

Impact du changement climatique sur les ressources en eau de Martinique

Rapport final

BRGM/RP-62676-FR
Mars 2014

Impact du changement climatique sur les ressources en eau de Martinique

Rapport final

BRGM/RP-62676-FR

Mars 2014

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2010 RSE15

L. Arnaud, S. Lanini

Vérificateur :

Nom : Y. Caballero

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : J.-C. Audru

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Mots clés : Aquifères volcaniques, Alimentation en eau potable, Altération, Conductivité électrique, Eau souterraine, Milieu fissuré, Reconnaissances géologique et hydrogéologique, Gros Morne, Martinique, DOM.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Arnaud L., Lanini S (2014). Impact du changement climatique sur les ressources en eau de Martinique. Rapport BRGM/RP-62676-FR, 91 p., 26 ill., 5 ann.

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La DEAL et le BRGM se sont associés pour étudier l'impact du changement climatique sur les ressources en eau, superficielles et souterraines, de la Martinique à l'horizon 2081-2100. L'enjeu principal étant de mesurer son impact sur la disponibilité future de la ressource pour l'alimentation en eau potable de l'île, en particulier en période d'étiage.

Les modélisations ont été conduites par l'intermédiaire d'un modèle hydrologique global à trois réservoirs développé par le BRGM et sur la base des projections climatiques élaborées par Météo France. En accord avec les dernières conclusions du GIEC (2013), deux scénarios climatiques ont été étudiés : les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 (le plus pessimiste).

Les principales limites et incertitudes des modèles hydrologique et climatique ont été clairement exposées. Aussi, les résultats de l'étude ne constituent pas des prévisions mais bien des projections de deux situations futures possibles et équiprobables, à l'horizon 2081-2100.

Pendant la saison sèche, la quantité d'eau disponible (infiltration + ruissellement) diminuerait de façon significative avec, à l'échelle de la Martinique, une baisse moyenne de 25 % pour le scénario RCP 4.5 et de 50 % pour le scénario RCP 8.5. D'un point de vue géographique, le sud-est de l'île serait moins impacté.

Pendant la saison des pluies, l'évolution diffère notablement selon le scénario climatique avec une augmentation moyenne des précipitations efficaces de 38 % pour le scénario RCP 4.5 et une évolution stable pour le scénario RCP 8.5.

En période de basses eaux, les modélisations hydrologiques indiquent une baisse quasi-systématique des débits mensuels moyens des cours d'eau à l'horizon 2081-2100, avec des déficits plus prononcés pour le scénario RCP 8.5. La moitié nord de la Martinique, où se situent la totalité des captages AEP, serait plus particulièrement impactée. Des tensions quantitatives croissantes sont, par conséquent, attendues sous l'effet du changement climatique pendant le carême, notamment dans le centre de la Martinique où les rivières apparaissent particulièrement vulnérables au changement climatique.

Avec une recharge des aquifères plus intense pendant la saison des pluies, la ressource en eau souterraine serait quant à elle moins sensiblement impactée. Dans le futur, les volumes d'eau souterraine potentiellement exploitables pourraient même être en augmentation dans le centre de la Martinique quel que soit le scénario climatique étudié ainsi que dans le sud dans le cas du scénario RCP 4.5.

Sommaire

1. Cadre de l'étude	7
2. Présentation du modèle hydrologique.....	9
2.1. PRINCIPES.....	9
2.2. AMÉLIORATIONS APPORTÉES EN 2013 AU MODÈLE HYDROLOGIQUE ..	12
2.2.1. Données climatiques	12
2.2.2. Données de sortie.....	13
2.2.3. Nouveau calage du modèle	15
2.3. ÉVALUATION DU MODÈLE HYDROLOGIQUE.....	19
3. Méthodologie d'évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de Martinique	21
3.1. PROJECTIONS CLIMATIQUES	21
3.1.1. Modélisation climatique.....	21
3.1.2. Scénarios climatiques étudiés	22
3.1.3. Principaux résultats	23
3.2. LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE	28
4. Résultats de la modélisation hydrologique.....	29
4.1. REPRODUCTION DU TEMPS PRÉSENT	29
4.2. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE BILAN HYDRIQUE	30
4.2.1. Impact sur l'ETR	30
4.2.2. Impact sur la Pluie efficace	33
4.2.3. Impact sur les bilans hydrologiques.....	36
4.3. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES DÉBITS DES RIVIÈRES	38
4.3.1. Débits moyens inter-annuels	38
4.3.2. Débits mensuels moyens.....	39
4.3.3. Débits d'étiage	41
4.4. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA PIÉZOMÉTRIE	43

4.5. VOLUMES D'EAU SOUTERRAINE EXPLOITABLE.....	46
5. Conclusion.....	49
6. Bibliographie	51

Liste des illustrations

Illustration 1 : Modèle hydrologique global à 3 réservoirs en cascade (Thiéry, 2003)	10
Illustration 2 : Schéma du troisième réservoir (extrait du rapport BRGM/RP-55099-FR)	10
Illustration 3 : Tableau de principe du modèle hydrologique global (Cf. Illustration 1 et Illustration 2 pour P, RU, H et V)	11
Illustration 4 : Comparaison des précipitations annuelles moyennes utilisées en 2006 (à gauche) et en 2013 à droite (délimitation des ZPH en noir, stations climatiques disponibles = triangles noirs)	13
Illustration 5 : Carte de localisation des piézomètres et des stations hydrologiques exploités pour le calage du modèle	14
Illustration 6 : Impact de l'augmentation du paramètre tau2 sur la piézométrie simulée (exemple de l'UH3 – Robert)	16
Illustration 7 : Comparaison entre les niveaux piézométriques simulés et observés pour les UH 17 – Sainte-Marie (à gauche) et 24 – Lézarde (à droite)	16
Illustration 8 : Coefficients de corrélation entre débits simulés et débits observés au pas de temps journalier issus des modélisations 2006 et 2013.....	17
Illustration 9 : Débits simulés (en 2006 et en 2013) vs débits observés au pas de temps journalier pour les rivières Oman, Capot, Galion et Lézarde	18
Illustration 10 : Domaine Aladin Climat à résolutions de 10 km et cartographie des 10 points modèle et des 37 pluviomètres de la Martinique (source : Météo France, 2012)	22
Illustration 11 : Les différents scénarios RCP avec leur extension jusqu'en 2300.....	23
Illustration 12 : Évolution de la pluie annuelle moyenne pour le scénario RCP 4.5.....	25
Illustration 13 : Évolution de la pluie annuelle moyenne pour le scénario RCP 8.5.....	26
Illustration 14 : Évolution des moyennes mensuelles de l'ETP modélisée au Lamentin	27
Illustration 15 : Corrélations entre les débits mensuels moyens, minimum et maximum et les niveaux piézométriques mensuels moyens simulés à partir des données observées (1991-2010) et du run historique (1981-2000).....	30
Illustration 16 : Évolutions des moyennes mensuelles de la pluie et de l'ETR pour l'UH 10 – Sainte-Luce et l'UH 11 – Capot.....	32
Illustration 17 : Évolution de la pluie et de l'ETR moyennes annuelles et des pluies efficaces saisonnières pour les 24 unités hydrogéologiques et selon les 2 scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5	35

Illustration 18 : Évolution spatialisée des pluies efficaces annuelles moyennes pour les deux scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5.....	36
Illustration 19 : Évolution des bilans hydrologiques pour les UH10 – Sainte-Luce et UH11 – Rivière Capot selon les scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5 (% d'évolution de l'ETR calculé par rapport à la pluie, % d'évolution de l'infiltration et du ruissellement calculés par rapport à la pluie efficace, % du soutien d'étiage calculé par rapport à l'infiltration)	37
Illustration 20 : Évolution du Module à l'exutoire des 24 unités hydrogéologiques pour les 2 scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5.....	38
Illustration 21 : Débits mensuels moyens simulés à l'exutoire des UH 10, 11, 18, 20, 22 et 24 pour les temps présent et futurs.....	40
Illustration 22 : Carte de localisation des prélèvements pour l'eau potable en Martinique (source : Observatoire de l'Eau Martinique).....	42
Illustration 23 : Évolution des débits mensuels moyens du mois de mars à l'exutoire des 24 unités hydrogéologiques et pour les 2 scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5	42
Illustration 24 : Évolution des niveaux piézométriques inter-annuels moyens pour les 2 scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5.....	43
Illustration 25 : Niveaux piézométriques mensuels moyens simulés pour les piézomètres de référence des UH 10, 11, 18, 20, 22 et 24 pour les temps présent et futurs	45
Illustration 26 : Évolution des volumes d'eaux souterraines exploitables par unité hydrogéologique et pour les 2 scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5.....	47

Liste des annexes

Annexe 1 Chroniques piézométriques modélisées	53
Annexe 2 Débits mensuels moyens issus des modélisations du climat observé (1991-2010) et du run historique ALADIN (1981-2000).....	67
Annexe 3 Évolution de l'ETR annuelle moyenne pour les scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5	73
Annexe 4 Débits mensuels moyens issus des modélisations du run historique ALADIN (1981-2000) et des runs RCP 4.5 et RCP 8.5 (2081-2100)	77
Annexe 5 Évolution des débits moyens à l'exutoire des 24 unités hydrogéologiques pour les mois d'avril, d'août et novembre.....	83

1. Cadre de l'étude

En Martinique, la production en eau potable provient à plus de 90 % des rivières et pose régulièrement des problèmes en période d'étiage avec le non-respect des débits réservés à l'aval des prises d'eau.

Conformément aux orientations fondamentales du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) de la Martinique, la sécurisation de l'alimentation en eau potable est en cours : réhabilitation des réseaux d'adduction, développement des interconnexions, exploitation des eaux souterraines, etc.

Dans la mesure du possible, cette question de la disponibilité de la ressource en eau doit cependant être traitée à plus long terme, en considérant le changement climatique attendu dans les décennies à venir.

C'est pourquoi, la DEAL et le BRGM se sont associés pour étudier l'impact du changement climatique sur les ressources en eau, superficielles et souterraines, de la Martinique à l'horizon 2081-2100.

Pour ce faire, il a été convenu d'exploiter le modèle hydrologique développé par le BRGM dans le cadre de la construction du Système d'Information sur les Eaux Souterraines de MARTinique (SIESMAR).

Préalablement au lancement de la présente étude, et en accord avec les dernières conclusions du GIEC (2013), Météo France s'est chargé de produire des projections de scénarios climatiques spatialisées pour le compte de la DEAL. Ces projections serviront de données d'entrée au modèle hydrologique.

2. Présentation du modèle hydrologique

La présente étude s'appuie sur le simulateur numérique dédié à la modélisation globale du cycle de l'eau en Martinique développé par le BRGM dans le cadre du Système d'Information sur les Eaux Souterraines de MARTinique (SIESMAR).

Les grands principes du modèle sont brièvement rappelés dans le paragraphe suivant, pour plus de détails, on se reportera au rapport relatif au volet quantitatif du SIESMAR (Rapport BRGM/RP-55099-FR, Vittecoq et *al.*, 2007).

2.1. PRINCIPES

L'option d'un modèle hydrologique global à 3 réservoirs avait été retenue (Illustration 1). La particularité du travail réalisé en 2006 a été d'introduire un changement d'échelle entre les deux premiers réservoirs (Sol et ZNS) et le réservoir Nappe. Le simulateur numérique a été développé à l'aide du logiciel Matlab/Simulink®.

L'île a ainsi été discrétisée en 1096 mailles de 1 km², pour chacune desquelles le bilan hydrique du sol, l'infiltration et le ruissellement sont calculés (2 premiers réservoirs). Les résultats obtenus sont ensuite agrégés à l'échelle des 24 unités hydrogéologiques (UH) définis. Ce changement d'échelle permet de calculer les variations de stock dans la nappe et le débit à l'exutoire de chacune des UH (3^{ème} réservoir, cf. Illustration 2).

Le tableau de l'illustration 3 récapitule les principales équations régissant le modèle hydrologique.

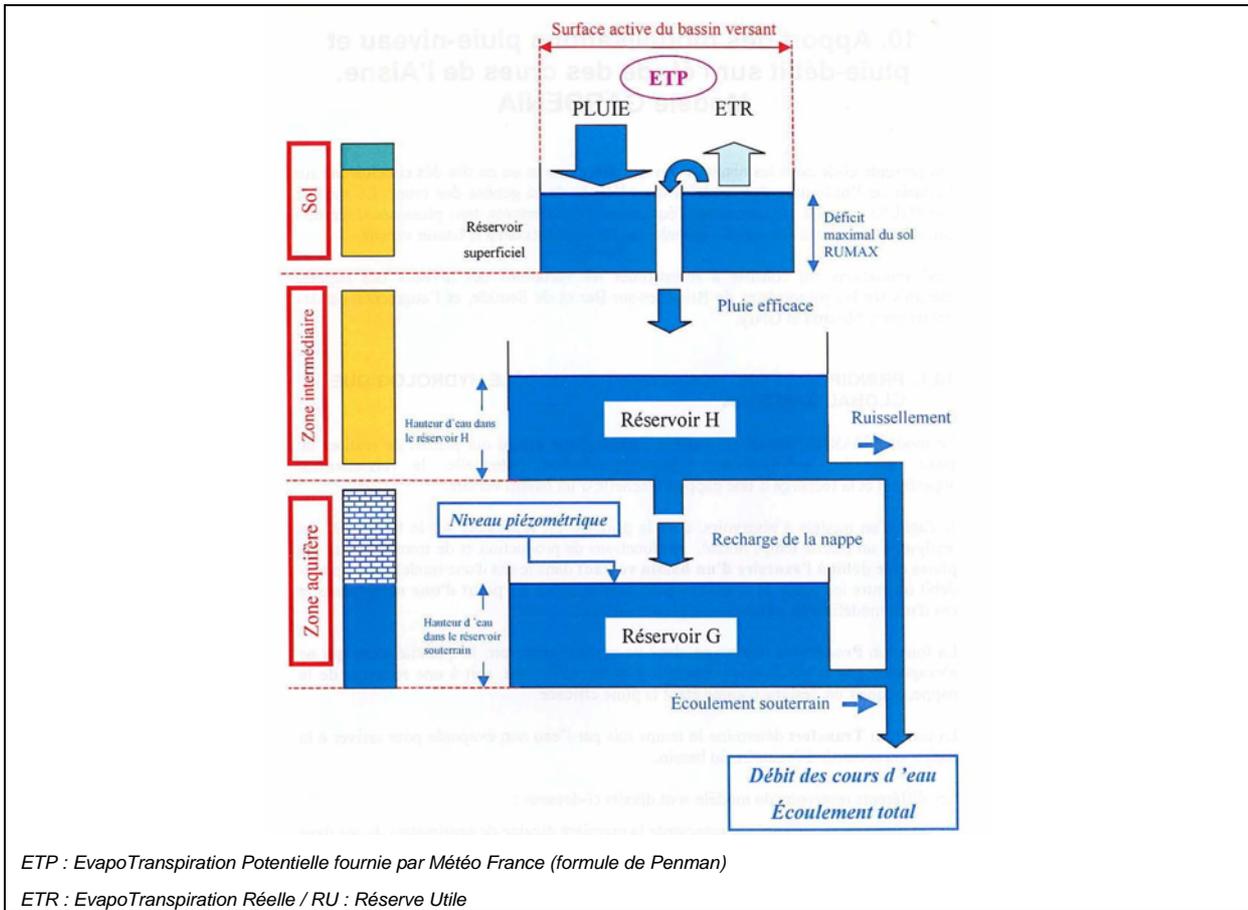


Illustration 1 : Modèle hydrologique global à 3 réservoirs en cascade (Thiéry, 2003)

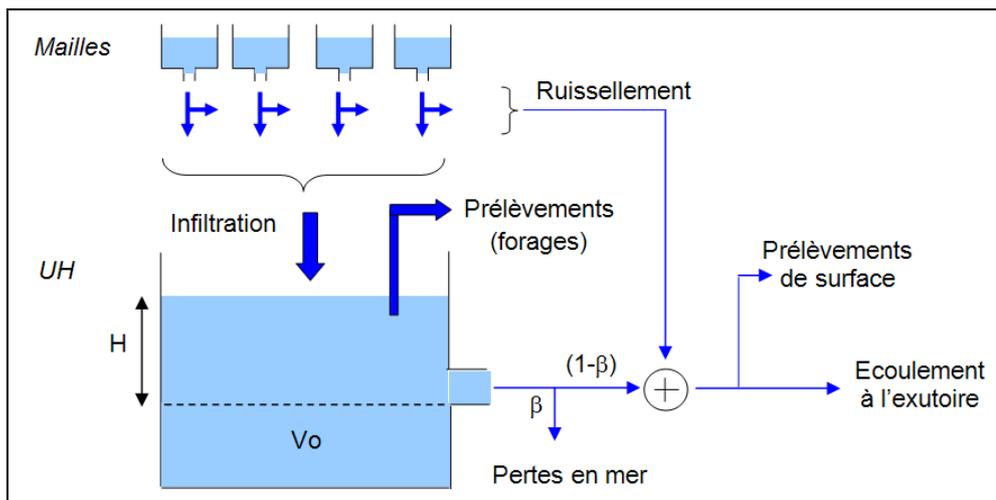


Illustration 2 : Schéma du troisième réservoir (extrait du rapport BRGM/RP-55099-FR)

CALCUL	ÉQUATIONS	DONNÉES EN ENTRÉE	SOURCES
	$ETR^n = \min(ETP^n; P^n + RU^n)$ $Peff^n = P^n - ETR^n + RU^n - RU_{max}$ <p>Si $Peff^n \leq 0$ alors $Peff^n = 0$</p> $RU^{n+1} = \min(RU_{max}; P^n + RU^n - ETR^n)$	Précipitations journalières et carte spatialisée des moyennes annuelles ETP journalière (Lamentin) et carte des iso-ETP	Météo France
Pluie efficace (Peff)		Réserve utile maximale des sols	INRA / Météo France
		Coefficients culturaux	INRA / Météo France
Ruissellement (R) et Infiltration (I)	$\frac{dH}{dt} = Peff(t) - \tau_1 H(t)$ $R(t) = \alpha \cdot \tau_1 \cdot H(t)$ $I(t) = (1 - \alpha) \cdot \tau_1 \cdot H(t)$	α_1 Coefficient de ruissellement dépendant : - d'un coefficient de pente - et d'un coefficient de sol	IGN Paramètre de calage
		τ_1 Constante de temps du réservoir intermédiaire (j^{-1})	Paramètre de calage
Stock dans la nappe et Débit à l'exutoire	$\frac{dV}{dt} = \sum I(t) - \tau_2 V(t) - \sum P(t)$ $Q_{nap}(t) = (1 - \beta) \cdot \tau_2 \cdot V(t)$ $Q_{riv}(t) = Q_{nap}(t) - \sum C(t)$	τ_2 Constante de temps du réservoir nappe (j^{-1}) β , Coefficient de fuite en mer P, Prélèvements en nappe	Paramètre de calage ODE
		C, Prélèvements eau de surface	ODE, DAF

Illustration 3 : Tableau de principe du modèle hydrologique global (Cf. Illustration 1 et Illustration 2 pour P, RU, H et V)

2.2. AMÉLIORATIONS APPORTÉES EN 2013 AU MODÈLE HYDROLOGIQUE

2.2.1. Données climatiques

Dans le cadre d'une « Licence Recherche », Météo France a mis à disposition du BRGM :

- les précipitations quotidiennes validées et homogénéisées pour 37 stations sur une période commune allant du 01/01/1991 au 31/12/2010. Les ruptures d'homogénéité dans les séries pluviométriques pouvant être du même ordre de grandeur que les phénomènes que l'on cherche à mettre en évidence, ce travail d'homogénéisation permet de consolider les données d'entrée du modèle hydrologique ;
- la spatialisation au km² des précipitations annuelles moyennes (calculées à partir de 35 des 37 stations précédentes) ;
- l'ETP quotidienne sur la station du Lamentin du 01/01/1991 au 31/12/2010.

La période modélisée a ainsi pu être étendue à 20 années (contre 11 en 2006 : 1986-1997).

La méthode de spatialisation visant à obtenir une pluie quotidienne par maille d'un km² est restée la même, mais grâce aux nouvelles données fournies par Météo France, elle a gagné en fiabilité. On peut notamment remarquer que, contrairement aux données 2006, les pluies maximales sont bien centrées sur la Montagne Pelée, le morne Jacob ou encore les Pitons du Carbet (Illustration 4).

Rappel de la méthodologie de spatialisation (Vittecoq et al., 2007) :

L'île a été découpée en 14 Zones Pluviométriquement Homogènes (ZPH) (Mobèche, 2003). Pour chacune, un pluviomètre de référence a été choisi. Les pluviomètres pour lesquels la pluie moyenne annuelle calculée à partir des chroniques disponibles ne correspondait pas avec la carte des isohyètes ont été éliminés. On affecte ensuite à toutes les mailles situées dans une même ZPH la chronique du pluviomètre de référence de cette zone, corrigée par un coefficient multiplicatif pour tenir compte entre autre de l'altitude. Pour chaque maille, ce coefficient correcteur est égal au rapport entre la pluviométrie moyenne annuelle de la maille fournie par la carte des isohyètes discrétisée et la pluviométrie moyenne annuelle mesurée au pluviomètre de référence.

Dans le cadre de la présente étude, la carte des isohyètes a été remplacée par la spatialisation au km² des précipitations moyennes annuelles calculées par Météo France sur la période 1991-2010. En outre, pour exploiter le maximum des 30 chroniques de précipitations disponibles, 21 ZPH ont finalement été délimitées. Ces dernières résultent du croisement des 14 ZPH initiales et des 24 unités hydrogéologiques (UH) (Cf. Illustration 4).

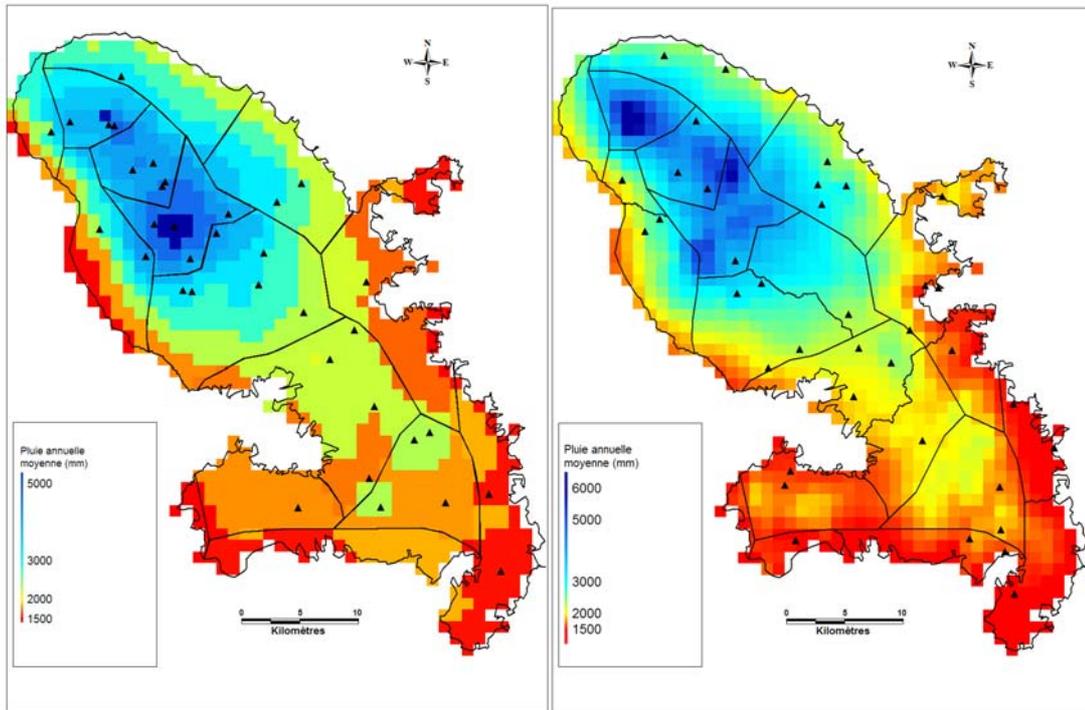


Illustration 4 : Comparaison des précipitations annuelles moyennes utilisées en 2006 (à gauche) et en 2013 à droite (délimitation des ZPH en noir, stations climatiques disponibles = triangles noirs)

2.2.2. Données de sortie

En ce qui concerne les chroniques observées, aucune donnée supplémentaire n'a pu être obtenue pour les débits de rivière par rapport à la modélisation de 2006 (7 unités hydrogéologiques suivies). La comparaison des débits simulés et observés a tout de même pu être réalisée sur une période plus étendue (par exemple jusqu'à juin 2005 pour l'UH10), alors qu'elle était limitée à fin 1997 auparavant.

En revanche, le modèle hydrologique bénéficie désormais des chroniques piézométriques du réseau de surveillance patrimonial de la Martinique sur la période 2004-2010. En 2006, faute de données, aucun calage n'avait réellement pu être réalisé sur les niveaux piézométriques.

La carte suivante présente les stations hydrologiques et les piézomètres disponibles pour le calage. Seules sept unités hydrogéologiques sont concernées par des stations hydrologiques disposant de données de débit (4, 10, 11, 18, 20, 22 et 24). *A contrario*, la majorité des UH est suivie par au moins un piézomètre (seules les UH 4, 12, 14, 16, 21 et 23 ne disposent pas de chronique piézométrique).

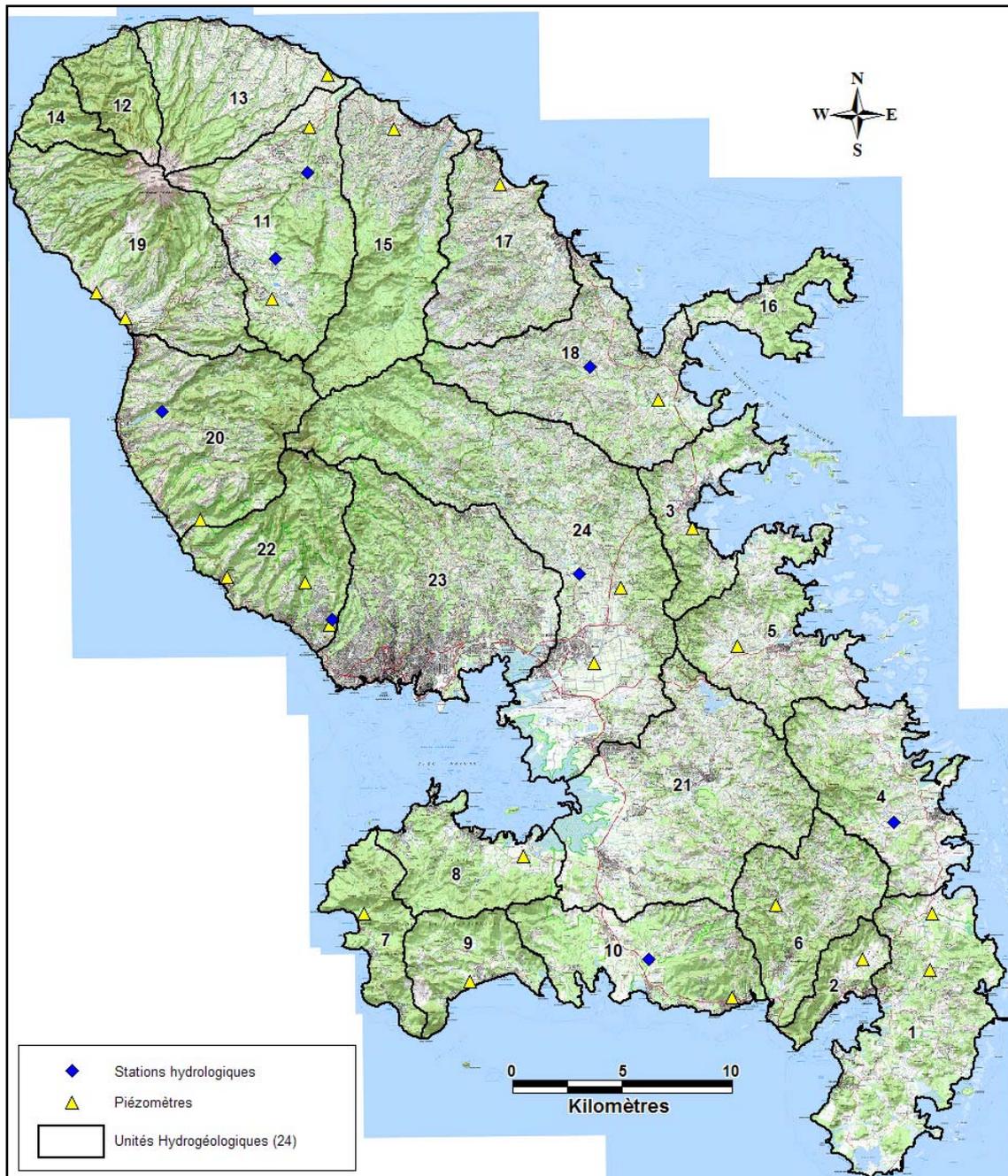


Illustration 5 : Carte de localisation des piézomètres et des stations hydrologiques exploités pour le calage du modèle

2.2.3. Nouveau calage du modèle

Le cahier des charges de l'étude ne prévoyait pas de procéder à un nouveau calage du modèle. Cependant, au regard des données acquises depuis 2006, il a été décidé d'affiner le calage du modèle dans le but de retranscrire le mieux possible les chroniques piézométriques sans toutefois dégrader le calage des chroniques de débit.

Modélisations pluie - niveau

Les meilleurs résultats ont été obtenus en ajustant le paramètre temps de transit moyens dans le réservoir « nappe » (Illustration 3) pour certaines UH. Le paramètre τ_2 a ainsi été augmenté pour les UH 1, 2, 3, 5, 7, 8, 10 et 13 car la piézométrie simulée ne retranscrivait pas suffisamment l'inertie des fluctuations observées (Illustration 6). Excepté pour l'UH 13, ces dernières correspondaient aux temps de transit dans la nappe les plus faibles (20 jours ; Vittecoq et al., 2007).

Les autres paramètres de calage sont finalement restés inchangés.

Tous les graphiques comparant piézométrie simulée et piézométrie observée sont reportés en Annexe 1. Le calage est satisfaisant pour les UH 1, 3, 6, 9, 10, 15, 17, 18, 20, 22 et 24 (cf. exemples sur l'illustration 7).

Le choix qui a été fait d'adopter un modèle simple et unique à trois réservoirs pour toutes les UH de la Martinique restreint forcément la qualité du calage. Ainsi, le modèle parvient à reproduire les chroniques piézométriques les plus classiquement rencontrées en Martinique, à savoir des régimes de fluctuations « mixtes » avec une dominante saisonnière (recharge annuelle) à laquelle se superpose l'influence des précipitations. Ces fluctuations caractérisent des aquifères laviques, à porosité de fissures et/ou de fractures, transmissifs et peu capacitifs. La plupart du temps, seuls les principaux pics de recharge sont correctement simulés (Illustration 7). En revanche, le modèle ne parvient logiquement pas (au regard de l'approche globale du modèle) à reproduire correctement les chroniques atypiques, c'est-à-dire :

- les plus fortes inerties observées sur des piézomètres interceptant des aquifères à porosité de matrice et de grande extension : Marin – Grand Fond (UH 2), Basse Pointe – Chalvet (UH 13) ;
- les inerties engendrées par des caractéristiques hydrodynamiques très médiocres : Marin – Cap Macré (UH 1), Anses d'Arlet – Grande Anse (UH 7), Trois Ilets – Vatable (UH 8) ;
- la forte influence de la marée à Saint-Pierre – Rivière Blanche (UH 19) ;
- les chroniques piézométriques, présentant un très faible battement de nappe, car tamponnées par une charge hydraulique constante : Basse Pointe – Chez Lélène implanté à proximité immédiate de la rivière Falaise et Morne Rouge – Desgrottes interceptant des ponces sous-jacentes à un horizon tourbeux saturé en eau (UH 11 dans les deux cas) ;

- enfin, suite aux précipitations exceptionnelles de début mai 2009, certains piézomètres ont enregistré une hausse du niveau piézométrique qui s'est répercutée sur tout le reste de l'année : Robert – Pontaléry (UH 3), Trois Ilets – Vatable (UH8), Saint-Pierre – CDST (UH 19), Bellefontaine (UH 20). Il faut noter que les caractéristiques hydrodynamiques sont médiocres au droit de ces ouvrages (possiblement associées à des tubages défectueux). Le calage redevient bon à partir de 2010.

Pour améliorer la simulation des niveaux piézométriques de ces différentes UH, il faudrait envisager d'introduire un peu plus de complexité dans le modèle à réservoirs (ajout de réservoirs, modification des lois de transferts entre réservoirs, etc.).

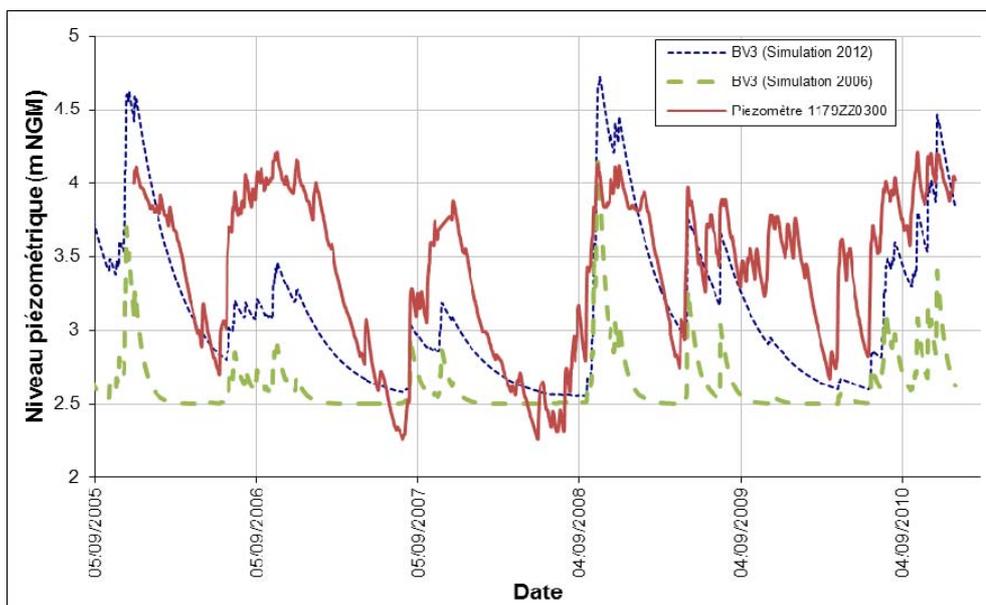


Illustration 6 : Impact de l'augmentation du paramètre tau2 sur la piézométrie simulée (exemple de l'UH3 – Robert)

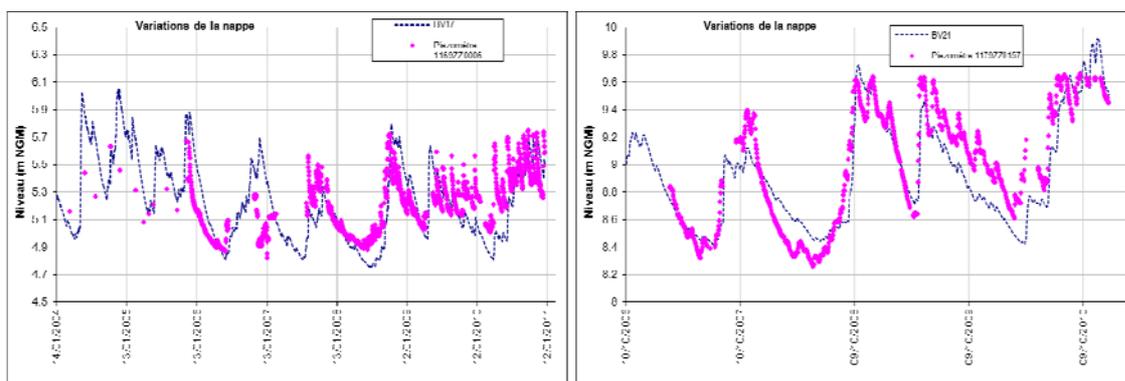


Illustration 7 : Comparaison entre les niveaux piézométriques simulés et observés pour les UH 17 – Sainte-Marie (à gauche) et 24 – Lézarde (à droite)

Modélisations pluie – débit spécifique

À quelques exceptions près, le nouveau calage n'a pas permis d'améliorer la retranscription des débits de rivières (Illustration 9).

Le tableau de l'illustration 8 propose une comparaison des coefficients de corrélation entre débits observés et débits simulés obtenus en 2006 et 2013 au pas de temps journalier. Ces derniers sont légèrement plus faibles avec le nouveau calage mais il faut noter que les durées de confrontation sont la plupart du temps plus importantes (exceptés pour les UH 18 et 24).

UH	2006		2013	
	Nb valeurs	Coeff. Corrélation (Pearson)	Nb valeurs	Coeff. Corrélation (Pearson)
4	655	0.537	2219	0.527
10	927	0.355	2621	0.387
11	736	0.751	2490	0.734
18	3233	0.776	1407	0.705
20	1092	0.648	2757	0.636
22	2101	0.61	3220	0.546
24	2912	0.787	1086	0.702

Illustration 8 : Coefficients de corrélation entre débits simulés et débits observés au pas de temps journalier issus des modélisations 2006 et 2013

La principale limite du modèle, liée au calcul de la répartition ruissellement / infiltration supposée constante, et avancée en 2006 reste donc ici prégnante. En effet, lors des forts événements pluvieux, la part d'eau ruisselée peut être notablement plus élevée qu'en période de carême (Vittecoq et al., 2007). Par conséquent, le meilleur calage global des débits et des niveaux piézométriques tend à sous-estimer les écoulements en condition extrême : sous-évaluation fréquente des pics de crue les plus marqués et des débits à l'étiage (sous-estimation des soutiens par les nappes probable).

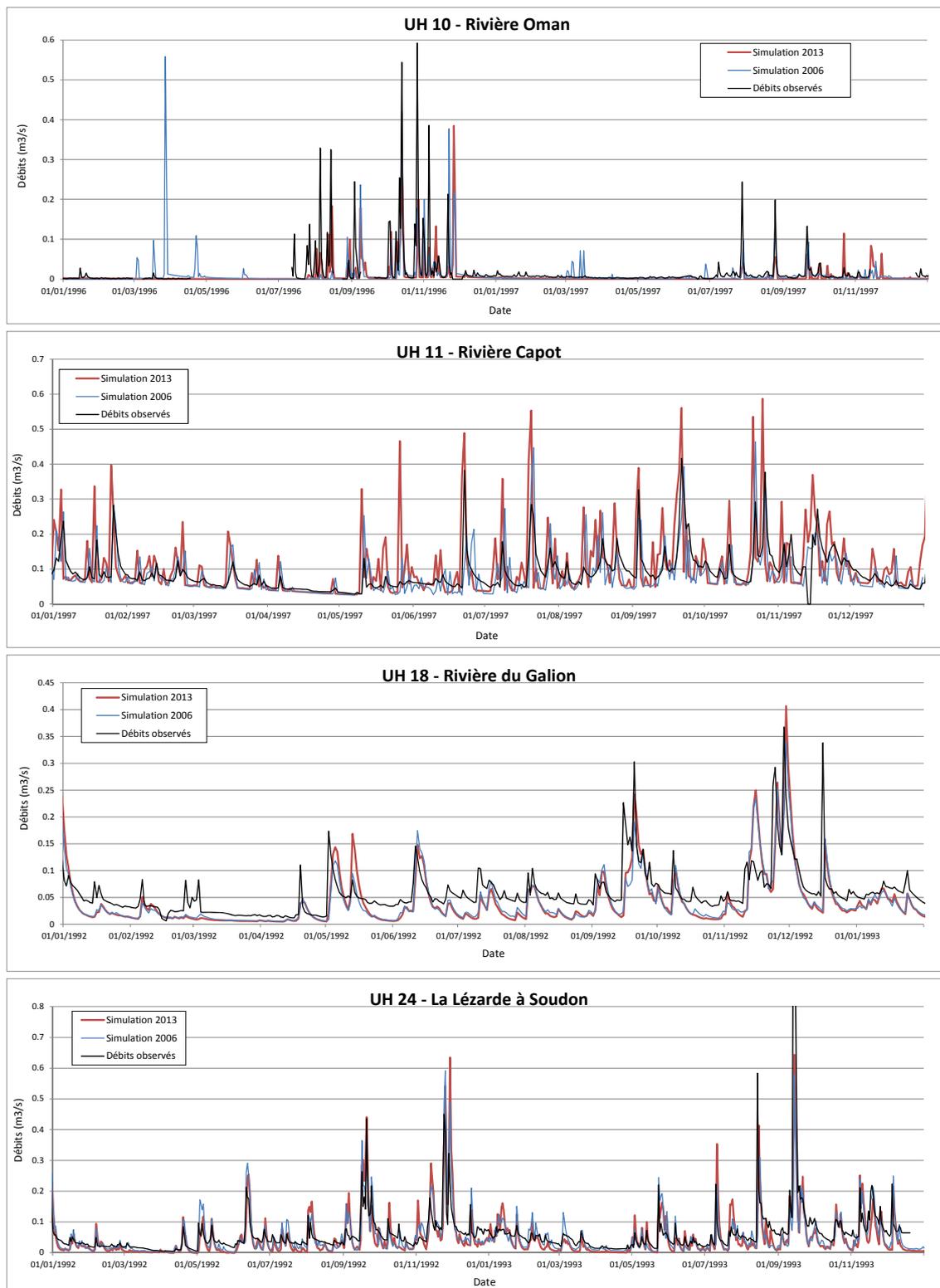


Illustration 9 : Débits simulés (en 2006 et en 2013) vs débits observés au pas de temps journalier pour les rivières Oman, Capot, Galion et Lézarde

2.3. ÉVALUATION DU MODÈLE HYDROLOGIQUE

Tout d'abord, les résultats obtenus sur les différentes simulations réalisées sur la période 1991-2010 montrent que tous les bilans restent corrects avec une erreur relative inférieure à 0.5 %.

Lors de l'étude 2006, il avait été noté une légère surestimation des pluies efficaces. La prise en compte des données climatiques analysées par Météo France semble améliorer ce point puisque les pluies efficaces sont globalement moins importantes à l'échelle de l'île (excepté pour les UH 7, 11, 12, 13, 15, 16 et 18).

Avec l'acquisition de nombreuses données piézométriques depuis 2006, le calage global du modèle a pu être consolidé. En revanche, à quelques exceptions près, aucune amélioration n'a pu être apportée à la modélisation des débits. Concernant ce dernier point, la principale limite du calage retenu est la sous-estimation des débits d'étiage.

En conclusion, bien que le modèle repose sur une approche globale, il permet de reproduire de manière acceptable les débits aux exutoires et les niveaux de nappe, avec des dynamiques de crue / recharge et décrue / vidange correctement simulées.

Le modèle hydrologique ainsi constitué doit donc permettre d'évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau à l'échelle des 24 unités hydrogéologique définies pour la Martinique. Il est cependant bien clair que l'évaluation devra se limiter à l'analyse de l'évolution de valeurs moyennes dans le but de dégager les grandes tendances (flux annuel et mensuel moyens).

3. Méthodologie d'évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de Martinique

3.1. PROJECTIONS CLIMATIQUES

Pour le compte de la DEAL, la Direction Interrégionale Antilles Guyane de Météo France a travaillé de 2011 à 2012 à la production de scénarios climatiques en lien avec le changement climatique. Les projections climatiques sont utilisées comme données d'entrée du modèle hydrologique développé par le BRGM.

Seuls les grands principes méthodologiques et les principaux résultats sont ici présentés, pour plus de détails, on se reportera au rapport de Météo France (2012).

Avant toute projection, Météo France a étudié l'évolution des paramètres observés (température et précipitations) sur la période 1965-2009 en Martinique. Il en ressort une augmentation significative des températures (+1.18 °C en moyenne pour les températures minimales sur la période 1965-2009) et une faible augmentation des précipitations, non statistiquement significative.

3.1.1. Modélisation climatique

La modélisation du climat en Martinique a été mise en œuvre à partir d'une descente d'échelle dynamique¹ par l'utilisation du modèle régional ALADIN CLIMAT, forcé par les dernières projections du modèle ARPEGE CLIMAT (CMIP-5). La résolution obtenue est ainsi de 10 km : soient 10 points terre en Martinique (Illustration 10).

Au départ, le modèle ARPEGE CLIMAT propose une résolution de 50x50 km² sur l'ensemble du globe, avec le point terre du modèle le plus proche de la Martinique situé à Puerto Rico (> 500 km).

La variabilité géographique et temporelle du climat étant trop importante en Martinique pour que le modèle puisse la reproduire avec 10 points terre, la descente d'échelle dynamique a été accompagnée d'une descente d'échelle statistique (méthode quantile / quantile).

Ces descentes d'échelle sont indispensables si on veut utiliser les simulations climatiques comme données d'entrée du modèle hydrologique (avec une précision spatiale suffisante).

¹ Consiste à emboîter des modèles sur des domaines limités avec une résolution de plus en plus fine

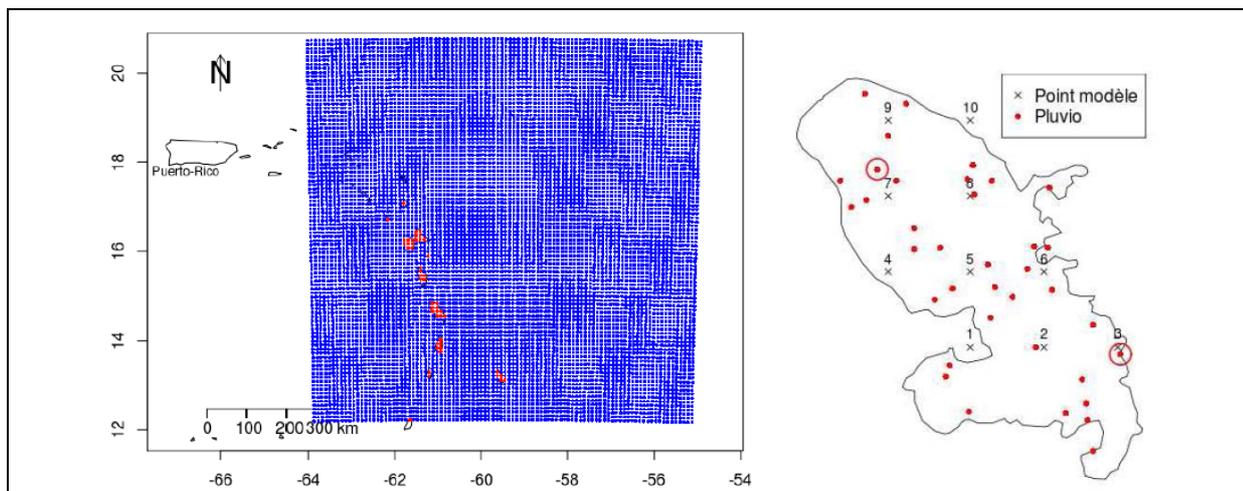


Illustration 10 : Domaine Aladin Climat à résolutions de 10 km et cartographie des 10 points modèle et des 37 pluviomètres de la Martinique (source : Météo France, 2012)

Pour permettre une exploitation des résultats par le modèle hydrologique développé par le BRGM, les normales de précipitations modélisées ont été spatialisées à la maille du km² par krigeage avec dérive(s) externe(s). Dans cette méthode, des prédicteurs (ou valeurs explicatives) sont utilisés, ils sont disponibles à une résolution de 90 m pour la Martinique (distance à la mer, altitude, pente, orientation, etc. ; Météo France, 2012).

Enfin, Météo France est également parvenu à modéliser l'évapotranspiration (ETP) à partir de sept variables issues des sorties du modèle ALADIN : rayonnement global, insolation, humidités relatives minimale et maximale, températures minimale et maximale, vent à 10m.

3.1.2. Scénarios climatiques étudiés

Météo France a travaillé sur deux des scénarios moyens proposés par le GIEC en 2013 : RCP 8.5 e RCP 4.5 (Representative Concentration Pathways) (Illustration 11) :

- **RCP 8.5 : scénario le plus pessimiste.** En 2100, on atteint un forçage radiatif de 8,5 W/m², ce qui correspond à une concentration équivalente en CO₂ proche de 1370 ppmv. Le forçage radiatif est en pleine augmentation en 2100. Il se rapproche de l'ancien scénario A2 (GIEC, 2007) ;
- **RCP 4.5 :** en 2100, on atteint un forçage radiatif de 4,5 W/m², ce qui correspond à une concentration équivalente en CO₂ proche de 650 ppmv. La stabilisation se fait après 2100, mais commence en 2060. Ce scénario correspond à l'ancien scénario B1 (**introduction de technologies propres et utilisation des ressources efficiente, mais sans initiative supplémentaire pour gérer le climat**).

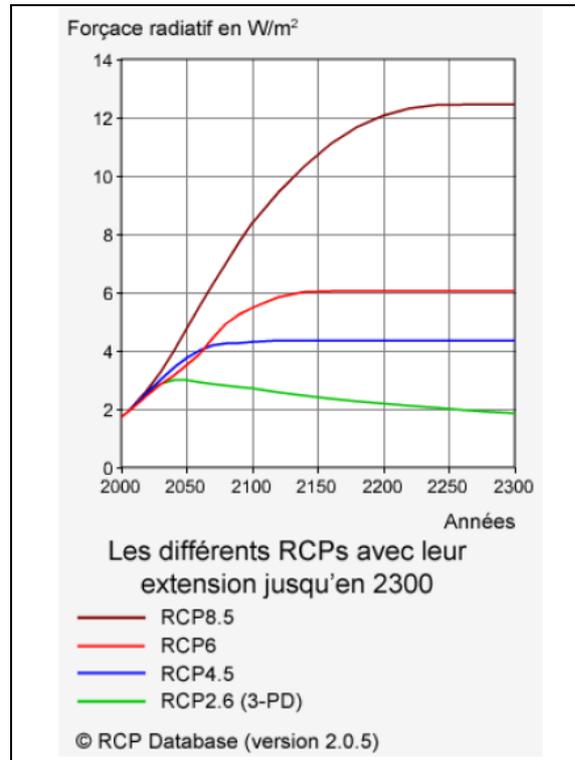


Illustration 11 : Les différents scénarios RCP avec leur extension jusqu'en 2300

En définitive, trois « runs » de simulation sont proposés par Météo France :

- un run historique sur la période 1971-2000 (simulation de référence) ;
- un run pour le scénario RCP 4.5 (ex scénario B1) sur la période 2071-2100.
- un run pour le scénario RCP 8.5 (ex scénario A2) sur la période 2071-2100.

3.1.3. Principaux résultats

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons uniquement à l'évolution des précipitations et de l'ETP.

Les précipitations

À l'échelle de la Martinique, il est attendu une augmentation des pluies annuelles moyennes sur une majorité du territoire :

- selon le scénario RCP 4.5, l'augmentation des précipitations annuelles seraient comprises entre +15 et +25 % dans le sud et le centre de l'île. L'évolution apparaît plus stable dans le nord et le nord Atlantique : de -3 % à +8 % (Illustration 12) ;

- selon le scénario RCP 8.5, les augmentations seraient moins importantes, majoritairement comprises entre +10 et +15 %. Des baisses de la pluviométrie annuelle moyenne sont même projetées dans le nord (Unité Hydrogéologique 11 à 13, Illustration 13).

D'un point de vue saisonnier, Météo France présente dans son rapport un focus sur les mois de juillet (début de saison des pluies) et de février (début de la saison sèche) :

- augmentation des précipitations projetée sur tout le territoire en juillet : de + 10 % à + 40 % pour le scénario RCP 8.5 et de + 20 % à + 60 % pour le scénario RCP 4.5 ;
- baisse des précipitations sur la majorité de l'île en février : de 0 à - 40 % pour le scénario RCP 8.5 et de 0 à - 30 % pour le scénario RCP 4.5. En revanche, la tendance est inverse sur une frange sud-est (Le François, Le Vauclin) avec de + 10 à + 40 % pour le scénario RCP 8.5 et de + 20 à + 60 % pour le scénario RCP 4.5.

En outre, à l'horizon 2071-2100, une augmentation des événements extrêmes à l'échelle de la saison est attendue :

- augmentation des saisons sèches (janvier à mars) extrêmement sèches (encore plus forte pour le scénario RCP 8.5). Le nord-ouest de l'île serait la zone la plus sensiblement concernée ;
- augmentation des saisons pluvieuses extrêmement pluvieuses (jusqu'à 10 fois plus fréquentes pour le scénario RCP 4.5).

Les Illustration 12 et Illustration 13 présentent l'évolution respective des précipitations annuelles moyennes à la maille du km² (maillage du modèle hydrologique) pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5.

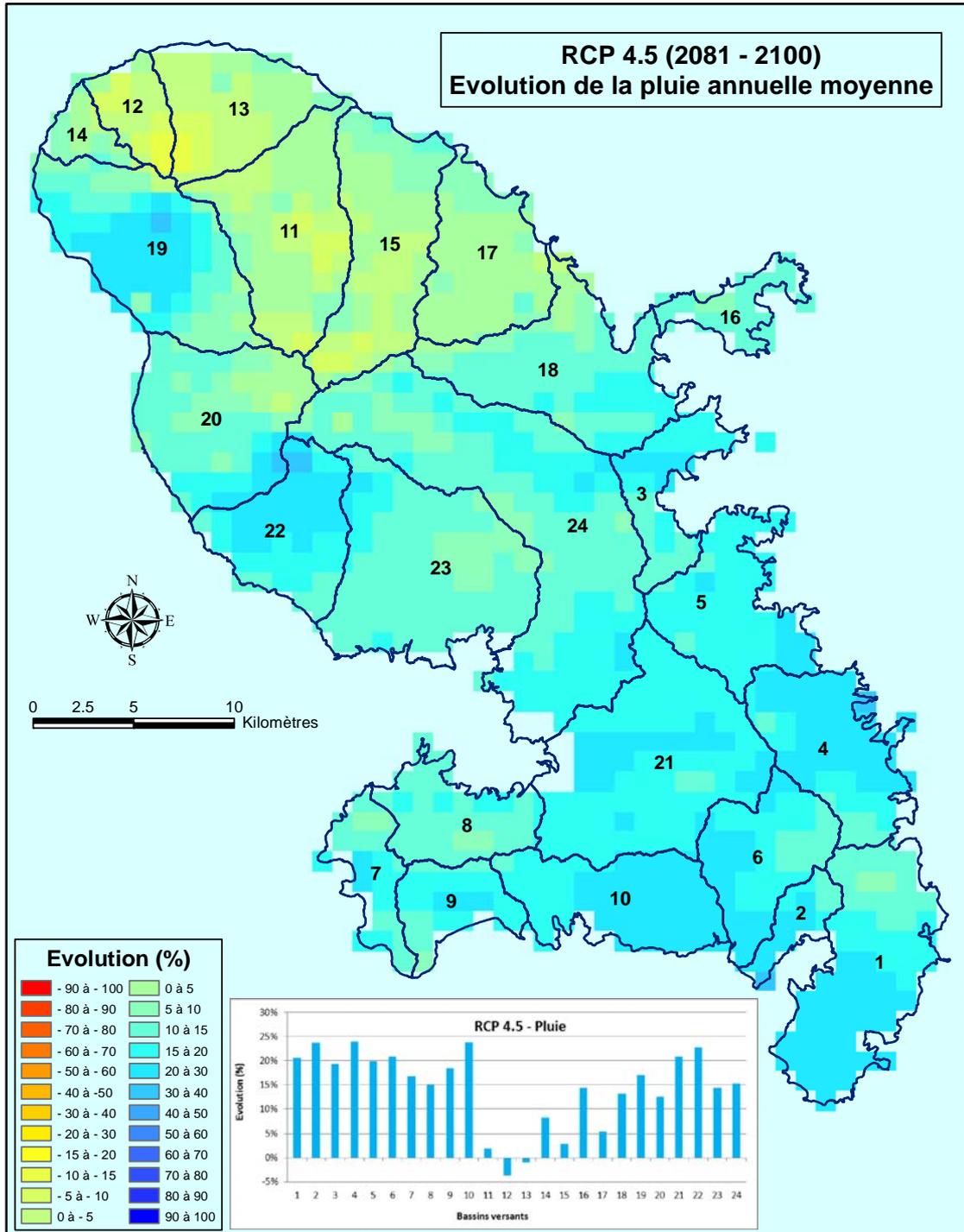


Illustration 12 : Évolution de la pluie annuelle moyenne pour le scénario RCP 4.5

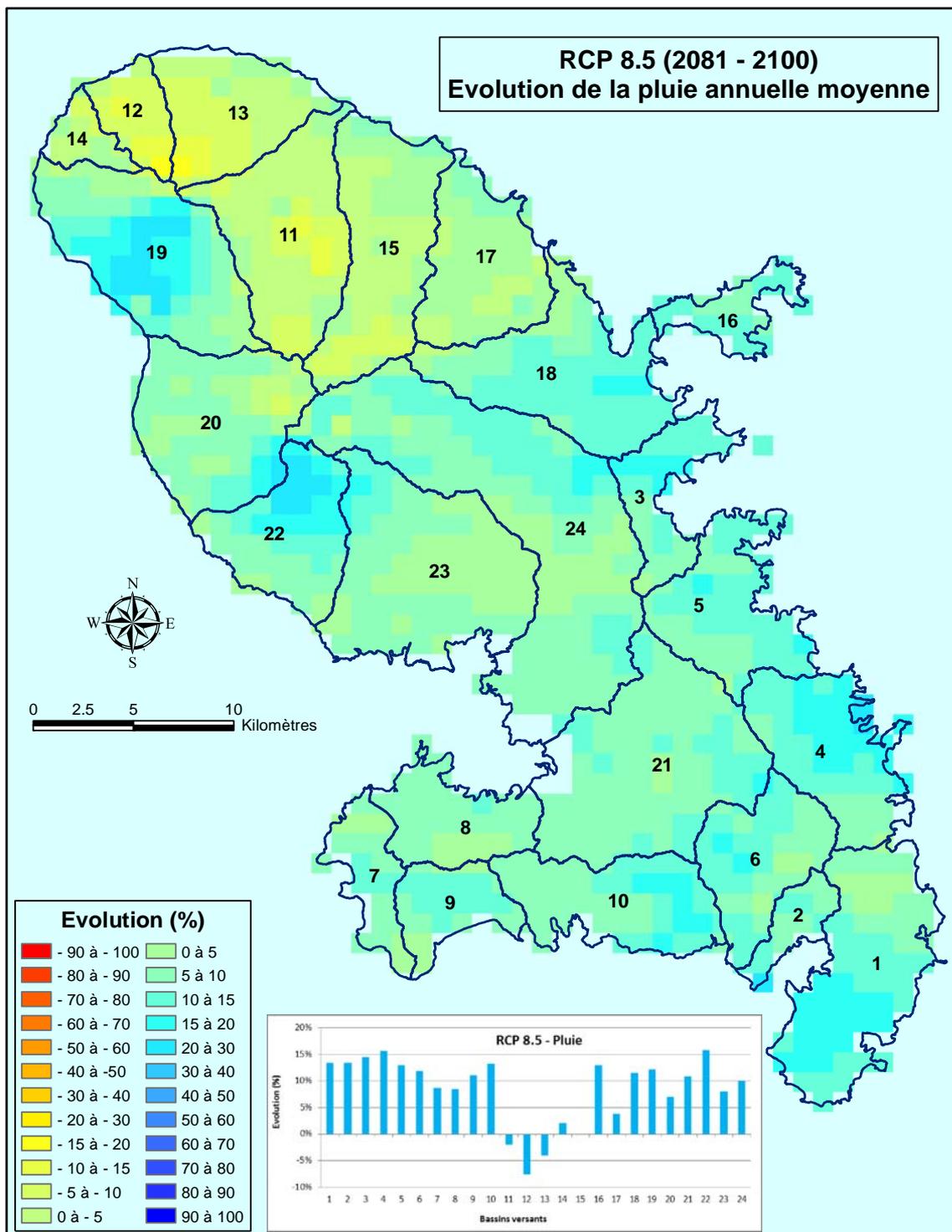


Illustration 13 : Évolution de la pluie annuelle moyenne pour le scénario RCP 8.5

L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évolution de l'ETP est principalement liée à l'évolution des températures. Une hausse globale des ETP serait ainsi observée à la station du Lamentin sur la période 2071-2100 (Illustration 14) :

- de + 10 % (novembre) à + 20 % (juin) selon le scénario RCP 4.5 ;
- de + 24 % (octobre) à + 34 % (avril) selon le scénario RCP 8.5.

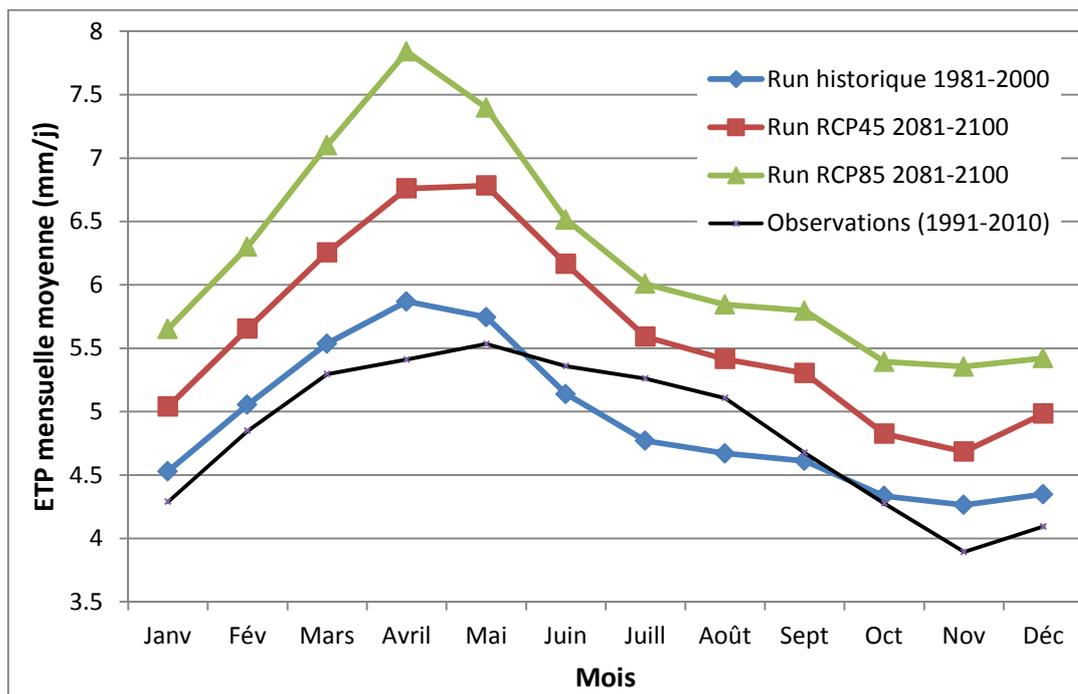


Illustration 14 : Évolution des moyennes mensuelles de l'ETP modélisée au Lamentin

Les incertitudes

La principale limite de l'étude mise en avant par Météo France est le recours à un seul couple de modèles numériques (ARPEGE-ALADIN) qui ne permet pas une vision complète de l'incertitude des projections. Idéalement, une approche multi-modèles s'avèrerait nécessaire.

Par ailleurs, les incertitudes liées à la descente d'échelle peuvent être importantes sur les pluies (Déqué et al., 2007).

Les projections utilisées dans le cadre de ce travail ne doivent donc être prises que comme deux indications de situations futures équiprobables, non représentatives de la diversité des situations possibles.

3.2. LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

Sur la base des données produites par Météo France, en complément de la modélisation sur la période 1991-2010 (à partir des données observées), trois modélisations hydrologiques ont été réalisées :

- une première pour le run historique sur la période 1981-2000 ;
- deux autres pour les runs RCP 4.5 et RCP 8.5 sur la période 2081-2100.

Dans la mesure où les données du run historique de Météo France sont elles-mêmes légèrement différentes des observations sur la même période (voir par exemple l'ETP sur l'illustration 14), on ne doit pas s'attendre à ce que le modèle hydrologique reproduise fidèlement les piézométries et débits au pas de temps journalier sur la période historique. Par contre, les tendances et les amplitudes doivent être retrouvées.

La méthodologie classiquement adoptée pour évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau, est de comparer les **simulations liées au climat futur à la simulation issue du run historique et non à la simulation faite à partir des données climatiques observées**. De cette manière, on s'assure de proposer une analyse de l'impact du changement climatique, en s'affranchissant autant que possible de la difficulté du modèle de climat utilisé à reproduire les observations. Cette analyse se fait en comparant les valeurs d'indicateurs statistiques comme les moyennes annuelles et mensuelles, calculées sur les deux périodes (1981-2000 vs 2081-2100).

Enfin, il faut noter que sur la période 2081-2100, on suppose que les prélèvements en eau ou encore l'occupation du sol (dont dépendent par exemple la réserve utile des sols et les coefficients culturaux utilisés dans le modèle) restent identiques à ceux considérés sur la période 1981-2000. Cette hypothèse est probablement fautive mais elle est retenue dans la plupart des études d'impacts des changements climatiques faute de prévisions fiables pour ces paramètres (Explore 2070, 2011).

L'impact du changement climatique sur les ressources en eau est évalué dans ce qui suit à l'échelle des 24 unités hydrogéologiques définies pour la Martinique (Cf. § 2.1). Une analyse plus détaillée est proposée pour six de ces unités : Sainte-Luce (UH 10), Rivière Capot (UH 11), Rivière Galion (UH 18), Le Carbet (UH 20), Schœlcher – Case Pilote (UH 22) et Rivière Lézarde (UH 24). En effet, le calage du modèle est considéré comme satisfaisant en piézométrie comme en débit dans ces secteurs (excepté en piézométrie pour l'UH 11). De plus, ces unités regroupent la quasi-totalité des prélèvements AEP de la Martinique.

4. Résultats de la modélisation hydrologique

Dans le cas de la modélisation climatique menée par Météo France comme dans le cas de la modélisation hydrologique, l'approche a été mono-modèle. Par conséquent, outre les incertitudes intrinsèques des modèles et leur limite de performance, il faut garder à l'esprit que les résultats discutés dans le présent chapitre ne couvrent pas l'ensemble des incertitudes associées aux études d'impact du changement climatique.

À ce titre, les résultats obtenus ne constituent pas des prévisions, mais bien des projections de deux situations futures possibles et équiprobables, à l'horizon 2081-2100.

4.1. REPRODUCTION DU TEMPS PRÉSENT

Pour l'analyse de la reproduction du temps présent, nous nous intéressons aux débits mensuels moyens, minimum et maximum ainsi qu'aux niveaux piézométriques mensuels moyens, modélisés à partir des données observées (1991-2010) et du run historique (1981-2000).

Il faut signaler que Météo France n'a pas utilisé exactement les mêmes méthodes de krigeage pour spatialiser les précipitations annuelles moyennes des séries observées et des séries issues du modèle ALADIN (run historique, runs RCP 4.5 et RCP 8.5). En effet, Météo France s'est appuyé sur 35 postes climatiques (2 présentant trop de lacunes) dans le cas des séries observées contre 37 pour les séries modélisées. L'ajout de deux postes influe ainsi sur le choix des prédicteurs utilisées (Cf. § 3.1.1) dans la méthode de krigeage et donc sur les résultats finaux (Météo France, 2012).

Il en résulte des différences, localement significatives, entre la pluviométrie annuelle moyenne spatialisée observée et celle issue des simulations climatiques (run historique). La pluviométrie spatialisée intervenant dans la chaîne de calcul du modèle hydrologique (Cf. § 2.2.1), un biais peut donc être observé dans la reproduction du temps présent pour certaines unités hydrogéologiques. Les plus grands écarts sont constatés pour les UH 3, 4, 5, 6, 8 et 22 et vont tous dans le sens d'une sous-estimation des précipitations moyennes.

Malgré cela, l'évolution saisonnière des débits et des niveaux piézométriques est globalement bien reproduite (comparaison des résultats du modèle forcé par les séries observées et du modèle forcé par le run historique). Cela est traduit par des coefficients de corrélation élevés sur les valeurs mensuelles (Illustration 15). Les moins bonnes corrélations concernent la reproduction des débits pour l'UH 1 – Sainte-Anne et l'UH 4 – Vauclin, à l'extrémité sud-est de la Martinique, avec des coefficients de corrélation de 0.88.

Des graphiques permettant, pour chaque UH, de comparer l'évolution des débits mensuels moyens issus de la simulation forcée par le climat observé et par le run historique d'Aladin sont consignés en Annexe 2.

Unités hydrogéologiques	Coefficients de Pearson			
	Q moy.	Q min.	Q max.	Piezo. moy.
UH 1	0.88	0.07	0.83	0.93
UH 2	0.94	0.99	0.75	0.97
UH 3	0.97	0.81	0.86	0.98
UH 4	0.88	-0.2	0.81	/
UH 5	0.98	0.6	0.73	0.98
UH 6	0.96	0.94	0.81	0.97
UH 7	0.96	0.55	0.88	0.97
UH 8	0.97	0.62	0.93	0.98
UH 9	0.96	0.96	0.89	0.97
UH 10	0.95	0.93	0.76	0.96
UH 11	0.99	0.9	0.69	0.99
UH 12	0.99	0.87	0.42	/
UH 13	0.99	0.8	0.48	0.99
UH 14	0.99	0.92	0.86	/
UH 15	0.99	0.83	0.71	0.99
UH 16	0.93	0.97	0.66	/
UH 17	0.99	0.93	0.86	0.99
UH 18	0.98	0.87	0.86	0.99
UH 19	0.99	0.94	0.81	0.99
UH 20	0.99	0.77	0.8	0.99
UH 21	0.97	0.77	0.73	/
UH 22	0.98	0.82	0.94	0.99
UH 23	0.98	0.7	0.93	/
UH 24	0.99	0.82	0.9	1.00

Illustration 15 : Corrélations entre les débits mensuels moyens, minimum et maximum et les niveaux piézométriques mensuels moyens simulés à partir des données observées (1991-2010) et du run historique (1981-2000)

En revanche, les corrélations apparaissent moins bonnes pour les débits mensuels minimum et maximum. Il s'annonce donc difficile de travailler sur ces valeurs statistiques pour évaluer l'impact du changement climatique.

4.2. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE BILAN HYDRIQUE

Dans un premier temps, nous étudierons l'impact du changement climatique sur l'évolution du bilan hydrique, c'est-à-dire la partition de la pluie entre l'évapotranspiration et les pluies efficaces. Il est rappelé que la pluie efficace est la quantité d'eau disponible pour le ruissellement, l'infiltration et, de façon plus marginale, pour la saturation des sols superficiels.

4.2.1. Impact sur l'évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente le flux d'évaporation que pourrait avoir un couvert de gazon bien alimenté en eau. L'ETP est généralement supérieure à l'évapotranspiration réelle (ETR), flux réellement observé et estimé par les modèles hydrologiques (Illustration 3).

En conséquence de l'élévation de température attendue, une augmentation généralisée de l'ETR annuelle est projetée, elle est plus marquée pour le scénario RCP 8.5 avec une augmentation annuelle moyenne de + 15% à l'échelle de la Martinique contre + 11% pour le scénario RCP 4.5.

Les plus fortes augmentations (> 15%) sont observées sur la bordure sud-est de l'île (du Robert à Sainte-Anne, UH 1 à 6) quel que soit le scénario ainsi que dans le nord et le nord Atlantique pour le scénario RCP 8.5 (UH 11, 12, 13 et 15).

Des cartes d'évolution de l'ETR moyenne annuelle sont reportées en Annexe 3 pour les deux scénarios.

L'illustration 16 présente les évolutions futures des pluies et des ETR mensuelles moyennes pour l'UH 10 – Sainte-Luce et l'UH 11 – Capot, deux UH aux conditions climatiques différentes.

Dans le cas de l'UH 10 (sud de la Martinique, moins arrosé), la baisse de la pluviométrie pendant la saison sèche devrait s'accompagner d'une baisse de l'ETR. L'ETP est en augmentation mais elle n'est pas satisfaite du fait de faibles précipitations et d'un déficit hydrique des sols. Cela est plus marqué pour le scénario RCP 8.5 (Illustration 16).

À partir du mois de juin, l'ETR est en nette augmentation et l'ETR projetée selon le scénario RCP 8.5 devient plus importante : scénario moins pluvieux mais avec une demande évaporatoire plus forte. À partir du mois d'août, l'augmentation de l'ETR est moins marquée.

Avec, en saison des pluies, une pluviométrie plus importante et une ETR plus faible pour le scénario RCP 4.5, l'augmentation relative des pluies efficaces est plus forte pour ce dernier (Cf. § 4.2.2).

Dans le cas de l'UH 11 (nord Atlantique), l'ETR croît entre le run historique et le RCP 8.5 et globalement dans les mêmes proportions toute l'année. L'ETR reste toujours légèrement plus importante pour le scénario RCP 8.5 que pour le RCP 4.5. Comparativement à l'UH 10, la variabilité saisonnière de l'ETR est par ailleurs très faible.

Ainsi, avec des précipitations sensiblement plus faibles en saison sèche, une baisse des écoulements (P - ETR) plus marquée est attendue dans le nord de la Martinique.

Enfin, contrairement à l'UH 10, l'augmentation de la pluie en saison des pluies n'est pas particulièrement plus forte que celle de l'ETR. L'impact du changement climatique sur les pluies efficaces devrait donc être plus limité dans le nord (§ 4.2.2).

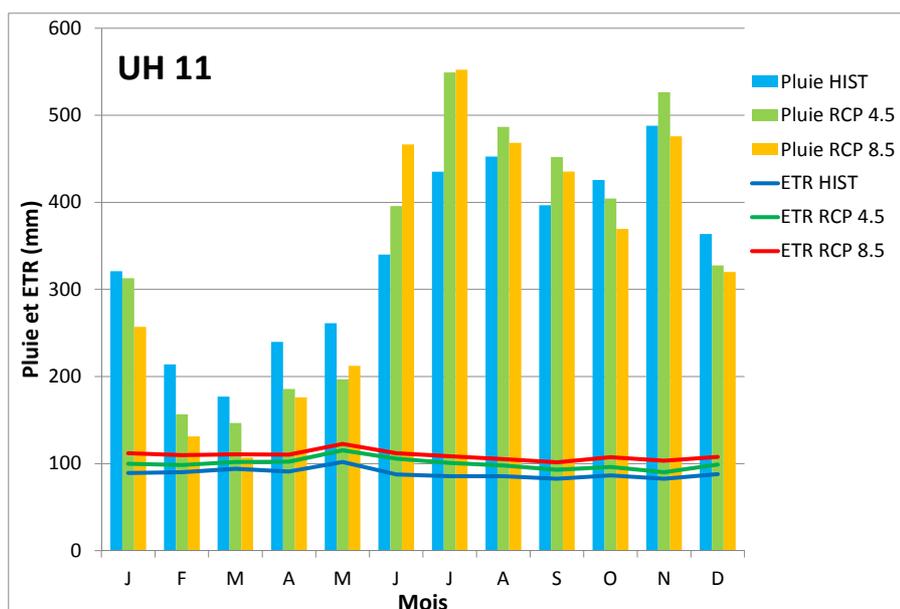
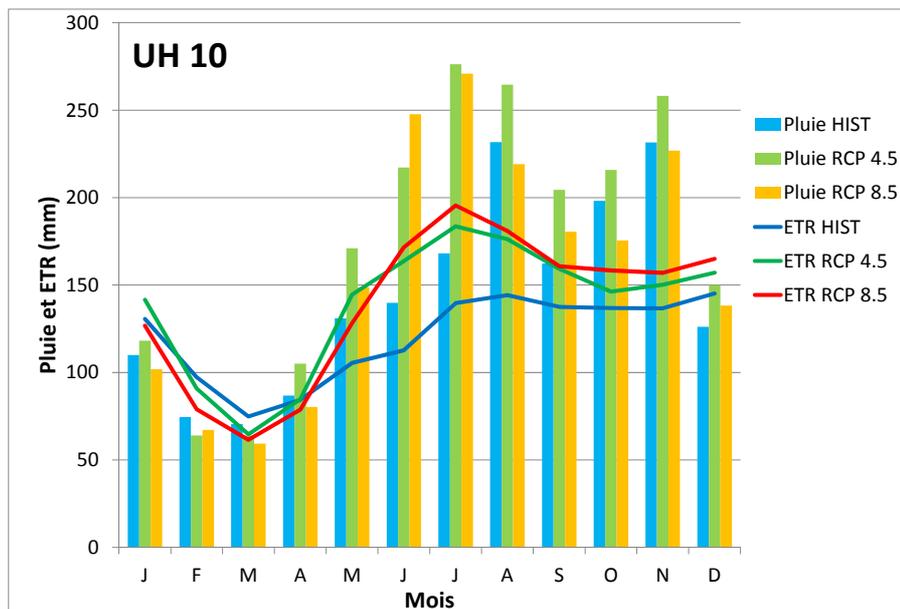


Illustration 16 : Évolutions des moyennes mensuelles de la pluie et de l'ETR pour l'UH 10 – Sainte-Luce et l'UH 11 – Capot

4.2.2. Impact sur la Pluie efficace

En cohérence avec les observations faites sur l'évolution des précipitations et de l'ETR, l'impact du changement climatique sur les précipitations efficaces apparaît très contrasté : d'une part, entre les deux scénarios climatiques étudiés et, d'autre part, entre saison sèche et saison des pluies (Illustration 17) :

- Scénario RCP 4.5 :
 - pendant la **saison des pluies** (juin à novembre), quasiment toutes les unités hydrogéologiques seraient concernées par une augmentation des pluies efficaces (+38% en moyenne à l'échelle de la Martinique). Une très forte augmentation (proche et supérieure à 50%) est constatée dans le sud de l'île (au sud d'une ligne Robert – Ducos (UH 1 à 10 et UH 21)) et plus localement au niveau de l'UH 22 (Schœlcher – Case Pilote). Comme évoqué précédemment, la forte augmentation des précipitations en saison des pluies prend donc ici le pas sur l'augmentation de l'ETR. Seules les UH 11 à 13 (extrémité nord) présentent une évolution relativement stable ;
 - au contraire, avec une baisse des précipitations pendant la **saison sèche** (décembre à mai), une baisse des pluies efficaces est attendue pour la très grande majorité du territoire (- 25% en moyenne à l'échelle de la Martinique, et jusqu'à -50% pour plusieurs UH). Seules les UH2 – Marin et UH21 – Petit Bourg enregistreraient des précipitations efficaces plus importantes à l'horizon 2081-2100 (+ 30%).
- Scénario RCP 8.5 :
 - pendant la **saison des pluies**, l'évolution apparaît relativement stable. Les seules évolutions marquées concernent les UH 1 (- 28%), 4 (- 27%) et 22 (+36%). En termes de bilan hydrique, l'augmentation conjuguée des précipitations et de l'ETR semble donc ici se neutraliser (§ 4.2.1) ;
 - pendant la **saison sèche**, tout le territoire sera possiblement concerné par une forte baisse des pluies efficaces, avec en moyenne - 51% à l'échelle de la Martinique (jusqu'à - 80% pour les UH 7 à 9, Presqu'île des Trois Ilets).

Les précipitations efficaces sont réparties entre infiltration et ruissellement. Au regard des hypothèses de travail retenues, les évolutions calculées par le modèle hydrologique sont identiques pour ces trois composantes du bilan hydrologique. En effet, les coefficients de sol (et donc les coefficients de ruissellement) intervenant dans le calcul de l'infiltration et du ruissellement sont restés identiques pour les modélisations du temps futur.

Pour une vision spatiale plus précise, des cartes présentant l'évolution des précipitations efficaces annuelles moyennes à la maille du km² sont reportées sur l'illustration 18.

En conclusion, à l'horizon 2081-2100, les modélisations hydrologiques projettent une diminution significative de la quantité d'eau disponible à l'écoulement (infiltration +

ruissellement) pendant la saison sèche : de 25 % en moyenne à l'échelle de la Martinique pour le scénario RCP 4.5 et de 50 % pour le scénario RCP 8.5. Le secteur le moins impacté serait le quart sud-est de l'île (UH 1 à 6, 10 et 21).

En ce qui concerne la saison des pluies, l'évolution diffère selon le scénario climatique projeté avec une augmentation significative des écoulements pour le scénario RCP 4.5 (+ 38 % en moyenne) et une situation globalement stable dans le cas du scénario RCP 8.5, à l'échelle de la Martinique. Il convient de remarquer que la pluie efficace projetée resterait stable dans le nord de l'île et le nord Atlantique (UH 11 à 15), pour les deux scénarios.

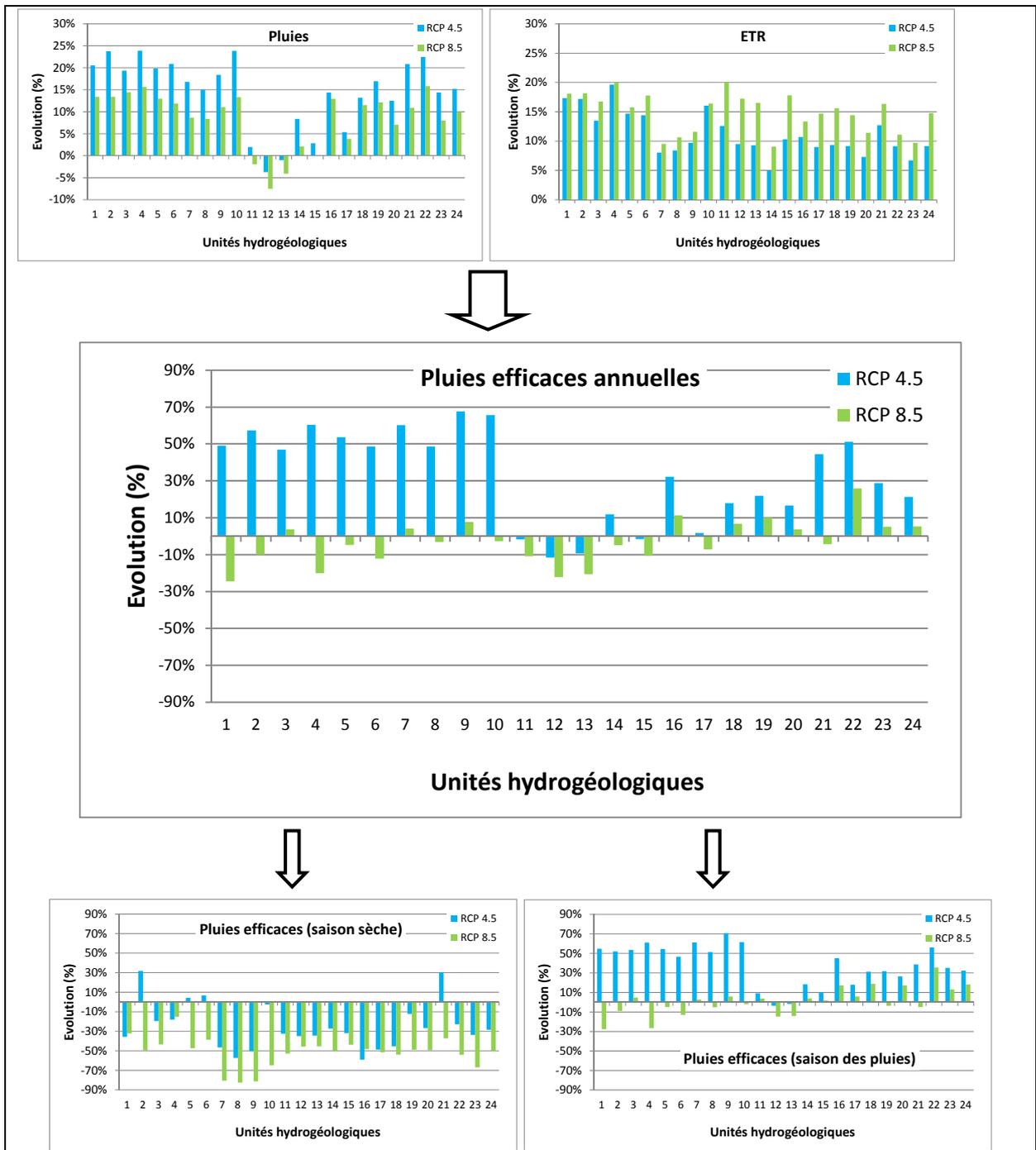


Illustration 17 : Évolution de la pluie et de l'ETR moyennes annuelles et des pluies efficaces saisonnières pour les 24 unités hydrogéologiques et selon les 2 scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5

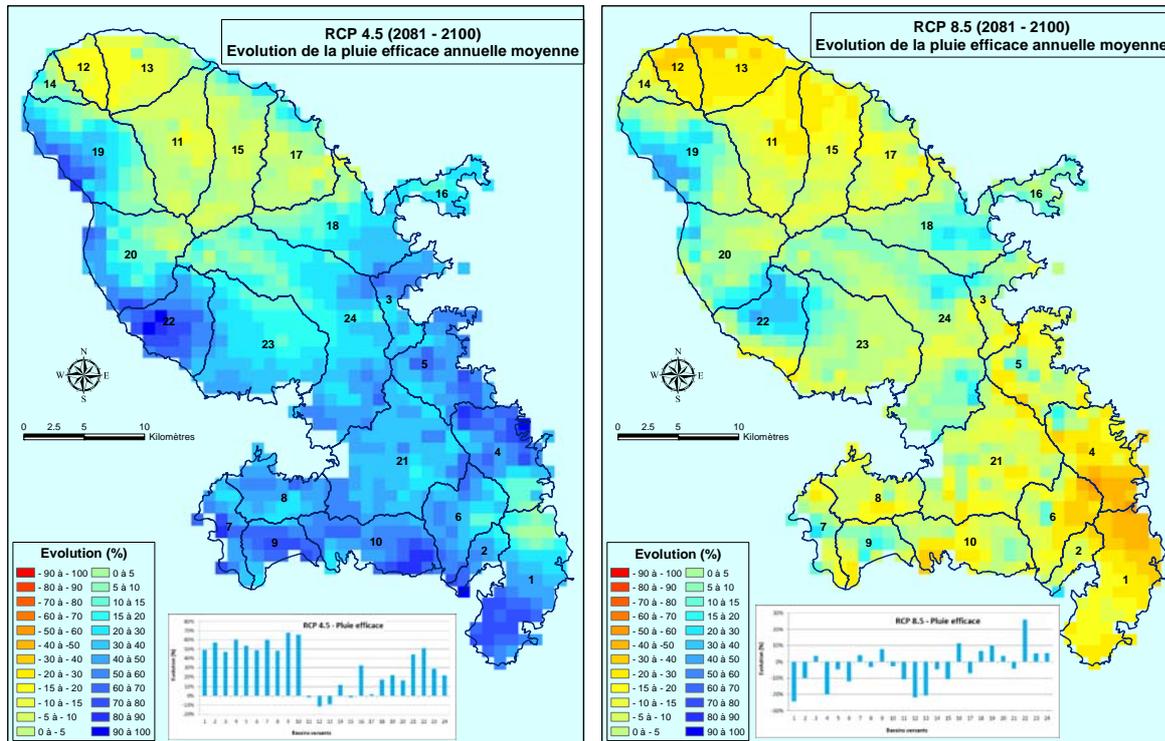


Illustration 18 : Évolution spatialisée des pluies efficaces annuelles moyennes pour les deux scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5

4.2.3. Impact sur les bilans hydrologiques

Dans le but d'illustrer ce qui a été discuté précédemment, une représentation schématique des différents termes du bilan hydrologique annuel est proposée pour les UH 10 et 11 (Illustration 19).

Avec une forte augmentation des pluies pendant la saison des pluies pour le scénario RCP 4.5, le réservoir sol du modèle se retrouverait saturé en eau, entraînant le plafonnement de la reprise par évapotranspiration.

Ce phénomène explique les très fortes augmentations relatives de la pluie efficace projetées dans de nombreux secteurs de l'île.

Par exemple, dans le cas de l'UH 10, avec, au pas de temps annuel, une augmentation des pluies et de l'ETR de respectivement 24 % et 16 %, les pluies efficaces et donc le débit moyen annuel à l'exutoire augmenteraient de 65 % (Illustration 19).

Ce phénomène n'est pas observé avec le scénario RCP 8.5 où l'augmentation des précipitations en saison des pluies serait moins importante.

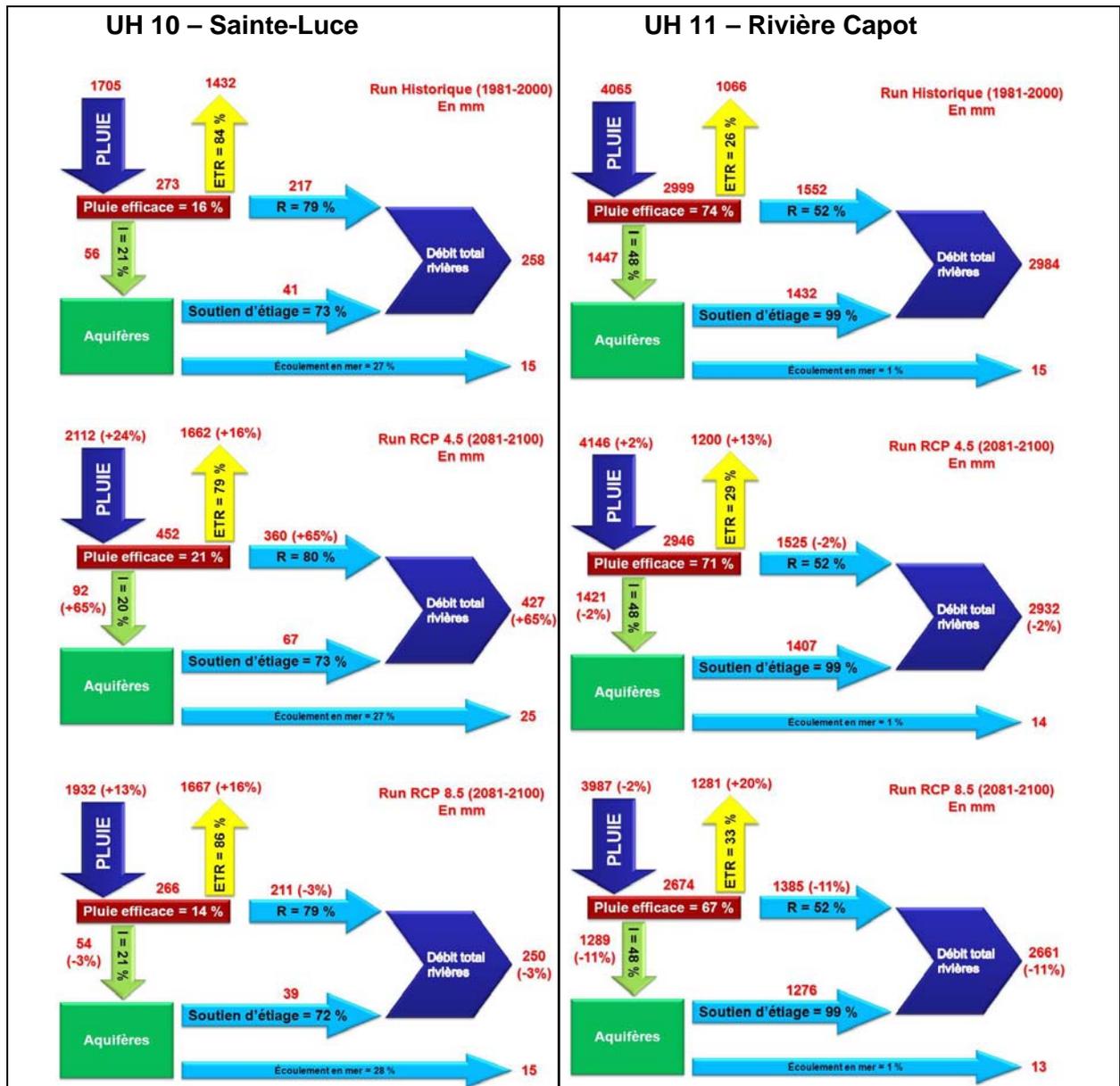


Illustration 19 : Évolution des bilans hydrologiques pour les UH10 – Sainte-Luce et UH11 – Rivière Capot selon les scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5 (% d'évolution de l'ETR calculé par rapport à la pluie, % d'évolution de l'infiltration et du ruissellement calculés par rapport à la pluie efficace, % du soutien d'étiage calculé par rapport à l'infiltration)

4.3. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES DÉBITS DES RIVIÈRES

En préambule, il est rappelé que les débits simulés prennent en compte les prélèvements AEP (Illustration 2 et Illustration 3). Il s'agit donc de débits influencés.

4.3.1. Débits moyens inter-annuels

Le module, débit moyen inter-annuel (en m³/s), a été calculé à l'exutoire de chacune des 24 unités hydrogéologiques. L'illustration 20 présente une cartographie de l'évolution des modules à l'horizon 2081-2100.

Dans le cas du **scénario RCP 4.5**, en lien direct avec l'évolution des précipitations efficaces annuelles, les débits moyens inter-annuels seraient très majoritairement plus élevés dans le futur, en particulier au sud d'une ligne Robert - Ducos avec des hausses de +37 % (UH21 – Petit Bourg) à +59 % (UH9 – Diamant). Seul le nord Atlantique de la Martinique serait concerné par des baisses des modules (UH 11, 12, 13, 15 et 17).

En ce qui concerne le **scénario RCP 8.5**, les débits moyens seront au contraire majoritairement à la baisse. Les baisses les plus sensibles sont attendues à l'extrémité sud-est de l'île (UH 1 et 4 avec respectivement -29 % et -25 %). Les modules restent à la hausse dans le Nord Caraïbe (UH 19, 20 et 22) et dans le centre de la Martinique (UH 16, 18 et 24).

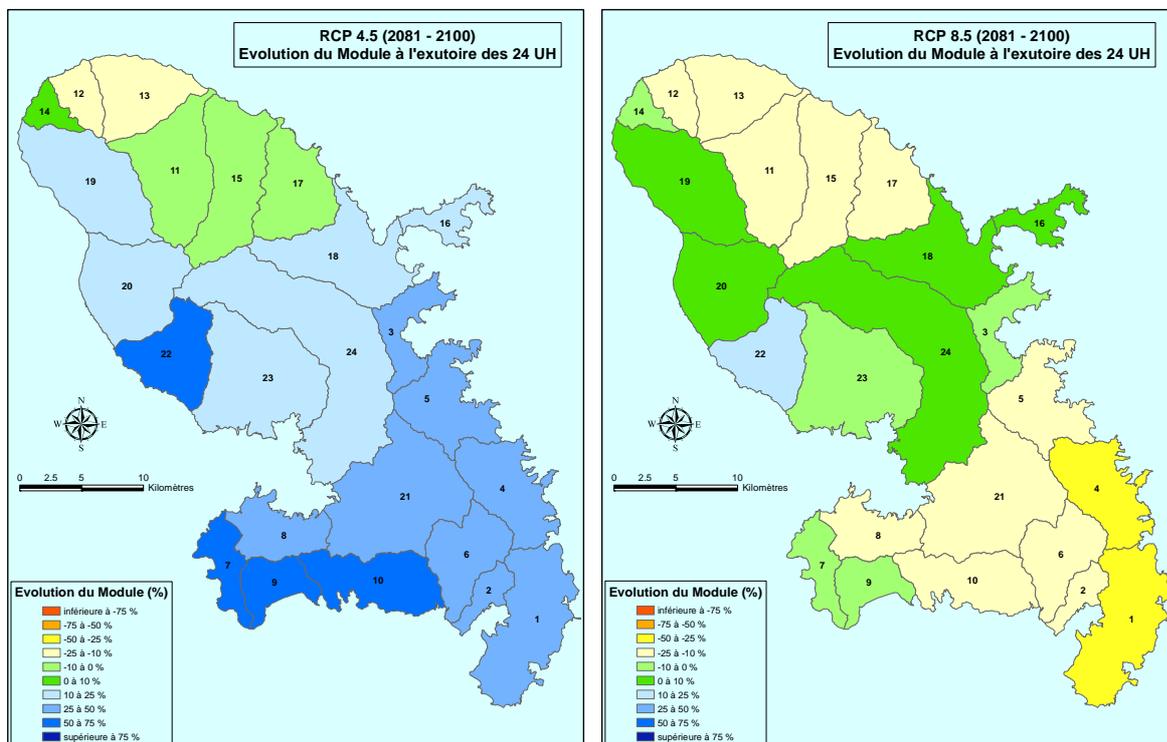


Illustration 20 : Évolution du Module à l'exutoire des 24 unités hydrogéologiques pour les 2 scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5

4.3.2. Débits mensuels moyens

L'illustration 21 présente les fluctuations du débit mensuel moyen simulées pour les temps présent et futurs à l'exutoire des six UH de référence, évoquées précédemment (§ 3.2). Pour les autres UH, les graphiques sont reportées en Annexe 4.

Globalement, la saisonnalité des débits ne semble pas être impactée. Les seules divergences remarquables concernent les UH 18 (Galion) et 24 (Lézarde, uniquement pour le scénario RCP 8.5) avec un premier pic de hautes eaux avancé au mois de juillet (contre août actuellement).

Pour chacune des UH étudiées, l'évolution possible des débits apparaît ainsi similaire avec cependant des intensités pouvant varier. Quel que soit l'UH, les débits sont plus importants dans le cas du scénario RCP 4.5, à l'exception du mois de juin (Cf. Illustration 21).

Pendant le Carême (saison sèche), on constate une baisse quasi systématique des débits projetés à l'horizon 2081-2100. La seule exception à relever concerne l'UH 10 (Sainte-Luce) dans le cas du scénario RCP 4.5 où les débits resteraient identiques voire très légèrement supérieurs de janvier à mai.

L'hivernage (saison des pluies) serait caractérisé par une très forte augmentation des débits en début de saison des pluies (juin à août), par la suite, l'impact du changement climatique serait moins marqué.

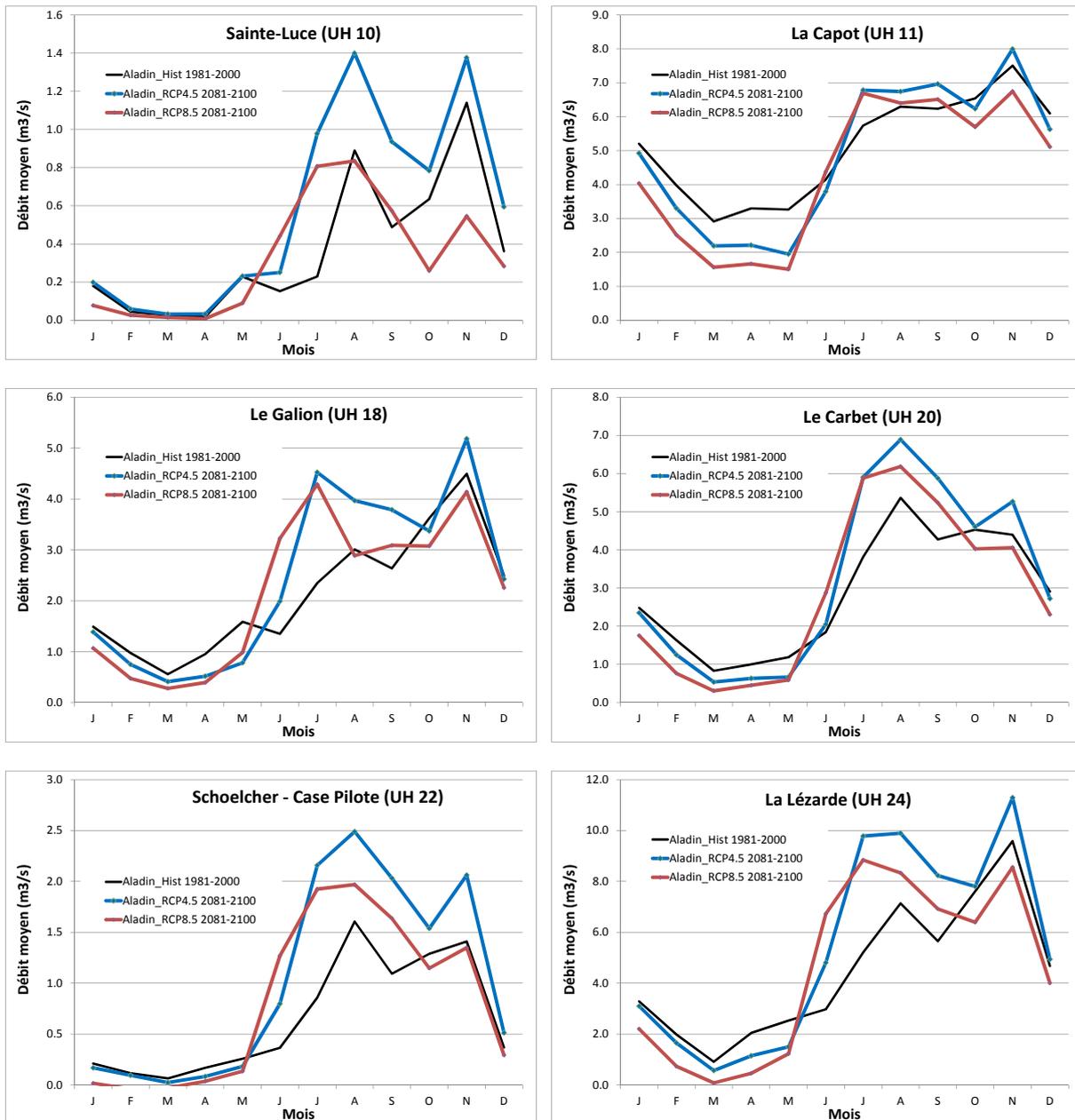


Illustration 21 : Débits mensuels moyens simulés à l'exutoire des UH 10, 11, 18, 20, 22 et 24 pour les temps présent et futurs

4.3.3. Débits d'été

Il est important d'appréhender l'impact du changement climatique sur les débits en période d'été, période particulièrement critique pour l'alimentation en eau potable en Martinique.

Le modèle ne permet, cependant, pas d'étudier des indicateurs classiquement utilisés en hydrologie comme par exemple le débit mensuel quinquennal sec QMNA5 (minimum atteint en moyenne une fois tous les cinq ans). En effet, il est rappelé que le modèle sous-estime les débits d'été (§ 2.2.3) et que la reproduction du temps présent apparaît moins satisfaisante pour les valeurs statistiques « minimum mensuel » et « maximum mensuel » (§ 4.1).

En concertation avec la DEAL, dans le but d'illustrer l'impact du changement climatique sur les débits à l'été, l'évolution des débits moyens du mois de mars à l'exutoire des 24 UH a été calculée pour les deux scénarios climatiques (Illustration 23).

La moitié nord de l'île, où s'exerce la totalité des prélèvements AEP (Illustration 22), enregistrerait les plus fortes baisses de débits moyens au mois de mars. Les principales tendances d'évolution seraient les suivantes :

- Pour le scénario climatique RCP 4.5 :
 - seules quelques UH présenteraient des hausses du débit moyen au mois de mars, dans la moitié sud de la Martinique : presqu'île des Trois Ilets, Le Robert, Le François ;
 - les baisses les plus marquées concerneraient le centre : UH 22 – Schœlcher, Case Pilote et UH 23 – Fort-de-France avec respectivement des baisses de débit projetées de l'ordre de 60 et 70% ;
 - pour la moitié nord de l'île, les baisses varient entre 20 % (UH 19 – Pelée Ouest) et 47 % (UH 12 – Conil Nord).
- Pour le scénario climatique RCP 8.5 :
 - seule l'UH 21 – Rivière Salée présenterait une hausse du débit moyen au mois de mars ;
 - les UH 22 – Schœlcher, Case Pilote, UH 23 – Fort-de-France et UH 24 – Lézarde présenteraient des baisses du débit moyen très importantes avec des assècs très fréquents sur la période 2081-2100 ;
 - pour la moitié nord de l'île, les baisses varieraient entre 40 % et 75 %.

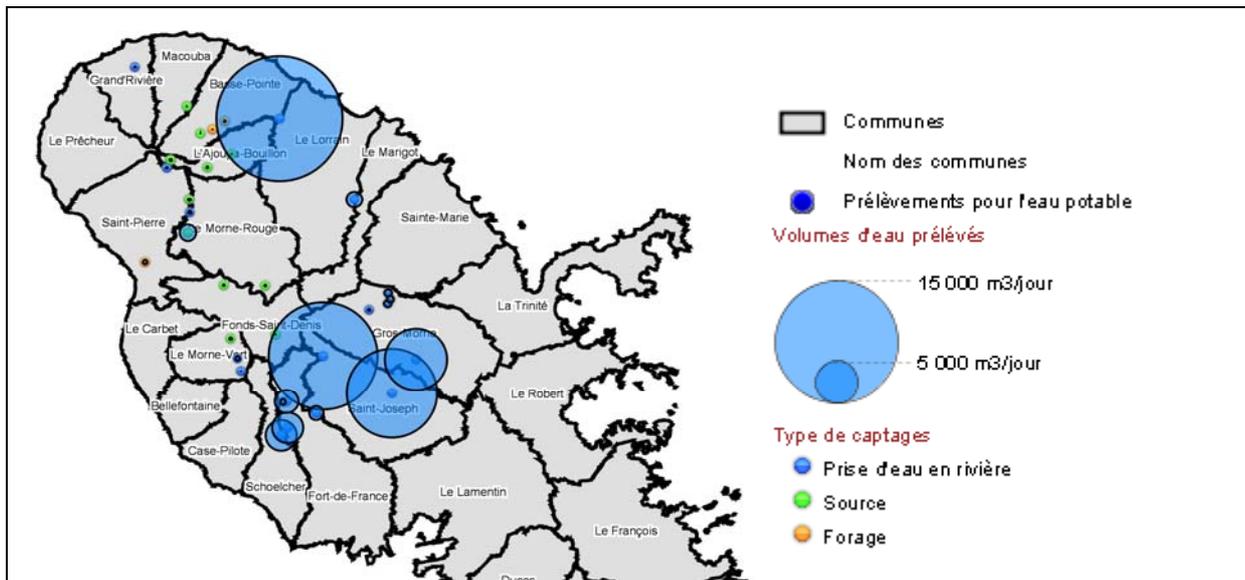


Illustration 22 : Carte de localisation des prélèvements pour l'eau potable en Martinique (source : Observatoire de l'Eau Martinique)

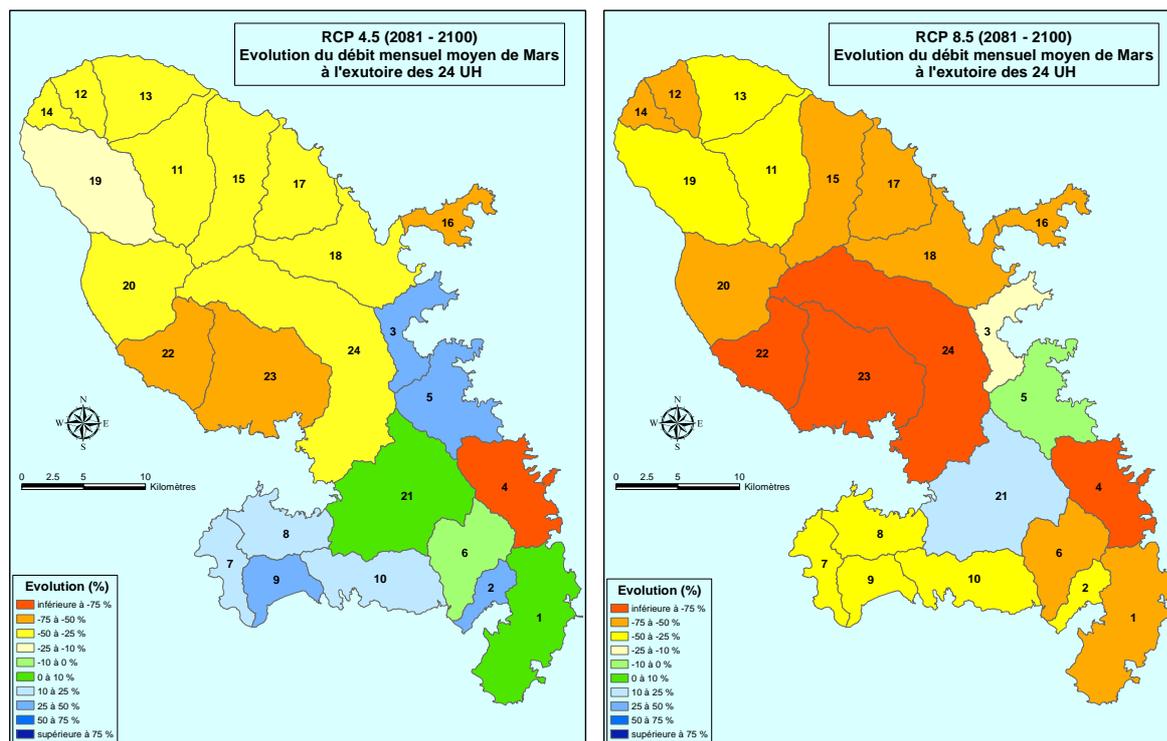


Illustration 23 : Évolution des débits mensuels moyens du mois de mars à l'exutoire des 24 unités hydrogéologiques et pour les 2 scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5

En période de carême, il est ainsi probable que les tensions quantitatives soient encore plus fortes dans le futur. Les prélèvements actuellement exercés sur les bassins versants du centre de la Martinique (UH 22 à 24) ne semblent, par exemple, pas soutenables à l'horizon 2081-2100, en particulier pour le scénario RCP 8.5.

Ceci est d'autant plus vrai que dès à présent, il n'est pas rare que le débit observé dans les cours d'eau soit inférieur au débit minimum biologique.

Les mêmes cartes ont été réalisées pour les mois d'avril, d'août et de novembre (Annexe 5).

4.4. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA PIÉZOMÉTRIE

Dans un premier temps, l'impact du changement climatique sur la piézométrie est analysé à l'échelle interannuelle. Pour ce faire, l'évolution du niveau d'eau moyen interannuel entre les périodes historiques et futures a été rapportée au battement annuel moyen de la période historique au droit de chaque piézomètre (Illustration 24). Ceci permet de caractériser l'importance de l'impact du climat futur au regard de la variabilité saisonnière de la nappe observée au cours de la période historique.

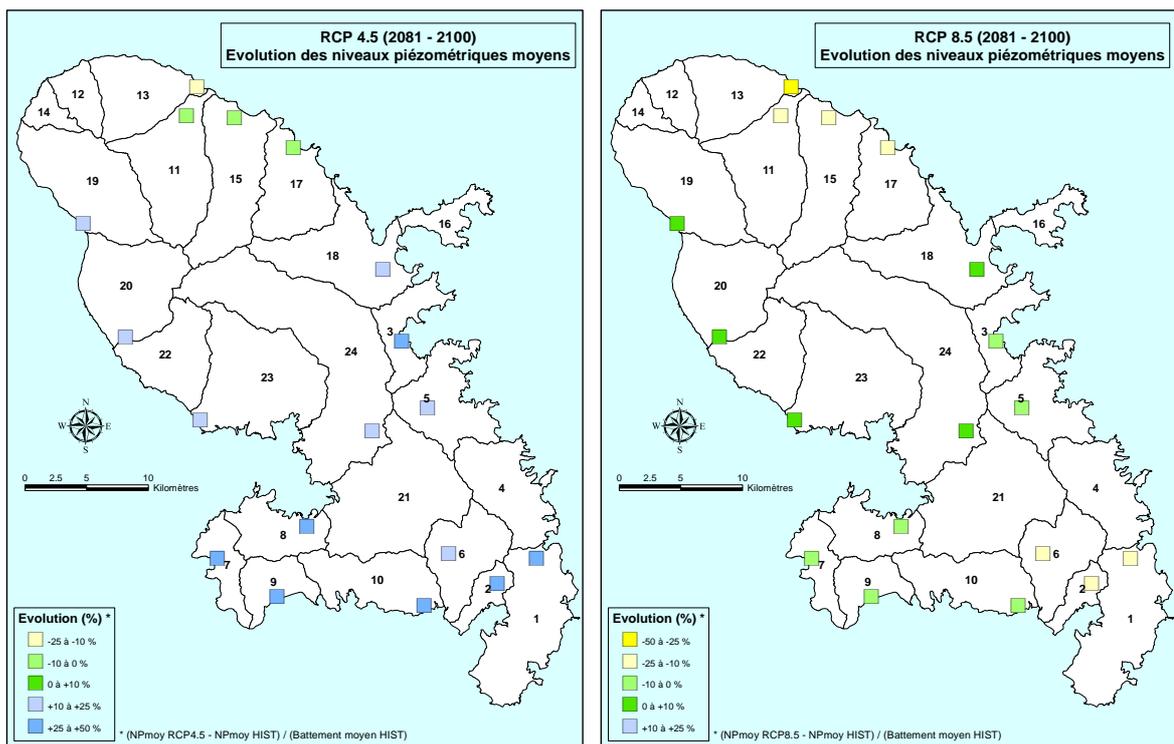


Illustration 24 : Évolution des niveaux piézométriques inter-annuels moyens pour les 2 scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5

Dans le cas du **scénario RCP 4.5**, une situation stable ou à la hausse est projetée de manière générale, excepté dans le Nord Atlantique, où des baisses (16 % pour l'UH 13 – Pelée Nord et 6 % pour les UH 11 – Capot et UH 16 – Lorrain Marigot) sont projetées. Les augmentations les plus importantes sont attendues dans le sud de la Martinique (de + 30 % à + 40 %).

En ce qui concerne le **scénario RCP 8.5**, seul le centre et le Nord Caraïbe présenteraient des niveaux piézométriques moyens plus élevés (jusqu'à + 24 % pour l'UH 19 – Pelée Ouest). Pour le reste, les niveaux moyens évolueraient à la baisse, plus particulièrement dans le Nord Atlantique (UH11, 13, 15 et 17).

Si on s'intéresse à l'évolution saisonnière des niveaux piézométriques (Illustration 25), on note qu'une recharge plus intense des aquifères est projetée dans le futur et ce quel que soit le scénario climatique. Dans le cas du scénario RCP 8.5 cependant, la période pendant laquelle la recharge s'exerce serait plus courte et la vidange des aquifères débuterait plus tôt.

Ainsi, à la sortie de la période de recharge, les niveaux de hautes eaux pour le scénario RCP 4.5 seraient majoritairement plus élevés que ceux de la période historique et équivalents ou légèrement inférieurs pour le scénario RCP 8.5.

Cette situation entrainerait une vidange des aquifères légèrement plus soutenue pendant la saison sèche, ce qui engendrerait, à l'horizon 2081-2100, des niveaux de basses eaux équivalents (dans le sud de la Martinique et au sein des UH 19, 22 et 24) ou inférieurs à ceux de la période historique pour le scénario RCP 4.5 et toujours inférieurs pour le scénario RCP 8.5.

En définitive, grâce à une recharge globalement plus importante quel que soit le scénario climatique étudié, l'impact du changement climatique sur les niveaux piézométriques de basses eaux serait limité et, en tout état cause, beaucoup moins marquée que sur les débits des cours d'eau. Par exemple, en basses eaux, les baisses de niveau les plus importantes sont de l'ordre de 20 cm, elles concernent le nord Atlantique dans le cas du scénario RCP 8.5. Ceci illustre le rôle « tampon » que jouent les eaux souterraines sur les processus hydrologiques.

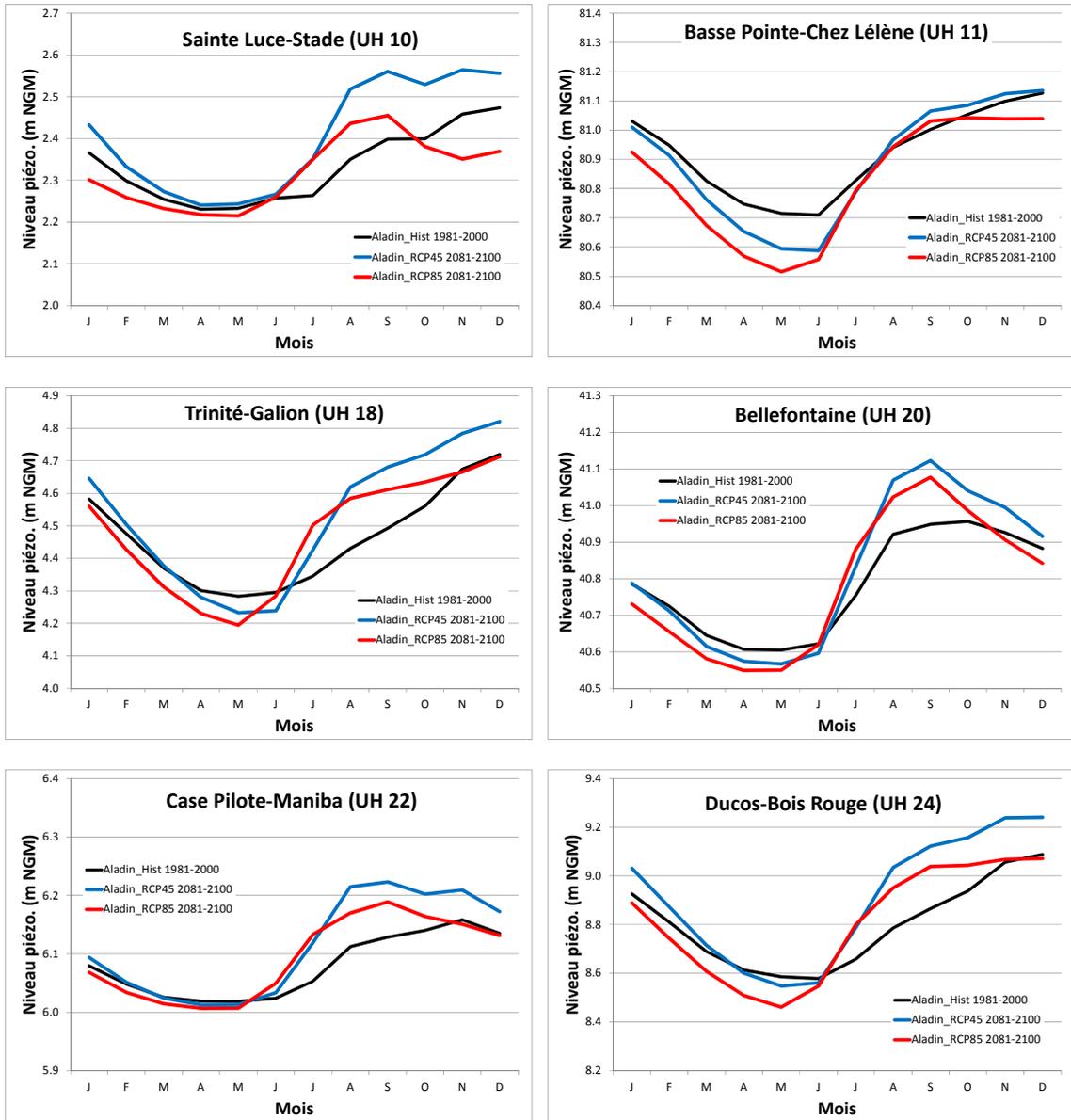


Illustration 25 : Niveaux piézométriques mensuels moyens simulés pour les piézomètres de référence des UH 10, 11, 18, 20, 22 et 24 pour les temps présent et futurs

4.5. VOLUMES D'EAU SOUTERRAINE EXPLOITABLE

Lanini et al. (2006) ont proposé des volumes d'eaux souterraines potentiellement exploitables au sein des 24 UH. Il s'agit de la ressource potentielle théoriquement disponible telle qu'évaluée par le modèle et ajustée aux contraintes d'exploitabilité (productivité unitaire des forages selon les formations, rayon d'influence, impact sur les écoulements de surface et les milieux, contraintes d'accès liées à la topographie et à l'occupation du sol, etc.).

À l'échelle de la Martinique, le volume d'eaux souterraines potentiellement exploitables avait ainsi été estimé à 82 800 m³/jour, soit de l'ordre de 30 Mm³/an.

Selon le **scénario climatique RCP 4.5**, la ressource mobilisable pourrait être portée à 94 200 m³/jour (+13%), soit un gain potentiel de l'ordre de 11 000 m³/jour à l'horizon 2081-2100, réparti dans le centre et le sud de l'île.

Pour de nombreuses UH, la ressource en eaux souterraine mobilisable est plafonnée par les conditions d'accessibilité (Cf. UH en gris, Illustration 26). Par exemple, malgré une lame d'eau infiltrée en augmentation, le nombre de forages ne peut être accru par faute d'espace disponible.

Selon le **scénario climatique RCP 8.5**, le volume d'eau souterraine exploitable évoluerait à la baisse avec une diminution globale de 4 100 m³/jour (-5%). Le nord et le nord Atlantique seraient les secteurs plus sensiblement impactés. En revanche, les UH 23 – Fort-de-France et UH 24 – Lézarde ne seraient pas concernées avec, au contraire, une possible augmentation du volume exploitable (respectivement + 400 et + 900 m³/jour).

Il est donc intéressant de noter que pour ces deux UH, soumises à d'importants prélèvements AEP, le déficit que provoquerait le changement climatique en termes de ressource en eau superficielle, pourrait être compensé par le développement de l'exploitation des eaux souterraines, et ce quel que soit le scénario climatique.

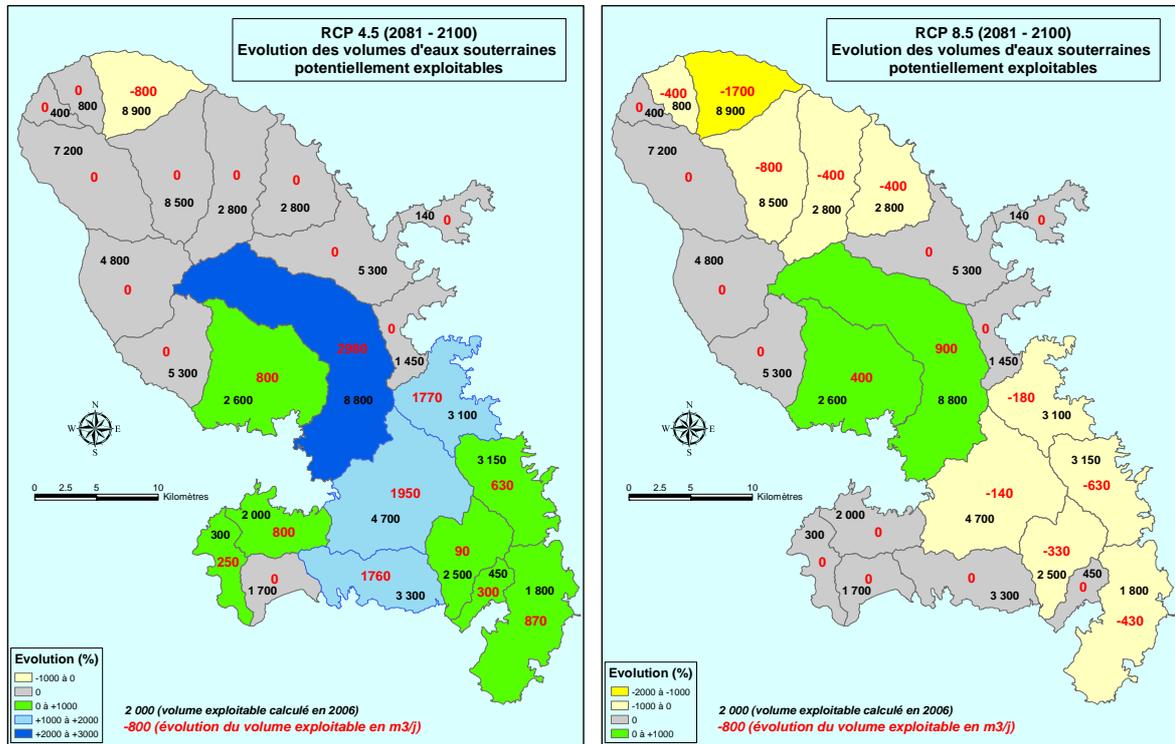


Illustration 26 : Évolution des volumes d'eaux souterraines exploitables par unité hydrogéologique et pour les 2 scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5

5. Conclusion

Dans le but d'évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau, superficielles et souterraines, de la Martinique à l'horizon 2081-2100, des modélisations ont été conduites par l'intermédiaire d'un modèle hydrologique global à trois réservoirs développé par le BRGM et sur la base des projections climatiques élaborées par Météo France. En accord avec les dernières conclusions du GIEC (2013), deux scénarios climatiques ont été étudiés : les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 (le plus pessimiste).

Même si le modèle hydrologique utilisé a été développé dans l'objectif d'appréhender les volumes d'eau souterraine potentiellement exploitables en Martinique, et non pour prédire des débits et des niveaux piézométriques, il a permis d'évaluer l'impact du changement climatique sur la ressource en eau superficielle et souterraine.

Il convient cependant de garder à l'esprit les limites associées à ce dernier et aux projections climatiques produites par Météo France :

- dans les deux cas (hydrologique et météorologique), l'approche se base sur l'utilisation d'un seul modèle. Les résultats obtenus ne couvrent donc pas l'ensemble des incertitudes associées aux études d'impact du changement climatique ;
- les simulations ont été faites à prélèvements constants et pour une occupation du sol identique à celle de la période actuelle. Ces hypothèses, probablement fausses, sont classiquement retenues faute de prévisions fiables ;
- le calage global du modèle hydrologique a privilégié la piézométrie et n'a pas particulièrement été axé sur les étiages, période pour laquelle les débits simulés apparaissent majoritairement sous-estimés ;
- enfin, la répartition ruissellement / infiltration est supposée constante, le modèle ne considère donc ni modification des états de la surface, ni changement du mécanisme de ruissellement lors d'évènements pluvieux plus intenses.

Au regard de ces limites et incertitudes, les résultats de l'étude ne constituent pas des prévisions mais bien des projections de deux situations futures possibles et équiprobables, à l'horizon 2081-2100.

Les deux scénarios climatiques étudiés, RCP 4.5 et RCP 8.5 (scénario le plus pessimiste en termes d'émission de gaz à effet de serre), présentent des évolutions contrastées :

- pendant la saison sèche, la quantité d'eau disponible (infiltration + ruissellement) diminuerait de façon significative à l'horizon 2081-2100 avec, à l'échelle de la Martinique, une baisse moyenne de 25 % pour le scénario RCP 4.5 et de 50 % pour le scénario RCP 8.5. D'un point de vue géographique, le sud-est de l'île serait moins impacté ;

- pendant la saison des pluies, l'évolution diffère notablement selon le scénario climatique avec une augmentation moyenne des précipitations efficaces de 38 % pour le scénario RCP 4.5 et une situation globalement comparable à la période historique pour le scénario RCP 8.5.

Il faut noter, dans le cas du scénario RCP 4.5, que l'augmentation relative des pluies efficaces pendant la saison des pluies serait globalement plus importante que celle des précipitations, particulièrement dans la moitié sud de l'île. La forte augmentation de la pluviométrie pendant cette période entraînerait, en effet, la saturation des sols et donc le plafonnement de l'ETR.

En période de basses eaux, les modélisations hydrologiques projettent ainsi une baisse quasi-systématique des débits mensuels moyens des cours d'eau à l'horizon 2081-2100, avec des déficits plus prononcés pour le scénario RCP 8.5. La moitié nord de la Martinique, où se situent la totalité des captages AEP, serait plus particulièrement impactée.

Des tensions croissantes sur les usages de la ressource pourraient par conséquent s'observer sous l'effet du changement climatique en période de carême futur. Il est par exemple possible que les prélèvements actuellement exercés sur le bassin versant de la Lézarde ne soient pas soutenables à l'horizon 2081-2100, en particulier pour le scénario RCP 8.5. Les rivières du centre de la Martinique apparaissent, en effet, très vulnérables au changement climatique.

La ressource en eau souterraine serait moins sensiblement impactée par le changement climatique. Cela s'expliquerait principalement par une recharge des aquifères plus intense pendant la saison des pluies, qui viendrait reconstituer les réserves et compenser en partie les déficits de pluie efficace projetés en saison sèche. De ce fait, les volumes d'eau souterraine potentiellement exploitables pourraient augmenter dans le centre et le sud de la Martinique, dans le cas du scénario RCP 4.5. Enfin, il est intéressant de souligner que même pour le scénario pessimiste RCP 8.5, les unités hydrogéologiques de Fort-de-France et de la Lézarde ne seraient pas impactées en termes de volume exploitable (légère augmentation).

Pour terminer, la prise en compte de l'impact du changement climatique sur l'évolution future de la ressource en eau en Martinique renforce l'intérêt de recourir à l'exploitation des eaux souterraines, ressource encore très peu mobilisée en Martinique.

6. Bibliographie

BRL, IRSTEA, Météo France (2011) – Explore 2070 - Eau et changement climatique. Rapport d'étape n°2 : hydrologie de surface.

BRL, IRSTEA, Météo France (2012) – Explore 2070 - Eau et changement climatique. Rapport d'étape B2a : hydrologie DOM.

Déqué M. (2007) – Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values, *Glob. And Plan. Change*, 57, 16-26.

GIEC (2013) – Climate change 2013. The Physical Science Basis.

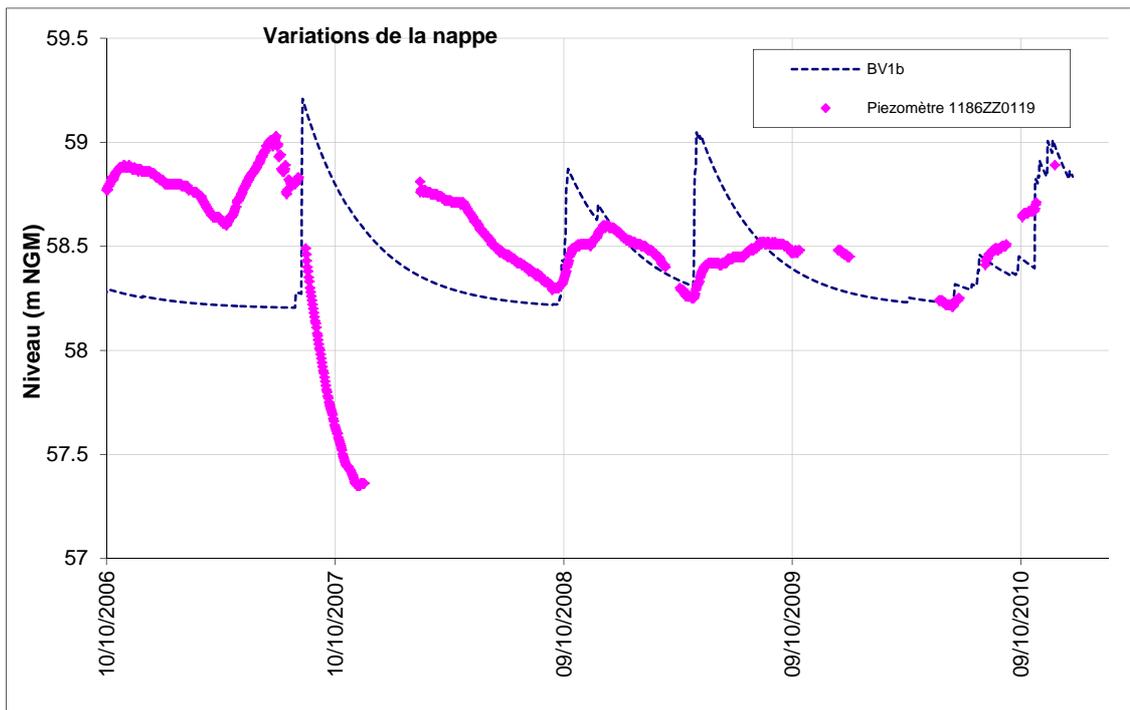
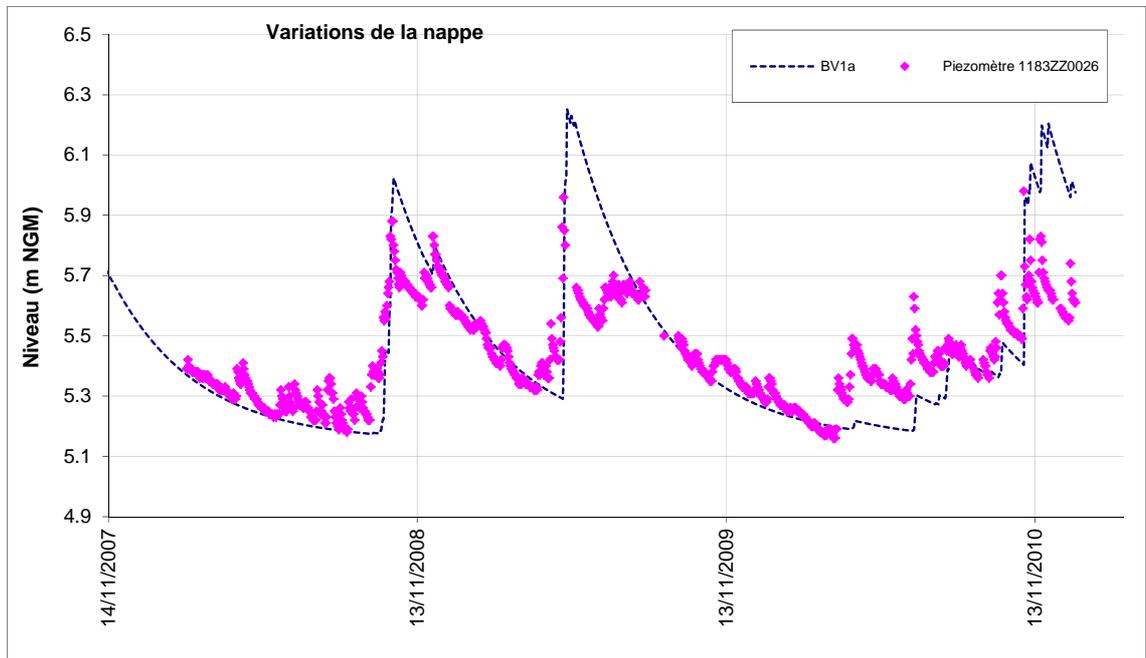
Habets F., Boé J., Déqué M., Ducharne A., Gascoin S. (2011) – Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Seine. Programme PIREN Seine.

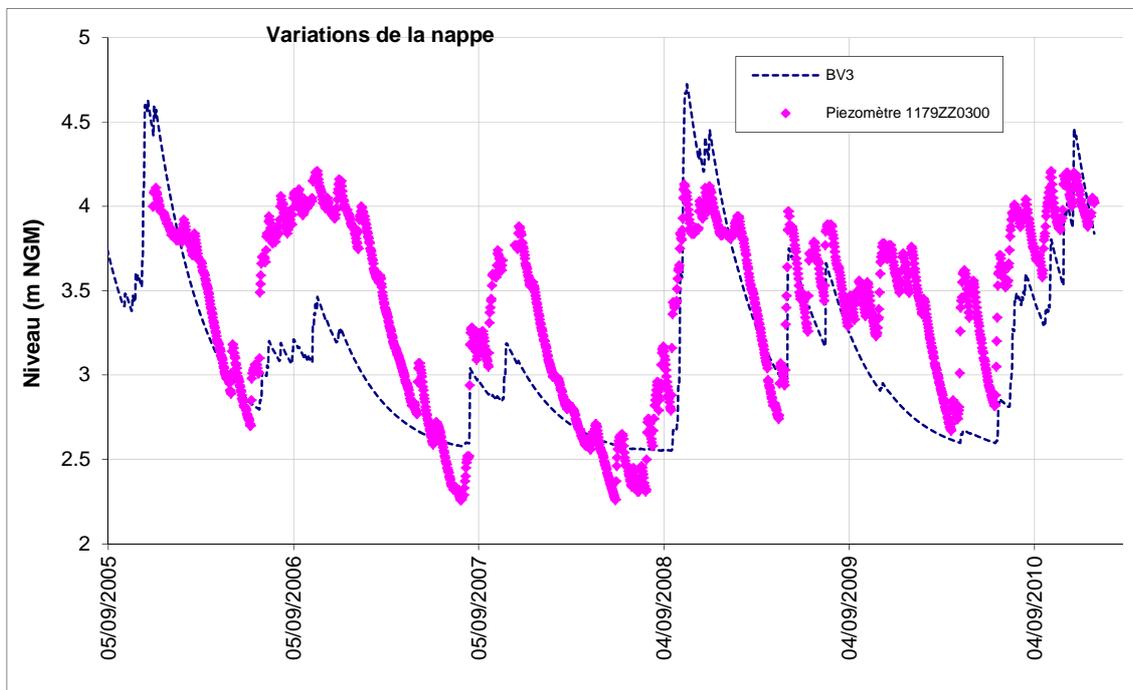
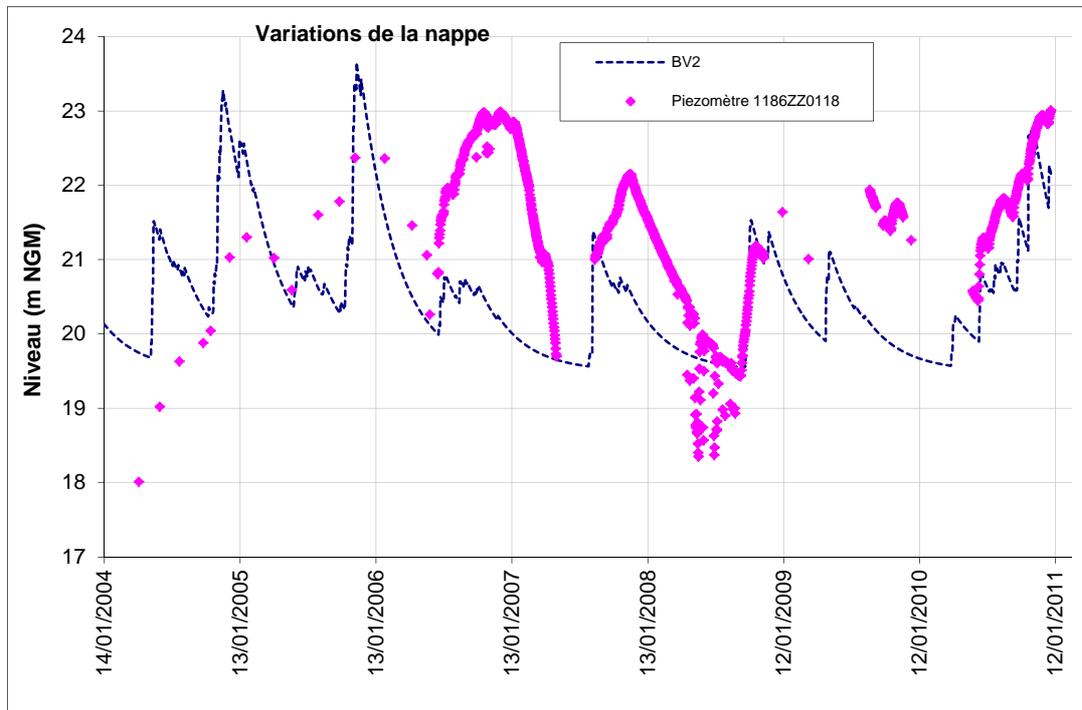
Météo France, Direction Interrégionale Antilles Guyane (2012) – Production de scénarios climatiques régionalisés. Rapport Final.

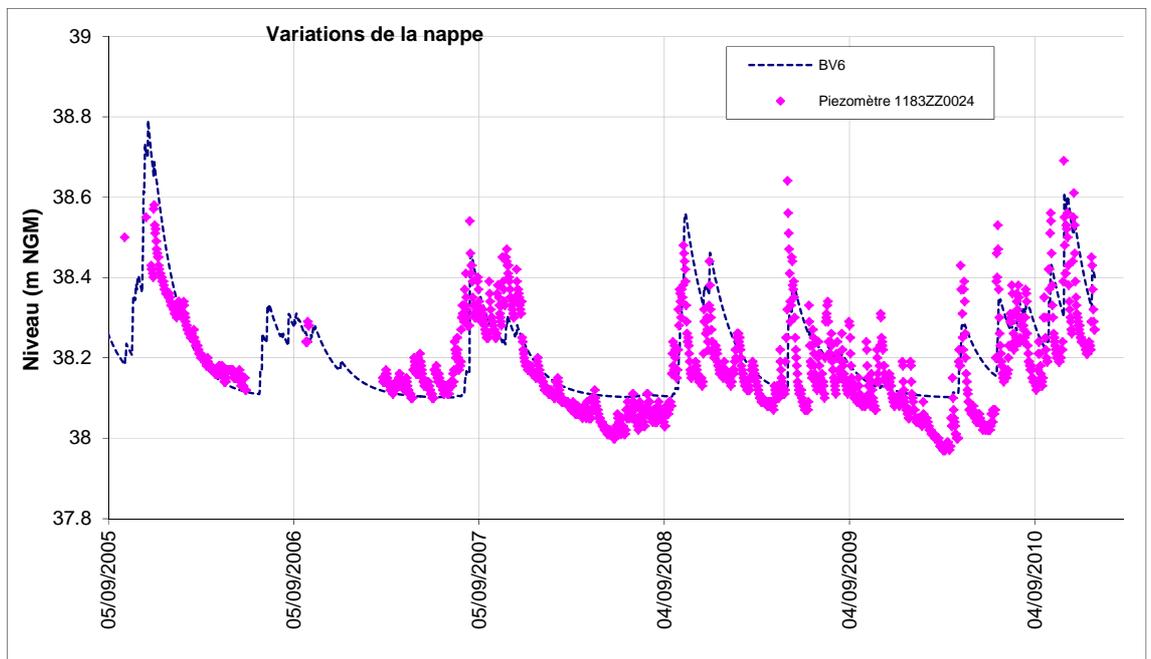
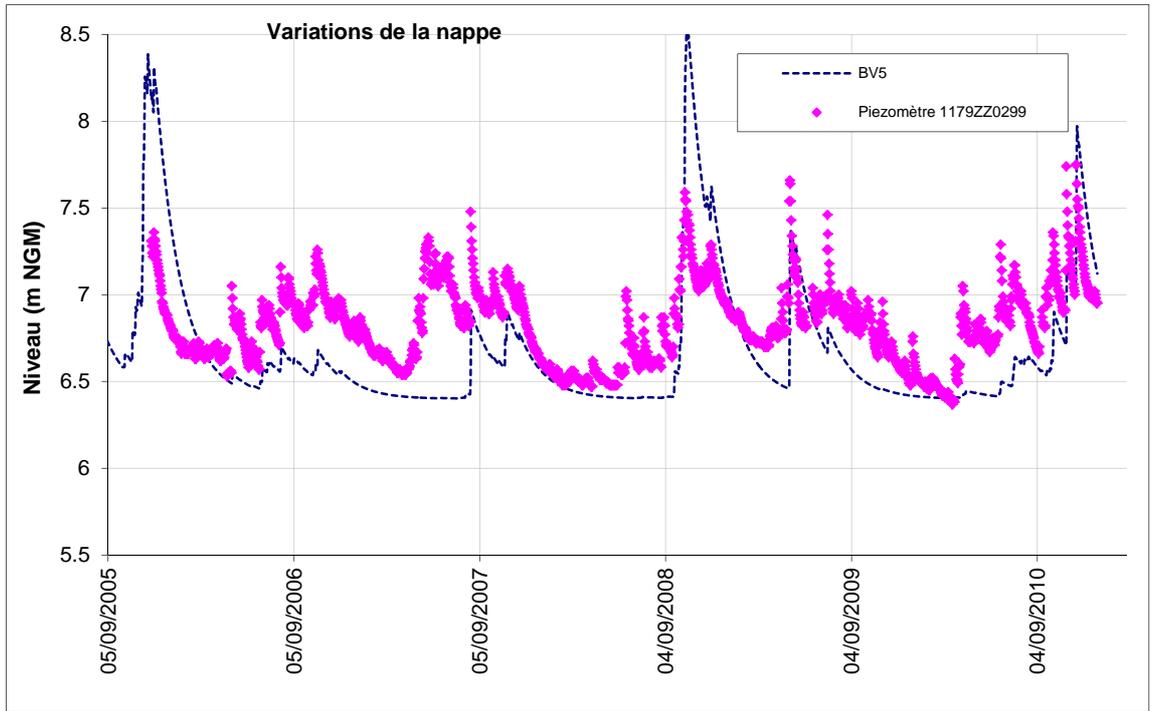
Vittecoq B., Lachassagne P., Lanini S., Ladouche B., Marechal J.C., Petit V. (2007) – Élaboration d'un système d'information sur les eaux souterraines de la Martinique : identification et caractérisations quantitatives. Rapport BRGM/RP-55099-FR, 221 p., 87 ill., 8 ann.

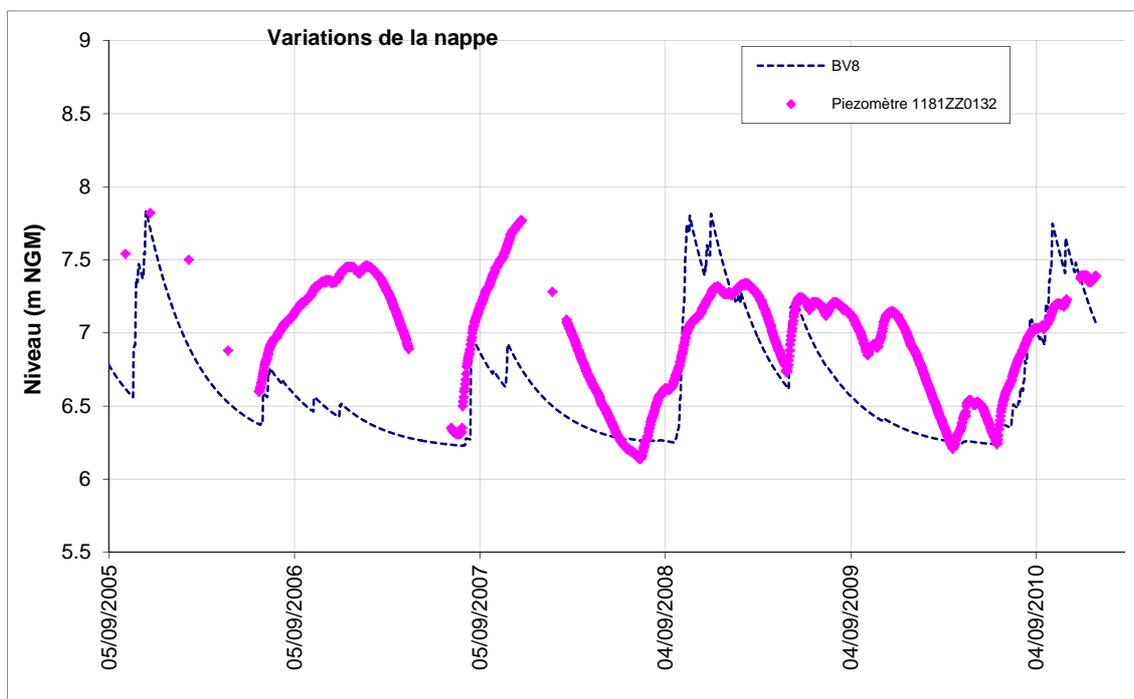
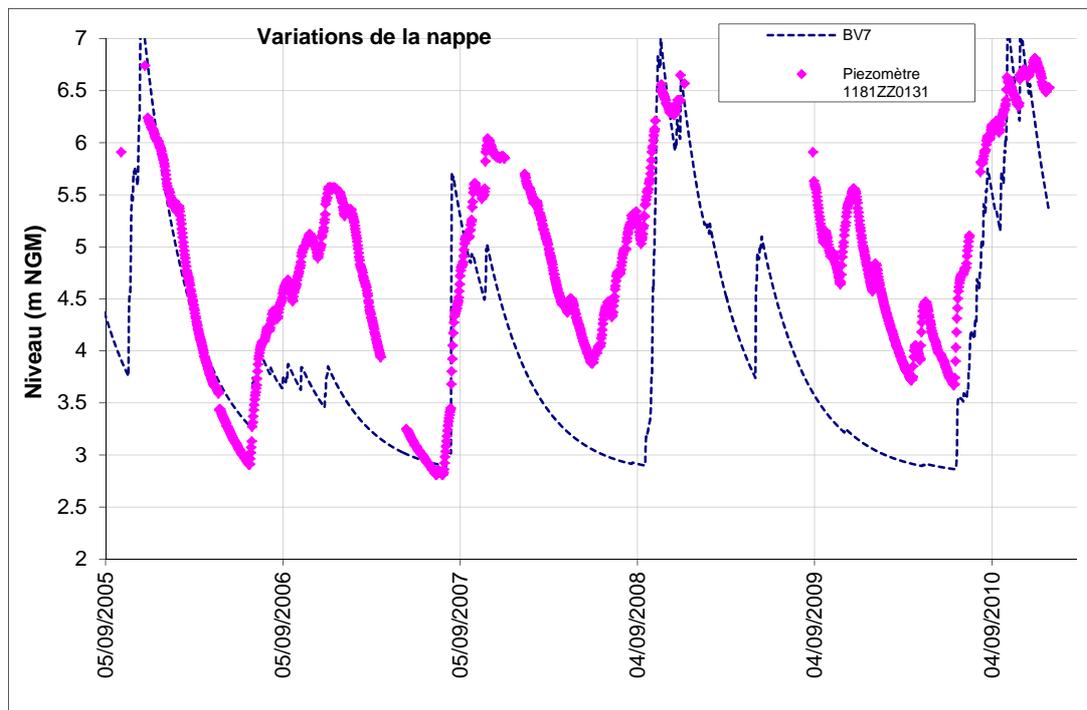
Annexe 1

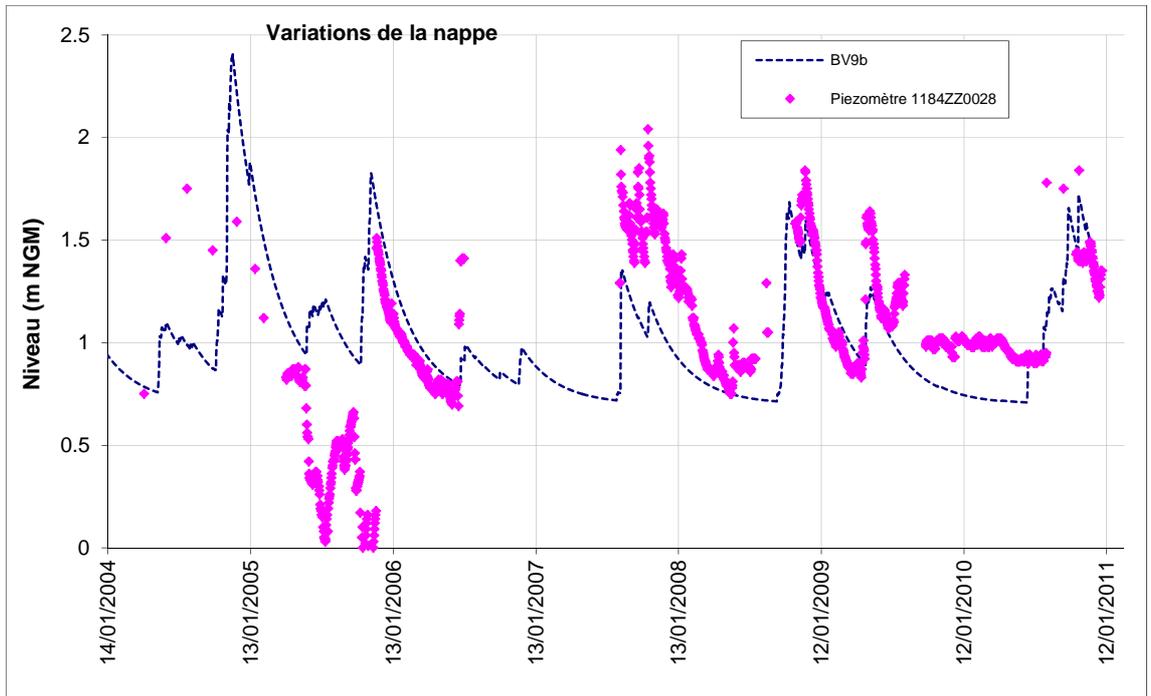
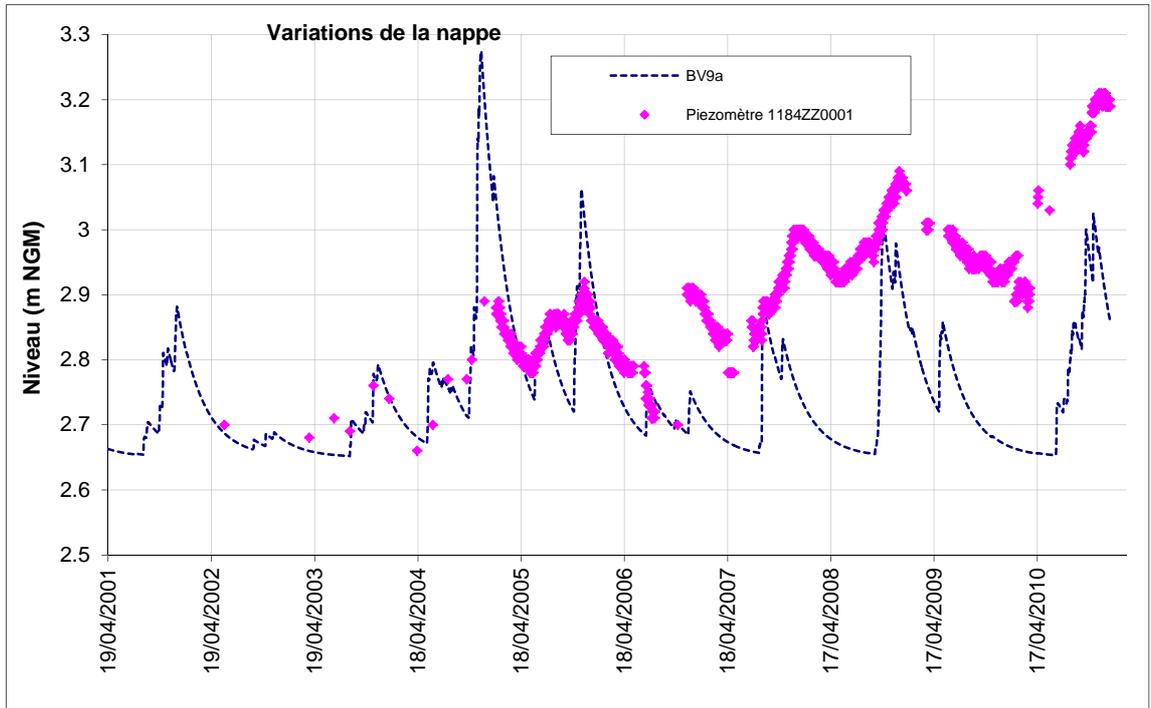
Chroniques piézométriques modélisées

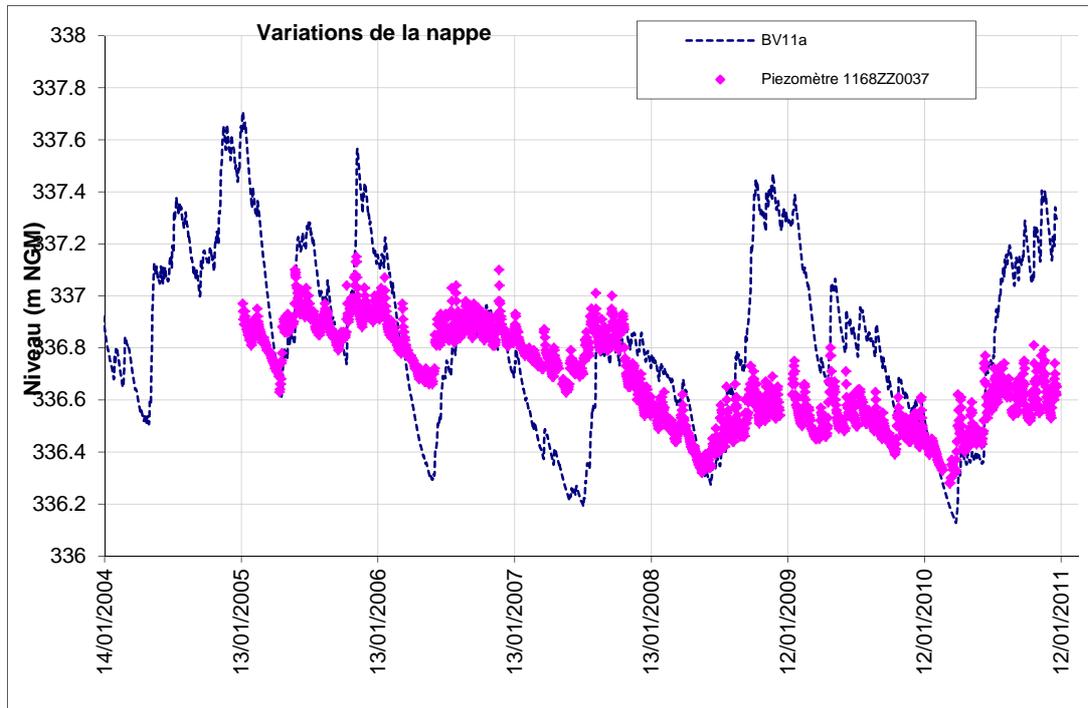
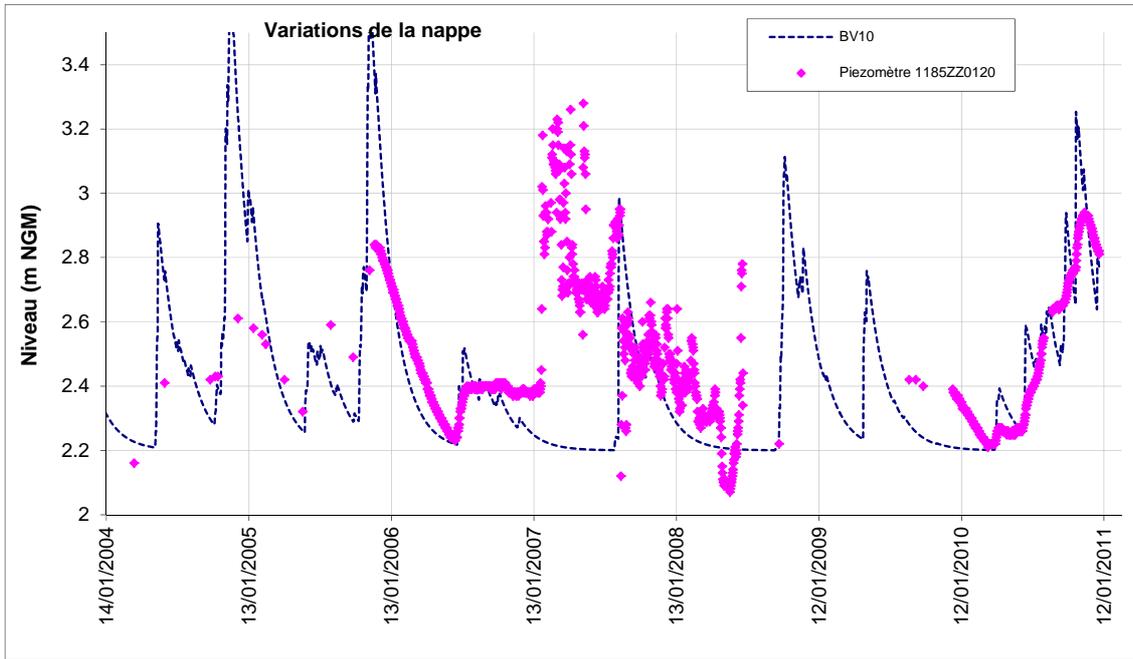


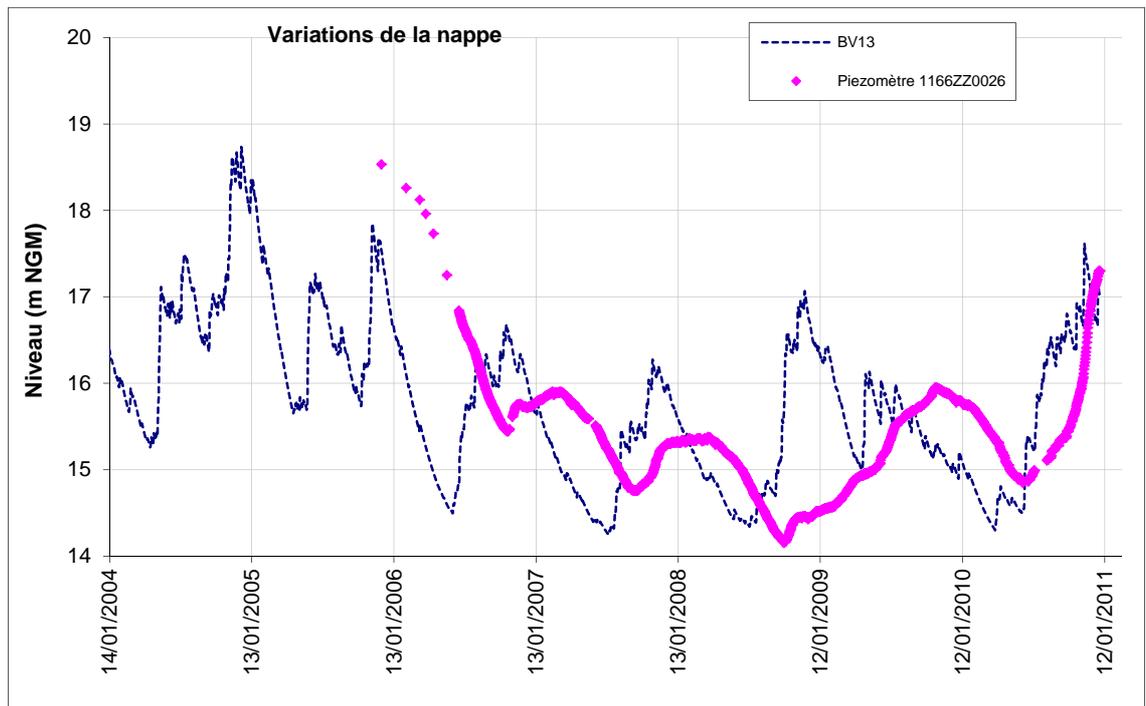
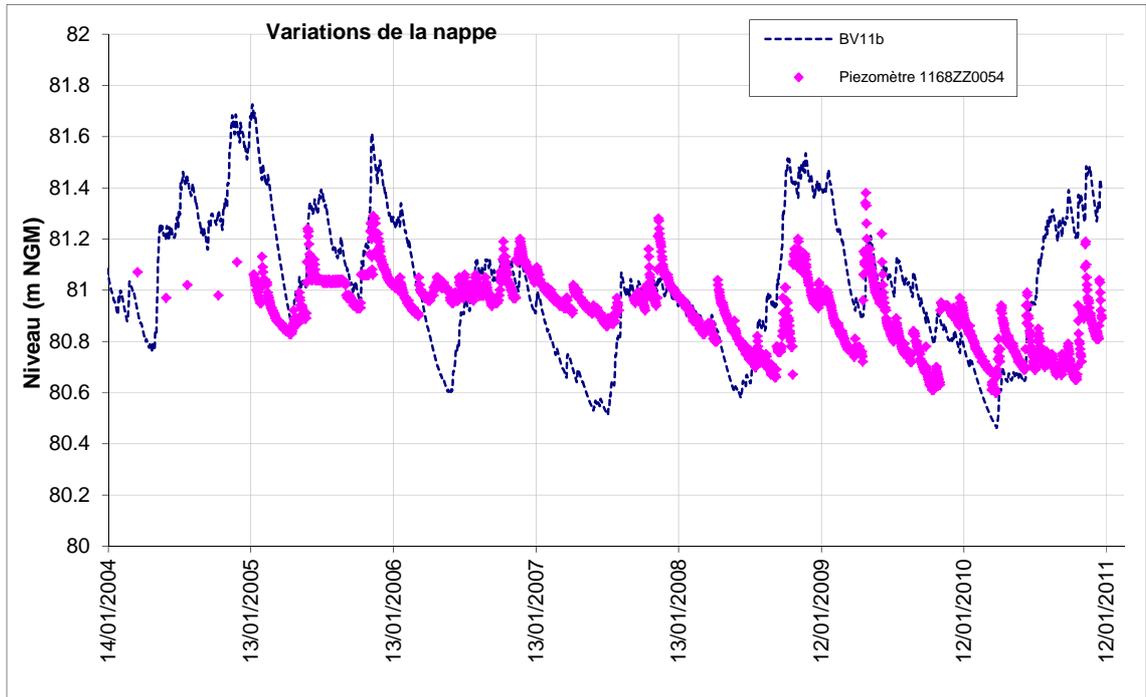


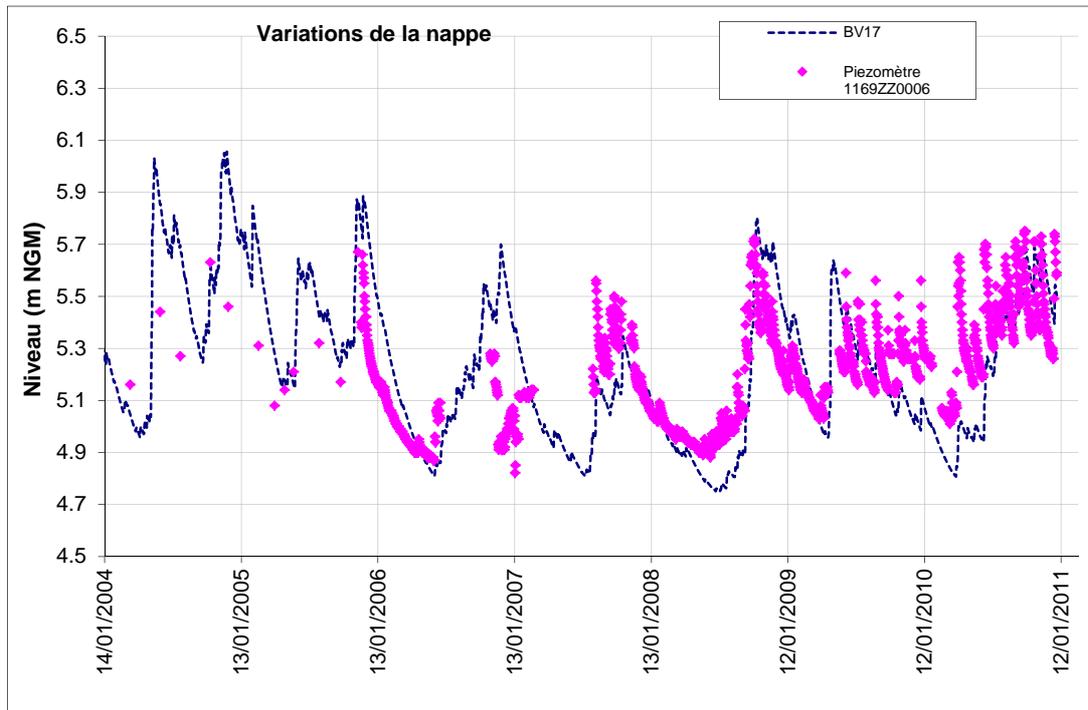
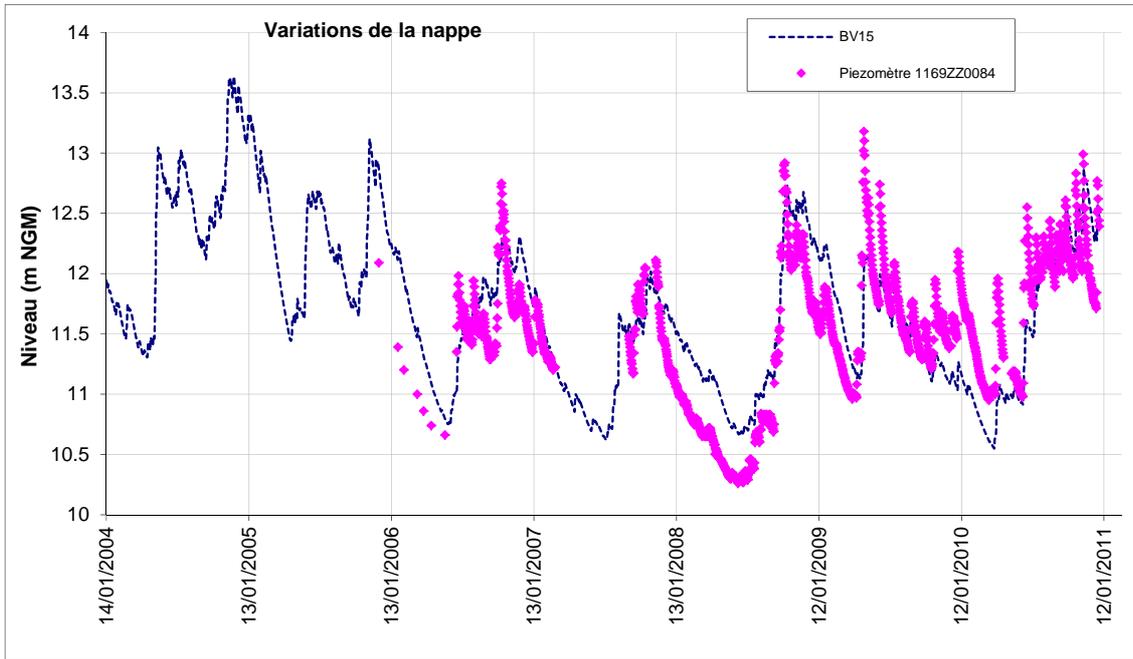


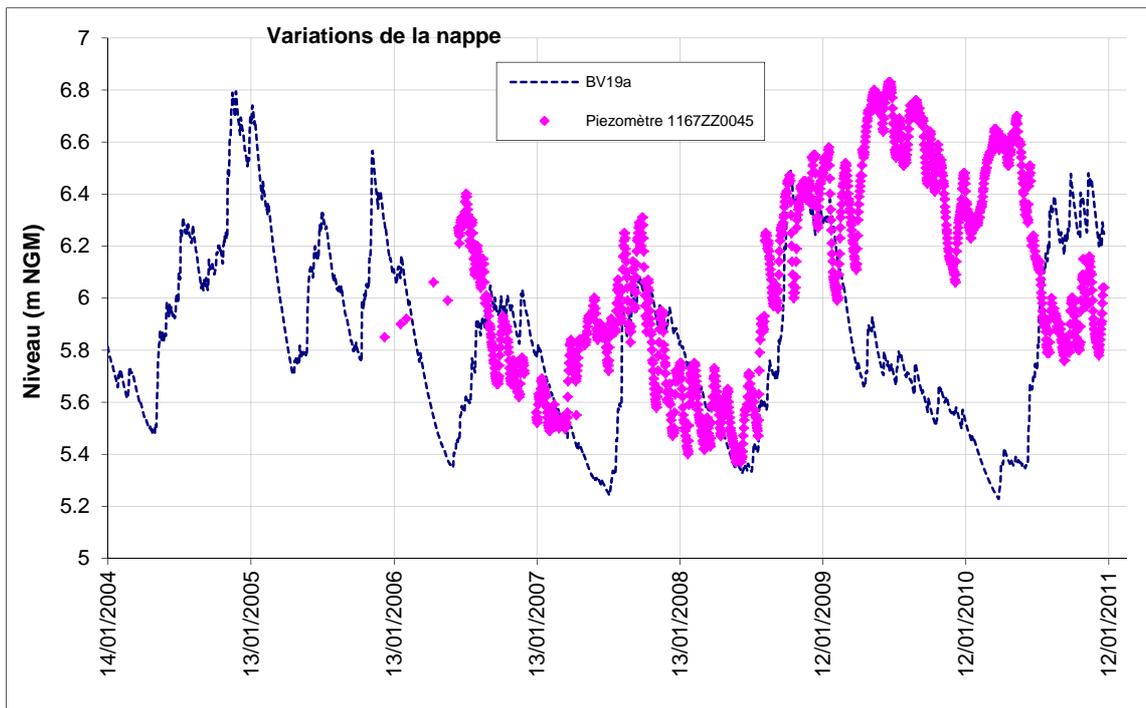
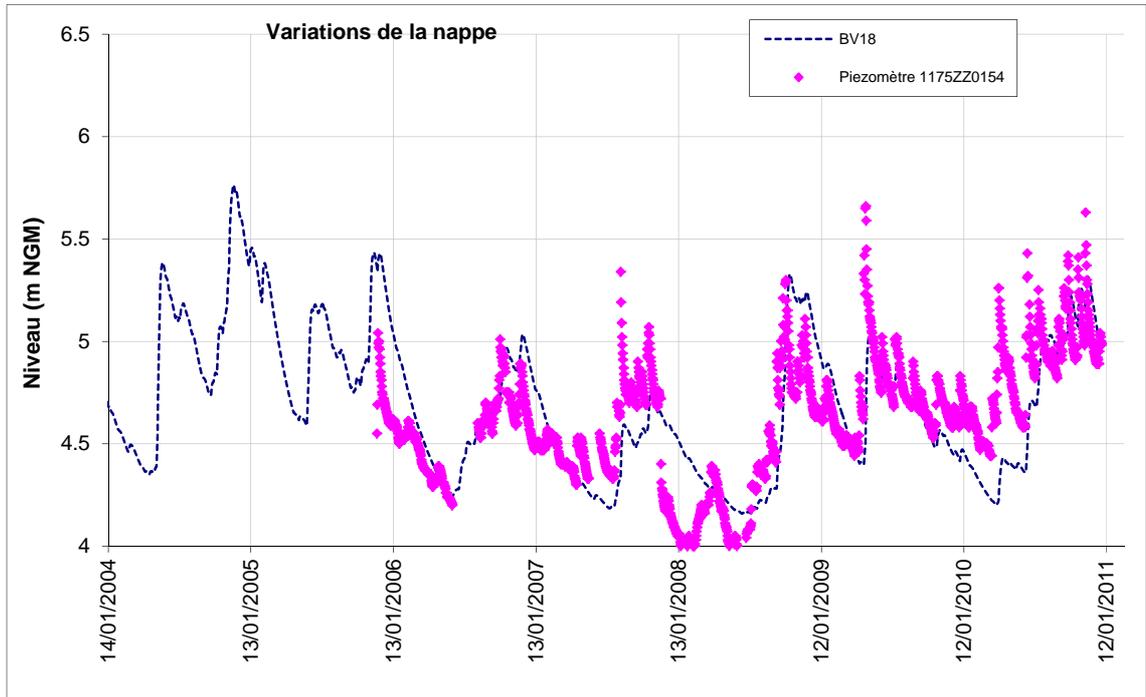


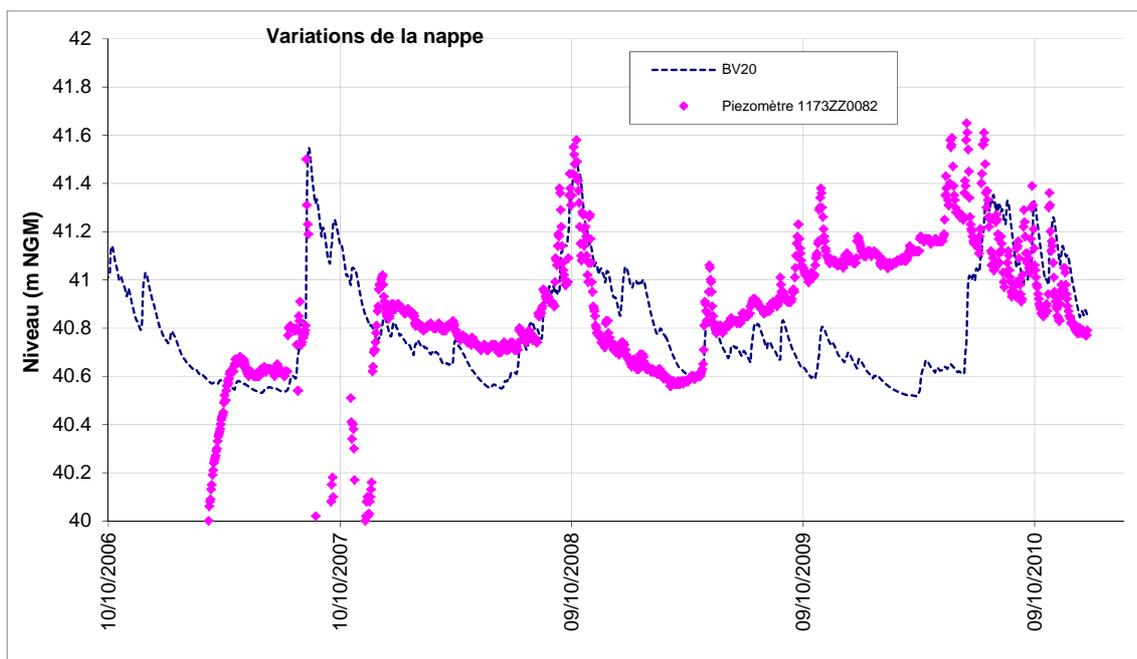
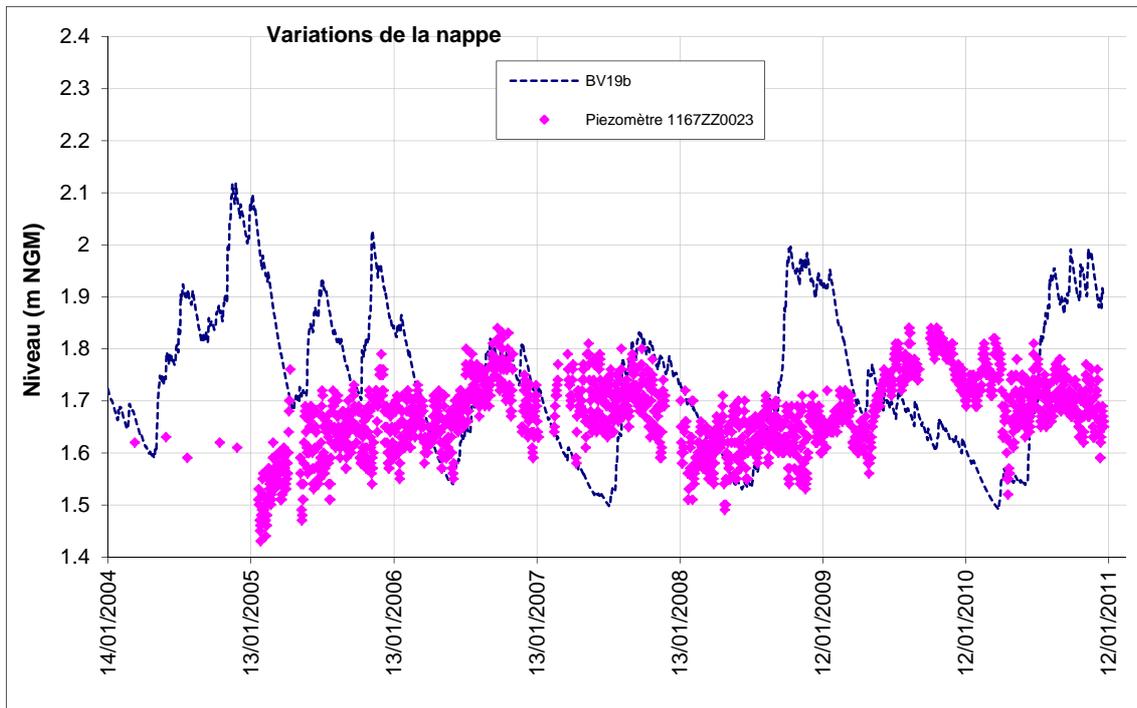


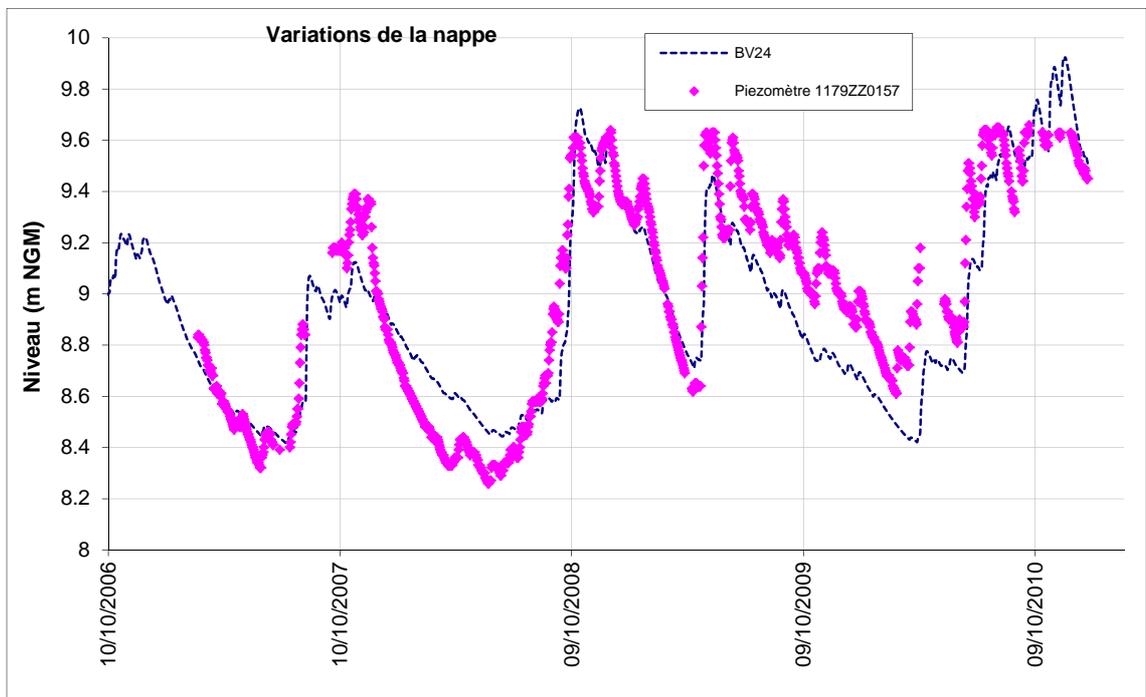
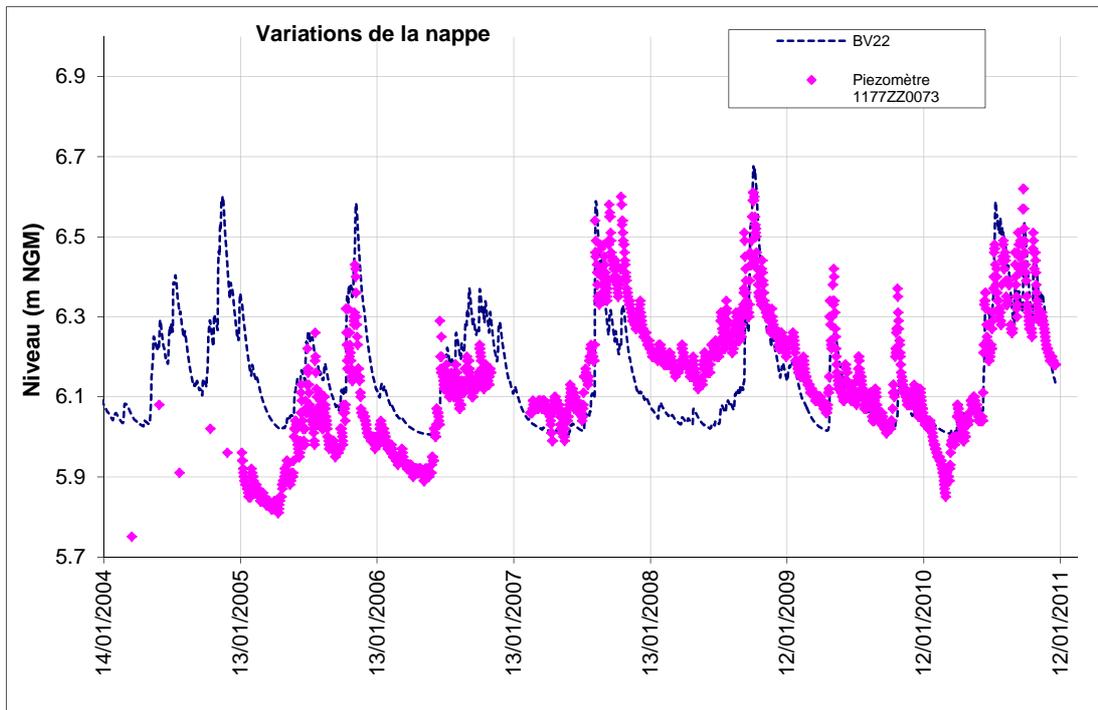






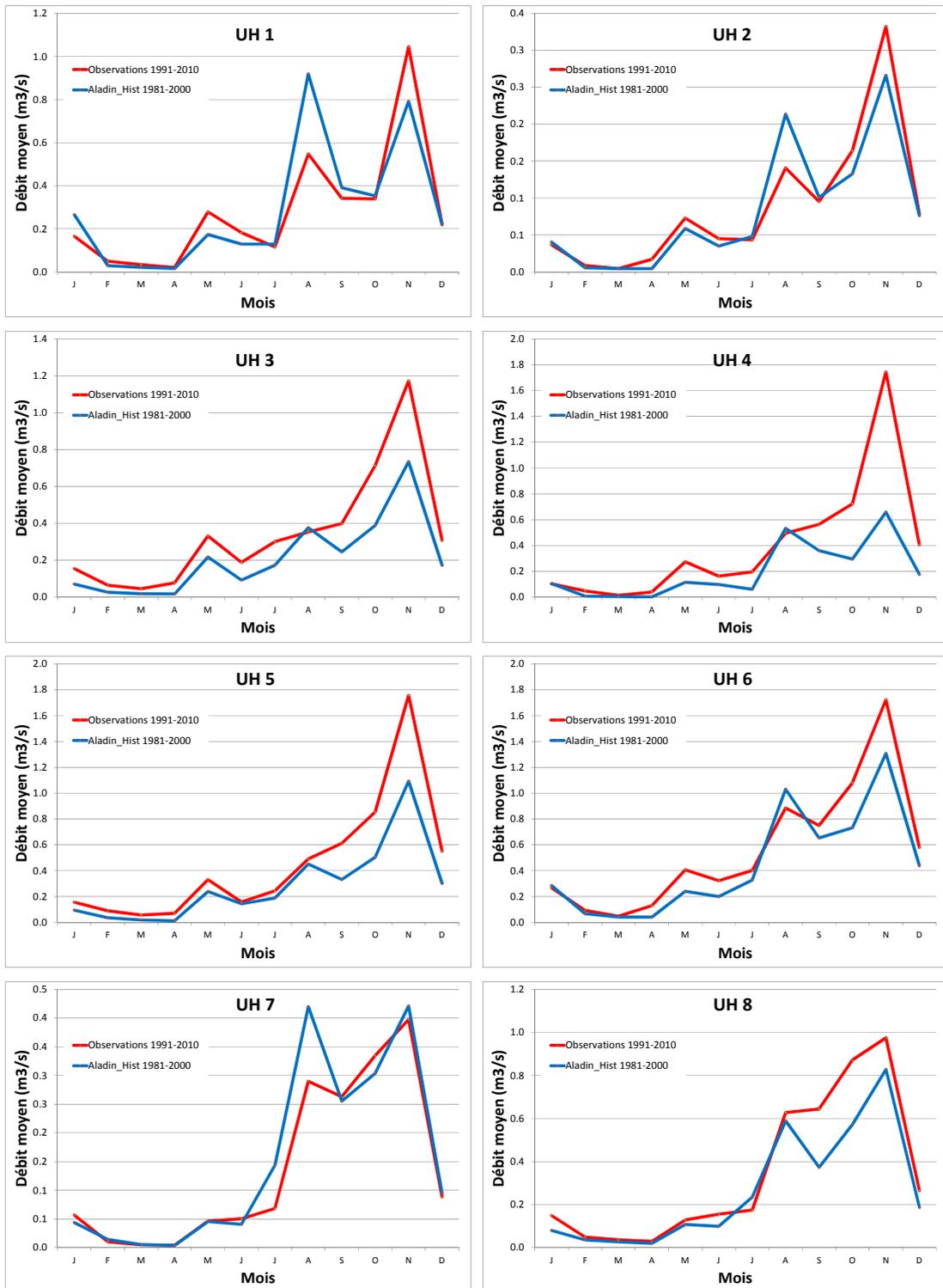


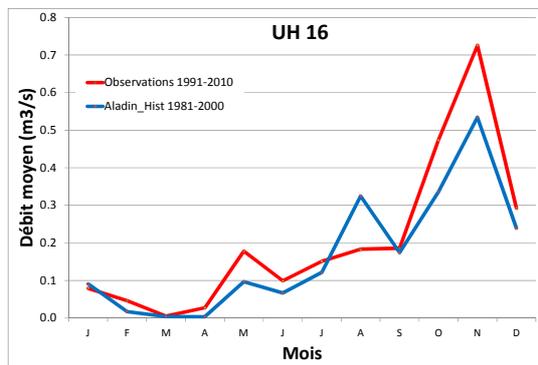
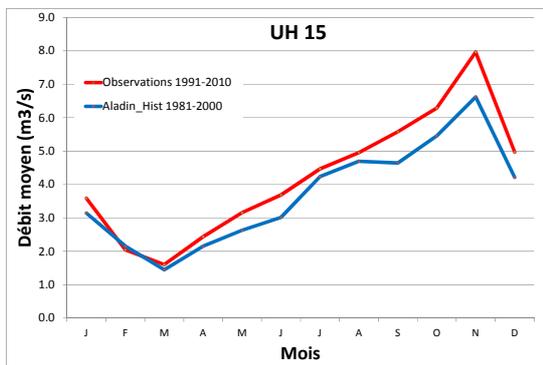
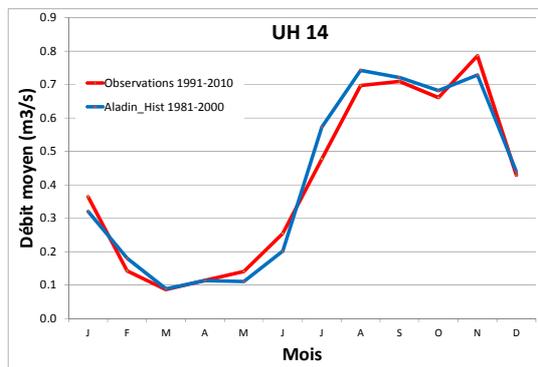
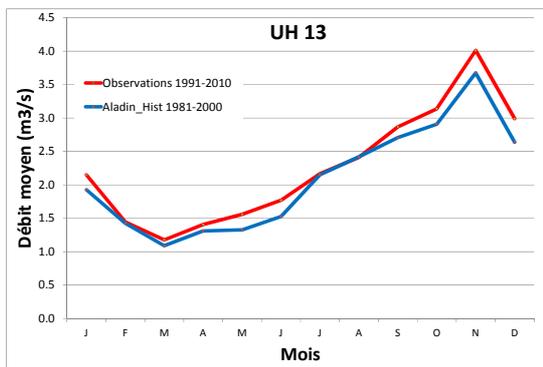
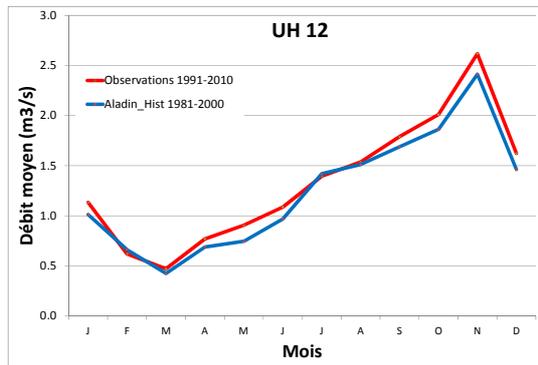
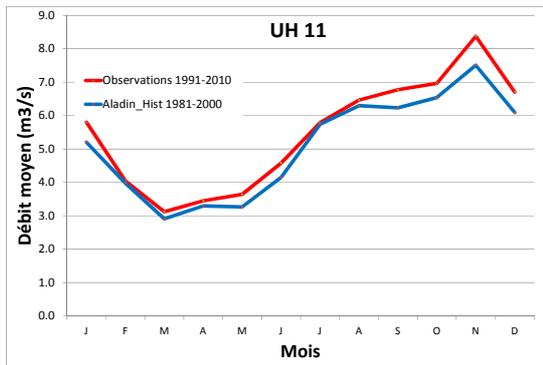
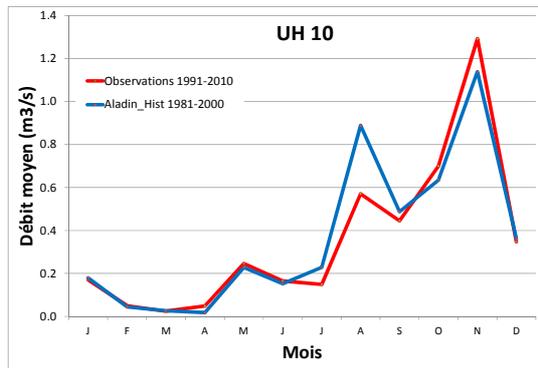
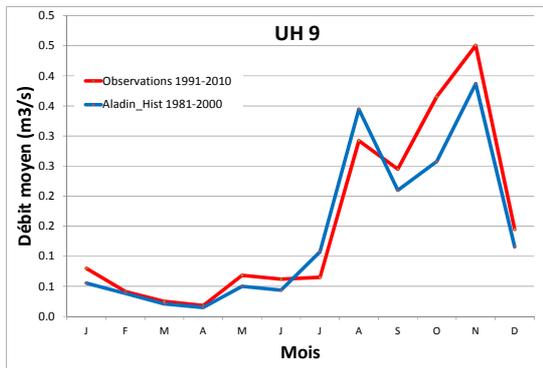


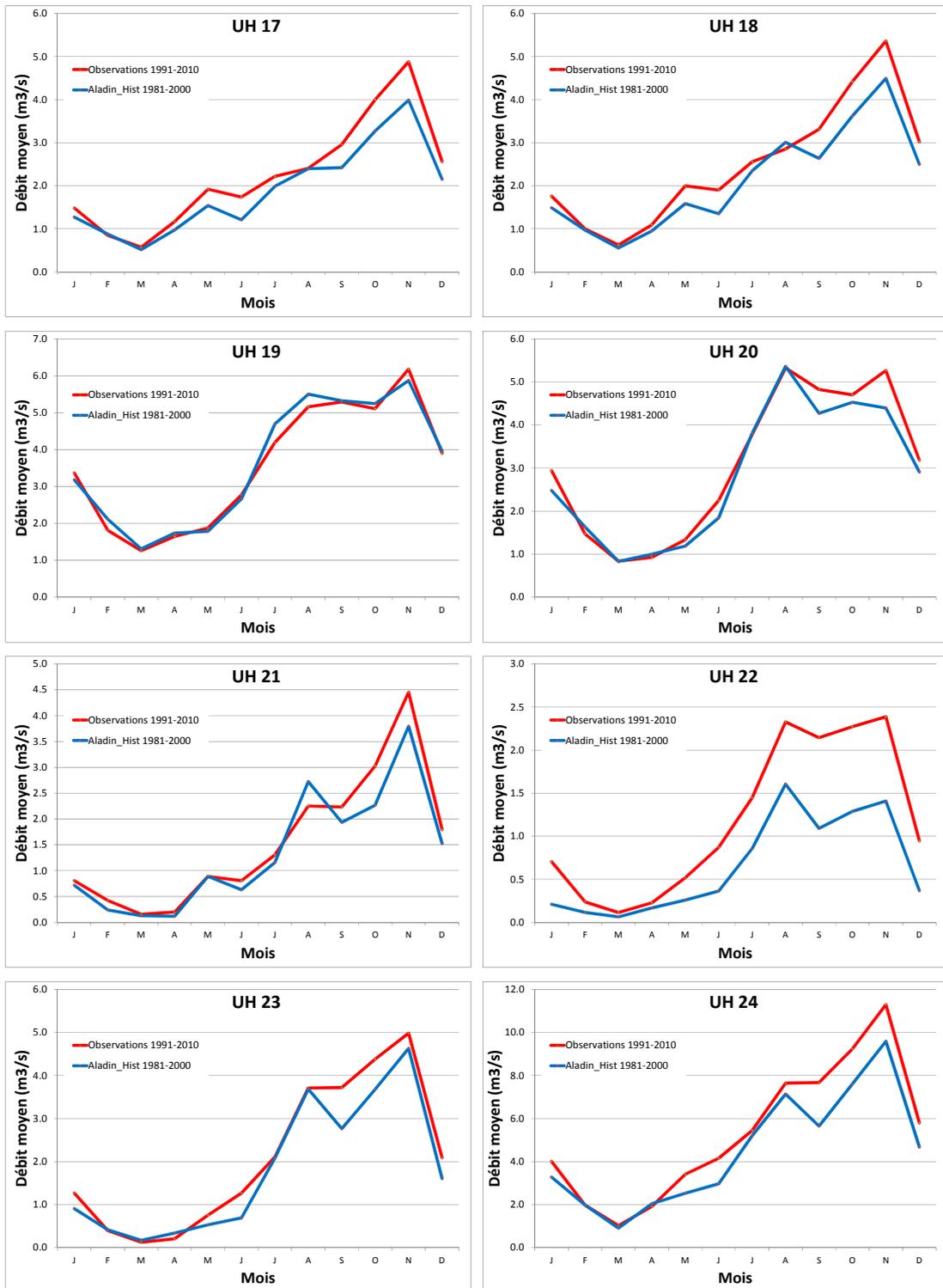


Annexe 2

Débits mensuels moyens issus des modélisations du climat observé (1991-2010) et du run historique ALADIN (1981-2000)

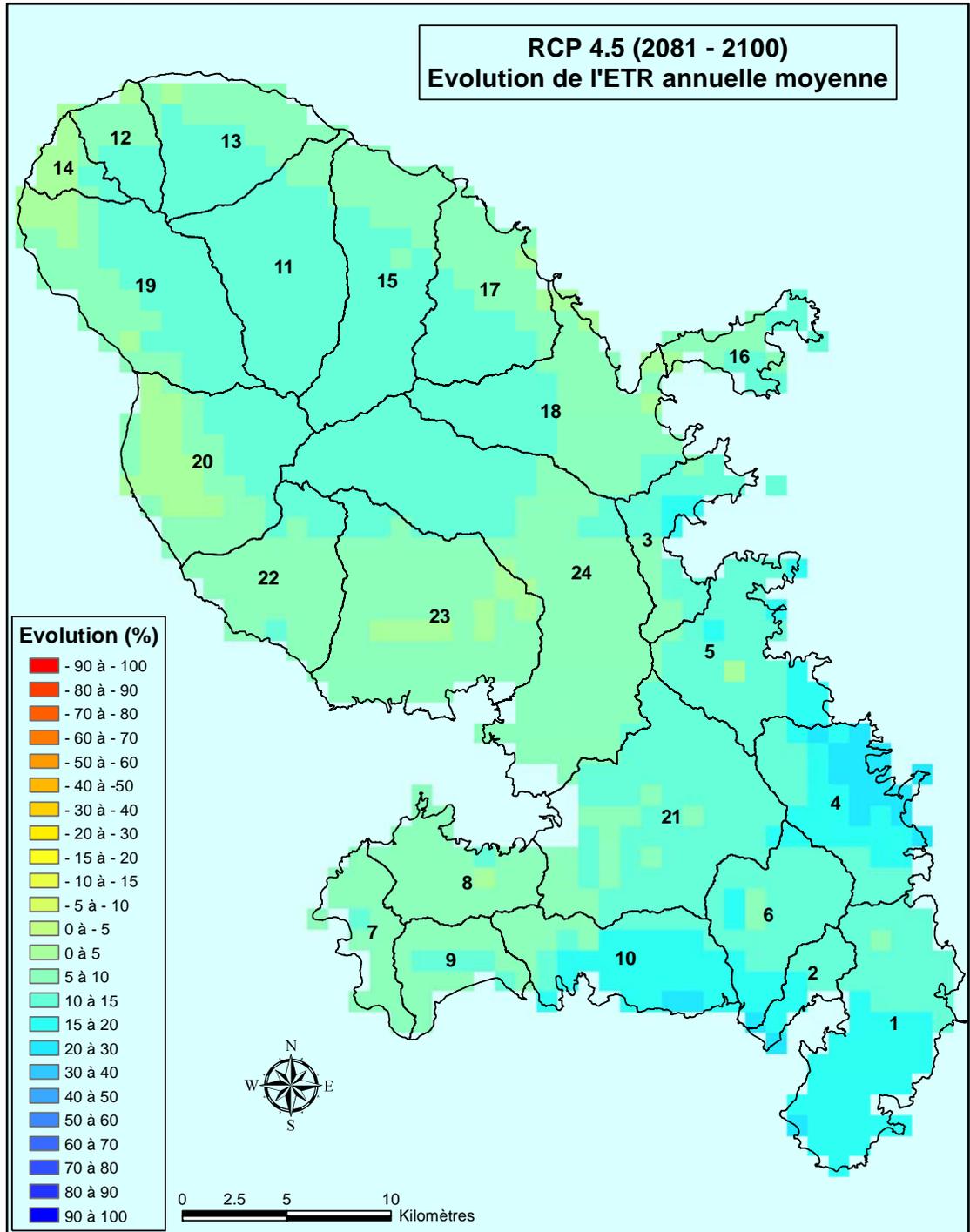


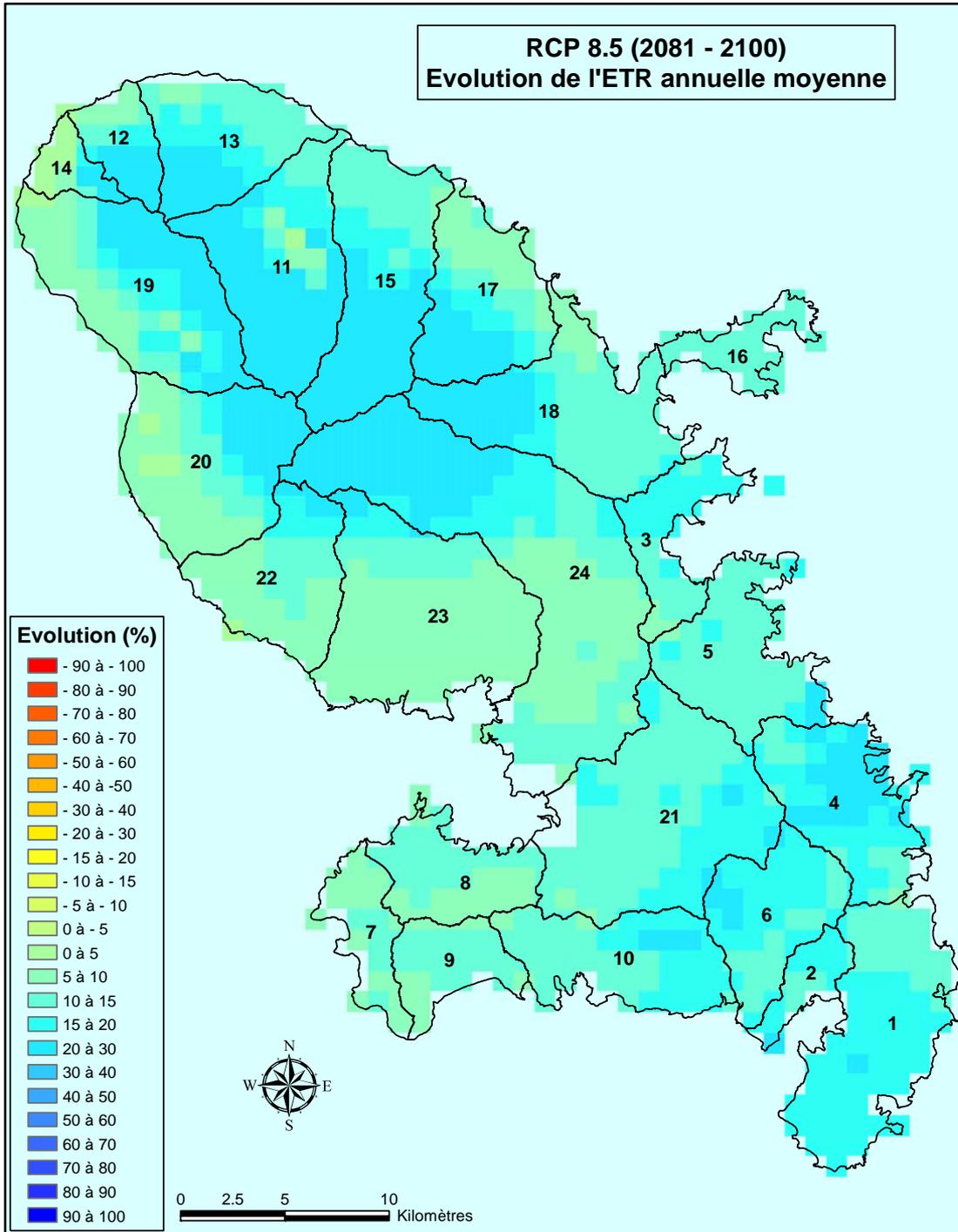




Annexe 3

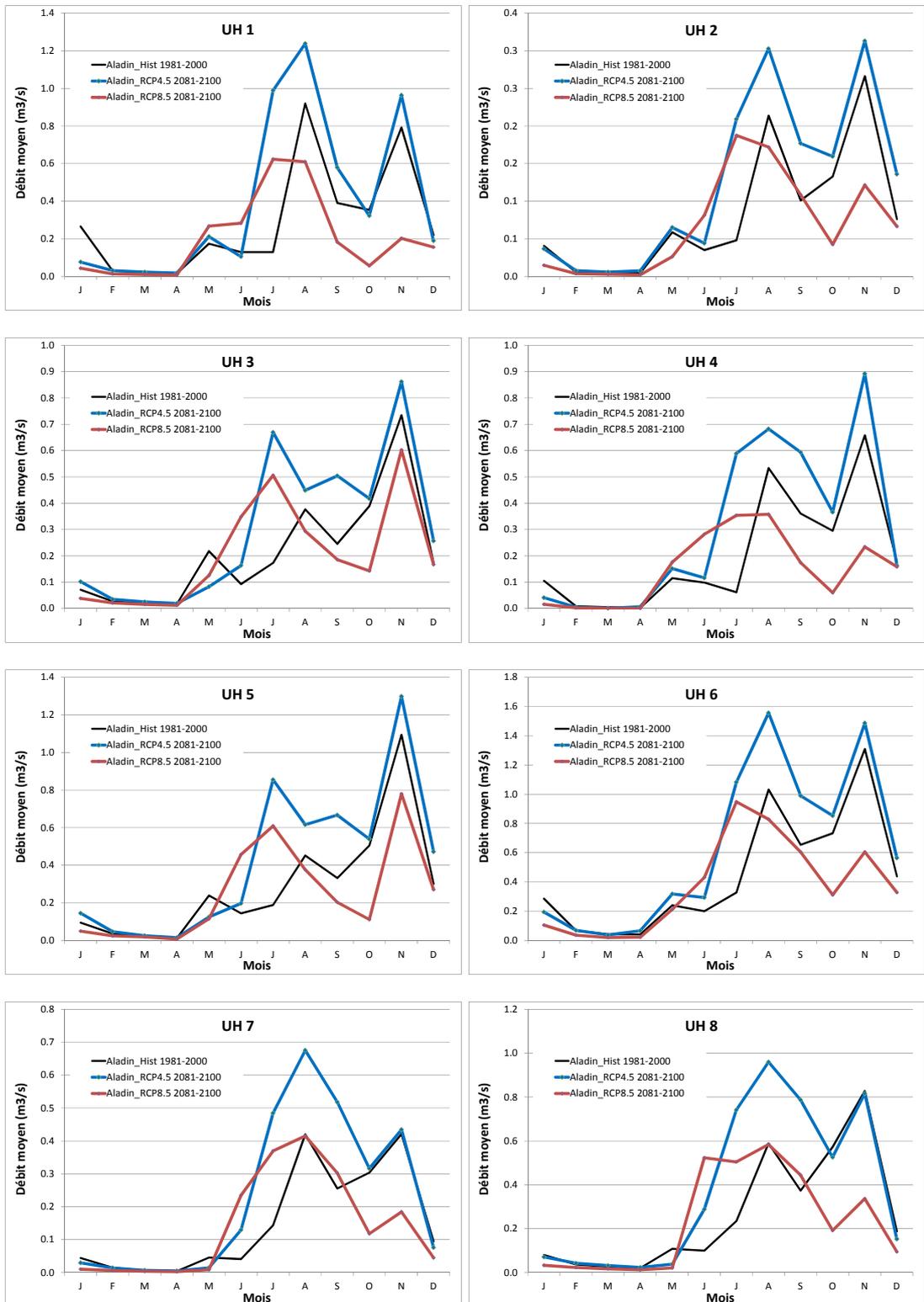
Évolution de l'ETR annuelle moyenne pour les scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5

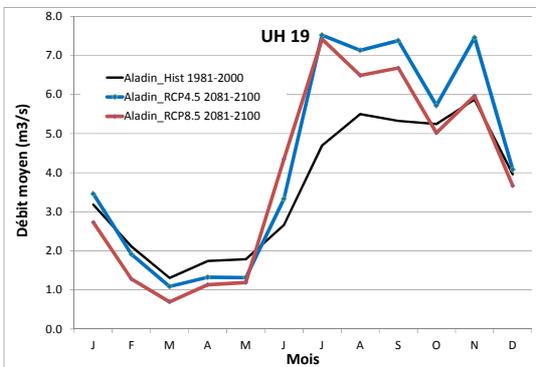
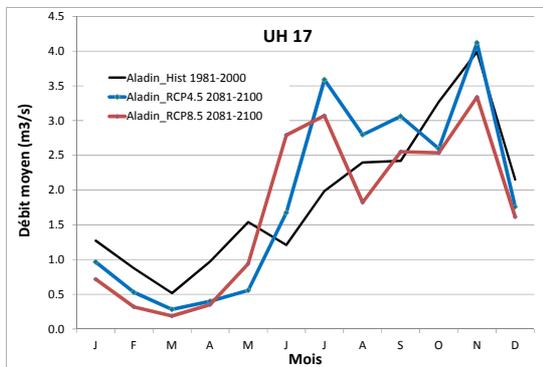
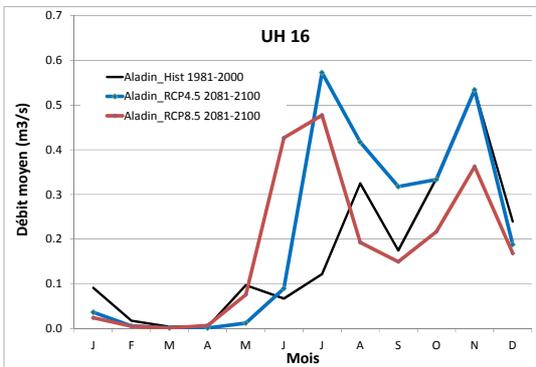
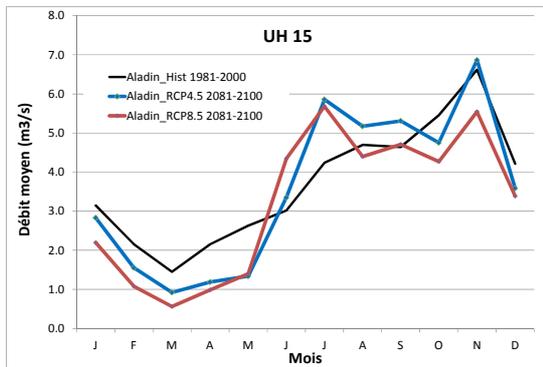
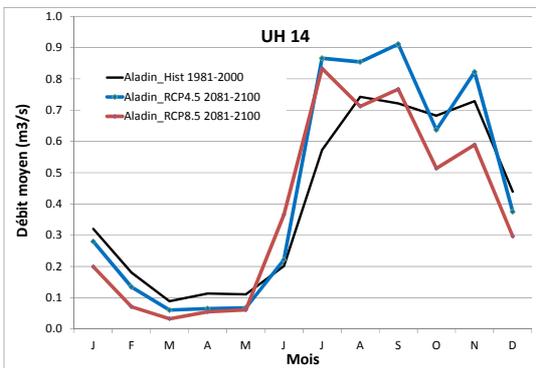
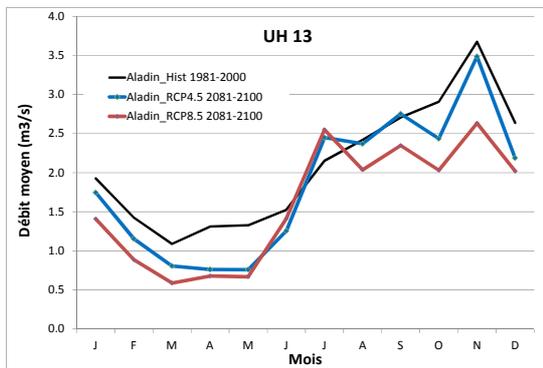
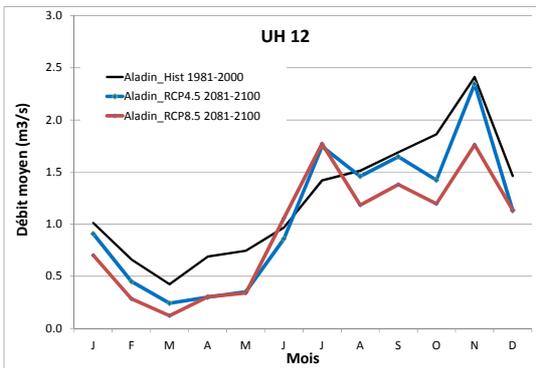
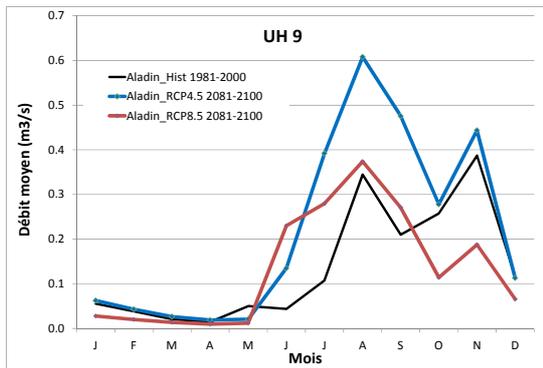


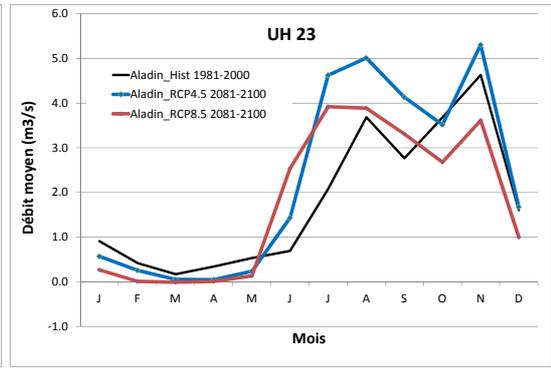
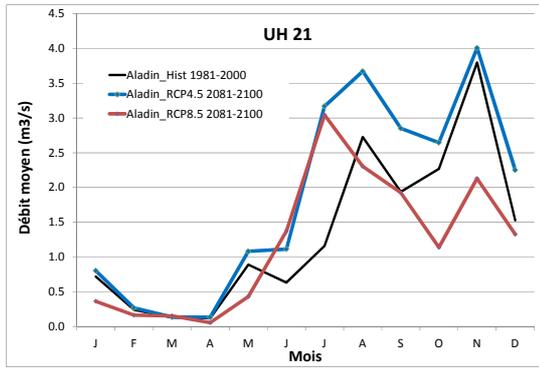


Annexe 4

Débits mensuels moyens issus des modélisations du run historique ALADIN (1981-2000) et des runs RCP 4.5 et RCP 8.5 (2081-2100)

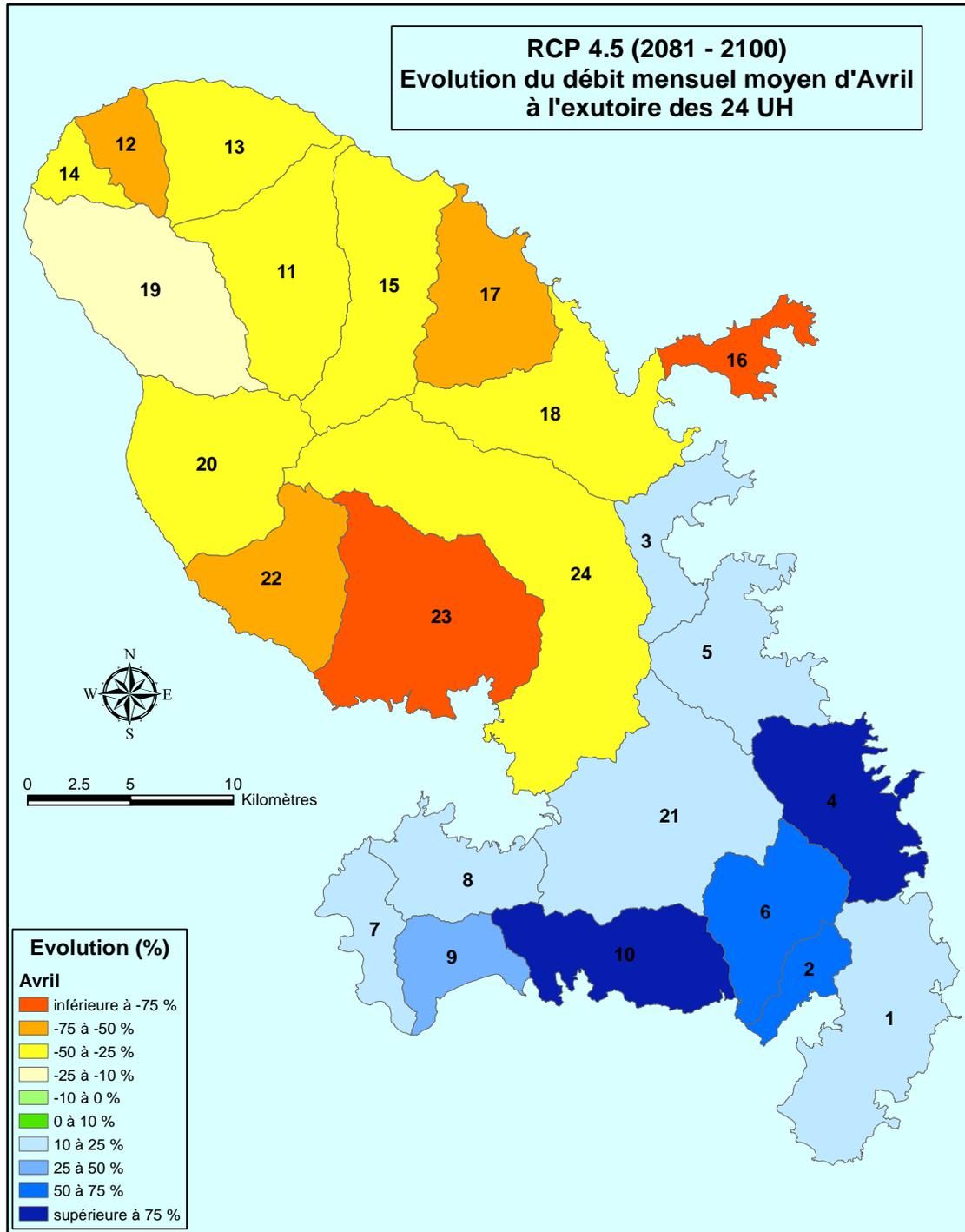


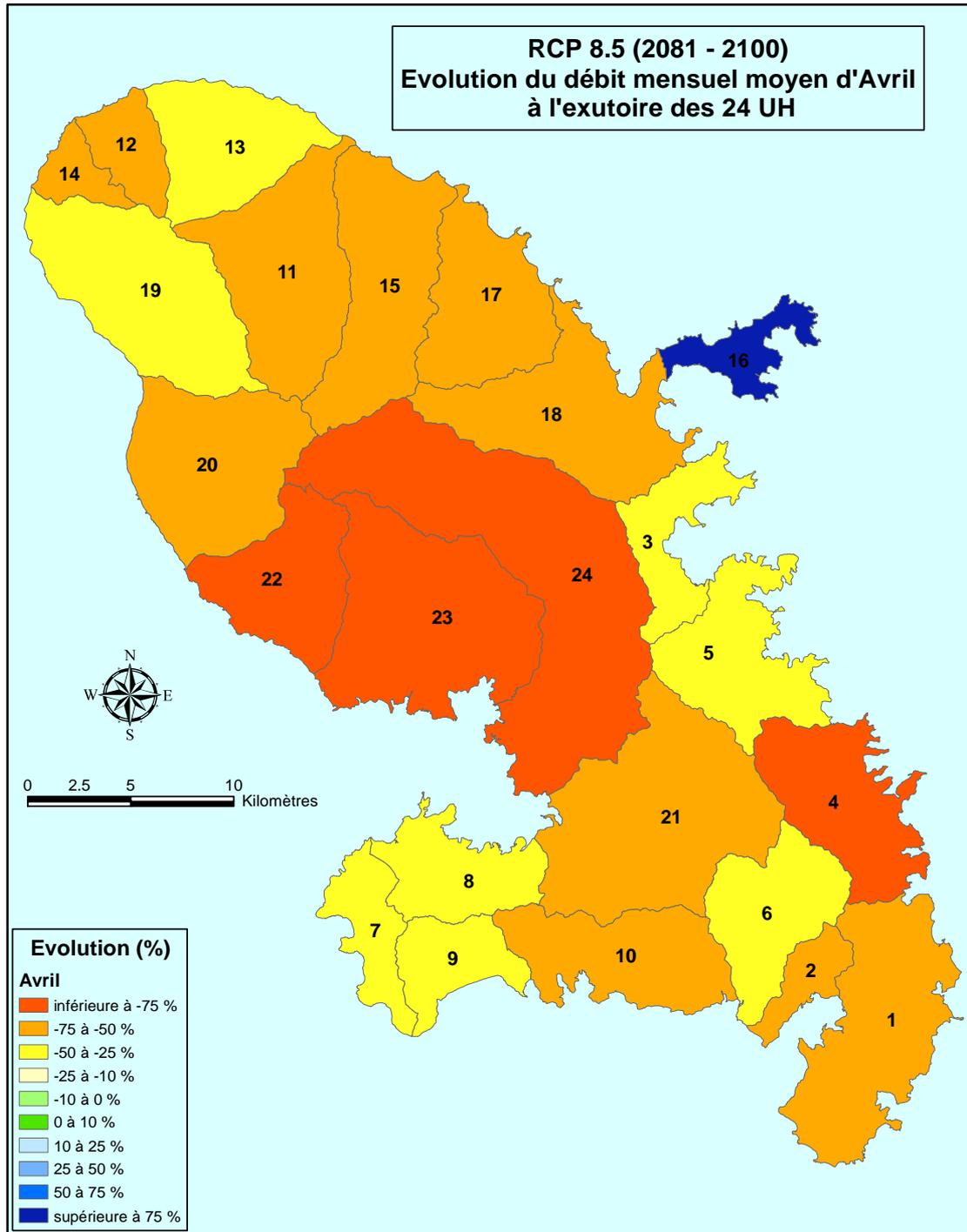




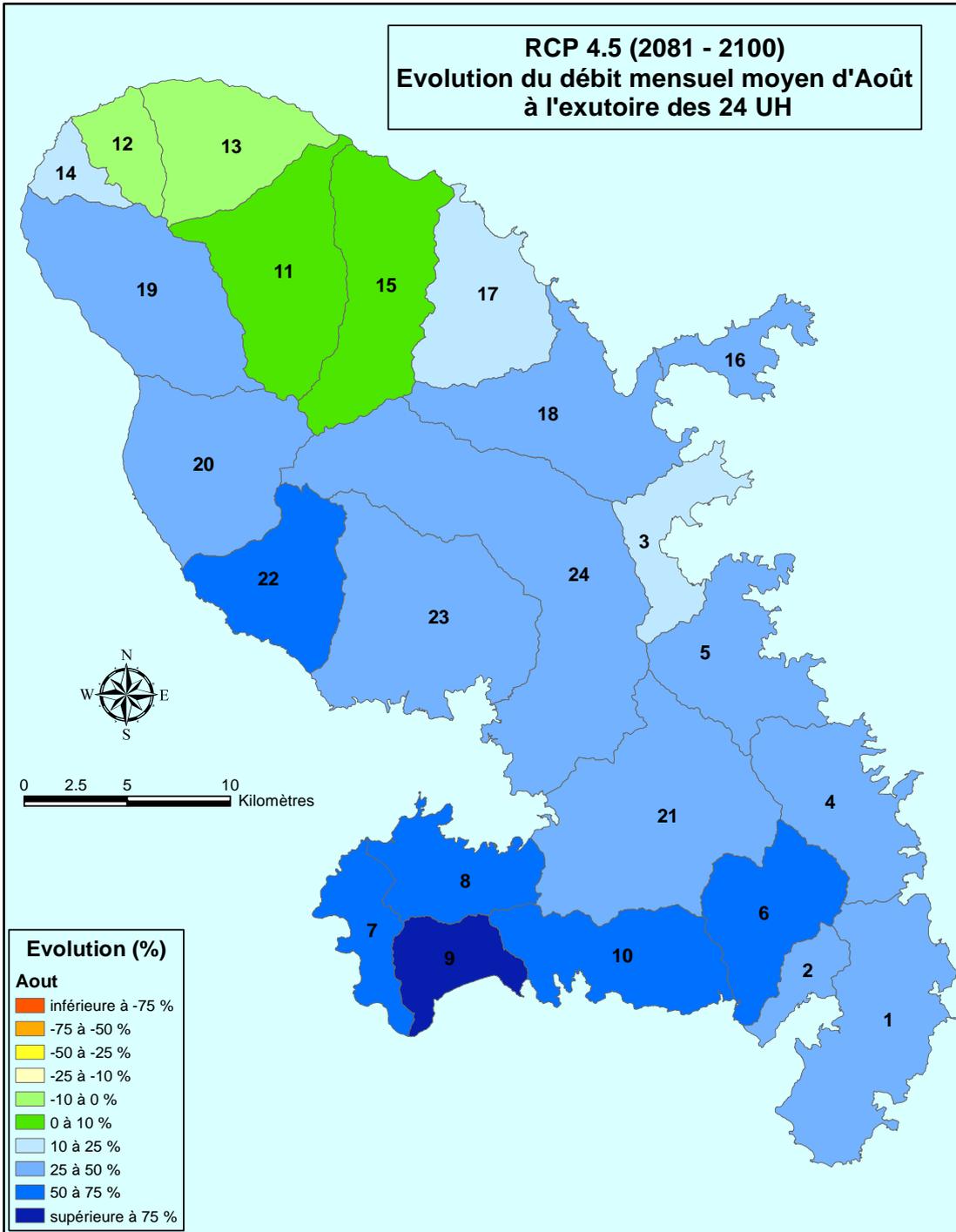
Annexe 5

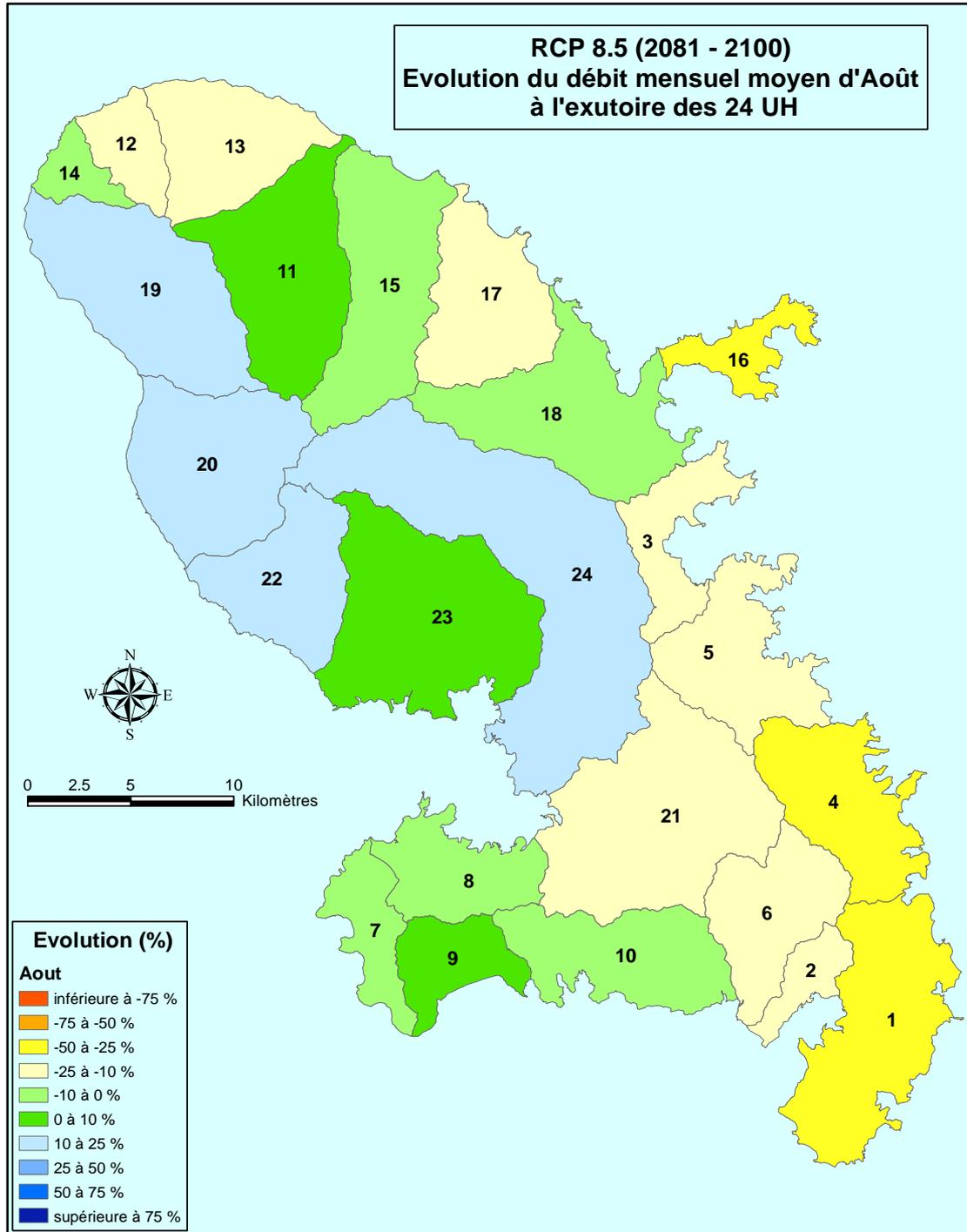
Évolution des débits moyens à l'exutoire des 24 unités hydrogéologiques pour les mois d'avril, d'août et novembre



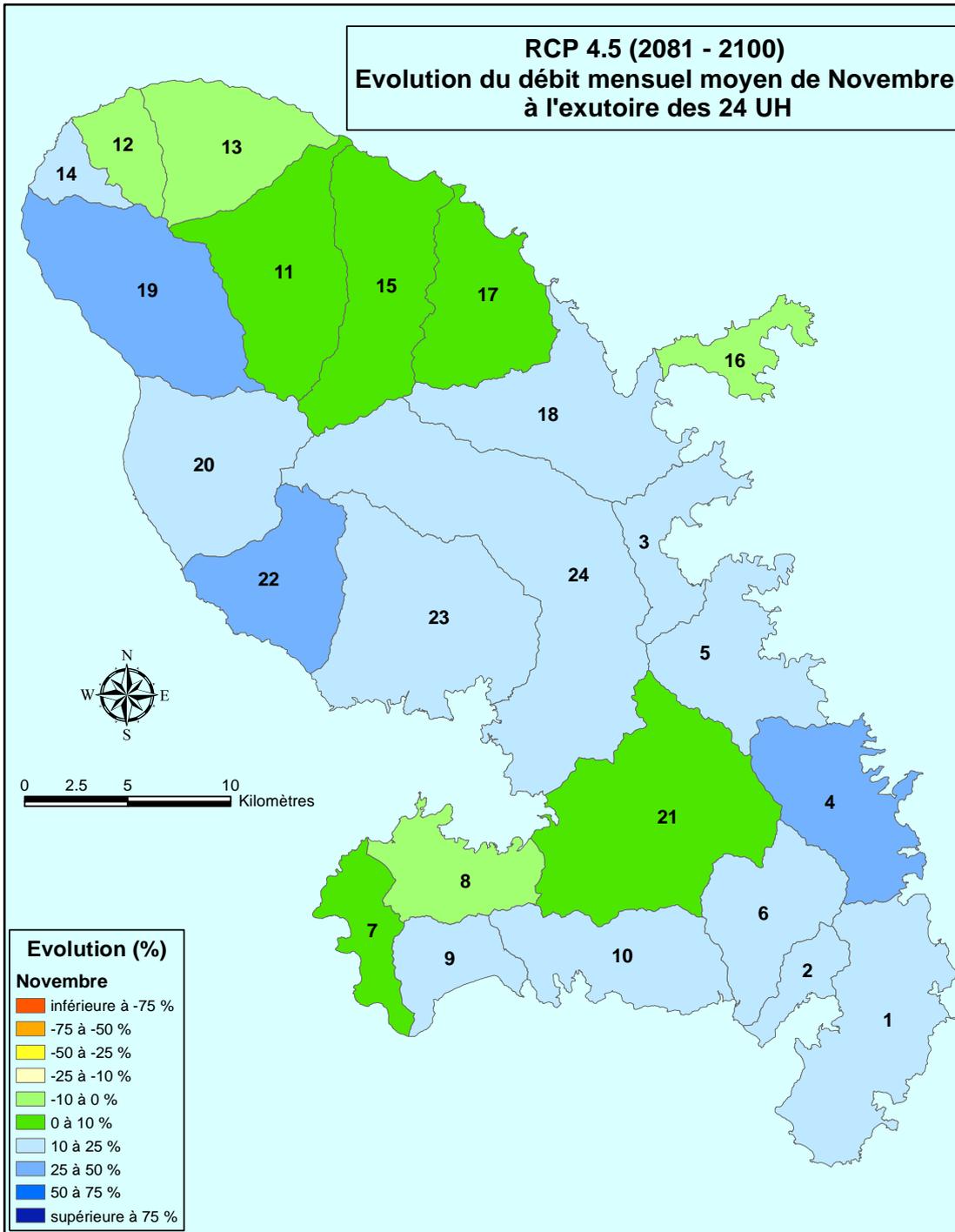


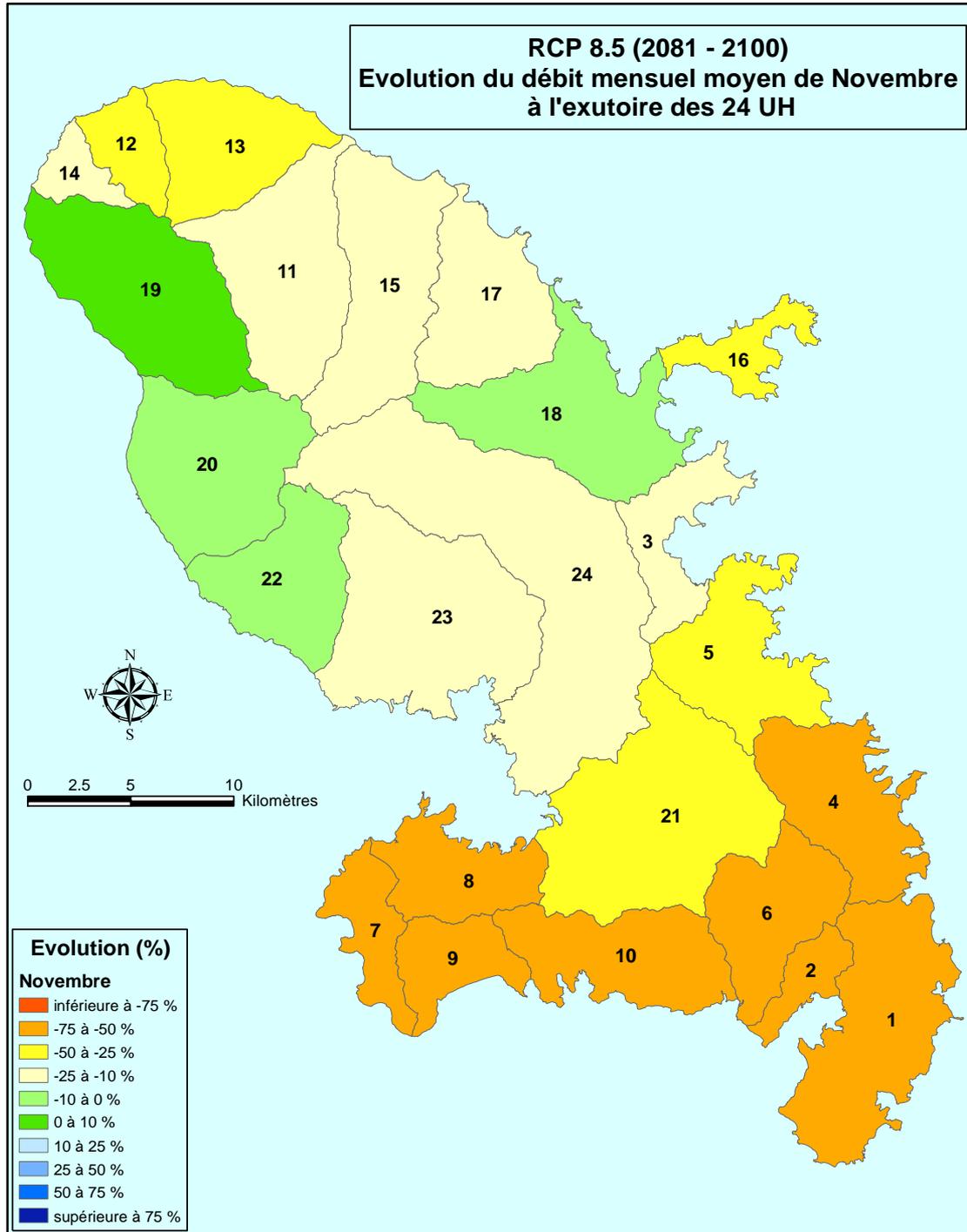
RCP 4.5 (2081 - 2100)
Evolution du débit mensuel moyen d'Août
à l'exutoire des 24 UH





RCP 4.5 (2081 - 2100)
Evolution du débit mensuel moyen de Novembre
à l'exutoire des 24 UH







Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Direction Régionale Martinique
4 Lot. Miramar
Route de la Pointe des Nègres
97 200 – Fort-de-France - Martinique
Tél. : 05 96 71 17 70