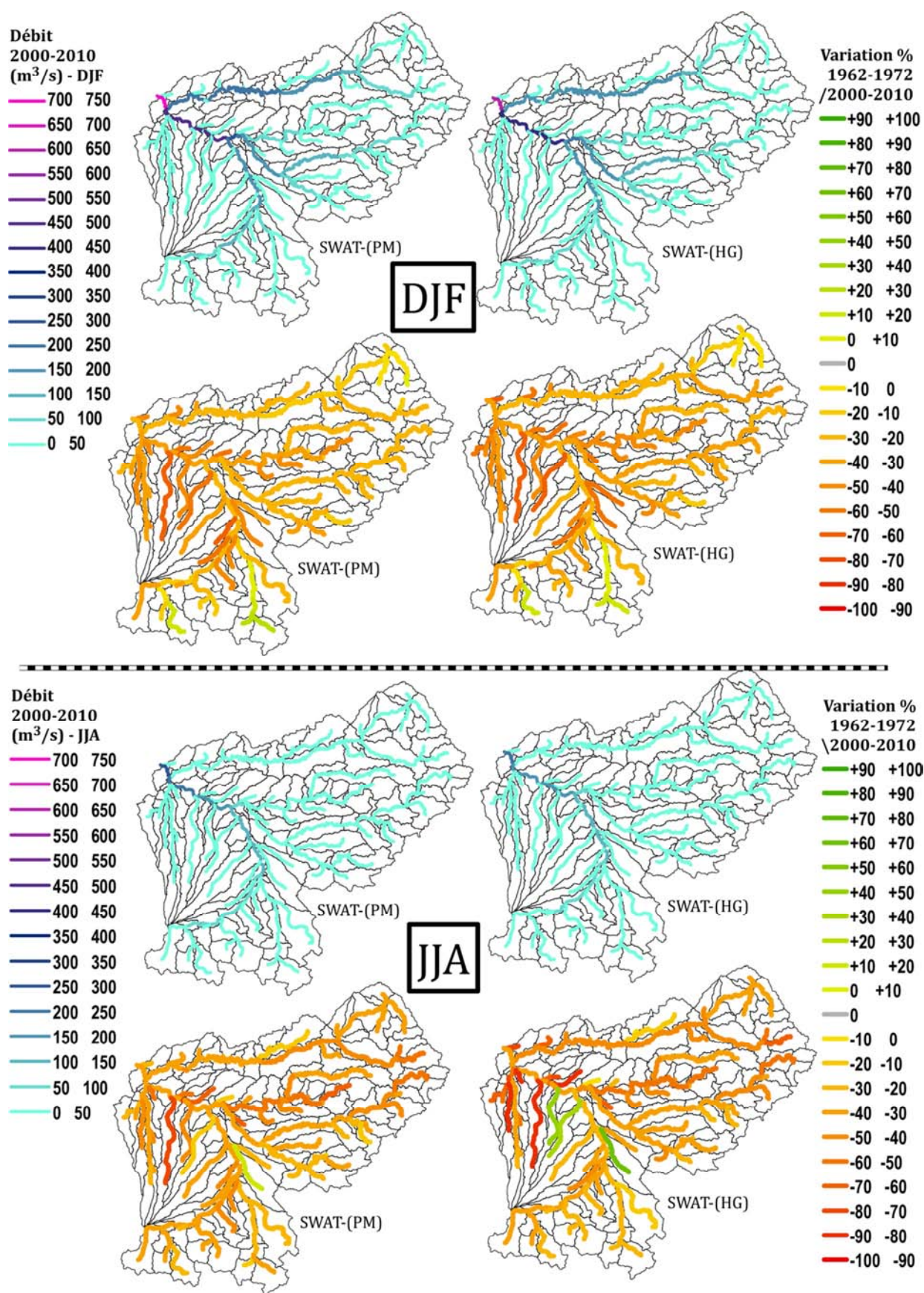


Figure IV.16 : Débit, moyennes mensuelles saisonnières spatialisées sur la période 2000 - 2010 et variation entre les périodes 1962-1972 et 2000-2010. (DJF = décembre ; janvier ; février et JJA = juin ; juillet ; août)

Dans la même logique, les variations de volume que ce flux a connu entre les décennies 1962-1972 et 2000-2010 peuvent être rapprochées de celle de la teneur en eau de sols (Figure IV.12) : certains bassins montagneux présentant une augmentation de l'eau dans les sols présentent aussi une augmentation du flux de subsurface. Mais cette explication ne peut être la seule puisque certains bassins présentant une augmentation de l'eau des sols peuvent être également sujets à une diminution des flux de subsurface.

L'explication de cette analyse contradictoire, il faut la chercher à une échelle de temps plus fine qui n'est pas discutée ici. En effet, pour qu'il y ait création de flux de subsurface, les sols doivent atteindre une certaine teneur en eau (fonction des caractéristiques pédologiques), mais la teneur en eau moyenne mensuelle d'un sous-bassin versant peut augmenter alors que le nombre d'épisodes où la teneur en eau est suffisante pour créer un flux de subsurface diminue.

La diminution de ces flux d'eau de surface mène à une baisse généralisée des débits du bassin versant (Figure IV.16). En effet, le volume des débits étant principalement lié à la contribution des flux de ruissellement et de subsurface, cette baisse est cohérente avec les analyses précédentes.

Par ailleurs, sur l'ensemble de ces comparaisons, on observe que les deux versions du modèle ne semblent pas montrer de dissimilitudes importantes de la répartition spatiale de ces flux d'eau bleue de surface.

4.2.2. Stocks d'eau bleue

Le stock de neige est l'une des composantes hydrologiques pour laquelle l'analyse spatiale est la plus évidente. En effet, si des chutes de neige peuvent survenir en hiver sur presque l'ensemble du bassin versant, les seuls stocks de neige conséquents qui perdurent se situent dans les zones de moyenne et haute altitude. C'est également ce que montre la Figure IV.17 pour la période 2000-2010, avec des stocks de neige principalement situés sur les reliefs pyrénéens et dans une moindre mesure sur le Massif central. De manière logique, ces derniers sont quasi absents de l'ensemble du bassin versant pendant la période estivale.

Les volumes stockés en hiver dans les Pyrénées ont cependant connu une forte variation depuis les années 1962-1972. L'un des sous-bassins montre une diminution

de l'ordre de 50 % au cours des 40 dernières années, mais on sait aussi que la variable de stock de neige est l'une des plus sensibles à la période de calibration utilisée (voir Chapitre 6). Les diminutions simulées sur les autres sous-bassins, de l'ordre de -40 à -60 mm semblent plus en accord avec les chiffres trouvés dans la littérature (López-Moreno, 2005; Miquel, 2012). Une tendance similaire apparaît au niveau des sous-bassins enneigés du Massif central. Les variations sur le reste du bassin versant sont marginales, et ne concernent que des stocks minimales de neige qui ne perdurent pas dans le temps et n'ont pas de réel effet sur le fonctionnement hydrologique du territoire.

En été, les stocks étant inexistantes sur la majorité du bassin versant, cela conduit à une variation nulle entre les deux époques. Les variations dans les territoires de montagne sont la conséquence de rares chutes de neige en haute altitude pendant l'été créant des stocks éphémères de neige. Cela représente cependant un faible nombre d'événements limités dans le temps et dans l'espace, n'ayant pas non plus d'impact majeur sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant. Il est aussi important de rappeler, qu'à travers le soin apporté à la modélisation de la neige dans la calibration de la neige, une légère tendance à surestimer les stocks de neige à la fin de la période de fonte (mai-juin) et en altitude a été mise en évidence ce qui peut aussi provoquer une légère surestimation de ces stocks de neige au début de l'été.

La Figure IV.18 montre la répartition du stock d'eau bleue contenu dans l'aquifère du bassin versant. L'étude globale de la répartition sur la période 2000-2010 nous apprend que les stocks d'eau sont plus importants dans les zones aval ce qui est assez consistant avec la répartition des zones aquifères du bassin versant. Cette répartition est cependant plus marquée sur les simulations produites à partir de la version SWAT-(PM).

L'étude des deltas obtenus par comparaison des deux décennies montre des variations relativement anecdotiques par rapport au volume contenu dans les aquifères.

Cette constatation est en accord avec les conclusions de la section 3.2 à l'échelle du bassin versant, à savoir que le taux de variation du stock d'eau dans l'aquifère est relativement faible, même si une faible tendance à la diminution existe.

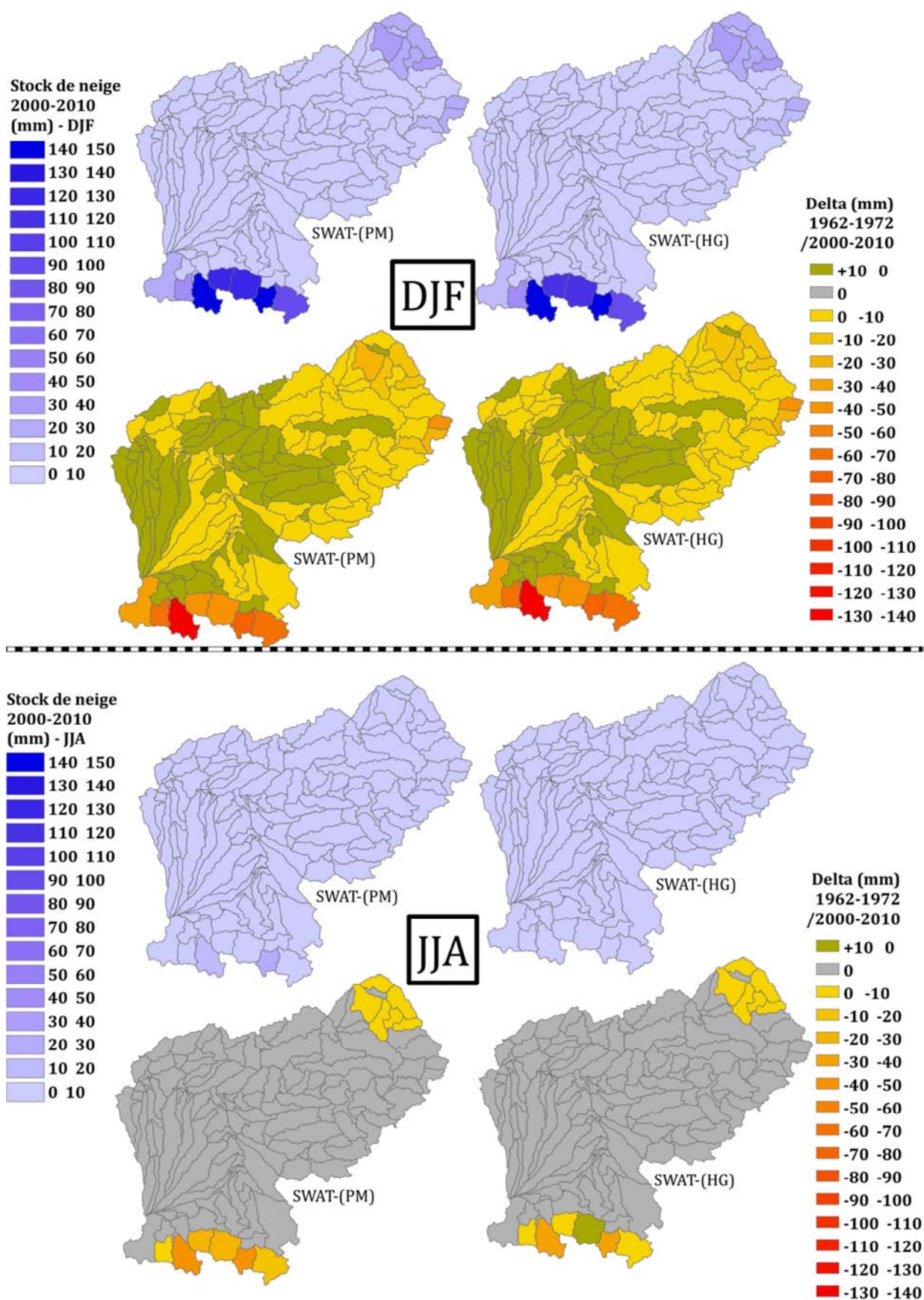


Figure IV.17 : Stock de neige, moyennes mensuelles saisonnières spatialisées sur la période 2000 - 2010 et variation entre les périodes 1962-1972 et 2000-2010. (DJF = décembre ; janvier ; février et JJA = juin ; juillet ; août)

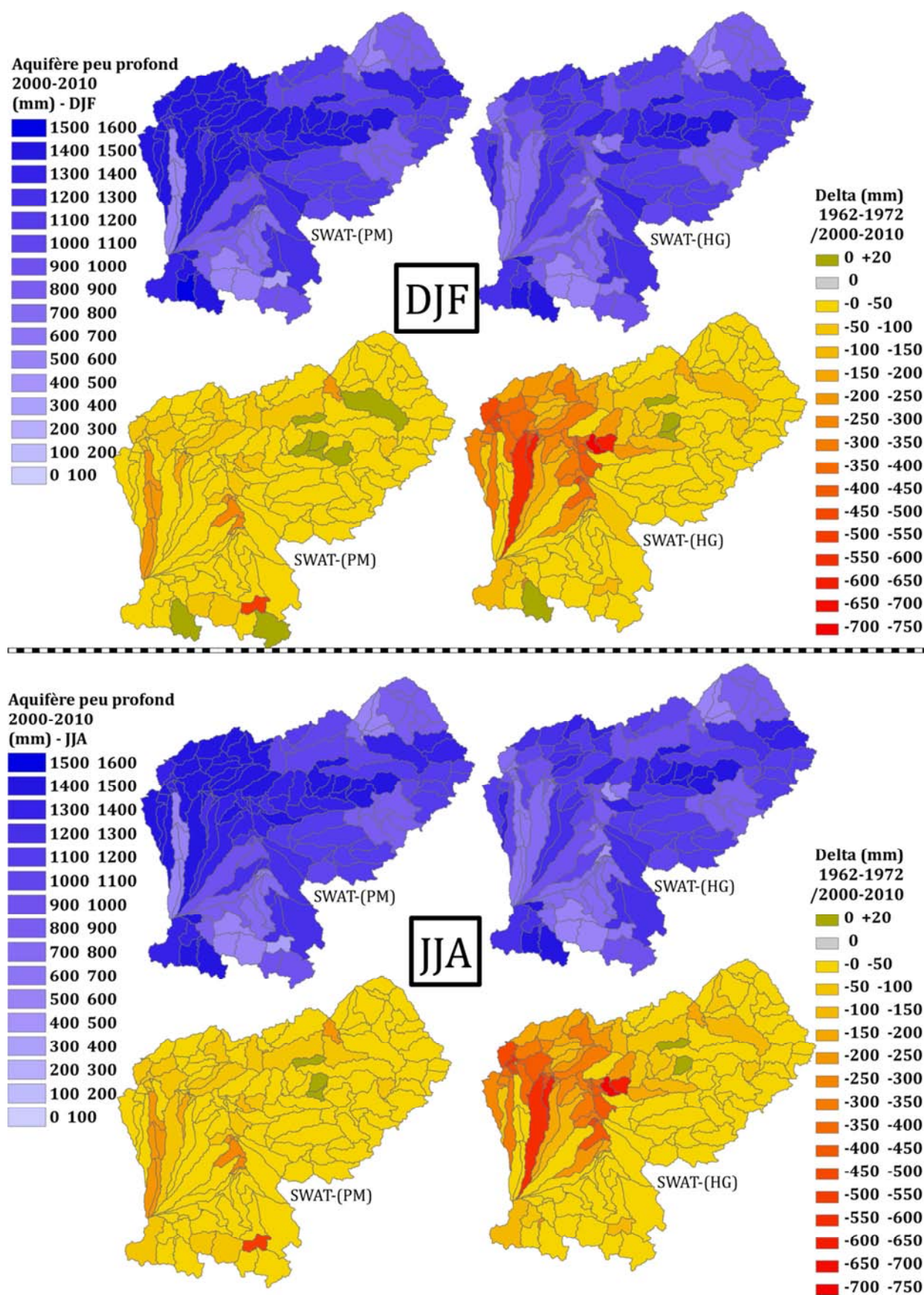


Figure IV.18 : Stock d'eau de l'aquifère peu profond, moyennes mensuelles saisonnières spatialisées sur la période 2000 - 2010 et variation entre les périodes 1962-1972 et 2000-2010. (DJF = décembre ; janvier ; février et JJA = juin ; juillet ; août)

4.2.3. Flux d'eau bleue souterrains

On peut voir sur la Figure IV.19 la forte saisonnalité du phénomène de recharge des nappes, beaucoup plus importante en hiver que pendant l'été. Cette recharge est conditionnée par la teneur en eau des sols et donc par l'infiltration. En comparant les Figures IV.14 et IV.19, il est facile d'observer la relation entre l'infiltration et la recharge de la nappe. Cette dernière étant plus marquée en altitude où les précipitations augmentent et l'ET diminue. En hiver, ce phénomène est accentué dans les mêmes zones par la présence de la neige qui favorise également l'infiltration.

La présence en été d'un sous-bassin pyrénéen ayant une très forte recharge est probablement une surestimation due au gradient de précipitations qui a été introduit pour la simulation des stocks de neige hivernaux. En outre, l'une des limites de SWAT est de ne simuler la recharge que par l'infiltration des précipitations. Or, dans la plaine de la moyenne Garonne, les épisodes de crue de la fin du printemps et du début de l'été, notamment aux mois de mai-juin, participent également à ce phénomène (Sun, 2015). Les valeurs montrées sur la Figure IV.19 dans cette zone devraient donc être supérieures à celle simulée.

Les deltas calculés en période hivernale ne montrent qu'aucune des zones du bassin ne présente de comportement plus marqué qu'une autre : une diminution quasi généralisée de la recharge de la nappe est à relever avec quelques exceptions en altitude, où une légère augmentation de la recharge apparaît.

En été, des comportements plus contrastés apparaissent sur le bassin versant, avec des augmentations dans les plaines et le long de la moyenne Garonne. Les fortes diminutions de la recharge se concentrant dans les sous-bassins d'altitude.

Enfin, la Figure IV.20 montre le transfert d'eau de la nappe vers la rivière. La répartition de ce flux sur la période hivernale semble assez bonne : une plus grande participation importante des aquifères au débit de surface est mise en évidence en zone de montagne. Cela est consistant avec la présence de neige qui provoque l'augmentation de l'infiltration et la diminution du ruissellement : le parcours de l'eau passe par la nappe. De même, un faible transfert dans la plaine où les débits sont élevés en période hivernale, ce qui a pour conséquence de diminuer les transferts naturels d'eau de la nappe vers les rivières.

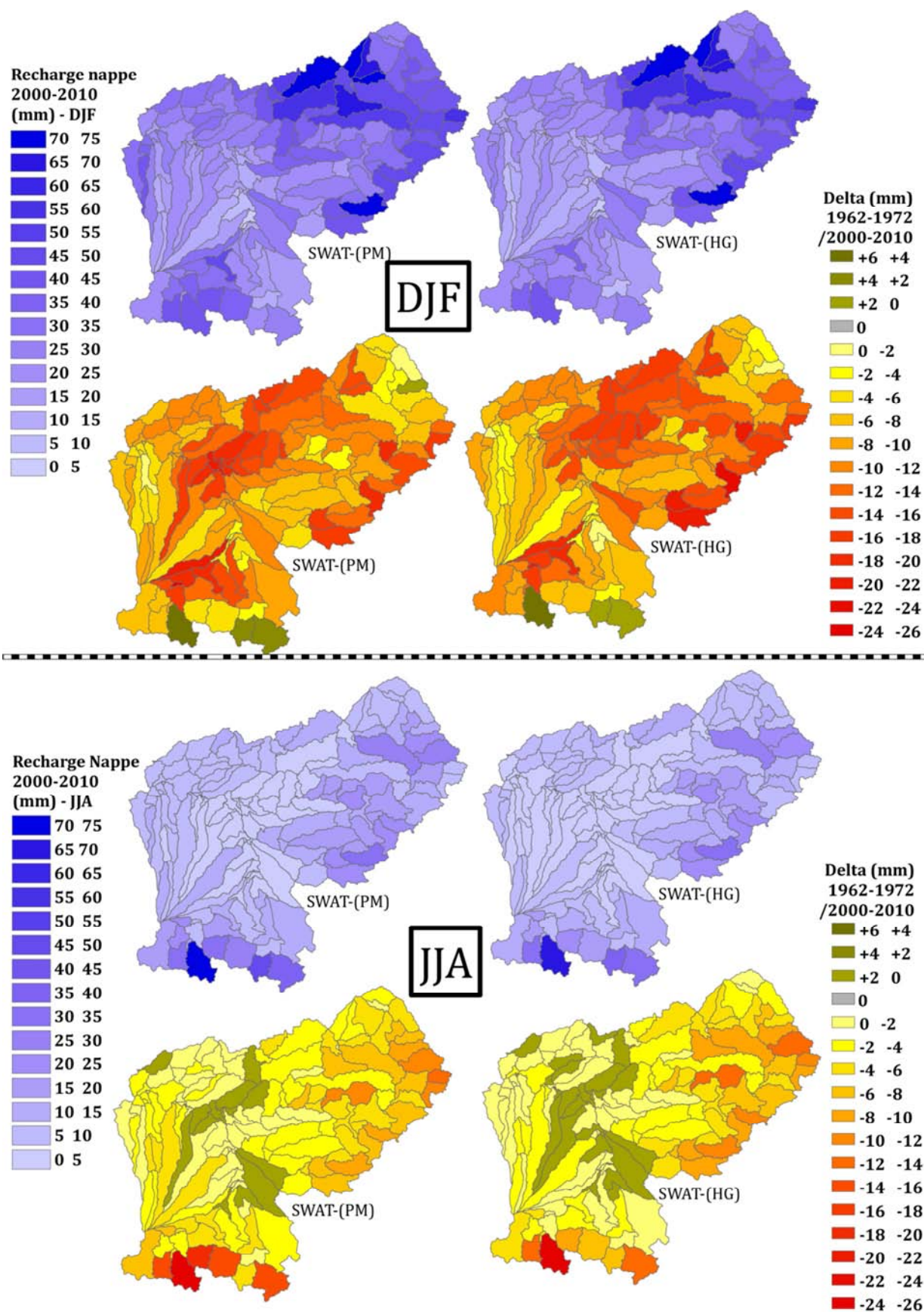


Figure IV.19 : Recharge de l'aquifère, moyennes mensuelles saisonnières spatialisées sur la période 2000 - 2010 et variation entre les périodes 1962-1972 et 2000-2010. (DJF = décembre ; janvier ; février et JJA = juin ; juillet ; août)

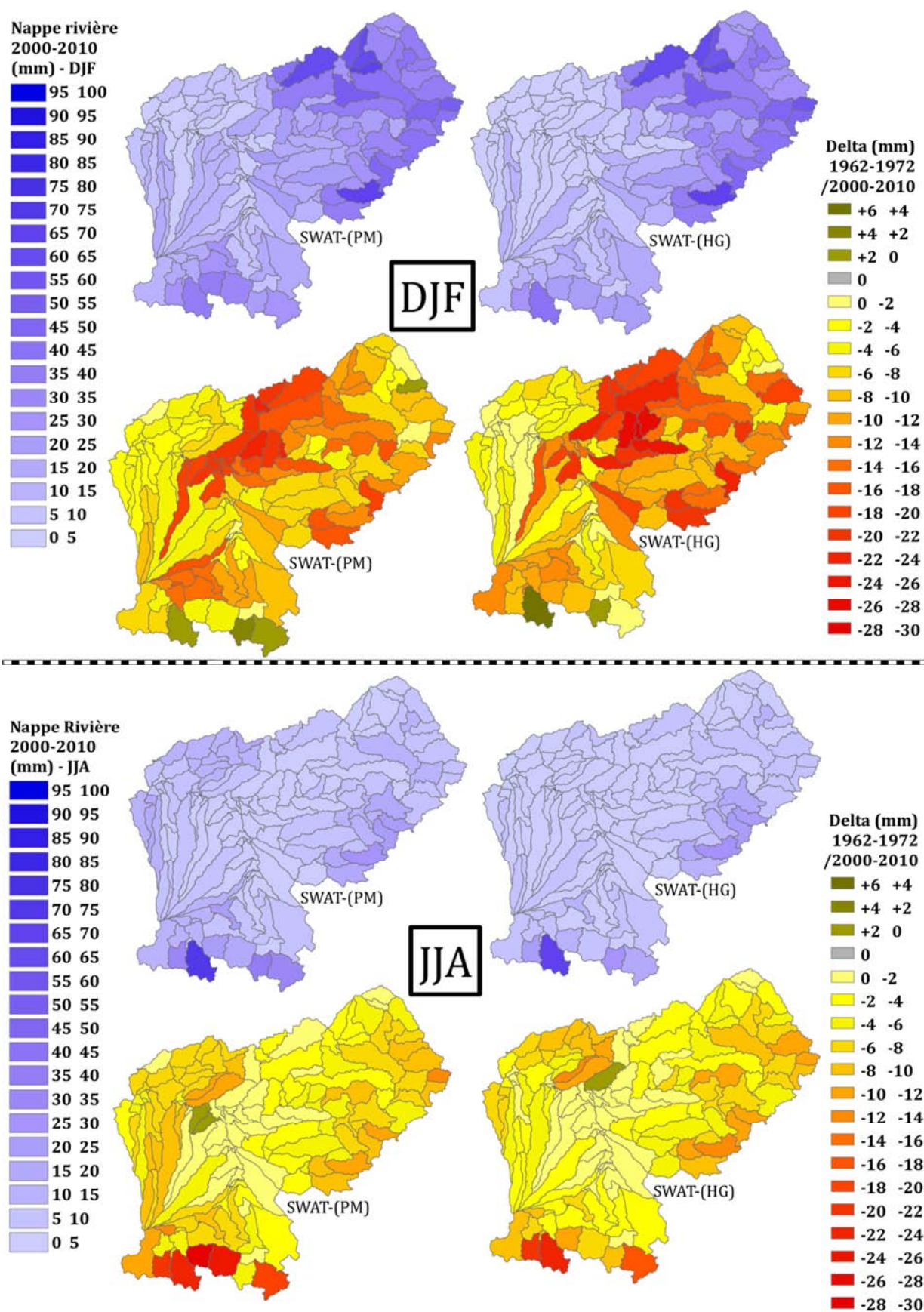


Figure IV.20 : Flux nappe-rivière, moyennes mensuelles saisonnières spatialisées sur la période 2000 - 2010 et variation entre les périodes 1962-1972 et 2000-2010. (DJF = décembre ; janvier ; février et JJA = juin ; juillet ; août)

Pendant la période estivale en revanche, les flux de la nappe vers la rivière devraient être plus importants, car en période d'étiage, une part importante des débits du réseau hydrographique de la plaine devrait provenir de ces transferts et ce comportement ne semble pas apparaître dans les simulations réalisées. L'analyse de cette figure pour la période 2000-2010, nous permet donc de mettre à jour l'une des limites de l'analyse saisonnière spatialisée de la modélisation mise en place.

Les variations mises en évidence sont également nettement négatives sur l'ensemble du bassin versant. Une plus forte baisse est à noter en période hivernale, baisse qui semble en relation directe avec la baisse de la recharge de la nappe.

5. Conclusion

Le travail réalisé dans ce chapitre nous a permis d'analyser en détail les simulations à des échelles spatiales différentes, sur les périodes de calibration et de validation couvrant un intervalle d'un peu plus de 40 ans.

Dans un premier temps, l'analyse des performances globales du modèle hydrologique SWAT a été réalisée en se basant sur la simulation des débits à différents endroits du bassin versant. Ces performances se sont révélées globalement bonnes à très bonnes, avec cependant une faiblesse à la simulation des débits d'étiage.

Dans un second temps, les différents flux et stocks composant le cycle hydrologique simulé par le modèle ont été analysés à différentes échelles spatiales et temporelles. Des tendances ont pu être mises à jour pour chacune de ces dimensions :

- La demande évapotranspiratoire est à la hausse sur l'ensemble du bassin versant. Cette hausse se traduit par une hausse de l'ET effective sur l'ensemble de la saison d'hiver alors qu'en été, à cause de l'augmentation généralisée de l'ET sur le reste de l'année, les volumes effectivement évapotranspirés dans les plaines de la moyenne Garonne sont plutôt en baisse, marqueur d'une augmentation des périodes de sécheresse pédologiques.
- La teneur en eau de sol, qui est fortement liée à l'évapotranspiration connaît également, à quelques exceptions près, une diminution notable sur l'ensemble du bassin versant.

- Les flux d'eau, écoulee et infiltrée, sont eux aussi en baisse, mais cette dernière, beaucoup plus marquée en hiver qu'en été, semble résulter principalement des variations de pluviométrie qui ont pu être mises en évidence dans la littérature. Cette baisse mène par suite à une baisse généralisée des débits sur le bassin versant.
- L'impact sur les stocks d'eau bleue se limite à une baisse substantielle de la neige pendant la saison hivernale, alors que les stocks d'eau des aquifères apparaissent comme relativement peu impactés sur les 50 dernières années, toute saison confondue et sur l'ensemble du bassin versant.
- Les flux d'eau souterrains sont également en baisse sur l'ensemble du bassin versant, mais une baisse beaucoup plus marquée en hiver qu'en été où une tendance claire est plus dure à mettre en évidence.

L'ensemble de cette analyse nous a permis également de mieux connaître les atouts et les faiblesses de la modélisation mise en place sur le bassin versant de la Garonne.

Les comparaisons avec d'autres données de simulation, à l'échelle annuelle et sur l'ensemble du territoire, nous ont montrées que la simulation réalisée avec SWAT est cohérente avec d'autres travaux réalisés sur le même bassin versant.

Deux versions différentes du modèle utilisant respectivement Penman-Monteith et Hargreaves ont été utilisées et comparées tout au long de cette analyse. La conclusion de cette comparaison est qu'aucune disparité très marquée entre les deux versions n'a pu être relevée, que ce soit sur les tendances ou la répartition spatiale.

Les simulations de l'ensemble du cycle hydrologique par le modèle sont cohérentes dans leur ensemble et présentent des résultats en accord avec les caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant.

Deux faiblesses du modèle sont cependant à relever : une légère sous-estimation de la recharge de la nappe dans la zone de plaine causée par l'absence de prise en compte des recharges par les épisodes de crue dans la plaine alluviale, mais surtout un transfert d'eau de la nappe vers la rivière, qui est très sous-estimé dans ces mêmes zones, pendant la saison estivale.

Malgré ces faiblesses, ce chapitre nous a permis d'établir une robustesse certaine de la simulation du cycle hydrologique dans son ensemble sur le bassin versant de la Garonne.

Enfin, une non-stationnarité du climat, également relevée dans la littérature a bien été constatée au niveau des données d'entrée du modèle. Cette non-stationnarité impact le cycle hydrologique, en influent plusieurs de ses composantes. Ces impacts représentent donc l'effet du changement du climat sur le cycle hydrologique depuis une cinquantaine d'années. Il est probable que cette influence du climat sur l'hydrologie se poursuive dans le futur. Pour vérifier cette hypothèse, le modèle SWAT mis en place peut être utilisé pour continuer l'analyse en contexte de projection.

Chapitre 8 : Projections hydrologiques des flux et stocks d'eau verte et d'eau bleue

Dans le chapitre précédent, la calibration et la validation du modèle ont permis d'effectuer une analyse du comportement hydrologique du bassin versant sur une période historique. Cette analyse a été réalisée à la fois de manière globale et annuelle et de manière spatialisée et saisonnière. Dans la suite de ce travail de recherche, le modèle sera donc utilisé avec des données de projection climatique, afin de réaliser des projections hydrologiques. La structure de l'analyse présentée dans ce chapitre est similaire à celle du chapitre précédent.

La dernière partie de ce travail de recherche est une exploration de l'impact potentiel induit par les changements climatiques sur le bassin versant de la Garonne.

Au total, ce sont 10 chaînes de modélisation qui ont été mises à contribution. Elles sont constituées de modèles climatiques régionaux (MCR) pilotés par des modèles climatiques globaux (MCG). Neuf d'entre elles sont utilisées pour faire tourner les versions SWAT-HG (calcul de l'ET à partir de la formule de Hargreaves) et 1 pour la version SWAT-PM (calcul de l'ET à partir de la formule de Penman-Monteith).

Dans la suite de ce chapitre, ces différentes chaînes seront désignées sous l'appellation de « modèles climatiques » lorsque cela se réfère uniquement à la partie de la chaîne permettant la production de données climatiques et de « modèles hydroclimatiques » pour désigner l'intégralité de la chaîne de modélisation permettant de produire des projections hydrologiques.

Rappelons que les données climatiques utilisées ici nous ont été livrées désagrégées sur la grille SAFRAN, après avoir été ajustées à ces mêmes données. Pour davantage de précisions sur les modèles et les corrections apportées pour chacun d'entre eux, le lecteur est invité de revoir Chapitre 1 section 3 de ce document.

Enfin, les deux versions du modèle SWAT (PM et HG) ont été utilisées en projection pour permettre d'exploiter au maximum les données climatiques disponibles. À la suite de l'analyse réalisée au chapitre précédent, où aucune différence substantielle n'avait été notée sur l'utilisation de ces deux versions, les résultats présentés dans la suite de ce chapitre sont les moyennes des simulations obtenues à partir des deux versions.

1. Comparaison sur la période de contrôle

Tous les modèles climatiques utilisés dans cette étude possèdent une réalisation sur une période de référence historique couvrant la période de 1971 à 2005. Pour éviter la confusion avec les travaux présentés dans le chapitre précédent (période historique), les réalisations passées des modèles climatiques seront désignées comme « période de contrôle ».

La première étape de l'utilisation des données fournies par ces modèles a donc été d'employer ces chroniques de contrôle pour comparer les différences de comportement du modèle SWAT, lorsqu'il est utilisé avec SAFRAN ou avec les modèles climatiques.

Comme dans le chapitre précédent, cette première appréhension globale du système hydroclimatique est réalisée à l'échelle du bassin versant et à un pas de temps annuel sur la période 1974-2005, après une période de trois ans d'initialisation des variables du modèle hydrologique SWAT.

La Figure IV.21 permet de comparer les différences en termes de précipitation annuelle, injectée dans le modèle SWAT par l'utilisation de chaque modèle climatique ou de la réanalyse SAFRAN. La première partie (**A**) de cette Figure IV.21 présente la fonction de répartition (CDF) des précipitations annuelles de chacun de ces jeux de donnée. Sans notion de répartition temporelle, cette figure permet d'appréhender la répartition des valeurs, entre la valeur maximum et la valeur minimum, sur la période considérée. La seconde partie (**B**) présente des boîtes à moustaches de la distribution des précipitations mensuelles moyennes de SAFRAN et de l'ensemble climatique, composé des 10 modèles climatiques utilisés. Une composante temporelle est cette fois introduite avec une analyse décennale en plus de l'analyse de la période de contrôle dans sa totalité ainsi que l'analyse des données sur la période hivernale (DJF) et estivale (JJA).

La Figure IV.21-A nous permet de voir que les distributions de la précipitation annuelle générée par les différents modèles climatiques correspondent à celle de SAFRAN pour une grande partie des quantiles des différentes distributions considérées. On observe que les valeurs issues de SAFRAN se trouvent contenues dans l'amplitude de la distribution de l'ensemble pour les valeurs allant de 10 à 85% des distributions. On note cependant que pour les quantiles supérieurs à 85%, que les données SAFRAN présentent des valeurs plutôt basses, une part importante de l'ensemble climatique présentant des valeurs substantiellement plus élevées. Cela nous permet de voir que les données issues de l'ensemble climatique semblent surestimer les valeurs extrêmes de précipitations.

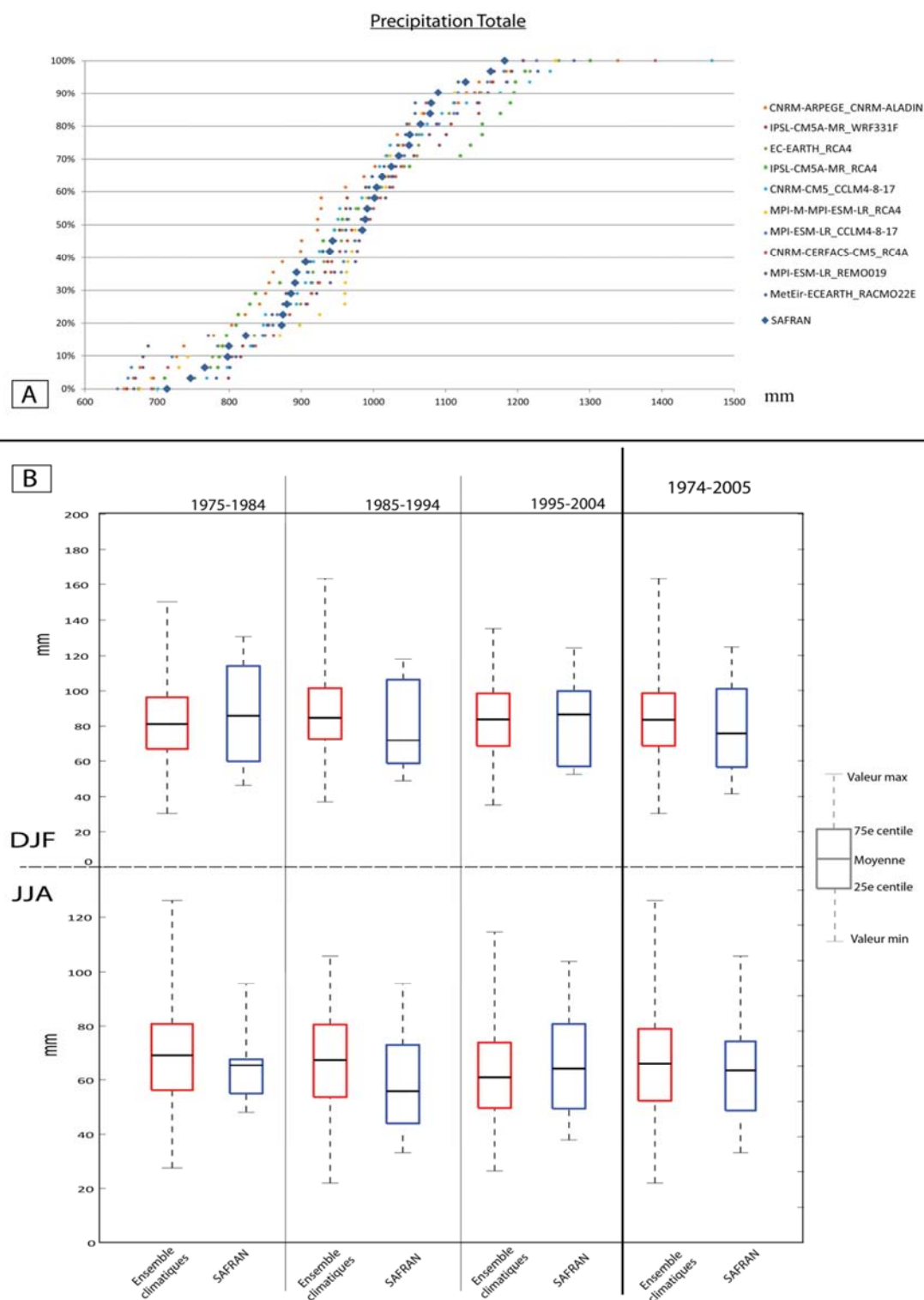


Figure IV.21 : Précipitation (solide et liquide) sur la période 1974-2005 et pour trois sous-périodes décennales. **(A)** Fonction de répartition des précipitations annuelles moyennes, sur l'ensemble de la période **(B)** Boîte à moustaches des précipitation mensuelle moyenne pour les mois de décembre, janvier et février (DJF) et juin, juillet et août (JJA) sur l'ensemble de la période de contrôle 1974-2005 et pour trois sous-périodes décennales

Cette observation s'applique également à l'inverse pour les valeurs faibles du décile inférieur des distributions.

Il est intéressant de rappeler que les séries de la majorité de ces modèles ont été corrigées par la technique CDF-t à partir des données SAFRAN, il est donc cohérent que les fonctions de répartition des différentes distributions soient similaires. Seul le modèle *CNRM-ARPEGE_CNRM-ALADIN* a été corrigé avec une autre méthode (Quantile-Quantile), et l'on peut noter une distribution ayant des valeurs légèrement inférieures pour les premiers 50% par rapport au reste de l'ensemble. Il en ressort cependant que les données d'entrées obtenues grâce aux modèles climatiques sont globalement cohérentes avec celle de la réanalyse SAFRAN.

Cette analyse est confirmée par l'analyse de la Figure IV.1-B. On y observe que la précipitation mensuelle moyenne de SAFRAN semble en accord avec celle de l'ensemble climatique si l'on considère la moyenne de distribution. Cela est particulièrement vrai pour deux des sous-périodes décennales : 1975-1984 et 1995-2004. Seule la sous-période 1985-1994 semble être plus difficilement représentée par l'ensemble des modèles climatiques, avec une précipitation mensuelle moyenne plus élevée que celle de SAFRAN. Il faut toutefois admettre qu'une période de 10 années est un peu courte pour comparer des climatologies. Néanmoins, la comparaison des distributions et des moyennes lorsqu'elles sont calculées sur l'ensemble de la période (1974-2005) nous montre que les deux distributions sont très semblables, quel que soit la saison considérée.

Une autre observation pouvant être faite à partir de la Figure IV.21-B, est que la distribution issue de l'ensemble des modèles climatiques possède une amplitude plus grande que celle observée sur le produit SAFRAN. Cela vient confirmer l'analyse de la Figure IV.21-A qui a mis en évidence des valeurs extrêmes minimum et maximum, plus importantes avec l'ensemble climatique, qu'elles ne le sont dans SAFRAN.

La Figure IV.22, de la même manière que la Figure IV.21 illustre la répartition des distributions pour les températures moyennes journalières de la période de contrôle

On observe grâce à la Figure IV.22-A que SAFRAN est bien inclus dans la distribution représentée par l'ensemble climatique même s'il se situe plutôt dans les valeurs hautes de cette distribution.

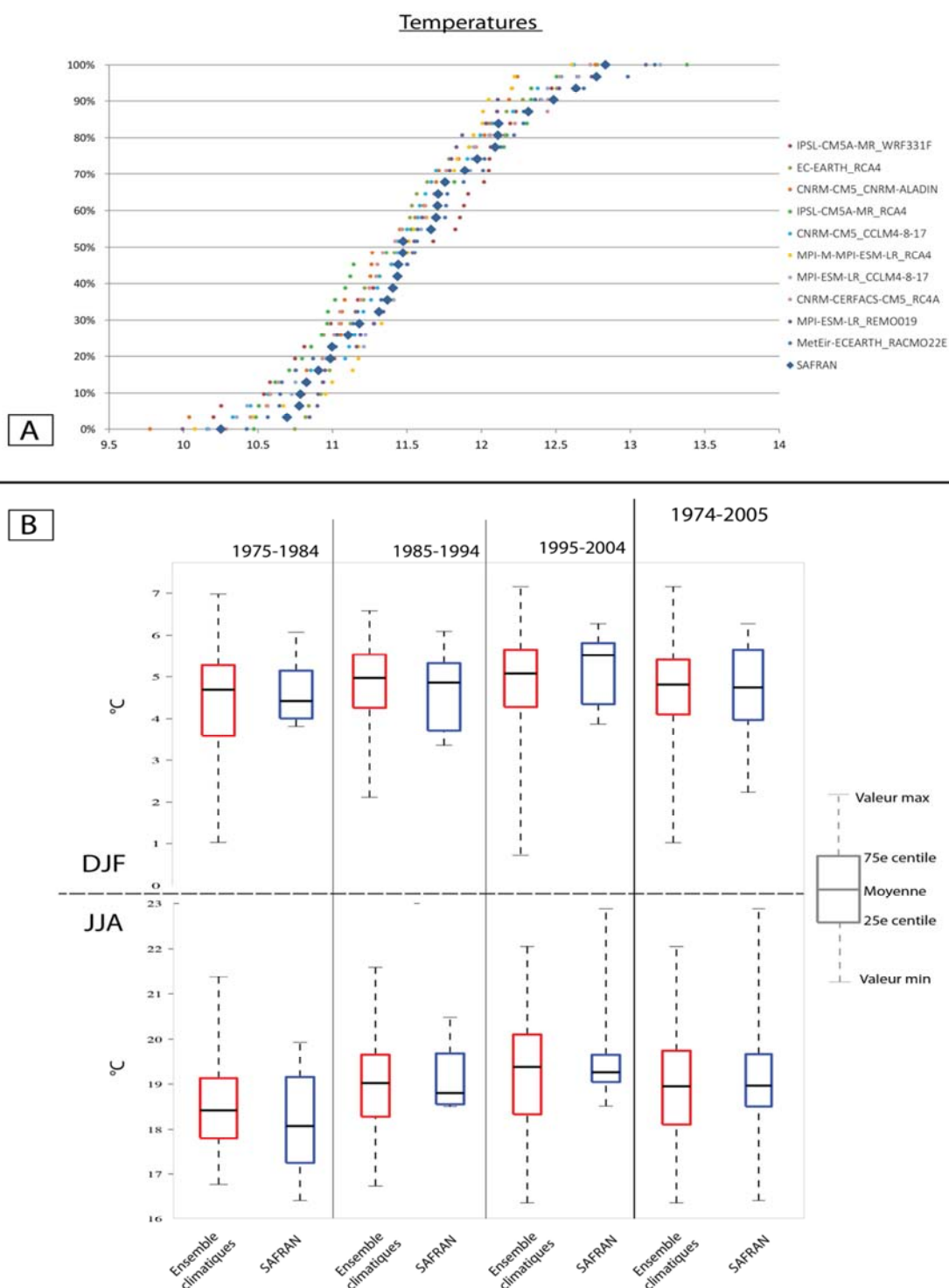


Figure IV.22 : Température journalière moyenne sur la période 1974-2005 et pour trois sous-périodes décennales. (A) Fonction de répartition des températures journalières moyennes, sur l'ensemble de la période, pour chacun des jeux de données. (B) Boîte à moustache des températures journalières moyennes pour les mois de décembre, janvier et février (DJF) et juin, juillet et août (JJA) sur l'ensemble de la période de contrôle 1974-2005 et pour trois sous-périodes décennales.

. Si l'amplitude des températures issues de l'ensemble climatique apparaît également en Figure IV.22-B comme plus importante que celle de SAFRAN, les différentes distributions de température ressortent comme étant relativement semblables,

particulièrement à la comparaison des moyennes. Comme pour les précipitations, cela est d'autant plus vrai lorsque l'on considère la période de contrôle dans son ensemble.

On peut également souligner une évolution des températures en période estivale (JJA) du produit SAFRAN qui semble plus important au fil des décennies, avec une augmentation de la moyenne et des extrêmes plus marquée que celle qui est obtenue avec les données des modèles climatiques. Les températures hivernales (DJF) apparaissent en légère augmentation également, mais cette augmentation semble être représentée de la même façon par les deux jeux de données.

Toutes les séries de données climatiques, dont les distributions sont présentées sur les Figures IV.21-A et IV.22-A, ont été utilisées pour faire tourner le modèle hydrologique SWAT, dernier maillon de la chaîne hydroclimatique

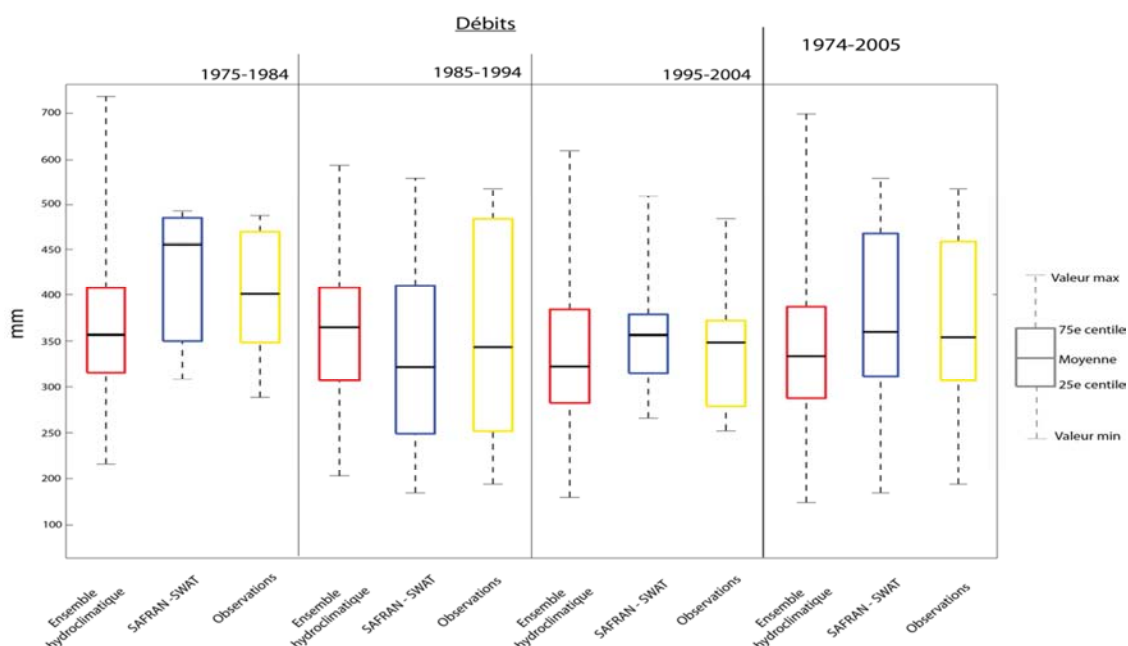


Figure IV.23 : Débits moyens annuels simulés à Tonneins (exutoire) en sortie du modèle SWAT pour chaque jeu de données météorologiques disponibles (Ensemble climatique et SAFRAN) sur la période 1974-2005 et sur trois sous-périodes décennales.

La Figure IV.23 permet la comparaison entre les débits moyens annuels à Tonneins simulés en sortie de chacune de ces chaînes de modélisation sur la période de contrôle, qui sont également comparées aux mesures *in situ* de débit.

On peut y voir que la simulation des débits annuels moyens semble relativement concordante entre les trois jeux de données que sont l'ensemble des modèles hydroclimatiques, la chaîne SAFRAN-SWAT et les données observées. Si l'on regarde

les sous-périodes décennales, la moyenne des distributions semble similaire, particulièrement pour les sous-périodes 1985-2004 et 1995-2004.

La sous-période 1975-1984 apparaît comme ayant une plus grande dissimilarité entre les moyennes de chacun des deux jeux de données simulés. Néanmoins, les moyennes des débits moyens annuels simulés à partir des modèles hydroclimatiques et de la chaîne SAFRAN-SWAT viennent encadrer la moyenne des débits annuels observés.

Si l'on considère, la période de contrôle dans sa globalité (1972-2005), cela nous permet de mettre en évidence des résultats de simulations très similaires en termes de débit annuel moyen.

On voit également que la distribution de débit obtenue par l'utilisation des modèles climatiques est beaucoup plus large que celle obtenue avec SAFRAN ou que les débits observés. Cela est particulièrement vrai pour les hauts débits, avec des valeurs extrêmes beaucoup plus importantes issues des simulations des chaînes hydroclimatiques. Cette analyse est la conséquence logique de celle réalisée sur les distributions des précipitations où les modèles climatiques semblaient produire des valeurs extrêmes plus marquées que celle de la distribution SAFRAN.

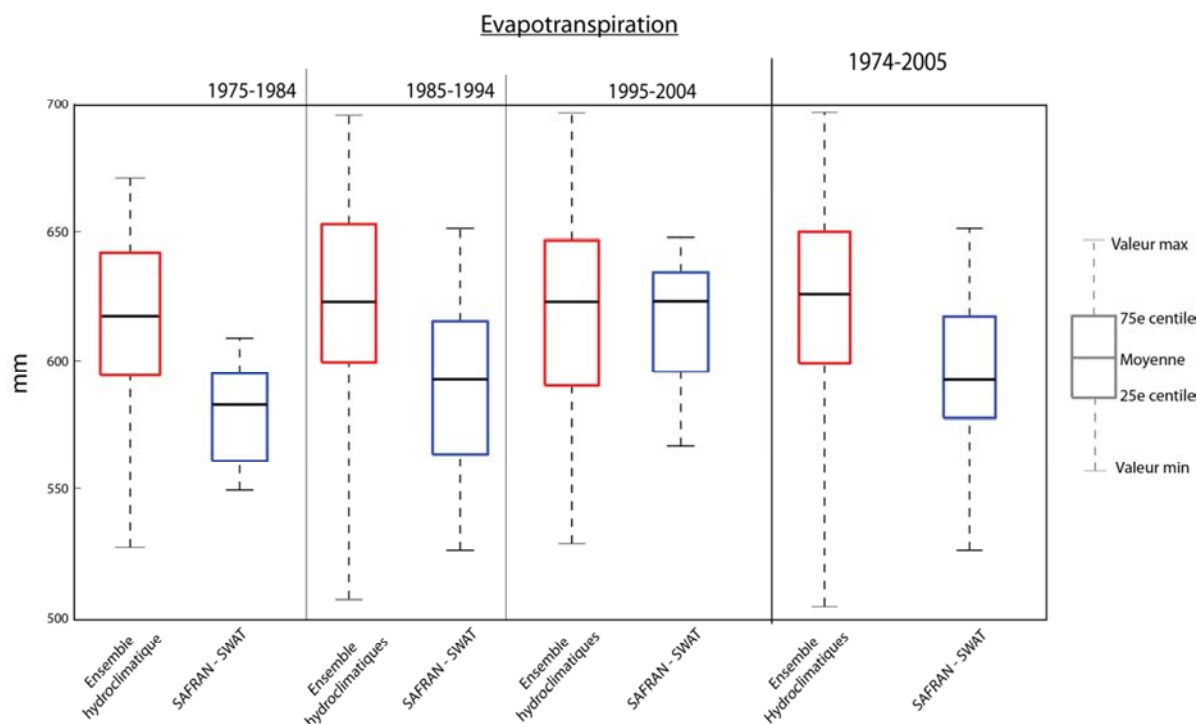


Figure IV.24 : ET obtenue en sortie du modèle SWAT pour chaque jeu de données météorologiques disponibles (modèles climatiques et SAFRAN) sur la période 1974-2005 et sur trois sous-périodes décennales.

Sur la Figure IV.24 qui illustre la comparaison des flux d'ET simulés à partir des différents jeux de données climatiques, apparaît cette fois une différence plus importante entre les distributions d'ET annuelles simulées par les chaînes hydroclimatiques et SAFRAN-SWAT, que celles détectées sur les distributions des précipitations et des débits. Seules les simulations réalisées sur la sous-période 1995-2004 semblent présenter des distributions et des valeurs moyennes semblables.

Comme pour les débits, on voit se répercuter les valeurs extrêmes de température observée sur la Figure IV.22 sur les distributions d'ET produite par les chaînes hydroclimatiques.

L'analyse décennale de la Figure IV.24 nous permet en outre de mettre en évidence la relative stabilité de la simulation d'ET par les modèles hydroclimatiques sur la période de contrôle, stabilité qui se retrouve aussi, dans une moindre mesure, sur la Figure IV.23 pour les débits.

Au contraire, si l'on regarde les séries simulées par SAFRAN-SWAT sur ces mêmes deux figures, apparaissent des variations décennales relativement claires à savoir une diminution des débits et une augmentation de l'évapotranspiration, tel que cela a été mis en évidence dans le chapitre précédent.

Pour confirmer cette analyse, des tests de tendances et de significativité ont été réalisés sur les séries simulées par les différents modèles hydroclimatiques. Les résultats de ces tests sont présentés dans le Tableau IV.7.

Si l'on regarde les tendances globales obtenues par l'utilisation de données issues de modèles climatiques, on voit que ces dernières se révèlent peu significatives, en comparaison de celles obtenues par l'utilisation des données SAFRAN ou celles relevées pour les observations. Cela est cohérent avec les observations faites sur les évolutions décennales réalisées à partir des analyses des distributions sur les Figures IV.21 à IV.24. On observe également une assez grande disparité entre les résultats obtenus pour chaque modèle climatique.

Ces deux observations permettent de mettre en évidence les incertitudes inhérentes à l'utilisation des modèles climatiques que sont : i) l'incertitude stochastique c'est-à-dire l'incertitude liée à la variabilité naturelle du climat qu'il est impossible de représenter et

qui et elle-même très liée aux conditions initiales des modèles. ii) l'incertitude qui est due au fonctionnement intrinsèque des modèles et à leurs limites à représenter le fonctionnement des systèmes climatiques. Ces incertitudes doivent être prises en compte dans la comparaison avec SAFRAN.

Tableau IV.7 : Test de Mann-Kendall et pente de Sen des entrées et sorties du modèle SWAT pour chaque jeu de données météorologiques disponibles (modèles climatiques et SAFRAN) sur la période 1974-2005

	Précipitation totale			Température-DJF			Température-JJA			ET			Débit		
	Z (tendance)	P-values	Pente de Sen (mm.an ⁻¹)	Z (tendance)	P-values	Pente de Sen (°C.an ⁻¹)	Z (tendance)	P-values	Pente de Sen (°C.an ⁻¹)	Z (tendance)	P-values	Pente de Sen (mm.an ⁻¹)	Z (tendance)	P-values	Pente de Sen (mm.an ⁻¹)
CNRM-ARPEGE_CNRM-ALADIN	-	0.574	-1.76	+	0.274	0.02	+	0.021	0.04	+	0.489	0.38	-	0.394	-2.01
CNRM-CERFACS-CM5_RC4A	-	0.936	-0.38	+	0.701	0.01	+	0.078	0.04	+	0.910	0.07	-	0.469	-1.88
CNRM-CM5_CCLM4-8-17	+	0.810	0.94	-	0.854	-0.01	+	0.652	0.01	+	0.860	0.07	+	0.910	0.40
EC-EARTH_RCA4	-	0.760	-0.86	+	0.469	0.01	+	0.463	0.01	+	0.962	0.06	+	0.987	0.14
IPSL-CM5A-MR_RCA4	-	0.760	-1.15	+	0.143	0.03	+	0.309	0.03	-	0.489	-0.57	-	0.987	-0.17
IPSL-CM5A-MR_WRF331F	+	0.489	2.03	+	0.160	0.04	+	0.078	0.04	+	0.910	0.04	+	0.170	2.55
MPI-ESM-LR_CCLM4-8-17	-	0.026	-6.06	+	0.541	0.01	+	0.069	0.04	-	0.016	-1.54	-	0.033	-3.95
MPI-ESM-LR_REMO019	-	0.310	-3.13	+	0.876	0.00	+	0.283	0.02	+	0.109	1.22	-	0.136	-2.85
MPI-M-MPI-ESM-LR_RCA4	-	0.150	-2.92	+	0.371	0.02	+	0.174	0.03	-	0.191	-0.78	-	0.095	-2.78
MetEir-ECEARTH_RAC MO22E	+	0.885	0.57	+	0.039	0.04	+	0.043	0.05	+	0.053	1.14	-	0.987	0.00
SAFRAN	-	0.059	-2.37	+	0.300	0.01	+	0.0002	0.06	+	0.004	1.1	-	0.002	-3.2
Observation													-	0.006	-2.56

D'une manière générale, l'analyse sur la période de contrôle nous montre que l'utilisation des données climatiques nous permet de représenter le système hydroclimatique de manière convenable, particulièrement si l'on considère la période dans son ensemble (1972-2005). La principale différence dans la représentation de ce système réside dans les valeurs extrêmes de température et de précipitations, plus marquée dans les données issues des modèles climatiques, qui mènent de manière logique à une répercussion de ces valeurs extrêmes sur les distributions de débit et de l'évapotranspiration. L'étude décennale des distributions issue des simulations

produites nous montre néanmoins que les sorties des modèles hydroclimatiques semblent rendre compte de la variabilité du climat de manière moins marquée que SAFRAN n'avait permis de la faire dans le chapitre précédent.

2. Projections hydrologiques

Les différentes chaînes hydroclimatiques décrites précédemment ont donc été utilisées pour réaliser des projections hydrologiques.

La période 2010-2050 a été choisie pour la réalisation de cet exercice. Ce choix a été motivé par comparaison avec les données utilisées pour la réalisation de la première partie de ce travail de recherche. Ces dernières couvrent une période de longueur comparable similaire (1960-2010) pour laquelle le modèle hydrologique, calibré sur la période 2000-2010 et validé sur la période 1962-1999, est apparu stable et performant. L'utilisation de ce dernier sur une période projective de même durée a donc été privilégiée.

Deux scénarios RCP ont été considérés (RCP4.5 et RCP8.5) et pour chacun d'entre eux, un ensemble de 8 simulations climatiques a été utilisé : certains des 10 modèles climatiques disponibles n'ayant pas de réalisation pour les deux scénarios. Pour rappel, le scénario RCP4.5 représente une augmentation du forçage radiatif modéré, avec stabilisation après 2050 lorsque le scénario RCP8.5 représente la plus forte augmentation envisagée du forçage radiatif sans stabilisation. À l'heure de l'écriture de ce document, ces deux scénarios sont les seuls disponibles sur la grille SAFRAN à partir du projet EURO-CORDEX. (Revoir Chapitres 1 et 2 pour plus de détails sur les modèles et les scénarios).

2.1. Comparaison des deux scénarios

Dans un premier temps, une comparaison des deux scénarios utilisés peut être effectuée. Cette comparaison peut se faire de la même façon que dans la section précédente, en comparant les entrées météorologiques qui seront proposées au modèle SWAT par les différents ensembles climatiques. La Figure IV.25 présente la distribution des paramètres de température et de précipitations obtenus par chacun des scénarios RCP, par saison, pour la période de projection (2010-2050) et pour 4 sous-périodes décennales.

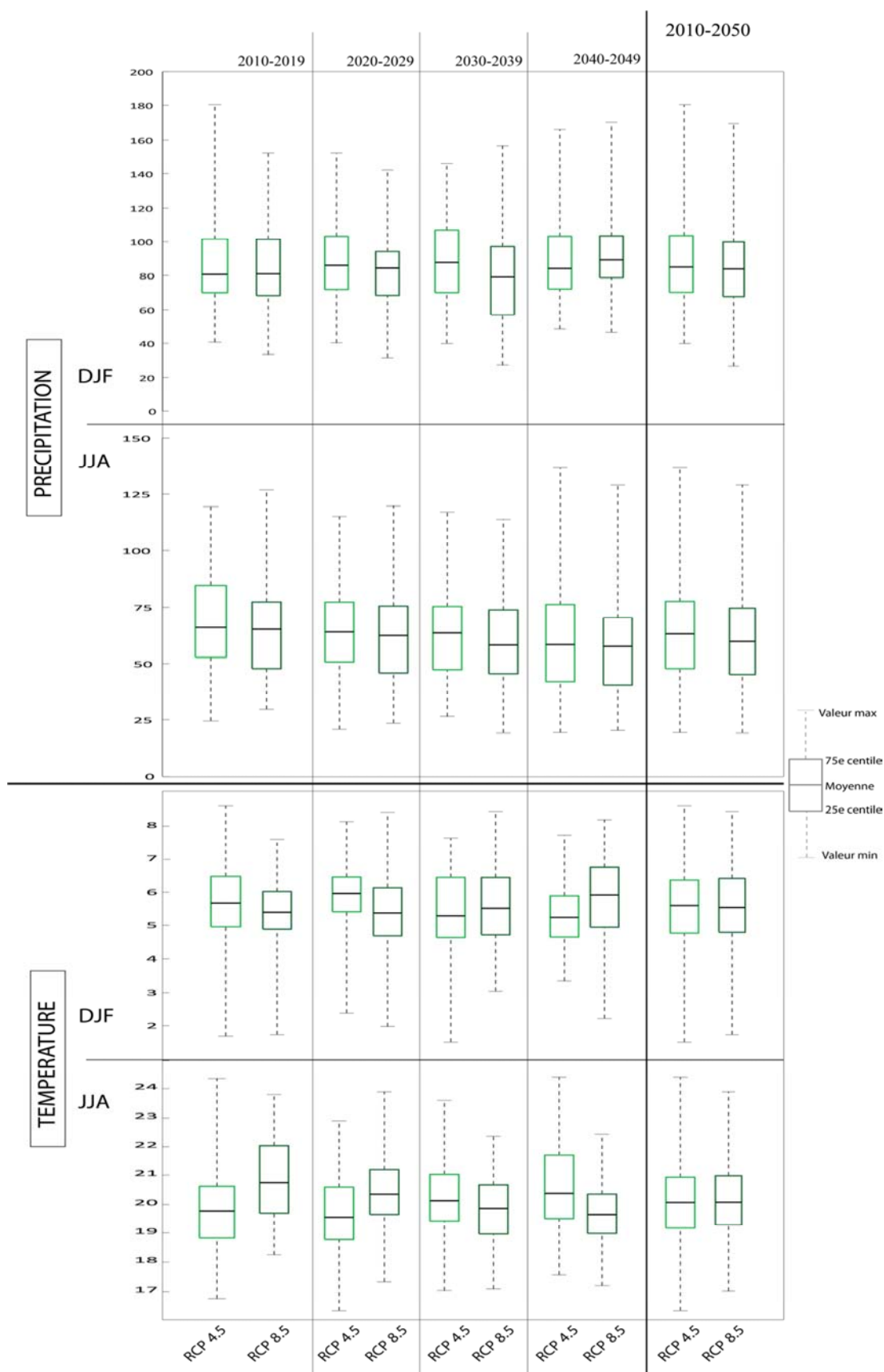


Figure IV.25 : Précipitation mensuelle moyenne et température journalière moyenne (pour les mois de décembre, janvier et février (DJF) et juin, juillet et août (JJA)). Moyenne des ensembles climatiques pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

La comparaison des deux scénarios permet de faire apparaître d'importantes similitudes entre les données climatiques produites à partir de chacun des scénarios considérés. Les 25% et 75% de la distribution, et plus encore les moyennes, présentent souvent des valeurs comparables. Cela est particulièrement vrai pour les précipitations. Pour les températures, on observe que les scénarios produisent tour à tour des températures légèrement plus élevées ou plus basses, il en résulte donc une très grande similarité si l'on considère la période dans son ensemble.

Cette observation est cohérente avec l'évolution des différents scénarios RCP dont la différenciation apparaît comme beaucoup plus marquée après les années 2050, ayant avant cela une augmentation du forçage radiatif assez similaire (Figure IV.26).

Cela est par ailleurs confirmé par les analyses des simulations produites par l'ensemble EURO-CORDEX en utilisant ces deux mêmes scénarios, à l'échelle de l'Europe (Jacob et al., 2014) et plus particulièrement à l'échelle de la France (Ouzeau et al., 2014) où de faibles différences sont observées entre les deux scénarios considérés, avant 2050.

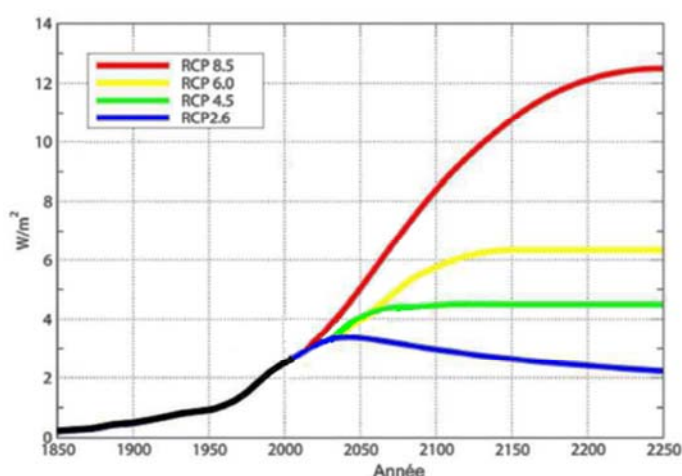


Figure IV.26 :

Évolution du forçage radiatif pour les quatre scénarios RCP existants. (D'après Ouzeau et al. (2014))

2.2. Tendances sur la période 2010-2050

Chacun des modèles climatiques a été utilisé pour faire tourner le modèle SWAT sur la période 2010-2050 (avec une période d'initialisation sur 2007-2009). Le Tableau IV.8 présente les tendances et les pentes obtenues par la réalisation de tests de Mann-Kendall et le calcul de la pente de Sen pour chaque composante du cycle hydrologique,

et pour chaque scénario. Ces tendances ont été calculées sur la moyenne des ensembles hydroclimatiques

Comme pour l'analyse sur la période de contrôle, on voit que les tendances mises à jour ont des significativités globalement peu élevées, présentant une baisse relativement généralisée des compartiments hydrologiques.

Cette diminution globale est cohérente avec les résultats obtenus à partir des données climatiques SAFRAN dans le chapitre 7 et représente une continuité des évolutions historiques.

Une exception importante est cependant à noter avec le flux d'ET qui était apparu en augmentation sur la période 1962-2010 alors qu'il est ici en baisse. Cette baisse se produit de manière contradictoire à une hausse significative des températures que ce soit en période estivale (JJA) ou hivernale (DJF). De plus, si l'on regarde le flux de « revap » (ET direct par remontée capillaire de l'aquifère) on voit que ce dernier est en augmentation, avec une significativité relativement élevée.

Tableau IV.8 : Test de Mann-Kendall et pente de Sen, réalisé sur la moyenne des ensembles hydroclimatiques de chaque scénario pour les différents flux et stocks annuels du cycle hydrologique simulés sur la période 2010-2050

	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Z (tendance)	P-values	Pente de Sen mm.an ⁻¹ (sauf Temp. °C.an ⁻¹)	Z (tendance)	P-values	Pente de Sen (mm.an ⁻¹) (sauf Temp. °C.an ⁻¹)
Précipitation	-	0.18	-1.32	-	0.27	-0.93
Température-DJF	+	<0.0001	0.041	+	0.013	0.014
Température-JJA	+	0.002	0.030	+	<0.0001	0.041
Débit	-	0.25	-0.82	-	0.63	-0.31
Évapotranspiration	-	0.07	-0.32	-	0.02	-0.48
--- dont Revap	+	0.08	0.02	+	0.01	0.07
Teneur en eau du sol	-	0.003	-0.15	-	0.01	-0.13
ETP	+	0.01	0.80	+	< 0.0001	1.27
Infiltration	-	0.16	-1.02	-	0.18	-1.01
Ruissellement	-	0.51	-0.12	-	0.81	-0.07
Subsurface	-	0.12	-0.11	-	0.40	-0.07
Stock de neige	-	0.003	-0.19	-	0.02	-0.17
Aquifère peu profond	-	0.33	-0.14	-	0.21	-0.34
Recharge de l'aquifère	-	0.10	-0.62	-	0.52	-0.22
Nappe-Rivière	-	0.20	-0.03	-	0.51	-0.27

Cette augmentation du « revap » et de la température, associée à une diminution générale de l'ET peut être à premier abord contradictoire. L'augmentation du flux de « revap » est signe que l'eau disponible dans les réservoirs facilement accessibles pour l'ET (sol, neige, ruissellement) vient à manquer. Les valeurs d'évapotranspiration potentielle (ETP) du modèle ont donc été analysées. Cette dernière représente la demande évapotranspiratoire maximum qui doit être comblée si l'eau est disponible en quantité suffisante.

On observe que cette variable présente une nette tendance à l'augmentation au cours de la période 2010-2050 avec, contrairement aux autres tests réalisés sur la même période, une significativité importante des tendances. Cette analyse nous permet de mettre en évidence que l'ET est en baisse principalement à cause d'une impossibilité de répondre à la demande évapotranspiratoire.

Cette analyse est renforcée non seulement par l'augmentation susmentionnée du « revap », mais également par le fait que la teneur en eau des sols et le stock de neige, principales sources de l'ET, soient les seules composantes du cycle hydrologique à présenter une baisse significative pour les deux scénarios (Tableau IV.8).

Les seules évolutions pouvant donc être considérés comme significatives sur les 40 prochaines années impactent principalement l'eau verte du bassin versant : diminution de la teneur en eau des sols (stock d'eau verte) engendrant des déficits d'eau disponible pour l'ET (flux d'eau verte) qui en vient à diminuer malgré l'augmentation significative de l'ETP. Si les flux et des stocks d'eau bleue semblent subir une tendance globale à la baisse, cette dernière ne se révèle significative que pour les stocks de neige.

Enfin, quel que soit le scénario RCP utilisé, les résultats obtenus par les différents ensembles hydroclimatiques sont très similaires et mènent à des tendances comparables. Cela est en accord avec le point précédent, où sont comparées les différentes données d'entrée climatiques utilisées.

2.3. Variation saisonnière spatialisée 2000-2010 Vs. 2040-2050

À l'instar du chapitre 7, une analyse est ensuite réalisée de manière spatialisée pour chaque flux et stock d'eau verte et d'eau bleue, avec une comparaison des moyennes saisonnières de deux périodes de 10 ans séparées d'un intervalle de 40 ans.

La décennie 2000-2010 sert toujours de période de référence. Les valeurs présentées pour cette période sont les moyennes des résultats obtenus avec chacune des versions du modèle SWAT (PM et HG), puisque très peu de divergences entre les résultats de ces deux versions ont pu être notées au cours du chapitre 7.

Cette période de référence est ensuite comparée aux projections réalisées sur la période 2040-2050. Pour cette comparaison, toutes les simulations hydroclimatiques ont été moyennées. En effet, suite à la mise en évidence de la grande similitude des deux ensembles utilisés pour chacun des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (sur la période 2010-2040), l'utilisation de la moyenne de la totalité des simulations permet d'effectuer notre comparaison en se basant maintenant sur 16 réalisations hydroclimatiques. Les deltas proposés pour estimer les variations entre les deux époques ont été obtenus par :

$$\Delta = \text{Volume}_{2040-2050} - \text{Volume}_{2000-2010}$$

Une valeur positive indique donc une hausse de l'indicateur hydrologique au court du temps.

2.3.1. Eau verte

Comme il a été montré dans la section précédente, le flux et le stock d'eau verte semblent les plus significativement impactés par les changements projetés à partir des données des modèles climatiques utilisés. Les Figures IV.27 et IV.28 illustrent l'évolution saisonnière de ces derniers.

La Figure IV.27, qui présente la variation saisonnière du flux d'évapotranspiration, est particulièrement intéressante à mettre en perspective avec les résultats obtenus dans la section précédente. Si l'ET à l'échelle annuelle est apparue comme ayant une tendance négative, on peut voir ici que cette tendance apparaît comme très irrégulière sur l'année.

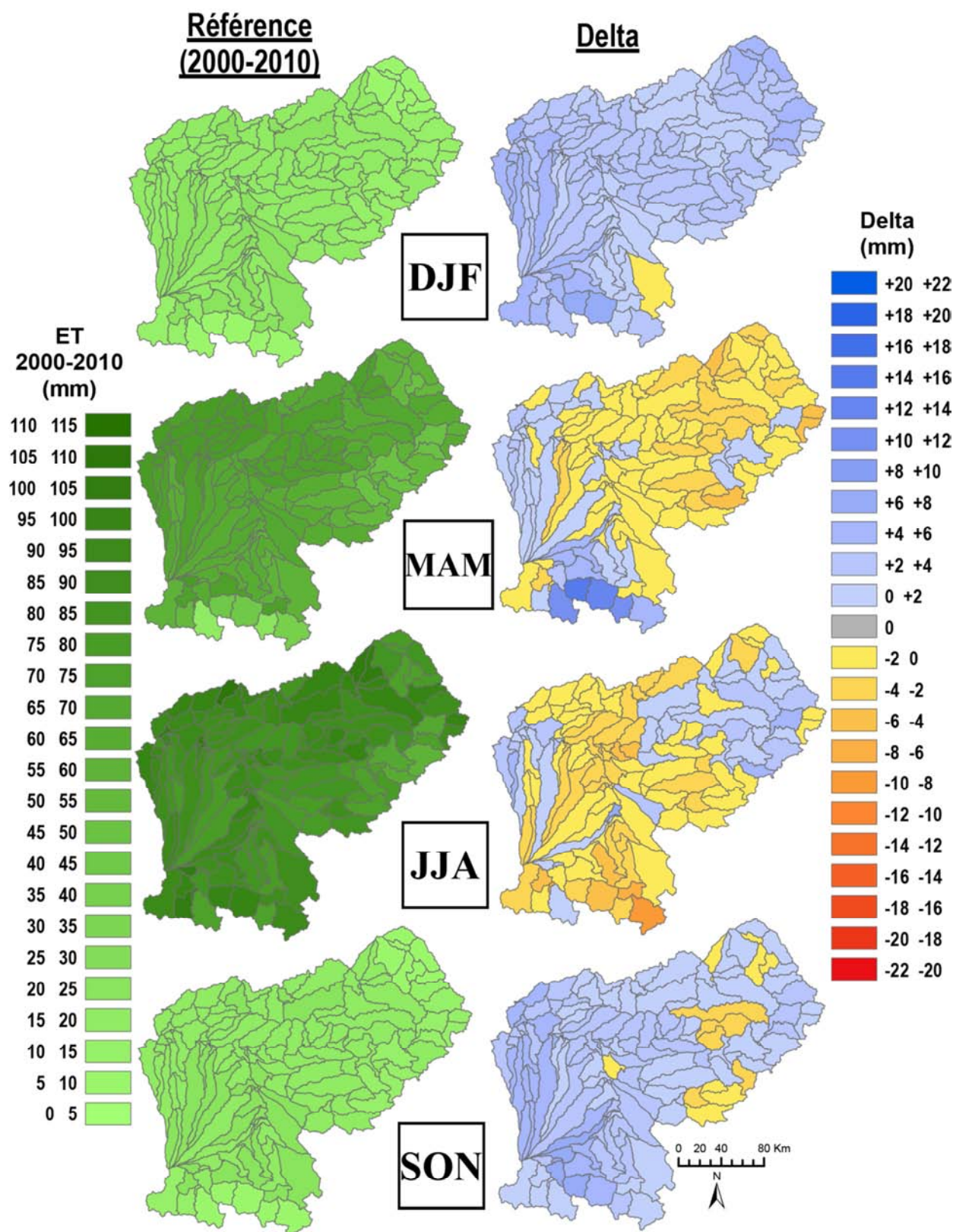


Figure IV.27 : Flux d'ET : moyennes mensuelles saisonnières spatialisées. Référence sur la période 2000-2010 – Moyenne SWAT-(PM) et SWAT-(HG). Évolution entre la période 2000-2010 et la période 2040-2050 – Moyenne de l'ensemble climatique et des deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. (DJF = décembre ; janvier ; février, MAM = mars ; avril ; mai, JJA = juin ; juillet ; août et SON = septembre ; octobre ; novembre).

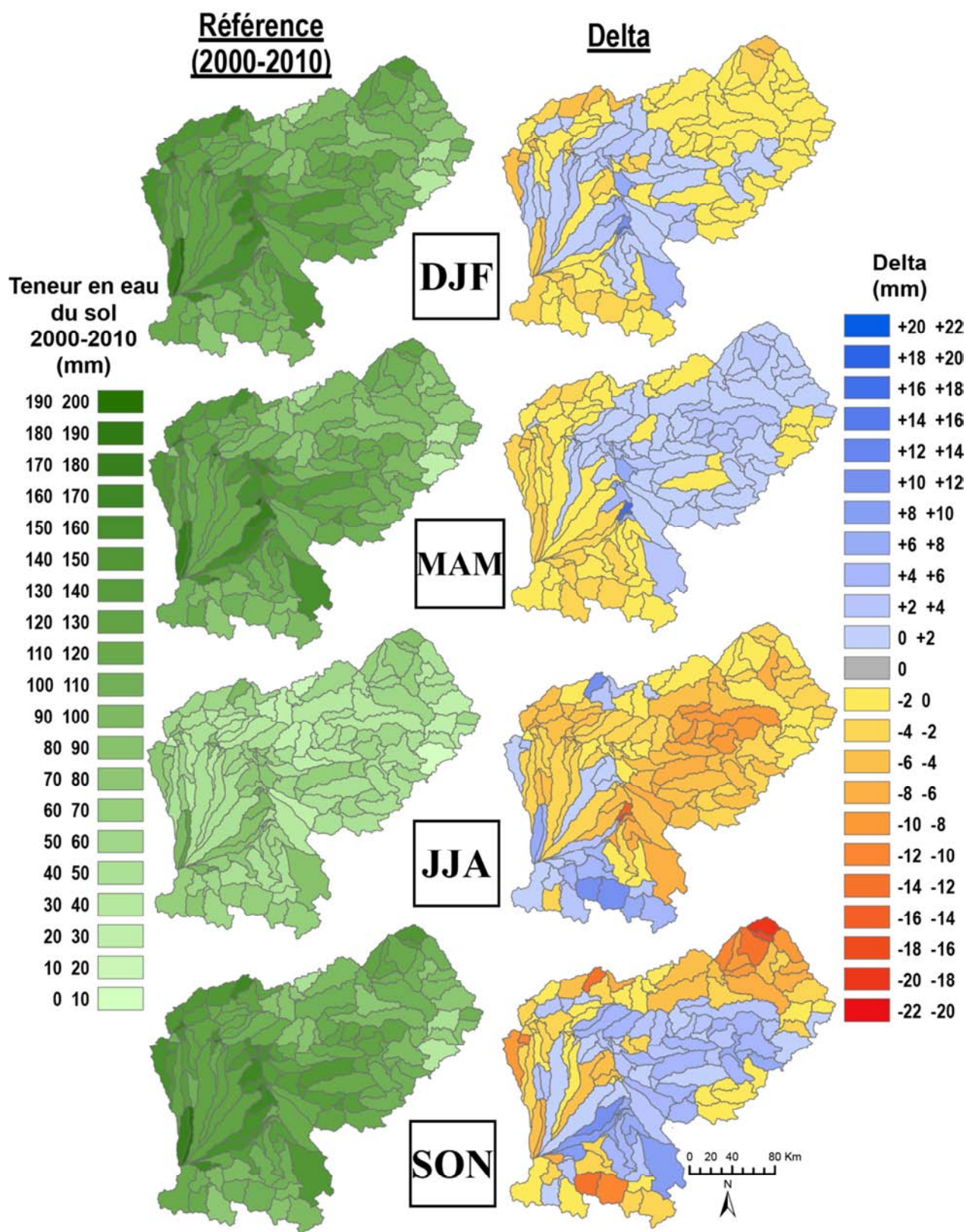


Figure IV.28 : Teneur en eau des sols : moyennes mensuelles saisonnières. Référence sur la période 2000-2010 – Moyenne SWAT-(PM) et SWAT-(HG). Évolution entre la période 2000-2010 et la période 2040-2050 – Moyenne de l'ensemble climatique et des deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. (DJF = décembre ; janvier ; février, MAM = Mars ; avril ; mai, JJA = juin ; juillet ; août et SON = septembre ; octobre ; novembre).

Une augmentation généralisée de ce flux est ici bien mise en évidence pendant l'automne et l'hiver, alors qu'il semble diminuer pendant le printemps et l'été. D'autre part, les augmentations obtenues entre septembre et février semblent assez significatives par rapport aux valeurs observées sur la période de référence. Au contraire, les variations sur les mois de mai à août, à la baisse comme à la hausse, apparaissent comme beaucoup moins importantes en comparaison des valeurs élevées d'évapotranspirations simulées sur la période 2000-2010, exception faite de la zone pyrénéenne pendant le printemps, où la diminution du manteau neigeux (voir section 2.3.2) engendre une augmentation marquée de l'ET.

Cette analyse vient renforcer l'hypothèse formulée dans la section précédente, à savoir que la demande évapotranspiratoire augmente, mais que les périodes soumises à une forte hausse de cette demande peuvent connaître une diminution de l'eau disponible pour y répondre, engendrant une diminution du flux d'eau réellement évaporée.

Cette analyse peut être étendue à la Figure IV.28 illustrant les variations de la teneur en eau des sols entre les deux décennies. On retrouve bien une diminution marquée de la teneur en eau des sols, particulièrement pendant la saison estivale, où cette fois la diminution apparaît substantielle au regard des teneurs en eaux des sols qui étaient obtenues sur la période 2000-2010.

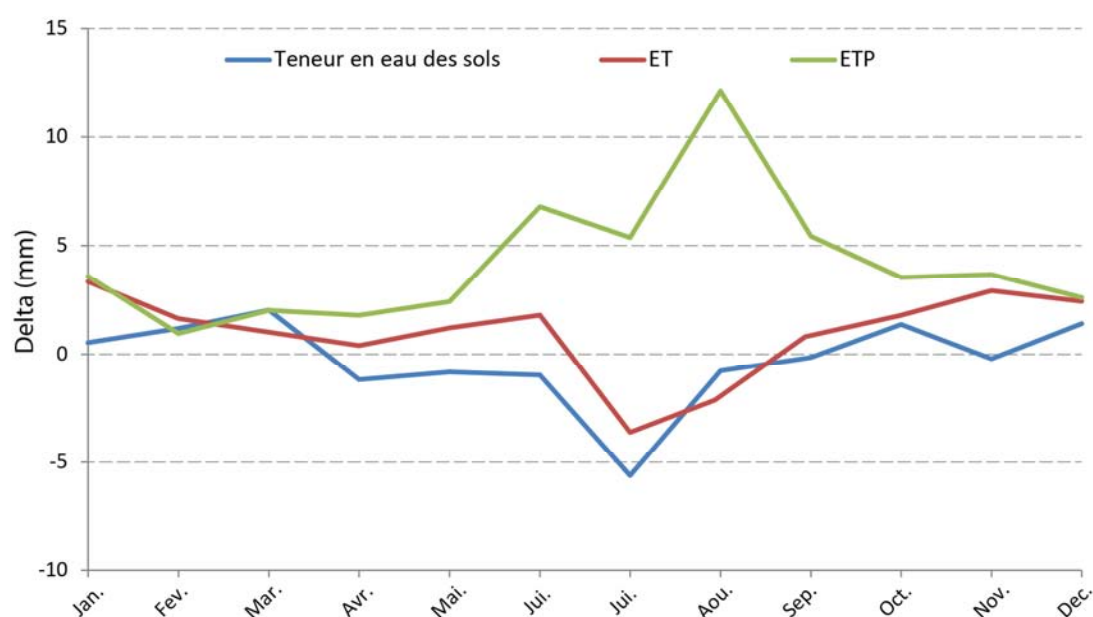


Figure IV.29 : comparaison des variations mensuelles interannuelles entre les périodes 2000-2010 et 2040-2050

Pour venir confirmer l'hypothèse d'un manque d'eau dans les sols pour répondre à la demande évaporatoire, la Figure IV.29 présente la variation du delta mensuel interannuel moyen de l'ET, de l'ETP et de la teneur en eau des sols. On voit nettement que la dynamique de la diminution de l'ET et de la teneur en eau des sols sont fortement liée.

Pour aider à mettre en perspective ces variations de teneur en eaux des sols, la Figure IV.30 montre ce que ces deltas représentent en termes de pourcentage de la teneur en eaux des sols pour la période estivale, pour laquelle les variations sont les plus marquées. On remarque alors que la baisse de la teneur en eau sur le bassin versant serait plutôt de l'ordre de 10%, pouvant atteindre plus rarement 15 à 25%. Une hausse du même ordre de grandeur apparaît dans la zone pyrénéenne du bassin versant. Cette baisse de la teneur en eaux moyenne des sols si elle n'est pas alarmiste, reste substantielle, et probablement le marqueur d'une potentielle augmentation des évènements extrêmes de sécheresse pédologique. Cette baisse est de plus cohérente avec celle observée au chapitre 7 à la comparaison des données historiques.

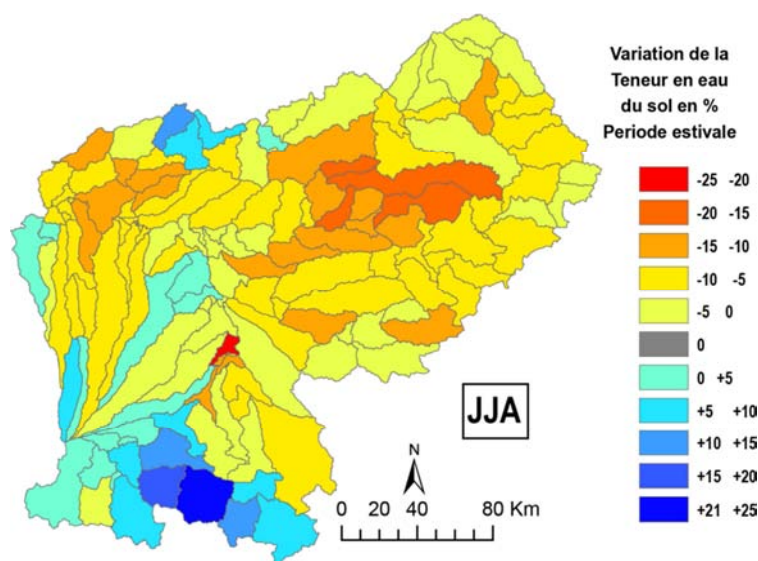


Figure IV.30 : Teneur en eau des sols : Pourcentage de variation de la teneur en eaux moyenne des sols en période estivale entre les décennies 2000-2010 et 2040-2050

2.3.2. Eau bleue

a. Flux d'eau bleue de surface

Les Figures IV.31, IV.32, IV.33 et IV.34 viennent illustrer respectivement les variations saisonnières, du ruissellement, de l'infiltration, du flux de subsurface et du débit.

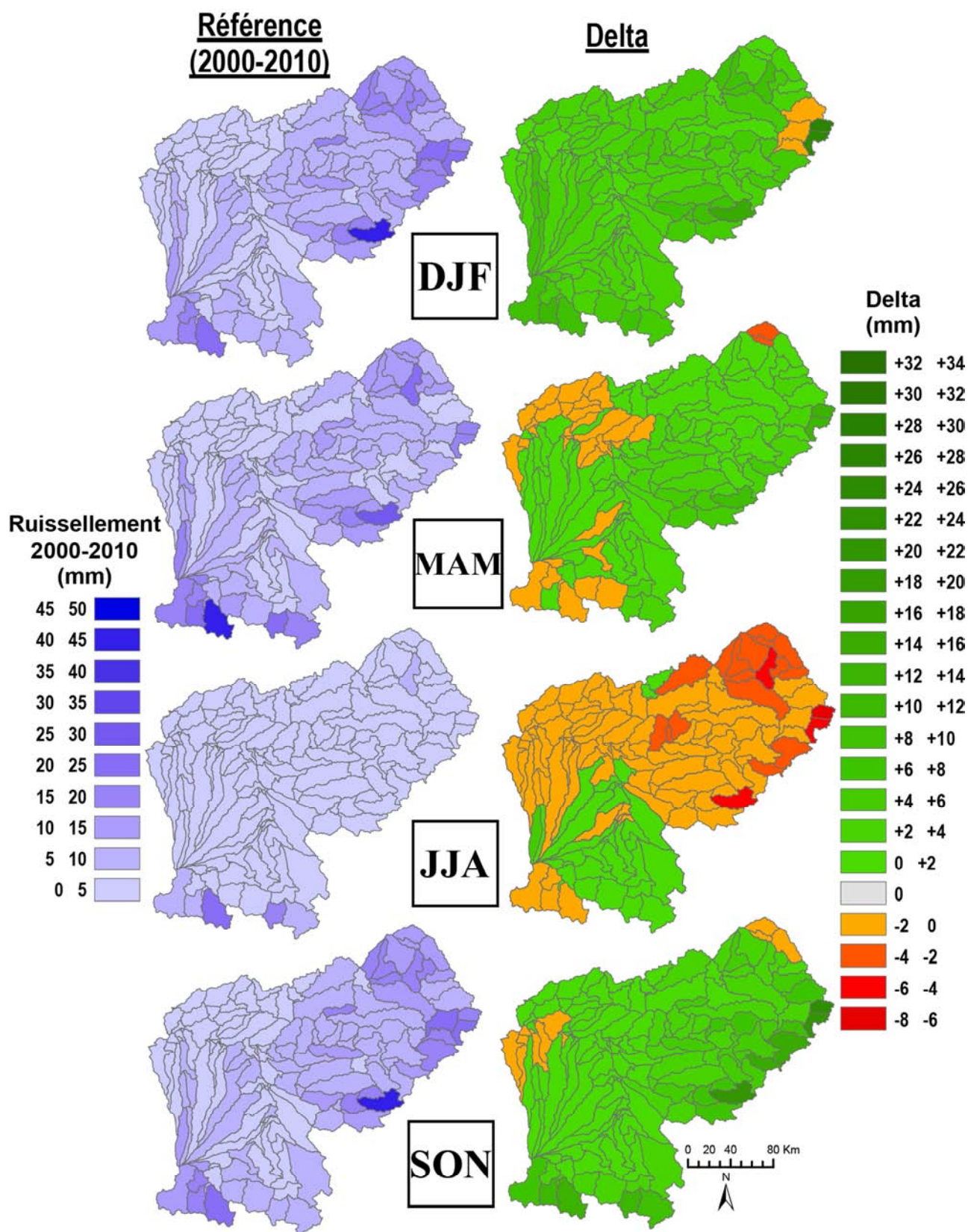


Figure IV.31 : Ruissellement : moyennes mensuelles saisonnières. Référence sur la période 2000-2010 – Moyenne SWAT-(PM) et SWAT-(HG). Évolution entre la période 2000-2010 et la période 2040-2050 – Moyenne de l'ensemble climatique et des deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. (**DJF** = décembre ; janvier ; février, **MAM** = mars ; avril ; mai, **JJA** = juin ; juillet ; août et **SON** = septembre ; octobre ; novembre).

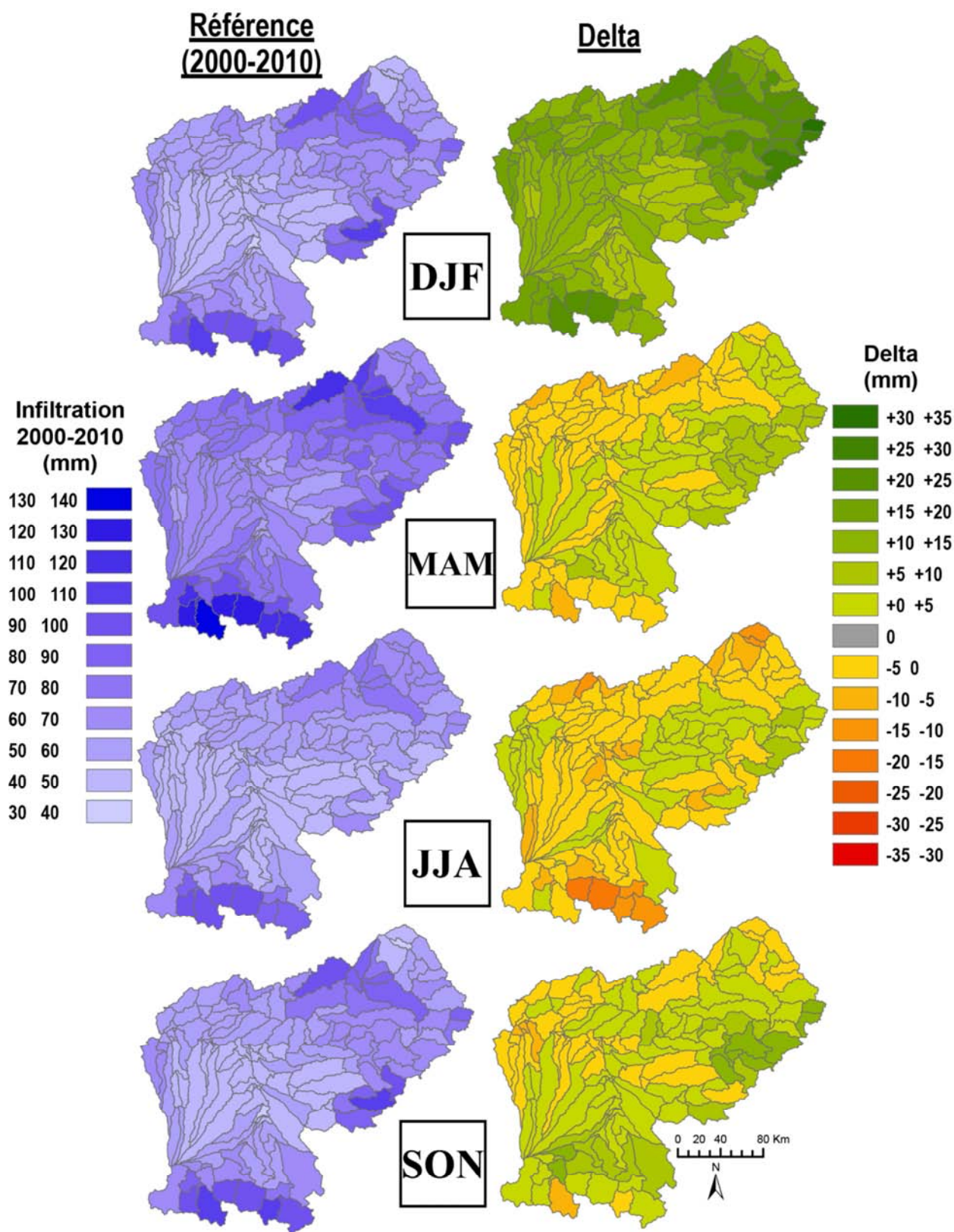


Figure IV.32 : Infiltration : moyennes mensuelles saisonnières. Référence sur la période 2000-2010 – Moyenne SWAT-(PM) et SWAT-(HG). Évolution entre la période 2000-2010 et la période 2040-2050 – Moyenne de l'ensemble climatique et des deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. (DJF = décembre ; janvier ; février, MAM = mars ; avril ; mai, JJA = juin ; juillet ; août et SON = septembre ; octobre ; novembre).

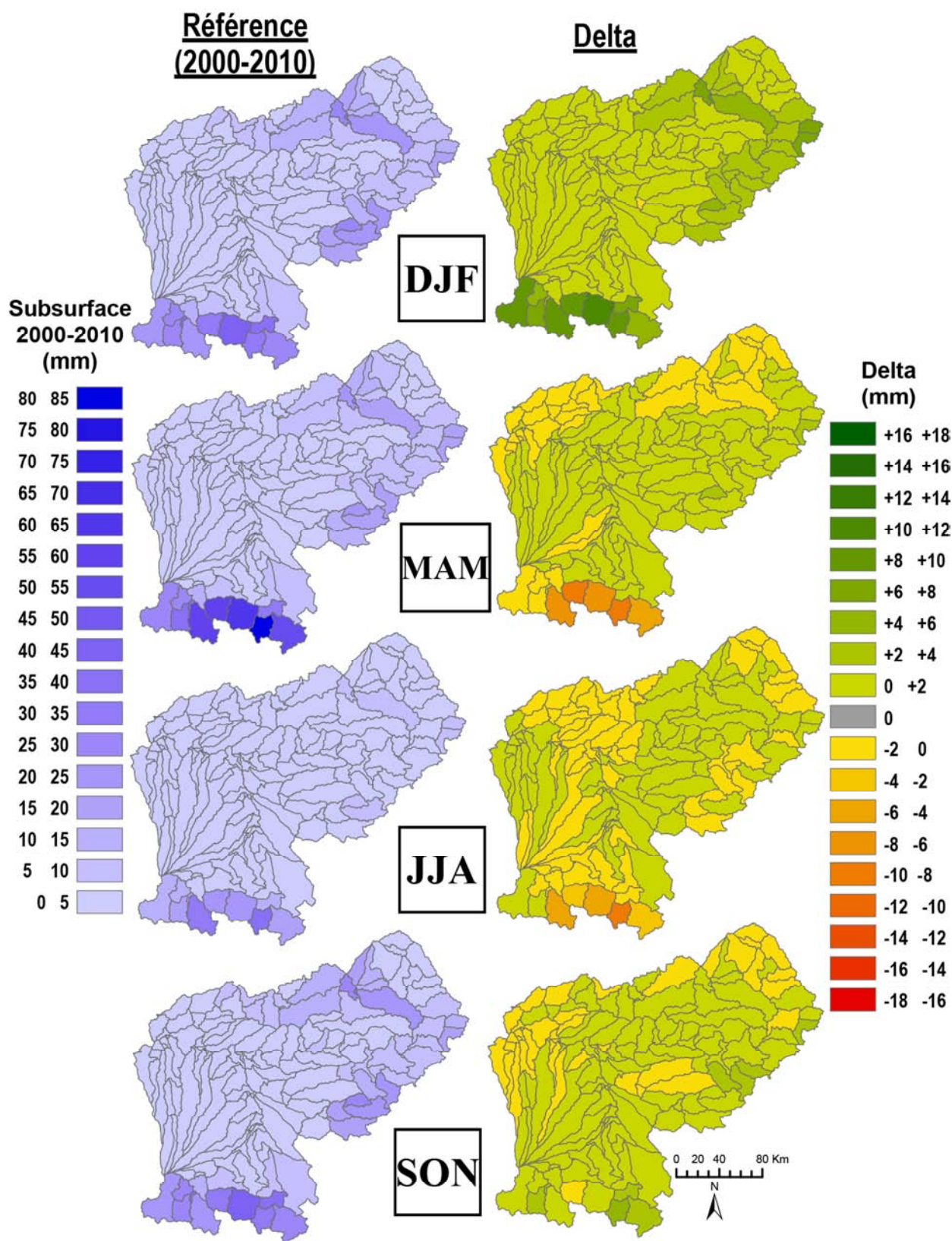


Figure IV.33 : Flux de subsurface : moyennes mensuelles saisonnières. Référence sur la période 2000-2010 – Moyenne SWAT-(PM) et SWAT-(HG). Évolution entre la période 2000-2010 et la période 2040-2050 – Moyenne de l'ensemble climatique et des deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. (DJF = décembre ; janvier ; février, MAM = mars ; avril ; mai, JJA = juin ; juillet ; août et SON = septembre ; octobre ; novembre).

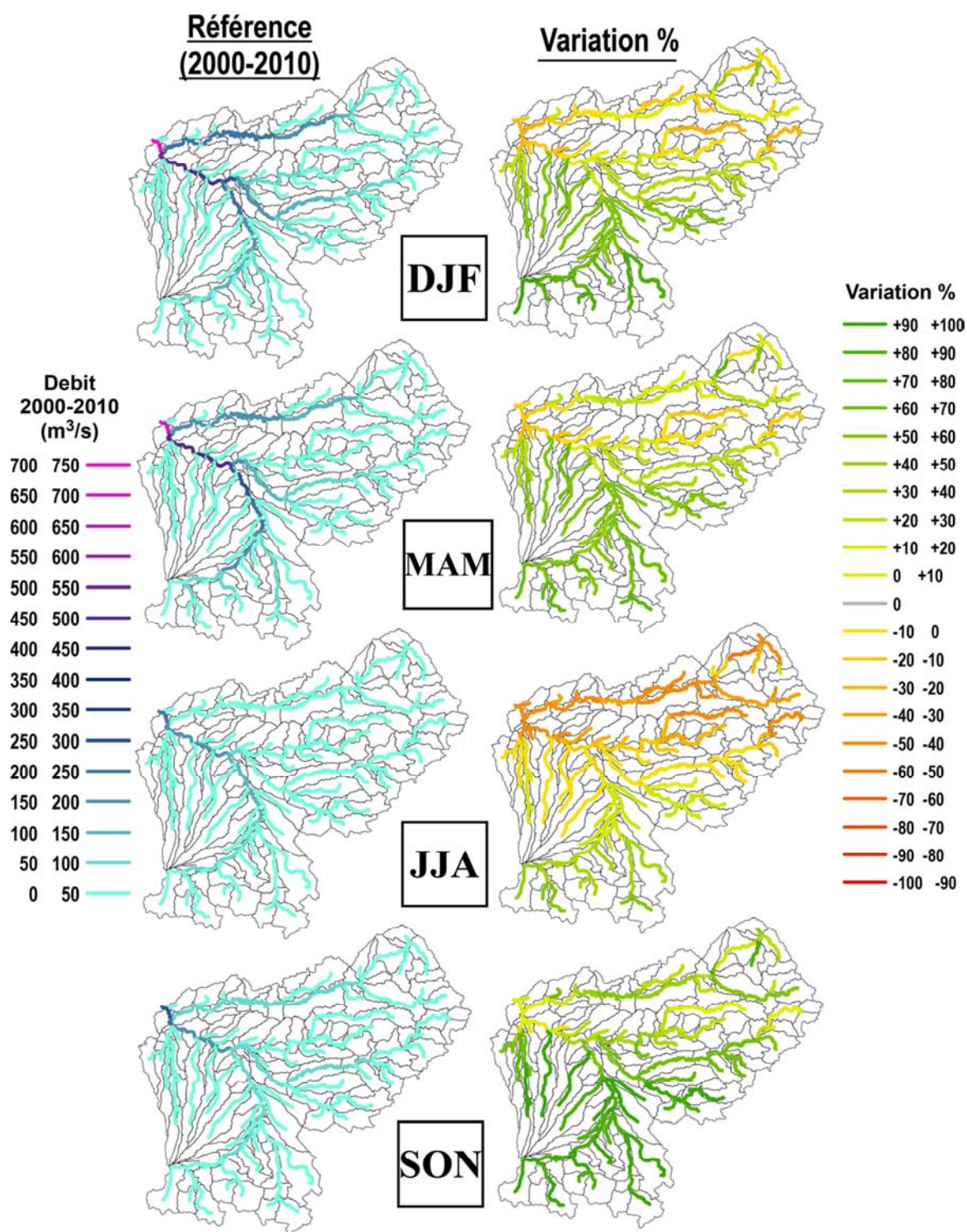


Figure IV.34 : Débit : moyennes mensuelles saisonnières spatialisées. Référence sur la période 2000-2010 – Moyenne SWAT-(PM) et SWAT-(HG). Évolution entre la période 2000-2010 et la période 2040-2050 – Moyenne de l'ensemble climatique et des deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. (DJF = décembre ; janvier ; février, MAM = mars ; avril ; mai, JJA = juin ; juillet ; août et SON = septembre ; octobre ; novembre).

Contrairement à la conclusion faite à partir des simulations historiques du chapitre précédent et aux tendances calculées sur l'intégralité de la période de projection présentée dans la section précédente, les variations des flux de ruissellement et de subsurface (Figure IV.31 et IV.33) apparaissent en hausse. Cette hausse, modérée en valeur absolue, est surtout marquée pendant les mois de septembre à février. Le flux de subsurface semble particulièrement augmenter dans les zones de montagnes pendant la saison hivernale.

Pour l'infiltration (Figure IV.32), cette augmentation existe aussi, mais elle semble restreinte à la période hivernale, seule période où elle est marquée sur l'ensemble du bassin versant, avec des valeurs de delta importantes. Pendant le printemps et l'été, le bassin versant apparaît au contraire comme étant impacté par une diminution de l'infiltration.

Malgré leurs contradictions avec les conclusions du chapitre précédent, ces augmentations hivernales marquées des flux d'eau bleue de surface sont consistantes avec les variations de précipitations qui sont produites par l'ensemble EURO-CORDEX pendant l'hiver, comme analysées par Ouzeau et al. (2014) et présentées Figure I.5 et I.6 de ce document.

Il est également intéressant de noter que l'augmentation pendant la saison hivernale de l'infiltration ne semble pas avoir d'effet sur la teneur en eau des sols (Figure IV.28), qui est en baisse pour la même période. L'augmentation de l'infiltration ne permettant apparemment pas de couvrir l'augmentation des demandes en évapotranspiration sur la même période.

La Figure IV.34 illustre les variations de débits mensuels moyens par saison obtenue à partir des projections climatiques. Les résultats obtenus sont assez contre-intuitifs et en opposition avec les résultats obtenus sur la période 1962-2010 où les débits ont été trouvés en nette baisse pour toutes les saisons. Ici, les débits semblent en augmentation une bonne partie de l'année, en accord avec les observations faites au sujet des flux de ruissellement et de subsurface puisque l'on voit apparaître une augmentation des débits particulièrement marquée sur la période de septembre à mai. Sur la période estivale cependant, une baisse est observée sur la majorité du bassin versant, à l'exception de la

zone Pyrénées. On a donc un effet marqué de l'augmentation du ruissellement qui participe à l'augmentation des débits, à l'exception de la période estivale.

b. Stock d'eau bleue

Les stocks d'eau bleue du bassin versant sont constitués de la neige et de l'eau contenue dans les aquifères. Les Figures IV.35 et IV.36 présentent leurs variations respectives, obtenues par l'utilisation des données climatiques futures.

Les deltas du stock de neige entre les deux décennies présentées dans la Figure IV.35 apparaissent très similaires à ceux obtenus lors des simulations effectuées à partir des données météorologiques historiques (Figure IV.17). Une diminution substantielle de l'eau contenue dans la couverture neigeuse hivernale est à souligner. Cette diminution pouvant être parfois de près de 50 % du volume de référence de la période 2000-2010. Cette tendance apparaît plus clairement que pour la majorité des autres composantes du cycle hydrologique, ce qui est consistant avec la significativité importante obtenue par les tests de Mann-Kendall en section 2.2 de ce chapitre. Une faible augmentation de la neige en automne apparaît néanmoins sur la partie de la plaine du bassin versant. Cette augmentation est probablement liée à des variations infimes de chute de neige épisodique et ne peuvent être considérées comme significative.

À l'instar du stock de neige, la variation de l'eau contenue dans l'aquifère peu profond du bassin versant semble très proche de celles observées lors de l'analyse sur les données historiques (Figure IV.18) avec des variations globalement peu significative par rapport au volume d'eau contenue dans les aquifères. Malgré les faibles valeurs des deltas entre les deux décennies considérées, une tendance à la baisse semble cependant apparaître, d'autant plus marquée que l'on se dirige vers l'exutoire du bassin versant, dans la plaine de la moyenne Garonne. Cette analyse en accord avec l'hypothèse mise en avant lors de l'analyse de l'eau verte et l'augmentation du taux de « revap » qui impacte directement les aquifères. Ainsi, l'augmentation observée de l'infiltration ne semble pas profiter au réservoir d'eau bleu que sont les aquifères, l'augmentation des phénomènes d'évapotranspirations ayant une forte influence sur la modification du trajet de l'eau.

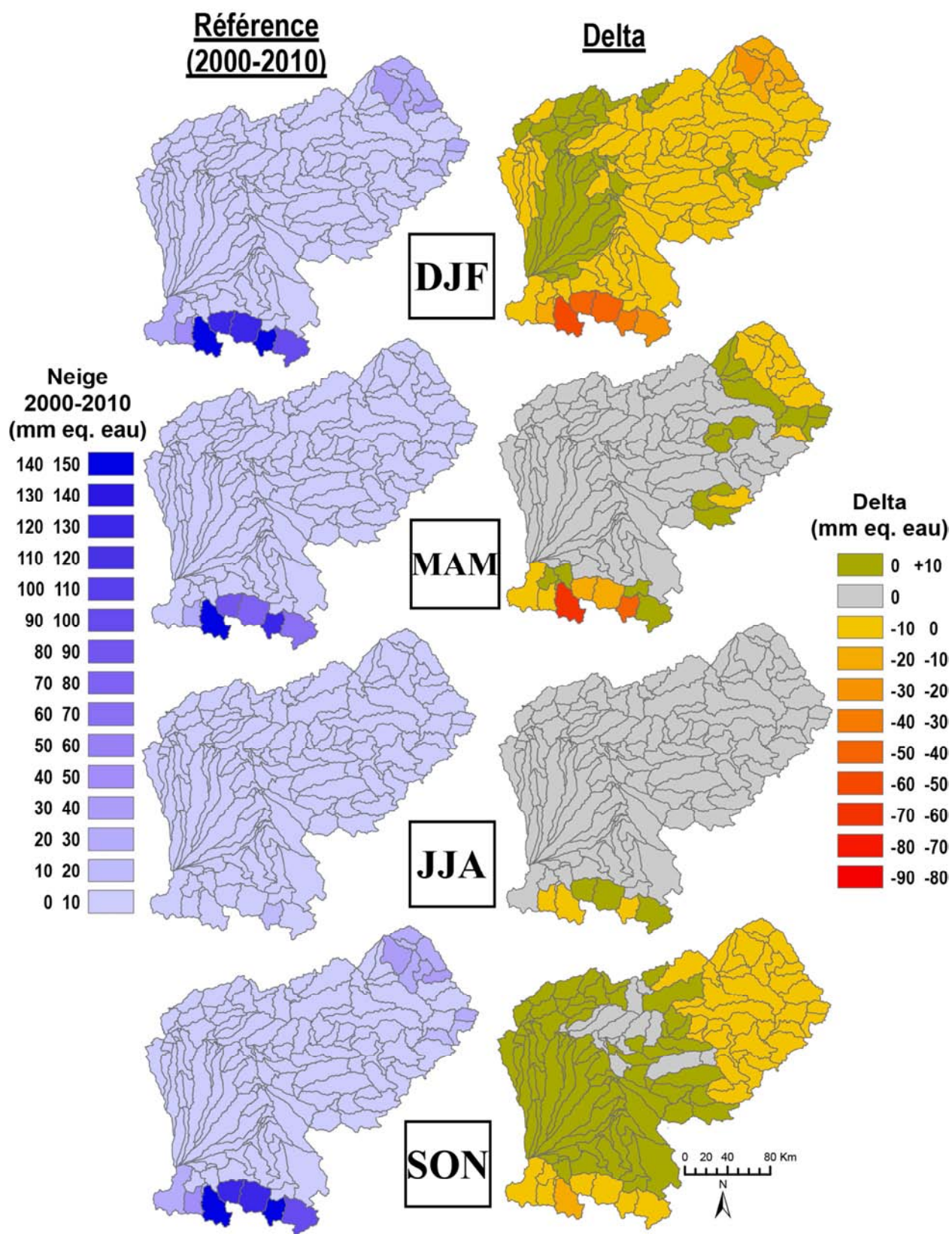


Figure IV.35 : Stock de neige : moyennes mensuelles saisonnières. Référence sur la période 2000-2010 – Moyenne SWAT-(PM) et SWAT-(HG). Évolution entre la période 2000-2010 et la période 2040-2050 – Moyenne de l'ensemble climatique et des deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. (DJF = décembre ; janvier ; février, MAM = mars ; avril ; mai, JJA = juin ; juillet ; août et SON = septembre ; octobre ; novembre).

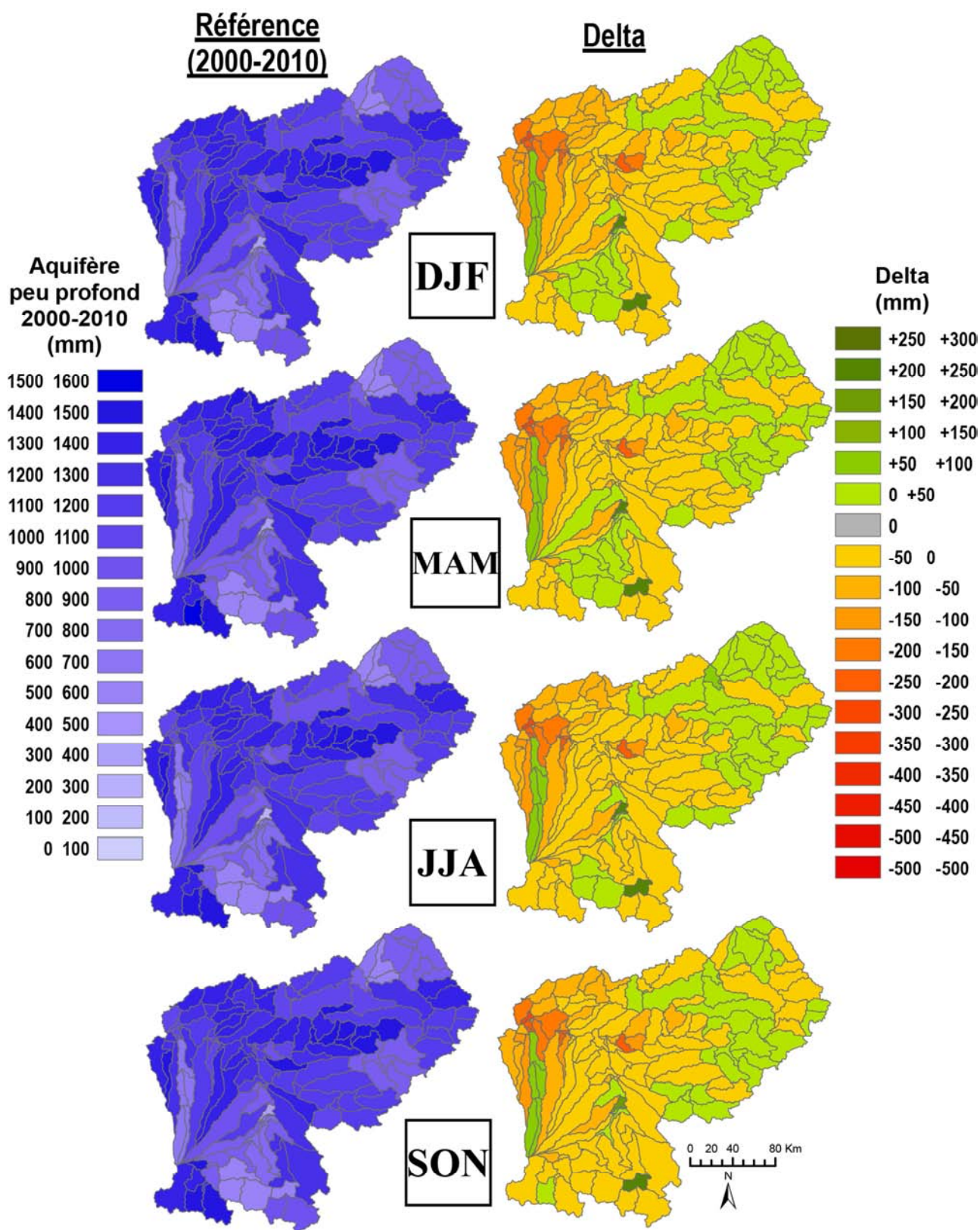


Figure IV.36 : Aquifère peu profond : moyennes mensuelles saisonnières. Référence sur la période 2000-2010 – Moyenne SWAT-(PM) et SWAT-(HG). Évolution entre la période 2000-2010 et la période 2040-2050 – Moyenne de l'ensemble climatique et des deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. (DJF = décembre ; janvier ; février, MAM = mars ; avril ; mai, JJA = juin ; juillet ; août et SON = septembre ; octobre ; novembre).

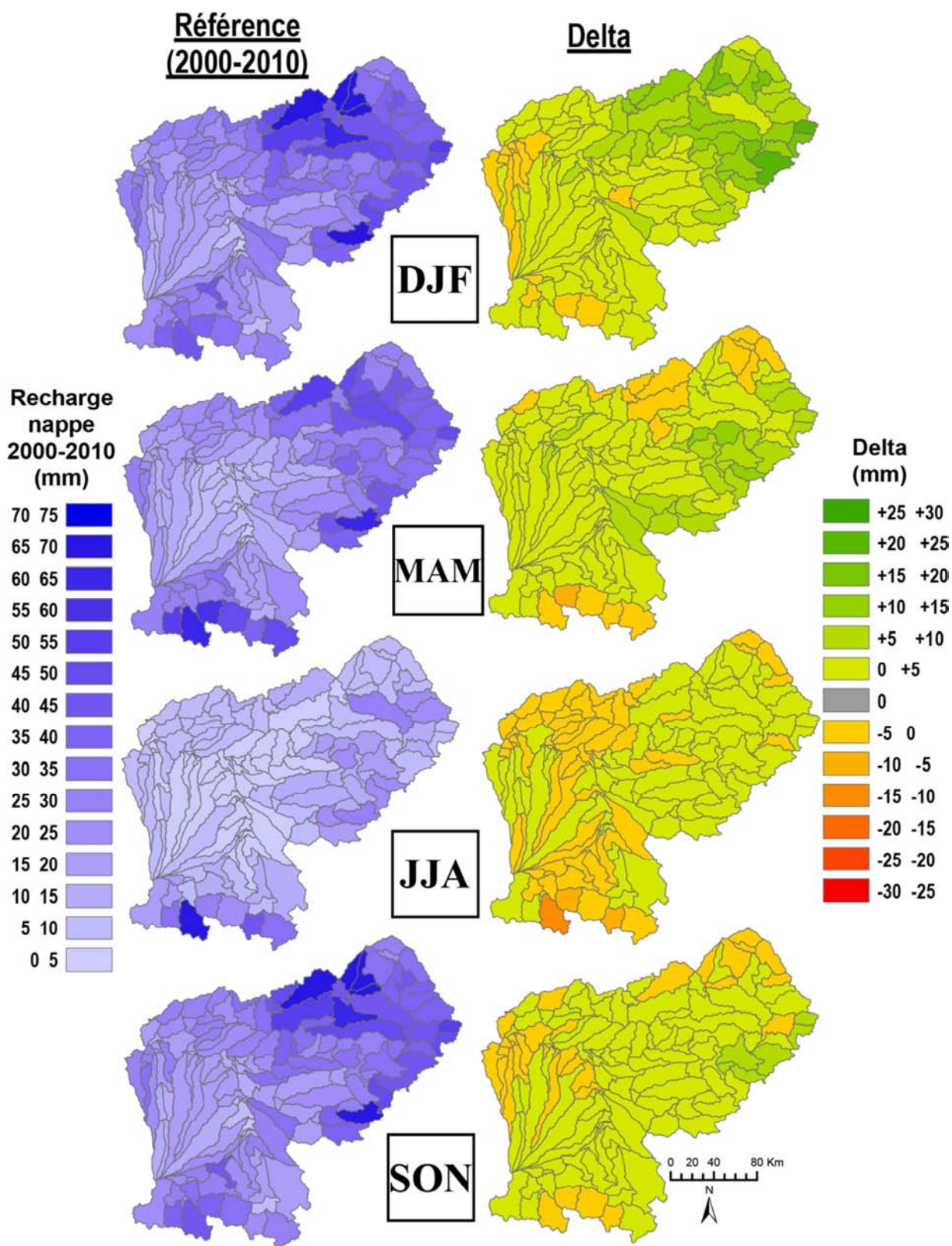


Figure IV.37 : Recharge de la nappe : moyennes mensuelles saisonnières. Référence sur la période 2000-2010 – Moyenne SWAT-(PM) et SWAT-(HG). Évolution entre la période 2000-2010 et la période 2040-2050 – Moyenne de l'ensemble climatique et des deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. (DJF = décembre ; janvier ; février, MAM = mars ; avril ; mai, JJA = juin ; juillet ; août et SON = septembre ; octobre ; novembre).

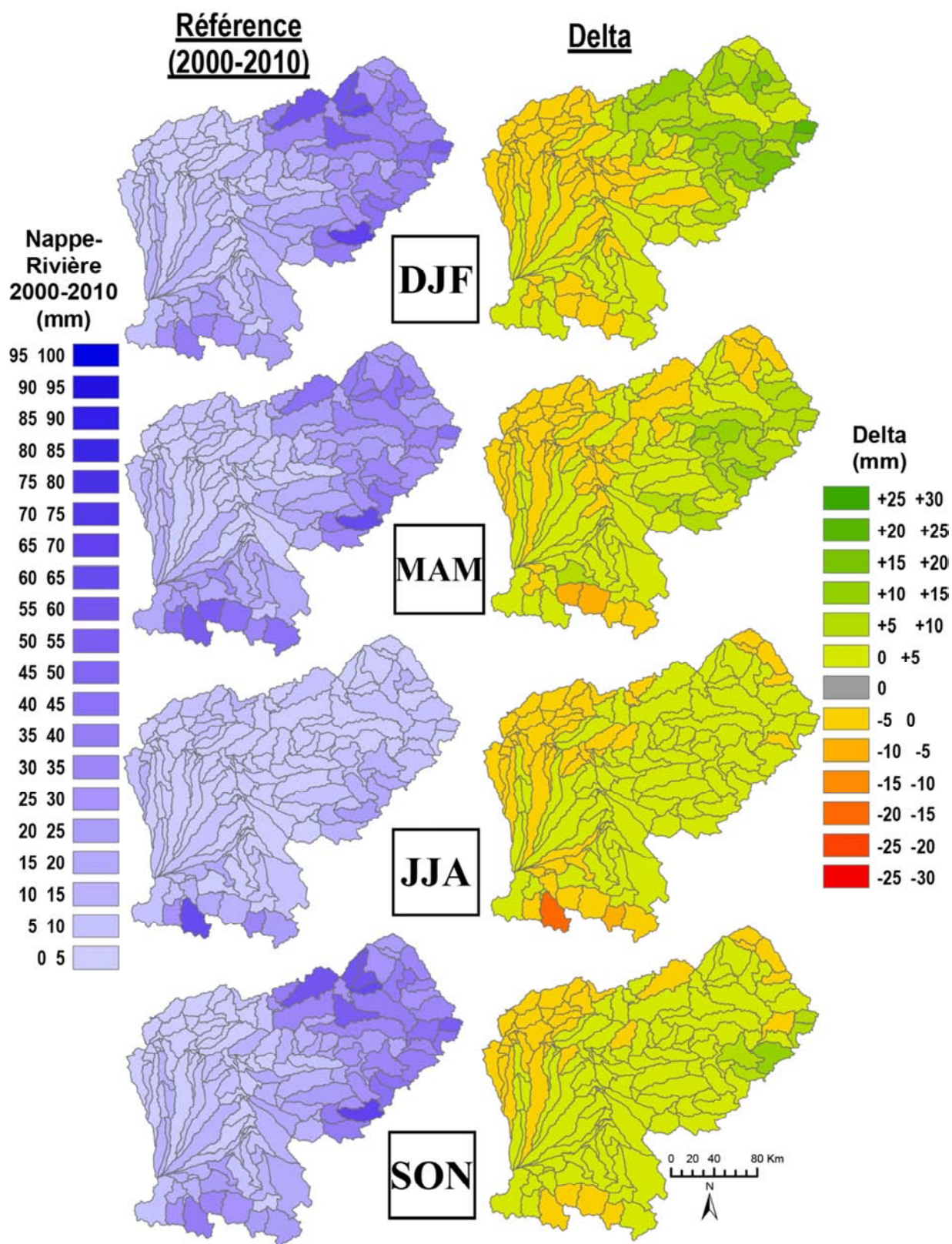


Figure IV.38 : Flux nappe-rivière : moyennes mensuelles saisonnières. Référence sur la période 2000-2010 – Moyenne SWAT-(PM) et SWAT-(HG). Évolution entre la période 2000-2010 et la période 2040-2050 – Moyenne de l'ensemble climatique et des deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. (DJF = décembre ; janvier ; février, MAM = mars ; avril ; mai, JJA = juin ; juillet ; août et SON = septembre ; octobre ; novembre).

L'analyse des stocks d'eau bleue du bassin versant résultant de l'utilisation des données issues des modèles climatiques nous permet de mettre en évidence des comportements très proches de ceux qui ont pu être constatés avec les données historiques, s'inscrivant ainsi dans une continuité de la tendance.

a. Flux d'eau bleue souterrains

Les dernières composantes du cycle hydrologique à être analysées ici sont la recharge de la nappe (Figure IV.37) et le flux de la nappe vers la rivière (Figure IV.38).

Il n'est pas évident de mettre à jour une tendance claire des variations de ces deux composantes ni d'un point de vue saisonnier ni d'un point de vue spatial. Les valeurs des variations de ces deux flux semblent assez faibles, laissant cependant plutôt apparaître une augmentation modérée.

La seule exception concerne la partie Massif Central du bassin versant, où ces deux flux connaissent une augmentation plus conséquente pendant la saison hivernale. Il est en outre intéressant de noter que les différentiels positifs que connaissent ces deux flux d'eau bleue, qui représentent les principaux flux d'entrée et de sortie de l'aquifère, semblent se compenser entre eux. La tendance à la baisse l'aquifère (Figure IV.36) ne peut donc pas s'expliquer par les variations des flux d'eau bleue souterraine observée sur les Figures IV.36 et IV.37.

La légère augmentation du flux d'eau de la nappe vers la rivière dans le Massif Central pendant l'hiver et le printemps doit cependant être un des facteurs participants à l'augmentation des débits telle qu'elle a été mise en évidence dans la Figure IV.34 au cours de ces périodes.

3. Conclusion

L'utilisation du modèle SWAT, avec différents jeux de données issues des sorties de différents modèles climatiques, a permis dans ce chapitre de dresser un bilan des impacts de la non-stationnarité du climat sur la simulation du cycle hydrologique du bassin versant de la Garonne en se basant sur deux scénarios : RCP4.5 et RCP8.5

L'utilisation des données climatiques dans le modèle hydrologique sur la période de contrôle (1974-2005) permet une assez bonne représentation du volume global des flux

d'entrées et de sorties du bassin versant. Si la représentation en terme de distribution est assez bonne, des comparaisons sur des périodes décennales ont permis d'observer que les données issues de l'ensemble climatique semblent présenter des variations de valeur moyenne moins marquées que celles obtenues avec SAFRAN, et donc représenter de manière moins marquée la non-stationnarité du climat qui avait pu être mise en évidence à partir des données SAFRAN dans le chapitre 7.

La comparaison des deux scénarios RCP considérés a permis de mettre en évidence d'importantes similitudes dans les données d'entrée utilisées pour faire tourner le modèle hydrologique.

En analysant les sorties annuelles des simulations hydroclimatiques réalisées sur la période courant de 2010 à 2050, des tendances similaires à celle observée dans le chapitre précédent sont mises en évidence pour la majorité des composantes hydrologiques du bassin versant. Néanmoins, les significativités de ces tendances sont très faibles et ne permettent pas de conclure de manière certaine, à l'exception des tendances concernant la teneur en eau des sols et le stock de neige, qui sont en baisses significatives.

Le flux annuel moyen d'ET est le seul ayant une tendance inverse à celle obtenue sur la période historique, et ressort comme ayant une tendance à la baisse, alors que sa composante représentant la remontée de l'eau par capillarité de la zone saturée et les températures sont en augmentation. Pour cette raison, l'ETP a cette fois était également analysée. Cette dernière apparaît en nette hausse, avec des significativités importantes, cela permettant d'émettre l'hypothèse que c'est en réalité la capacité générale de l'hydrosystème à répondre à cette demande évapotranspiratoire qui est en baisse.

Cette hypothèse est renforcée par l'analyse des variations saisonnières spatialisées, qui fait apparaître l'ET en augmentation pendant la saison hivernale alors qu'elle est en baisse pendant la période estivale. Cette baisse de l'ET est à relier également à la baisse conjointe de la teneur en eau dans les sols, qui est en accord avec les tendances calculées sur les valeurs annuelles de la période 2010-2050.

Les flux d'eau bleue de surfaces que sont l'infiltration, le ruissellement et le flux de subsurface apparaissent quant à eux en augmentation, particulièrement pendant l'hiver, ce qui est en accord avec l'augmentation de la précipitation projetée par l'ensemble

EURO-CORDEX. L'augmentation de ces flux a par suite un effet sur les débits qui augmentent eux aussi, ce qui n'est pas consistant avec ce qui a pu être conclu lors du chapitre 7 sur les données 1962-2010.

Des stocks d'eau bleue, seule la neige connaît une diminution substantielle et significative pendant la saison hivernale. Cette diminution correspond de très près à celle qui a été obtenue à l'aide des données historiques du chapitre précédent.

Pour les flux d'eau bleue souterraine, même si une légère augmentation peut être relevée, particulièrement en période hivernale, cette dernière reste peu importante en termes de volume.

Discussion

Les résultats présentés dans la partie V sont ici discutés et comparés à la littérature existante afin d'en définir les limites. La discussion présentée ici ne concerne que la partie des résultats scientifiques. En effet, les travaux présentés dans la partie IV de ce document ont déjà été discutés au cours des chapitres 4 à 6 de ce document.

.

Cette recherche nous a apporté beaucoup d'informations sur les variations du système hydroclimatique du bassin versant de la Garonne, qu'il convient de critiquer et de mettre en perspective avec les études antérieures sur le sujet.

L'objectif de cette étude était de réaliser une approche globale du cycle hydrologique, en considérant l'ensemble de ses composantes, et pas uniquement l'eau bleue comme cela est le cas dans la plupart des études hydrologiques, mais en s'attardant également sur les composants de l'eau verte, qui sont souvent oubliés, mais qui jouent pourtant un rôle très important dans le fonctionnement global des hydrosystèmes. Le bassin versant de la Garonne pour lequel a été réalisée l'étude est un bassin très contrasté, tant du point de vue des caractéristiques physiques des territoires que de son fonctionnement hydrologique. Malgré ces contrastes, de nombreuses données sont disponibles pour ce territoire, ce qui a permis de mettre en place le modèle SWAT avec une fine représentation spatiale du territoire, mais dont les simulations sont apparues robustes dans un contexte de changement climatique. Cela a pu être mené à bien grâce à une attention particulière apportée à la mise en place du modèle qui est discutée dans les chapitres 4 à 6 de ce document et qui ne sera pas reprise ici.

Une fois le modèle mis en place, les performances en calibration comme en validation sur des débits mensuels sont apparues globalement bonnes à très bonnes, d'après la valeur de plusieurs indicateurs largement utilisée dans la littérature. Malgré les efforts apportés à la mise en place et à la calibration du modèle présenté dans la partie 3, celui-ci est moins précis pour certaines zones bien délimitées, notamment les sous-bassins d'altitude de la zone pyrénéenne et les coteaux de Gascogne. En effet, ces territoires sont soumis à une plus forte anthropisation de leur régime hydrologique et un rôle important de la neige qui a fait l'objet d'un travail spécifique notamment en utilisant les informations couplées des données de débits mesurés et de télédétection. Même si ces influences anthropiques restent limitées lorsque l'on considère les débits sur une base mensuelle (Sauquet et al., 2010).

Les valeurs des critères de performance sélectionnés, parmi ceux discutés par Moriasi et al. (2007), ont été comparées à celles déjà disponibles dans la littérature pour le même territoire le bassin versant de la Garonne. Il apparaît alors que les performances sur les débits obtenues avec SWAT sont aussi bonnes que celles obtenues de modèles plus simples comme GR4J et CEQUEAU qui ne représentent cependant pas aussi bien

toutes les composantes du cycle hydrologique (Dupeyrat et al., 2008; MEED, 2012b; Hendrickx and Sauquet, 2013). Elles sont également légèrement supérieures à celles obtenues avec la suite SIM-MODCOU par Voirin-Morel (2003) qui présente 2 stations sur 15 ayant des Nse inférieurs à 0.5 ou par MEED (2012b) qui n'obtient pas de valeurs supérieures à 0.8 sur le bassin versant que ce soit pour Nse ou NseLog (simulation à l'échelle de la France). Elles sont cependant comparables à celles d'Habets et al. (2008) avec le même outil de modélisation SIM-MODCOU. Il faut noter que ces études considèrent des périodes d'une dizaine d'années alors qu'ici le modèle SWAT a été validé sur 40 ans sans perte notable de la performance.

L'évaluation de la vraisemblance du débit hydrologique a été réalisée par comparaison avec ISBA-MODCOU (Martin et al., 2016), particulièrement pour le flux évaporatif qui est une composante du cycle hydrologique aussi délicate à appréhender qu'elle est importante pour la représentation globale du cycle hydrologique. Voirin-Morel (2003) obtient également des valeurs d'ET simulées comparables sur le bassin versant de la Garonne à Tonneins, avec une part de l'ET oscillant entre 55 et 70% de la précipitation sur le bassin.

L'application de deux calculs différents de l'ETR, utilisant chacune une formulation différente de l'ETP (Penman-Monteith et Hargreaves), a permis d'exploiter un plus grand nombre de jeux de données issus de modèles climatiques et ainsi d'évaluer l'impact de ces différentes formulations sur l'ensemble de la modélisation. Comme nous avons pu le voir, l'utilisation de ces différentes formulations n'a eu aucun impact notable sur les performances de la simulation des débits et ne présente pas de divergence majeure à la simulation des différents éléments du cycle hydrologique, évapotranspiration comprise. Cela est cohérent avec la comparaison réalisée par Kannan et al. (2007) ou Droogers and Allen (2002) qui arrive aux mêmes conclusions. Les deux formulations ont pourtant été trouvées par d'autres auteurs comme pouvant mener à des divergences dans les simulations (Oudin et al., 2005), notamment avec SWAT (Earls and Dixon, 2008; Maranda and Anctil, 2015). Il est néanmoins très difficile de savoir quelle formulation de l'ETP permet de représenter au mieux la réalité du flux d'ET, étant donnée la difficulté de mesurer ce flux *in situ*, les études se basant principalement sur la représentation des débits. Considérer la moyenne des simulations hydrologiques obtenues à partir de ces deux formulations permet ici une approche plus large des représentations possibles du flux d'évapotranspiration.

De plus, indépendamment de la formulation de l'ETP choisie, il existe une influence de la qualité et de la densité spatio-temporelles des données météorologiques utilisée pour réaliser cette estimation. L'utilisation de la grille SAFRAN permet ici de réduire l'erreur due à la faible spatialisation de données météorologiques conventionnelles comme décrit par Earls and Dixon (2008).

Les simulations produites ont permis d'analyser de manière distincte l'évolution des différentes composantes du cycle hydrologique (passées et futures).

Que l'on considère les résultats obtenus sur la période historique (1960-2010) ou future (jusqu'en 2050), l'impact le plus marqué concerne les composantes d'eau verte, soit la teneur en eau des sols et le flux évaporatif. Ainsi, sur l'ensemble des deux périodes, la teneur en eaux des sols apparaît en baisse pour la période estivale, ce qui est consistant avec les études réalisées sur le sujet à l'échelle nationale (Soubeyroux et al., 2010; Vidal et al., 2010b; Soubeyroux et al., 2011; Soubeyroux et al., 2012). Les conclusions concernant la période hivernale sont quant à elle un peu différentes : si une diminution de la teneur en eau des sols est bien relevée au cours de la deuxième moitié du XXe siècle (en accord avec les études précédemment citées), l'utilisation des données de modèles climatiques indique plutôt une augmentation de cette dernière pour la première moitié du XXIe siècle. Si cette augmentation diverge des études précédemment citées, elle est en accord avec certaines études attestant d'une augmentation des précipitations hivernales au cours de cette même période (Ouzeau et al., 2014). Néanmoins, la tendance des valeurs annuelles sur l'ensemble de la période (1960-2050) montre une baisse significative de la teneur en eaux des sols, ce qui rejoint également les observations qui peuvent être recensées dans la littérature.

L'analyse des variations des flux d'évapotranspiration a mis en évidence un phénomène intéressant : si sur l'ensemble de la période (passée et future), les températures sont en augmentation toutes saisons confondues, en accord avec la littérature (notamment Moisselin et al. (2002) et Brulebois et al. (2015) pour la période historique ou Jacob et al. (2014) et Ouzeau et al. (2014) pour la période future), une baisse de l'évapotranspiration réelle est constatée pendant la période estivale, alors que l'évapotranspiration potentielle subit une hausse significative. Cette diminution de l'ET peut également être corrélée avec une diminution importante de la teneur en eau des sols, ce qui indique que cette baisse est en fait due à un manque d'eau pour combler la

demande évapotranspiratoire. Cette analyse doit cependant être prise avec nuance pour plusieurs raisons. La première est intrinsèque aux méthodes de calcul de l'ETP et aux données utilisées qui sont imparfaites. On a pu voir dans le Chapitre 8 (Figure IV.24) que l'utilisation de l'ensemble climatique sur la période de contrôle semblait mener à une surestimation de l'ET par rapport à SAFRAN. Cela semble cohérent avec les articles soulignant la légère surestimation de température estivale par le CMIP5 dans la partie sud de l'Europe (Cattiaux et al., 2013; Kotlarski et al., 2014). La seconde est le fait que l'irrigation ne soit pas considérée dans le modèle utilisé ici. Or cette irrigation aura pour effet de prélever de l'eau bleue pour la passer en eau verte et ainsi augmenter l'eau disponible pour les flux de retour vers l'atmosphère. Enfin, les crues menant à des débordements de la Garonne et de ses principaux affluents ne sont pas non plus représentées par le modèle, or ces phénomènes sont assez fréquents, et contribuent à recharger le stock d'eau verte en particulier sur la plaine alluviale de la moyenne Garonne (Sun, 2015; Sun et al., 2015; Bernard-Jannin, 2016). Tous ces facteurs viendront réduire la forte diminution de teneur en eaux des sols simulés et par suite permettront plus d'évapotranspiration. Cette baisse de la teneur en eau des sols est cependant clairement un indicateur de l'augmentation des périodes de sécheresse pédologiques sur le bassin versant.

Pour l'eau bleue, on observe une baisse généralisée des différents flux et stocks sur la période historique en accord avec les simulations produites par Habets et al. (2008) avec le modèle SIM. Cette tendance semble plus complexe sur la période future. Ainsi, certaines composantes restent en nette baisse, comme le stock de neige, venant confirmer les observations des études sur le sujet (López-Moreno, 2005; Maris et al., 2009; Miquel, 2012), alors que d'autres, de manière contradictoire avec les analyses sur la période passée, semblent en augmentation. C'est particulièrement le cas des flux d'eau bleue de surface que sont le ruissellement, l'infiltration et les débits, qui sont soumis à une augmentation substantielle pendant les périodes hivernale et automnale. Cette constatation n'est pas homogène avec la première partie de l'analyse réalisée, mais elle est cependant assez proche de certaines études antérieures à celle-ci. Ainsi, si Tisseuil et al. (2010) tablent sur une diminution des débits en automne, qui n'apparaît pas ici, ils insistent aussi sur une augmentation des débits hivernaux, qualifiée de dramatique pour les systèmes hydrologiques à régimes pluviaux du bassin versant. C'est également le cas dans l'étude menée par Caballero et al. (2007), Sauquet et al.

(2010) ou (Miquel, 2012). La différence majeure avec la plupart de ces études concerne principalement les débits pendant la saison printanière, qui sont considérés en baisse alors qu'ils apparaissent ici en hausse. Cette augmentation des flux d'eau bleue de surface pendant la période de septembre à avril provient de plusieurs phénomènes qui se conjuguent, mais qu'il est possible de différencier :

- i) L'augmentation de la précipitation moyenne hivernale, particulièrement marquée sur les reliefs, qui est induite par les projections climatiques utilisées (Ouzeau et al., 2014), ce qui impacte aussi les taux d'infiltration qui n'augmentent que pendant cette saison alors qu'ils sont en baisse le reste de l'année.
- ii) La diminution importante de la couverture de neige, qui est apparue très significative au cours de cette étude, vient augmenter le ruissellement et par suite les débits. Des épisodes de fonte plus fréquente au cours de l'hiver et du printemps dû à des enchaînements de précipitations solide puis liquide pourraient aussi venir jouer un rôle dans l'augmentation des débits d'une manière générale sur ces périodes, et des épisodes de débits extrêmes en particulier.
- iii) Les épisodes de précipitation extrême sont également en augmentation si l'on considère les données climatiques utilisées (Jacob et al., 2014; Ouzeau et al., 2014), ce qui a également été confirmé par la présente étude lors de la comparaison de SAFRAN et de l'ensemble climatique. D'après les études citées plus haut, ces épisodes de précipitations extrêmes sont en augmentation en automne et au printemps pour les événements de forte précipitation et en été pour les événements de faible précipitation, venant appuyer l'analyse de la hausse et de la baisse respective des écoulements pendant ces périodes. À noter que les données climatiques régionalisées de manière dynamique utilisées ici ont été montrées comme améliorant de manière substantielle la représentation des extrêmes par rapport aux modèles climatiques à plus grande échelle (Prein et al., 2015).
- iv) Le dernier des facteurs entrant en jeu est le modèle lui-même : la calibration ayant été réalisée sur des débits mensuels, il est probable que le modèle soit sensible à une augmentations des extrêmes journaliers de précipitation.

Si les précipitations extrêmes et les fontes de neige sont à l'origine de ces augmentations de débit d'eau bleue de surface, il s'agirait alors plutôt d'une « accélération » de cette partie du cycle hydrologique, avec des volumes plus importants, mais plus concentrés dans le temps. Cette accélération aurait donc comme effet une augmentation des débits de pointe journaliers, ce qui est confirmé par Roudier et al. (2015). Il est cependant très difficile de venir analyser cela avec le modèle hydrologique tel qu'il a été mis en place pour cette étude. En effet, l'étude des événements extrêmes nécessite une calibration journalière du modèle hydrologique, qui n'était pas celle réalisée dans cette étude qui s'intéressait davantage à une vision à long terme du cycle hydrologique.

Concernant la saison estivale, les résultats présentés en projection indiquent bien une baisse du débit sur une majorité du bassin versant, ce qui est également cohérent avec les études susmentionnées. La hausse des débits pendant cette période semble être restreinte à la zone pyrénéenne du bassin versant.

Les dernières composantes du cycle hydrologique sont les flux et le stock d'eau bleue souterrains. Si une légère baisse de ces derniers peut être relevée au travers de l'étude réalisée ici, les tendances ne semblent pas très significatives. Cela est en accord avec l'étude de Caballero et al. (2007) qui trouvent une relative stabilité des aquifères à l'horizon 2060, mais beaucoup moins marquée que celle qui peut être trouvée dans d'autres études telle que celle du projet EXPLORE 2070 (MEED, 2012c) tablant sur une nette diminution de la recharge et du stock. Il est important de noter que cette dernière étude est réalisée avec un modèle strictement hydrogéologique et que le modèle SWAT, s'il a permis une analyse de l'hydrosystème dans son ensemble, reste assez simple quant à la représentation des processus souterrains. En effet, plusieurs faiblesses du modèle SWAT peuvent être relevées quant à la représentation des flux souterrains :

- i) L'absence de représentation des flux d'eau de la rivière vers la nappe qui participe à la recharge de cette dernière, particulièrement dans la plaine de la moyenne Garonne. Dans la partie de la plaine alluviale du bassin, le flux d'eau de la rivière vers la nappe, non représenté avec la version de SWAT utilisée ici, a été estimé 50 % du volume du flux de la nappe vers la rivière, cela ayant un impact important sur la recharge de la nappe dans la plaine

alluviale (Sun, 2015; Sun et al., 2015). De même, L'absence de représentation des phénomènes de débordement des cours d'eau peut représenter jusqu'à 69% de la recharge des nappes alluviales connectées (Sun, 2015; Sun et al., 2015). En outre, la non-prise en compte de ce phénomène joue également un rôle dans l'augmentation des débits du bassin, puisque l'alimentation de la nappe par le réseau hydrographique lors des phénomènes de débordement en période de crue a également un effet de diminution des débits vers l'aval (Sun, 2015; Sun et al., 2015; Bernard-Jannin, 2016).

- ii) De même, les processus mis en jeu dans la simulation des eaux bleues souterraines sont très variables géographiquement, et n'ont pas fait l'objet d'une calibration spécifique en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque sous-bassin versant, ce qui n'a pas été réalisé ici. Si des données précises existent pour certaines parties du bassin notamment via le modèle hydrogéologique MARTHE (Thiéry, 1987) comme c'est le cas dans la plaine alluviale de la moyenne Garonne (MEED, 2012a), il reste très compliqué d'adapter au contexte hydrogéologique réel la calibration de chacun des ensembles de sous-bassins considérés dans la calibration en cascade réalisée pour cette étude. Cela représente l'une des limites de l'utilisation du modèle SWAT pour cette étude, qui reste un modèle conceptuel qui n'est pas fait pour simuler de manière précise les écoulements souterrains qui sont des processus très complexes.
- iii) Enfin, les prélèvements d'eau dans les nappes ne sont pas considérés ici, et pourraient avoir un impact important sur les ressources souterraines, notamment en liaison avec les besoins en irrigation et l'augmentation de la teneur en eau des sols et donc du passage de l'eau bleue à l'eau verte.

V Conclusion générale et perspectives

Cette thèse s'inscrit dans la recherche d'une approche de gestion intégrée de la ressource en eau à l'échelle régionale, permettant à la fois de comprendre les variations des différentes composantes du cycle hydrologique (eau verte et eau bleue) face à l'ensemble du système hydrologique, mais permettant également d'intégrer l'influence des changements climatiques sur ce système.

Pour répondre à ces objectifs, les travaux présentés dans ce document ont permis dans un premier temps de considérer l'usage d'un outil de modélisation hydrologique conceptuel semi-distribué, le *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) appliqué au bassin versant de la Garonne (France), site à la fois contrasté (hydrologiquement et structurellement) et largement étudié. Une première phase a permis de mettre en place le modèle sur le bassin versant et de souligner les points faibles de la modélisation réalisée en essayant au mieux de les corriger. Ainsi, le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Garonne étant très influencé par l'apport d'eau des reliefs que sont le Massif Central et les Pyrénées, un soin particulier a donc été apporté à la représentation de la neige sur le bassin versant. Cela a permis d'améliorer de manière substantielle la simulation des différents flux hydrologiques, non seulement dans les zones montagneuses, mais également dans le reste du bassin versant.

L'utilisation de données météorologiques maillées (SAFRAN) plutôt que des données colligées par les stations météorologiques conventionnelles a également fait l'objet d'une étude particulière. Cela a permis de mettre en évidence les avantages de la première, en particulier pour une représentation plus fine spatialement des intrants météorologiques utilisés par le modèle, et d'améliorer par là même les simulations hydrologiques produites. L'avantage de l'utilisation de cette grille de donnée météorologique n'est pas seulement lié à la qualité des simulations, mais permet également de disposer de longues chroniques afin de pouvoir convenablement calibrer et valider le modèle hydrologique en vue de son utilisation dans un contexte de projection climatique. En outre, les données climatiques fournies par Météo-France, issues de différents modèles climatiques, sont désagrégées sur cette même grille, ce qui permet de réduire également l'erreur due à la variation spatiale de la prise en compte des données d'entrée lors d'un usage en contexte de projection climatique.

Le modèle a ensuite été testé lors d'un exercice de calibration et validation croisées (*Differential split samplig test*) sur des périodes ayant des caractéristiques climatiques

différentes en terme de température et de précipitation, afin d'évaluer la robustesse du modèle et la méthode de calibration utilisée pour estimer l'effet possible de la transposition temporelle du modèle. Les résultats ont démontré que SWAT était faiblement influencé par cette transposition temporelle, tant en terme de performance hydrologique que dans la représentation des différents processus par le modèle.

Cette première étape a permis de mettre en place un outil adapté au besoin de l'étude. Par la suite, sa calibration avec l'outil SWAT-CUP à l'échelle des sous-bassins versants composant le territoire a mené à de très bonnes performances pour la de simulation des débits, que ce soit sur la période de calibration ou sur celle de validation (40 ans). Les simulations de ce modèle ont donc été la base d'une analyse de l'évolution des différents flux et stocks du bassin versant sur une période d'un siècle (1960-2050)

Les tendances les plus significatives qui ont été identifiées concernent l'eau verte du bassin versant, notamment le flux d'ET et la teneur en eau des sols. La première de ces deux composantes apparaît en nette hausse, sur l'ensemble de la période passée et future (1960-2050) et du territoire, toutes saisons confondues, alors que la teneur en eau des sols apparaît en baisse. Ces deux composantes sont essentielles à la gestion agricole du bassin versant, une activité importante, et leurs variations mettent en évidence une augmentation des périodes de sécheresse pédologique et donc des périodes pour lesquelles la demande en irrigation de cultures pourrait augmenter de manière sensible.

Les eaux bleues de surface (ruissellement, infiltration, subsurface et débit) ont montré des comportements différents suivant que l'on considère les périodes passée ou future. En effet, ces flux ont diminué en importance depuis le milieu du XXe siècle, de manière relativement homogène sur toute l'année. Cependant, elles pourraient connaître une augmentation assez substantielle dans le futur, particulièrement pendant l'automne et l'hiver, en raison de l'augmentation de la précipitation, mais également des événements de précipitations extrêmes simulés par les différents modèles climatiques. En modifiant les régimes d'écoulement, changements qui s'apparentent à une « accélération », ces variations sont également de première importance dans une vision de gestion à long terme, puisqu'elles influencent la gestion des ouvrages hydrauliques présents sur le bassin versant, notamment pour contrer les événements hydrologiques extrêmes. Ces variations sont également à relier à celles de l'eau verte dans le sens où une quantité plus importante d'eau va s'écouler directement dans le

réseau hydrographique, au détriment des ressources d'eau verte utiles à la végétation et à l'agriculture.

La variation du stock de neige apparaît importante, avec une diminution significative tout au long de la période étudiée. La diminution de ce stock de neige, qui normalement emmagasine de l'eau bleue pour la restituer durant le printemps et l'été participe donc également à l'accélération des écoulements en hiver notamment, puisque l'eau s'écoule toute l'année, sans être stockée naturellement de manière transitoire et/ou dans les barrages et donc sans restitution possible durant des périodes de faible pluviométrie.

Les dernières composantes que forment les flux d'eau souterrains (recharge de la nappe et transfert nappe-rivière) ainsi que le stock d'eau souterraine (aquifère) semble en légère baisse sans qu'une tendance marquée ne soit apparue dans les modélisations réalisées, notamment en raison des limites du modèle SWAT quant à la représentation de ces composantes souterraines.

Au final, ce travail a permis d'évaluer l'impact des variations des climats sur le cycle hydrologique et a posé les bases pour une prise en compte éventuelle, dans leur ensemble des règles de gestion de la ressource à l'échelle régionale.

Si l'étude réalisée a permis d'aboutir à des résultats concluants en termes d'analyse des variations hydrologiques, certaines améliorations pourraient être apportées pour permettre une analyse encore plus fine des impacts du changement climatique :

- i) La prise en compte de l'anthropisation sur le bassin versant, notamment les barrages, les prélèvements et l'irrigation, permettrait de représenter de manière encore plus précise le cycle hydrologique à l'échelle journalière cette fois-ci, en autorisant par exemple une calibration et une utilisation du modèle à un pas de temps journalier, voire infrajournalier, pour les phénomènes de crues rapides. Cela permettrait en outre d'estimer l'impact humain sur le cycle hydrologique et notamment lors des événements extrêmes (étiage et crues) et les effets induits par les activités anthropiques, par une comparaison des projets avec/sans prise en compte des activités humaines. En revanche, il faudrait également réussir à modéliser adéquatement ces règles de gestion afin de pouvoir les extrapoler correctement dans le futur, ce qui implique nécessairement de pouvoir

anticiper l'évolution des contraintes sociales, juridiques, économiques et environnementales qui les influencent.

- ii) Si les flux et stocks souterrains d'eau bleue n'ont pas montré de tendances marquées, cela peut être dû à certaines difficultés du modèle SWAT à représenter pleinement la partie souterraine de l'hydrologie. Cela pourrait être amélioré, par exemple, avec l'utilisation de nouveaux modules comme SWAT-LUD récemment proposé par Sun et al. (2015), qui permet l'amélioration de la représentation des échanges rivière-nappe dans le modèle. SWAT-LUD repose sur un nouveau découpage spatial des HRU incluant des sols alluviaux, permettant de connecter la rivière à la nappe alluviale et ainsi de prendre en compte les échanges décrits dans la discussion de la partie III de ce document. Cela aurait pour effet d'améliorer la représentation du stockage de l'eau dans la nappe alluviale, tout en atténuant la hausse des débits prévue en aval. Le calage du projet sur des valeurs journalières qui permettrait également de cibler plus spécifiquement l'effet des événements extrêmes de précipitation, qui nécessite une échelle de temps plus fine, et de valider l'accélération constatée des flux d'eau bleue de surface. Au demeurant, il faut aussi souligner que plusieurs recherches en cours portent sur une meilleure représentation de ces événements extrêmes par les modèles climatiques.
- iii) L'usage des outils de télédétections, tel qu'utilisé pour la calibration de la neige dans le chapitre 4 de cette thèse, pourrait être étendu et permettre la validation d'autres compartiments hydrologiques simulés par le modèle. C'est le cas des données SMOS ou GRACE. Les premières sont des mesures radiométriques permettant d'estimer la teneur en eau des sols (environ 5cm de pénétration). Les secondes sont des données gravimétriques permettant d'estimer l'ensemble des masses d'eau sur une colonne de détection donnée, ce qui pourrait notamment permettre d'aider à valider les volumes d'eau dans les aquifères.
- iv) L'analyse des variations des différents compartiments hydrologiques pourrait permettre de venir enrichir les études réalisées sur le rôle écologique de certains d'entre eux. Ainsi, le rôle écologique de la nappe alluviale et des sols sur les flux de carbone et de nitrate mis en évidence par Sun (2015) et Bernard-Jannin (2016) pourraient être transposés à l'échelle du bassin versant.

Bibliographie

- [1] SWAT Literature Database for Peer-Reviewed Journal Articles. Center for Agricultural and Rural development.
- [2] Abbaspour, K.C., 2013. SWAT-CUP 2012 : SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. , 103 pp.
- [3] Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S.S., Yang, H., 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research*, 45.
- [4] Abbaspour, K.C., Johnson, C.A., van Genuchten, M.T., 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4): 1340-1352.
- [5] Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Kløve, B., 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524: 733-752.
- [6] AEAG, 2014. GARONNE 2050 : Etude prospective sur les besoins et les ressources en eau, à l'échelle du bassin de la Garonne - Rapport final, AEAG.
- [7] Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., Forzieri, G., 2015. Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19(5): 2247-2260.
- [8] Anderson, E.A., 1976. A Point Energy and Mass Balance Model of a Snow Cover. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Hydrology.
- [9] Andreassian, V., Perrin, C., Berthet, L., Le Moine, N., Lerat, J., Loumagne, C., Oudin, L., Mathevet, T., Ramos, M.H., Valéry, A., 2009. Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*(13): p. 1757 - p. 1764.
- [10] Arnold, J.G., Allen, P.M., 1996. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of Hydrology*, 176(1-4): 57-77.
- [11] Arnold, J.G., Allen, P.M., Bernhardt, G., 1993. A Comprehensive Surface-Groundwater Flow Model. *Journal of Hydrology*, 142(1-4): 47-69.
- [12] Arnold, J.G., Fohrer, N., 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19(3): 563-572.
- [13] Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B., Neitsch, S.L., 2012a. Soil and Water Assessment Tool - Input/Output Documentation - version 2012.
- [14] Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N., Jha, M.K., 2012b. Swat: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the Asabe*, 55(4): 1491-1508.
- [15] Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Allen, P.M., 1999a. Continental Scale Simulation Of Hydrologic Balance. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(5): 1037-1051.
- [16] Arnold, J.G., Srinivasan, R., Ramanarayanan, T.S., DiLuzio, M., 1999b. Water resources of the Texas Gulf basin. *Water Sci Technol*, 39(3): 121-133.
- [17] ASTER, 2011. Global Digital Elevation Model V2 90x90m. In: NASA, METI (Eds.).

- [18] Awotwi, A., Yeboah, F., Kumi, M., 2015. Assessing the impact of land cover changes on water balance components of White Volta Basin in West Africa. *Water and Environment Journal*, 29(2): 259-267.
- [19] Barnett, T.P., Adam, J.C., Lettenmaier, D.P., 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066): 303-309.
- [20] Bernard-Jannin, L., 2016. Modélisation du processus de dénitrification dans les eaux souterraines des plaines alluviales, Université de Toulouse, 297 p pp.
- [21] Bieger, K., Hörmann, G., Fohrer, N., 2014. Simulation of Streamflow and Sediment with the Soil and Water Assessment Tool in a Data Scarce Catchment in the Three Gorges Region, China. *J. Environ. Qual.*, 43(1): 37-45.
- [22] Bingner, R.L., 1996. Runoff simulated from Goodwin Creek Watershed using SWAT. *Transactions of the Asae*, 39(1): 85-90.
- [23] Boe, J., Terray, L., 2008. A weather-type approach to analyzing winter precipitation in France: Twentieth-century trends and the role of anthropogenic forcing. *J Climate*, 21(13): 3118-3133.
- [24] Boithias, 2012. Modélisation des transferts de pesticides à l'échelle des bassins versants en période de crue Université Paul Sabatier Toulouse.
- [25] Boithias, L., Sauvage, S., Taghavi, L., Merlina, G., Probst, J.L., Perez, J.M.S., 2011. Occurrence of metolachlor and trifluralin losses in the Save river agricultural catchment during floods. *J Hazard Mater*, 196: 210-219.
- [26] Boone, A., Etchevers, P., 2001. An Intercomparison of Three Snow Schemes of Varying Complexity Coupled to the Same Land Surface Model: Local-Scale Evaluation at an Alpine Site. *Journal of Hydrometeorology*, 2(4): 374-394.
- [27] Brito, D., Campuzano, F.J., Sobrinho, J., Fernandes, R., Neves, R., 2015. Integrating operational watershed and coastal models for the Iberian Coast: Watershed model implementation – A first approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 167, Part A: 138-146.
- [28] Brulebois, E., Castel, T., Richard, Y., Chateau-Smith, C., Amiotte-Suchet, P., 2015. Hydrological response to an abrupt shift in surface air temperature over France in 1987/88. *Journal of Hydrology*, 531, Part 3: 892-901.
- [29] Brunet, R., Coppolani, J., 1970. Atlas Midi-Pyrenees. Berger-Levrault.
- [30] Butcher, J.B., 1999. Forecasting future land use for watershed assessment. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(3): 555-565.
- [31] Caballero, Y., Voirin-Morel, S., Habets, F., Noilhan, J., LeMoigne, P., Lehenaff, A., Boone, A., 2007. Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, 43(7).
- [32] Castellani, 1986. Régionalisation des précipitations annuelles par la méthode de la régression linéaire simple : l'exemple des Alpes du Nord. *Revue de géographie alpine*: 393-403.
- [33] Cattiaux, J., Douville, H., Peings, Y., 2013. European temperatures in CMIP5: origins of present-day biases and future uncertainties. *Clim Dynam*, 41(11-12): 2889-2907.
- [34] Ceppi, P., Scherrer, S.C., Fischer, A.M., Appenzeller, C., 2012. Revisiting Swiss temperature trends 1959–2008. *Int J Climatol*, 32(2): 203-213.

- [35] Chahed, J., Hamdane, A., Besbes, M., 2008. A comprehensive water balance of Tunisia: blue water, green water and virtual water. *Water Int*, 33(4): 415-424.
- [36] Chambre régionales d'agriculture Midi-Pyrénées, 2015. Tableau de bord de l'agriculture de Midi-Pyrénées 2014.
- [37] Chaouche, K., Neppel, L., Dieulin, C., Pujol, N., Ladouche, B., Martin, E., Salas, D., Caballero, Y., 2010. Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change. *Cr Geosci*, 342(3): 234-243.
- [38] Charbonneau, R., Fortin, J.P., Morin, G., 1977. The CEQUEAU Model: decription and exemples of its use in problems related to water resource management / Le modèle CEQUEAU: description et exemples d'utilisation dans le cadre de problèmes reliés à l'aménagement. *Hydrological Sciences Bulletin*, 22(1): 193-202.
- [39] Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.-Y., Sauquet, E., Vidal, J.-P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T., Maugis, P., De Lacaze, X., 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche*(4): 5-15.
- [40] Chea, R., 2012. Modélisation des transferts d'eau et des matière en suspension dans un continuum fluvial lors des événements extrêmes, Uni. of Toulouse.
- [41] Chen, J., Wu, Y., 2012. Advancing representation of hydrologic processes in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) through integration of the TOPographic MODEL (TOPMODEL) features. *Journal of Hydrology*, 420.
- [42] CHESS, 2001. *Climate, Hydrochemistry and Economics of Surface-water Systems*.
- [43] Chien, H.C., Yeh, P.J.F., Knauft, J.H., 2013. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States. *Journal of Hydrology*, 491: 73-88.
- [44] CLC, 1990. *Corine Land Cover In: EuropeanUnion* (Ed.).
- [45] CLC, 2006. *Corine Land Cover In: EuropeanUnion* (Ed.).
- [46] Coughlan, J., Running, S., 1997. Regional ecosystem simulation: A general model for simulating snow accumulation and melt in mountainous terrain. *Landscape Ecology*, 12(3): 119-136.
- [47] Courtier, P., Freydier, C., Geleyn, J., Rabier, F., Rochas, M., 1991. The arpege project at Meteo-France, ECMWF seminar proceedings, pp. 193-231.
- [48] Dai, A., 2011. Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1): 45-65.
- [49] de Almeida Bressiani, D., Srinivasan, R., Jones, C.A., Mendiando, E.M., 2015. Effects of different spatial and temporal weather data resolutions on the streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3).
- [50] DeBeer, C.M., Pomeroy, J.W., 2009. Modelling snow melt and snowcover depletion in a small alpine cirque, Canadian Rocky Mountains. *Hydrological Processes*, 23(18): 2584-2599.
- [51] Della-Marta, P.M., Haylock, M.R., Luterbacher, J., Wanner, H., 2007. Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D15): n/a-n/a.

- [52] Dessens, J., Bücher, A., 1997. A Critical Examination of the Precipitation Records at the Pic Du Midi Observatory, Pyrenees, France. In: Diaz, H., Beniston, M., Bradley, R. (Eds.), *Climatic Change at High Elevation Sites*. Springer Netherlands, pp. 113-121.
- [53] Detlef, P.v.V., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Weyant, J., 2011. A special issue on the RCPs. *Climatic Change*, 109(1-2): 1-4.
- [54] DHI, D.H.I., 1998. MIKE SHE Water Movement - User Guide and Technical Reference Manual.
- [55] Dile, Y.T., Srinivasan, R., 2014. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *Journal of the American Water Resources Association*, 50(5): 1226-1241.
- [56] Douglas-Mankin, K.R., Srinivasan, R., Arnold, J.G., 2010. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications. *Trans. Asabe*, 53(5): 1423-1431.
- [57] Douville, H., Chauvin, F., Planton, S., Royer, J.F., Salas-Méla, D., Tyteca, S., 2002. Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols. *Clim Dynam*, 20(1): 45-68.
- [58] Droogers, P., Allen, R.G., 2002. Estimating Reference Evapotranspiration Under Inaccurate Data Conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16(1): 33-45.
- [59] Dupeyrat, A., Agosta, C., Sauquet, E., Hendrickx, F., 2008. Sensibilité aux variations climatiques d'un bassin à fort enjeux - Cas de la Garonne, 13th IWRA world water congress, Montpellier, France.
- [60] Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarch, G., Lesaffre, B., Martin, E., 1993. A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of Glaciology*, Vol 18, 1993: Proceedings of the Symposium on Snow and Snow-Related Problems, 18: 65-71.
- [61] Dwyer, J., Schmidt, G., 2006. The MODIS Reprojection Tool. In: Qu, J., Gao, W., Kafatos, M., Murphy, R., Salomonson, V. (Eds.), *Earth Science Satellite Remote Sensing*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 162-177.
- [62] Earls, J., Dixon, B., 2008. A Comparison of SWAT Model-Predicted Potential Evapotranspiration Using Real and Modeled Meteorological Data. *Vadose Zone Journal*, 7(2).
- [63] Eckhardt, K., Ulbrich, U., 2003. Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *Journal of Hydrology*, 284(1-4): 244-252.
- [64] EEA, 2009. Water resources across Europe — confronting water scarcity and drought.
- [65] EEA, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012 - An indicator based report.
- [66] ESDB, 2006. european soil data base v2.0, 1kmx1km "dominant value and dominant STU" Rasters In: (EEA), E.u. (Ed.).
- [67] Etchevers, P., 2000. Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale. Impact de la modélisation de la neige sur l'hydrologie du Rhône, Univ. Toulouse III.
- [68] Fader, M., Rost, S., Muller, C., Bondeau, A., Gerten, D., 2010. Virtual water content of temperate cereals and maize: Present and potential future patterns. *Journal of Hydrology*, 384(3-4): 218-231.
- [69] Falkenmark, M., 1995. Land-water linkages : A synopsis in Land and Water integration and river basin management, Land and water bulletin-FAO pp. 16.

- [70] Falkenmark, M., 1997. Meeting water requirements of an expanding world population. *Philos T Roy Soc B*, 352(1356): 929-936.
- [71] Falkenmark, M., Rockström, J., 2004. Balancing water for humans and nature : the new approach in ecohydrology. Earthscan, London ; Sterling, VA, 247 pp.
- [72] Falkenmark, M., Rockström, J., 2005. Rain: The Neglected Resource. Swedish Water House Policy Brief, 2(SIWI).
- [73] Falkenmark, M., Rockström, J., 2006. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, 132(3).
- [74] Falkenmark, M., Rockström, J., 2010. Building Water Resilience in the Face of Global Change: From a Blue-Only to a Green-Blue Water Approach to Land-Water Management. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, 136(6): 606-610.
- [75] Faramarzi, M., Abbaspour, K.C., Schulin, R., Yang, H., 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes*, 23(3).
- [76] Fassnacht, S.R., Heun, C.M., Latrón, J., López Moreno, J.I., 2010. Variability of snow density measurements in the Río Esera Valley, Pyrenees Mountains, Spain. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 36(1): 59-72.
- [77] Ferrant, S., Durand, P., Justes, E., Probst, J.L., Sanchez-Perez, J.M., 2013. Simulating the long term impact of nitrate mitigation scenarios in a pilot study basin. *Agr Water Manage*, 124: 85-96.
- [78] Ferrant, S., Oehler, F., Durand, P., Ruiz, L., Salmon-Monviola, J., Justes, E., Dugast, P., Probst, A., Probst, J.L., Sanchez-Perez, J.M., 2011. Understanding nitrogen transfer dynamics in a small agricultural catchment: Comparison of a distributed (TNT2) and a semi distributed (SWAT) modeling approaches. *Journal of Hydrology*, 406(1-2): 1-15.
- [79] Fischer, J., 1932. Le régime de la Garonne pyrénéenne. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*: 281-354.
- [80] Fontaine, T.A., Cruickshank, T.S., Arnold, J.G., Hotchkiss, R.H., 2002. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *Journal of Hydrology*, 262(1-4): 209-223.
- [81] Fontaine, T.A., Klassen, J.F., Cruickshank, T.S., Hotchkiss, R.H., 2001. Hydrological response to climate change in the Black Hills of South Dakota, USA. *Hydrological Sciences Journal*, 46(1): 27-40.
- [82] Fuka, D.R., Walter, M.T., MacAlister, C., Degaetano, A.T., Steenhuis, T.S., Easton, Z.M., 2014. Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*, 28(22): 5613-5623.
- [83] Gaborit, É., Anctil, F., Fortin, V., Pelletier, G., 2013. On the reliability of spatially disaggregated global ensemble rainfall forecasts. *Hydrological Processes*, 27(1): 45-56.
- [84] Gandin, L.S., 1963. Objective analysis of meteorological fields (In Russian). *Gidrometeoizdat*, 238 pp. [Israel Program for Scientific Translations, 1965, 242 pp.], Jerusalem.
- [85] Garen, D.C., Marks, D., 1996. spatially distributed snow modelling in mountainous regions: boise river application, *HydroGIS 96: application of geographic information systems in hydrology and water ressources management.*, Vienna.

- [86] Gascoin, S., Hagolle, O., Huc, M., Jarlan, L., Dejoux, J.F., Szczypka, C., Marti, R., Sánchez, R., 2015. A snow cover climatology for the Pyrenees from MODIS snow products. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, in press(11): 12531-12571.
- [87] Gassman, P.W., Osei, E., Saleh, A., Hauck, L.M., 2002. Application of an environmental and economics modeling system for watershed assessments. *Journal of the American Water Resources Association*, 38(2): 423-438.
- [88] Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., Arnold, J.G., 2007. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Trans. Asabe*, 50(4).
- [89] Gassman, P.W., Sadeghi, A.M., Srinivasan, R., 2014. Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. *J. Environ. Qual.*, 43(1): 1-8.
- [90] Githui, F.W., 2008. Assessing the Impacts of Environmental Change on the Hydrology of the Nzoia Catchment, in the Lake Victoria Basin, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.
- [91] Glavan, M., Pintar, M., Volk, M., 2013. Land use change in a 200-year period and its effect on blue and green water flow in two Slovenian Mediterranean catchments—lessons for the future. *Hydrological Processes*, 27(26): 3964-3980.
- [92] Gosain, A.K., Rao, S., Arora, A., 2011. Climate change impact assessment of water resources of India. *Curr Sci India*, 101(3): 356-371.
- [93] Green, H.W., Ampt, G.A., 1911. Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(01): 1-24.
- [94] Gruneawald, D., Scheithauer, J., 2010. Europe's southernmost glaciers: response and adaptation to climate change. *Journal of glaciology*, 56(195).
- [95] Grusson, Y., Sun, X., Gascoin, S., Sauvage, S., Raghavan, S., Anctil, F., Sanchez Pérez, J.M., 2015. Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and streamflow dynamics over an alpine watershed. *Journal of Hydrology*, 531(3): 574–588.
- [96] Gurtz, J., Lang, H., Verbunt, M., Zappa, M., 2005. The Use of Hydrological Models for the Simulation of Climate Change Impacts on Mountain Hydrology. In: Huber, U., Bugmann, H.M., Reasoner, M. (Eds.), *Global Change and Mountain Regions. Advances in Global Change Research*. Springer Netherlands, pp. 343-354.
- [97] Gutowski, W.J., Gutzler, D.S., Wang, W.-C., 1991. Surface Energy Balances of Three General Circulation Models: Implications for Simulating Regional Climate Change. *J Climate*, 4(2): 121-134.
- [98] Habets, F., Boone, A., Champeaux, J.L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Seguí, P., Rousset-Regimbeau, F., Viennot, P., 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D6).
- [99] Habets, F., Etchevers, P., Golaz, C., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Noilhan, J., Ottlé, C., 1999. Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D24): 31145-31172.
- [100] Hall, D.K., Riggs, G.A., 2007. Accuracy assessment of the MODIS snow products. *Hydrological Processes*, 21(12): 1534-1547.

- [101] Hall, D.K., Salomonson, V.V., Riggs, G.A., 2006. MODIS/Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500m Grid, Version 5. In: *Journal of Climate*, C.U.N.S.a.I.D.C. (Ed.).
- [102] Hanasaki, N., Inuzuka, T., Kanae, S., Oki, T., 2010. An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model. *Journal of Hydrology*, 384(3-4): 232-244.
- [103] Hanratty, M.P., Stefan, H.G., 1998. Simulating climate change effects in a Minnesota agricultural watershed. *J Environ Qual*, 27(6): 1524-1532.
- [104] Hargreaves, G.H., 1975. Moisture availability and crop production. *Transactions of the ASAE*, 18(5): 980-994.
- [105] Hendrickx, F., Sauquet, E., 2013. Impact of warming climate on water management for the Ariège River basin (France). *Hydrological Sciences Journal*, 58(5): 976-993.
- [106] Her, Y., Frankenberger, J., Chaubey, I., Srinivasan, R., 2015. Threshold effects in HRU definition of the Soil and Water Assessment Tool. *Transactions of the ASAE*, 58(2): 367-378.
- [107] Hirsch, R.M., Slack, J.R., Smith, R.A., 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18(1): 107-121.
- [108] Hoff, H., Falkenmark, M., Gerten, D., Gordon, L., Karlberg, L., Rockstrom, J., 2010. Greening the global water system. *Journal of Hydrology*, 384(3-4): 177-186.
- [109] Hong, W., Park, M., Park, J., Park, G., Kim, S., 2010. The spatial and temporal correlation analysis between MODIS NDVI and SWAT predicted soil moisture during forest NDVI increasing and decreasing periods. *KSCE J Civ Eng*, 14(6): 931-939.
- [110] Houet, T., Loveland, T., Hubert-Moy, L., Gaucherel, C., Napton, D., Barnes, C., Sayler, K., 2010. Exploring subtle land use and land cover changes: a framework for future landscape studies. *Landscape Ecology*, 25(2): 249-266.
- [111] Huang, F., Li, B.G., 2010a. Assessing grain crop water productivity of China using a hydro-model-coupled-statistics approach Part I: Method development and validation. *Agr Water Manage*, 97(7): 1077-1092.
- [112] Huang, F., Li, B.G., 2010b. Assessing grain crop water productivity of China using a hydro-model-coupled-statistics approach. Part II: Application in breadbasket basins of China. *Agr Water Manage*, 97(9): 1259-1268.
- [113] Huang, S., Krysanova, V., Hattermann, F., 2015. Projections of climate change impacts on floods and droughts in Germany using an ensemble of climate change scenarios. *Reg Environ Change*, 15(3): 461-473.
- [114] Hunink, J.E., Droogers, P., Kauffman, S., Mwaniki, B.M., Bouma, J., 2012. Quantitative simulation tools to analyze up- and downstream interactions of soil and water conservation measures: Supporting policy making in the Green Water Credits program of Kenya. *Journal of Environmental Management*, 111: 187-194.
- [115] IPCC, 1990. Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group II, IPCC.
- [116] IPCC, 1992. Climate Change 1992: The Supplementary Report to the GIEC Scientific Assessment, Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group

- I combined with Supporting Scientific Material [J.T. Houghton, B.A. Callander and S.K. Varney (eds.)].
- [117] IPCC, 2000. Special report on emissions scenarios [Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.)].
- [118] IPCC, 2007. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - Synthesis Report.
- [119] IPCC, 2008. Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. IPCC expert meeting report, 19-21 september 2007, Noordwijkerhout, The Netherlands, 155 pp.
- [120] IPCC, 2013. 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.)], 1535 pp.
- [121] IPCC, 2014a. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.
- [122] IPCC, 2014b. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 pp.
- [123] IPCC, 2014c. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [124] Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O., Bouwer, L., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2014. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change*, 14(2): 563-578.
- [125] Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G., 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE.
- [126] Jewitt, G., 2006. Integrating blue and green water flows for water resources management and planning. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31(15-16): 753-762.
- [127] Jha, M., Pan, Z.T., Takle, E.S., Gu, R., 2004. Impacts of climate change on streamflow in the Upper Mississippi River Basin: A regional climate model perspective. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 109(D9).

- [128] Jha, M.K., Arnold, J.G., Gassman, P.W., Giorgi, F., Gu, R.R., 2006. Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi river basin streamflows using SWAT Journal of the American Water Resources Association, 42(4): 997-1015.
- [129] Jha, M.K., Gassman, P.W., 2013. Changes in hydrology and streamflow as predicted by a modelling experiment forced with climate models. Hydrological Processes.
- [130] Jiménez Cisneros, B.E., Oki, T., Arnell, N.W., Benito, G., Cogley, J.G., Döll, P., Jiang, T., Mwakalila, S.S., 2014. Freshwater resources. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA,, pp. 229-269.
- [131] Kalogeropoulos, K., Chalkias, C., 2012. Modelling the impacts of climate change on surface runoff in small Mediterranean catchments: empirical evidence from Greece. Water and Environment Journal.
- [132] Kannan, N., White, S.M., Worrall, F., Whelan, M.J., 2007. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000. Journal of Hydrology, 332(3–4): 456-466.
- [133] Kendall, M.G., 1975. Rank correlation methods. Griffin, Oxford, England.
- [134] Kessler, J., Chambraud, A., 1990. Météo de la France: tous les climats localité par localité. Lattès.
- [135] Kirchner, M., Faus-Kessler, T., Jakobi, G., Leuchner, M., Ries, L., Scheel, H.-E., Suppan, P., 2013. Altitudinal temperature lapse rates in an Alpine valley: trends and the influence of season and weather patterns. Int J Climatol, 33(3): 539-555.
- [136] Kjellström, E., Nikulin, G., Hansson, U.L.F., Strandberg, G., Ullerstig, A., 2011. 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations. Tellus A, 63(1): 24-40.
- [137] Klein, A.G., Barnett, A.C., 2003. Validation of daily MODIS snow cover maps of the Upper Rio Grande River Basin for the 2000–2001 snow year. Remote Sens Environ, 86(2): 162-176.
- [138] Klein Tank, A.M.G., Können, G.P., 2003. Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946–99. J Climate, 16(22): 3665-3680.
- [139] Klein Tank, A.M.G., Können, G.P., Selten, F.M., 2005. Signals of anthropogenic influence on European warming as seen in the trend patterns of daily temperature variance. Int J Climatol, 25(1): 1-16.
- [140] Klein Tank, A.M.G., Wijngaard, J.B., Können, G.P., Böhm, R., Demarée, G., Gocheva, A., Mileta, M., Pashiardis, S., Hejkrlik, L., Kern-Hansen, C., Heino, R., Bessemoulin, P., Müller-Westermeier, G., Tzanakou, M., Szalai, S., Pálsdóttir, T., Fitzgerald, D., Rubin, S., Capaldo, M., Maugeri, M., Leitass, A., Bukantis, A., Aberfeld, R., van Engelen, A.F.V., Forland, E., Miletus, M., Coelho, F., Mares, C., Razuvaev, V., Niepova, E., Cegnar, T., Antonio López, J., Dahlström, B., Moberg, A., Kirchhofer, W., Ceylan, A., Pachaliuk, O., Alexander, L.V., Petrovic, P., 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. Int J Climatol, 22(12): 1441-1453.

- [141] Klemeš, V., 1986. Operational Testing of Hydrological Simulation-Models. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 31(1): 13-24.
- [142] Konar, M., Dalin, C., Hanasaki, N., Rinaldo, A., Rodriguez-Iturbe, I., 2012. Temporal dynamics of blue and green virtual water trade networks. *Water Resources Research*, 48.
- [143] Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O.B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V., 2014. Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci. Model Dev.*, 7(4): 1297-1333.
- [144] Kovats, R.S., Valentini, R., Bouwer, L.M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M., Soussana, J.F., 2014. Europe. In: Barros, V.R. et al. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1267-1326.
- [145] Krause, P., Boyle, D., Bäse, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5: 89-97.
- [146] Lévesque, É., Anctil, F., Van Griensven, A., Beauchamp, N., 2008. Evaluation of streamflow simulation by SWAT model for two small watersheds under snowmelt and rainfall. *Hydrological Sciences Journal*, 53(5): 961-976.
- [147] Lin, B., Chen, X., Yao, H., Chen, Y., Liu, M., Gao, L., James, A., 2015. Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. *Ecol Indic*, 58: 55-63.
- [148] Liu, X., Ren, L., Yuan, F., Singh, V.P., Fang, X., Yu, Z., Zhang, W., 2009. Quantifying the effect of land use and land cover changes on green water and blue water in northern part of China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6): 735-747.
- [149] Liu, Z., Mehran, A., Phillips, T.J., AghaKouchak, A., 2014. Seasonal and regional biases in CMIP5 precipitation simulations. *Climate Research*, 60(1): 35-50.
- [150] Livneh, B., Bohn, T.J., Pierce, D.W., Munoz-Arriola, F., Nijssen, B., Vose, R., Cayan, D.R., Brekke, L., 2015. A spatially comprehensive, hydrometeorological data set for Mexico, the U.S., and Southern Canada 1950–2013. *Scientific Data*, 2.
- [151] López-Moreno, J.I., 2005. Recent Variations of Snowpack Depth in the Central Spanish Pyrenees. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(2): 253-260.
- [152] Lopez-Moreno, J.I., Fassnacht, S.R., Heath, J.T., Musselman, K.N., Revuelto, J., Latron, J., Moran-Tejeda, E., Jonas, T., 2013. Small scale spatial variability of snow density and depth over complex alpine terrain: Implications for estimating snow water equivalent. *Adv Water Resour*, 55: 40-52.
- [153] Luo, Y., Arnold, J., Allen, P., Chen, X., 2012. Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16(4): 1259-1267.
- [154] Magand, C., Ducharme, A., Le Moine, N., Gascoin, S., 2013. Introducing Hysteresis in Snow Depletion Curves to Improve the Water Budget of a Land Surface Model in an Alpine Catchment. *Journal of Hydrometeorology*, 15(2): 631-649.
- [155] Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*: 245-259.

- [156] Mapfumo, E., Chanasyk, D.S., Willms, W.D., 2004. Simulating daily soil water under foothills fescue grazing with the soil and water assessment tool model (Alberta, Canada). *Hydrological Processes*, 18(15): 2787-2800.
- [157] Maranda, B., Anctil, F., 2015. SWAT Performance as Influenced by Potential Evapotranspiration Formulations in a Canadian Watershed. *Transactions of the ASABE*, 58(6): 1585-1600.
- [158] Mariotti, A., Dell'Aquila, A., 2012. Decadal climate variability in the Mediterranean region: roles of large-scale forcings and regional processes. *Clim Dynam*, 38(5-6): 1129-1145.
- [159] Maris, M.N.A., Giraud, G., Durand, Y., Navarre, J.P., Merindol, L., 2009. Results of 50 years of climate reanalysis in the French Pyrenees (1958-2008) using the SAFRAN and CROCUS models. *Issw 09 Europe: International Snow Science Workshop, Proceedings*: 219-223.
- [160] Martelloni, G., Segoni, S., Lagomarsino, D., Fanti, R., Catani, F., 2012. Snow Accumulation-Melting Model (SAMM) for integrated use in regional scale landslide early warning systems. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9(8): 9391-9423.
- [161] Martin, E., Gascoin, S., Grusson, Y., Murgue, C., Bardeau, M., Anctil, F., Ferrant, S., Lardy, R., Moigne, P., Leenhardt, D., Rivalland, V., Sánchez Pérez, J.-M., Sauvage, S., Therond, O., 2016. On the Use of Hydrological Models and Satellite Data to Study the Water Budget of River Basins Affected by Human Activities: Examples from the Garonne Basin of France. *Surv Geophys*: 1-25.
- [162] McKay, M.D., Beckman, R.J., Conover, W.J., 1979. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*, 21(2): 239-245.
- [163] MEED, 2012a. Explore 2070 - Modelisation des aquifères du bassin Aquitain.
- [164] MEED, 2012b. Explore 2070 - Rapport de synthèse - Hydrologie de surface.
- [165] MEED, 2012c. Explore 2070 - Rapport de synthèse - Hydrologie souterraine.
- [166] Merz, R., Parajka, J., Blöschl, G., 2011. Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses. *Water Resources Research*, 47(2).
- [167] MetOffice, 2011. Climate: Observation, projections and impacts - france.
- [168] Michelangeli, P.A., Vrac, M., Loukos, H., 2009. Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions. *Geophys Res Lett*, 36(11).
- [169] Minder, J.R., Mote, P.W., Lundquist, J.D., 2010. Surface temperature lapse rates over complex terrain: Lessons from the Cascade Mountains. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(14).
- [170] Miquel, C., 2012. Etude préliminaire sur les changements climatiques dans le massif des pyrénées : caractérisation et effets prévisibles sur la ressource en eau., Université de Montpellier II.
- [171] Mitchell, T.D., Jones, P.D., 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int J Climatol*, 25(6): 693-712.
- [172] Moberg, A., Jones, P.D., Lister, D., Walther, A., Brunet, M., Jacobeit, J., Alexander, L.V., Della-Marta, P.M., Luterbacher, J., Yiou, P., Chen, D., Klein Tank, A.M.G., Saladié, O., Sigró, J., Aguilar, E., Alexandersson, H., Almaraz, C., Auer, I., Barriendos, M., Begert, M., Bergström, H., Böhm, R., Butler, C.J., Caesar, J., Drebs, A., Founda, D., Gerstengarbe, F.-W., Micela, G., Maugeri, M., Österle, H., Pandzic, K., Petrakis, M., Srncic, L., Tolasz, R., Tuomenvirta, H.,

- Werner, P.C., Linderholm, H., Philipp, A., Wanner, H., Xoplaki, E., 2006. Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901–2000. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(22).
- [173] Moisselin, J.-M., Schneider, M., Canellas, C., 2002. Les changements climatiques en France au XX^e siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations.
- [174] Moisselin, J.M., Dubuisson, B., 2006. Évolution des valeurs extrêmes de température et de précipitations au cours du XX^e siècle en France. *La météorologie*, 54.
- [175] Monteiro, J.A.F., Strauch, M., Srinivasan, R., Abbaspour, K., Gücker, B., 2015. Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. *Hydrological Processes*.
- [176] Monteith, J., 1965. Evaporation and environment, *Symp. Soc. Exp. Biol.*, pp. 4.
- [177] Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the Asabe*, 50(3): 885-900.
- [178] Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282): 747-756.
- [179] Mulvany, 1850. On the use of self registering rain and flood gauges. *Inst. Civ. Eng. Proc.*, 4: 1-8.
- [180] Musau, J., Sang, J., Gathenya, J., Luedeling, E., 2015. Hydrological responses to climate change in Mt. Elgon watersheds. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3: 233-246.
- [181] Narasimhan, B., Srinivasan, R., 2005. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agr Forest Meteorol*, 133(1-4): 69-88.
- [182] Narasimhan, B., Srinivasan, R., Arnold, J.G., Di Luzio, M., 2005. Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data. *Transactions of the Asae*, 48(3): 1101-1113.
- [183] Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(03): 282-290.
- [184] Natkhin, M., Dietrich, O., Schäfer, M., Lischeid, G., 2013. The effects of climate and changing land use on the discharge regime of a small catchment in Tanzania. *Reg Environ Change*: 1-12.
- [185] Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2002. Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation - version 2000.
- [186] Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2005. Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation - version 2005.
- [187] Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2011. Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation - version 2009.

- [188] Nicholls, N., 2001. commentary and analysis: The Insignificance of Significance Testing. *B Am Meteorol Soc*, 82(5): 981-986.
- [189] Noilhan, J., Mahfouf, J.F., 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change*, 13(1-4): 145-159.
- [190] Noilhan, J., Planton, S., 1989. A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Mon Weather Rev*, 117(3): 536-549.
- [191] Nunes, J.P., Seixas, J., Keizer, J.J., 2013. Modeling the response of within-storm runoff and erosion dynamics to climate change in two Mediterranean watersheds: A multi-model, multi-scale approach to scenario design and analysis. *Catena*, 102(0): 27-39.
- [192] Oeurng, C., Sauvage, S., Coynel, A., Maneux, E., Etcheber, H., Sanchez-Perez, J.M., 2011a. Fluvial transport of suspended sediment and organic carbon during flood events in a large agricultural catchment in southwest France. *Hydrological Processes*, 25(15): 2365-2378.
- [193] Oeurng, C., Sauvage, S., Sanchez-Perez, J.M., 2010. Temporal variability of nitrate transport through hydrological response during flood events within a large agricultural catchment in south-west France. *Sci Total Environ*, 409(1): 140-149.
- [194] Oeurng, C., Sauvage, S., Sanchez-Perez, J.M., 2011b. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal of Hydrology*, 401(3-4): 145-153.
- [195] Onuşluel Gül, G., Rosbjerg, D., 2010. Modelling of hydrologic processes and potential response to climate change through the use of a multisite SWAT. *Water and Environment Journal*, 24(1): 21-31.
- [196] Oudin, L., Andréassian, V., Mathevet, T., Perrin, C., Michel, C., 2006. Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research*, 42(7).
- [197] Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1-4): 290-306.
- [198] Ouyang, W., Hao, F., Skidmore, A.K., Toxopeus, A.G., 2010. Soil erosion and sediment yield and their relationships with vegetation cover in upper stream of the Yellow River. *Sci Total Environ*, 409(2): 396-403.
- [199] Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, P., Vautard, R., Jouzel, J., 2014. Le climat de la France au 21^e siècle : actualisation des projections, Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC).
- [200] Pagès, M., Miró, J.R., 2010. Determining temperature lapse rates over mountain slopes using vertically weighted regression: a case study from the Pyrenees. *Meteorological Applications*, 17(1): 53-63.
- [201] Palamuleni, L., Ndomba, P., Annegarn, H., 2011. Evaluating land cover change and its impact on hydrological regime in Upper Shire river catchment, Malawi. *Reg Environ Change*, 11(4): 845-855.

- [202] Palazón, L., Navas, A., 2014. Modeling sediment sources and yields in a Pyrenean catchment draining to a large reservoir (Ésera River, Ebro Basin). *Journal of Soils and Sediments*, 14(9): 1612-1625.
- [203] Parajka, J., Blöschl, G., 2008. Spatio-temporal combination of MODIS images – potential for snow cover mapping. *Water Resources Research*, 44(3): W03406.
- [204] Pardé, M., 1936. Le régime de la Garonne. *Revue de géographie alpine*: 254-258.
- [205] Park, M., Ha, R., Kim, N., Lim, K., Kim, S., 2013. Assessment of future climate and vegetation canopy change impacts on hydrological behavior of Chungju dam watershed using SWAT model. *KSCE J Civ Eng*: 1-12.
- [206] Pepin, N., Kidd, D., 2006. Spatial temperature variation in the Eastern Pyrenees. *Weather*, 61(11): 300-310.
- [207] Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1–4): 275-289.
- [208] Pinglot, F., 2012. Mountainous river stream flow modeling via ArcSWAT: a challenge, Univ. Toulouse III.
- [209] Piniewski, M., Voss, F., Bärlund, I., Okruszko, T., Kundzewicz, Z.W., 2013. Effect of modelling scale on the assessment of climate change impact on river runoff. *Hydrological Sciences Journal*, 58(4): 737-754.
- [210] Pradhan, N.S., Sijapati, S., Bajracharya, S.R., 2015. Farmers' responses to climate change impact on water availability: insights from the Indrawati Basin in Nepal. *Int J Water Resour D*, 31(2): 269-283.
- [211] Pradhanang, S.M., Anandhi, A., Mukundan, R., Zion, M.S., Pierson, D.C., Schneiderman, E.M., Matonse, A., Frei, A., 2011. Application of SWAT model to assess snowpack development and streamflow in the Cannonsville watershed, New York, USA. *Hydrological Processes*, 25(21): 3268-3277.
- [212] Prein, A.F., Gobiet, A., Truhetz, H., Keuler, K., Goergen, K., Teichmann, C., Fox Maule, C., Meijgaard, E., Déqué, M., Nikulin, G., Vautard, R., Colette, A., Kjellström, E., Jacob, D., 2015. Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11° and 0.44° simulations: high resolution, high benefits? *Clim Dynam*, 46(1): 383-412.
- [213] Probst, J.L., 1983. Hydrologie du bassin de la Garonne : Modèles de Mélange, Bilan de l'Erosion, Exportation des Nitrates et des Phosphates, Univ. Toulouse.
- [214] Quilbé, R., Rousseau, A.N., Moquet, J.S., Savary, S., Ricard, S., Garbouj, M.S., 2008. Hydrological responses of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12(1): 101-110.
- [215] Quintana-Segui, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S., 2008. Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France. *J Appl Meteorol Clim*, 47(1): 92-107.
- [216] Radeloff, V.C., Nelson, E., Plantinga, A.J., Lewis, D.J., Helmers, D., Lawler, J.J., Withey, J.C., Beaudry, F., Martinuzzi, S., Butsic, V., Lonsdorf, E., White, D., Polasky, S., 2011. Economic-based projections of future land use in the conterminous United States under alternative policy scenarios. *Ecol Appl*, 22(3): 1036-1049.

- [217] Rahman, K., Maringanti, C., Beniston, M., Widmer, F., Abbaspour, K., Lehmann, A., 2013. Streamflow Modeling in a Highly Managed Mountainous Glacier Watershed Using SWAT: The Upper Rhone River Watershed Case in Switzerland. *Water Resour Manag*, 27(2): 323-339.
- [218] Ramos, M.C., Martínez-Casasnovas, J.A., 2015. Climate change influence on runoff and soil losses in a rainfed basin with Mediterranean climate. *Nat Hazards*, 78(2): 1065-1089.
- [219] Raposo, J., Dafonte, J., Molinero, J., 2013. Assessing the impact of future climate change on groundwater recharge in Galicia-Costa, Spain. *Hydrogeol J*, 21(2): 459-479.
- [220] Reynolds, R.W., Smith, T.M., Liu, C., Chelton, D.B., Casey, K.S., Schlax, M.G., 2007. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *J Climate*, 20(22): 5473-5496.
- [221] Rijckborst, H., 1967. Hydrology of the Upper-Garonne Basin, Valle de Arán, Spain. J. J. Groen & Zoon.
- [222] Ritchie, J.T., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water resources research*, 8(5): 1204-1213.
- [223] Rockström, J., 1997. On-farm agrohydrological analysis of the Sahelian yield crisis: rainfall partitioning, soil nutrients and water use efficiency of pearl millet. PhD thesis in Natural Resource Management, Stockholm University.
- [224] Rockström, J., 1999. On-farm green water estimates as a tool for increased food production in water scarce regions. *Physics and Chemistry of the Earth Part B-Hydrology Oceans and Atmosphere*, 24(4): 375-383.
- [225] Rockstrom, J., Falkenmark, M., 2000. Semiarid crop production from a hydrological perspective: Gap between potential and actual yields. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 19(4): 319-346.
- [226] Rockstrom, J., Gordon, L., 2001. Assessment of green water flows to sustain major biomes of the world: Implications for future ecohydrological landscape management. *Physics and Chemistry of the Earth Part B-Hydrology Oceans and Atmosphere*, 26(11-12).
- [227] Rosenberg, N., Epstein, D., Wang, D., Vail, L., Srinivasan, R., Arnold, J., 1999. Possible impacts of global warming on the hydrology of the Ogallala aquifer region. *Climatic Change*, 42(4): 677-692.
- [228] Rosenthal, W.D., Srinivasan, R., Arnold, J.G., 1995. Alternative river management using a linked GIS-hydrology model. *Trans. ASAE*, 38(3): 783-790.
- [229] Roudier, P., Andersson, J.M., Donnelly, C., Feyen, L., Greuell, W., Ludwig, F., 2015. Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming. *Climatic Change*: 1-15.
- [230] Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.-T., Chuang, H.-Y., Juang, H.-M.H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Van Delst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., Van Den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.-K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.-Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R.W., Rutledge, G., Goldberg, M., 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *B Am Meteorol Soc*, 91(8): 1015-1057.
- [231] Sauquet, E., Dupeyrat, A., Hendrickx, F., Perrin, C., Samie, R., Vidal, J.P., 2010. IMAGINE 2030, climat et aménagements de la Garonne : quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030?

- (IMAGINE 2030, climate and water management: uncertainties on water resources for the Garonne river basin in 2030?), IRSTEA.
- [232] Savary, S., Rousseau, A., Quilbé, R., 2009. Assessing the Effects of Historical Land Cover Changes on Runoff and Low Flows Using Remote Sensing and Hydrological Modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(6): 575-587.
- [233] Savenije, H.H.G., 1999. The role of Green water in food production in sub-Saharan Africa, *Water for food in sub-Saharan Africa*, FAO, Roma.
- [234] Savenije, H.H.G., 2004. The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary. *Hydrological Processes*, 18(8).
- [235] Schuol, J., Abbaspour, K.C., Srinivasan, R., Yang, H., 2008a. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 352(1-2): 30-49.
- [236] Schuol, J., Abbaspour, K.C., Yang, H., Srinivasan, R., Zehnder, A.J.B., 2008b. Modeling blue and green water availability in Africa. *Water Resources Research*, 44(7).
- [237] Scibek, J., Allen, D.M., 2006. Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels. *Water Resources Research*, 42(11): W11405.
- [238] Seiller, G., Anctil, F., Perrin, C., 2012. Multimodel evaluation of twenty lumped hydrological models under contrasted climate conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4): 1171-1189.
- [239] Seiller, G., Hajji, I., Anctil, F., 2015. Improving the temporal transposability of lumped hydrological models on twenty diversified U.S. watersheds. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3: 379-399.
- [240] Sen, P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324): 1379-1389.
- [241] Sherman, L.K., 1932. Streamflow from rainfall by the unit graph method. *Engng News Record*, 108: 501-505.
- [242] Son, K.H., Kim, J.K., 2008. Application of Proxy-basin Differential Split-Sampling and Blind-Validation Tests for Evaluating Hydrological Impact of Climate Change Using SWAT. *Journal of Korea Water Resources Association*, 41(10): pp. 969-982.
- [243] Soubeyroux, J.-M., Kitova, N., Blanchard, M., Vidal, J.-P., Martin, E., Dandin, P., 2012. Sécheresses des sols en France et changement climatique : Résultats et applications du projet ClimSec. *La Météorologie*, 78.
- [244] Soubeyroux, J.-M., Vidal, J.-P., Baillon, M., Blanchard, M., Ceron, J.-P., Franchistéguy, L., Régimbeau, F., Martin, E., Vincendon, J.-C., 2010. Caractérisation et prévision des sécheresses et étiages en France à partir de la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou. *La Houille Blanche*(5): 30-39.
- [245] Soubeyroux, J.M., Vidal, J.P., Najac, J., Kitova, N., Blanchard, M., Dandin, P., Martin, E., Pagé, C., Habets, F., 2011. Projet ClimSec Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final du projet
- [246] Srinivasan, R., 2013. Soil and Water Assessment Tool - Introductory Manual - version 2012.

- [247] Stahl, K., Hisdal, H., Hannaford, J., Tallaksen, L.M., van Lanen, H.A.J., Sauquet, E., Demuth, S., Fendekova, M., Jódar, J., 2010. Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 7(4): 5769-5804.
- [248] Stefanova, A., Krysanova, V., Hesse, C., Lillebø, A.I., 2014. Climate change impact assessment on water inflow to a coastal lagoon: the Ria de Aveiro watershed, Portugal. *Hydrological Sciences Journal*, 60(5): 929-948.
- [249] Stehr, A., Debels, P., Arumi, J.L., Romero, F., Alcayaga, H., 2009. Combining the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and MODIS imagery to estimate monthly flows in a data-scarce Chilean Andean basin. *Hydrological Sciences Journal*, 54(6): 1053-1067.
- [250] Stockle, C.O., Dyke, P.T., Williams, J.R., Jones, C.A., Rosenberg, N.J., 1992a. A Method for Estimating the Direct and Climatic Effects of Rising Atmospheric Carbon-Dioxide on Growth and Yield of Crops. 2) Sensitivity Analysis at 3 Sites in the Midwestern USA. *Agr Syst*, 38(3): 239-256.
- [251] Stockle, C.O., Williams, J.R., Rosenberg, N.J., Jones, C.A., 1992b. A Method for Estimating the Direct and Climatic Effects of Rising Atmospheric Carbon-Dioxide on Growth and Yield of Crops. 1) Modification of the Epic Model for Climate Change Analysis. *Agr Syst*, 38(3): 225-238.
- [252] Stone, M.C., Hotchkiss, R.H., Hubbard, C.M., Fontaine, T.A., Mearns, L.O., Arnold, J.G., 2001. Impact of climate change on missouri river basin water yield. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5): 1119-1129.
- [253] Stone, M.C., Hotchkiss, R.H., Mearns, L.O., 2003. Water yield responses to high and low spatial resolution climate change scenarios in the Missouri River Basin. *Geophys Res Lett*, 30(4).
- [254] Stonefelt, M.D., Fontaine, T.A., Hotchkiss, R.H., 2000. Impacts of climate change on water yield in the upper wind river basin *Journal of the American Water Resources Association*, 36(2): 321-336.
- [255] Stratton, B.T., Sridhar, V., Gribb, M.M., McNamara, J.P., Narasimhan, B., 2009. Modeling the Spatially Varying Water Balance Processes in a Semiarid Mountainous Watershed of Idaho1. *Journal of the American Water Resources Association*, 45(6): 1390-1408.
- [256] Strauch, M., Volk, M., 2013. SWAT plant growth modification for improved modeling of perennial vegetation in the tropics. *Ecol Model*, 269(0): 98-112.
- [257] Sturm, M., Wagner, A.M., 2010. Using repeated patterns in snow distribution modeling: An Arctic example. *Water Resources Research*, 46(12): W12549.
- [258] Sulser, T.B., Ringler, C., Zhu, T.J., Msangi, S., Bryan, E., Rosegrant, M.W., 2010. Green and blue water accounting in the Ganges and Nile basins: Implications for food and agricultural policy. *Journal of Hydrology*, 384(3-4): 276-291.
- [259] Sun, X., 2015. Modelling of surface water and groundwater exchange and denitrification process in the alluvial plain area at the catchment scale, Université Toulouse III Paul Sabatier.
- [260] Sun, X., Bernard-Jannin, L., Garneau, C., Volk, M., Arnold, J., Srinivasan, R., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J., 2015. Improved simulation of river water and groundwater exchange in an alluvial plain using the SWAT model. *Hydrological Processes*.
- [261] Takle, E.S., Jha, M., Anderson, C.J., 2005. Hydrological cycle in the upper Mississippi River basin: 20th century simulations by multiple GCMs. *Geophys Res Lett*, 32(18): L18407.

- [262] Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2012. A summary of the CMIP5 experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93: 485–498.
- [263] Theil, H., 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis'. *Indag. math.*, 12: 85.
- [264] Thiéry, D., 1987. Le modèle MARTHE, modélisation d'aquifère par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour le calcul hydrodynamique des écoulement, BRGM.
- [265] Tian, Y., Xu, Y.P., Zhang, X.J., 2013. Assessment of Climate Change Impacts on River High Flows through Comparative Use of GR4J, HBV and Xinanjiang Models. *Water Resour Manag*, 27(8): 2871-2888.
- [266] Tisseuil, C., Vrac, M., Lek, S., Wade, A.J., 2010. Statistical downscaling of river flows. *Journal of Hydrology*, 385(1–4): 279-291.
- [267] Todini, E., 2007. Hydrological catchment modelling: past, present and future. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(1): 468-482.
- [268] Todini, E., 2011. History and perspectives of hydrological catchment modelling. *Hydrol Res*, 42(2-3): 73-85.
- [269] Troin, M., Caya, D., 2014. Evaluating the SWAT's snow hydrology over a Northern Quebec watershed. *Hydrological Processes*, 28(4): 1858-1873.
- [270] UNESCO, 2011. The impact of global change on water resources : the response of UNESCO'S international hydrology programme, Paris.
- [271] Uppala, S.M., Kallberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., Bechtold, V.D.C., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., Berg, L.V.D., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, I., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J.F., Morcrette, J.J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., Woollen, J., 2005. The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(612): 2961-3012.
- [272] USDA, S., 1972. National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Washington, DC.
- [273] van den Besselaar, E.J.M., Klein Tank, A.M.G., Buishand, T.A., 2013. Trends in European precipitation extremes over 1951–2010. *Int J Climatol*, 33(12): 2682-2689.
- [274] Van der Linden, P., Mitchell, J.F.B.e., 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project.
- [275] van Haren, R., van Oldenborgh, G., Lenderink, G., Collins, M., Hazeleger, W., 2013. SST and circulation trend biases cause an underestimation of European precipitation trends. *Clim Dynam*, 40(1-2): 1-20.
- [276] van Oldenborgh, G.J., Drijfhout, S., Ulden, A.v., Haarsma, R., Sterl, A., Severijns, C., Hazeleger, W., Dijkstra, H., 2009. Western Europe is warming much faster than expected. *Climate of the Past*, 5(1): 1-12.
- [277] Vautard, R., Gobiet, A., Jacob, D., Belda, M., Colette, A., Déqué, M., Fernández, J., García-Díez, M., Goergen, K., Güttler, I., Halenka, T., Karacostas, T., Katragkou, E., Keuler, K., Kotlarski, S., Mayer, S., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Patarčić, M., Scinocca, J., Sobolowski, S., Suklitsch,

- M., Teichmann, C., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V., Yiou, P., 2013. The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Clim Dynam*, 41(9-10): 2555-2575.
- [278] Vaze, J., Post, D.A., Chiew, F.H.S., Perraud, J.M., Viney, N.R., Teng, J., 2010. Climate non-stationarity – Validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology*, 394(3-4): 447-457.
- [279] Vazquez-Amabile, G.G., Engel, B.A., 2005. Use of SWAT to compute groundwater table depth and streamflow in the Muscatatuck River watershed. *Transactions of the Asae*, 48(3): 991-1003.
- [280] Verbunt, M., Gurtz, J., Jasper, K., Lang, H., Warmerdam, P., Zappa, M., 2003. The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling. *Journal of Hydrology*, 282(1-4): 36-55.
- [281] Vidal, J.P., Martin, E., Franchisteguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.M., 2010a. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int J Climatol*, 30(11): 1627-1644.
- [282] Vidal, J.P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J.M., Blanchard, M., Baillon, M., 2010b. Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14(3): 459-478.
- [283] Villeneuve, J.P., Hubert, P., Mailhot, A., A.N., R., 1998. La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau. *Rev. Sci. Eau*, n° Speciale 11: 19-39.
- [284] Viner, D., Hulme, M., 1997. The Climate Impacts LINK Project: Applying Results of the Hadley Centre's Climate Change Experiments in Climate Change Impacts Assessments.
- [285] Viviroli, D., Archer, D.R., Buytaert, W., Fowler, H.J., Greenwood, G.B., Hamlet, A.F., Huang, Y., Koboltschnig, G., Litaor, M.I., López-Moreno, J.I., Lorentz, S., Schädler, B., Schreier, H., Schwaiger, K., Vuille, M., Woods, R., 2011. Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(2): 471-504.
- [286] Viviroli, D., Weingartner, R., 1999. The hydrological significance of mountains: from regional to global scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 8(6): 1017-1030.
- [287] Viviroli, D., Weingartner, R., Messerli, B., 2003. Assessing the Hydrological Significance of the World's Mountains. *Mt Res Dev*, 23(1): 32-40.
- [288] Voirin-Morel, S., 2003. Modélisation distribuée des flux d'eau et d'énergie et des débits à l'échelle régionale du bassin Adour-Garonne, Uni. Toulouse III.
- [289] Wang, X., Melesse, A.M., 2005. Evaluation of the SWAT model's snowmelt hydrology in a northwestern Minnesota watershed *Transactions of the Asae* 48(4): 1359-1376
- [290] Weedon, G.P., Balsamo, G., Bellouin, N., Gomes, S., Best, M.J., Viterbo, P., 2014. The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. *Water Resources Research*, 50(9): 7505-7514.
- [291] Willaarts, B.A., Volk, M., Aguilera, P.A., 2012. Assessing the ecosystem services supplied by freshwater flows in Mediterranean agroecosystems. *Agr Water Manage*, 105: 21-31.
- [292] Williams, J., Jones, C., Kiniry, J., Spaniel, D.A., 1989. The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE*, 32(2): 497-0511.

- [293] Wu, M., Chiu, Y., Demissie, Y., 2012. Quantifying the regional water footprint of biofuel production by incorporating hydrologic modeling. *Water Resources Research*, 48.
- [294] Xie, P., Chen, M., Yang, S., Yatagai, A., Hayasaka, T., Fukushima, Y., Liu, C., 2007. A Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation over East Asia. *Journal of Hydrometeorology*, 8(3): 607-626.
- [295] Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J., Yang, H., 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358(1–2): 1-23.
- [296] Yew Gan, T., Dlamini, E.M., Biftu, G.F., 1997. Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, 192(1–4): 81-103.
- [297] Zabaleta, A., Meaurio, M., Ruiz, E., Antigüedad, I., 2014. Simulation Climate Change Impact on Runoff and Sediment Yield in a Small Watershed in the Basque Country, Northern Spain. *J Environ Qual*, 43(1): 235-245.
- [298] Zahabiyoun, B., Goodarzi, M.R., Bavani, A.R.M., Azamathulla, H.M., 2013. Assessment of Climate Change Impact on the Gharehou River Basin Using SWAT Hydrological Model. *Clean-Soil Air Water*, 41(6): 601-609.
- [299] Zang, C., Liu, J., 2013. Trend analysis for the flows of green and blue water in the Heihe River basin, northwestern China. *Journal of Hydrology*, 502: 27-36.
- [300] Zang, C.F., Liu, J., van der Velde, M., Kraxner, F., 2012. Assessment of spatial and temporal patterns of green and blue water flows under natural conditions in inland river basins in Northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8): 2859-2870.
- [301] Zeinivand, H., Smedt, F., 2009. Hydrological Modeling of Snow Accumulation and Melting on River Basin Scale. *Water Resour Manag*, 23(11): 2271-2287.
- [302] Zhang, X., Srinivasan, R., Debele, B., Hao, F., 2008. Runoff Simulation of the Headwaters of the Yellow River Using The SWAT Model With Three Snowmelt Algorithms. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(1): 48-61.
- [303] Zhang, Y., Su, F., Hao, Z., Xu, C., Yu, Z., Wang, L., Tong, K., 2015. Impact of projected climate change on the hydrology in the headwaters of the Yellow River basin. *Hydrological Processes*, 29(20): 4379-4397.
- [304] Zolina, O., Simmer, C., Belyaev, K., Kapala, A., Gulev, S., 2009. Improving Estimates of Heavy and Extreme Precipitation Using Daily Records from European Rain Gauges. *Journal of Hydrometeorology*, 10(3): 701-716.
- [305] Zuo, D., Xu, Z., Peng, D., Song, J., Cheng, L., Wei, S., Abbaspour, K.C., Yang, H., 2015. Simulating spatiotemporal variability of blue and green water resources availability with uncertainty analysis. *Hydrological Processes*, 29(8): 1942-1955.

VI Annexes

Annexes 1 : Valeur des paramètres calibrés

Annexes 1 : Valeur des paramètres calibrés

Valeurs des paramètres calibrés pour chaque ensemble de sous-bassins. « Calibrée » est la valeur calibrée et « Min. » et « Max. » sont les valeurs de l'intervalle utilisé pour la calibration. « R_ », « V_ » et « A_ » indique la manière dont a été calibré le paramètre :

« R » indique une variation relative (= $[valeur\ a\ calibré \cdot (1 + valeur\ définie)]$).

« V » indique une variation absolue (= + valeur définie).

« A » indique un remplacement de la valeur à calibrer par la valeur définie.

La localisation des stations peut être trouvée Figure II.21

Auterive	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.078867	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.239667	0	1
A_GW_DELAY.gw	26.07	-30	60
A_GWQMN.gw	273.000031	-500	500
V_ESCO.hru	0.84215	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.02522	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	0.0204	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(.).sol	-0.035967	-0.05	0.05
A_REVAPMN.gw	31.666683	-500	500
V_CANMX.hru	19.67	0	30

Nérac	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	0.023	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.583667	0	1
A_GW_DELAY.gw	24.089998	-30	60
A_GWQMN.gw	466.333344	-500	500
V_ESCO.hru	0.75335	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.04202	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	0.02376	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(.).sol	0.010033	-0.05	0.05
A_REVAPMN.gw	164.333359	-500	500
V_CANMX.hru	22.269999	0	30

Cahors	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.076867	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.155667	0	1
A_GW_DELAY.gw	-28.65	-30	60
A_GWQMN.gw	387.666687	-500	500
V_ESCO.hru	0.51815	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.19322	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	0.015547	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(.).sol	-0.045633	-0.05	0.05
V_REVAPMN.gw	260.333344	-500	500
V_CANMX.hru	27.309999	0	30
V_GW_SPYLD.gw	0.065733	0	0.4
R_CH_S1.sub	-0.001233	-0.05	0.05
V_CH_K1.sub	47.833336	0	100
R_CH_N1.sub	-0.0121	-0.05	0.05

Foix	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.077	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.057667	0	1
A_GW_DELAY.gw	59.129997	-30	60
A_GWQMN.gw	-26.333319	-500	500
V_ESCO.hru	0.62885	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.10814	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	-0.009947	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(.).sol	-0.0165	-0.05	0.05
V_REVAPMN.gw	-30.333319	-500	500
V_CANMX.hru	7.53	0	30
V_PLAPS.sub	102.200005	-100	500
V_TLAPS.sub	-4.142667	-2	-6
V_SFTMP.bsn	1.838667	-2	2

Annexes 1 : Valeur des paramètres calibrés

V_SMTMP.bsn	1.828	-2	2
V_SMFMX.bsn	2.342667	2	6
V_SMFMN.bsn	2.236	2	6
V_TIMP.bsn	0.538333	0	1

Laguepie	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.074067	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.992333	0	1
A_GW_DELAY.gw	48.209999	-30	60
A_GWQMN.gw	489.000031	-500	500
V_ESCO.hru	0.67715	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.1115	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	-0.002213	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(..).sol	-0.011633	-0.05	0.05
A_REVAPMN.gw	235.000015	-500	500
V_CANMX.hru	10.309999	0	30

Lamagistère	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	0.044333	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.004333	0	1
A_GW_DELAY.gw	19.65	-30	60
A_GWQMN.gw	-347.6666	-500	500
V_ESCO.hru	0.67745	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.13766	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	0.003867	-0.04	0.04
A_SOL_AWC(..).sol	0.01	-0.05	0.05
V_REVAPMN.gw	286.3333	-500	500
V_CANMX.hru	1.79	0	30
R_CH_W1.sub	0.011566	-0.05	0.05

Loubejac	Calibrée	Min.	Max.
:R_CN2.mgt	0.049667	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.959	0	1
A_GW_DELAY.gw	7.049999	-30	60
A_GWQMN.gw	312.333344	-500	500
V_ESCO.hru	0.61595	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.05702	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	0.032133	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(..).sol	0.027767	-0.05	0.05
V_REVAPMN.gw	1.000015	-500	500
V_CANMX.hru	11.37	0	30
R_CH_K1.sub	-0.007633	-0.05	0.05
R_CH_W1.sub	-0.019167	-0.05	0.05
R_GW_SPYLD.gw	0.0804	0	0.4
R_GWHT.gw	7.675	0	25

Marsal	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.097133	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.331	0	1
A_GW_DELAY.gw	24.209999	-30	60
A_GWQMN.gw	-112.333321	-500	500
V_ESCO.hru	0.93845	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.02834	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	0.019013	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(..).sol	0.028233	-0.05	0.05
V_REVAPMN.gw	-126.333321	-500	500
V_CANMX.hru	29.15	0	30
V_GW_SPYLD.gw	0.1396	0	0.4
V_GWHT.gw	10.908334	0	25
R_CH_S1.sub	-0.031767	-0.05	0.05
R_CH_W1.sub	-0.049833	-0.05	0.05
V_CH_K1.sub	84.050003	0	150
R_CH_N1.sub	-0.018167	-0.05	0.05

Annexes 1 : Valeur des paramètres calibrés

Millau	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.023533	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.065667	0	1
A_GW_DELAY.gw	-24.030001	-30	60
A_GWQMN.gw	139.000015	-500	500
V_ESCO.hru	0.82745	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.14606	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	0.03784	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(..).sol	-0.0157	-0.05	0.05
V_REVAPMN.gw	-282.333313	-500	500
V_CANMX.hru	1.83	0	30
V_PLAPS.sub	490.833344	0	500
V_TLAPS.sub	-3.718667	-2	-6
V_SFTMP.bsn	1.846667	-2	2
V_SMTMP.bsn	-0.812	-2	2
V_SMFMX.bsn	5.502666	2	6
V_SMFMN.bsn	5.526667	2	6
V_TIMP.bsn	0.417667	0	1
R_CH_S1.sub	-0.0077	-0.05	0.05
R_CH_W1.sub	-0.043167	-0.05	0.05
R_CH_N1.sub	0.012633	-0.05	0.05

Portet	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.071133	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.021	0	1
A_GW_DELAY.gw	-13.83	-30	60
A_GWQMN.gw	-196.999985	-500	500
V_ESCO.hru	0.87065	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.07226	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	-0.00696	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(..).sol	0.002833	-0.05	0.05
A_REVAPMN.gw	-1.666652	-500	500
V_CANMX.hru	29.429998	0	30

Roquefort	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.0522	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.169667	0	1
A_GW_DELAY.gw	11.189999	-30	60
A_GWQMN.gw	-449	-500	500
V_ESCO.hru	0.61325	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.1211	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	-0.0372	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(..).sol	-0.046833	-0.05	0.05
V_REVAPMN.gw	355.000031	-500	500
V_CANMX.hru	0.31	0	30
V_PLAPS.sub	161.800003	-100	500
V_TLAPS.sub	-5.406667	-2	-6
V_SFTMP.bsn	1.852	-2	2
V_SMTMP.bsn	0.870667	-2	2
V_SMFMX.bsn	2.369333	2	6
V_SMFMN.bsn	5.462667	2	6
V_TIMP.bsn	0.812333	0	1

Sarrans	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.0106	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.565667	0	1
A_GW_DELAY.gw	-4.530001	-30	60
A_GWQMN.gw	91.666687	-500	500
V_ESCO.hru	0.52595	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.16922	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	-0.013893	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(..).sol	0.001767	-0.05	0.05
V_REVAPMN.gw	-136.333328	-500	500
V_CANMX.hru	0.97	0	30

Annexes 1 : Valeur des paramètres calibrés

V_PLAPS.sub	365.5	0	500
V_TLAPS.sub	-5.206666	-2	-6
V_SFTMP.bsn	1.657333	-2	2
V_SMTMP.bsn	1.385333	-2	2
V_SMFMX.bsn	5.377333	2	6
V_SMFMN.bsn	4.001333	2	6
V_TIMP.bsn	0.345667	0	1
R_CH_N1.sub	-0.025633	-0.05	0.05
R_CH_K1.sub	-0.000767	-0.05	0.05
R_CH_W1.sub	0.0387	-0.05	0.05
R_GW_SPYLD.gw	0.206267	0	0.4

Larra	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.039667	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.893667	0	1
A_GW_DELAY.gw	59.489998	-30	60
A_GWQMN.gw	-77.666656	-500	500
V_ESCO.hru	0.71675	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.02774	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	0.0132	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(.).sol	0.0463	-0.05	0.05
V_REVAPMN.gw	449.666687	-500	500
V_CANMX.hru	28.25	0	30
V_GWHT.gw	7.908334	0	25
R_CH_W1.sub	-0.020033	-0.05	0.05
V_CH_K1.sub	7.25	0	50
R_CH_N1.sub	-0.0111	-0.05	0.05

St B��t	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.0442	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.044333	0	1
A_GW_DELAY.gw	29.909998	-30	60
A_GWQMN.gw	437.666687	-500	500
V_ESCO.hru	0.64565	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.13346	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	0.008827	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(.).sol	-0.0365	-0.05	0.05
A_REVAPMN.gw	349.666687	-500	500
V_CANMX.hru	2.61	0	30
V_PLAPS.sub	492.600006	-100	500
V_TLAPS.sub	-2.009333	-2	-6
V_SFTMP.bsn	0.278667	-2	2
V_SMTMP.bsn	0.702667	-2	2
V_SMFMX.bsn	2.726667	2	6
V_SMFMN.bsn	4.910666	2	6
V_TIMP.bsn	0.472333	0	1

Tonneins	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.077667	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.509	0	1
A_GW_DELAY.gw	-27.75	-30	60
A_GWQMN.gw	49.666683	-500	500
V_ESCO.hru	0.88565	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.1451	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	-0.03896	-0.04	0.04
V_REVAPMN.gw	-116.333321	-500	500
R_CH_K1.sub	97.833336	0	100
R_GW_SPYLD.gw	0.325733	0	0.4
R_GWHT.gw	7.641667	0	25

Truy��re Aval	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.093267	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.074333	0	1
A_GW_DELAY.gw	-19.950001	-30	60

Annexes 1 : Valeur des paramètres calibrés

A_GWQMN.gw	189.666687	-500	500
V_ESCO.hru	0.84695	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.14726	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	0.00552	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(..).sol	-0.031833	-0.05	0.05
V_REVAPMN.gw	-468.333344	-500	500
V_CANMX.hru	26.689999	0	30
V_GW_SPYLD.gw	0.233733	0	0.4
V_GWHT.gw	22.125002	0	25
R_CH_S1.sub	0.048633	-0.05	0.05
V_CH_K1.sub	73.900002	0	100
R_CH_N1.sub	-0.007633	-0.05	0.05

Truyère Amont	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.0754	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.941667	0	1
A_GW_DELAY.gw	51.269997	-30	60
A_GWQMN.gw	355.000031	-500	500
V_ESCO.hru	0.74915	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.19862	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	-0.021413	-0.04	0.04
V_REVAPMN.gw	243.666687	-500	500
V_CANMX.hru	1.37	0	30
V_PLAPS.sub	43.166668	0	500
V_TLAPS.sub	-2.708	-2	-6
V_SFTMP.bsn	-0.790667	-2	2
V_SMTMP.bsn	-0.718667	-2	2
V_SMFMX.bsn	4.625333	2	6
V_SMFMN.bsn	4.532	2	6
V_TIMP.bsn	0.265	0	1
V_GW_SPYLD.gw	0.343333	0	0.4
R_CH_W1.sub	-0.046167	-0.05	0.05
R_CH_N1.sub	-0.014367	-0.05	0.05

Valentine	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.029933	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.023667	0	1
A_GW_DELAY.gw	40.349998	-30	60
A_GWQMN.gw	467.666687	-500	500
V_ESCO.hru	0.53225	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.13046	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	-0.010053	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(..).sol	-0.002233	-0.05	0.05
A_REVAPMN.gw	368.333374	-500	500
V_CANMX.hru	3.19	0	30
V_PLAPS.sub	75.833336	0	500
V_TLAPS.sub	-2.788	-2	-6
V_SFTMP.bsn	-1.598667	-2	2
V_SMTMP.bsn	1.353333	-2	2
V_SMFMX.bsn	2.014667	2	6
V_SMFMN.bsn	5.521333	2	6
V_TIMP.bsn	0.581	0	1

Verdun	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.013533	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.444333	0	1
A_GW_DELAY.gw	-27.33	-30	60
A_GWQMN.gw	-43.666653	-500	500
V_ESCO.hru	0.71675	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.06158	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	0.033253	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(..).sol	0.0087	-0.05	0.05
V_REVAPMN.gw	-303.666656	-500	500
V_CANMX.hru	22.65	0	30

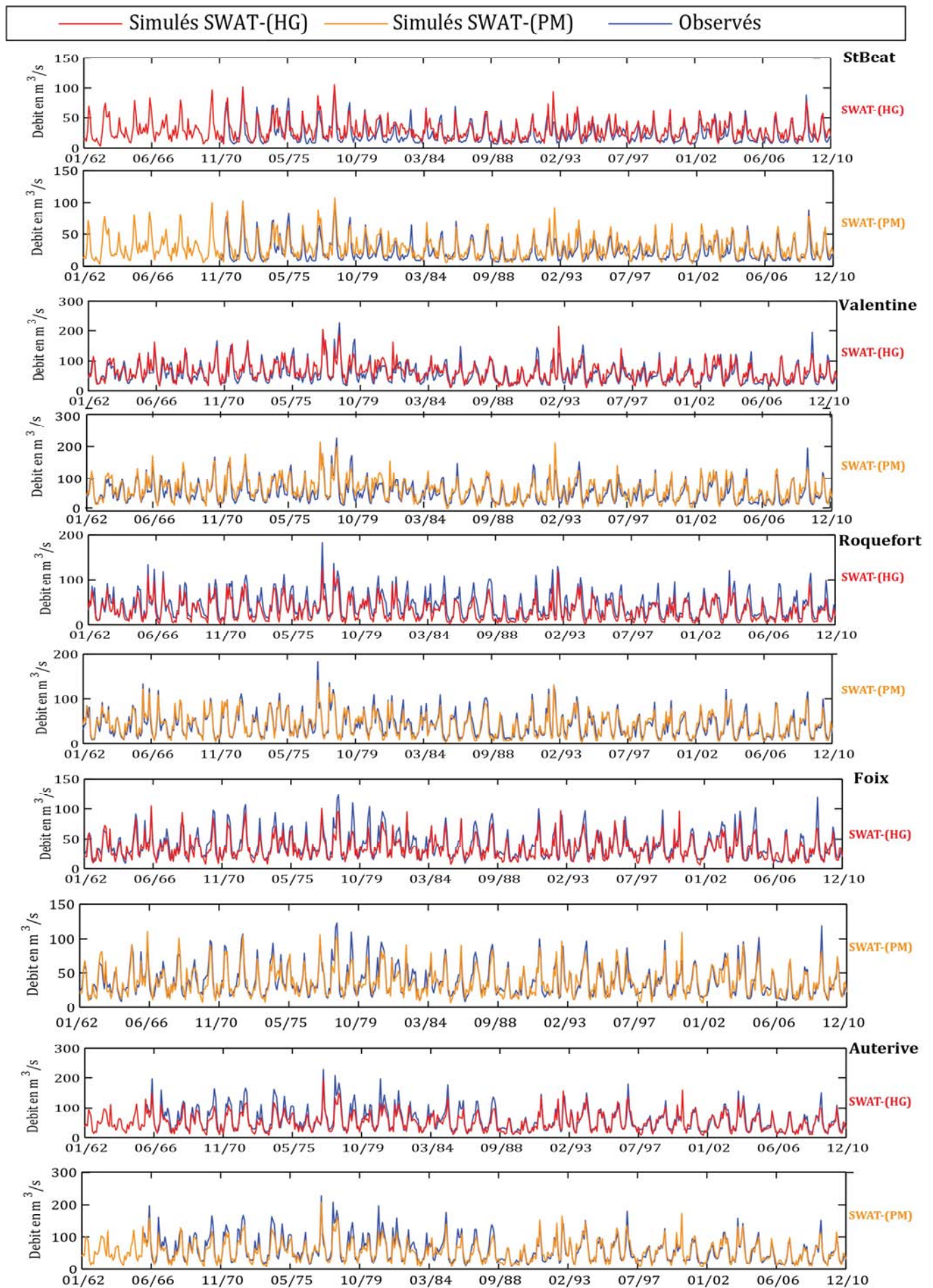
Annexes 1 : Valeur des paramètres calibrés

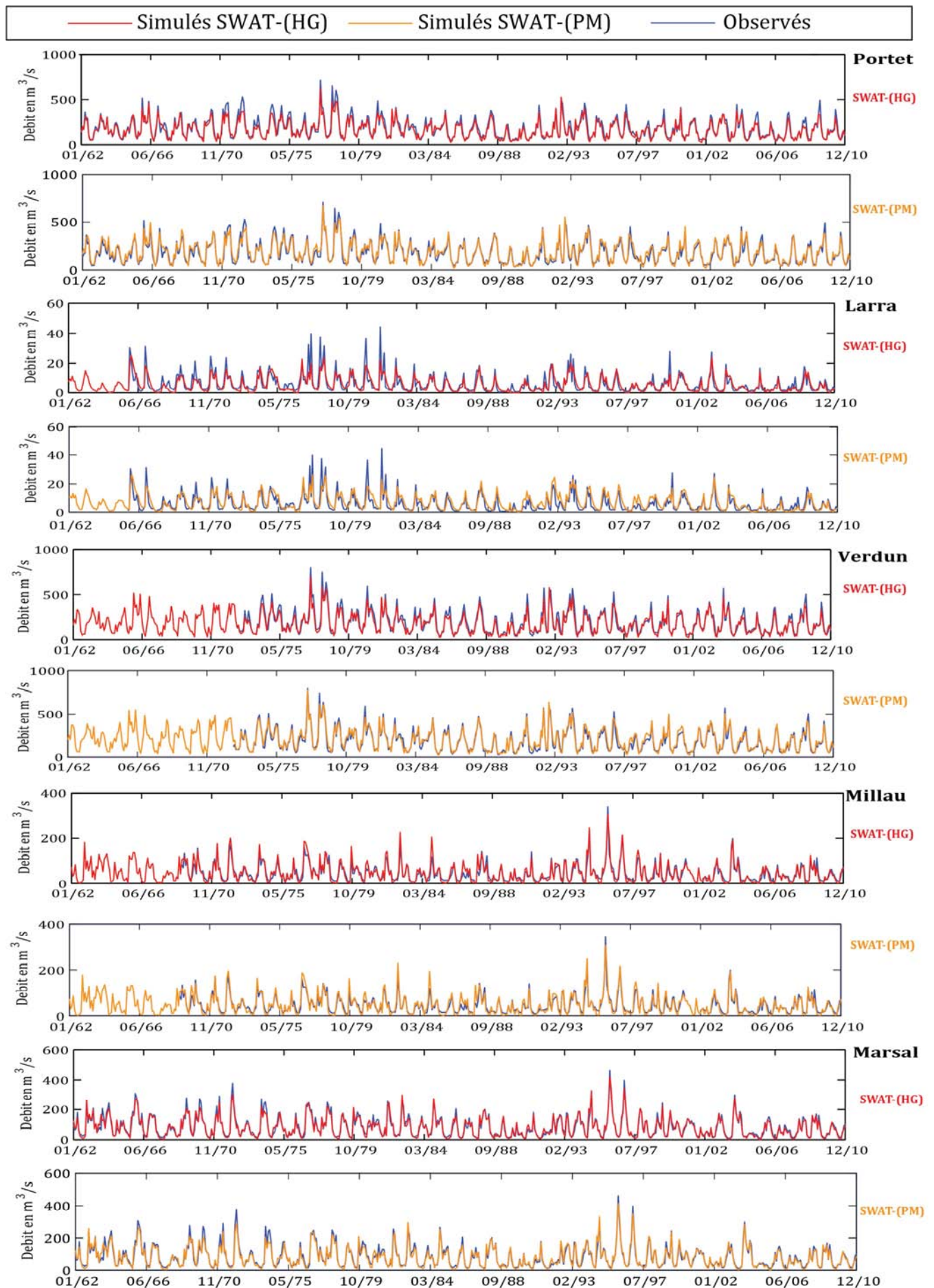
R_CH_K1.sub	3.633333	0	100
R_CH_S1.sub	-0.0119	-0.05	0.05
R_GW_SPYLD.gw	0.1676	0	0.4
R_GWHT.gw	0.308333	0	25

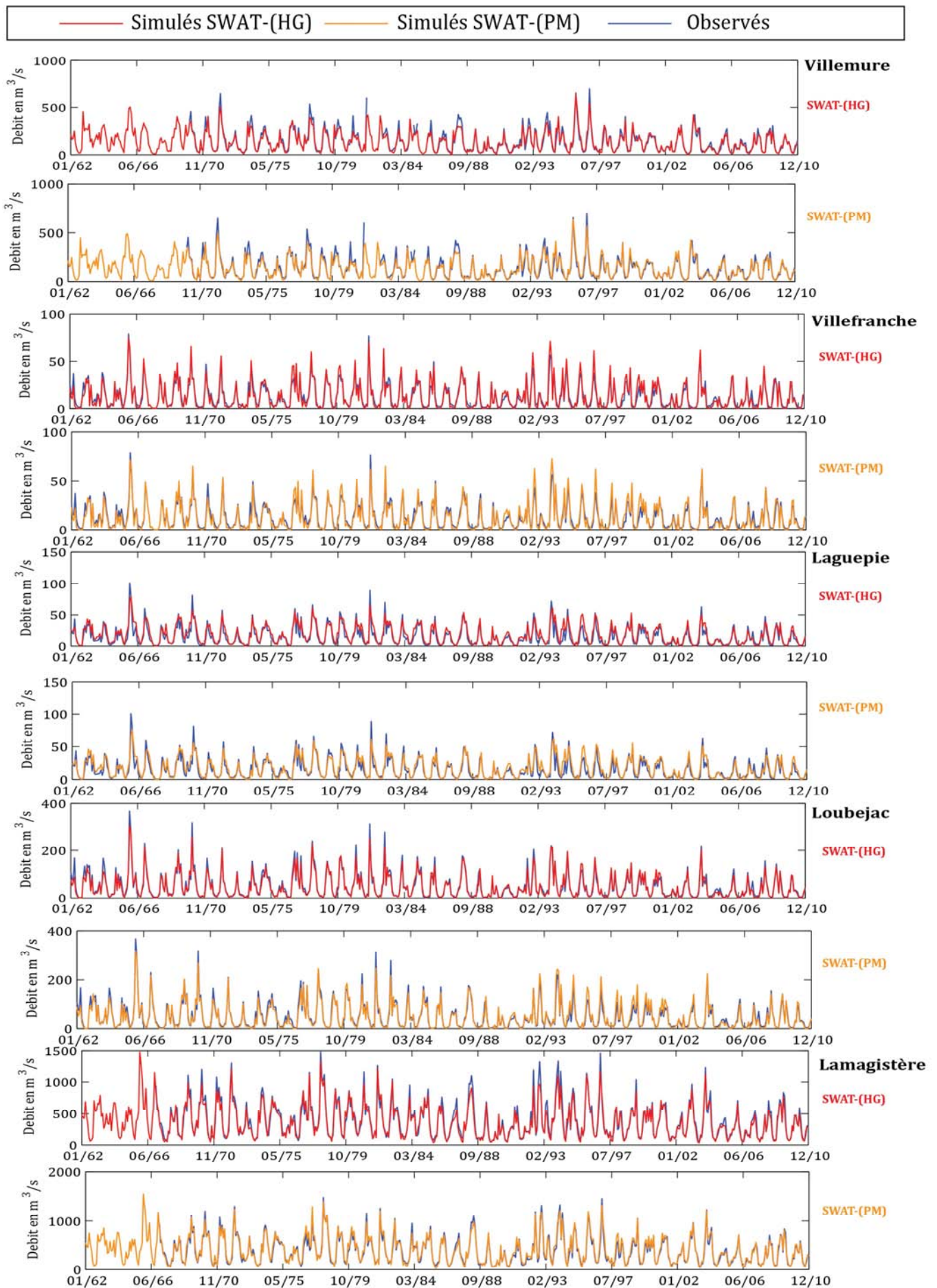
Villefranche	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.067133	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.283667	0	1
A_GW_DELAY.gw	-24.09	-30	60
A_GWQMN.gw	183.666687	-500	500
V_ESCO.hru	0.54125	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.1247	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	0.021253	-0.04	0.04
R_SOL_AWC(..).sol	0.0211	-0.05	0.05
A_REVAPMN.gw	-91.666656	-500	500
V_CANMX.hru	24.65	0	30

Villemure	Calibrée	Min.	Max.
R_CN2.mgt	-0.0318	-0.1	0.1
V_ALPHA_BF.gw	0.482333	0	1
A_GW_DELAY.gw	37.649998	-30	60
A_GWQMN.gw	-342.333344	-500	500
V_ESCO.hru	0.56165	0.5	0.95
V_GW_REVAP.gw	0.19562	0.02	0.2
A_RCHRG_DP.gw	-0.038587	-0.04	0.04
V_REVAPMN.gw	-452.333344	-500	500
V_CANMX.hru	4.01	0	30
V_PLAPS.sub	161.5	0	500
V_TLAPS.sub	-4.161333	-2	-6
V_SFTMP.bsn	0.404	-2	2
V_SMTMP.bsn	1.886667	-2	2
V_SMFMX.bsn	2.089333	2	6
V_SMFMN.bsn	3.761333	2	6
V_TIMP.bsn	0.255667	0	1
R_CH_N1.sub	-0.0449	-0.05	0.05
V_CH_K1.sub	1.716667	0	50
R_GW_SPYLD.gw	0.0436	0	0.4

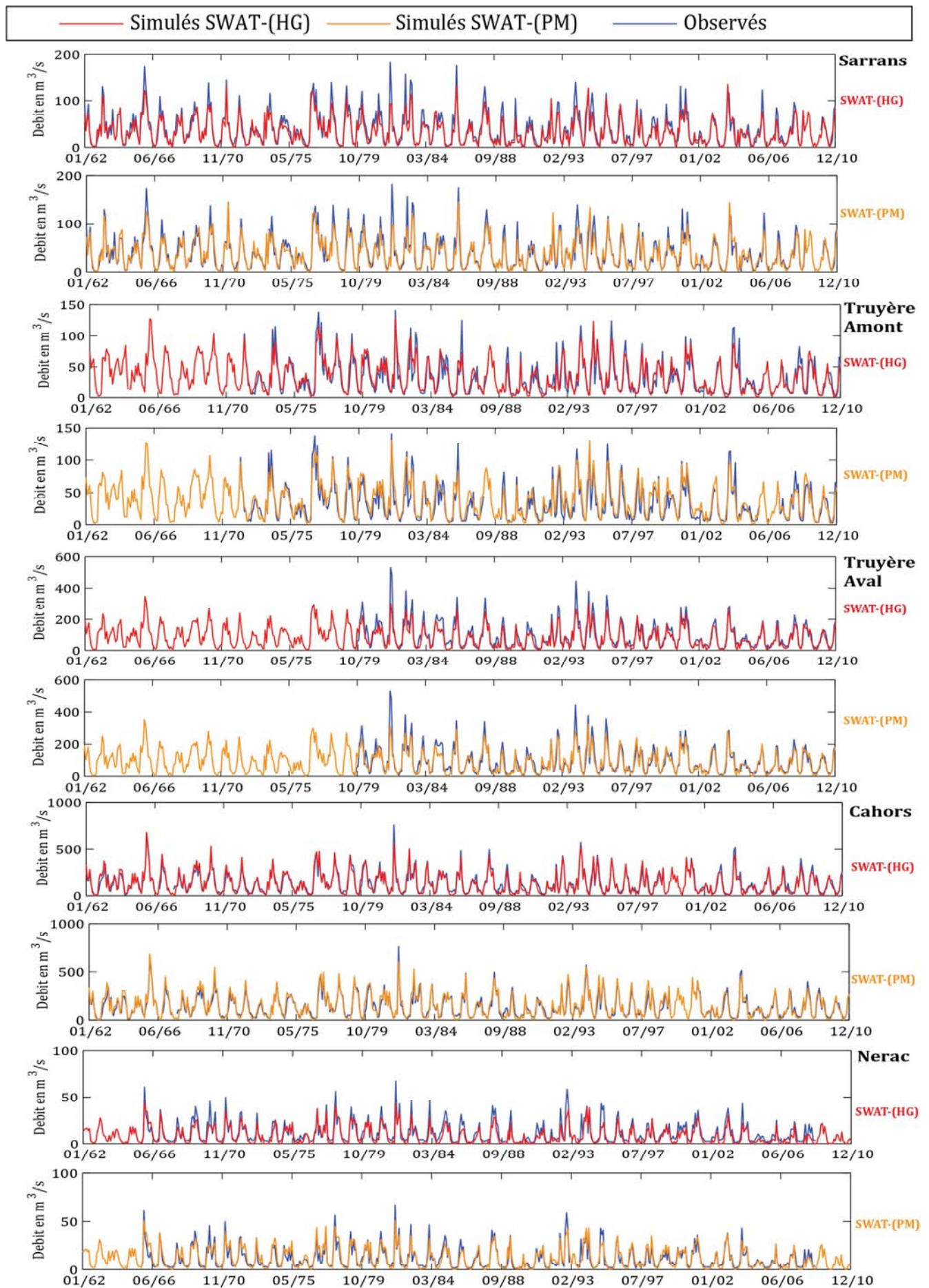
Annexes 2 : Hydrogrammes des stations calibrés







Annexes 2 : Hydrogrammes des stations calibrés



ARTICLE PUBLIE

Surveys in Geophysics

Annexes 3: On the use of hydrological models and satellite data to study the water budget of river basins affected by human activities: examples from the Garonne basin of France (Martin et al. 2016)

Eric Martin, Simon Gascoin, Youen Grusson, Clément Murgue, Mélanie Bardeau, François Anctil, Sylvain Ferrant, Romain Lardy, Patrick Le Moigne, Delphine Leenhardt, Vincent Rivalland, José-Miguel Sánchez Pérez, Sabine Sauvage, Olivier Therond

*Eric Martin : CNRM-GAME (Météo-France, CNRS), 42 avenue Coriolis, 31057 Toulouse, France
IRSTEA, UR RECOVER, 3275 route de Cézanne, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5 e-mail:
Eric.Martin@irstea.fr*

Patrick Le Moigne : CNRM-GAME (Météo-France, CNRS), 42 avenue Coriolis, 31057 Toulouse, France

Simon Gascoin, Sylvain Ferrant Vincent Rivalland : Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO), UPS/CNRS/IRD/CNES, 18 avenue E. Belin bpi 2801, 31401 Toulouse, France

Youen Grusson : University of Toulouse; INPT, UPS; Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement (EcoLab), Avenue de l'Agrobiopole, 31326 Castanet Tolosan Cedex, France

Youen Grusson, François Anctil : Chaire de recherche EDS en prévisions et actions hydrologiques, Department of Civil and Water Engineering, Université Laval, Québec, G1V 0A6, Canada

Sabine Sauvage, José-Miguel Sánchez Pérez University of Toulouse; INPT, UPS; Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement (EcoLab), Avenue de l'Agrobiopole, 31326 Castanet Tolosan Cedex, France CNRS, EcoLab, 31326 Castanet Tolosan Cedex, France

Clément Murgue, Romain Lardy, Delphine Leenhardt, Olivier Théron : INRA, UMR AGIR, BP52627, 31326 Castanet Tolosan, France INP Toulouse, UMR AGIR, BP52627, 31326 Castanet Tolosan, France

Clément Murgue CACG, BP 449 - 65004 Tarbes, France

Romain Lardy : ARVALIS - Institut du végétal 3 rue Joseph et Marie Hackin 75016 Paris, France

Mélanie Bardeau : BRGM, 3 Rue Marie Curie, 31520 Ramonville-Saint-Agne, France

Abstract:

Natural and anthropogenic forcing factors and their changes significantly impact water resources in many river basins around the world. Information on such changes can be derived from fine scale in-situ and satellite observations, used in combination with hydrological models. The latter need to account for hydrological changes caused by human activities to correctly estimate the actual water resource. In this study, we consider the catchment area of the Garonne river (in France) to investigate the capabilities of space-based observations and up-to date hydrological modelling in estimating water resources of a river basin modified by human activities and a changing climate. Using the ISBA-MODCOU and SWAT hydrological models, we find that the water resources of the Garonne Basin display a negative climate trend since 1960. The snow component of the two models is validated using the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) snow cover extent climatology. Crop sowing dates based on remote sensing studies are also considered in the validation procedure. Use of this data set improves the simulated evapotranspiration and river discharge amounts when compared to conventional data. Finally, we investigate the benefit of using the MAELIA multi-agent model that accounts for a realistic agricultural and management scenario. Among other results, we find that changes in crop systems have significant impacts on water uptake for agriculture. This work constitutes a basis for the construction of a future modelling framework of the sociological and hydrological system of the Garonne river region.

Résumé:

Les facteurs de forçage naturels et anthropiques et leurs changements impactent significativement les ressources en eau dans de nombreux bassins fluviaux sur la planète. Les informations concernant ces changements peuvent être approchées au travers d'observation *in situ* et d'observations par satellite, combinées avec des modèles hydrologiques. Ces derniers doivent tenir compte des changements hydrologiques causés par les activités humaines pour estimer correctement la ressource en eau réelle. Dans cette étude, nous considérons le bassin versant de la rivière Garonne (en France) pour explorer les apports possibles des observations spatiales à la modélisation hydrologique visant à l'estimation des ressources en eau dans des bassins influencés par les activités humaines et le changement climatique. En utilisant les modèles hydrologiques ISBA-MODCOU et SWAT, nous constatons que les ressources en eau du bassin Garonne affichent une tendance climatique négative depuis 1960. La composante de la neige des deux modèles est validée à l'aide du MODIS (*Moderate Resolution Imaging spectroradiometer*). Des données de télédétections sont également utilisées pour la validation des dates de semis des cultures. L'utilisation de ces données permet d'améliorer la représentation de l'évapotranspiration et des débits simulés par rapport aux données classiques. Enfin, nous étudions l'avantage d'utiliser le modèle multi-agent MAELIA qui intègre un générateur de scénario agricole réaliste. Il est noté que les changements dans les systèmes de cultures ont des impacts importants sur l'absorption de l'eau pour l'agriculture. Ce travail constitue une base pour la construction d'un futur cadre de modélisation du système sociologique et hydrologique de la région de la Garonne.

Introduction

Human-induced land use changes are now widespread over the planet. The primary objectives of land use are to satisfy immediate human needs (Foley et al. 2005). Agriculture and urbanization are important drivers of these changes. The hydrological cycle has been transformed in many places to provide freshwater for irrigation, domestic uses, and industry (Vörösmarty et al. 2000). The number of dams along rivers and associated reservoirs has rapidly increased over recent decades (Lehner et al. 2011). Groundwater resources are being extensively used in regions with large aquifers and frequent water stresses (Wada et al. 2010). As a consequence, water fluxes, including evapotranspiration, are modified in many regions of the world (Asokan and Destouni 2014). Depending on the region and the hydrological variable considered, the signal can be dominated by climatic variability and trends or human activities (Vörösmarty et al. 2000; Moss et al. 2010). In south India, for instance, irrigation relies totally on groundwater extraction. The imbalance between recharge and extraction leads to local groundwater depletion, and hence water scarcity episodes that depend on local settings, e.g., small surface reservoir capacity maintained by farmers to catch monsoon runoff, aquifer capacity to store this recharge, and irrigated area extent that condition the water demand (Perrin et al. 2012).

These water scarcity episodes are expected to increase due to dry climatic extremes projected for the Garonne region in the future (Ferrant et al. 2014b). In the Upper Mississippi basin, climate change is the dominant driver of runoff changes over the 20th century, while land use changes (e.g., in forested areas, grasslands and croplands) can influence the river runoff locally (Frans et al. 2013). The impact of irrigation on local climate varies according to climatic zones and the degree of anthropization (Lobell et al. 2009; Destouni et al. 2012). For example, Grouillet et al. (2015) found that, by 2050, in two Mediterranean catchments (Herault in France and Ebro in Spain) anthropogenic impacts on water demand will dominate the impacts due to climate change.

Explicitly taking into account direct human forcing in hydrological modeling is now a recognized need in order to correctly simulate hydrological evolution of highly anthropized basins. Some models already attempt to do this as is the case, for example,

of the global-scale WaterGAP model (Alcamo et al. 2003). This consists of the WaterGAP Global Hydrology Model (Döll et al. 2003) and five water use models for irrigation, livestock, household, manufacturing and cooling of thermal power plants. This type of model is highly relevant for simulating large scale hydrological patterns, e.g., groundwater depletion (Döll et al. 2014). This type of approach is also implemented at the scale of individual catchments smaller than the typical catchments simulated by WaterGAP (Grouillet et al. 2015). The main limitations for small scale applications are the level of details needed to reproduce human processes and the availability of databases.

Nowadays there is a growing interest to better account for the co-evolutionary dynamics of coupled water-human systems. Sivapalan et al. (2012) introduced the concept of socio-hydrology, a new science coupling people and water resources, to highlight the need to study the coupled human-water system using an interdisciplinary approach. Preliminary attempts in this direction have been able to explain the multiples changes that occurred over the Murrumbidgee River basin in Australia during the 20th century (Kandasamy et al. 2014). In this example, the underlying modeling framework (van Emmerik et al. 2014) is composed of five subsystems (hydrology, population, irrigation, ecology and environmental awareness) that non-linearly interact and have two external drivers - climate and socio-economic. The model results highlight the competition between human productive and environmental restorative forces that lead to a so-called pendulum swing between agricultural development and environmental health. Due to oversimplifications, the model cannot describe the precise evolution of the system, but contains enough key elements to describe it. Another approach to describe a socio-hydrology system is to use agent-based models able to handle multiple interactions between numerous agents (Gaudou et al. 2014; Therond et al. 2014). The main advantage of this new approach is a greater flexibility in simulating individual processes and their interactions. However, it is quite complex and sensitive to small variations in the parameterization of the interaction rules between agents.

Accounting for both climatic and anthropogenic changes remains a challenge for hydrological models. While in-situ and space-based hydrological measurements are able to provide information on human-induced changes, a large number of hydrological models do not simulate all the components of these changes, and only account for the corresponding processes indirectly.

Satellite observations are able to document fine scale processes with a high spatio-temporal resolution. For example, FORMOSAT-2, launched in 2004, is able to observe vegetation development at a high spatial resolution (~10m) with a frequent revisit time (few days). This allows the detection of biophysical variables like the leaf area index (LAI) for selected areas (Courault et al. 2010, Claverie et al. 2012). The Sentinel-2 mission provides similar observations at the global scale. The Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission (whose launch is planned for 2020) is a swath-mapping radar interferometer designed to measure temporal changes of surface water elevation (lakes, reservoirs and river channels with a quasi-global coverage between 78° S and 78° N (Durand et al. 2014; Biancamaria et al. 2015, see also <https://swot.jpl.nasa.gov>). Concerning rivers, the basic SWOT measurements will consist of river water surface elevation, slope and width at a very fine scale. It is anticipated that rivers wider than 100m and lake or reservoir areas larger than 250x250m will be observed with good accuracy. The SWOT revisit time depends on longitude: it is about 4 days at mid-latitudes. In anthropized basins, river gauges networks are usually relatively dense, but SWOT may be used to estimate flows between gauges or measure the water volumes of man-made reservoirs. Such data are usually not easily available, unless in situ networks depend on public bodies.

On the modelling side, several human processes need to be taken into account. Large alpine dams modify water regimes; other dams may be used to sustain low flows. In general, only a small number of large reservoirs are involved and the associated processes may be taken into account relatively easily, if data are available. Irrigation is a critical process. Models should be able to account for the balance between crop water demand and resource availability (from groundwater, reservoirs and rivers, Döll et al. 2012, Perrin et al. 2012, Ferrant et al. 2014b). For instance, two major opposing effects of irrigation on aquifer dynamics may be identified: groundwater depletion in regions with primarily groundwater-fed irrigation, and groundwater accumulation in regions dominated by return flows from irrigation fed by surface-water (Goderniaux et al. 2009; Holman et al. 2009; Scibeck et al. 2006; Jyrkama et al. 2007; Döll et al. 2009; Gurdak et al. 2010; Kovalevski et al. 2007; Green et al. 2007). The main difficulty is to account for water management practices that depend on the basin, as well as local and national governance (Mazzega et al. 2014). The simulation of human processes requires

integrated modelling tools, able to simulate spatio-temporal interactions (including feedbacks) within and between socio-ecological systems, at relevant scale, and accounting for water management and associated agricultural practices (Therond et al. 2014). Another important parameter is land use change, that can lead to threshold effects (e.g., change from agriculture to forest, Donohu et al. 2007; Qiu et al. 2011; Murgue et al. 2015) or more diffuse variations (e.g., crop rotation, Parajuli et al. 2013). The objective of this paper is to discuss some challenges in estimating the water budget of a highly anthropized basin subject to climate change. We take advantage of recent studies dedicated to the Garonne Basin (a river basin that is highly modified by human activities, in France, with complex irrigation systems and frequent water management problems) to discuss how the combination of modelling and space-based observations can be used to improve the water budget estimate. Section 2 describes the Garonne basin and its current hydrological behavior. Section 3 shows how fine scale satellite observations of snow cover and vegetation can be used to validate and calibrate the hydrological models. Section 4 presents an example of the use of a multi-agent platform developed for the Garonne Basin to assess realistic crop rotation scenarios.

1. The water balance at the scale of the entire Garonne basin

1.1 Climate and physical properties

The Garonne river basin (56,000 km² in total - 50,000 km² at the Tonneins station - see Figure 1) is located in southwestern France. It drains water from the northern slopes of the Pyrenees Mountains (along the French border with Spain) and the southern slopes of the Massif Central. The mean annual discharge based on 103 years of in situ data at the Tonneins gauging station is estimated to be 600 m³ s⁻¹. The main tributaries of the Garonne river are the Ariège (flowing from the Pyrénées), and the Tarn and Lot (flowing from the Massif Central). The broad range of altitudes and slopes within the Garonne watershed leads to a diversity of hydrological behaviors that can be associated with three geographic zones: the Pyrenees to the south, the Massif Central to the north east, and the plain between them (Probst 1983). The Pyrenean portion of the watershed (i.e. elevated mountains – with some peaks exceeding 3,000 m - above a large plain where the topography does not exceed a few hundred meters) largely influences the

hydrological regime. The watershed altitudes range from 150 m to 3,145 m, with 44 % of the watershed below 500 m and 20 % above 1,500 m.

The basin climate is influenced by oceanic conditions in its western part. It is characterized by heavy rainfall events during winter and relatively warm weather during summer. There is an important precipitation gradient from west to east, ranging from approximately 1200 mm year⁻¹ in the Atlantic coastal region to about 600 mm year⁻¹ 300 km to the east in the plain area. The upper Garonne and the Ariège river regimes are marked by spring snowmelt in the Pyrenees (Caballero et al. 2007), while summer flows are very low due to relatively dry conditions then.

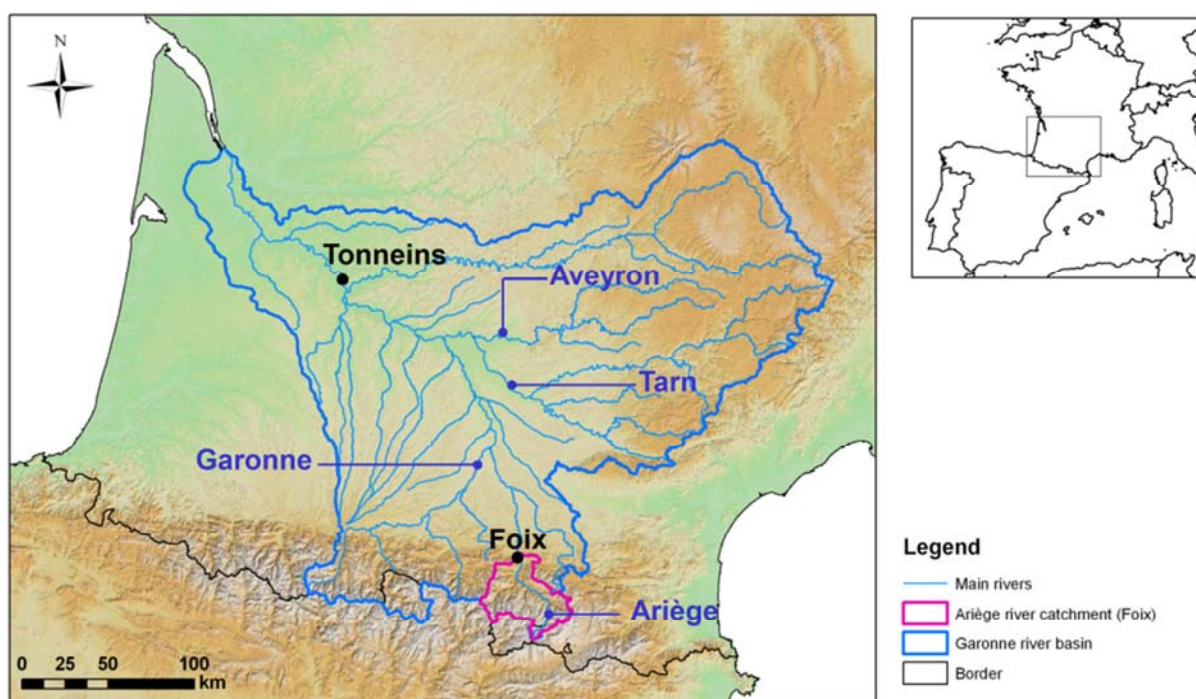


Figure 1: Map of the Garonne river basin, showing the main rivers and discharge stations mentioned in the paper.

From a geological point of view, the basin was marked by several marine invasions during the Jurassic and Cretaceous eras that led to the formation of limestone aquifers (some being heavily karstified) toward the north and the east. Some of these aquifers are exploited. More recently, the erosion of the Pyrenees, Massif Central and the Montagne Noire has led to the accumulation of a high amount of molasse substratum in the center of the basin. The hydrographic network, marked by the recent succession of glaciation and deglaciation, is composed of alluvial terraces. If the river is not deeply incised, the alluvial aquifer feeds the river during most of the time, while water is transferred to the aquifer during flooding periods. If the river is deeply incised, the

aquifer only feeds the river; these aquifers are also exploited. According to the FAO soil classification on the European Soils Data Base map (ESDB 2006), the soil composition is dominated by different types of cambisols (65 % of the catchment).

The Garonne river flows to the Atlantic Ocean through the Gironde estuary, one of the most important in Western Europe. Due to this geographical arrangement, the hydrological influence of tides can be measured relatively far upstream. For this reason, the model domain is limited to the catchment area at the Tonneins gauge station, where there is no tidal effect.

1.2 Anthropization, environmental change due to human actions

Land use analyses from the Corine Land Cover (CLC2000) reveal that the plain is dominated by crops and pastures (Figure 2). Agricultural activities cover 49 % of the watershed, while the hillsides of the Pyrenees (35 % of the watershed) are covered with forests. For altitudes above 2,500 m, the vegetation is composed of alpine grassland and shrub covers. The influence of human activities is high in the basin (irrigated agriculture). The irrigated surface area became five times larger between the 1970's and the 1990's, and has now stabilized at 160,000 ha (Sauquet et al. 2010). About 60% of the irrigated surface is devoted to maize, the second main irrigated crops being sunflower and wheat. Water uptake for irrigation represents about 70% of the total during low flow period. Uptake comes primarily from surface waters (more than 80%), reservoirs (8%) and groundwater (9%). In some areas, e.g., the plain near the confluence of the Tarn and the Garonne, groundwater uptake can reach 23%.

At the basin scale, Sauquet et al. (2010) estimated that the total water uptake for agriculture, industry and drinking water amounted to 7% of the discharge. Agricultural usage is dominant, especially during the summer months. Compared to other river basins in France, the Garonne basin has the largest deficit between supply and demand. Hence regulation and management plans are implemented at the basin (or sub-basin) and departmental (administrative district) levels (Mazzega et al. 2014). At the basin level, the Master Scheme for Water Planning and Management (Mazzega et al. 2014) defines the general orientation for the management of water resources and water

demands. It fixes (for 41 river gauges located in the Garonne catchment) two regulation rules: the “objective low-water flow” corresponding to the minimum flow that ensures a good functioning of the aquatic environment (and should be respected 8 years out of 10), and the “crisis flow”, corresponding to the level under which the drinking water supply and the survival of aquatic species are in danger.

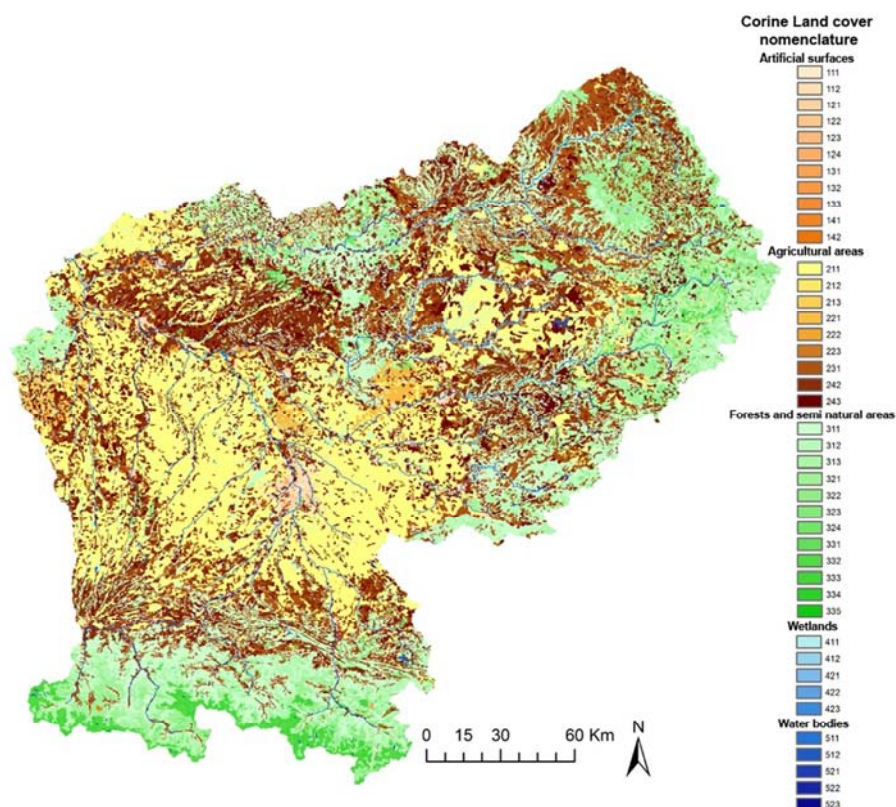


Figure 2: Map of the land use of the Garonne river basin. Sub-classification with numbers corresponds to the Corine-land cover classification (<http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>).

Low Water Management Plans define medium term strategies and public policies to manage the imbalance between supply and demand. At the administrative level, departmental state services enforce water use restriction rules when they are required. Drought commissions are established when a crisis is foreseen in order to evaluate the most relevant strategy. The input data to the commission can be observations (flow, water level in reservoirs or in aquifers) or model results. In order to evaluate how much water can be withdrawn from the aquifers, hydrodynamic models of alluvial aquifers of the upper Garonne, Tarn and lower Aveyron were developed in 2009 by the French Geological Survey (BRGM) (Bardeau and Bourdaa 2010); these have been in continuous use since this date.

1.3 Hydrological regime of the Garonne Basin: trends and variability

The mean annual air surface temperature over the basin increased by 1.1°C from 1901 to 2000, while over this time span the precipitation decreased (with a negative trend that is barely significant, however) (Moisselin et al. 2002). Discharge trends are clearly negative, especially since the mid 1990's. Figure 3 presents the observed rainfall and snowfall based on meteorological data analyzed by the Safran system (Vidal et al. 2010), the observed discharge and the estimated pseudo-natural discharge. The pseudo-natural discharges estimated by Sauquet (2010) over the period 1995-2005 have been extended back to 1990 (the epoch when the irrigated surface area stabilized).

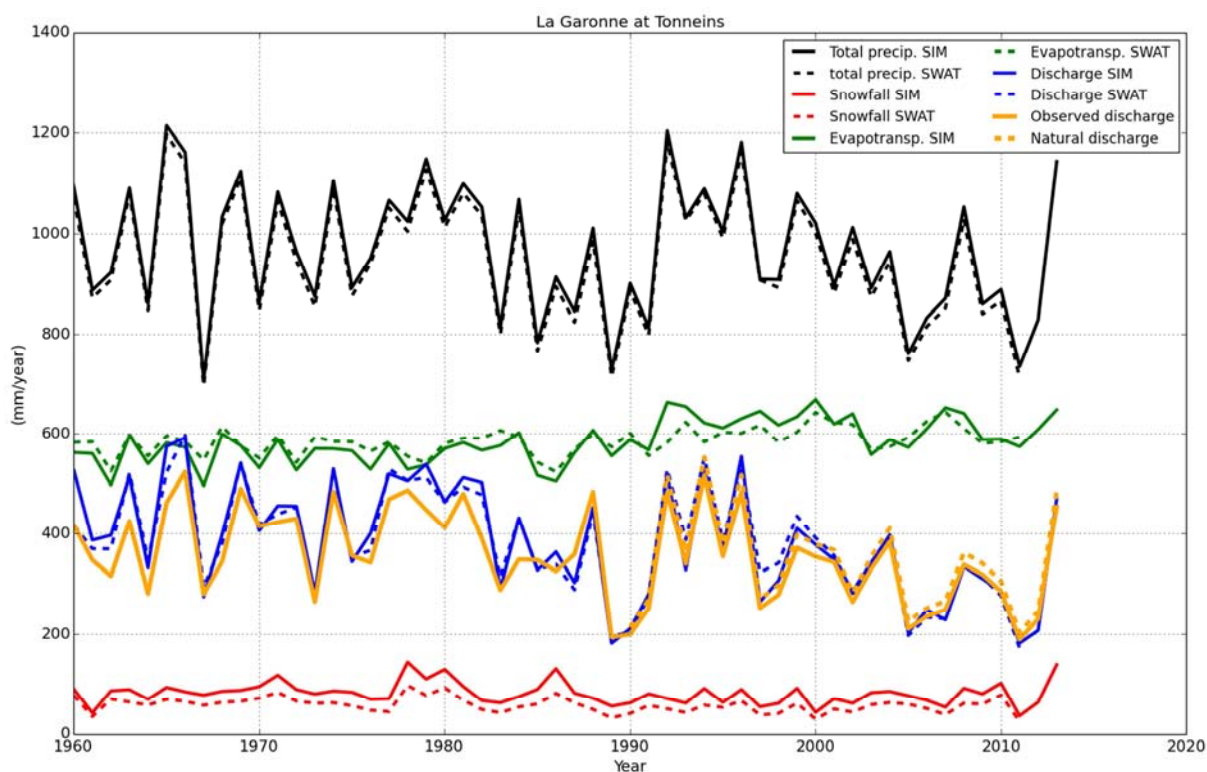


Figure 3: Variation of the main components of the water balance over the period 1960-2013 for the Garonne at Tonneins, as estimated by the Safran analysis system (precipitation) and the ISBA-MODCOU and SWAT models (evapotranspiration, discharge, snowfall)

Evaporation is evaluated using two hydrological models. The first model is the ISBA-Modcou model developed at Meteo-France (SIM, Habets et al. 2008; Decharme et al. 2013). It has two components: the land surface model ISBA (Interaction Soil-Biosphere-Atmosphere) and the distributed hydrological model MODCOU (MODélisation COUplée). The mesh size is 8km over the basin for the land surface

model, and varies between 0.25 and 2 km for the hydrological model. The land surface model transfers runoff from the surface and to the bottom of the hydrological model. Aquifers are only taken into account implicitly through conceptual transfer reservoirs (Artinyan et al. 2012).

The second model considered in this study is the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool, Arnold et al. 1993), a comprehensive, physically-based, semi-distributed and watershed-scale hydrological model that allows the simulation of a large number of hydrology-related physical processes (Douglas-Mankin et al. 2010; Gassman et al. 2007). In SWAT, the basin is discretized into sub-watersheds, which thereafter are divided into hydrological response units (HRUs), based on homogeneous soil, land use and slope. The HRUs are then used to compute a water balance, considering four reservoirs: snowpack, soil, shallow aquifer, and deep aquifer. Hydrological processes connecting those reservoirs include infiltration, runoff, evapotranspiration, lateral flow and percolation. Computation is performed at the HRU level, aggregated at the sub-basin level, and routed through reaches toward the catchment outlet. SWAT was applied to the upper part of the Garonne basin by Grusson et al. (2015). It must be noted that originally the two models had different objectives. SIM aims to simulate the coupled energy and mass balance of continental surfaces, while SWAT is a hydro-agro-environmental model, able to simulate the impact of climate, land use, and agricultural practices on hydrology. We use both as they offer different kinds of information, and thus are complementary.

The results for both models presented in this paper include the whole Garonne river watershed up to Tonneins. The SWAT model has been calibrated at monthly time steps over the 2000-2010 period using 21 stations spread over the watershed. SIM was not specifically calibrated for this study; the performance is the same as in Habets et al. (2008).

Figure 3 shows the main components of the water balance at the outlet (Tonneins) between 1960 and 2013, including analyses, observations and model outputs. The total precipitation and snowfall come from the Safran reanalysis (Vidal et al. 2010). The small differences between the two models are due to the spatial interpolation of the original 8 km Safran grid used by SIM that have been re-interpolated at the sub-

watershed scale for SWAT (150 sub-watersheds and 3156 HRUs from the minimum surface of 0.0174 km² and maximum 316 km²). The mean total precipitation over the period is 966 mm, but there is a marked negative trend since the middle of the 1990's. The linear trend over the common period of the two models (1960-2011) is small but significant ($-0.38 \text{ mm year}^{-1}$ for SIM, $-0.36 \text{ mm year}^{-1}$ for SWAT, 99% confidence using a Monte Carlo non-parametric test). During the same period, the evapotranspiration calculated by the two models presents a significant positive trend of $+1.55 \text{ mm year}^{-1}$ for SIM and $+0.76 \text{ mm year}^{-1}$ for SWAT. Concerning the discharge, the linear trend is $-3.82 \text{ mm year}^{-1}$ for SIM, $-3.25 \text{ mm year}^{-1}$ for SWAT and only $-2.30 \text{ mm year}^{-1}$ from the observations.

However, it must be noted that the largest differences appear during the first half of the period, which make an important impact on the computed trends. The reasons for these differences are many, but it is difficult to determine the main factor: uncertainties in meteorological forcing, changes in land use, anthropization, or model calibration, etc. It must be noted that anthropogenic forcing factors were not explicitly accounted for in the two models but were only indirectly considered in the calibration procedure. Land use and vegetation characteristics are based on the ECOCLIMAP database (Faroux et al., 2013). SWAT is calibrated for the period 2000-2010 using the observed discharge, so that it indirectly accounts for anthropization. In addition to agricultural changes in the plain area, rapid land cover changes are occurring in the mountainous areas of the Garonne catchment due to the abandonment of agro-pastoral areas, i.e. due to reforestation. These human-induced land cover changes also impact some key hydrological processes such as storm runoff and snow melt in the Garonne river headwaters (Szczypta et al. 2015). Further work on observation and model errors are needed to explain the larger differences at the beginning of the period.

Figure 3 shows that the observed or modelled discharge trends at the annual discharge are mainly linked to climate variability and change, and not to anthropization. The trends are due to the natural variability (from annual to multi-decadal scales (Boé and Habets, 2014)) and the human-induced climate change.

2. Interest of fine scale data to validate or constrain models

At the scale of the entire Garonne basin, uncertainties in the meteorological forcing and observation errors cause uncertainties in the discharge trend estimates which are larger than the averaged effects of anthropization. This is not the case for smaller sub-basins or at the seasonal scale, as irrigation is most prevalent during the summer months, and hydroelectric power production is dominant in winter, due to the high proportion of electrically heated houses in France. Discharge variability is also underestimated by the models because both land use and vegetation cycles are assumed to be constant over the whole period. In addition to discharge data, there is a need for additional data to either validate or constrain the models. Satellite data are especially adapted, provided that they have a high enough resolution. In the remaining part of this Section, we provide two examples that demonstrate the added value of fine scale satellite data for hydrological modelling.

2.1 Snow cover

The Ariège basin at Foix is one of the major mountainous sub-basins of the Garonne basin. Its area is 1340 km² and its mean annual discharge is around 40 m³ s⁻¹. As it contains a complex network of dams used for hydropower, the observed discharge is not representative of natural processes (in particular snow melt). Recently, Gascoin et al. (2015) built a snow cover dataset based on the space-based MODIS products, MOD10A1 and MYD10A1 (Hall et al., 2007), for the Pyrenees. This dataset provides snow cover extent at a daily time step over the region since 2000, with 500 m resolution. The MODIS data set was validated against in situ and Landsat data. This dataset complemented the in situ snow cover and discharge observations that are available for the basin. In addition, Heindrickx and Sauquet (2013) produced a series of pseudo-natural discharge values for the Ariege River at Foix, based on dam operations.

The snow cover dataset was used to validate the snow cover extent simulated by SIM. The snow model of SIM is the multilayer model ISBA-ES (Boone and Etchevers, 2001). The snow cover fraction is a function of snow water equivalent. SIM is a distributed model using an 8 km grid; two versions of the model were considered. The first is the standard version (ISBA) whereas the second is a version taking into account up to four elevation bands in mountainous grid cells, characterized by a high sub-grid

variability of orography (ISBA-M). Figure 4 shows the comparison between snow observations and the two model versions for two contrasting winters (2008/2009 and 2009/2010). Over the whole period (from 2000 to 2013), the correlation for daily data is very high (0.96), but the model has a small negative bias (0.05), which is especially visible during, or immediately after, snowfalls (e.g., in November 2008). A possible explanation for these temporary biases may be the very simple relation between snow cover equivalent and the snow fraction implemented in the model. Indeed, in a study of an alpine catchment (the Durance), Magand et al. (2014) highlighted the fact that the snow cover extent varies faster during winter than during the ablation season because melting occurs at preferential locations. In our case, underestimation mainly occurs from December to March. The difference between the simulations with and without elevation bands is usually low, except at the end of the season, when the snow cover fractions simulated using elevation bands are higher.

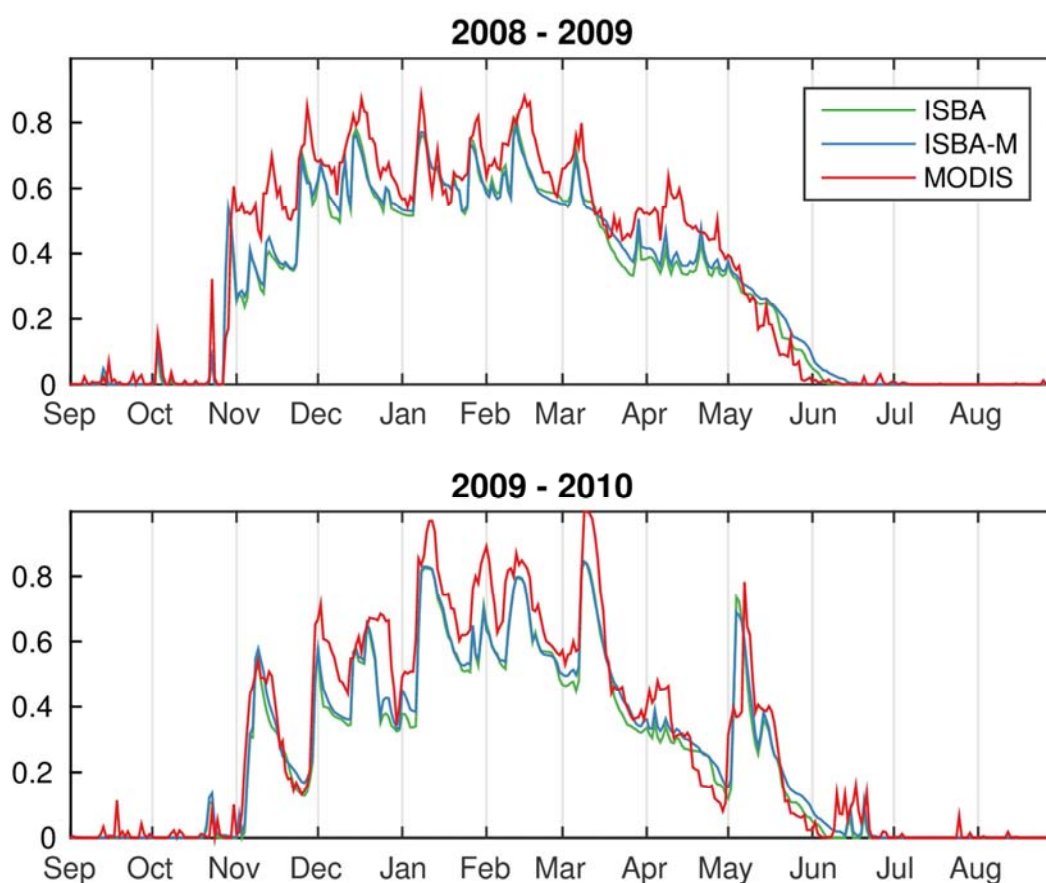


Figure 4: Fractional snow cover extent for the Ariège catchment at Foix : comparison of the snow cover extent simulated by the standard version of ISBA (ISBA) and the version accounting for elevation bands in mountain regions (ISBA-M) with the MODIS-derived climatology for two winters.

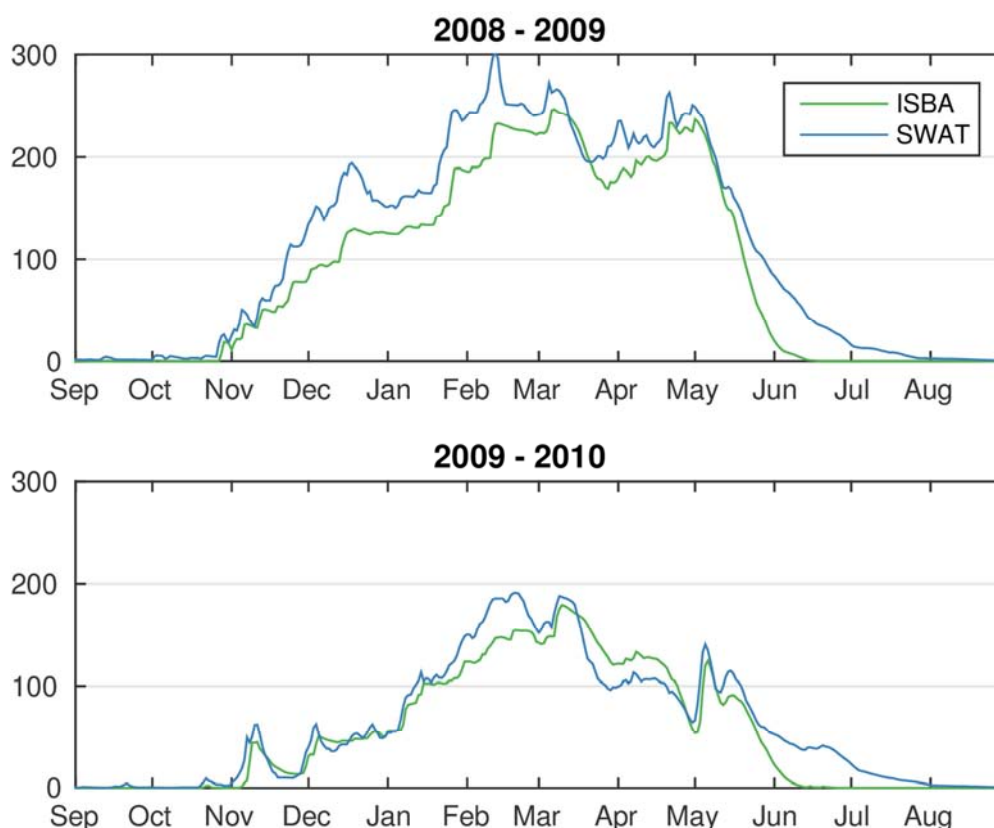


Figure 5: Snow water equivalent for the Ariège catchment at Foix: comparison of the snow water equivalent (mm) simulated by ISBA and SWAT over two years.

The snow water equivalent produced by ISBA was also compared to the snow water equivalent simulated by the SWAT model applied to the Garonne basin (Grusson et al. 2015). In this version, the snow module of SWAT used 10 elevation bands over each snow dominated sub-watershed, where each band covers one-tenth of total sub-watershed elevation. The agreement between the two models is high (Figure 5), even if the SWAT model tends to overestimate the snow cover in spring and summer (as also shown by Grusson et al. 2015, using in situ measurements), the mean bias being less than 13 mm snow water equivalent (SWE).

Grusson et al. (2015) highlighted the positive impact of elevation bands in SWAT on the river discharge simulation. Even if the snow cover extents simulated by ISBA and ISBA-M are very close, the impact on the river discharge is substantial: the monthly efficiency improved from 0.48 to 0.68 when compared to the operational measurements at Foix, and from 0.63 to 0.85 when compared to the naturalized discharge proposed by Heindrickx and Sauquet (2013).

Logically, it is necessary to pay great attention to the spring season in the evaluation of the snow cover extent. In our case, the large differences between the simulations appeared during this period. The use of space-based snow cover extent may be a good alternative for the validation of snow cover simulations in the absence of natural river discharge estimates.

2.3 Crop sowing date

The water balance of crop areas is highly influenced by the precise timing of operations such as sowing and harvesting, as well as irrigation for some crops. Hydrology and crop models have been coupled to take into account the influences of both hydrological settings and of agricultural practices on the water and nutrient cycles at the agricultural catchment scale. Most of these applications require spatially distributed models, where information on soil-crop location within the slopes as well as on hydrological settings (i.e. topography, groundwater storage, reservoir location or irrigation pumping) are included to provide spatially explicit information on water uses (Ferrant et al. 2014a; Perrin et al. 2012) and nutrient transfer and transformation within the catchment (Beaujouan et al. 20012; Ferrant et al. 2011).

Uncertainties raised by these modelling approaches at the watershed level are mainly related to the lack of agronomical observations in all soil-climatic situations encountered within the catchment and to the lack of spatial a priori knowledge on physical processes, such as soil organic matter transformations, saturated area extent and dynamics after rainfall events which influence both runoff and crop growth. Senthilkumar et al. (2015) highlighted the link between sowing, harvesting dates and water scarcity. Hutchings et al. (2012) demonstrated the importance of the timing of field operations for complex dynamic carbon and nitrogen models. However, the timing of operations is often derived from rough regional estimates, or from farmers' enquiries further extrapolated to cover the whole catchment. The use of high resolution remotely sensed data is a promising way to improve our knowledge of some operations, in particular for winter crops.

Ferrant et al. (2014a) have explored the potential of satellite remote sensing to gain information on the crop sowing date in the cultivated hydrological catchment of Auradé

(320 ha) in the Garonne basin. They used a series of 105 leaf area index (LAI) maps derived from high resolution Formosat-2 images acquired from 2006 to 2010 to calibrate the sowing date of sunflower and winter wheat crops at the crop field level in the agro-hydrological model TNT2 (Beaujouan et al. 2002). This model shares the same modeling objectives as the SWAT model (a comparison between both models is reported in Ferrant et al., 2011). An optimization process of the sowing date was done by matching the early variations of simulated LAI with the LAI derived from Formosat-2 images at crop-field scale. The results showed a large impact on in-stream nitrogen fluxes, but a limited impact on the mean annual discharge.

However, at shorter time-scales, the impact was larger. The optimization process based on the sowing date significantly improved the temporal growth dynamic simulated for the winter wheat whereas that for sunflower was not much impacted. A delay of a few weeks in the sowing date of winter wheat (from October to November) postponed the emergence date by a few months (by 3 months in the case of the year 2010), while the emergence date of sunflower directly followed the sowing dates in spring (indeed in this season the cumulative daily temperature threshold was reached in a few days). The winter wheat growth and biomass was then highly impacted by the optimization process, which led to a modification of the nitrogen and water cycles between a priori and optimized situations.

We provide here the analysis of the water budget at a monthly time step. In Figure 6, we represent the differences between both simulations in % for the discharge and the simulated actual evapotranspiration (AET). It appears that the crop growth optimization highly impacts the monthly AET, from - 17% to + 8%. The differences are bigger in 2010 for which the use of satellite LAI leads to earlier sowing dates and wheat emergence dates for most of the fields. An increase of AET fluxes associated to this earlier development is simulated from March to June, followed by a relative decrease at the end of the growth period. This decrease is explained by a drop of soil water content due to an earlier root water uptake during spring. Monthly discharges are decreasing with the increase of AET at the end of winter and spring, and remain lower than a priori simulations because of drier soils.

This type of approach can be implemented at the scale of the Garonne, either with the SWAT or SIM models, when the Sentinel-2 data will be available. The optimization process requires running the model not more than six times. Depending on how fast a model run is, the process at the crop field level can be considered not to consume too much computer time. The satellite derived information can be used at the crop field level or at the finer spatial scale needed by the models, the hydrologic response unit (HRU) for SWAT. This is defined mainly by the land use spatial resolution, which can be either at the crop field level or at the computation square grid for SIM (8x8 km). The need for spatial aggregation of the satellite information depends also on the agricultural context. In this example, sunflower and winter wheat crop succession implies that both crops are spatially mixed in the studied area and should not be aggregated at the sub-basin scale. Indeed, it is crucial to differentiate between winter and spring crops as the winter crops induce larger uncertainties in the simulations. The added value of the Formosat-2 high resolution (which will be provided with Sentinel-2) is that it can explicitly provide spatial information on the inter-crop field heterogeneity, to study its impact on the global water cycle.

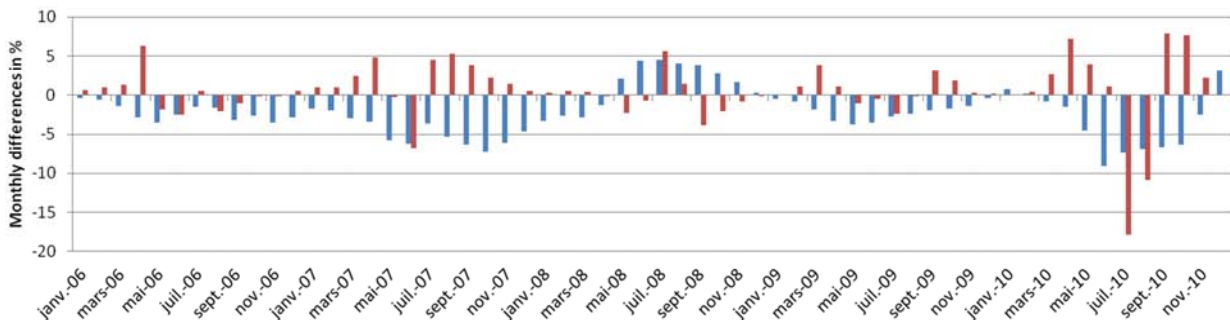


Figure 6: Monthly discharge (blue) and evapotranspiration (red) simulated by the TNT2 model: differences between “optimized sowing date” and “a priori sowing dates”

3 Explicit modelling of human activities at the scale of the basin using a multi-agent simulation platform

3.1 MAELIA: a multi-agent platform of social-ecological systems

Water resource management problems arise from interactions within socio-hydrology systems, a particular type of human-nature systems. Classically these systems are conceptualized as being composed of four main core sub-systems (McGinnis et al. 2014): (a) resource systems (e.g., hydrological systems), (b) resource units (e.g., water

Annexes 3: On the use of hydrological models and satellite data to study the water budget of river basins affected by human activities: examples from the Garonne basin of France (Martin et al. 2016)

volume and flow), (c) governance systems (e.g., which regulate uses and manage water resources), and (d) users (e.g., individuals and groups who use water). Anderies et al. (2004) highlighted the role of their infrastructure (e.g., dams, water distribution networks) in the functioning of these systems.

Table 1. Key processes of socio-hydrology systems represented in the MAELIA multi-agent platform. Note that "Reference watershed" in the Table corresponds to the Finest watershed used by French administration to manage water. HRU stands for "hydrological response unit" (with homogenous soil, slope and land cover)

Processes	Nature of the model	Spatial and temporal resolutions
<i>Ecological:</i>		
- Hydrology (surface and groundwater)	Land and routing phases of SWAT (Arnold et al. 1993)	Reference watershed /Day
- Crop growth	AqYield: empirical generic crop model (Constantin et al. 2015)	Field/Day
- Other plant growth	Simplified version of SWAT formalisms	HRU ⁴ /Day
<i>Socio-economic:</i>		
- Land cover change	Statistical and probabilistic model based on the analysis of the Corine Land Cover database (http://sd1878-2.sivit.org/)	HRU/Year
- Demography	Statistic model based on French national data	District/Year
- Domestic consumption	Econometric model (Reynaud and Leenhardt 2008)	Withdrawal and reject points/Day
- Industrial consumption	Statistical model	Withdrawal and reject points/Day
<i>Decision-making:</i>		
- Crop allocation (cropping plan)	Multi-criteria decision based on Dempster-Shafer belief theory integrated into a Belief-Desire-Intention architecture (Taillandier et al. 2012)	Farm/Year
- Crop management	Nested decision rules (IF THEN ELSE)	Field/Day
- Dam management	Nested decision rules (IF THEN ELSE)	Dam and supplied river section/Day
- Water use restriction	Nested decision rules (IF THEN ELSE)	Restriction zone/Day

Therond et al. (2014) developed the Multi-Agent for Environmental Norms Impact Assessment (MAELIA) platform to perform an integrated assessment of the impacts of endogenous and exogenous changes on the functioning of socio-hydrology systems. MAELIA focuses on water deficit issues and was applied in two rivers sub-basins of the Garonne basin: the Aveyron basin (a sub-basin of the Tarn basin) and the upstream

part of the Garonne basin itself (upstream of the confluence with the Ariège). Originally, it allows simulating the key interactions between and within the four core sub-systems. Thanks to its multi-agent architecture, it represents the decision making process of water users (including irrigators), dam managers and state services regarding water use restrictions. In this platform, hydrology is modelled through the use of formalisms of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model (Arnold et al. 1993), which is fully coupled with human processes such as irrigation. Spatial delineation of farms' islets (a set of contiguous fields) and the annual crop pattern of each farm of the investigated river basin are provided by the French Land Parcel Identification System (LPIS) dataset (Inan et al. 2010). The analysis of different annual LPIS values allowed the reconstitution of the crop rotations of the different fields of the different farms' islets (Murgue et al. 2014, 2015). According to local databases, expert knowledge and geographic information system (GIS) treatments, each irrigated islet was connected with one or several water resources (river, small dam, or groundwater). Climate data used with MAELIA came from the Safran analysis system on an 8 x 8 km grid (see Section 3.3).

Table 1 synthesizes the main processes represented and the nature of the models used in MAELIA. All these intertwined processes interact at different spatial levels and at daily time steps in the platform, including feedbacks. For example, the crop water requirement at field level determines the farmer's decision and thus irrigation water withdrawals in the different resources. This decision impacts river flows that determine other decisions for water releases and/or withdrawal restrictions. In return, the resulting hydrology determines the water available for irrigation and so the farmers' capacity to irrigate and therefore the crop growth. Modelling methods for these key processes are briefly described below.

3.1.1 Agricultural processes

MAELIA simulates the spatio-temporal dynamics of crop management operations and their impacts on crop growth. The crop model AqYield (Constantin et al. 2015) simulates plant growth, soil water dynamics, and crop yield in each field. It is a simple empirical model that proved its robustness under the pedoclimatic (soil temperature and moisture) conditions and the crop irrigation strategies of the Garonne basin (Constantin

et al. 2015; Murgue et al. 2014). AqYield allows the simulation of 17 crops/cultivars, including 12 species that cover 100% of the irrigated areas of the Garonne basin: sunflower, wheat, barley, peas, rapeseed, sorghum, soya, temporary and permanent meadows, apple, plum, and maize. Maize being locally the most intensively irrigated specie, it is considered under 8 crops/cultivars: 1 for seed, 1 for forage and 6 for grain production ranging in 6 earliness categories: very late (VL), late (L), semi late (SL), semi-early (SE), early (E), very early (VE). AqYield provides soil and plant indicators to the farmer agents and hydrological information (drainage and runoff) to the MAELIA hydrological module.

The use of MAELIA in a river basin requires the description of crop management strategies (CMS) by production situation type (e.g., a combination of pedoclimatic conditions and farm type). A CMS must be defined for each crop of each crop rotation affecting each field. A CMS is coded as a set of decision rules (DRs) using the typical syntax: “IF INDICATOR OPERATOR THRESHOLD AND INDICATOR OPERATOR [...] THEN ACTION (ELSE ACTION)”. Such a set of DRs should be seen as a pre-established strategy that defines the conditions to trigger various sequences of technical operations depending on soil, plant, climate, water resources conditions at field level or socio-economic conditions at farm level (e.g., workforce availability). There are about 30 individual rules per CMS (for up to 8 technical operations; Murgue et al. 2014). At the farm level, farmer agents manage the concurrence between technical operations considering pre-defined priorities. At the field level, farmer agents decide to withdraw water from a given resource, according to a priority rule between the various possible resources and accounting for how full they are.

3.1.2 Hydrological processes

The hydrological module in MAELIA uses the formalisms of the SWAT model to simulate hydrological fluxes at the sub-watershed level (25 km² in average). In MAELIA the SWAT algorithms were implemented for both (a) the “land phase” of the hydrologic cycle that controls the water loads to the main channel of each sub-watersheds (snowmelt, runoff, infiltration, redistribution in soil profile, evapotranspiration for non-crop plants, lateral subsurface flow and percolation into

shallow and deep aquifers) and (b) the “routing phase” of the hydrologic cycle that controls the water flows to the outlet of the watershed through the channel network (water routing through the channel, transfers to and from the shallow aquifer, evaporation).

3.1.3 Water management

Regarding water management, decision-making processes of dam manager and state services, respectively for water releases and withdrawal restrictions, are also coded as a set of IF-THEN decision rules. These decision rules must be parameterized locally by eliciting dam managers’ and state services’ current practices. In MAELIA each dam manager agent seeks to optimize releases according to objectives of sustaining targeted river flows and specific constraints of its dam(s): (a) reserved flow (minimum water flow at the exit of the dam), maximum flow due to dam and river characteristics, (b) period of release (e.g., for tourism), (c) transfer time between the dam and the targeted monitoring points, and (d) emptying curve of the reservoir (statistical curve used to help present releases without compromising late season ones). When it is not possible or sufficient to sustain water flow through water releases (no dams in the sub-watershed, no more available water in the dam) the state services might issue Drought Decrees that prohibit the withdrawal of water in some areas and for some days. Three levels of withdrawal restrictions can be launched: 1 or 2 days a week (level 1), 3 or 4 days a week (level 2), or 7 days a week (i.e. permanent prohibition, level 3). Each Drought Decree concerns one or several pre-defined “drought zones”. For level 1 or 2 these drought zones are divided in sectors (sub areas) so that each day of the week a different sector is successively concerned with the prohibition. Additionally, the decision to apply this restriction is constrained by principles regarding the progressiveness of regulations (i.e. withdrawal restrictions must be progressive) and down- and up-stream solidarity (up-stream area of a given drought zone must be in a restriction level that is greater or equal). Restriction decisions are taken once every week. The modeling of dams and regulation management is detailed in Mayor et al. (2012).

3.1.4 Other socio-economic processes

Regarding other socio-economic processes, such as domestic and industrial water demands and non-agricultural land cover evolutions, MAELIA uses statistical and econometric formalisms either tailored (e.g., industrial demand) or existing (e.g., Reynault and Leenhardt, 2008, for an econometric model of domestic demand according to the water price, principal residence rate, household income, summer maximum temperature, and population density).

3.1.5 Calibration of the model

When applying MAELIA to a river basin the calibration of the MAELIA platform is performed module by module, combining quantitative and qualitative approaches. Many parameters can influence the model outputs, with a high level of interactions. In order to get an overview of the model behavior and to screen influential parameters, multiple sensitivity analyses are performed, while considering some sub-sets of processes or not. These step-by-step sensitivity analyses enabled the different influences and interactions to be disentangled, and are a preliminary step to the calibration process. The calibration process is multi-objective (e.g., reproducing water flows and anthropogenic dynamics). It uses a multi-point approximation method (Lardy et al. 2014). The principle of this method is to replace the original optimization problem by a succession of simpler and time-independent problems. This approximation is achieved thanks to meta-models for a limited part of the parameter space.

3.2 Evaluation and impact of changes in the spatial allocation of cropping systems in the Aveyron sub-basin

3.2.1 Studied area and methodology

Through a participatory design methodology, Murgue et al. (2015) identified with stakeholders from the Aveyron sub-basin different types of changes in the socio-hydrology system that may limit the recurrent water deficits experienced. These deficits correspond to the annual water quantities necessary to maintain river flows above the regulatory minimum thresholds, i.e. the minimum flow that ensures the proper functioning of aquatic environment locally (for details see Mazzega et al. 2014). The methodology was implemented on an 800 km² irrigated landscape located in the lower

reaches of the Aveyron sub-basin. The mean annual volume withdrawn for irrigation is around 18 hm³. Feedstock cereals and maize cropping dominate the area, with numerous patches of fruit and high-income seed-production fields. The utilized agricultural area is 40,000 ha. There are about 1150 farms, of which 43% are irrigated.

During the design process, agricultural land stakeholders as well as water management and environment authorities were asked to specify and quantify as precisely as possible the nature of the changes (e.g., crop rotation, crop management practices) and their location (e.g., in which soil, farm type, or pedoclimatic area), including farm level acceptability thresholds (e.g., which area in a farm can support changes). The geographical information system included in MAELIA acted as a hub during the design process, providing information to ease the elicitation of participants' visions and enabling the formalization of the proposals into spatially explicit alternatives.

Information on the current spatial distribution of cropping systems and the designed alternatives were used as inputs to the MAELIA platform. It was run on a 10 years climatic series (2001-2010) to assess effects of alternative spatial allocations of cropping systems on daily river flows and water management (e.g., dam releases of water).

3.2.2 Evaluation of the MAELIA instance

As suggested by Bergez et al. (2010) regarding evaluation of integrated modeling tools, we articulated quantitative and qualitative approaches for the evaluation of the MAELIA usage in the Aveyron sub-basin. For this, we organized workshops with local agricultural and water management experts and presented them with outputs of simulations using the current cropping system spatial distribution, and dams and restriction management strategies as input. During these workshops the analyses of the simulations were focused on key outputs that were representative of the socio-hydrology system behavior; e.g., annual irrigation withdrawals, dynamics of crop management operations (per CMS pedoclimatic conditions), and simulated stream flow for the main rivers. We provided local experts with the quantitative data when available, mainly the regional Water Agency data on annual withdrawal levels (based

on farmer annual declarations), daily measurements of the river flows at river basin outlet, daily dam water releases, etc.

Outcomes of the quantitative and qualitative assessments showed that our use of the MAELIA platform allowed the current intra- and inter-annual withdrawal dynamics from the field to the sub-basin scale to be reproduced (for details see Murgue et al. 2014). Local experts compared simulation outputs with the data from the regional Water Agency and concluded that the simulations were very satisfactory (Figure 7). They also validated the simulated dynamics of crop management operations (e.g., sowing dates, first and last irrigation dates). We also observed that MAELIA reproduced with a good accuracy the observed flow dynamic during the low-flow season (results not shown here). However, even if simulated dam water releases and restriction days were considered as being quite consistent in their patterns, they did not match with the observed daily data. The detailed analysis of these results with local experts showed that, actually, the decision process of releasing dam water and setting withdrawal restrictions does not follow the rules determined by the local authorities.

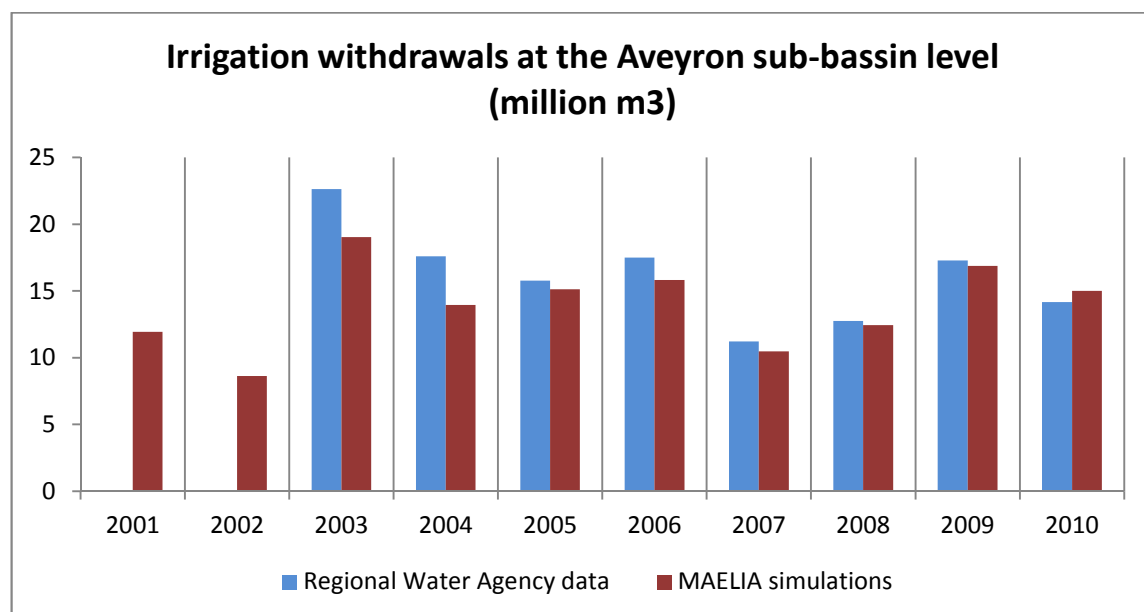


Figure 7: Annual withdrawal volumes (in million m³) estimated by the Regional Water Agency through aggregation of annual irrigator declarations (2003-2010, blue) and estimated with the MAELIA modelling platform through simulation of irrigation management strategies at the field level (2001-2010, red). For the MAELIA simulations, in 2003, 2004 and 2005, the crop patterns of farms in the sub-basin were estimated while for the other years observed data from the French Land Parcel Identification System were used. This may explain the underestimation of water withdrawals by MAELIA for 2003 and 2004

The actual process is the outcome of a social negotiation where “the negotiation ingredients may include the development of conflicts among the stakeholders, breaches

of discussions, the game of political influences, issue linking, electoral considerations and the preservation of the social peace, etc.” (Mazzega et al. 2014). Even if the outcomes of such a negotiation process cannot be simulated with a modeling platform like MAELIA, this method can be used to assess *ex ante* (based on forecasts) theoretical impacts of changes in agricultural activities or water resources management under the *ceteris paribus* (all other things being equal) hypothesis (Mazzega et al., 2014)

3.2.3 Impact assessment of crop rotation changes

Here, we present the assessment of one key co-designed alternative aiming at reducing the overall irrigation demand and so reduce the global water deficit of the Aveyron sub-basin. It corresponds to the replacement of irrigated maize mono-cropping by a maize-wheat rotation. The wheat crops are irrigated if necessary since they are cropped on fields where irrigation is possible. When designing this alternative, farmers specified that for economic reasons the maize-wheat rotation should be only implemented on 40% of farms’ maize mono-cropping area (i.e. in a particular year, the wheat crop would replace maize on only 20% of the maize mono-cropping area). This alternative resulted in changing maize rotation practices in 100 ha on about 3,000 ha of maize mono-cropping. As a test, we also assessed the potential impact on river flow of this type of alternative if they were implemented on 100% of the farms’ maize monocropping area. These two different simulations are called AltRot40% and AltRot100%, respectively.

Table 2 summarizes the impact on the reduction of annual withdrawals in the study area and the potential reduction of the estimated deficit during the two driest summers in the 10-year studied period. AltRot40% allows for an average 4.2% reduction of annual withdrawals from the watershed. For the years 2003 and 2009 (the two driest summers in the ten years climatic series), the change triggers a reduction of about 0.8 and 1.0 hm³, respectively 11% and 14% of the estimated water deficit of the basin. AltRot100% has a more significant impact, allowing a reduction of the withdrawals by about a half of the estimated deficit in the driest years.

Annexes 3: On the use of hydrological models and satellite data to study the water budget of river basins affected by human activities: examples from the Garonne basin of France (Martin et al. 2016)

Table 2. Impact of the alternate scenarios AltRot40% (replacement of irrigated maize mono-cropping by a maize-wheat rotation over 40% of the present maize fields) and AltRot100% (same as Alt40%, but over 100% of the irrigated maize mono-cropping) on the water withdrawn and the water deficit, expressed in %

	Water withdrawn	Water deficit	Water deficit
	2000-2010	2003	2009
AltRot40%	-4.2%	-11%	-14%
AltRot100%	-10.5%	-27%	-39%

The analysis of simulated discharges showed that AltRot40% and AltRot100% have different effects depending on the sub-watershed. In watershed, where river flows are driven by dam releases (e.g., the Aveyron river), these alternatives have a low impact on the river flow itself. They allow the saving of water in dams at the beginning of the irrigation season, and therefore to secure the possibility of replenishing the flows with water releases at the end of the season. In catchments where water releases from the dam have no (significant) impacts, the simulations showed that the implementation of these alternatives variously raises and lowers the discharge, through the cropping season, and has a tendency to reduce the river discharge at the end of the season (Figure 8). For the Aveyron river, AltRot100% significantly raises the flow level during the low flow season. For the Lère sub-watershed, the impact can be either positive or negative; however, it is always negative towards the end of the season (October and November).

This occurrence is explained by the fact that replacing maize by wheat, while it reduces irrigation withdrawals, also induces less drainage and runoff from the fields to the surrounding rivers. Indeed, as wheat evapotranspiration is higher than that for maize in spring, the soil moisture level is lower: the spring rainfall almost entirely goes into the soil under wheat and evapotranspires during May and June. Conversely, in a maize field, with the later development of the crop, the soil is kept moist and the rainfall is drained to the aquifers or runs off to the adjacent rivers. As the growing season progresses, the soil moisture under wheat is lower due to evapotranspiration. As a consequence, the summer rain has to replace the water in the soil before the adjacent rivers are fed. In contrast, as maize is intensively irrigated during low flow season the soil is kept moist, and the summer rain is drained or runs off to adjacent water bodies.

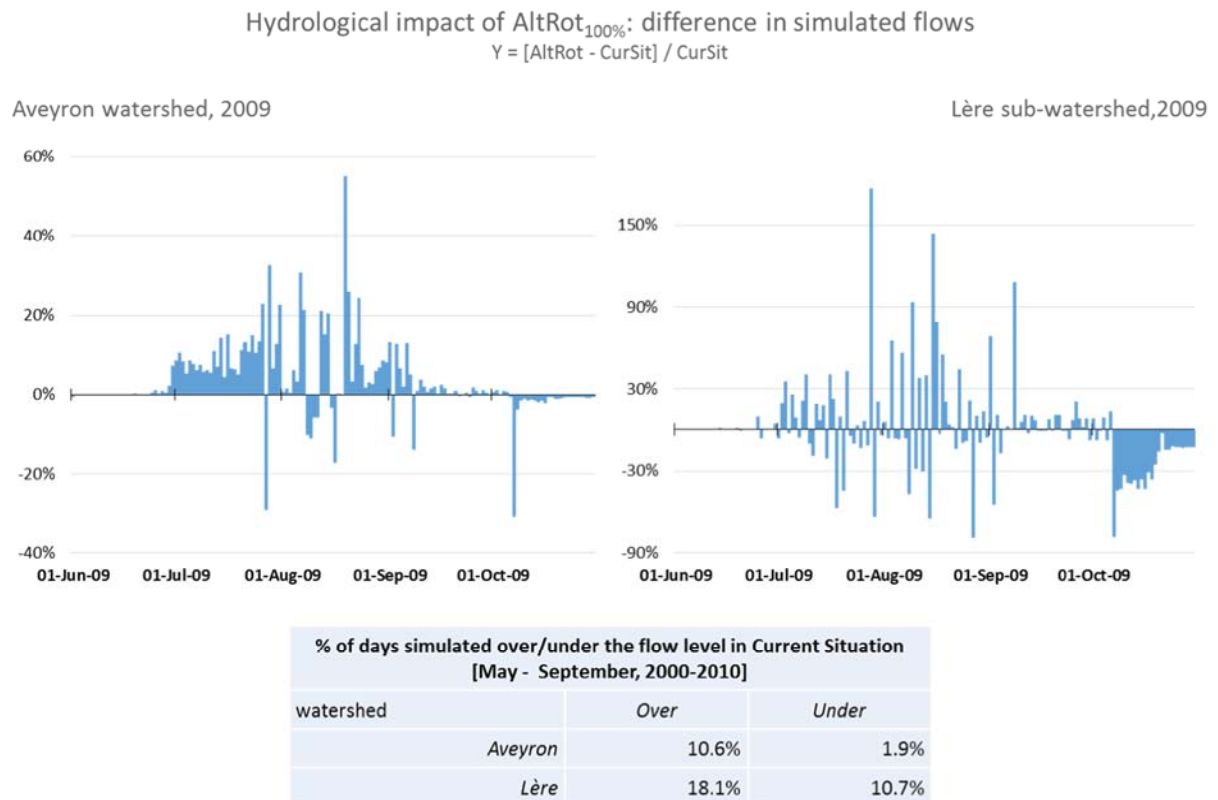


Figure 8: Difference (in %) of the simulated outflows between AltRot100% and the current situation [(AltRot - CurSit)/CurSit] for the Aveyron river (strongly supported by water releases from dams) and the Lère river (with only a few water releases from dams)

In conclusion, neither AltRot40% nor AltRot100% can meet the expectations of local water managers to suppress the annual water deficits but, of course, AltRot100% has a stronger impact than AltRot40%. However, as this alternative is far beyond that designed by local stakeholders, its acceptability by farmers seems to be difficult. The MAELIA simulations showed that in situations where water is not available from reservoirs to replenish the river flow and irrigation water is abstracted directly from the rivers, these alternatives may have negative effects all through the season, especially at the end of the growing season. Even if the evaluation of the MAELIA simulations gave satisfactory results, these scenarios are subject to model errors. The figures provided by MAELIA must be used with caution; they must be further confirmed by sensitivity studies to individual processes or by the use of different models.

Conclusions

The Garonne river area has been subjected to significant climate change over the past fifty years. Both ISBA-MODCOU and SWAT hydrological models highlight trends toward less water resources being available from year to year. This negative trend of the Garonne river flow is mainly due to the increasing simulated evapotranspiration.

There are now more high resolution space-based data providing useful information on both natural and anthropogenic processes. Two examples have been considered in this paper. In the case of snow, MODIS data were successfully used to validate the snow cover extent of the Ariège at Foix, a mountainous sub-catchment. However, some difficulties may arise when converting the snow cover extent to snow water equivalent, as the relation between these two quantities may be complex. The results over the Garonne basin derived from the ISBA-MODCOU model, which is able to simulate both the snow cover extent and discharge, are in good agreement with both the MODIS and the natural discharge of the Ariège river at Foix. The explicit treatment of elevation bands significantly improved the score of the discharge in ISBA-MODCOU and SWAT (Grusson et al. 2015), while the differences are small concerning the snow cover extent. The MODIS snow cover extent validation may then be extended to the whole mountain range, in order to complement existing in situ snow cover measurements and discharge data.

Concerning the vegetation growth, the use of realistic sowing dates modified the actual evapotranspiration and discharge, with a contrasted impact depending on the year. This pilot study was limited to a small watershed in the Garonne river basin because (a) the agro-hydrological model used requires calibration of water cycle using discharge and runs at the spatial resolution of the high-resolution satellite images (8 meters), and (b) these satellite data with a short revisit time were only available within a narrow swath (Formosat-2). However, a simplified crop growth modelling approach based on satellite images (Duchemin et al. 2008) can be adapted to larger study areas, and the upcoming Sentinel satellite missions will provide similar imagery at the global scale from 2016. In particular, the Sentinel-2 multispectral imagery (Drusch et al. 2012) will enable LAI maps to be generated at 20 m resolution every five days for all land areas. Such a high spatial resolution is necessary in areas such as the Garonne river basin because the cultivated fields are often smaller than 10 ha. With current mid-resolution sensors such

as MODIS (500 m), there is a risk of mixing the signal from winter and summer crops which are often cultivated in adjacent fields. Shorter revisit times (e.g., in comparison with the 16 days for the Landsat mission) are also needed to capture the crop growth and the date of the harvest. We expect that these remote sensing data will enable land surface models to be better constrained so that the hydrological modelling at the catchment scale may be improved. Concerning the impact of human activities, the multi-agent simulation platform MAELIA is able to simulate the impact of realistic agricultural scenarios discussed with local stakeholders on the river flows and water management (i.e. dam releases). The scenario tested in this paper showed that substantial hydrological impacts may only be caused by very significant changes of the crops being grown.

The aim of the work described here is to build a coherent framework representing the socio-hydrology system at the scale of the Garonne catchment. The work must be completed to cover the whole basin, accounting for additional human processes, such as large reservoir management for hydropower and agriculture, and develop the validation using additional data. First, there is a need to develop methods to aggregate the information from the field to relevant hydrological components (sub-basins, irrigated areas, local aquifers, administrative areas, etc.). Secondly, present and future high resolution satellite information should be used to calibrate, constrain or validate the modeling. In addition to information on sowing dates, data from Sentinel-2 will provide information on vegetation development and proxies for the soil water holding capacity. The SWOT mission (to be launched in 2020, Biancamaria et al. 2015) is designed to observe the surface water elevation in rivers wider than 100 m and water bodies (lakes, reservoirs, ponds, continuous wetlands) with an area greater than 250 m x 250 m. In the Garonne catchment, it will provide information on the main rivers and on the actual water storage in the largest reservoirs. It is hoped that the construction of this modelling framework of the Garonne socio-hydrology system will provide valuable information for (i) the operational management of the low water flow period, (ii) the evaluation of scenarios for the development of agriculture, and (iii) the adaptation to climate change.

Acknowledgments

Annexes 3: On the use of hydrological models and satellite data to study the water budget of river basins affected by human activities: examples from the Garonne basin of France (Martin et al. 2016)

This work was carried out within the framework of the project REGARD funded by the STAE foundation (Toulouse, France). Discharge observations were provided by the French Hydro database (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, <http://www.eaufrance.fr>), which gathers data from many observers. The authors thank Eric Sauquet and Frédérick Hendrickx for fruitful discussions on the Garonne river and for making available the natural river flows at Foix, and the Editor in Chief for suggesting linguistic changes. This paper arises from the International Space Science Institute (ISSI) workshop “Remote sensing and water resources”, held at ISSI, Bern, Switzerland, from 6 to 10 October 2014.

Annexes 3: On the use of hydrological models and satellite data to study the water budget of river basins affected by human activities: examples from the Garonne basin of France (Martin et al. 2016)

References

- Alcamo J, Döll P, Henrichs T, Kaspar F, Lehner B, Rosh T, Siebert S (2003) Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences Journal* 48 317:337
- Anderies J. M., JanssenMA, Ostrom E (2004) A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective. *Ecology and Society* 9 1:18
- Arnold JG, Allen PM, Bernhardt G (1993) A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology* 142 :47-69
- Artinyan E, Habets F, Noilhan J, Ledoux E, Dimitrov D, Martin E, Le Moigne P (2008) Modelling the water budget and the riverflows of the Maritsa basin in Bulgaria. *Hydrology and Earth System Sciences* 12 :21-37
- Asokan S, Destouni G (2014) Irrigation Effects on Hydro-Climatic Change: Basin-Wise Water Balance-Constrained Quantification and Cross-Regional Comparison. *Surveys in Geophysics* 35:879-895
- Bardeau M., Bouardaa S. (2010) Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin
- Adour-Garonne - Modélisation de la nappe alluviale de la Garonne en Haute-Garonne – Année 3. BRGM/RP-58063-FR. Rapport final. http://sigesmpy.brgm.fr/IMG/pdf/mod31_annee3_final_rp-58063-fr.pdf Accessed 27 January 2016
- Beaujouan V, Durand P, Ruiz L, Arousseau P, Cotteret G (2002) A hydrological model dedicated to topography-based simulation of nitrogen transfer and transformation: rationale and application to the geomorphology - denitrification relationship. *Hydrological Processes* 16 :493-507
- Biancamaria S, Lettenmaier DP, Pavelsky TM (2015) The SWOT mission and capabilities for land hydrology. *Surveys in Geophysics* (submitted)
- Boone A, Etchevers P (2001) An intercomparison of three snow schemes of varying complexity coupled to the same land surface model: Local-scale evaluation at an Alpine site. *J. Hydrometeorol.* 2:374-394
- Caballero Y, Voirin-Morel S, Habets F, Noilhan J, LeMoigne P, Lehenaff A, Boone A (2007) Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resour. Res.* 43 doi:10.1029/2005WR004192
- Constantin J, Willaume M, Murgue C, Lacroix B, Therond O (2015) The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology* 206:55-68
- Courault D, Hadria R, Ruget F, Oliso A, Duchemin B, Hagolle O, Dedieu G (2010) Combined use of FORMOSAT-2 images with a crop model for biomass and water monitoring of permanent grassland in Mediterranean region. *Hydrology and Earth System Sciences* 14:1731-1744
- Decharme B, Martin E, Faroux S (2013) Reconciling soil thermal and hydrological lower boundary conditions in land surface models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118:7819-7834
- Destouni G, Jaramillo F, Prieto C (2013) Hydroclimatic shifts driven by human water use for food and energy production. *Nature Clim. Change* 3:213-217
- Döll P, Hoffmann-Dobrev H, Portmann F, Siebert S, Eicker A, Rodell M, Strassberg G, Scanlon B (2012) Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *Journal of Geodynamics* 59-60:143-156
- Döll P, Kaspar F, Lehner B (2003) A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology* 270:105-134
- Döll P (2009) Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. *Environ. Res. Lett.* doi:10.1088/1748-9326/4/3/035006

Annexes 3: On the use of hydrological models and satellite data to study the water budget of river basins affected by human activities: examples from the Garonne basin of France (Martin et al. 2016)

Döll P, Müller Schmied H, Schuh C, Portmann FT, Eicker A (2014) Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites. *Water Resources Research* 50:5698-5720

Donohue RJ, Roderick ML, McVicar TR (2007) On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences* 11:983-995

Douglas-Mankin KR, Srinivasan R, Arnold JG (2010) Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications. *Trans. Asabe* 53:1423-1431

Drusch M, Bello U D, Carlier S, Colin O, Fernandez V, Gascon F, Hoersch B, Isola C, Laberinti P, Martimort P, Meygret A, Spoto F, Sy O, Marchese F, Bargellini P (2012) Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment* 120:25-36

Duchemin B, Maisongrande P, Boulet G, Benhadj I (2008) A simple algorithm for yield estimates; Evaluation for semi-arid irrigated winter wheat monitored with green leaf area index. *Environmental Modelling & Software* 23:876-892

Durand M, Neal J, Rodriguez E, Andreadis KM, Smith LC, Yoon Y (2014) Estimating reach-averaged discharge for the River Severn from measurements of river water surface elevation and slope. *Journal of Hydrology* 511:92-104

ESDB (2006) european soil data base v2.0, 1kmx1km "dominant value and dominant STU" Rasters. http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/ESDB_data_1k_raster_intro/ESDB_1k_raster_data_intro.html
Accessed 20 April 2015

Faroux S, Kaptué Tchuenté A T, Roujean J-L, Masson V, Martin E, Le Moigne P (2013) 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. *Geosci. Model Dev.* 6:563-582.

Ferrant S, Oehler F, Durand P, Ruiz L, Salmon-Monviola J, Justes E, Dugast P, Probst A, Probst J-L, Sanchez-Perez J-M (2011) Understanding nitrogen transfer dynamics in a small agricultural catchment: Comparison of a distributed (TNT2) and a semi distributed (SWAT) modeling approaches. *Journal of Hydrology* 406:1-15

Ferrant S, Gascoin S, Veloso A, Salmon-Monviola J, Claverie M, Rivalland V, Dedieu G, Demarez V, Ceschia E, Probst J-L, Durand P, Bustillo V (2014a) Agro-hydrology and multi-temporal high-resolution remote sensing: toward an explicit spatial processes calibration. *Hydrology and Earth System Sciences* 18:5219-5237

Ferrant S, Caballero Y, Dewandel B, Perrin J, Dazin F, Aulong S, Ahmed S, Maréchal, JC (2014b)" Projected impacts of climate change on farmers' extraction of groundwater from crystalline aquifers in South India", *Scientific Reports*, doi:10.1038/srep03697.

Foley JA, DeFries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR, Chapin FS, Coe MT, Daily GC, Gibbs HK, Helkowski JH, Holloway T, Howard EA, Kucharik CJ, Monfreda C, Patz JA, Prentice IC, Ramankutty N, Snyder PK (2005) Global Consequences of Land Use. *Science* 309:570-574

Frans C, Istanbuluoglu E, Mishra V, Munoz-Arriola F, Lettenmaier DP (2013) Are climatic or land cover changes the dominant cause of runoff trends in the Upper Mississippi River Basin? *Geophysical Research Letters* 40:1104-1110

Gascoin S, Hagolle O, Huc M, Jarlan L, Dejoux J-F, Szczypka C, Marti R, Sánchez R (2015) A snow cover climatology for the Pyrenees from MODIS snow products. *Hydrology and Earth System Sciences* 19:2337-2351

Gassman PW, Reyes MR, Green CH, Arnold JG (2007) The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Trans. Asabe*, 50:1211-1250

Gaudou B, Sibertin-Blanc C, Therond O, Amblard F, Auda Y, Arcangeli J-P, Balestrat M, Charron-Moirez M-H, Gondet E, Hong Y, Lardy R, Louail T, Mayor E, Panzoli D, Sauvage S, Sánchez-Pérez J-M, Taillandier P, Van Bai N, Vavasseur M Mazzega, P (2014) The MAELIA Multi-Agent Platform for Integrated Analysis of Interactions Between Agricultural Land-Use and Low-Water Management Strategies. In: Alam S J, Parunak HVD (ed) *Multi-Agent-Based Simulation XI*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 85-100.

Annexes 3: On the use of hydrological models and satellite data to study the water budget of river basins affected by human activities: examples from the Garonne basin of France (Martin et al. 2016)

Goderniaux P, Brouyère S, Fowler HJ, Blenkinsop S, Therrien R, Orban P, Dassargue A (2009) Large-scale surface-subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. *J. Hydrol.* 373:122–138

Green TR, Bates BC, Charles SP, Fleming PM (2007) Physically based simulation of potential effects of carbon dioxide-altered climates on groundwater recharge. *Vadose Zone J.* 6 :597–609

Grouillet B, Fabre J, Ruelland D, Dezetter A (2015) Historical reconstruction and 2050 projections of water demand under anthropogenic and climate changes in two contrasted Mediterranean catchments. *Journal of Hydrology* 522:684-696

Grusson Y, Xiaoling S, Gascoin S, Sauvage S, Raghavan, S, Anctil F, Sánchez Pérez JM (2015) Exploring snow and streamflow dynamics in an alpine watershed using the semi-distributed hydrological model SWAT. *Journal of Hydrology* 531:574-588

Gurdak JJ, Roe CD (2010) Review: recharge rates and chemistry beneath playas of the High Plains aquifer, USA. *Hydrogeol. J.* 18:1747–1772

Habets F, Boone A, Champeaux JL, Etchevers P, Franchistéguy L, Leblois E, Ledoux E, Le Moigne P, Martin E, Morel S, Noilhan J, Seguí- PQ, Rousset-Regimbeau F, Viennot P (2008) The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research* 113 doi:10.1029/2007JD008548

Hall D, Riggs G (2007) Accuracy assessment of the MODIS snow products. *Hydrological Processes* 21:1534-1547

Hendrickx F, Sauquet E (2013) Impact of warming climate on water management for the Ariège River basin (France). *Hydrological Sciences Journal* 58:976-993

Holman IP, Tascone D, Hess TM (2009) A comparison of stochastic and deterministic downscaling methods for modelling potential groundwater recharge under climate change in East Anglia, UK: implication for groundwater resource management. *Hydrogeol. J.* 17:1629–1641

Hutchings NJ, Reinds GJ, Leip A, Wattenbach M, Bienkowski JF, Dalgaard T, Dragosits U, Drouet JL, Durand P, Maury O, de Vries W (2012) A model for simulating the timelines of field operations at a European scale for use in complex dynamic models. *Biogeosciences* 9:4487-4496

Inan HI, Sagris V, Devos W, Milenov P, van Oosterom P, Zevenbergen J (2010) Data model for the collaboration between land administration systems and agricultural land parcel identification systems. *Journal of Environmental Management* 91:2440–2454

Jyrkama MI, Sykes JF (2007) The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the Grand River watershed (Ontario). *J. Hydrol.* 338:237–250

Kandasamy J, Sountharajah D, Sivabalan P, Chanan A, Vigneswaran S, Sivapalan M (2014) Socio-hydrologic drivers of the pendulum swing between agricultural development and environmental health: a case study from Murrumbidgee River basin, Australia. *Hydrology and Earth System Sciences* 18:1027-1041

Kovalevskii VS (2007) Effect of climate changes on groundwater. *Water resour.* 34:140–152

Lardy R, Mazzega P, Sibertin-Blanc C, Aud, Y, Sánchez Pérez JM, Sauvage S, Therond O. (2012) Calibration of simulation platforms including highly interweaved processes: the MAELIA multi-agent platform. In: Ames DP, Quinn N, Rizzoli A (ed) 7th Int. Congress on Env. Modelling and Software (iEMSs). pp 1-8

Lehner B, Liermann CR, Revenga C, Vörösmarty C, Fekete B, Crouzet P, Döll P, Endejan M, Frenken K, Magome J, Nilsson C, Robertson JC, Rödel R, Sindorf N, Wisser D (2011) High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9:494-502

Lobell D, Bala G, Mirin A, Phillips T, Maxwell R, Rotman D (2009) Regional Differences in the Influence of Irrigation on Climate. *J. Climate* 22:2248-2255

McGinnis MD, Ostrom E (2014) Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges.

Annexes 3: On the use of hydrological models and satellite data to study the water budget of river basins affected by human activities: examples from the Garonne basin of France (Martin et al. 2016)

Ecology and Society. doi:10.5751/ES-06387-190230

Magand C, Ducharme A, Le Moine N, Gascoin S (2013) Introducing Hysteresis in Snow Depletion Curves to Improve the Water Budget of a Land Surface Model in an Alpine Catchment. *J. Hydrometeor* 15:631-649

Mayor E, Mazzega P, Panzoli D, Sibertin-Blanc C, Therond O., Vavasseur M. (2012) Formal representation of Water Withdrawal Policies for Integrated Assessment. In: Gilbert T, Kirkilionis M, Nicolis G. *Proceedings of the European Conference on Complex Systems 2012*, pp1-15

Mazzega P, Therond O, Debril T, March H, Sibertin-Blanc C, Lardy R, Sant'ana D (2014) Critical multi-level governance issues of integrated modelling: An example of low-water management in the Adour-Garonne basin (France) . *Journal of Hydrology* 519, Part C:2515-2526

Mishra AK, Singh VP (2010) A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391:202-216

Moisselin JM, Schneider M, Canellas C, Mestre O (2002) Les changements climatiques en France au 20ème siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie* 38:45-56

Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747-756

Murgue C, Lardy R, Vavasseur M, Leenhardt D, Therond O (2014) Fine spatio-temporal simulation of crop and farming systems effects on irrigation withdrawal dynamics within a river basin. In: Ames DP, Quinn N, Rizzoli A (ed) *7th Int. Congress on Env. Modelling and Software, iEMSs*. pp 1784-1791

Murgue C, Therond O, Leenhardt D (2015) Toward integrated water and agricultural land management: Participatory design of agricultural landscapes. *Land Use Policy* 45:52-63

Nash J, Sutcliffe J (1970) River flow forecasting through conceptual models part I à " A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290

Parajuli P, Jayakody P, Sassenrath G, Ouyang Y, Pote J (2013) Assessing the impacts of crop-rotation and tillage on crop yields and sediment yield using a modeling approach . *Agricultural Water Management* 119:32-42

Perrin J, Ferrant S, Massuel S, Dewandel B, Maréchal J, Aulong S, Ahmed S (2012) Assessing water availability in a semi-arid watershed of southern India using a semi-distributed model. *Journal of Hydrology* 460-461:143-155

Probst JL (1983) Hydrologie du bassin de la Garonne : Modèles de Mélange, Bilan de l'Erosion, Exportation des Nitrates et des Phosphates. PhD Thesis, Univ. Toulouse.

Qiu GY, Yin J, Tian F, Geng S (2011) Effects of the "Conversion of Cropland to Forest and Grassland Program" on the Water Budget of the Jinghe River Catchment in China. *Journal of environmental quality* 40:1745-1755

Reynaud A, Leenhardt D (2008) MoGIRE : a model for integrated water management. In: Sánchez-Marré M, Béjar J, Comas J, Rizzoli AE, Guariso G (ed) *Proceedings of the 2008 International Congress on Environmental Modelling and Software. iEMSs*. pp 576-583

Sauquet E, Dupeyrat A, Hendrickx F, Perrin C, Samie R, Vidal J-P 2010 IMAGINE 2030, climate and water management: uncertainties on water resources for the Garonne river basin in 2030? <http://cemadoc.irstea.fr/oa/PUB00028876-imagine-2030-climat-amenagements-garonne-queelles-i.html> Accessed 20 April 2015

Scibek J, Allen DM (2006) Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels. *Water Resour*. doi:10.1029/2005WR004742

Sivapalan M, Savenije HHG, Blöschl G (2012) Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrological Processes* 26:1270-1276

Annexes 3: On the use of hydrological models and satellite data to study the water budget of river basins affected by human activities: examples from the Garonne basin of France (Martin et al. 2016)

Szczypta C, Gascoin S, Houet T, Hagolle O, Dejoux JF, Vigneau C, Fanise P. (2015) Impact of climate and land cover changes on snow cover in a small Pyrenean catchment. *Journal of Hydrology* 521:84-99

Taillandier P, Therond O, Gaudou B (2013) A new BDI agent architecture based on the belief theory. Application to the modeling of cropping plan decision-making. In: Seppelt R, Voinov AA, Lange S, Bankamp D (ed) *Managing Resources of a Limited Planet, Proceedings of the sixth biennial meeting of the International Environmental Modelling and Software Society. iEMSs*. pp. 2463-2470

Therond O, Sibertin-Blanc C, Lardy R, Gaudou B, ballestrat M, Hong Y, Louail T, Mayor E, Nguyen VB, Taillandier V, Vavasseur M, Mazzega, P (2014) Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems. In: Ames DP, Quinn NWT, Rizzoli AE (ed) *7th Int Congress on Env. Modelling and Software. iEMSs*. pp 1833-1840

van Emmerik THM, Li Z, Sivapalan M, Pande S, Kandasamy J, Savenije HHG, Chanan A, Vigneswaran S (2014) Socio-hydrologic modeling to understand and mediate the competition for water between agriculture development and environmental health: Murrumbidgee River basin, Australia. *Hydrology and Earth System Sciences* 18:4239-4259

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

Vörösmarty CJ, Green P, Salisbury J, Lammers RB (2000) Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science* 289:284-288

Wada Y, van Beek LPH, van Kempen CM, Reckman JWM, Vasak S, Bierkens MFP (2010) Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters* 37 doi:10.1029/2010GL044571