



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DE L'ÉNERGIE



Hydrologie de surface

A1 –Rapport de synthèse

Octobre 2012



Présent
pour
l'avenir



Le rapport final du lot Hydrologie de Surface du projet Explore 2070 comporte les documents suivants.

A - Synthèse des travaux

A0 Note de synthèse de 4 pages

A1 Rapport de synthèse

A2 Graphiques et Cartes de présentation des résultats

B - Rapports thématiques détaillés

B1 Rapport détaillé Climatologie Métropole

B2a Rapport détaillé Hydrologie Métropole

B2b Rapport détaillé Hydrologie Métropole - Zooms

B3 Rapport détaillé DOM

B4 Rapport Thermie

B5 Synthèse Bibliographique

Le présent document constitue le rapport surligné en gris.

Il présente la démarche générale adoptée par le lot Hydrologie de Surface, et l'ensemble des résultats en termes d'évolutions hydrologiques possibles à l'horizon 2050-2070, ainsi que les incertitudes associées.

“Demain ne sera pas comme hier. Il sera nouveau et dépendra de nous. Il est moins à découvrir qu’à inventer.”

Gaston Berger

“... il s’agit de faire de vous des hommes prêts à affronter ce qui n’a jamais été.”

Paul Valéry.

A1 - RAPPORT DE SYNTHÈSE

1. DEMARCHE GENERALE ET METHODOLOGIE	1
1.1 Objectifs	1
1.2 Démarche generale	1
1.3 Méthodologie adoptée	3
1.3.1 Choix de la période de référence	3
1.3.2 Choix d'un scénario de gaz à effet de serre	4
1.3.3 La modélisation climatique	5
1.3.4 La descente d'échelle	6
1.3.5 La modélisation hydrologique	7
1.3.6 L'analyse des résultats et l'évaluation des incertitudes	12
1.3.7 Spécificité des départements d'Outre-mer (DOM)	15
1.4 Schéma de synthèse sur la démarche adoptée	17
2. RESULTATS	18
2.1 Principaux indicateurs utilisés	18
2.2 La moyenne ne traduit pas tous les futurs possibles	19
2.3 Les principaux résultats en quelques mots	20
2.4 Présentation plus détaillée des résultats - Métropole	21
2.4.1 Quel climat possible à l'horizon 2046-2065 ?	21
2.4.2 Ressource en eau : pratiquement partout, les écoulements vont se réduire et les étiages seront plus sévères	31
2.4.3 Les évolutions possibles des crues sont contrastées à l'échelle nationale	43
2.4.4 Analyse des tendances par district hydrographique et retour sur les études existantes	46
2.5 Présentation plus détaillée des résultats – DOM	64
2.5.1 Ile de la Réunion	64
2.5.2 Guyane66	
2.5.3 Martinique et Guadeloupe	68
2.5.4 Conclusion sur les DOM	70
2.6 Discussion sur les incertitudes	71
2.6.1 Les sources d'incertitudes	71
2.6.2 Quelles incertitudes sont liées au choix du scénario GES ?	73
2.6.3 Quelles incertitudes sont liées au choix des modèles de circulation générale ?	74
2.6.4 Quelles incertitudes sont liées au choix de la méthode de descente d'échelle ?	77
2.6.5 Quelles incertitudes sont liées au calcul de l'évapotranspiration potentielle ?	78
2.6.6 Quelles incertitudes sont liées aux choix et paramétrages des modèles hydrologiques ?	79
2.6.7 Quelles incertitudes sont liées à l'utilisation de débits influencés ?	84
2.6.8 Peut-on identifier des sources d'incertitudes prépondérantes ?	90

3. CONCLUSIONS	92
4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET SOURCES.....	93
ANNEXES	95
Annexe 1 Compléments d'analyse des évolutions hydrologiques possibles : Particularité régionales	97
Annexe 2 L'évolution des débits moyens est-elle majoritairement due à l'évolution des précipitations ou à l'évolution des températures ?	103
Annexe 3 Comparaison des erreurs relatives en temps présent et des tendances futures. Complément sur les incertitude et la significativité des résultats.	107
Annexe 4 Comparaison des résultats Lot Hydrologie de Surface – Lot Hydrologie souterraine	117
Annexe 5 Quel est l'impact de la naturalisation des débits sur les performances du modèle Isba-Modcou ?	123
Annexe 6 Comparabilité des résultats d'Explore 2070 avec ceux d'études antérieures	127
Annexe 7 Comparaison des résultats Explore 2070 – RExHySS	131
Annexe 8 Compléments sur les incertitudes liées à l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	139

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES

Figure 1 : Représentation schématique d'un bassin versant.....	1
Figure 2 : Principe de la démarche du lot hydrologie de surface pour la simulation des écoulements.....	2
Figure 3 : Vue globale de la démarche adoptée par le lot Hydrologie de Surface	3
Figure 4 : Scénarios d'émission de gaz à effet de serre proposés dans le 4 ^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (IPCC AR4).....	4
Figure 5 : Evolutions des concentrations de CO2 pour les différents scenarii utilisés par le GIEC (source : http://www.ipcc-data.org)	5
Figure 6 : Exemple de données de précipitations (mm/jour) couvrant la France. La figure (a) montre les données à la résolution typique d'un modèle global du climat, tandis que la figure (b) montre les données désagrégées statistiquement à une résolution de 8 km. (Source : Pagé et al., 2008).....	6
Figure 7 : Maillage de 8km*8km (grille Isba) pour lequel on dispose de simulations climatiques	7
Figure 8 : Exemple de superposition grille ISBA / bassin : bassin de 1300 km ² (la Têt à Perpignan)	7
Figure 9 : Structure schématique du modèle GR4J	8
Figure 10 : Schéma de principe de SIM: l'eau est transférée vers la rivière, puis dans la rivière avec un pas de temps de 3h. L'eau peut également s'infiltrer vers la nappe qui interagit avec la rivière	9
Figure 11 : Localisation des 1522 points de calcul retenus pour Explore 2070 en Métropole	10
Figure 12 : Exemple de calcul de l'évolution possible d'un indicateur hydrologique	14
Figure 13 : Schéma de la démarche générale adoptée par le lot Hydrologie de Surface	17
Figure 14 : Evolution possible de l'ETP entre 1961–90 et 2046–65 (%) (543 points doubles)	22
Figure 15 : Evolutions possibles (°C) des températures annuelles et saisonnières en France entre 1961-90 et 2046-65, résultats issus des sept modèles de circulation générale utilisés pour Explore 2070.	25
Figure 16 : Evolutions possibles (en %) des cumuls de précipitations annuelles et saisonnières en France entre 1961-90 et 2046-65 : résultats issus des sept modèles de circulation générale utilisés pour Explore 2070	27
Figure 17 : Ecarts de valeur moyenne des températures (en °C) et précipitations (en %) quotidiennes Safran simulées pour la France métropolitaine entre simulations 2046-2065 et référence 1961-1990 pour l'année et les quatre saisons. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour l'ensemble des 7 simulations-scénario A1B.	29
Figure 18 : Evolutions relatives possibles du débit moyen annuel (en %) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats produits par les deux modèles hydrologiques alimentés par les sorties désagrégées des 7 modèles climatiques.....	32
Figure 19 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques x 7 MCG). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.....	33
Figure 20: Boîtes à moustache des évolutions relatives possibles du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65, établies sur les médianes des évolutions simulées sur les 543 bassins où l'on dispose de 14 simulations.....	34
Figure 21: Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 projections pour cinq grands bassins versants.....	34
Figure 22 : Evapotranspiration potentielle (mm/an) et Cumul de précipitations annuel (mm/an) simulés en temps présent et futurs par les modèles climatiques MGC1, MGC2 et MGC3.....	35
Figure 23 : Coefficients d'écoulement (Q/P) en fonction de l'inverse de l'indice d'aridité (P/ETP) simulés en temps présent et futur par le modèle climatique MGC1 et les deux modèles hydrologiques.....	36
Figure 24 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans (QMNA5) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations.	36

Figure 25 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans (QMNA5) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques x 7 MCG). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.....	38
Figure 26 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen du mois d'août entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations.	39
Figure 27 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen du mois d'août entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques x 7 MCG). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.....	40
Figure 28 : Boîtes à moustache des évolutions relatives possibles (en %) du débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans (QMNA5) entre 1961-90 et 2046-65 , établies sur les médianes des évolutions simulées sur les 543 bassins où l'on dispose de 14 simulations.....	41
Figure 29 : Boîtes à moustache des évolutions relatives possibles (en %) des débits moyens des mois d'août et septembre entre 1961-90 et 2046-65, établies sur les médianes des évolutions simulées sur les 543 bassins où l'on dispose de 14 simulations.....	41
Figure 30 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans (QMNA5) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 projections pour cinq grands bassins versants.....	42
Figure 31 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans (QJXA10) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations.	44
Figure 32 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans (QJXA10) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques x 7 MCG). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.....	45
Figure 33 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans (QJXA10) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations pour cinq grands bassins versants.	45
Figure 34 : Evolutions climatiques et hydrologiques relatives possibles (en %) entre 1961-90 et 2046-65 à sur la Garonne à Lamagistère. Résultats des 14 projections.....	49
Figure 35: Evolutions climatiques et hydrologiques relatives possibles (en %) entre 1961-90 et 2046-65 dans le district Adour-Garonne : Distribution des évolutions médianes.....	49
Figure 36: Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel et du QMNA5 entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations pour les bassins des contreforts pyrénéens.....	50
Figure 37 : Evolutions climatiques et hydrologiques relatives possibles (en %) entre 1961-90 et 2046-65 à sur la Somme à Abbeville. Résultats des 14 projections.....	52
Figure 38: Evolutions climatiques et hydrologiques possible entre 1961-90 et 2046-65 dans le district Artois-Picardie : Distribution des évolutions médianes	52
Figure 39 : Evolutions climatiques et hydrologiques relatives possibles (en %) entre 1961-90 et 2046-65 à sur la Loire à Montjean. Résultats des 14 projections.....	54
Figure 40 : Evolutions climatiques et hydrologiques possible entre 1961-90 et 2046-65 dans le district Loire-Bretagne : Distribution des évolutions médianes	54
Figure 41: Evolutions climatiques et hydrologiques possibles entre 1961-90 et 2046-65 à sur la Seine à Paris. Résultats des 14 projections	56
Figure 42 : Evolutions climatiques et hydrologiques possible entre 1961-90 et 2046-65 dans le district Seine-Normandie : Distribution des évolutions médianes.....	56
Figure 43: Evolutions possibles du débit moyen annuel et du QMNA5 entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations (points situés en Seine-Normandie)	57
Figure 44 : Evolutions climatiques et hydrologiques possibles entre 1961-90 et 2046-65 à sur la Moselle à Uckange et la Meuse à Chooz. Résultats des 14 projections.....	59
Figure 45: Evolutions climatiques et hydrologiques possible entre 1961-90 et 2046-65 dans le district Rhin-Meuse : Distribution des évolutions médianes	59
Figure 46 : Evolutions climatiques et hydrologiques possibles entre 1961-90 et 2046-65 à sur le Rhône à Beaucaire. Résultats des 14 projections.....	61

Figure 47: Evolutions climatiques et hydrologiques possible entre 19691-90 et 2046-65 dans le district Rhône-Méditerranée-Corse : Distribution des évolutions médianes.....	61
Figure 48: Evolutions possibles des débits mensuels dans les Cévennes entre 1961-90 et 2046-65. Résultats des 14 simulations.	62
Figure 49 : Evolutions possibles de débits mensuels dans les bassins de montagne	63
Figure 50 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MLQ pour la Réunion	65
Figure 51 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MQ pour la Réunion	65
Figure 52 : Evolutions calculées des débits moyens annuels, QMNA5 et QJXA10 à la Réunion... ..	66
Figure 53 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MLQ pour la Guyane	67
Figure 54 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MQ pour la Guyane	67
Figure 55 : Evolutions calculées des débits moyens annuels, QMNA5 et QJXA10 en Guyane	67
Figure 56 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MLQ pour la Martinique.....	68
Figure 57 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MQ pour la Martinique.....	68
Figure 58 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MLQ pour la Guadeloupe..	69
Figure 59 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MQ pour la Guadeloupe....	69
Figure 60 : Evolutions calculées des débits moyens annuels, QMNA5 et QJXA10 en Martinique .	69
Figure 61 : Evolutions calculées des débits moyens annuels, QMNA5 et QJXA10 en Guadeloupe	70
Figure 62 : Cascade des incertitudes liées à la démarche d'étude d'impact, d'après Boé (2007) ..	72
Figure 63 : Dispersion des projections des modèles climatiques en termes d'évolution de la température moyenne globale	73
Figure 64 Anomalies climatiques annuelles et saisonnières produites par les modèles du GIEC et en particulier par les sept modèles d'Explore 2070 (source initiale : Pagé et al, 2008)	75
Figure 65 : Evolution possible du QJXA10 aux points de régime "Méditerranéen/cévenol", entre 1961-90 et 2046-65.....	76
Figure 66 : Evolution possible du module aux points de régime "Méditerranéen/cévenol" et "pluvial-océanique-2", entre 1961-90 et 2046-65	77
Figure 67 : Evolutions possibles du QJXA10 entre 1970-99 et 2035-64 : résultats issus des trois méthodes de descente d'échelle, d'après Quintana et al, 2011. (%)	78
Figure 68 : Performances en validation du modèle GR4J avec module neige Cemaneige – Critère C2MQ.....	80
Figure 69 : Performances en validation du modèle GR4J avec module neige Cemaneige – Critère C2MLQ.....	80
Figure 70 : Performances du modèle Isba-Modcou – critère C2MQ	80
Figure 71 : Performances du modèle Isba-Modcou – critère C2MLQ	80
Figure 72 : Evolution possible du QMNA5 entre 1961-90 et 2046-95 : Résultats médians issus des deux modèles hydrologiques GR4j et Isba-Modcou (Carte bimodèle)	82
Figure 73 : Evolution possible du QMNA5 entre 1961-90 et 2046-95 : Résultats médians issus des deux modèles hydrologiques GR4j et Isba-Modcou (graphique par régime hydrologique)	83
Figure 74 : Evolution possible du module entre 1961-90 et 2046-95 : Résultats médians issus des deux modèles hydrologiques GR4j et Isba-Modcou (Carte bimodèle)	84
Figure 75 : Critères C2MQ (rond bleu) et C2MLQ (carré rouge) pour la modélisation avec débits naturalisés et débits influencés.....	86
Figure 76 : Résultats issus des deux modèles hydrologiques sur les zooms Seine, Garonne et Orb, avec prise en compte ou non des influences anthropiques pour GR4J.....	88
Figure 77 : Evolutions hydrologiques possibles entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 modélisations	91
Figure 78 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 projections pour les bassins des contreforts pyrénéens.....	98
Figure 79 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations (Seine-Normandie)	98
Figure 80 : Evolutions relatives possibles (en %) des débits mensuels dans les Cévennes entre 1961-90 et 2046-65. Résultats des 14 simulations.	99
Figure 81 : Evolutions relatives possibles (en %) du QMNA5 entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations pour les bassins des contreforts pyrénéens.....	101

Figure 82 : Evolutions relatives possibles (en %) de débits mensuels dans les bassins de montagne	102
Figure 83 : Comparaison des évolutions relatives des débits moyens, obtenues par le test des configurations 1 (a, "Précipitations stationnaires") et 2 (b, "Températures stationnaires") par rapport à la configuration de référence.....	105
Figure 84 : Comparaison des tendances calculées et du biais des modèle hydrologiques en temps présent : MODULE	110
Figure 85 : Comparaison des tendances calculées et du biais des modèle hydrologiques en temps présent : QMNA5.....	110
Figure 86 : Comparaison des tendances calculées et du biais des modèle hydrologiques en temps présent : QJXA10	111
Figure 87 : Evolution moyenne du module et convergence des 14 projections.....	113
Figure 88 : Evolution moyenne du module et comparaison avec le biais des modèles hydrologiques en temps présent.....	113
Figure 89 : Evolution moyenne du QMNA5 et convergence des 14 projections.....	114
Figure 90 : Evolution moyenne du QMNA5 et comparaison avec le biais des modèles hydrologiques en temps présent.....	114
Figure 91 : Evolution moyenne du QJXA10 et convergence des 14 projections	115
Figure 92 : Evolution moyenne du QJXA10 et comparaison avec le biais des modèles hydrologiques en temps présent.....	115
Figure 93 : Comparaison des variations de débit mensuel entre temps présent et temps futur obtenues par le Lot 3 (modèles GR4J et Isba-Modcou) et le Lot 4 (modèle Isba-Modcou). Chaque courbe lie les douze valeurs de variations de débits mensuels et les points représentent les modules. (bassins 275 à 388).....	120
Figure 94 : Comparaison des variations de débit mensuel entre temps présent et temps futur obtenues par le Lot 3 (modèles GR4J et Isba-Modcou) et le Lot 4 (modèle Isba-Modcou). Chaque courbe lie les douze valeurs de variations de débits mensuels et les points représentent les modules. (bassins 446 à 622).....	121
Figure 95 : Comparaison des critères de performances du modèle Isba-Modcou sur des séries naturalisées et influencées.....	126
Figure 96 : Comparaison des valeurs quotidiennes d'ETP Penman Monteith entre Abbeville aérodrome (50°08'06" N, 01°50'00" E) et le point S afran 221 pour la période du 1 ^{er} août 1970 au 31 décembre 1995 (distance entre les 2 points environ 25km).....	134
Figure 97 : Comparaison des valeurs quotidiennes d'ETP Penman Monteith entre Perpignan aérodrome (42°44'12" N-02°52'18" E) et le point Safran 9673 pour la période du 1 ^{er} août 1970 au 31 décembre 1995 (distance entre les 2 points environ 4km).....	134
Figure 98 : Comparaison des valeurs quotidiennes d'ETP Penman Monteith entre Paris Montsouris (48°49'18" N 02°20'12" E) et le point Safran 1564 pour la période du 1 ^{er} août 1970 au 31 décembre 1995 (distance entre les 2 points environ 3km).....	135
Figure 99 : Comparaison des valeurs quotidiennes d'ETP Penman Monteith entre Evreux (49°01'30" N 01°13'18") et le point Safran 1241 pour la période du 1 ^{er} août 1970 au 31 décembre 1995 (distance entre les 2 points environ 2km).....	135
Figure 100 : Comparaison des variations de débit mensuel entre temps présent et temps futur obtenues par les projets Explore 2070 et RExHySS pour les modèles GR4J et Isba-Modcou. Chaque courbe lie les douze valeurs de variations de débits mensuels et les points représentent les modules.	137
Figure 101 : Signaux des cumuls annuels d'ETP calculés pour 6 GCM et 5 modèles d'ETP, pour le scénario d'élévation de 2°C de la température (source : (Kingston et al., 2009)) .	143
Figure 102 : Cartographie de la variabilité de l'ETP, l'ETR et des débits à partir de 6 modèles d'ETP et du modèle hydrologique PCR-GLOBWB (source : (Weiland et al., 2012)) (un faible coefficient CV rend compte d'une faible variabilité entre les six estimations).....	146

TABLEAUX

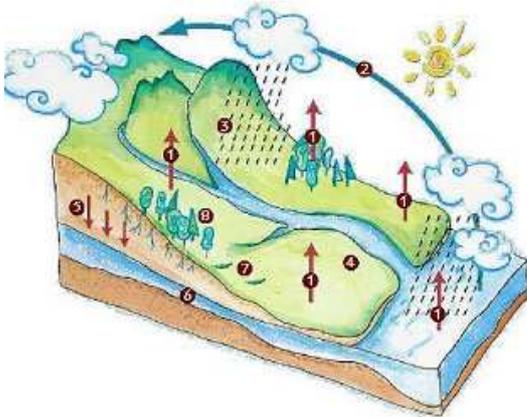
Tableau 1 : 7 simulations « AR4 désagrégées par méthode CERFACS dsclim » fournies au projet Explore 2070.....	7
Tableau 2 : Liste des bassins versants de la Réunion.....	65

1. DEMARCHE GENERALE ET METHODOLOGIE

1.1 OBJECTIFS

OBJECTIF PRINCIPAL

Figure 1 : Représentation schématique d'un bassin versant



Source : <http://www.rappel.qc.ca/bassin-versant/cycle-de-leau.html>

Le projet EXPLORE 2070 est divisé en 8 lots.

La tâche principale attendue du Lot « Hydrologie de surface » est une **évaluation de l'impact possible du changement climatique à l'horizon 2070 sur les ressources en eau superficielles à l'échelle nationale.**

AUTRES OBJECTIFS

Le Lot Hydrologie de surface est également chargé de caractériser, à l'échelle nationale, les évolutions climatiques possibles à l'horizon 2070 (données d'entrée pour ce Lot) et de participer aux réflexions sur les mesures d'adaptation. Enfin, le Lot s'est vu confier la réalisation de modélisations de la température de l'eau pour estimer son évolution future probable (ce dernier aspect n'est pas traité dans le présent rapport).

1.2 DEMARCHE GENERALE

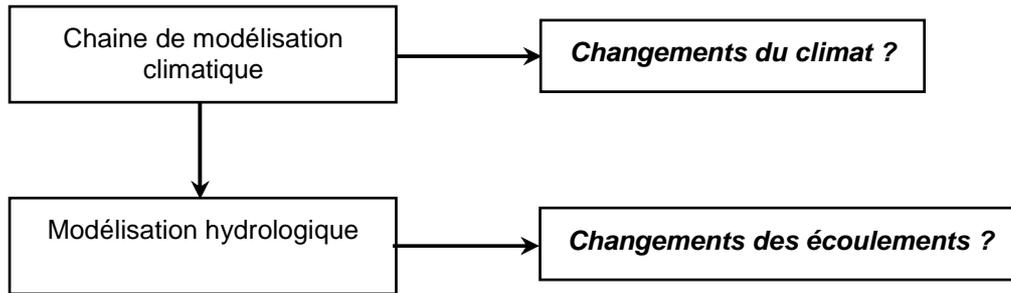
DES MODELES CLIMATIQUES AUX MODELES HYDROLOGIQUES

Pour répondre à cette question, une chaîne de calcul a été mise en place au droit de **1522 bassins versants en Métropole et 35 bassins versants dans les départements d'Outre-mer (Guadeloupe, Guyane, Martinique et Réunion)**, afin d'établir des **projections de débits à l'horizon 2050-2070** (période approximative, les périodes précises sont précisées plus bas).

Comme résumé sur la Figure 2 :

- ▶ Des **modèles climatiques** permettent de simuler le climat présent et le climat futur sous la forme de précipitations, températures et évapotranspiration potentielle (ETP).
- ▶ Ces données de sorties des modèles climatiques sont utilisées en entrée des **modèles hydrologiques** afin de simuler les débits présents et futurs possibles aux exutoires des bassins, et donc **d'appréhender les changements hydrologiques possibles en ces points.**

Figure 2 : Principe de la démarche du lot hydrologie de surface pour la simulation des écoulements



Cette chaîne de calcul fait intervenir plusieurs modèles climatiques et hydrologiques dans le but de cerner une part de l'incertitude inhérente à ce type d'approche.

Cette chaîne de calcul produit et utilise des chroniques simulées de précipitations, températures, évapotranspirations potentielles et débits au pas de temps journalier, sur deux périodes : 1961-1990 et 2046-2065 ¹. Les différences entre les résultats des simulations sur ces deux périodes permettent d'identifier des **évolutions climatiques et hydrologiques possibles**.

A l'issue de ces simulations, un travail d'analyse statistique fournit des éléments de réponse aux interrogations suivantes : **Quels pourront être les impacts du changement climatique sur les écoulements en termes de ressource en eau et de risque de crues ?**

LES PROJECTIONS RESTENT INCERTAINES MAIS LES RESULTATS INVITENT TOUTEFOIS A AGIR DES A PRESENT

Les résultats ne constituent pas des prévisions mais des projections visant à donner une image des états possibles des cours d'eau français à l'horizon 2050-2070. Il sera essentiel de garder à l'esprit que **de nombreuses incertitudes sont attachées à tous les résultats produits**. Le lecteur est invité à la plus grande prudence quant à leur utilisation.

Cependant, si des incertitudes demeurent et s'il n'est pas possible de tout quantifier précisément, des tendances nettes ressortent à l'échelle nationale. Ces tendances incitent dès aujourd'hui à construire des politiques d'adaptation.

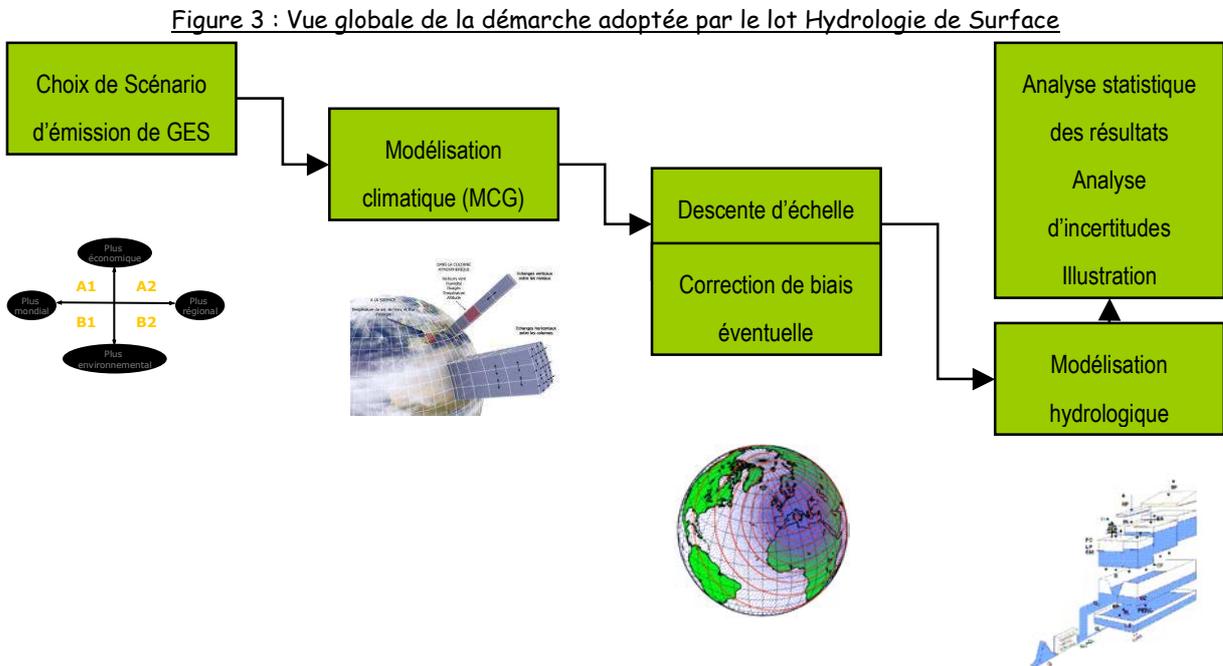
Les projections climatiques et hydrologiques resteront toujours par nature incertaines. Ces incertitudes sont parties intégrantes du système dans lequel doivent se prendre des décisions sur l'avenir de la gestion de l'eau. Dire qu'on ne sait pas tout ne peut excuser l'inaction. A l'inverse, dire qu'on sait tout, ou masquer les parts d'ombre, serait illusoire. Le présent rapport s'efforcera de souligner ce qu'on peut dire des futurs possibles des ressources en eau et aussi ce qu'on en ignore.

Les différentes étapes de la démarche et les choix méthodologiques adoptés sont synthétisés ci-après. Pour une présentation plus détaillée des méthodes mises en œuvre par le lot Hydrologie de surface, on se référera aux documents *B2a - Rapport détaillée Hydrologie Métropole* et *B3 - Rapport détaillé DOM*.

¹ Pour les calculs réalisés sur les DOM les dates de ces périodes diffèrent.

1.3 METHODOLOGIE ADOPTÉE

La démarche générale adoptée par le lot hydrologie de Surface suit l'organisation schématisée à la Figure 3.



A partir d'une hypothèse d'émission de gaz à effet de serre, on mobilise des modèles climatiques (modèles de circulation général MCG) qui produisent des simulations de pluie et température sur un large maillage (de l'ordre de 300 km). Une méthode de descente d'échelle et un débiaisage de ces simulations permet l'obtention de simulations climatiques sur un maillage plus fin (8 km x 8 km sur la métropole) et donc, après agrégation, à l'échelle des bassins versants étudiés. Ces données servent de données d'entrée aux modèles hydrologiques qui produisent des séries de débits journaliers à partir desquels on réalise des calculs d'indicateurs. Chacune de ces étapes repose sur un ensemble d'hypothèses et de choix méthodologiques importants. Des incertitudes de différentes natures demeurent.

Les descriptions établies ci-dessous s'appliquent au travail réalisé sur la métropole. Les spécificités pour le travail établi sur les DOM sont décrites dans le paragraphe 1.3.7.

1.3.1 Choix de la période de référence

La mesure de l'impact du changement climatique repose sur la comparaison des débits et autres grandeurs hydrologiques simulés sur deux périodes : une période « de référence » et une période future.

Le différentiel pourrait être calculé entre des débits observés passés et des projections futures. Cependant, si le modèle hydrologique est biaisé en conditions passées, cette approche peut conduire à des résultats erronés (sur- ou sous-estimation des évolutions). On préfère donc **comparer les projections de débits futurs aux simulations de débits passés, en faisant l'hypothèse que les erreurs systématiques du modèle restent inchangées** (ce qui constitue cependant une hypothèse forte). Comparer les résultats des simulations futures aux simulations de la période de référence, et non aux observations, permet d'éviter d'introduire un biais lié aux erreurs du modèle en conditions actuelles.

La période de référence retenue pour Explore 2070 est la période 1961-1990.

Il s'agit d'une période de référence couramment utilisée en climatologie et de celle retenue dans la majorité des études d'impact. Elle est toutefois contraignante en termes de disponibilité de données hydrométriques (car beaucoup de stations ont été installées à la fin des années 1960 ou dans les années 1970).

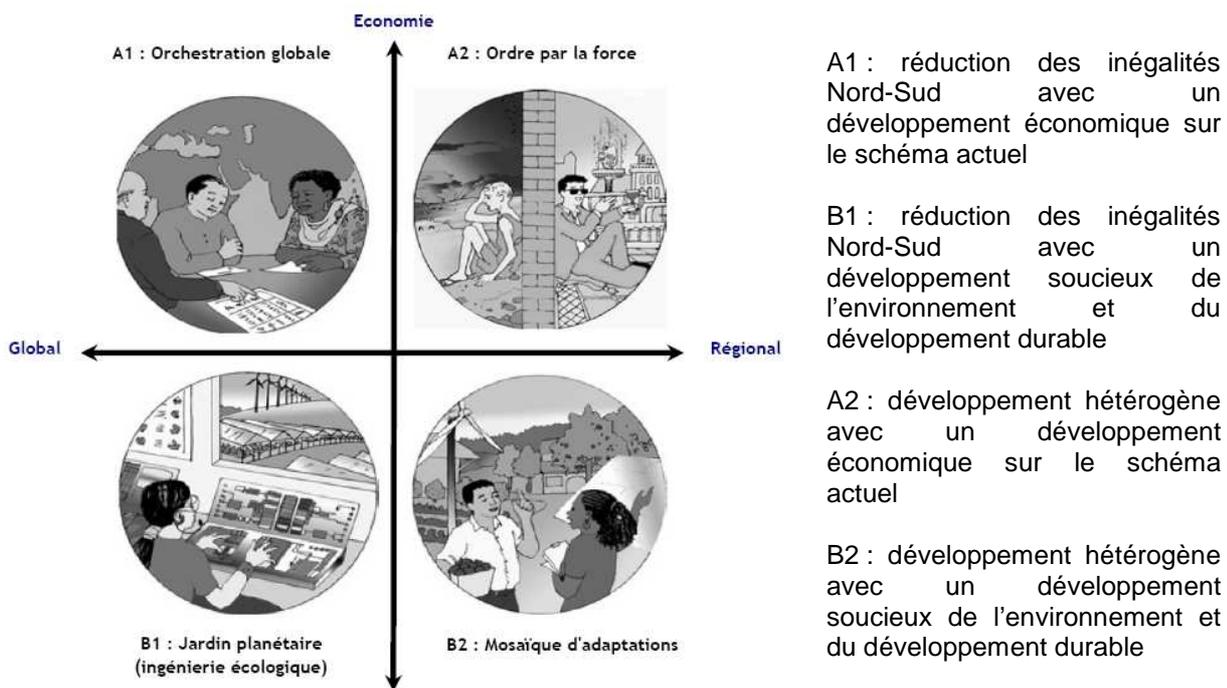
Il faut noter que d'autres périodes de référence auraient pu être prises en compte, notamment la période 1970-1999. Sur cette période, la disponibilité des données hydrométriques est meilleure. De plus, elle correspond davantage au contexte « actuel », ce qui peut faciliter la communication des résultats. Elle fait cependant moins référence au niveau international. Le choix de la période de référence 1961-1990 aura probablement tendance à amplifier les deltas simulés par rapport au choix d'une période de référence plus récente.

La période future utilisée est la période 2046-2065 (pour des raisons de disponibilité des simulations climatiques, comme on le verra plus bas).

1.3.2 Choix d'un scénario de gaz à effet de serre

Dans le 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (IPCC AR4), quatre familles de scénarios d'émissions de GES sont utilisées. La Figure 4 présente schématiquement ces quatre familles.

Figure 4 : Scénarios d'émission de gaz à effet de serre proposés dans le 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (IPCC AR4)

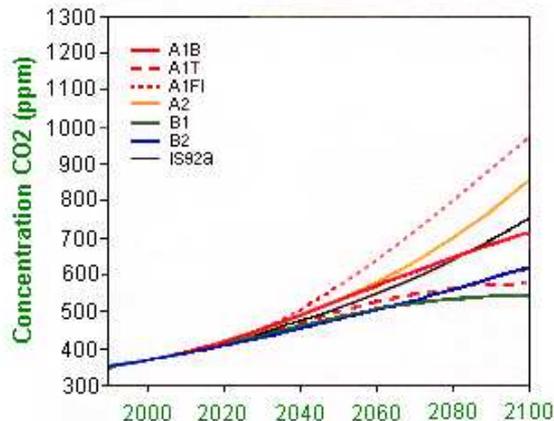


d'après <http://www.millenniumassessment.org/en/index.html>

Le scénario d'émission de GES A1B a été sélectionné pour des raisons de disponibilité des données. Au moment du démarrage du projet Explore 2070, il s'agissait en effet du seul scénario pour lequel un grand nombre de modèles désagrégés étaient disponibles sur la France avec une finesse de résolution (8 km) adaptée aux ambitions du projet.

Il s'agit d'un scénario médian. **Cependant, l'utilisation d'un unique scénario ne permet pas de rendre compte dans les résultats des incertitudes liées aux hypothèses d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre. Ces incertitudes peuvent être très fortes du fait de différences notables entre concentration de GES possibles dans le futur (voir Figure 5). Les résultats hydrologiques finaux pourraient être fortement influencés par ce choix de scénario, sans que l'on puisse le mesurer.**

Figure 5 : Evolutions des concentrations de CO₂ pour les différents scénarii utilisés par le GIEC
(source : <http://www.ipcc-data.org>)



1.3.3 La modélisation climatique

Les simulations climatiques sont produites par des modèles de circulation générale (MCG). Il s'agit de modèles couplés océan-atmosphère qui modélisent la partie organisée des écoulements atmosphériques et océaniques, responsable du climat². Ils fonctionnent à l'échelle du globe.

En entrée de ces modèles, on fait varier les concentrations de gaz à effet serre (GES) et aérosols selon le scénario GES choisi (ici le scénario A1B). On obtient en sortie des simulations climatiques à une résolution spatiale de l'ordre de plusieurs centaines de km.

Il est important de noter que les situations météorologiques simulées n'ont pas pour objectif, pour une date donnée, de reproduire la situation correspondante réellement observée (ou qui sera observée) cependant les chroniques simulées doivent restituer les principales statistiques du climat observé.

Dans le projet Explore 2070, les résultats de 7 modèles de circulation générale ont été utilisés. Ces 7 modèles ont été choisis, parmi les 23 modèles utilisés par le GIEC, par le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) pour leur représentativité de la variabilité climatique.

Cette approche multi-modèle permettra, par la comparaison des 7 résultats, une prise en compte de l'incertitude liée à ces modèles climatiques.

Ces modèles et leur désignation dans le cadre du projet Explore 2070 sont présentés dans le paragraphe suivant.

² Le climat est défini par l'Organisation Mondiale de la Météorologie comme « la description statistique, en termes de moyenne et de variabilité, des quantités pertinentes (précipitations, températures...) sur une période de temps ».

1.3.4 La descente d'échelle

Les 7 MCG fournissent des simulations à une résolution de plusieurs centaines de kilomètres. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre des méthodes de descente d'échelle qui visent à désagréger ces données à une échelle adaptée aux études hydrologiques (voir illustration Figure 6).

Deux approches complémentaires existent :

- ▶ l'approche statistique qui repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables locales et les prédicteurs modèles ;
- ▶ l'approche dynamique qui consiste à résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional. Elle utilise une modélisation localisée avec comme conditions aux limites les résultats des modélisations conduites à l'échelle du globe.

Les résultats d'une seule **méthode de descente d'échelle** ont été utilisés dans le cadre d'Explore 2070. Ces résultats ont été établis en amont d'Explore 2070 par la méthodologie DSCLIM développée au CERFACS (Boé et al. 2006 ; Boé 2007). Il s'agit d'une **désagrégation d'échelle statistique multivariée** qui repose sur l'utilisation du concept de type de temps et qui est dérivée de la méthode classique des analogues.

Ce choix d'utilisation d'une seule méthode de descente d'échelle a été contraint par des questions de disponibilités des données à une résolution spatiale adaptée au projet.

Il faut noter que la méthode de descente d'échelle peut induire des incertitudes importantes, qui ne pourront pas être quantifiées en raison du choix d'une seule méthode. En particulier, les incertitudes liées à la descente d'échelle peuvent être importantes sur les pluies (Déqué et al. 2007) et ainsi avoir des impacts forts sur les débits (Quintana 2010). Un état de l'art concernant les incertitudes induites par l'étape de descente d'échelle est proposé au paragraphe 4.3.

A l'issue de ce travail de descente d'échelle, on obtient sur la Métropole :

- ▶ **des données simulées de précipitations liquides et solides, températures et ETP,**
- ▶ **au pas de temps journalier,**
- ▶ **au pas d'espace de 8 km x 8 km (il s'agit de la grille Isba, voir Figure 7),**
- ▶ **pour la période de référence 1961-1990 et pour la période future 2046-2065,**
- ▶ **ceci pour chacun des 7 modèles climatiques.**

A partir de ce maillage de 8km x 8km, on calculera des séries climatiques à l'échelle des bassins versants étudiés (voir Figure 8).

Figure 6 : Exemple de données de précipitations (mm/jour) couvrant la France. La figure (a) montre les données à la résolution typique d'un modèle global du climat, tandis que la figure (b) montre les données désagrégées statistiquement à une résolution de 8 km. (Source : Pagé et al., 2008)

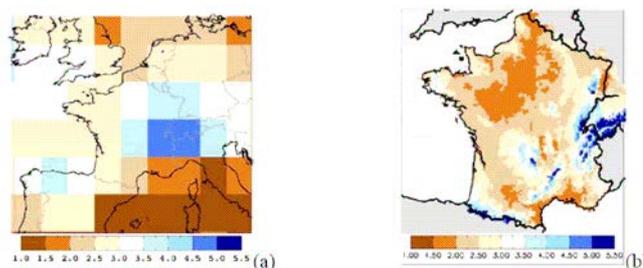


Figure 7 : Maillage de 8km*8km (grille Isba) pour lequel on dispose de simulations climatiques

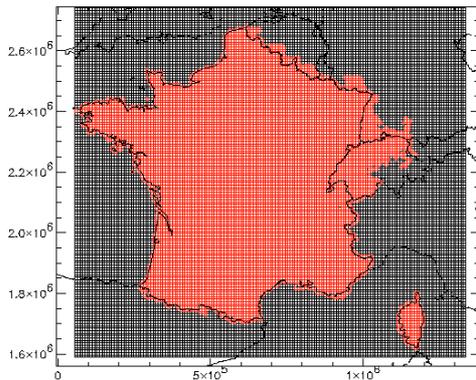
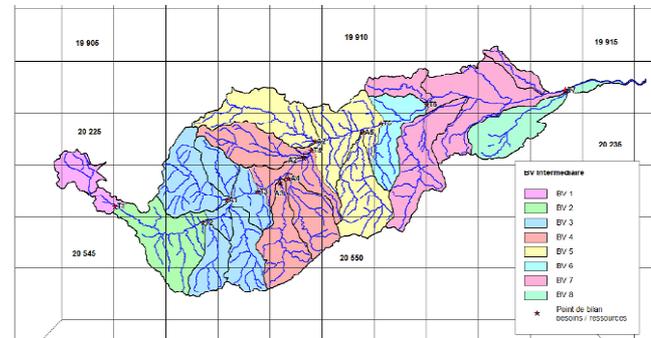
Figure 8 : Exemple de superposition grille ISBA / bassin : bassin de 1300 km² (la Têt à Perpignan)

Tableau 1 : 7 simulations « AR4 désagrégées par méthode CERFACS dsclim » fournies au projet Explore 2070

Scénario GES	Nom Modèle et Nomenclature Explore 2070		Nom de la simulation	Centre climatique	Période fournie : (années hydrologiques comprises entre)
A1B	CCCMA_CGCM3	C1	A1B_CCCMA-CGCM3	CCCMA (Canada)	1961-1991 2046-2065
A1B	ECHAM5/MPI	C2	A1B_ECHAM5-MPI	MPI (Allemagne)	1961-1991 2046-2065
A1B	ARPEGE V3+	C3	A1B-ARPV3	Météo-France	1961-1991 2046-2065
A1B	GFDL-CM2.0	C4	A1B_GFDL-CM2.0	GFDL (USA)	1961-1991 2046-2065
A1B	GFDL-CM2.1	C5	A1B_GFDL-CM2.1	GFDL (USA)	1961-1991 2046-2065
A1B	GISS_MODEL_ER	C6	A1B_GISS-MODEL-ER	GISS (USA)	1961-1991 2046-2065
A1B	MRI-CGCM2.3.2	C7	A1B_MRI-CGCM2.3.2	MRI (Japon)	1961-1991 2046-2065

1.3.5 La modélisation hydrologique

1.3.5.1 Choix des modèles hydrologiques

Dans l'objectif de prendre en compte l'incertitude liée aux modélisations hydrologiques, on adopte une approche multi-modèle. Deux modèles hydrologiques ont été mobilisés : le modèle GR4J d'Irstea (ex-Cemagref) et le modèle Safran-Isba-Modcou (SIM) de Météo-France.

Le premier est un modèle global, apparenté aux modèles conceptuels. Le second est un modèle distribué (il fonctionne avec un découpage de l'espace en mailles élémentaires de 8 km x 8 km) à bases physiques. Cela correspond à des approches de modélisation très différentes. Dans le premier cas, l'approche est qualifiée de descendante : on cherche à avoir une description systémique du fonctionnement du bassin versant. Dans le second cas, elle est qualifiée d'ascendante : on cherche à modéliser des composants "élémentaires" du système et ensuite à les assembler.

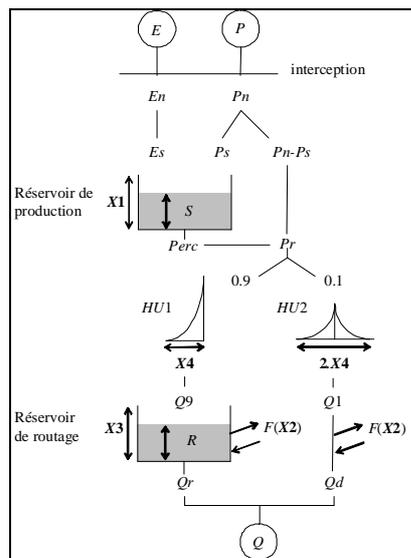
LE MODELE GR4J

Il s'agit d'un modèle construit pour reproduire le comportement hydrologique global d'un bassin versant : il fait le lien entre la lame d'eau précipitée et l'évapotranspiration potentielle sur le bassin, et son débit à l'exutoire.

C'est un modèle empirique à réservoirs (voir Figure 9) : un ensemble de réservoirs interconnectés qui se vident et se remplissent au cours du temps traduisent la transformation de la pluie en débit.

Il fonctionne au pas de temps journalier et possède 4 paramètres, qui n'ont pas de signification physique directe et sont déterminés grâce à une phase de calage. Cela nécessite de disposer d'une chronique de débits observés suffisamment longue (idéalement de plus de 5 ans).

Figure 9 : Structure schématique du modèle GR4J



LE MODELE SAFRAN-ISBA-MODCOU

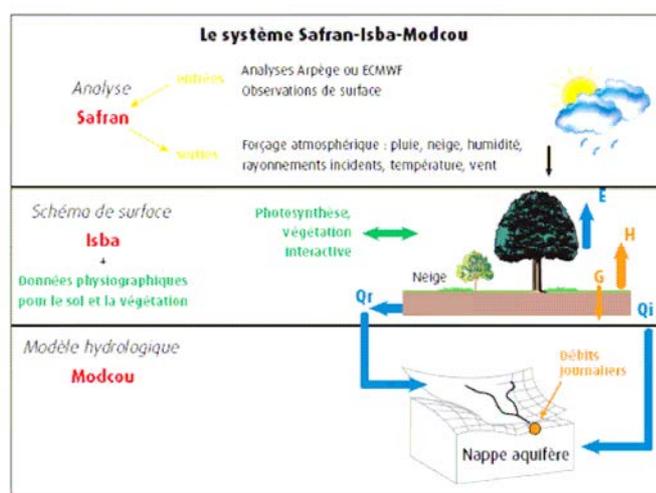
Il s'agit en fait d'une chaîne de trois modèles à bases physiques (voir Figure 10).

ISBA (Intercation Surface Biosphere Atmosphere) est le schéma de surface du modèle climatique Arpège-Climat. Il simule les échanges d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation et les basses couches de l'atmosphère.

MODCOU est un modèle hydrogéologique, qui intègre les informations de ruissellement de surface produites par ISBA et assure les différents transferts d'eau (dans et vers les rivières, dans et vers une nappe aquifère, et nappe-rivière). C'est un modèle distribué à mailles emboîtées (l'espace est représenté par l'agrégation d'unités élémentaires : des mailles carrées de 8 km de côté).

Cette chaîne est complétée par SARAN afin d'intégrer l'analyse des paramètres météorologiques.

Figure 10 : Schéma de principe de SIM: l'eau est transférée vers la rivière, puis dans la rivière avec un pas de temps de 3h. L'eau peut également s'infiltrer vers la nappe qui interagit avec la rivière



1.3.5.2 Choix des points de calculs

Les résultats des simulations pour Isba-Modcou (chaîne de calcul Safran-Isba-Modcou) étaient déjà disponibles en amont du projet et ont été mis à disposition par Météo-France dans le cadre du projet au droit de **907 points correspondant à des stations hydrologiques et de 256 points correspondant à des exutoires maritimes de bassins versants**. Ces résultats sont au pas de temps journalier (débit moyen journalier en m^3/s) et correspondent aux simulations réalisées avec chacun des 7 modèles climatiques cités précédemment pour la métropole (scénario de concentration en GES A1B).

Il s'agissait donc de faire un choix pour les calculs réalisés avec GR4J :

- ▶ choix de stations parmi celles déjà traitées avec Isba-Modcou afin d'avoir le plus possible de stations communes aux deux modèles (pour cerner l'incertitude liée à la modélisation hydrologique) ;
- ▶ choix d'autres stations visant à compléter l'échantillon pour le rendre le plus représentatif possible de la variabilité des conditions et des enjeux à l'échelle nationale, en garantissant une couverture relativement homogène du territoire.

Ce choix implique principalement les aspects suivants : la disponibilité, la qualité des données hydrométriques et enfin les enjeux associés à certaines problématiques pour le projet (évolution de la ressource et des risques). Ce choix s'effectue au sein de la base de données nationale hydrométrique HYDRO gérée par le MEDDTL.

Par rapport aux enjeux soulignés dans le cadre de l'intégration, les stations suivantes ont été privilégiées :

- ▶ stations correspondant aux points nodaux définis dans les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux,
- ▶ points considérés comme de bonne qualité pour le suivi des étiages dans les travaux récents d'Irstea (centre de Lyon) pour l'ONEMA,
- ▶ points appartenant au réseau national de vigilance sur les crues VIGICRUES,
- ▶ points situés sur des cours d'eau traversant l'une des 15 grandes métropoles françaises.

Pour l'aspect « qualité des données », des filtres ont été mis en œuvre pour éliminer les stations ne comportant pas assez de mesures renseignées comme étant de bonne qualité, ou trop influencées par des ouvrages hydrauliques.

Pour l'aspect « disponibilité des données », nous avons considéré les critères adoptés par la banque HYDRO, à savoir de disposer d'au moins dix années de données pour le calcul des descripteurs hydrologiques. Cependant, nous avons quand même retenu des points de calculs pour lesquels seulement six années de débit étaient disponibles sur la période de référence. Cette durée peut-être considérée comme une durée minimale pour évaluer et caler les modèles hydrologiques de type GR4J. Sur ces stations, on disposera donc d'un modèle calé pour réaliser des simulations et ainsi calculer des variables hydrologiques, mais pas de références sur les débits observés.

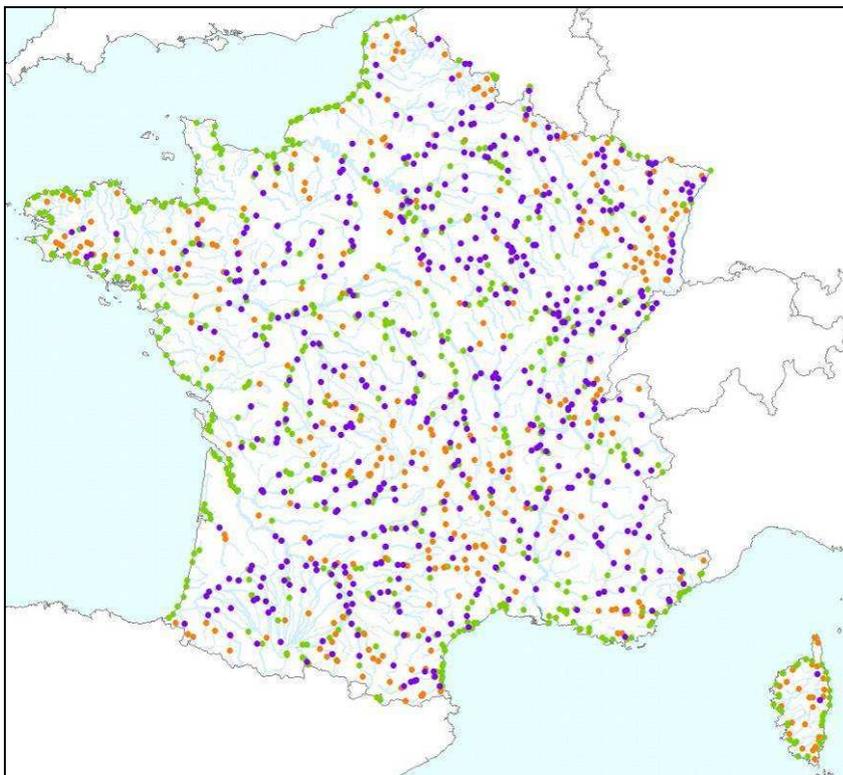
Notons que nous avons également imposé un taux de lacune mensuel maximum égal à 50% et un taux de mesures valides (suivant les codes qualité de la banque HYDRO) supérieur ou égal à 80%, de manière à s'assurer de l'homogénéité temporelle des données.

Pour les simulations par GR4J, 902 points de calcul ont été sélectionnés parmi les stations hydrométriques de la Banque HYDRO.

Pour la métropole, les calculs sont donc établis au droit de 1522 points (voir Figure 11) :

- ▶ 543 points GR4J+Isba-Modcou ;
- ▶ 359 points GR4J seul ;
- ▶ 620 points Isba-Modcou seul.

Figure 11 : Localisation des 1522 points de calcul retenus pour Explore 2070 en Métropole



Points de calcul Explore 2070

- Points doubles GR4J + Isba-Modcou (543 points)
- Points GR4J seul (359)
- Points Isba-Modcou seul (620)

1.3.5.3 La démarche de mise en œuvre des modèles hydrologiques

Cette mise en œuvre suit les trois étapes suivantes.

1 - ÉTUDE DE FIABILITE DES MODELES

Il s'agit d'évaluer la capacité des modèles à reproduire les débits passés. Cela fournira une première quantification de l'incertitude associée aux modèles hydrologiques.

Pour cela, on utilise des critères d'efficacité, appelés critères de Nash-Sutcliffe, fonctions quadratiques de la différence entre débits observés et simulés.

$$\text{Critère de Nash-Sutcliffe pour les débits : } NQ = 1 - \frac{\sum (Q_s - Q_o)^2}{\sum (Q_o - \bar{Q})^2}.$$

où Q_s est le débit simulé, Q_o est le débit observé, et \bar{Q} est le débit observé moyen

Ils seront donnés sous la forme « C2MQ » et « C2MLQ » (C2MLQ s'applique aux logarithmes des débits) dans l'ensemble des rapports :

$$C2MQ = \frac{NQ}{2 - NQ}$$

Cette forme permet d'obtenir des valeurs bornées entre -1 et 1. Le critère C2MQ privilégie les hautes eaux ; le critère C2MLQ privilégie les basses eaux.

GR4J : Pour l'évaluation des performances du modèle GR4J, on effectue une procédure de calages-contrôles croisés, qui consiste à mesurer l'écart entre les débits simulés et les débits observés sur deux périodes distinctes³, grâce aux critères C2MQ et C2MLQ.

Isba-Modcou : On évalue l'écart entre les séries de débits simulées et observées lorsque des données d'observation sont disponibles, selon les mêmes critères C2MQ et C2MLQ.

Une analyse des résultats de performances est proposée au chapitre 2.6.6. Il est important de noter que des performances limitées sur certains bassins incitent à la prudence quant à l'interprétation des résultats.

2 - CALAGE DES MODELES

GR4J : Pour réaliser les simulations, le modèle est calé sur toute la période pour laquelle on dispose de données observées, incluse dans la période de référence. On détermine ainsi en chaque point un jeu de 4 paramètres, qui permet de paramétrer le modèle en temps futur. Cela implique une hypothèse forte, qui revient à supposer que la fonction de transformation opérée par le bassin ne varie pas avec le climat.

Isba-Modcou : Isba-Modcou n'a pas fait l'objet de calages locaux, mais un travail d'ajustement global à l'échelle de grands bassins a été effectué afin de s'approcher au mieux des débits observés.

On peut donc s'attendre logiquement à avoir sur la période de référence des simulations de débit produites par GR4J (avec les forçages observés) plus proches des observations qu'avec Isba-Modcou.

³ Le modèle est calé sur une première sous-période P1 puis contrôlé sur une sous-période indépendante P2, puis les périodes sont inversées.

3 - SIMULATIONS DES DEBITS PASSES ET FUTURS PAR LES DEUX MODELES

En chaque point d'étude, pour chaque combinaison modèle hydrologique x modèle climatique, on effectue les simulations des débits passés (1962-1990) (*) et futurs (2046-2065), au pas de temps journalier. **On génère donc, pour chaque point de calcul, 7 ou 14 chroniques de débits journaliers en temps passé et 7 ou 14 chroniques de débits journaliers en temps futur.**

(*) NB : L'année 1961 est réservée à l'initialisation des réservoirs interne et est donc exclue de l'analyse. Dans la suite du rapport, on notera cependant la période de référence « 1961-1990 ».

1.3.5.4 Les principales hypothèses

Cette démarche repose sur des hypothèses fortes :

- ▶ Stationnarité :
 - le fonctionnement hydrologique et les caractéristiques du bassin restent inchangés dans le temps,
 - les paramètres valables en conditions actuelles restent valables en conditions futures ;
- ▶ Fiabilité :
 - un modèle fiable en conditions actuelles le reste en conditions futures,
 - les biais du modèle restent du même ordre de grandeur en conditions futures ;
- ▶ Extrapolation :
 - le modèle est apte à s'adapter à des conditions extrêmes jamais rencontrées en « temps passé » (événements extrêmes ou série d'événements).

De plus, tous les bassins ont été considérés ici comme naturels, c'est-à-dire qu'il **n'y a pas eu de travail préalable de désinfluencement** (sauf dans quelques cas particuliers). Pour les bassins sur lesquels il y a des influences fortes en crue ou en étiage, cela peut avoir pour conséquence d'entraîner un biais dans l'estimation des paramètres du modèle hydrologique (les paramètres ont tendance à s'adapter aux influences) et dans ses sorties.

1.3.6 L'analyse des résultats et l'évaluation des incertitudes

CHOIX DES INDICATEURS

Afin de caractériser les évolutions hydrologiques entre la période de référence et la période future, un ensemble de descripteurs ont été calculés à partir des simulations de débits journaliers. Il s'agit d'une quinzaine d'indicateurs qui rendent compte :

- ▶ des régimes hydrologiques (module, débits mensuels, débit annuel quinquennal sec, ...) ;
- ▶ des étiages (QMNA5, VCN30, ...) ;
- ▶ des crues (QJXA10, ...).

Les définitions des principaux indicateurs hydrologiques utilisés sont détaillées en tête du chapitre 2.

De plus, des descripteurs climatiques et des indicateurs de la fiabilité des modèles hydrologiques sont aussi calculés.

CALCULS DES EVOLUTIONS FUTUR / REFERENCE POUR DES INDICATEURS CLES

Pour chaque combinaison modèle hydrologique / modèle climatique, on calcule la valeur de l'indicateur sur la période passée (aussi appelée "période de référence" ou "temps présent") et sur la période future, puis on calcule l'écart entre ces deux valeurs :

$$\Delta = \frac{\text{FUT} - \text{PST}}{\text{PST}}$$

où FUT est la valeur calculée à partir des simulations sur la période 2046-2065 et PST est la valeur calculée à partir des simulations sur la période 1961-1990.

Comme indiqué plus haut, 7 modèles climatiques ont été utilisés ainsi que, selon les points de calcul, 1 ou 2 modèles hydrologiques. On a donc, **pour chaque point de calcul, 7 ou 14 valeurs de Δ pour chaque indicateur**, la dispersion de ces 7 ou 14 valeurs rendant compte, pour partie, de l'incertitude.

Ce sont ces Δ (deltas) qui rendent compte de l'évolution possible des indicateurs, et qu'il convient d'appliquer aux valeurs observées pour calculer des évolutions possibles en valeur absolue.

COMMENT ESTIMER LES EVOLUTIONS POSSIBLES DES INDICATEURS EN VALEUR ABSOLUE ?

Considérons un exemple (fictif) : le débit moyen annuel observé en une station sur la période passée 1961-1990 de 1673 m³/s. Pour cette station, Explore 2070 indique 14 évolutions possibles du débit moyen annuel à l'horizon 2046-2065. La figure suivante indique comment estimer en valeur absolue le débit moyen futur possible à cette station selon la formule suivante :

$$\text{Débit moyen annuel futur possible à l'horizon 2046-2065} = (1 + \Delta) \times \text{Débit moyen annuel observé sur la période 1961-1990}$$

où Δ désigne l'évolution entre 2046-2065 et 1961-1990 calculée par une projection hydro-climatique du projet.

Figure 12 : Exemple de calcul de l'évolution possible d'un indicateur hydrologique

	modèle hydrologique 1 GR4J	modèle hydrologique 2 Isba-Modcou	
Résultats des MODELISATIONS d'Explore 2070 sous forme de Deltas (FUT-PST)/PST	Modèle climatique 1	-36%	-23%
	Modèle climatique 2	-32%	-21%
	Modèle climatique 3	-27%	-17%
	Modèle climatique 4	-24%	-14%
	Modèle climatique 5	-20%	-10%
	Modèle climatique 6	-17%	-9%
	Modèle climatique 7	-14%	-8%
	<i>min</i>	-36%	-23%
	<i>med</i>	-24%	-14%
	<i>max</i>	-14%	-8%
OBSERVATION S historiques	Débit moyen annuel observé sur la période 1961-1990 (m3/s)		1673
	PROSPECTIVE	Débit moyen annuel futur possible à l'horizon 2046-2065 (m3/s)	1 071
1 138			1 322
1 221			1 389
1 271			1 439
1 338			1 506
1 389			1 522
1 439			1 539
<i>min</i>		1 071	1 288
<i>med</i>		1 271	1 439
<i>max</i>		1 439	1 539

Le projet a calculé 14 résultats en termes d'évolution possible du débit moyen annuel.

Un condensé de ces résultats sous la forme Min/Médiane/Max est présenté dans les fiches de synthèse.

Evolution possible en valeur absolue :
14 valeurs possibles qui cernent une part de l'incertitude entourant la prospective

PRESENTATION DES RESULTATS

La description complète des indicateurs calculés, et des modes de calculs mis en œuvre, est exposée dans le document *B2a – Rapport détaillé Hydrologie Métropole*.

Afin de présenter parallèlement les évolutions hydrologiques calculées et une évaluation de l'incertitude associée, et cela à différentes échelles de lecture, plusieurs rendus sont proposés :

- ▶ **Des fiches de synthèse par bassin versant.** Pour chaque point d'étude, on propose une fiche qui synthétise les évolutions de tous les indicateurs. Pour chaque indicateur, on présente :
 - la valeur issue des observations, lorsque l'on possède au moins 10 ans de données (critère minimum pour réaliser un calcul statistique pertinent),
 - les valeurs médiane, minimale et maximale du Δ pour chaque modèle hydrologique respectivement.
- ▶ **Un ensemble de graphes** rend compte de l'évolution globale et des incertitudes associées à l'échelle nationale, après partition des points par type de régimes hydrologiques, et à l'échelle de quelques bassins en particulier.

- ▶ Ces évolutions hydrologiques et les incertitudes associées seront aussi représentées grâce à **un ensemble de cartes** à l'échelle nationale.

L'ensemble de ces graphes et cartes est compilé dans le document A2 - Graphiques et Cartes de présentation des résultats qui inclut également un guide de lecture de ces documents.

Le chapitre suivant du présent rapport présente une analyse de résultats obtenus, des évolutions hydrologiques calculées et du niveau de confiance que l'on peut accorder à ces résultats. Il est illustré par des cartes et graphes extraits du document A2.

1.3.7 Spécificité des départements d'Outre-mer (DOM)

La méthodologie mise en œuvre pour les modélisations hydrologiques dans les DOM (Guadeloupe, Guyane, Martinique et Réunion) ne peut suivre exactement celle présentée pour la Métropole. Les principales spécificités relatives aux DOM sont résumées ci-après.

DES DONNEES HYDROLOGIQUES ET CLIMATIQUES LIMITEES

La première spécificité à noter pour le travail concernant les DOM est une disponibilité des données moindre par rapport à la Métropole, que ce soit :

- ▶ Les données hydrométriques ;
- ▶ Les données d'observations météorologiques ;
- ▶ Les données de simulation climatiques.

En effet, le nombre de stations hydrométriques existantes et présentant des séries de données journalières jugées fiables sur une période suffisamment longue est assez restreint pour les DOM.

Les données d'observations météorologiques posent aussi des difficultés pour les modélisations hydrologiques (peu de points d'observation, forte variabilité spatiale, existence d'épisodes cycloniques sur certains DOM).

Les données de simulations climatiques sont particulièrement pauvres. Les résolutions sont moins fines que pour la métropole, et les points de références sont parfois situés en dehors des territoires concernés. Pour traiter les Antilles, au démarrage du projet, on disposait uniquement de simulations climatiques à Porto Rico et à Trinidad.

Ce manque de données a de nombreuses conséquences dans la démarche suivie par le lot Hydrologie de surface :

Le territoire d'étude et de modélisation hydrologique sera limité aux bassins versants pour lesquels on dispose de données hydrométriques et climatiques suffisantes. L'ensemble des bassins versants étudiés ne couvre donc qu'une partie limitée des territoires des DOM.

La période de référence considérée doit être adaptée à la disponibilité des données météorologiques et hydrométriques. Cette période ne sera donc pas systématiquement l'intervalle 1961-1990 retenu pour la métropole, elle sera définie pour chaque DOM, avec le souci de rester « proche » de la période 1961-1990, tout en tenant compte des données disponibles.

La qualité des calages du modèle hydrologique, et donc la fiabilité des modélisations hydrologiques, pourraient être très amoindries, notamment pour les bassins versants présentant des données météorologiques peu denses.

Les incertitudes liées aux simulations hydrologiques sont démultipliées du fait de la pauvreté des simulations climatiques disponibles. En particulier, les résultats des modélisations hydrologiques pour les Antilles devront être reçus avec une très grande prudence.

MODELES CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE UTILISES

Dans le cadre des travaux menés sur les territoires de Départements d'Outre-mer, l'approche multi-modèles adoptée pour la Métropole ne peut pas être suivie en raison du manque de données disponibles :

- ▶ Un seul modèle hydrologique, le modèle GR4J d'Irstea, est utilisé ;
- ▶ Un seul modèle climatique, le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France, est utilisé. Deux expériences de régionalisation climatiques ont été utilisées (EtireEU et Global 50km), fournissant ainsi deux jeux de données de simulations climatiques.

DES CONTEXTES CLIMATIQUES SPECIFIQUES

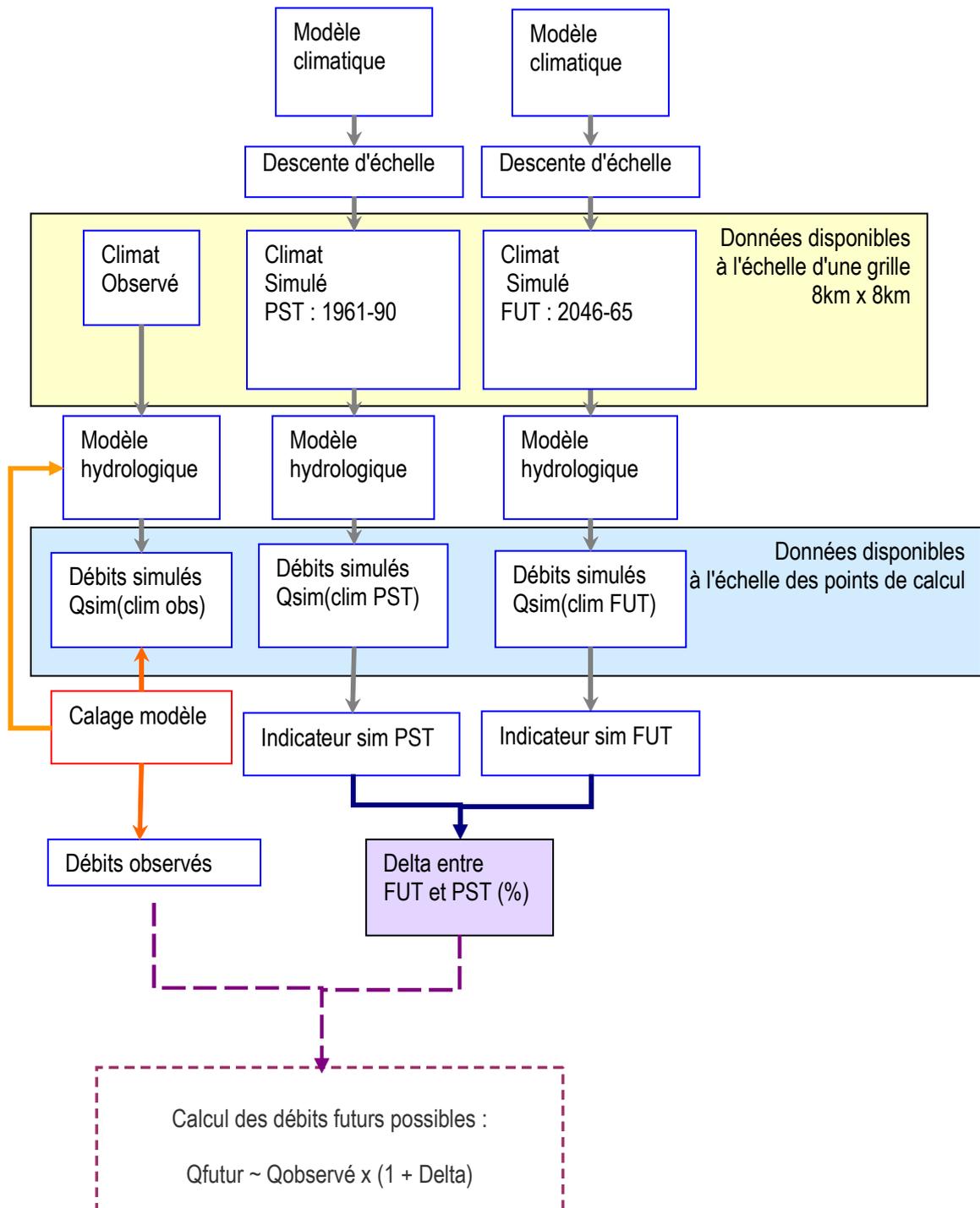
En outre, le contexte climatique des DOM constitue une spécificité essentielle à prendre en compte.

En particulier, la Martinique, la Guadeloupe et la Réunion présentent une activité cyclonique importante, avec des événements de crue très spécifiques dus aux très fortes pluies correspondantes (plusieurs centaines de mm en quelques heures). Les performances du modèle hydrologiques pourraient être amoindries en contexte cyclonique, du fait de la spécificité de ces événements délicats à mesurer (tant en pluie qu'en débit) et de la difficulté de les simuler au même titre que les conditions hydrologiques plus courantes. En conséquence, une approche « multi-paramétrages », intégrant la dynamique événementielle des précipitations, sera mise en place afin d'améliorer les performances des modélisations sur l'île de la Réunion.

1.4 SCHEMA DE SYNTHESE SUR LA DEMARCHE ADOPTEE

Le schéma de la Figure 13 résume la démarche effectuée pour chacun des points de calcul, et chacun des couples Modèle Climatique (MCG) – Modèle Hydrologique (7 ou 14 couples sur la métropole et 1 à 3 couples pour les DOM).

Figure 13 : Schéma de la démarche générale adoptée par le lot Hydrologie de Surface



Dans la suite du rapport, on emploiera le terme « **projection** » pour parler de l'ensemble de cette chaîne de calcul. Selon les points de calcul, elle a été appliquée (en Métropole) 7 fois (7 modèles climatiques x un seul modèle hydrologique) ou 14 fois (7 modèles climatiques x 2 modèles hydrologiques). D'où par exemple l'emploi de l'expression « les 14 projections ».

2. RESULTATS

2.1 PRINCIPAUX INDICATEURS UTILISES

Le document *B2a - Rapport détaillé Hydrologie Métropole* présente les définitions et modes de calcul détaillés de tous les indicateurs climatiques et hydrologiques utilisés dans le projet.

On rappellera ici la définition des trois principaux indicateurs utilisés dans le présent document de synthèse.

- ▶ **Débit annuel moyen** dit aussi **Module**. Ce débit est établi à partir de la moyenne de l'ensemble des débits journaliers disponibles.
- ▶ **QMNA5** : Le QMNA désigne le débit mensuel minimal d'une année civile. On utilise en particulier le QMNA5 qui est le QMNA de temps de retour 5 ans. Le tableau ci-dessous explicite le calcul du QMNA5 :

m3/s	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	...	Année n
janv	12	15	17	9		m1
févr	14	12	22	15		m2
mars	15	17	35	25		m3
avr	35	23	37	34		m4
mai	45	38	39	35		m5
juin	37	22	18	25		m6
juil	14	10	14	17		m7
août	8	7	9	12		m8
sept	5	9	10	11		m9
oct	8	12	7	14		m10
nov	12	14	10	13		m11
déc	11	12	11	12		m12

QMNA	5	7	7	9	...	min(m _i)
------	---	---	---	---	-----	----------------------

Calage d'une loi statistique (loi log-normale) sur la série des QMNA pour calculer le QMNA5 (QMNA de temps de retour 5 ans sec)

Le QMNA5 est tel que, statistiquement, en moyenne, une année sur 5 le QMNA est plus faible que le QMNA5, 4 années sur 5 il est plus élevé.

- ▶ **QJXA10** est le débit journalier maximal annuel, de période de retour 10 ans. Pour chaque année, on enregistre le débit journalier maximal. On classe ensuite ces débits par ordre croissant. On peut alors associer à chaque débit maximal une fréquence de dépassement et construire la distribution de débits.

m3/s	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	...	Année n
01-janv	120	134	256	176		QJ1
02-janv	122	145	280	177		QJ2
03-janv	137	147	282	189		QJ3
04-janv	142	153	300	190		QJ4
...
...	...	...	...	724	...	...
...	...	450	...	...	...	...
...	514	...	540	...	...	...
...
28-déc	213	76	234	97		QJ362
29-déc	199	80	240	102		QJ363
30-déc	187	82	241	107		QJ364
31-déc	186	84	238	98		QJ365

QJXA	514	450	540	724	...	max(QJ _i)
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----------------------

Calage d'une loi statistique (loi de Gumbel) sur la série des QJXA pour calculer le QJXA10 (QJXA de temps de retour 10 ans)

Le QJXA10 est tel que, statistiquement, en moyenne, une année sur 10 le QJXA est plus élevé que le QJXA10, 9 années sur 10 il est plus faible.

2.2 LA MOYENNE NE TRADUIT PAS TOUS LES FUTURS POSSIBLES

Chaque étape de la chaîne de calcul déclinée ci-dessus est réalisée sous plusieurs hypothèses fortes, qui induisent d'importantes incertitudes dans les résultats finaux. **Ces incertitudes sont discutées au paragraphe 2.6.**

Pour appréhender ces incertitudes, et approcher les niveaux de confiance que l'on peut accorder aux résultats finaux, **le projet se fonde sur une approche multi-modèles. Ces résultats ne peuvent pas être réduits à la simple moyenne des résultats obtenus par chaque modèle. La concordance effective ou non des différents résultats issus de différents modèles permettra d'approcher la confiance que l'on peut accorder aux résultats.**

Ce faisant, l'approche multi-modèle ne rend pas compte de toutes les incertitudes : en particulier, un seul scénario d'émission de gaz à effet de serre a été utilisé, et une seule méthode de descente d'échelle est mobilisée. En conséquence, tout résultat, y compris ceux pour lesquels les 14 simulations s'accordent, restent incertains.

Il faut donc garder à l'esprit pour la suite qu'une valeur unique serait nécessairement trompeuse, compte tenu des incertitudes inhérentes aux travaux réalisés.

Ces incertitudes pèsent sur les résultats à tous les niveaux d'interprétation, c'est-à-dire :

- ▶ **La qualification des évolutions hydrologiques** : Existe-il, pour tel enjeu, une évolution significative ou non, et dans quel sens ?
- ▶ **La quantification de ces évolutions** : De combien les débits pourraient-ils évoluer ? Sur ce point en particulier, la prudence dans l'utilisation des chiffres produits s'impose.
- ▶ **La régionalisation des résultats** : Existe-il des tendances régionales significatives ? Quelles seront les régions les plus impactées ?

Néanmoins, l'incertitude n'empêche pas de dégager certaines tendances et d'apporter dès aujourd'hui des éléments d'aide à la décision.

2.3 LES PRINCIPAUX RESULTATS EN QUELQUES MOTS

METROPOLE

Les chiffres donnés ci-dessous sont les anomalies calculées entre les simulations futures (2046-65) et les simulations passées (1961-90).

En termes de ressource annuelle, les travaux de simulations permettent de conclure sur **une baisse globale du débit moyen annuel sur toute la métropole, de l'ordre de 10% à 40%** pour une majorité de bassins (Figure 18).

On peut s'attendre à une **baisse particulièrement sensible pour les cours d'eau des contreforts pyrénéens, de l'ordre de 10 à 60%** (Figure 18 et Annexe 1).

Concernant les débits d'étiage, une forte majorité des simulations s'accordent sur **une baisse générale des débits, plus accentuée encore que la baisse de la ressource moyenne annuelle**. Le QMNA5 pourrait baisser de 5 à 65% selon les régions (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). **Les débits des mois d'août et de septembre des bassins à régime pluvial océanique pourraient baisser de 30 à 70% sur la plus grande partie du territoire** (Figure 29). Dans les bassins de montagne, les étiages estivaux pourraient être plus sévères (Annexe 1).

Cette baisse pourrait être particulièrement sensible dans le bassin Seine-Normandie, sur la rive gauche de la Garonne, ainsi que sur la moitié Nord du district Rhône-Méditerranée-Corse (Figure 24).

Concernant le risque de crue, **l'intensité des crues pourrait augmenter dans les Cévennes et dans le Nord-est de la France** (Figure 31).

Pour tous les indicateurs, au-delà des tendances générales, les tentatives de régionalisation des résultats doivent cependant être considérées avec la plus grande prudence : certaines « spécificités régionales » pouvant être parfois dues à des hypothèses du projet ou des incertitudes spécifiques, et non à un signal effectif.

DOM

Les travaux de modélisation réalisés sur les DOM sont affectés de fortes incertitudes, à la fois sur le niveau d'information climatique (peu de projections, pas de méthode de descente d'échelle fine, présence d'événements cycloniques très délicats à modéliser, etc.) et sur les performances de la modélisation hydrologiques, qui restent globalement assez modestes.

Compte tenu de ces incertitudes et des résultats obtenus, **il semble délicat de dégager des tendances claires pour ces départements.**

2.4 PRESENTATION PLUS DETAILLEE DES RESULTATS - METROPOLE

Ce paragraphe a vocation à présenter les principales tendances et résultats issus des travaux du lot Hydrologie de Surface sur la Métropole.

Les illustrations sont extraites du document A2 qui regroupe l'ensemble des cartes et graphiques produits par le lot Hydrologie de Surface concernant les évolutions hydrologiques possibles. Ce document inclut un guide de lecture des cartes et graphiques. Ce guide pourra aider la lecture des documents présentés dans le présent rapport.

La présentation plus détaillée comporte les éléments suivants :

- ▶ Une analyse des **évolutions climatiques possibles** : paragraphe 2.4.1 ;
- ▶ Une analyse des **évolutions hydrologiques possibles** qui comprend :
 - une analyse des aspects ressources en eau (paragraphe 2.4.2) divisée en :
 - une analyse des débits moyens annuels,
 - une analyse des débits d'étiage,
 - une analyse des crues (paragraphe 2.4.3) ;
- ▶ Une **synthèse à l'échelle des 6 grands districts hydrographiques de la métropole** sur les aspects climatiques et hydrologiques (paragraphe 2.4.4).

Ce paragraphe reprend pour partie certains des éléments contenus dans les paragraphes thématiques précédents en les regroupant sous une forme qui pourra intéresser les gestionnaires de ces districts. Cette synthèse comprend également un rebouclage avec des éléments de bibliographie issus d'autres projets qu'Explore 2070 conduits à l'échelle de ces districts hydrographiques.

Avertissement : Explore 2070 reste un exercice conduit à l'échelle nationale dont les résultats doivent principalement s'analyser à cette échelle. Les synthèses à l'échelle des districts constituent un mode d'analyse des résultats nationaux mais ne sauraient remplacer des exercices plus précis à l'échelle de ces districts. Ainsi, nous avons fait le choix, dans ce paragraphe 2.4.4, de ne pas présenter de carte zoomant sur chaque district. On se reportera aux cartes nationales (qui mentionnent les limites des districts.)

2.4.1 Quel climat possible à l'horizon 2046-2065 ?

L'analyse des simulations climatiques utilisées pour Explore 2070 permet de dégager les conclusions suivantes, basées sur l'analyse des Figure 15, Figure 16 et Figure 17.

TEMPERATURES

- ▶ En hiver et au printemps, la dispersion entre modèles est plus grande. L'écart de température en juin-juillet-août est un peu plus élevé que sur les autres périodes. Il s'élève alors de 2,2 à 2,5°C.
- ▶ Pour mémoire, le rapport « *Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08* » (Pagé, Terray, Boé, 2008) mentionnait les résultats suivant :
 - Au niveau des températures, les résultats montrent une réponse assez uniforme, autant l'hiver que l'été.
 - On note une augmentation de la température de l'ordre de 2,0 à 2,5 C de l'Ouest vers l'Est l'hiver, tandis qu'en été la répartition de l'augmentation est plutôt uniforme sur le territoire, avec un maximum sur les Alpes et un minimum sur la pointe bretonne.

Ces résultats ont été obtenus par l'analyse de 15 modèles du GIEC

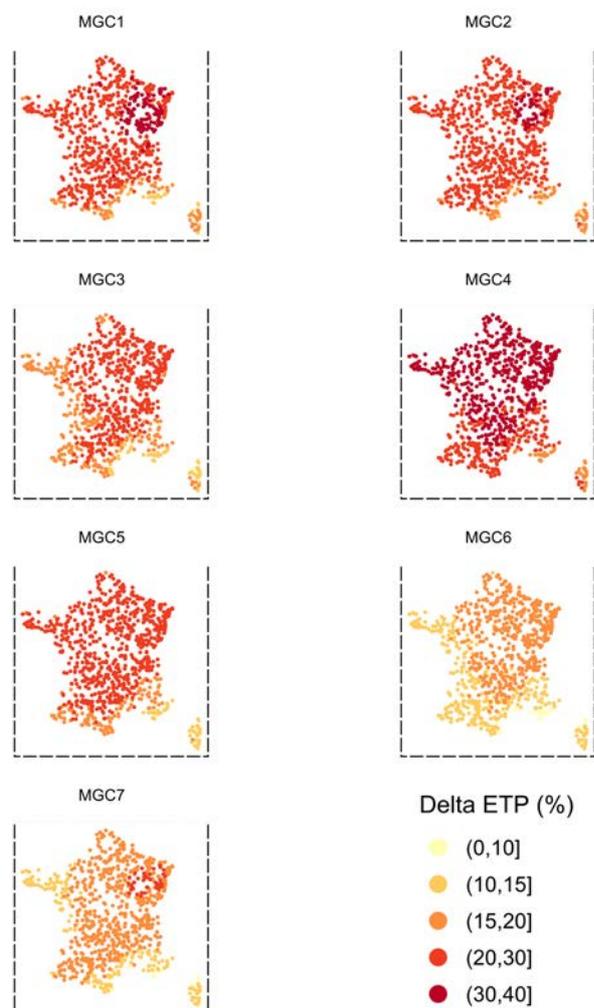
L'analyse des cartes de la Figure 15 aboutit sensiblement aux mêmes conclusions, bien que ne traitant qu'un sous-ensemble de 7 modèles parmi ces 15 modèles :

- ▶ **Tous les modèles vont dans le sens d'un réchauffement compris entre 1,4 et 3°C en moyenne annuelle.**
- ▶ Les écarts de température d'ECHAM5-MPI et GFDL CM2.1 en mars-avril-mai sont nettement plus faibles que pour les 6 autres modèles.
- ▶ En hiver, les écarts les plus forts sont dans le Nord-Est et s'affaiblissent en allant vers le Sud-Ouest.
- ▶ La répartition est plus homogène en été.
- ▶ A l'automne, l'Est présente des écarts un peu plus forts que l'Ouest.

ETP

Les évolutions de ce paramètre sont contrôlées principalement par les évolutions des températures. Les cartes suivantes présentent l'évolution de l'ETP moyenne annuelle (intégrée sur tout le bassin considéré et représentée au droit de son exutoire) pour chacun des bassins versants ayant fait l'objet d'une double simulation GR4J et Isba-Modcou et ceci pour chacun des 7 MCG.

Figure 14 : Evolution possible de l'ETP entre 1961-90 et 2046-65 (%) (543 points doubles)



PRECIPITATIONS

- ▶ **Une tendance à la baisse apparaît sur la moyenne multi-modèle, hormis en hiver où aucune tendance ne se dessine. Au printemps la baisse apparaît peu significative à l'échelle du territoire. C'est en été que les précipitations semblent le plus déficitaires avec des baisses de 23% à 16% de la valeur moyenne de référence.**
- ▶ Pour mémoire, le rapport « Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08 » (Pagé, Terray, Boé, 2008) mentionnait les résultats suivants :
 - Au niveau des précipitations, les résultats de la moyenne multi-modèles de la désagrégation montrent, en hiver, une augmentation des précipitations sur le relief méditerranéen, le Massif Central ainsi que sur les Pyrénées orientales, et un assèchement sur le pays Basque et la pointe bretonne.
 - La période estivale montre un tout autre portrait, soit une diminution des précipitations sur pratiquement tout le territoire, et de façon plus marquée sur le relief des Alpes, du Massif Central, et des Pyrénées. On remarquera également la dépendance forte par rapport à la topographie.

Ces résultats ont été obtenus par l'analyse de 15 modèles du GIEC.

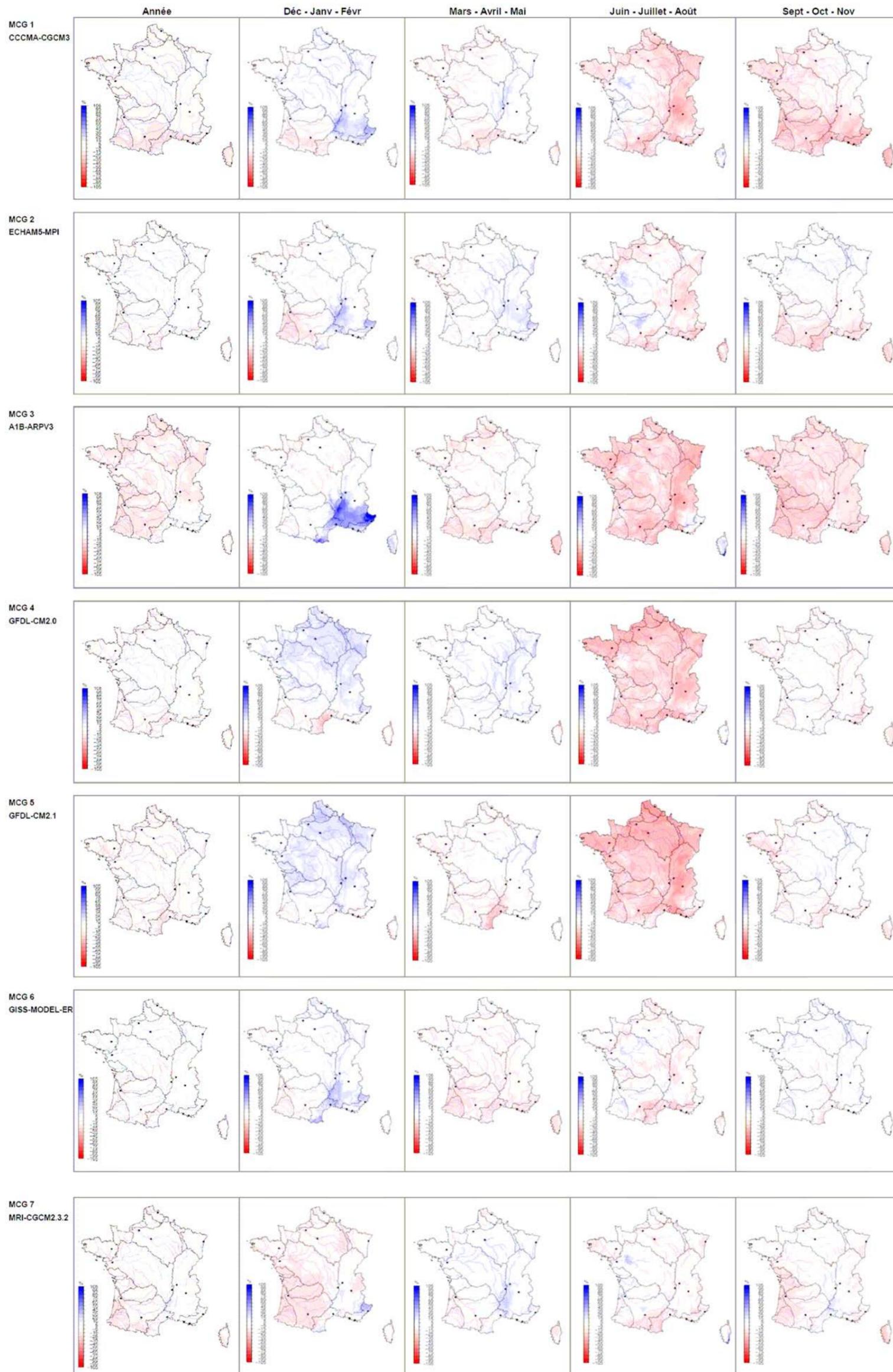
Pour leur majeure partie, l'analyse des cartes de la Figure 16 aboutit sensiblement aux mêmes conclusions, bien que ne traitant qu'un sous-ensemble de 7 de ces modèles.

Une grande disparité apparaît entre les modèles dans la répartition géographique des ratios de précipitations. L'extrême Sud-Ouest est déficitaire dans la majorité des cas.

Figure 15 : Evolutions possibles (°C) des températures annuelles et saisonnières en France entre 1961-90 et 2046-65, résultats issus des sept modèles de circulation générale utilisés pour Explore 2070.

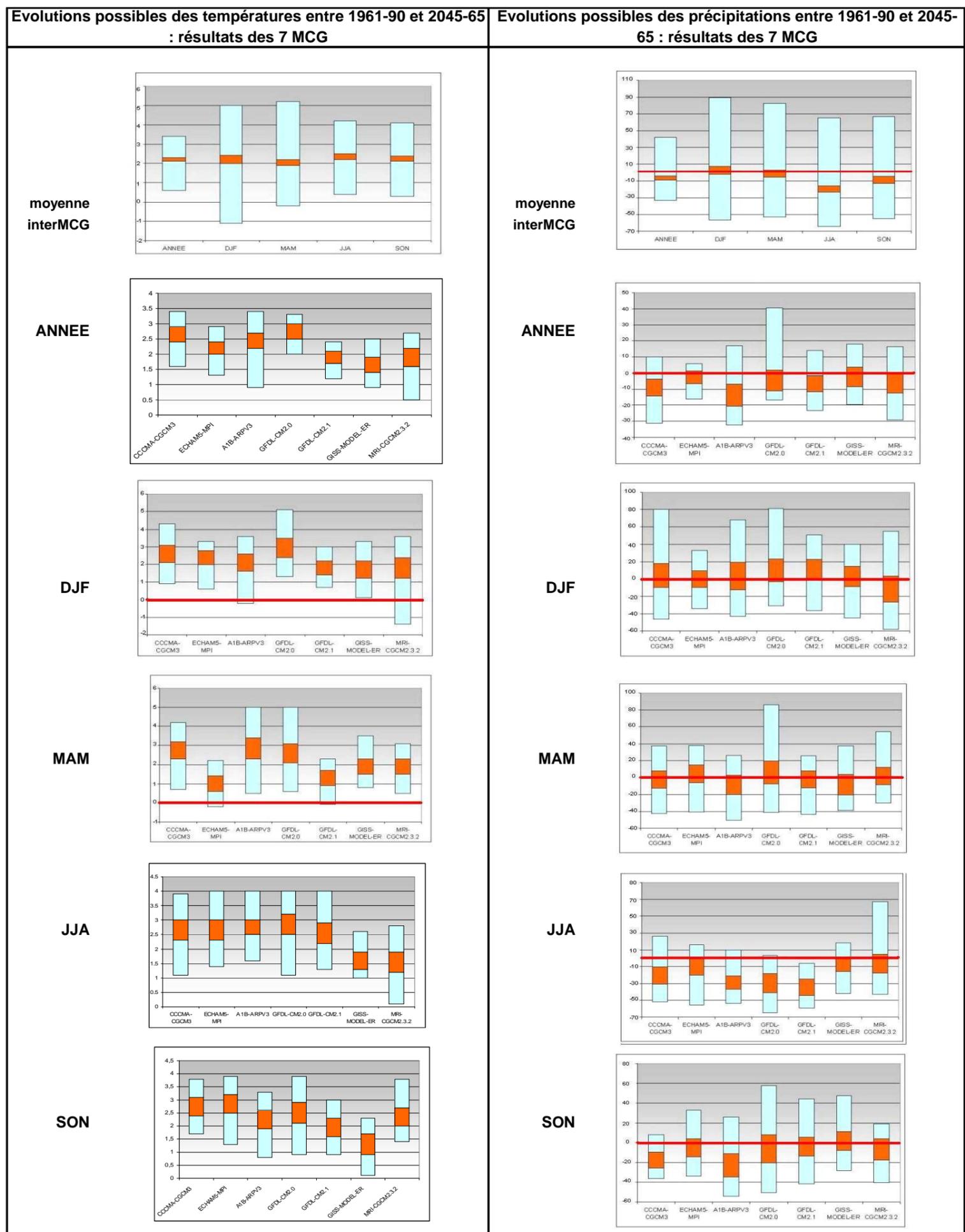


Figure 16 : Evolutions possibles (en %) des cumuls de précipitations annuelles et saisonnières en France entre 1961-90 et 2046-65 : résultats issus des sept modèles de circulation générale utilisés pour Explore 2070



Les graphiques de la Figure 17 rendent compte des résultats des 7 MCG en termes d'anomalies de précipitations et de températures, et de la variabilité de ces résultats. La zone orange de chaque diagramme en boîte correspond à l'intervalle de confiance à 95% des résultats. Les bornes de boîtes bleues sont définies par les valeurs extrêmes des 7 simulations⁴.

Figure 17 : Ecarts de valeur moyenne des températures (en °C) et précipitations (en %) quotidiennes Safran simulées pour la France métropolitaine entre simulations 2046-2065 et référence 1961-1990 pour l'année et les quatre saisons. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour l'ensemble des 7 simulations-scénario A1B.



⁴ Voir l'Annexe 3 pour une explication détaillée de ces graphiques

2.4.2 Ressource en eau : pratiquement partout, les écoulements vont se réduire et les étiages seront plus sévères

L'analyse des résultats permet de détecter quelques grandes tendances sur lesquelles les 14 projections s'accordent. Il s'agit des principales conclusions à retenir quant à l'évolution possible de la ressource en eau à l'horizon 2050-70. Elles sont détaillées ci-après.

RESSOURCE MOYENNE ANNUELLE

En résumé

Les chiffres donnés ci-dessous sont les anomalies calculées entre les simulations futures (2046-65) et les simulations passées (1961-90).

Les résultats d'Explore 2070 s'accordent sur les évolutions futures possibles suivantes :

- ▶ **Une baisse globale du débit moyen annuel sur toute la métropole**, à l'exception des affluents rive droite du bas Rhône, sur laquelle les différentes projections sont en désaccord. (Figure 18 et Figure 19).
- ▶ **La cause prépondérante de cette baisse est l'augmentation significative de l'évapotranspiration potentielle, simulée sur tout le territoire par l'ensemble des modèles climatiques.** Cette augmentation, couplée à une baisse des cumuls de précipitations annuelles sur la majeure partie du territoire, induit une augmentation de l'aridité des bassins versants. (Figure 22). Cela s'accompagne d'une baisse générale de la productivité des bassins versants (Figure 23).
- ▶ **Pour une majorité de points, le débit moyen annuel pourrait baisser de l'ordre de 10 à 40%** (Figure 18)
- ▶ **Une baisse particulièrement marquée de débit moyen annuel pour les cours d'eau des contreforts pyrénéens.** Les 14 projections s'accordent sur une baisse particulièrement marquée dans cette zone, relativement aux autres régions. Cette baisse prend cependant des valeurs s'étendant de 10 à 60% selon les points de calcul et selon les modèles utilisés (Figure 18 et Annexe 1).
- ▶ On observe également, pour une majorité de projections, une **baisse particulièrement forte du débit moyen annuel sur la majorité du district hydrographique Seine-Normandie**, de 10 à 60% (Figure 18 et Annexe 1).
- ▶ En ce qui concerne les affluents rive droite du bas Rhône, on ne peut conclure sur l'évolution des écoulements moyens annuels, on note cependant une baisse significative des débits des mois de mai à octobre (Figure 18 et Annexe 1).
- ▶ **Sur le reste du territoire, il est difficile de statuer sur de fortes tendances régionales.**
- ▶ De façon générale, les tentatives de régionalisation des résultats doivent être menées avec la plus grande prudence : certaines « spécificités régionales » pouvant être dues à des hypothèses du projet ou des incertitudes spécifiques, et non à un signal effectif.

Tendances générales

La Figure 18 et la Figure 19 rendent compte de ces grandes tendances.

Figure 18 : Evolutions relatives possibles du débit moyen annuel (en %) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats produits par les deux modèles hydrologiques alimentés par les sorties désagrégées des 7 modèles climatiques.

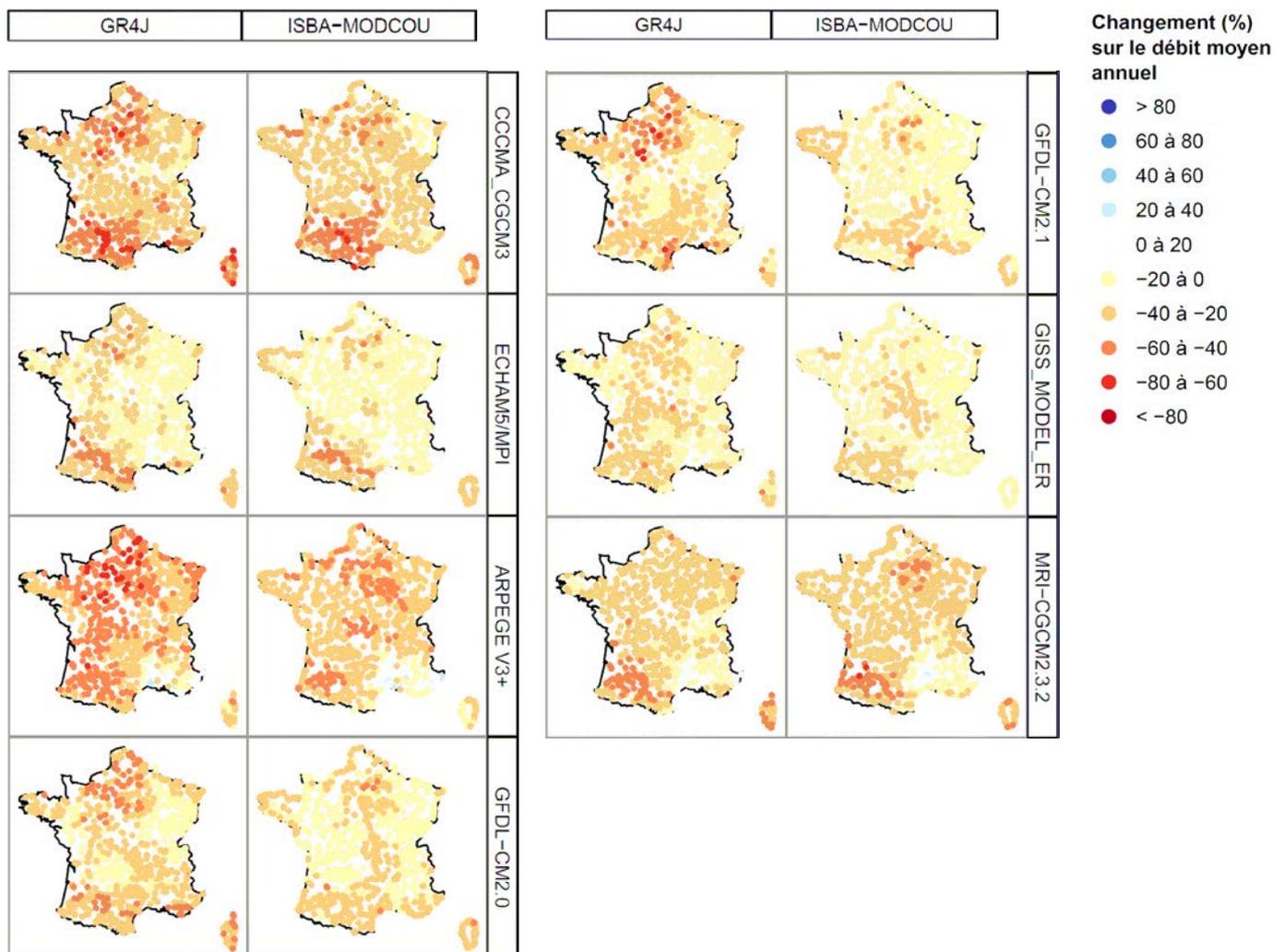
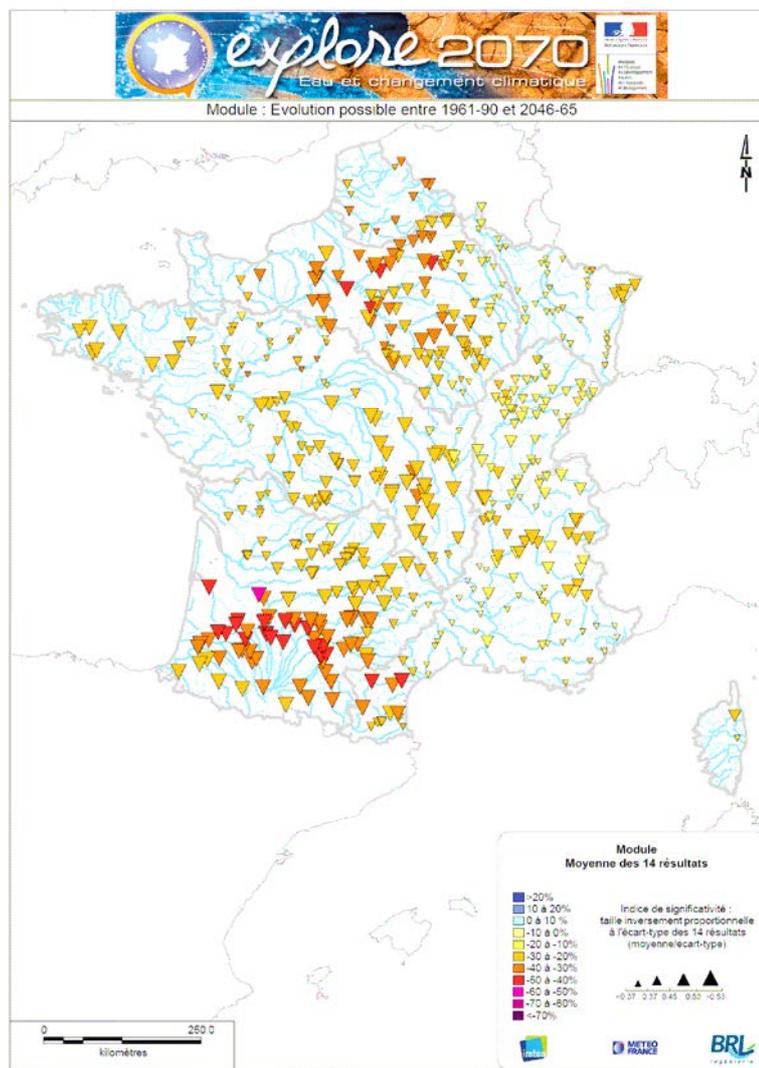


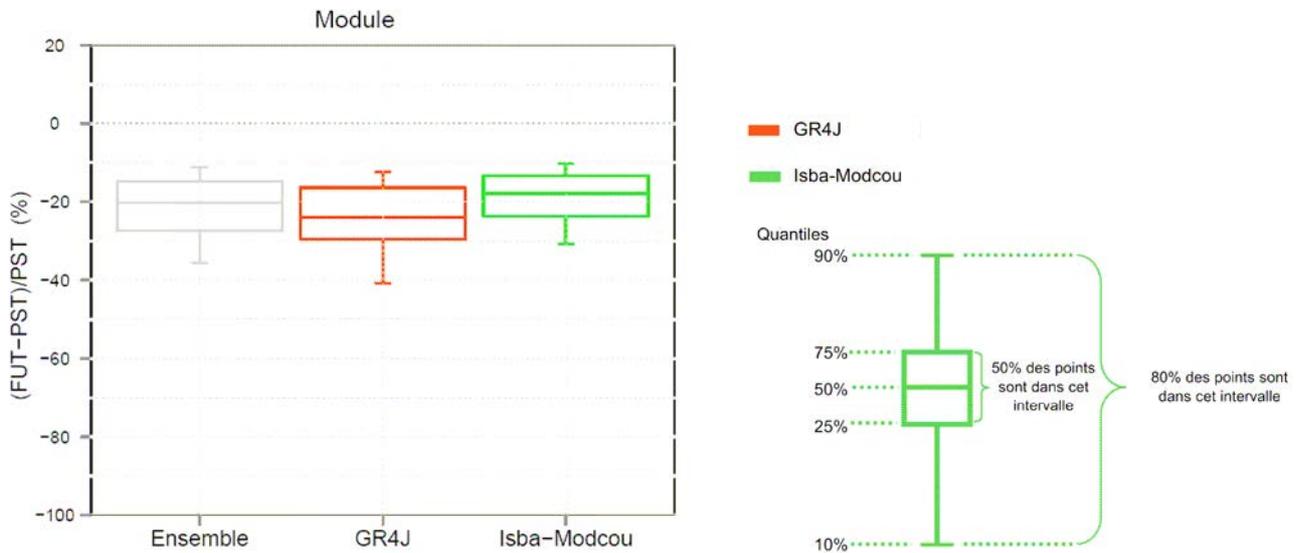
Figure 19 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques x 7 MCG). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.



Les deux figures précédentes montrent les points pour lesquels les 14 projections utilisées dans Explore 2070 s'accordent :

- ▶ Une **forte baisse du module sur les bassins du contrefort pyrénéen** de l'ordre de 40% à 50% en moyenne (à plus ou moins 20% selon les modèles).
Cette tendance régionale serait due notamment à une baisse importante des précipitations dans cette zone, baisse des moyennes annuelles et saisonnières indiquée par la quasi-totalité des modèles climatiques utilisés. (Figure 15 et Figure 16).
- ▶ Une **baisse significative au niveau du bassin Seine-Normandie**, de l'ordre de 30% à 50% en moyenne (à plus ou moins 20% selon les modèles).
Cette baisse serait notamment la conséquence d'une tendance forte à des étiages plus sévères, comme décrit plus bas.
- ▶ Une **baisse moyenne de l'ordre de 20% à 30% au centre du territoire** (à plus ou moins 20% selon les modèles).
- ▶ Dans le Sud-Est et le Nord-Est de la métropole, de fortes divergences des résultats ne permettent pas de statuer sur la tendance.

Figure 20: Boîtes à moustache des évolutions relatives possibles du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65, établies sur les médianes des évolutions simulées sur les 543 bassins où l'on dispose de 14 simulations.

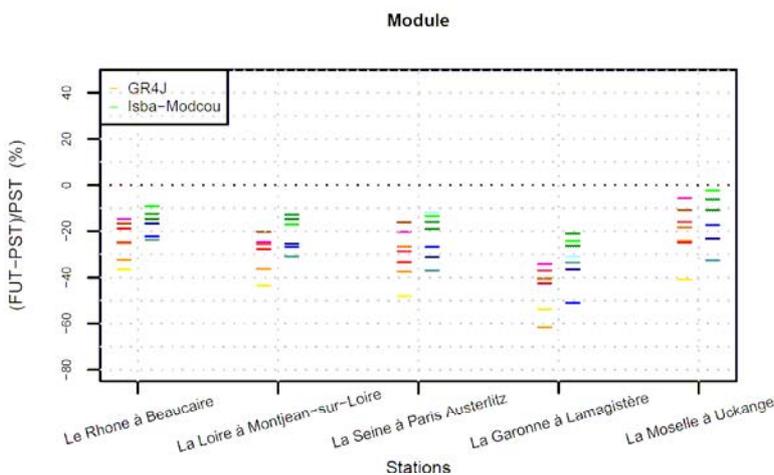


- Il ressort des simulations une grande dispersion des résultats selon la chaîne de modèle utilisée : pour un point donné, l'écart entre les 14 projections est de l'ordre de 40 points (voir graphique GN4-2 du document A2).
- Cet ordre de grandeur doit permettre de nuancer les résultats de la carte de la Figure 19 : les valeurs représentées (en %) sont en fait estimées à plus ou moins 25% près.

Une analyse complémentaire des quelques particularités régionales observées est proposée en Annexe 1.

Exutoires des grands bassins

Figure 21: Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 projections pour cinq grands bassins versants



Lecture du graphique :

Pour 5 grands bassins versants, on présente les résultats issus des 14 simulations, en termes de baisse possible du module. L'écart entre les 14 valeurs permet d'avoir un aperçu de la dispersion entre les résultats. Elle varie de 30 à 60 points.

Pour la majorité des exutoires des grands bassins (voir Figure 21), on peut s'attendre à une baisse de l'ordre de 10 à 40% du débit moyen annuel, à l'exception du bassin de la Garonne pour lequel cette baisse pourrait atteindre 20 à 60%.

Les facteurs de changement

L'analyse croisée des évolutions climatiques et hydrologiques simulées par les chaînes de modèles nous permettent de penser que :

- ▶ D'une part, **le facteur climatique qui joue un rôle prépondérant pour les évolutions hydrologiques futures est probablement l'évapotranspiration potentielle**. D'après la Figure 22 les variations d'ETP sont en général plus importantes que les variations de lame d'eau précipitée au pas de temps annuel, pour la plupart des modèles climatiques et la plupart des points d'études.
- ▶ Par ailleurs, une étude de sensibilité du modèle GR4J vis-à-vis des évolutions de températures et de précipitations montre que **la tendance globale à la baisse des débits moyens, à l'échelle du territoire, est plus liée à l'augmentation globale de la température qu'aux évolutions sur les précipitations**. L'augmentation de la température entraîne une augmentation nette de la demande évaporatoire, ce qui va limiter fortement les volumes disponibles pour les écoulements. Cependant, les variations entre bassins de l'intensité globale de la baisse semblent davantage liées à la variabilité spatiale des évolutions des précipitations.

Voir étude détaillée en Annexe 2.

- ▶ Cette augmentation significative de l'ETP pour l'ensemble des bassins versants induit une **augmentation générale de l'aridité sur l'ensemble du territoire** (représentée par le coefficient ETP/P : voir la Figure 23). Cela engendre **une baisse de productivité des bassins versants** (représentée par le coefficient Q/P : voir la Figure 23). Ces résultats se généralisent pour les sept MCG.

Figure 22 : Evapotranspiration potentielle (mm/an) et Cumul de précipitations annuel (mm/an) simulés en temps présent et futurs par les modèles climatiques MGC1, MGC2 et MGC3.

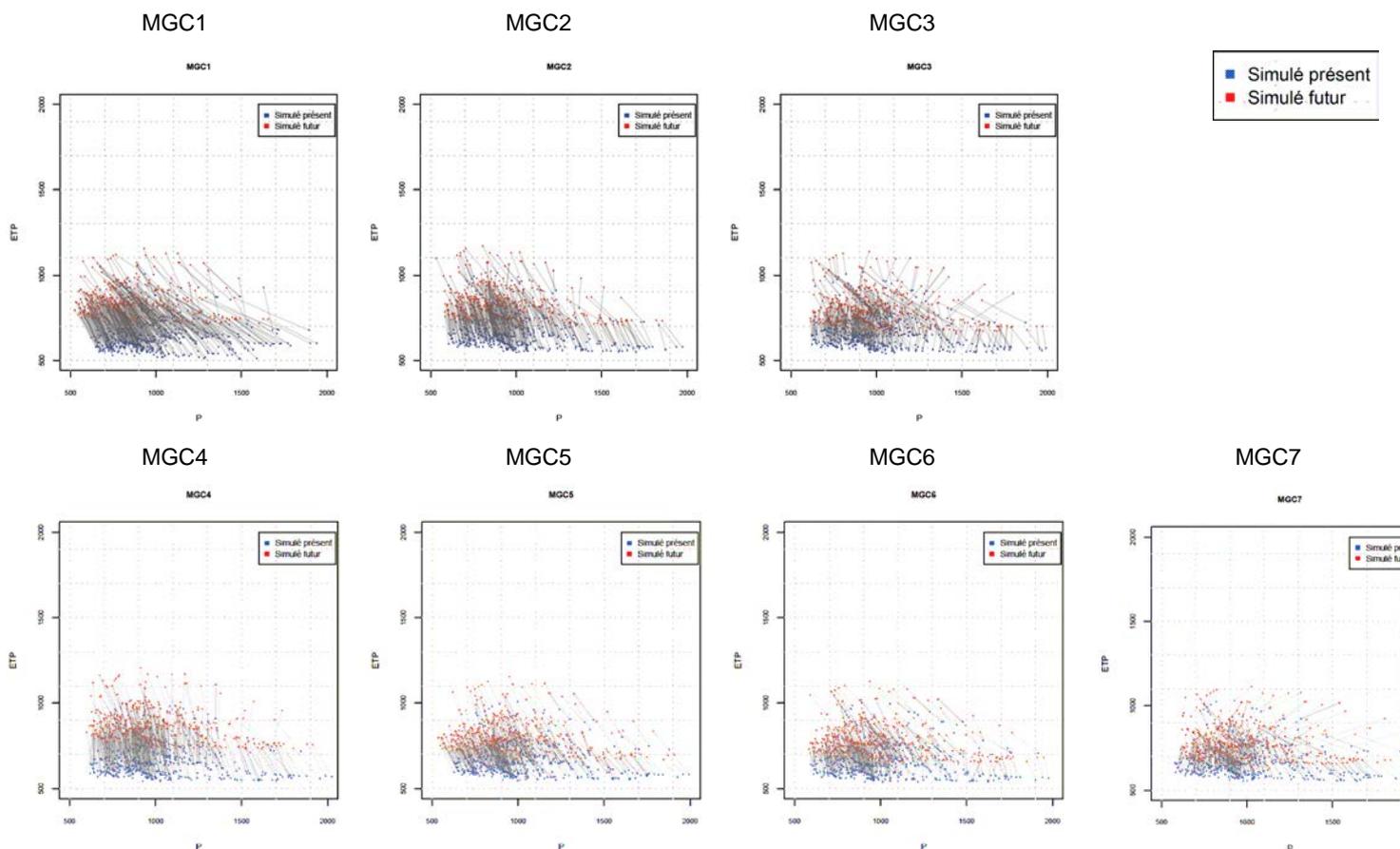
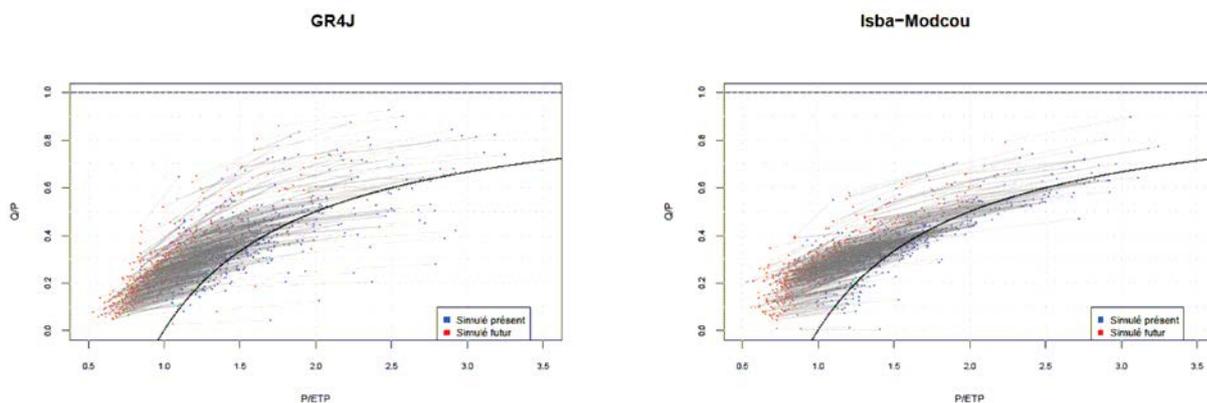


Figure 23 : Coefficients d'écoulement (Q/P) en fonction de l'inverse de l'indice d'aridité (P/ETP) simulés en temps présent et futur par le modèle climatique MGC1 et les deux modèles hydrologiques.



DEBITS D'ETIAGE

En résumé

Les chiffres donnés ci-dessous sont les anomalies calculées entre les simulations futures (2046-65) et les simulations passées (1961-90).

Les résultats d'Explore s'accordent sur les points suivants :

- ▶ Une baisse générale des débits d'étiage pour la majorité des bassins de la métropole.
- ▶ Pour la plupart des bassins et des simulations, la baisse du QMNA5 (débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans) est de l'ordre de 5% à 65% (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).
- ▶ On peut s'attendre, pour une majorité de bassins de régime pluvial-océanique, à une baisse de 10 à 70% des débits des mois d'août et de septembre (Figure 26 et Figure 29).
- ▶ Les résultats sont plus dispersés pour les étiages que pour les ressources moyennes annuelles (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).
- ▶ Une majorité des projections (notamment les projections GR4J) indiquent une baisse de la ressource plus sévère en période d'étiage qu'en moyenne annuelle (Figure 24) sur la majeure partie du territoire.
- ▶ Dans les bassins de montagne :
 - les projections s'accordent sur des étiages estivaux plus sévères ;
 - les projections divergent concernant l'évolution des étiages hivernaux (Annexe 1).

Tendances générales

Figure 24 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans

(QMNA5) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations.

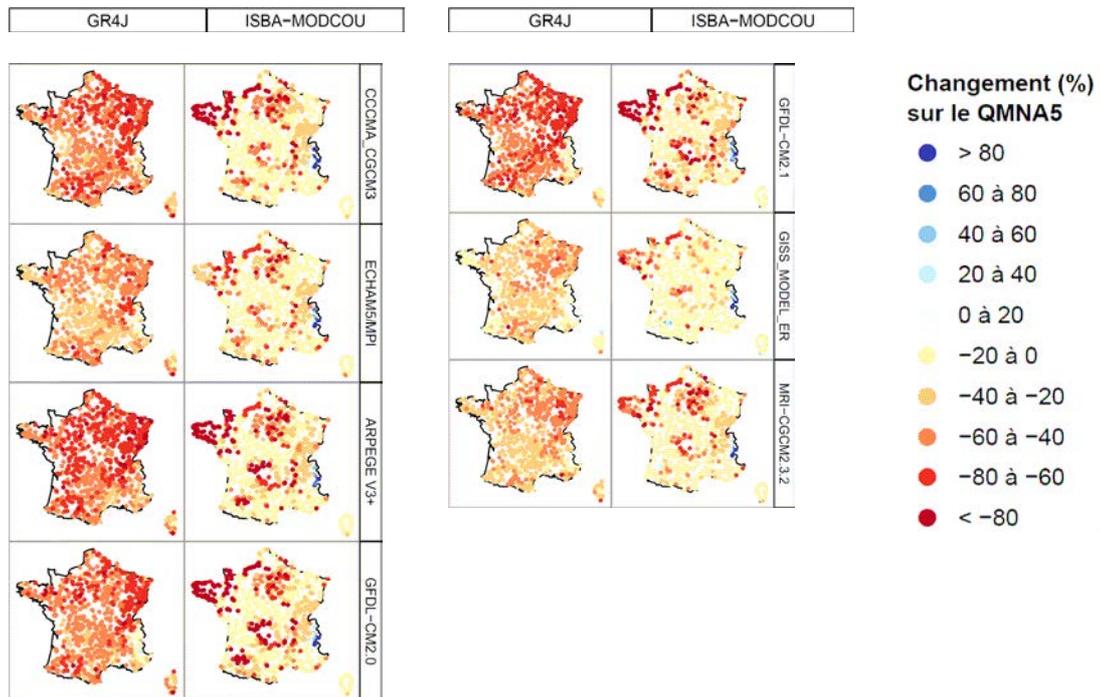
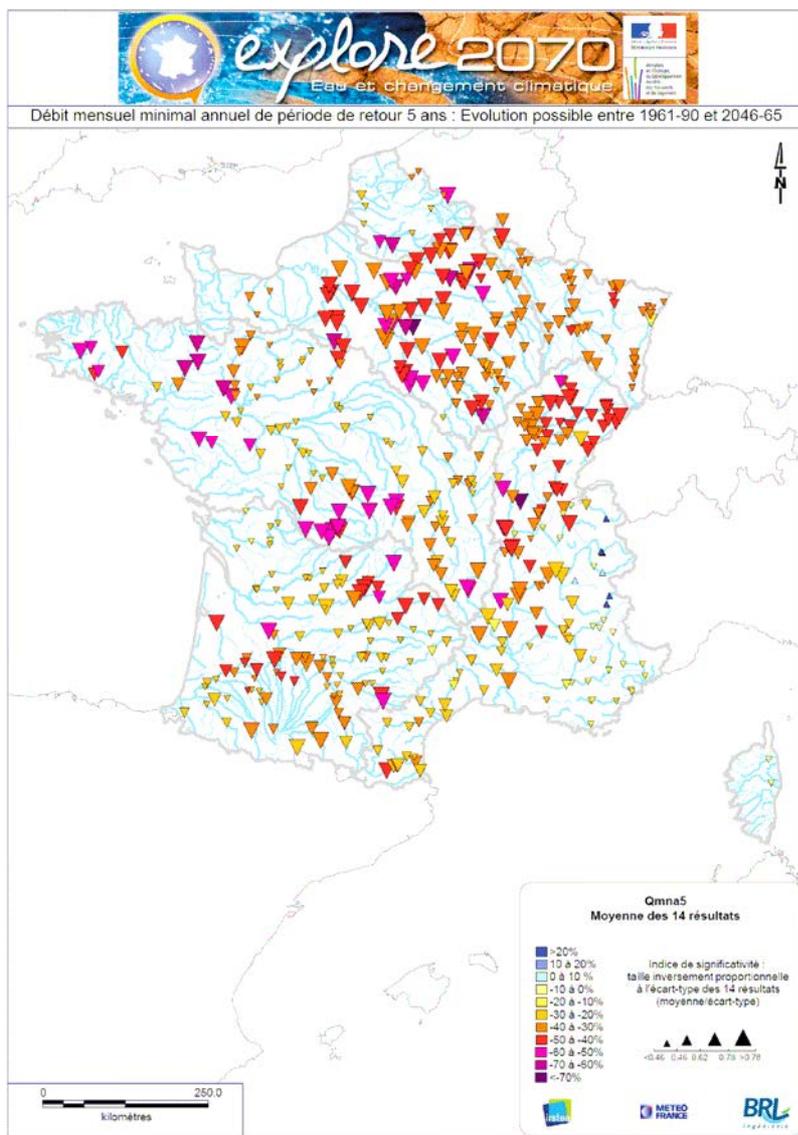


Figure 25 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans (QMNA5) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques x 7 MCG). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.



La carte de la Figure 25 montre que :

- ▶ Le QMNA5 pourrait baisser de 30% à 60% en moyenne dans le bassin Seine-Normandie (à plus ou moins 30% selon les projections).
- ▶ Le QMNA5 pourrait baisser de 30% à 50% en moyenne sur le piémont pyrénéen (à plus ou moins 30% selon les projections)

Figure 26 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen du mois d'août entre 1961-90 et 2046-65 :
Résultats des 14 simulations.

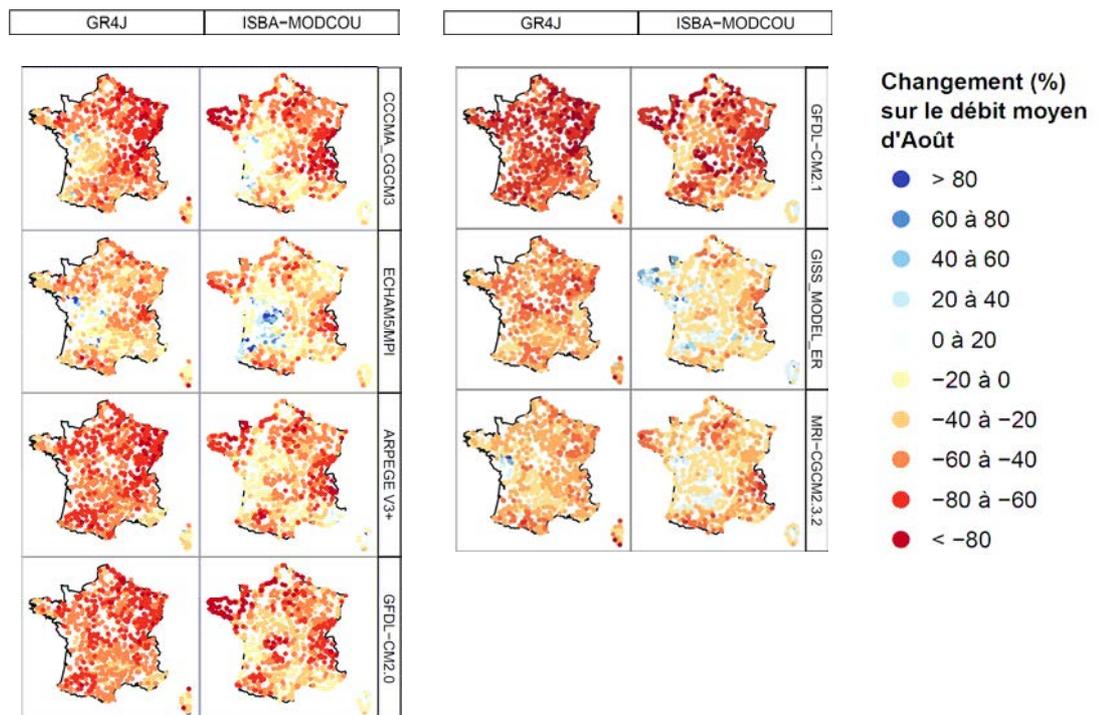
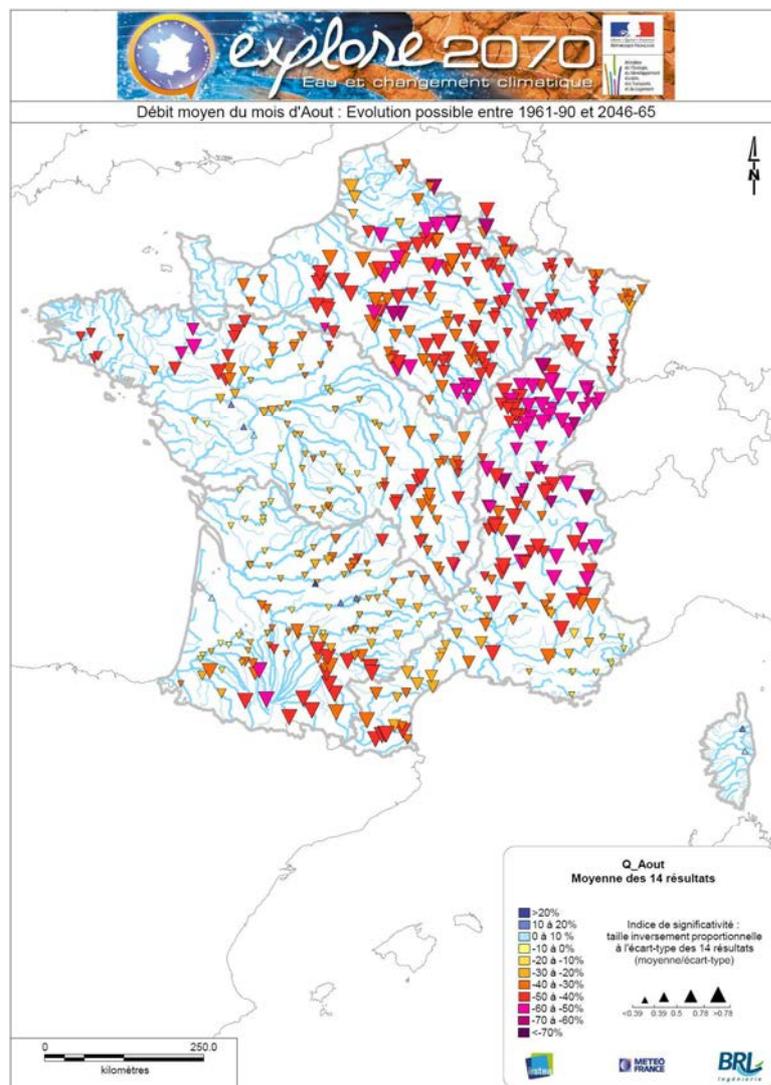


Figure 27 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen du mois d'août entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques x 7 MCG). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.



La Figure 26 et la Figure 27 montrent que :

- ▶ Le débit moyen du mois d'août pourrait baisser de 40 à 60% sur le district Seine-Normandie (à plus ou moins 20% près selon les projections).
- ▶ Le débit moyen du mois d'août pourrait baisser de 50 à 60% sur la moitié Nord du district Rhône-Méditerranée-Corse (à plus ou moins 20% selon les projections).
- ▶ Le débit moyen du mois d'août pourrait baisser de 40 à 50% sur le piémont pyrénéen (à plus ou moins 20% selon les projections).
- ▶ La divergence des modèles dans la zone centre-ouest de la France ne permet pas de statuer sur la tendance du débit du mois d'août. Cette incertitude vient notamment des divergences des modèles climatiques dans les prédictions de précipitations estivales.

Figure 28 : Boîtes à moustache des évolutions relatives possibles (en %) du débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans (QMNA5) entre 1961-90 et 2046-65, établies sur les médianes des évolutions simulées sur les 543 bassins où l'on dispose de 14 simulations.

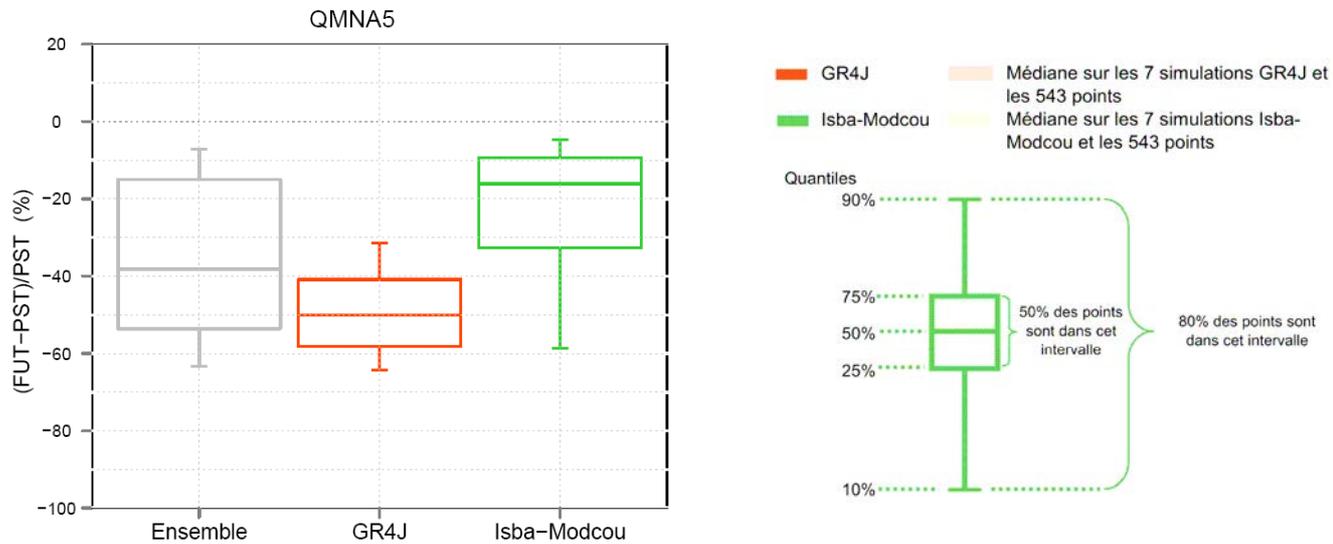
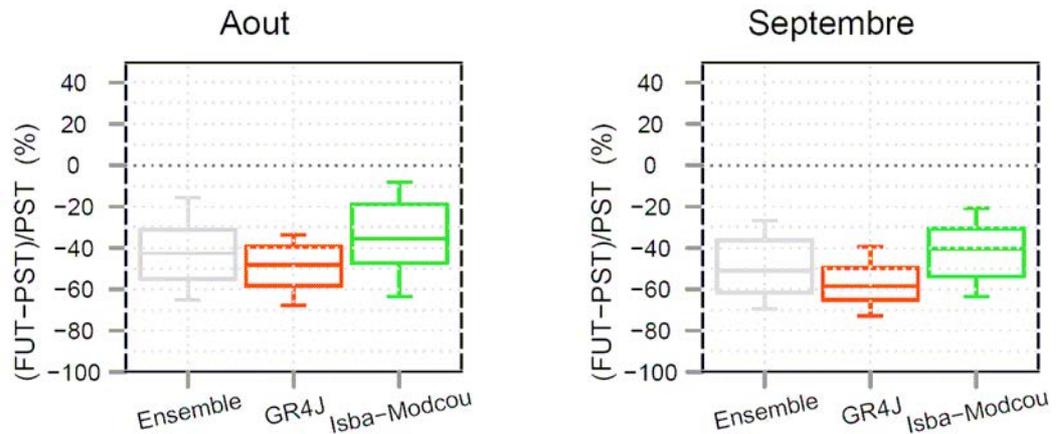


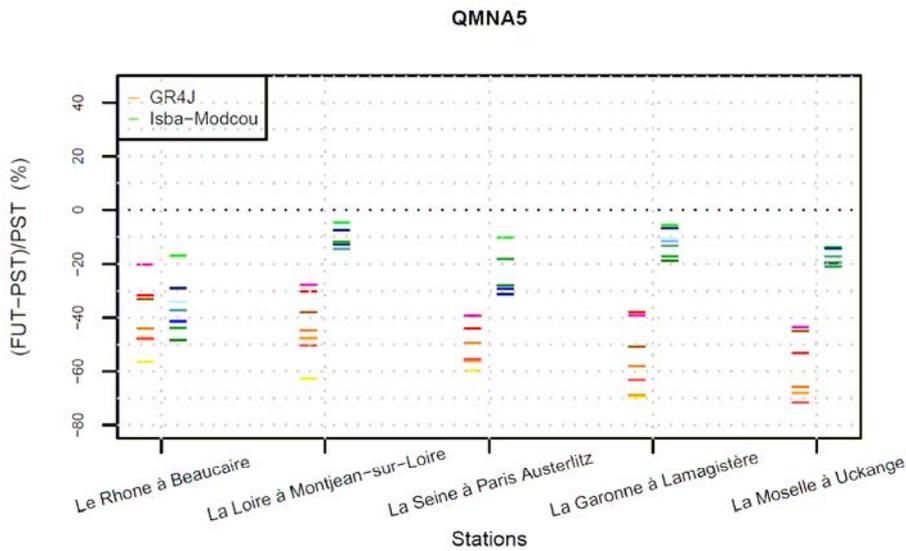
Figure 29 : Boîtes à moustache des évolutions relatives possibles (en %) des débits moyens des mois d'août et septembre entre 1961-90 et 2046-65, établies sur les médianes des évolutions simulées sur les 543 bassins où l'on dispose de 14 simulations.



- Il faut noter que la dispersion entre les 14 simulations est particulièrement fort pour les débits d'étiages. On note que 80% des points doubles présentent une évolution du QMNA5 comprise entre 5 et 65% (voir graphique GN4-2 du document A2). Pour un point donné, l'écart entre les 14 résultats est de l'ordre de 60 points en moyenne.

Exutoires des grands bassins

Figure 30 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans (QMNA5) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 projections pour cinq grands bassins versants.



Lecture du graphique :

Pour 5 grands bassins versants, on présente les résultats issus des 14 simulations, en termes de baisse possible du module. L'écart entre les 14 valeurs permet d'avoir un aperçu de l'intervalle de confiance lié aux résultats. Il varie de 30 à 60 points.

Tous les modèles prédisent des étiages plus sévères à l'exutoire des grands bassins versants français (voir Figure 30), avec des résultats cependant très hétérogènes : le Rhône à Beaucaire pourrait subir une baisse de QMNA5 de 20 à 50% ; la Garonne à Lamagistère pourrait voir son QMNA5 baisser de 5 à 70% à l'horizon 2050.

Une analyse complémentaire concernant certaines particularités régionales est proposée en Annexe 1.

2.4.3 Les évolutions possibles des crues sont contrastées à l'échelle nationale

En résumé

Les chiffres donnés ci-dessous sont les anomalies calculées entre les simulations futures (2046-65) et les simulations passées (1961-90).

Compte tenu de la disponibilité des données hydrométriques disponibles à l'échelle du projet (1522 points d'étude, sur une période de référence 1961-1990), l'analyse se limite pour la majorité des points de calcul à l'étude de l'évolution des crues décennales : les périodes de disponibilité de données et les contraintes du projet permettant pour un nombre trop restreint de bassins d'étudier les crues de temps de retour plus élevé. L'analyse ci-après se concentre donc sur l'évolution possible de l'indicateur **QJXA10 (Débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans)** à l'horizon 2050.

L'étude des résultats d'Explore 2070 conduit aux conclusions suivantes :

- ▶ **L'intensité des crues pourrait augmenter dans les Cévennes, et dans le Nord-est de la France** (partie Est du district Rhin-Meuse) (Figure 31).
- ▶ Les zones de haut relief (Alpes, Pyrénées, Jura), la rive gauche de la Garonne et les 2/3 ouest du district Seine-Normandie sont des zones pour lesquels le QJXA10 pourrait baisser à l'horizon 2050 (Figure 31).
- ▶ On ne détecte pas de tendance significative sur le reste du territoire.
- ▶ On note une **grande variabilité des résultats** et des tendances selon les 14 projections et pour les différents bassins français (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Les résultats suivants précisent ces conclusions.

Tendances générales

Figure 31 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans (QJXA10) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations.

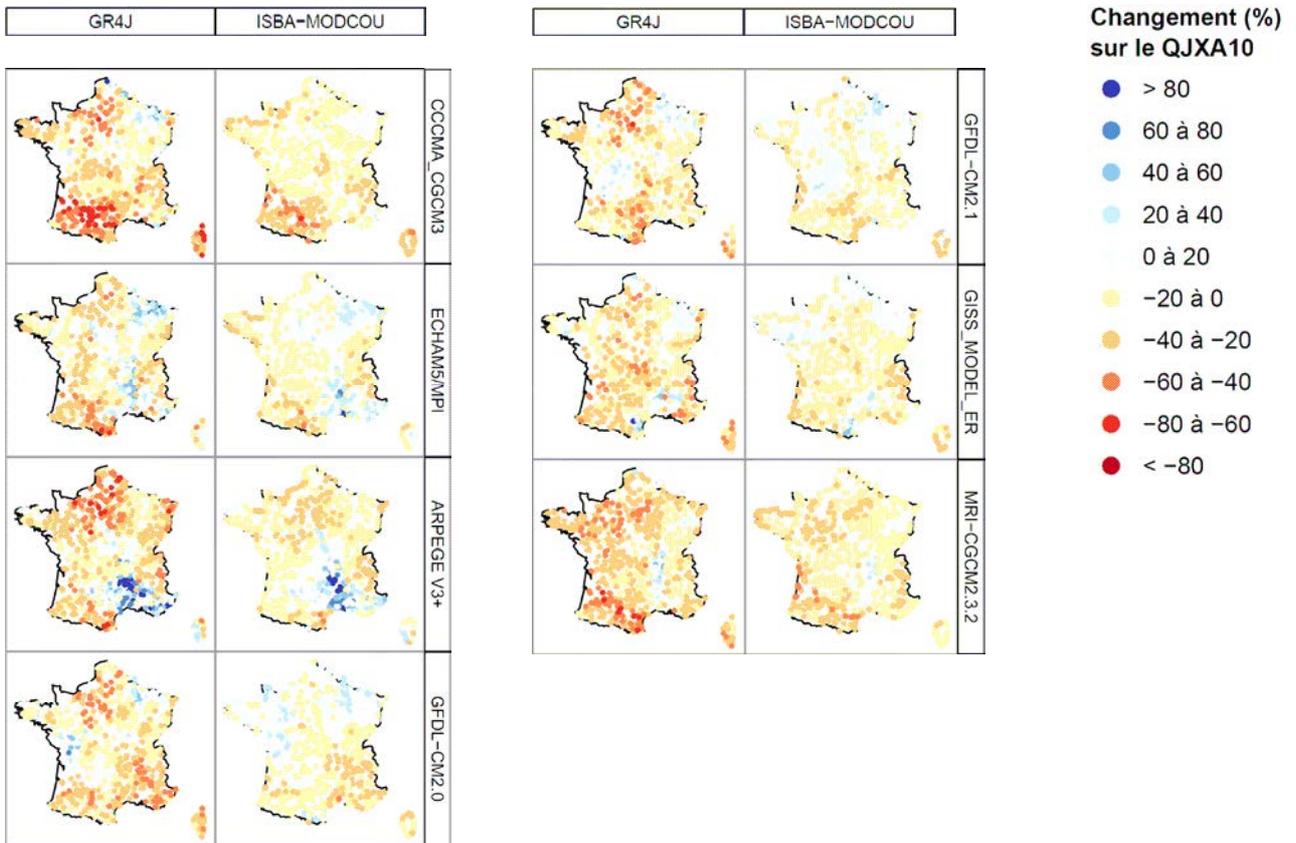
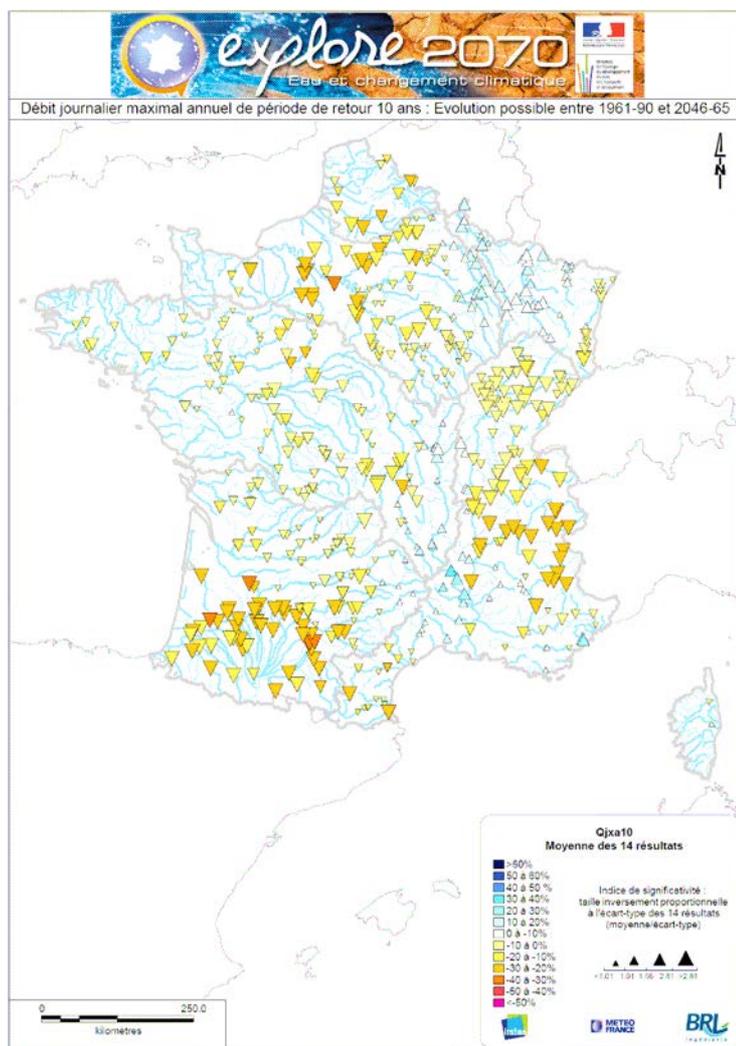


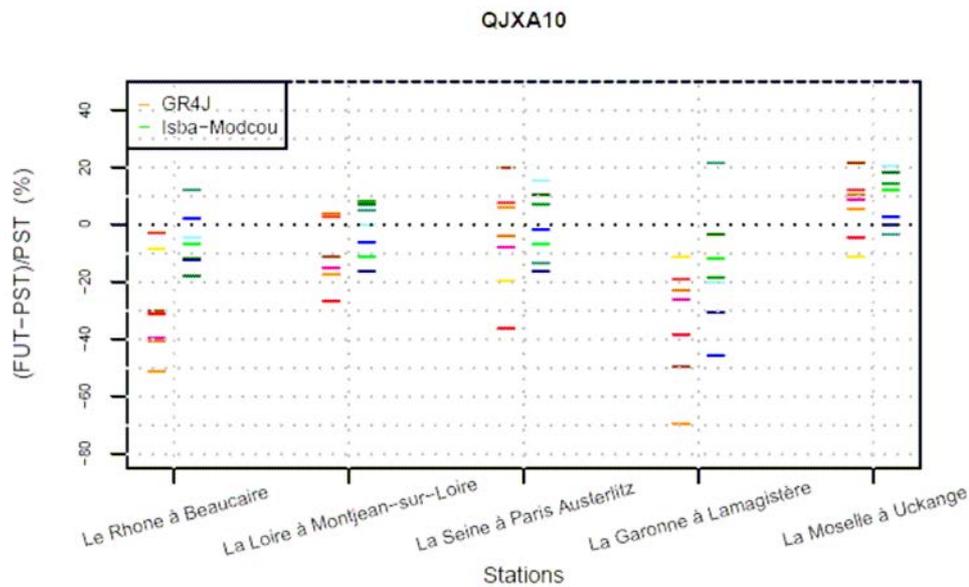
Figure 32 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans (QJXA10) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques x 7 MCG). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.



On note une forte hétérogénéité des résultats présentés à la Figure 31. D'après ces résultats, on peut s'attendre à une augmentation possible de l'intensité des crues dans les Cévennes, ainsi que dans le Nord-Est de la France. Dans le Nord-Est, le QJXA10 pourrait augmenter de l'ordre de 0 à 30%. Dans les Cévennes, les résultats sont très divergents d'un modèle à l'autre.

Exutoires des grands bassins

Figure 33 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans (QJXA10) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations pour cinq grands bassins versants.



Lecture du graphique :

Pour 5 grands bassins versants, on présente les résultats issus des 14 simulations, en termes de baisse possible du module.

Ce graphe illustre la dispersion des résultats.

2.4.4 Analyse des tendances par district hydrographique et retour sur les études existantes

On présente ci-après les **tendances à l'échelle des six districts hydrographiques** (correspondant aux zones de compétence des Agences de l'eau), issues des 14 projections hydro-climatiques produites par Explore 2070. Ces résultats sont mis en perspective avec les études existantes sur ces bassins. Le caractère comparable ou non avec ces études antérieures est analysé en Annexe 6. Certaines études ont fait des hypothèses très différentes de celles faites dans Explore 2070, ce qui réduit l'intérêt de la comparaison des résultats. Notons que l'étude de Boé et al. (2009) a été réalisée dans les mêmes conditions qu'Explore 2070 en ce qui concerne le modèle Isba-Modcou. Les tendances sont donc similaires à celles annoncées par ce modèle.

Pour chaque district, on présente deux graphiques :

- ▶ Les évolutions climatiques et hydrologiques au droit d'un point de calcul situé généralement en aval du district et sur une rivière importante. Les résultats des 14 projections sont présentés, rendant ainsi compte d'une part de l'incertitude.
- ▶ Une vue globale des évolutions médianes au droit des points de calcul situés dans le district considéré. Les médianes des 14 projections étant seulement prises en compte, ces graphes ne rendent pas directement compte de l'incertitude liée aux modèles, en revanche, ils rendent compte de la disparité spatiale des résultats.

2.4.4.1 Adour-Garonne

Sur le district Adour-Garonne, l'analyse se base sur les 121 points de calcul pour lesquels on disposait de 14 projections.

Evolutions climatiques

- ▶ Les cumuls de précipitations annuels pourraient baisser de l'ordre de 5 à 20% selon les projections, avec une médiane de l'ordre de 5 à 10%. L'évapotranspiration annuelle pourrait augmenter de 10 à 30%.

Débits annuels

- ▶ Le sud du district Adour-Garonne, les contreforts pyrénéens, constituent une zone pour laquelle la baisse de la ressource en eau pourrait être particulièrement sensible. Dans cette zone, les débits moyens annuels pourraient baisser de 10 à 60% selon les projections. La zone la plus critique semble être la Garonne moyenne. Les 14 projections ont sur cette zone un indice de convergence élevé, indiquant la significativité de cette tendance.
- ▶ Cette spécificité régionale pourrait s'expliquer en partie par une baisse importante des précipitations annuelles et saisonnières, simulée par la quasi-totalité des modèles climatiques utilisés.
- ▶ Dans la moitié nord du district Adour-Garonne (bassins du Lot et de la Dordogne), les projections s'accordent sur une baisse du débit moyen annuel moins accentuée, de l'ordre de 10 à 40%.

Etiages

- ▶ Le QMNA5 pourrait baisser de l'ordre de 0 à 65% selon les projections et les cours d'eau, avec de très fortes baisses sur la Garonne moyenne, comme pour les débits moyens. Les parties amont des bassins du Lot et de la Dordogne semblent davantage impactés en étiage que pour les débits annuels. Notons que les gammes de baisses fournies par les deux modèles hydrologiques sont assez différentes (plus importantes pour le modèle GR4J).

Crues

- ▶ La quasi-totalité des projections s'accordent sur une baisse de l'intensité des crues décennales, plus prononcée sur la partie pyrénéenne et la Garonne moyenne. Cette baisse semble moins sensible et plus incertaine sur la partie nord du district, avec une moins bonne convergence des projections.

Comparaison aux études antérieures

Le projet Imagine 2030 avait pour objectif de quantifier les évolutions de la ressource en eau sur le bassin de la Garonne en amont de Lamagistère à l'horizon 2030. Bien que cette échéance ne soit pas la même que celle d'Explore 2070, les résultats d'Explore 2070 vont dans le même sens, avec une diminution marquée du débit moyen et des débits d'étiage. Ils sont également cohérents avec ceux de Tisseuil et al. (2010) qui avaient analysé les évolutions de débit sur 51 bassins d'Adour-Garonne, montrant une baisse généralisée et significative des débits estivaux.

Les tendances d'Explore 2070 sont nettement plus marquées que celles proposées par Caballero et al. (2007) au même horizon sur le district Adour-Garonne, qui étaient de l'ordre de -10% sur les bas débit. Cette étude avait été réalisée avec le modèle hydrologique Isba-Modcou, mais avec des projections plus anciennes et un scénario de gaz à effet de serre B2 (moins impactant, en particulier en termes de hausses de températures).

Principales références :

- ▶ Caballero, Y., Voirin-Morel, S., Habets, F., Noilhan, J., Le Moigne, P., Lehenaff, A. & Boone, A. (2007). Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resour. Res.* 43, W07448, 19 doi:10.1029/2005WR004192.

-
- ▶ Sauquet, E., Dupeyrat, A., Hendrickx, F., Labedade, R., Samie, R., Vidal, J-P., Perrin, C., Boudhraa, H. & Gaëckler, M. (2009). Impacts anthropiques et étiages de la Garonne à l'horizon 2030. Proceedings of the "Colloque 193 SHF : Etiages, Sécheresses, Canicules rares et leurs impacts sur les usages de l'eau", Lyons, France, 7-8/10/ 2009.
 - ▶ Tisseuil, C., Vrac, M., Lek, S. & Wade, A.J. (2010). Statistical downscaling of river flows. *Journal of Hydrology*, 385: 1-4, 279-291.

Figure 34 : Evolutions climatiques et hydrologiques relatives possibles (en %) entre 1961-90 et 2046-65 à sur la Garonne à Lamagistère. Résultats des 14 projections

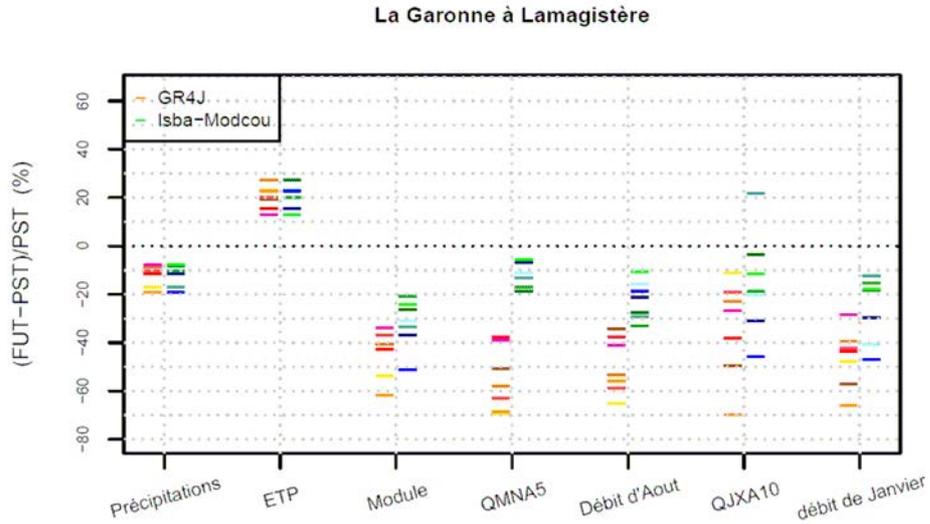


Figure 35: Evolutions climatiques et hydrologiques relatives possibles (en %) entre 1961-90 et 2046-65 dans le district Adour-Garonne : Distribution des évolutions médianes

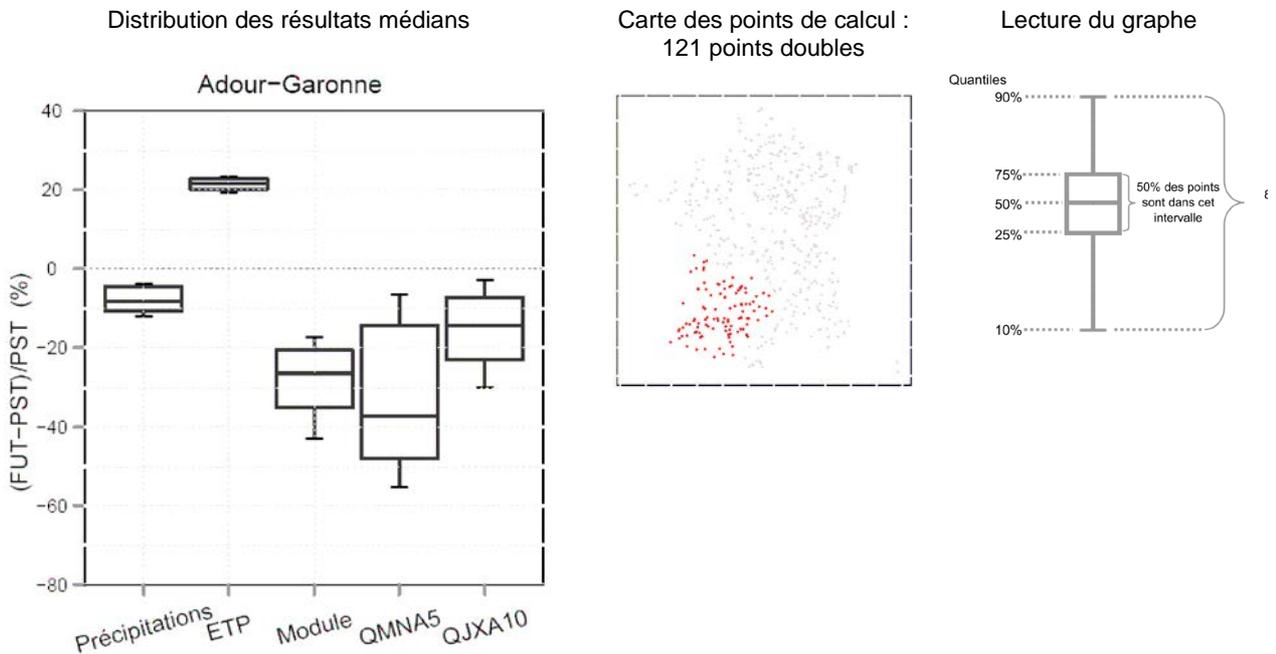
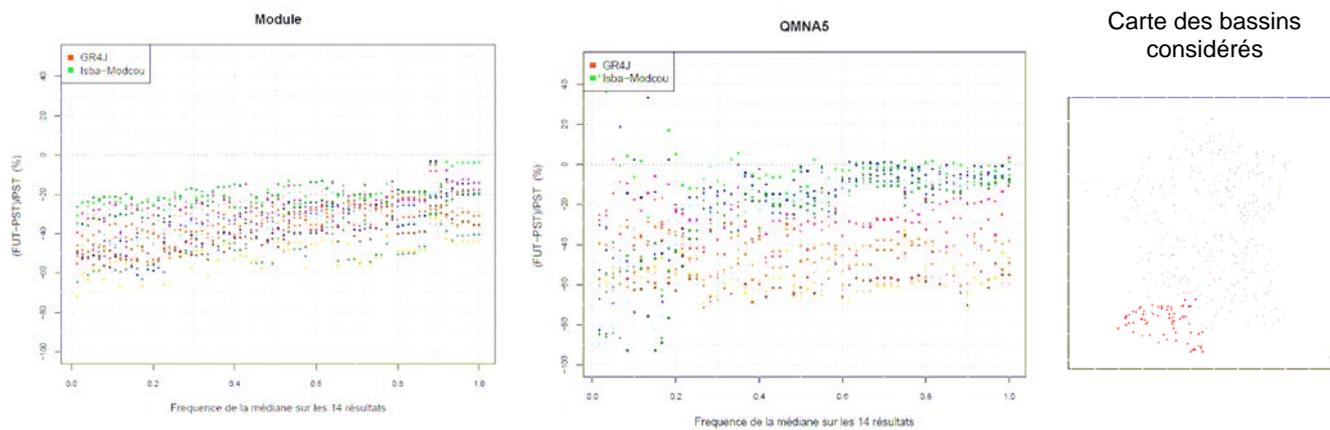


Figure 36: Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel et du QMNA5 entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations pour les bassins des contreforts pyrénéens



2.4.4.2 Artois-Picardie

Sur le district Artois-Picardie, l'analyse se base sur les 11 points de calcul pour lesquels on disposait de 14 projections.

Evolutions climatiques

- ▶ Les cumuls de précipitations annuels pourraient baisser de l'ordre de 0 à 18% selon les projections, avec une médiane de l'ordre de 8%. L'évapotranspiration potentielle annuelle pourrait augmenter de 15 à 35%.

Débits annuels

- ▶ Les débits moyens annuels pourraient baisser de 0 à 60% selon les projections. L'amplitude des tendances simulées est cependant assez différente entre les deux modèles hydrologiques (plus prononcée pour GR4J que pour Isba-Modcou). Il n'y a pas de disparités régionales marquées.

Etiages

- ▶ Le QMNA5 pourrait baisser de l'ordre de 0 à 65% selon les projections et les cours d'eau. Les gammes des baisses sont très différentes suivant les deux modèles

Crues

- ▶ Les crues semblent globalement orientées à la baisse sur le bassin, mais des divergences fortes existent entre modèles sur certaines stations.

Comparaison aux études antérieures

Nous n'avons pas identifié d'études antérieures sur ce district hydrographique.

Figure 37 : Evolutions climatiques et hydrologiques relatives possibles (en %) entre 1961-90 et 2046-65 à sur la Somme à Abbeville. Résultats des 14 projections

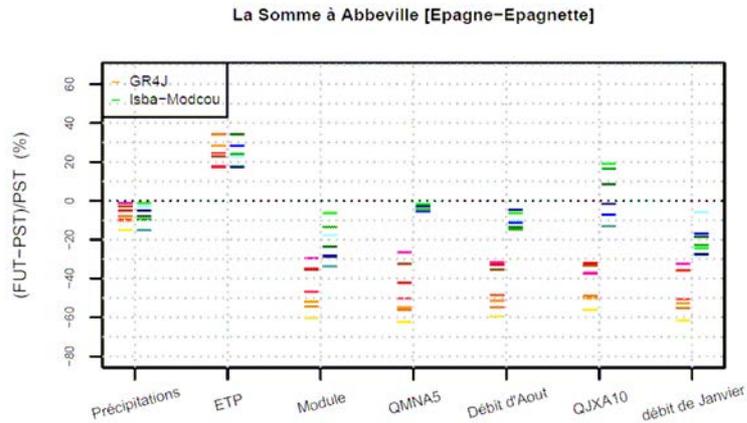


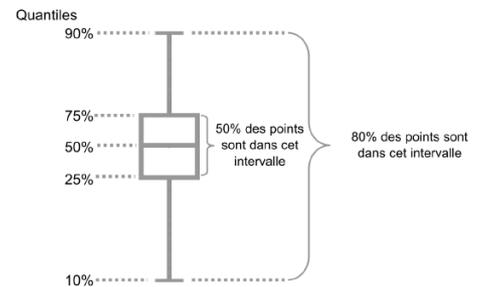
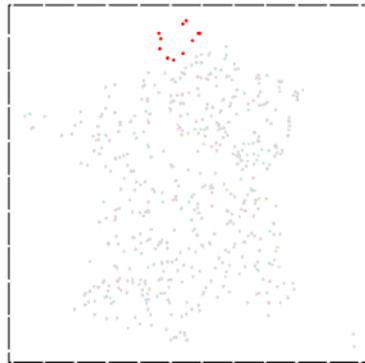
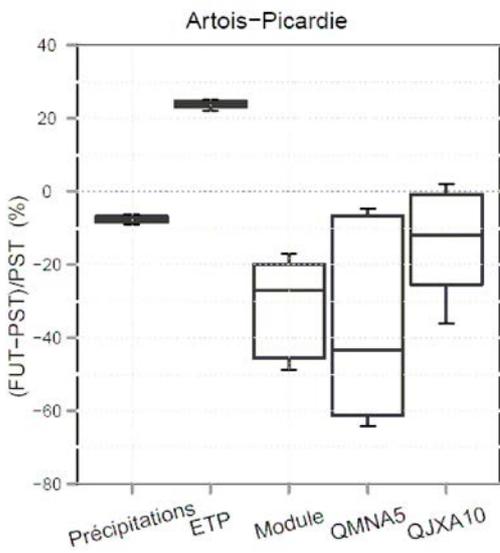
Figure 38: Evolutions climatiques et hydrologiques possible entre 19691-90 et 2046-65 dans le district Artois-Picardie : Distribution des évolutions médianes

Attention : le graphique statistiques ci-dessous est réalisés à partir d'un échantillon de seulement 11 points de calcul : il convient de l'interpréter avec prudence.

Distribution des résultats médians

Carte des points de calcul : 11 points doubles

Lecture du graphe



2.4.4.3 Loire-Bretagne

Sur le district Loire-Bretagne, l'analyse se base sur les 110 points de calcul pour lesquels on disposait de 14 projections.

Evolutions climatiques

- ▶ Les cumuls de précipitations annuels pourraient baisser de l'ordre de 0 à 20% selon les projections, avec une médiane de l'ordre de 5%. L'évapotranspiration annuelle pourrait augmenter de 15 à 30%, avec une médiane de l'ordre de 23%.

Débits annuels

- ▶ Sur la Loire à Montjean, le débit annuel pourrait baisser de 10 à 45% selon les projections.
- ▶ Selon les bassins versants, les évolutions médianes s'étendent de 10 à 30% de baisse du module. Les tendances produites par les modèles semblent le mieux converger sur l'Allier, la Loire amont, le bassin du Cher et la Bretagne, où la médiane des baisses oscille entre 20 et 30%. Des écarts plus substantiels peuvent apparaître sur les autres parties du district, parfois liés à des niveaux de performance différents des modèles.

Etiages

- ▶ Sur la Loire à Montjean, le QMNA5 pourrait baisser de 5 à 60% selon les projections.
- ▶ Des tendances fortes à la baisse sont simulées sur les bassins amont de la Vienne et du Cher, de la Loire et de l'Allier, ainsi que sur la Bretagne, avec une bonne convergence des différentes projections. Sur la partie médiane du bassin de la Loire, les tendances sont moins prononcées, avec des divergences plus fortes entre les modèles (GR4J fournissant des tendances plus pessimistes qu'Isba-Modcou).

Crues

- ▶ Les crues décennales (débit journalier) semblent globalement orientées à la baisse modérée (de l'ordre de 10%) sur l'ensemble du district, à l'exception des parties amont de la Loire et de l'Allier où la tendance est plutôt à l'augmentation modérée.

Comparaison aux études antérieures

Les résultats du récent projet Hydroqual sur le bassin de la Loire tendaient à indiquer une baisse des débits moyens et des débits d'étiage, les tendances sur les crues étant incertaines. Les résultats d'Explore 2070 sont globalement en accord avec ces résultats, avec également une tendance à la baisse sur les débits moyens et d'étiage, et des tendances peu marquées sur les crues.

Figure 39 : Evolutions climatiques et hydrologiques relatives possibles (en %) entre 1961-90 et 2046-65 à sur la Loire à Montjean. Résultats des 14 projections

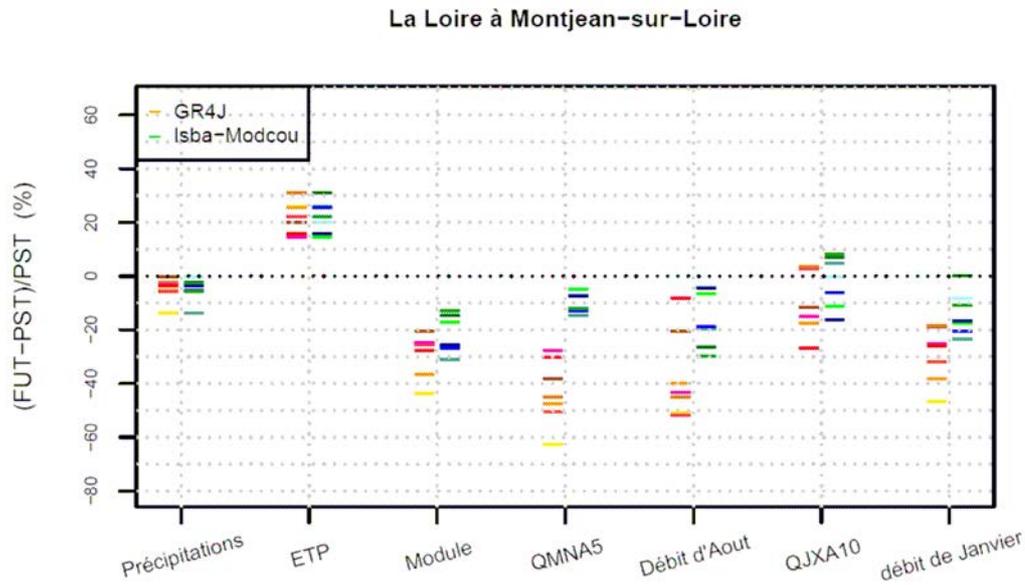
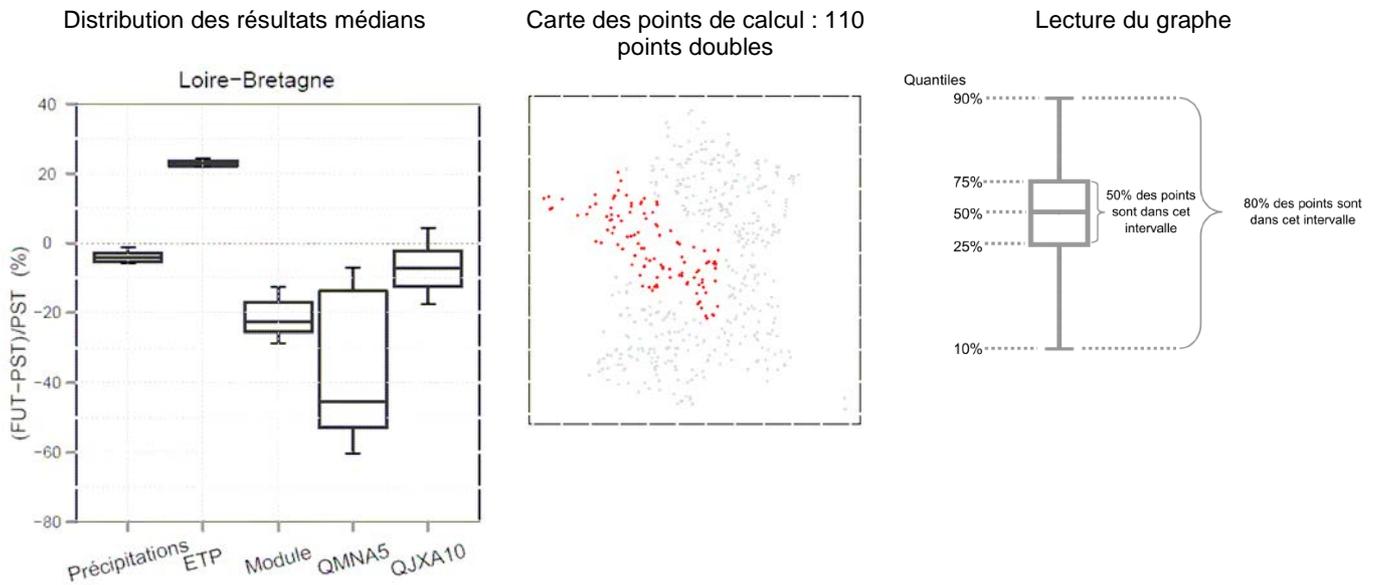


Figure 40 : Evolutions climatiques et hydrologiques possible entre 19691-90 et 2046-65 dans le district Loire-Bretagne : Distribution des évolutions médianes



2.4.4.4 Seine-Normandie

Sur le district Seine-Normandie, l'analyse se base sur les 103 points de calcul pour lesquels on disposait de 14 projections.

Evolutions climatiques

- ▶ Les cumuls de précipitations annuels pourraient baisser de l'ordre de 0 à 15% selon les projections, avec une médiane de l'ordre de 5%. L'évapotranspiration annuelle pourrait augmenter de 15 à 30%, avec une médiane de l'ordre de 25%.

Débits annuels

- ▶ La majorité des projections s'accorde sur une **baisse particulièrement forte du débit moyen annuel sur la majorité du district hydrographique Seine-Normandie**, allant de 10 à 60%. (Figure 43).
- ▶ La médiane des 14 projections situe la baisse du module entre 15 et 40% selon les bassins versants. La partie intermédiaire du bassin de la Seine pourrait être plus particulièrement impactée (-20 à -50%) alors que les baisses projetées sur la partie amont du bassin (Marne amont, Aisne amont, Aire) apparaissent moindres (-10 à -30%). Sur la partie Normandie, les baisses apparaissent fortes mais nous disposons de trop peu de points pour donner une tendance régionale.

Etiages

- ▶ La plupart des projections s'accordent sur une baisse particulièrement sensible des débits d'étiage. Le QMNA5 pourrait baisser de 10 à 70% selon les projections. Les deux modèles hydrologiques s'accordent pour faire ressortir le bassin de la Seine comme l'un des bassins avec les baisses les plus sévères au niveau du territoire.

Crues

- ▶ Si les bassins amont de la Marne et de l'Aisne semblent présenter une augmentation modérée de la crue décennale, le reste du bassin de la Seine semble présenter plutôt une tendance à la baisse, avec des tendances plus prononcées sur la partie aval du bassin.

Comparaison aux études antérieures

Les résultats d'Explore 2070 confirment les tendances annoncées par les projets GICC-Seine et RExHySS sur le bassin de la Seine, à savoir une tendance nette à la diminution des débits moyens et des étiages, et des tendances moins marquées et plus incertaines sur les crues

Du fait de données d'entrée comparables et de méthodologies similaires, une comparaison plus détaillée a été conduite entre les résultats de RExHySS et ceux d'Explore 2070. Elle est présentée en Annexe 7.

Principales références :

Ducharne A, Habets F, Viennot P, Boé J, Bourqui M, Crespi O, Déqué M, Evaux L, Gascoin S, Hachour A, Leblois E, Lepelletier T, Maisonnave E, Martin E, Mouchel JM, Moulin L, Oudin L, Pagé C, Perrier A, Ribstein P, Rieu J, Sauquet E, Terray L, Thiéry D (2009). Le changement climatique menace-t-il les ressources en eau ? Le cas des bassins de la Seine et de la Somme, R2DS Eclairages, N°6, 4 pp.

Ducharne A, Sauquet E, Habets F, Déqué M, Gascoin S, Hachour A, Martin E, Oudin L, Pagé C, Terray L, Thiéry D, Viennot P (2011). Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique. La Houille Blanche, N°1-2011, 51-57, doi:10.1051/lhb:2011006.

Figure 41: Evolutions climatiques et hydrologiques possibles entre 1961-90 et 2046-65 à sur la Seine à Paris. Résultats des 14 projections

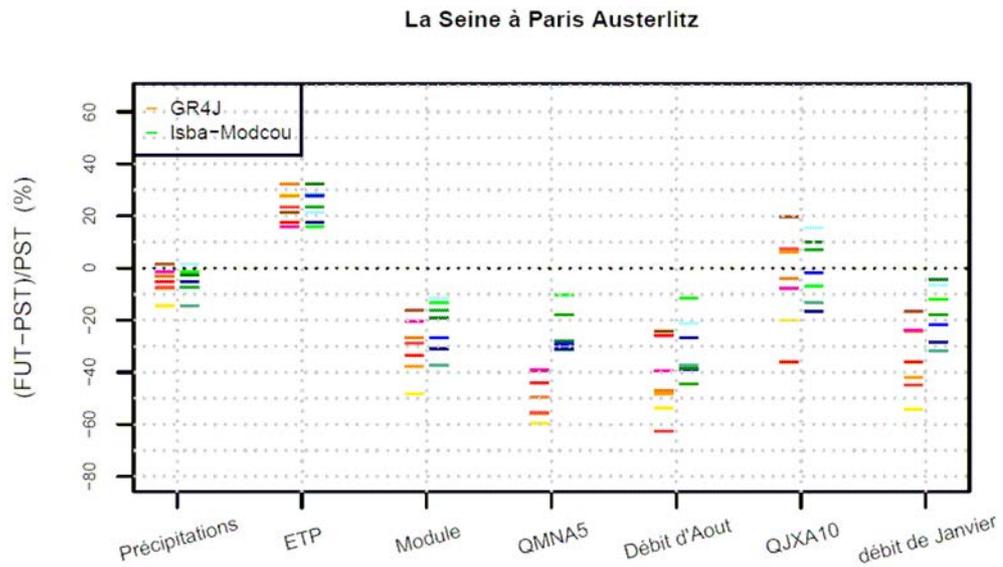


Figure 42 : Evolutions climatiques et hydrologiques possible entre 1961-90 et 2046-65 dans le district Seine-Normandie : Distribution des évolutions médianes

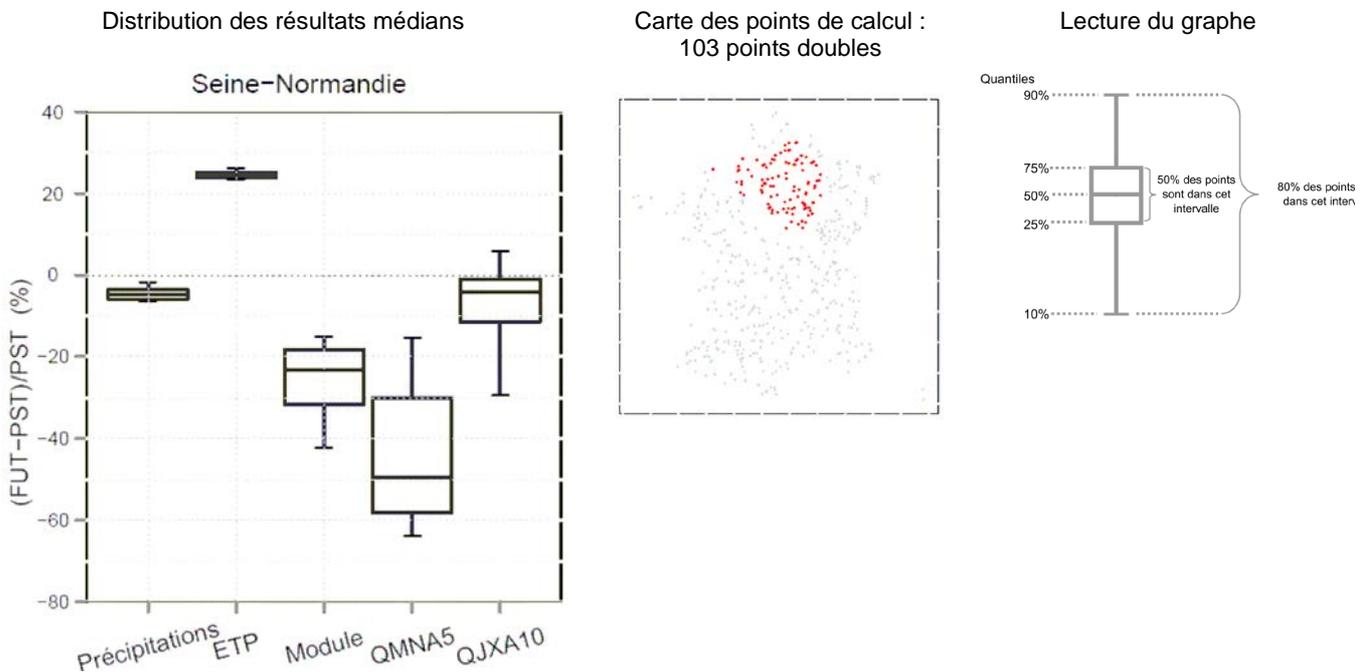
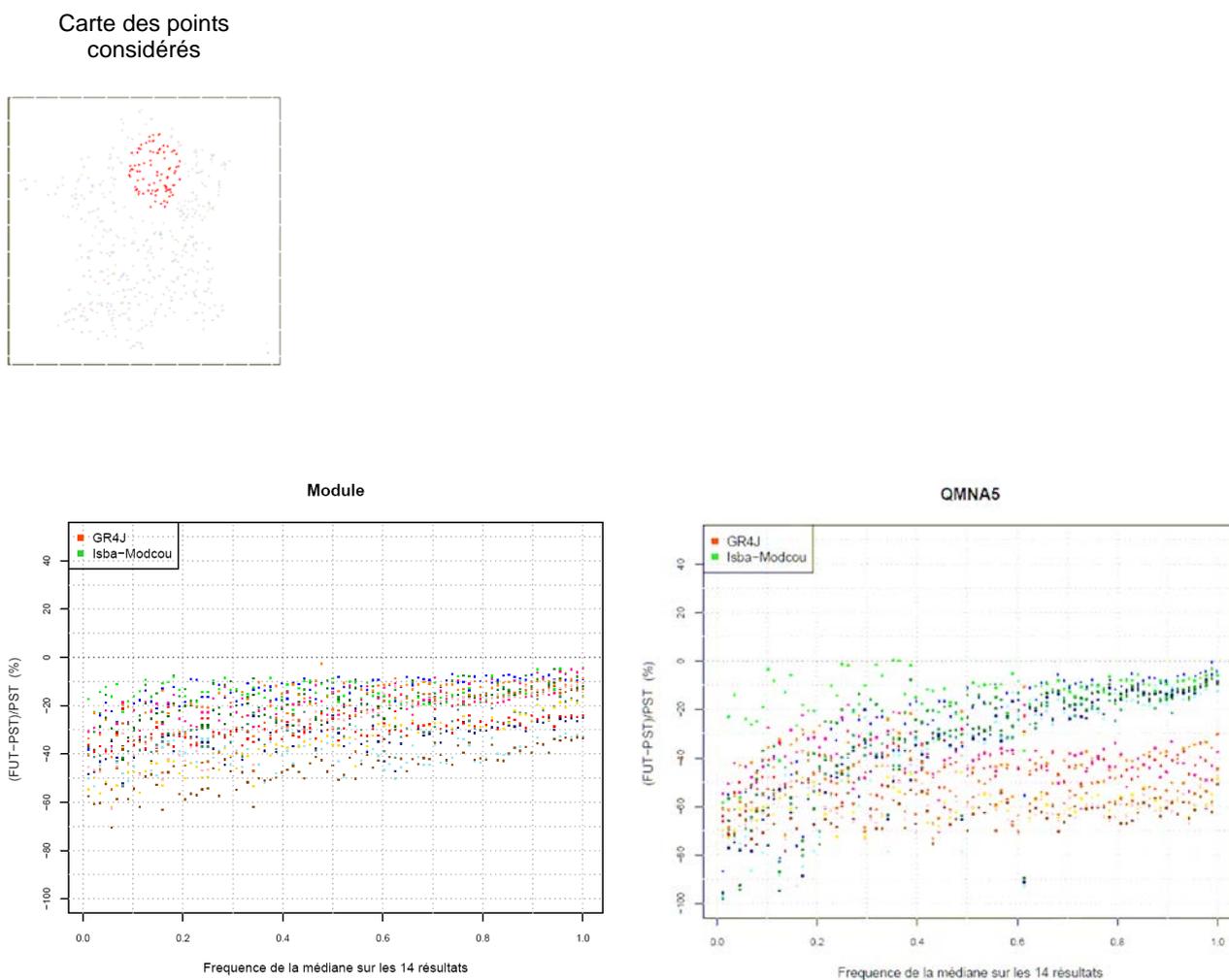


Figure 43: Evolutions possibles du débit moyen annuel et du QMNA5 entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations (points situés en Seine-Normandie)



2.4.4.5 Rhin-Meuse

Sur le district Rhin-Meuse, l'analyse se base sur les 44 points de calcul pour lesquels on disposait de 14 projections.

Evolutions climatiques

- ▶ Les cumuls de précipitations annuels pourraient baisser de l'ordre de 0 à 15% selon les projections, avec une médiane de l'ordre de 3%. L'évapotranspiration annuelle pourrait augmenter de 15 à 35%, avec une médiane de l'ordre de 25%.

Débits annuels

- ▶ Les débits moyens annuels pourraient baisser de l'ordre de 0 à 40% selon les projections. Les tendances les plus prononcées semblent se concentrer sur la frontière nord du bassin. Les projections sont cependant assez dispersées sur la majorité des stations du district (faible indice de convergence des projections)

Etiages

- ▶ Les résultats des 14 projections sont extrêmement dispersés et incertains pour les débits d'étiages : le QMNA5 pourraient baisser de 5 à 70% selon les modèles, avec des tendances à la baisse beaucoup plus marquées pour GR4J.

Crues

- ▶ Le QJXA10 pourrait augmenter sur la majorité des cours d'eau du district (de 5 à 30%), en particulier la Meuse et la Moselle. Le bassin de l'Ill semble, lui, plutôt orienté à la baisse modérée

Comparaison aux études antérieures

L'augmentation globale des contrastes saisonniers (étiages plus faibles et crues plus fortes) projetée par Explore 2070 sur le district Rhin-Meuse va dans le même sens que les résultats de Booij (2004), de Wit et al. (2007), van Pelt et al. (2009) et Drogue et al. (2010) sur le bassin de la Meuse. Notons que la plupart de ces auteurs notent cependant les fortes incertitudes sur les tendances trouvées liées aux nombreuses sources d'incertitude.

Sur le bassin de la Moselle (station de Trier), le projet RheinBlick2050 (Görger et al., 2010) prévoyait des tendances peu marquées et incertaines à l'horizon 2021-2050, que ce soit sur les débits moyens, d'étiage ou de crue. A l'horizon 2071-2100, une tendance à l'augmentation modérée des débits moyens et des débits de crue était projetée, parallèlement à une diminution plus nette des débits d'étiage (20 à 50%). A l'exception du module, les résultats d'Explore 2070 vont donc dans le même sens que ceux du projet RheinBlick2050.

Figure 44 : Evolutions climatiques et hydrologiques possibles entre 1961-90 et 2046-65 à sur la Moselle à Uckange et la Meuse à Chooz. Résultats des 14 projections

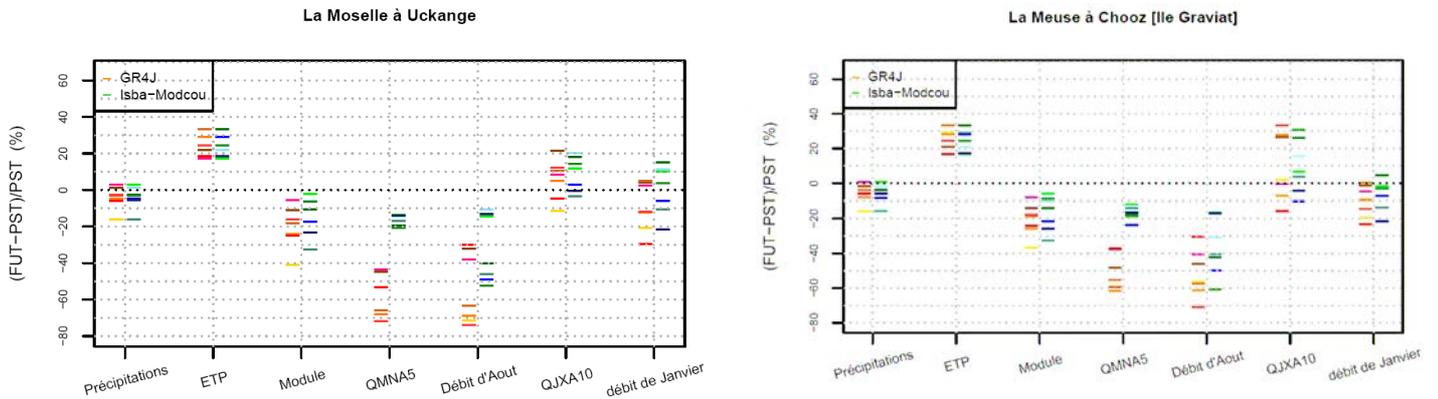
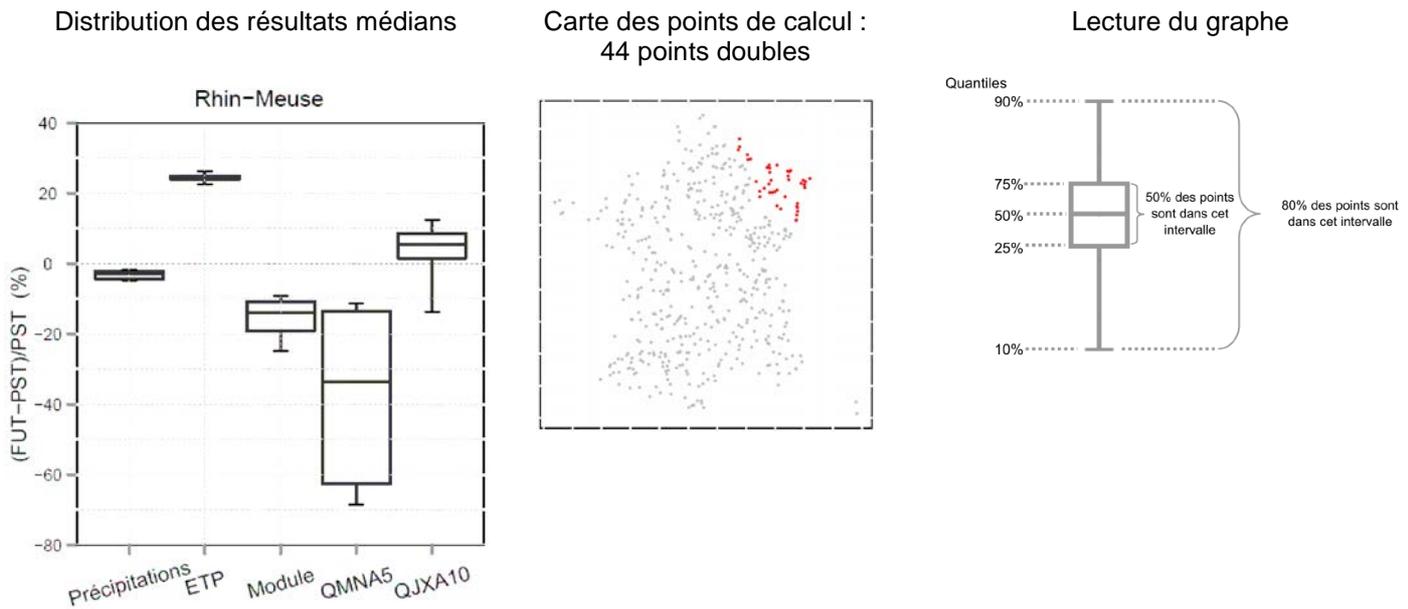


Figure 45: Evolutions climatiques et hydrologiques possible entre 1961-90 et 2046-65 dans le district Rhin-Meuse : Distribution des évolutions médianes



2.4.4.6 Rhône-Méditerranée-Corse

Sur le district Rhône-Méditerranée-Corse, l'analyse se base sur les 154 points de calcul pour lesquels on disposait de 14 projections. Seuls deux points de calcul étaient disponible en Corse, ce qui limite l'analyse de tendances à l'échelle de l'île.

Evolutions climatiques

- ▶ Les cumuls de précipitations annuels pourraient baisser de l'ordre de 0 à 15% selon les projections, avec une médiane de l'ordre de 5%. Certains modèles climatiques projettent cependant une hausse des cumuls de précipitation dans les Cévennes et la pointe Sud-Ouest. L'évapotranspiration annuelle pourrait augmenter de 5 à 30%.

Débits annuels

- ▶ Sur la majeure partie du district, les projections s'accordent sur une baisse du débit moyen annuel, de l'ordre de 10 à 40%. Les tendances les plus fortes se situent sur le bassin de l'Aude et les bassins pyrénéens, et sur la partie médiane du bassin du Rhône (notamment bassin de l'Isère). Sur le bassin de la Saône, la tendance est assez homogène autour de -20%.
- ▶ En ce qui concerne les affluents rive droite du bas Rhône, on ne peut conclure sur l'évolution des écoulements moyens annuels, on note cependant une baisse significative des débits des mois de mai à octobre (Figure 46).

Etiages

- ▶ L'évolution possible des débits d'étiage est fortement variable selon les bassins versants (Figure 47).
- ▶ Au Nord du district (Saône, Doubs, Ain), la baisse des débits d'étiage pourrait être particulièrement sensible. Selon les projections, le QMNA5 pourrait baisser de 20 à 70%.
- ▶ Dans les bassins de montagne :
 - les projections s'accordent sur des étiages estivaux plus sévères (Figure 49),
 - les projections divergent concernant l'évolution des étiages hivernaux (Figure 49),
 - selon les projections, le QMNA5 pourrait diminuer de façon modérée (baisse de 0 à 20%) ou bien augmenter.
- ▶ Sur le reste du district, le QMNA5 pourrait baisser de 10 à 60% selon les projections.

Crues

- ▶ Il y a une assez forte disparité régionale sur les tendances des QJXA10. Les bassins de la Durance, de l'Isère et la partie pyrénéenne présentent des baisses prononcées (de 10 à 30%) et globalement assez convergentes. Les bassins de la Saône et du Doubs présentent une tendance à la baisse plus modérée de 5 à 20 %. Les Cévennes, et plus généralement les affluents rive droite du bas Rhône, présentent quant à eux une tendance à la hausse de 5 à 30%. Sur les bassins côtiers méditerranéens, les tendances sont assez hétérogènes.

Comparaison aux études antérieures

De nombreux travaux ont été réalisés sur le district Rhône-Méditerranée-Corse. Les contrastes régionaux observés dans les résultats d'Explore 2070 ont également été mis en évidence dans les travaux antérieurs, avec des impacts différenciés sur les affluents du Rhône, mais une tendance globale à la diminution des étiages estivaux. Les résultats d'Explore 2070 sur la partie pyrénéenne semblent également cohérents avec ceux mis en évidence par Caballero et al. (2009) dans le cadre du projet VULCAIN à l'horizon 2030, particulièrement sur la diminution des débits estivaux. Enfin, la tendance à l'augmentation des crues sur la partie cévenole avait également été mise en avant par les résultats de Quintana-Segui et al. (2010).

Figure 46 : Evolutions climatiques et hydrologiques possibles entre 1961-90 et 2046-65 à sur le Rhône à Beaucaire. Résultats des 14 projections

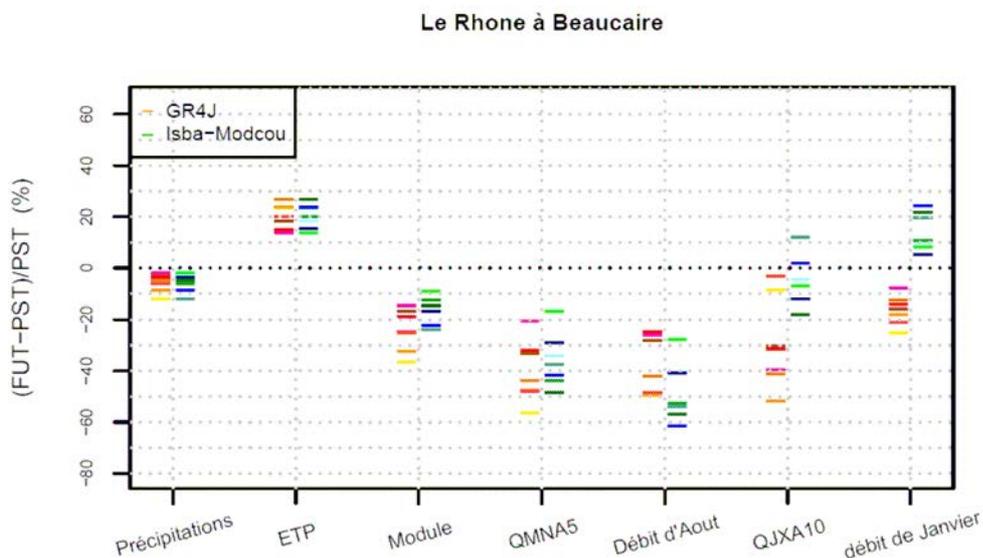


Figure 47: Evolutions climatiques et hydrologiques possible entre 19691-90 et 2046-65 dans le district Rhône-Méditerranée-Corse : Distribution des évolutions médianes

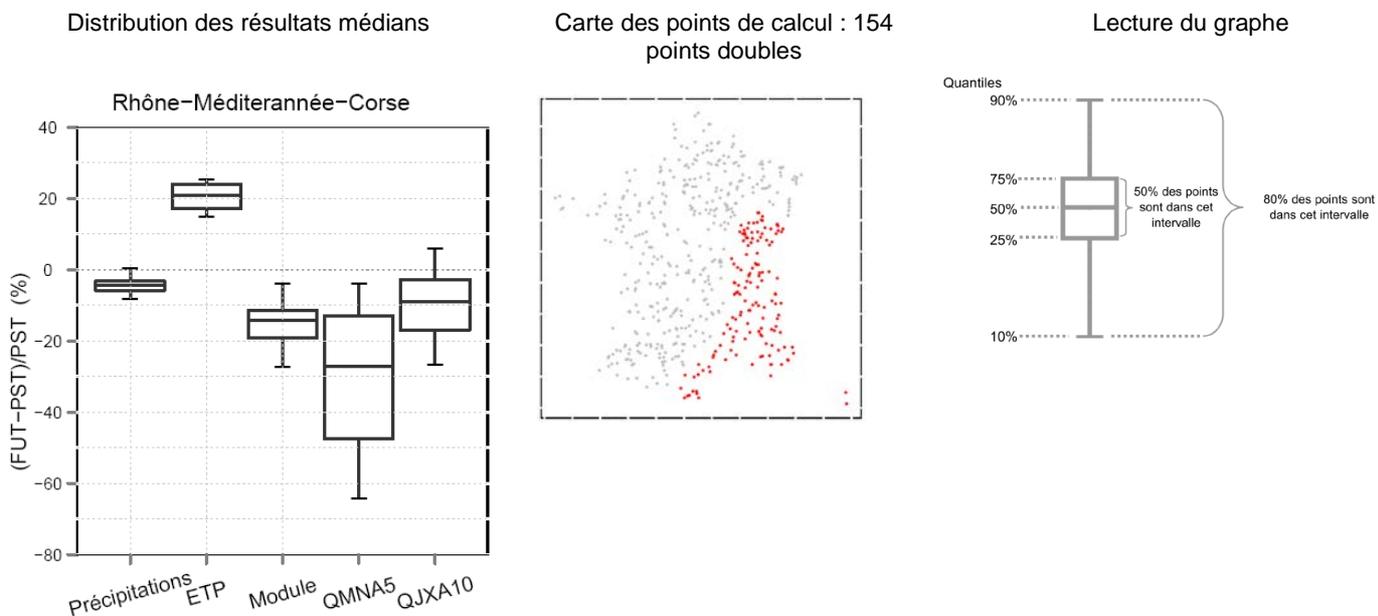
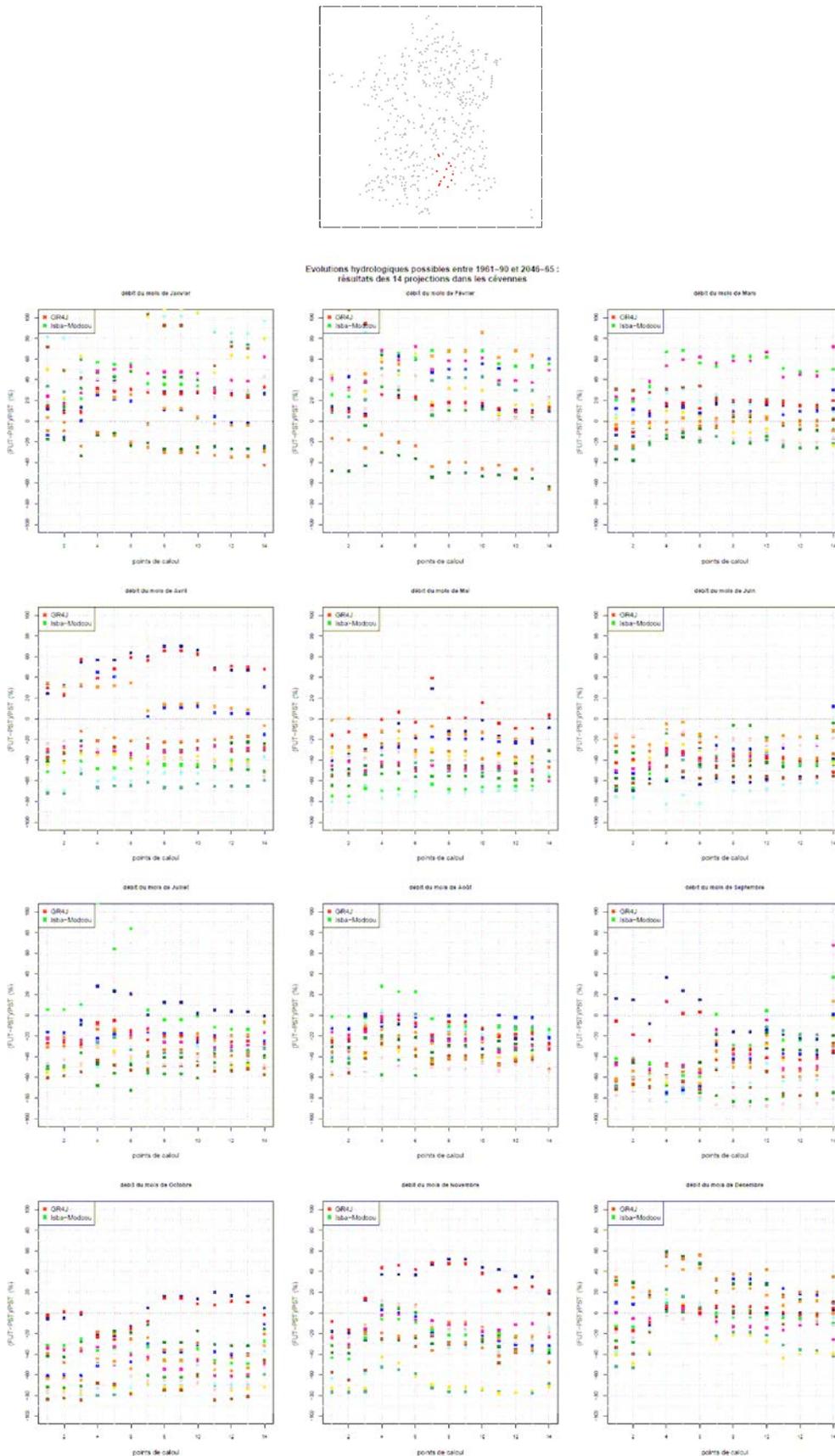


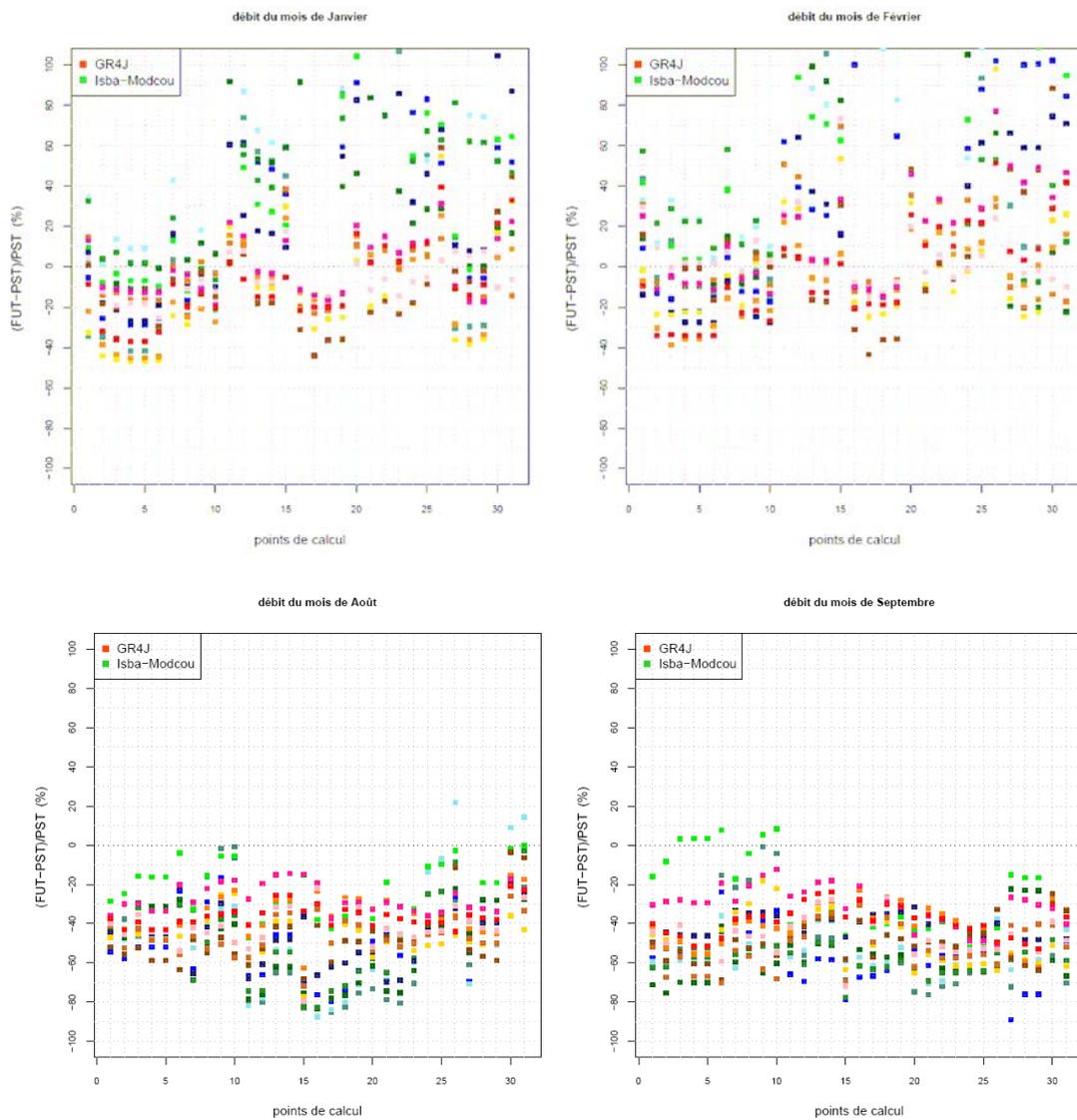
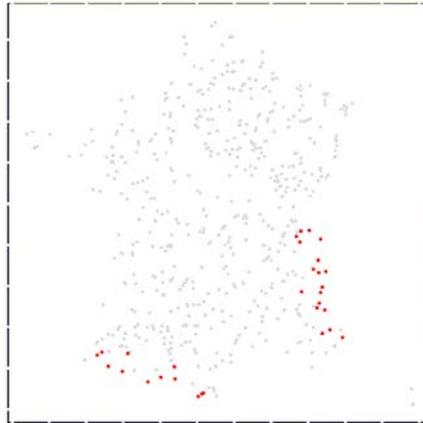
Figure 48: Evolutions possibles des débits mensuels dans les Cévennes entre 1961-90 et 2046-65. Résultats des 14 simulations.



La plupart des projections s'accordent sur une baisse des débits des mois de mai à octobre.

Figure 49 : Evolutions possibles de débits mensuels dans les bassins de montagne

Carte des points de calcul



2.5 PRESENTATION PLUS DETAILLEE DES RESULTATS – DOM

Comme déjà indiqué plus haut, rappelons ici que la méthodologie appliquée et le détail des données utilisées pour les DOM sont exposés dans le document *B3 – Rapport détaillé DOM*.

Avertissement : Compte tenu des difficultés liées à la disponibilité des données, les résultats dans les départements d’Outre-mer sont associés à de très fortes incertitudes.

2.5.1 Ile de la Réunion

2.5.1.1 Rappel des points clés de la méthodologie

On rappelle les principaux éléments de méthodes et hypothèses développés pour l’île de la Réunion :

- ▶ un scénario d’émission de gaz à effet de serre : A2 ;
- ▶ un modèle climatique global : ARPEGE CLIMAT ;
- ▶ une méthode de descente d’échelle : Global 50 qui donne un point de grille sur la Réunion, dont les valeurs sont désagrégées via des polygones de Thiessen au niveau de 6 postes météorologiques ;
- ▶ un modèle hydrologique : GR4J.

Notons que le niveau d’information climatique disponible est bien en deçà de ce que l’on a sur la métropole. Le contexte hydroclimatique particulier, lié notamment à la présence de cyclones, rend la modélisation délicate. Il y a donc des sources de forte incertitude.

2.5.1.2 Quel climat possible à l’horizon 2050-2070 ?

L’analyse des simulations climatiques produites pour la Réunion concluent que :

- ▶ **Le réchauffement pourrait être marqué pour les températures maximales avec un écart moyen supérieur à 1°C.**
- ▶ **Le réchauffement pourrait être marqué pour les températures minimales avec un écart moyen supérieur à 1°C.**
- ▶ **Les ratios de précipitation ne montrent pas d’évolution par rapport au climat de référence.**

2.5.1.3 Quelles évolutions hydrologiques possibles ?

Les bassins versants étudiés dans le cadre d’Explore 2070 (voir Tableau 2) sont localisés sur les cartes de la Figure 50 et de la Figure 51. Ces cartes présentent les performances du modèle GR4J, quantifiées par les critères C2MLQ et C2MQ respectivement. Le modèle a globalement des performances moyennes et est particulièrement mal calé sur certains bassins.

Figure 50 : Performances en validation du modèle
GR4J - Critère C2MLQ pour la Réunion

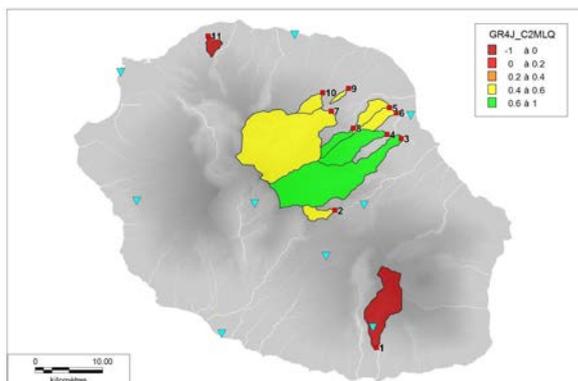


Figure 51 : Performances en validation du modèle
GR4J - Critère C2MQ pour la Réunion

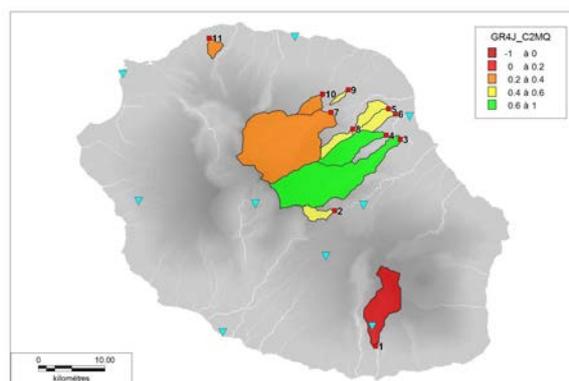


Tableau 2 : Liste des bassins versants de la Réunion

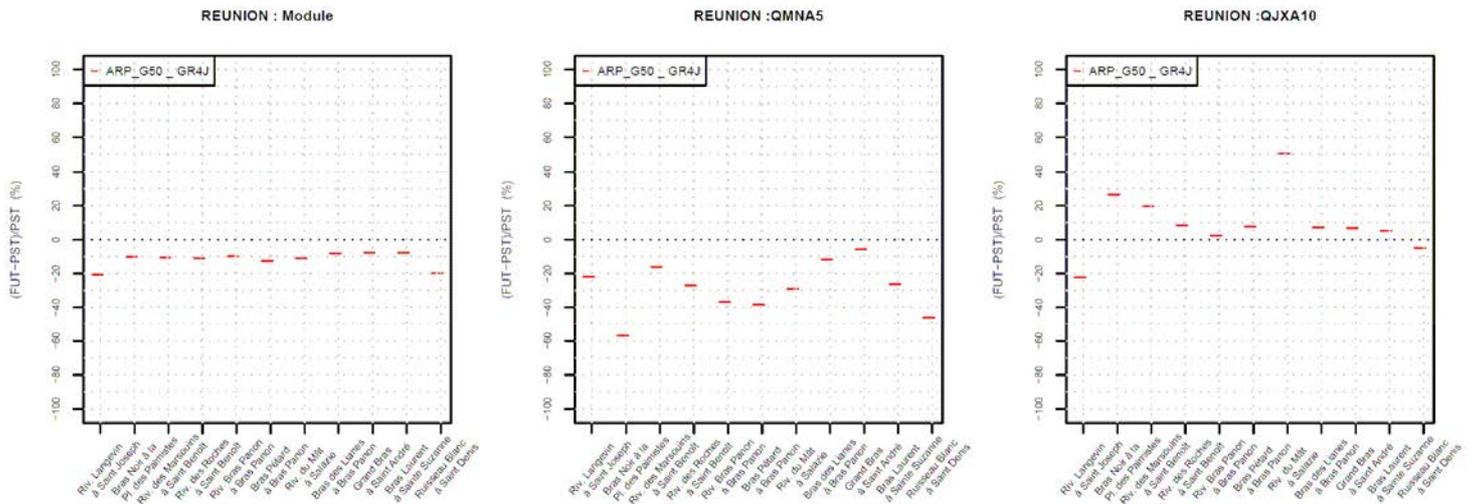
N°	Code Hydro	Nom
1	Z40010100	La rivière Langevin à Saint Joseph
2	Z40101130	Le bras Noir à la Plaine des Palmistes [Bebourg]
3	Z40120100	La rivière des Marsouins à Saint Benoît [Béthléem]
4	Z40130130	La rivière des Roches à Saint Benoît [Abondance]
5	Z40131130	La rivière Bras Panon à Bras Panon
6	Z40131170	Le bras Pétard à Bras Panon
7	Z40200100	La rivière du Mât à Salazie
8	Z40211090	Le bras des Lianes à Bras Panon
9	Z40300100	Le Grand Bras à Saint André
10	Z40301190	Le bras Laurent à Sainte Suzanne
11	Z40321470	Le ruisseau Blanc [Ravine] à Saint Denis [La Montagne]

RESULTATS

Les résultats obtenus doivent être utilisés avec prudence compte tenu des fortes incertitudes. A la Réunion, pour la projection réalisée, on note (voir Figure 52) :

- ▶ une tendance généralisée à la baisse des débits moyens annuels de l'ordre de 10% en moyenne, cette valeur étant commune à la plupart des bassins ;
- ▶ une tendance généralisée à la baisse pour des débits d'étiages, de l'ordre de 20% en moyenne ;
- ▶ une tendance à la hausse des débits de crues (QJXA10), non systématique.

Figure 52 : Evolutions calculées des débits moyens annuels, QMNA5 et QJXA10 à la Réunion



2.5.2 Guyane

2.5.2.1 Rappel des points clés de la méthodologie

On rappelle les principaux éléments de méthodes et hypothèses développés pour la Guyane :

- ▶ un scénario d'émission de gaz à effet de serre : A1B ;
- ▶ un modèle climatique global : ARPEGE CLIMAT ;
- ▶ une méthode de descente d'échelle : EtireEU (avec deux jeux de simulations : USA hadc et USA stream2)⁵, puis la correction quantile-quantile qui fournit des simulations climatiques en 4 points sur la Guyane ;
- ▶ un modèle hydrologique : GR4J.

2.5.2.2 Quel climat possible à l'horizon 2050-2070 ?

L'analyse des simulations effectuées sur la Guyane à l'horizon permet de dégager les tendances possibles suivantes :

- ▶ **Le réchauffement pourrait être marqué pour les températures minimales avec un écart moyen supérieur à 1 voire 2°C** pour la quasi-totalité des saisons et des scénarios. On note cependant une variabilité des résultats selon les simulations :
 - des écarts maximaux assez importants avec les simulations pôle étiré Etats-Unis, SST Hadley Center-A1B, dépassant 3 °C ;
 - les résultats de la simulation A2 sont un peu plus pessimistes que pour le scénario A1B.
- ▶ **Le réchauffement pourrait être marqué pour les températures maximales avec un écart moyen supérieur à 1°C** pour la quasi-totalité des scénarios et des saisons (hormis l'été pour laquelle le réchauffement est moins fort).
- ▶ **Les ratios de précipitation sont assez peu significatifs.**

⁵ Se reporter au rapport B3 pour plus de précisions.

2.5.2.3 Quelles évolutions hydrologiques possibles ?

Les bassins versants étudiés dans le cadre d'Explore sont localisés sur les cartes de la Figure 53 et de la Figure 54. Ces cartes présentent les performances du modèle GR4J, quantifiées par les critères C2MLQ et C2MQ respectivement.

Comme pour les bassins de la Réunion, on constate des performances modestes voire faibles sur certains bassins.

Figure 53 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MLQ pour la Guyane

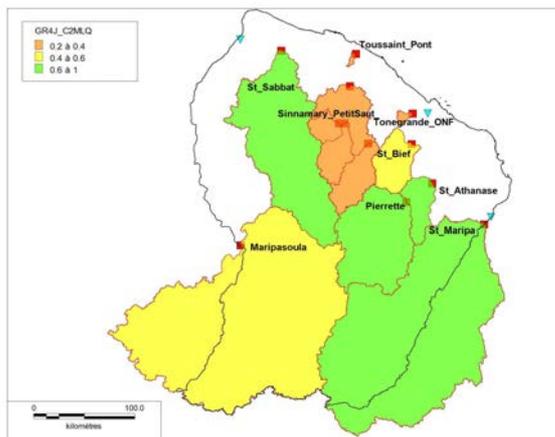
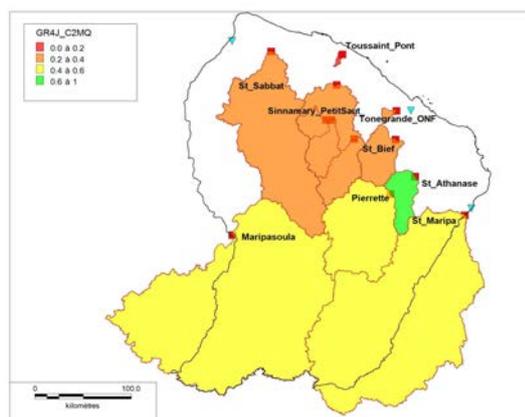


Figure 54 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MQ pour la Guyane

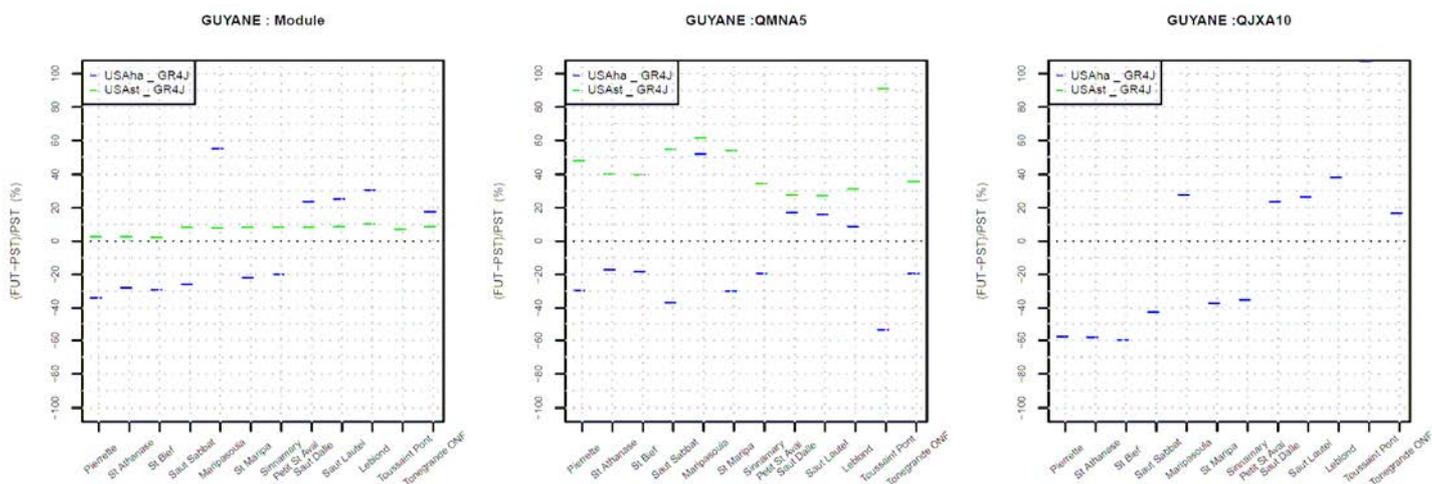


RESULTATS

Les résultats obtenus pour l'ensemble des points et les deux projections climatiques sont synthétisés sur la Figure 55. On ne peut détecter de tendance générale claire concernant l'hydrologie de la Guyane, quelque soit la variable considérée. Les projections peuvent cependant indiquer localement des tendances fortes, mais avec souvent des divergences importantes entre les deux projections disponibles, surtout au niveau du QMNA5 et du QJXA10.

Au-delà des différences entre projections climatiques, les performances limitées du modèle hydrologique pourraient en partie expliquer ces constats.

Figure 55 : Evolutions calculées des débits moyens annuels, QMNA5 et QJXA10 en Guyane



2.5.3 Martinique et Guadeloupe

2.5.3.1 Rappel des points clés de la méthodologie

On rappelle les principaux éléments de méthodes et hypothèses développés pour les Antilles :

- ▶ un scénario d'émission de gaz à effet de serre : A1B ;
- ▶ un modèle climatique global : ARPEGE CLIMAT ;
- ▶ aucun point de simulation climatique n'est disponible sur les territoires. On "utilise" les simulations calculées aux points de Porto Rico (Glob50) et Trinidad (EtireEU), puis on applique la méthode des anomalies. Cela implique de très fortes incertitudes, les conditions climatiques entre Porto Rico, Trinidad et les Antilles étant sensiblement différentes. Ce point est explicité dans le document B3 – Rapport détaillé DOM.
- ▶ un modèle hydrologique : GR4J.

2.5.3.2 Quel climat possible à l'horizon 2050-2070 ?

L'analyse des simulations climatiques réalisées aux points de Porto-Rico et Trinidad montre que :

- ▶ **Le réchauffement pourrait être marqué pour les températures maximales et plus encore pour les minimales avec un écart moyen supérieur à 1°C, voire 2°C pour les minimales** (à noter qu'en métropole, ce sont les simulations de températures maximales qui présentent les écarts les plus élevés).
- ▶ **Il n'y a pas de signal significatif sur les précipitations**

2.5.3.3 Quelles évolutions hydrologiques possibles ?

RAPPEL DE LA METHODOLOGIE

Les bassins versants étudiés dans le cadre d'Explore sont localisés sur les cartes de la Figure 56 à la Figure 59. Ces cartes présentent les performances du modèles GR4J, quantifiées par les critères C2MLQ et C2MQ.

Figure 56 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MLQ pour la Martinique

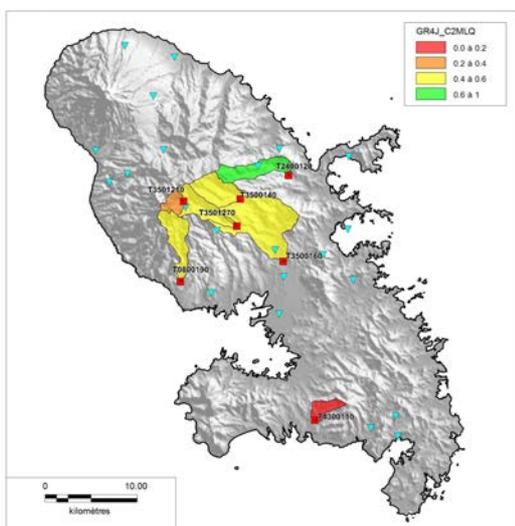


Figure 57 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MQ pour la Martinique

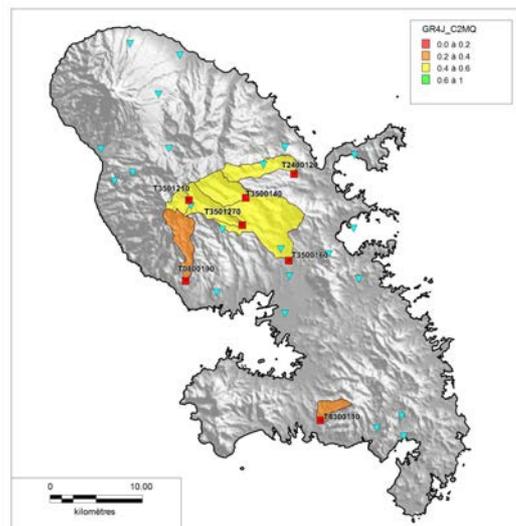


Figure 58 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MLQ pour la Guadeloupe

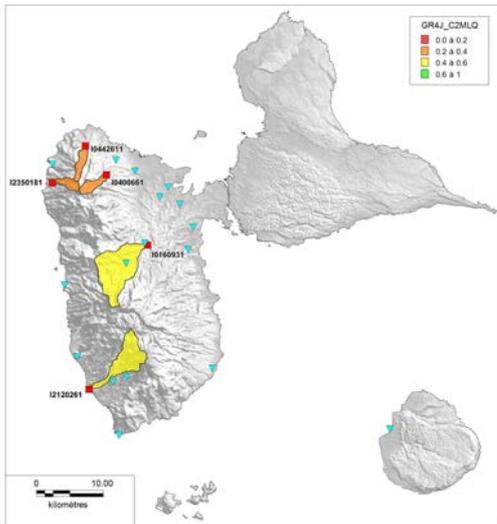
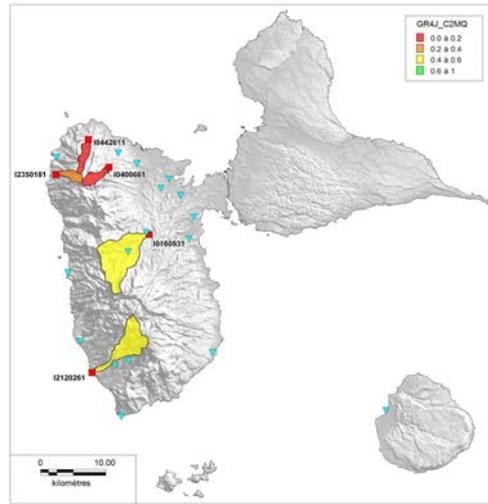


Figure 59 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MQ pour la Guadeloupe



RESULTATS

Les résultats obtenus pour l'ensemble des points et les trois projections climatiques sont synthétisés sur la Figure 60 (Martinique) et la Figure 61 (Guadeloupe). Comme pour la Guyane, on ne peut détecter de tendance claire concernant l'hydrologie des Antilles.

Figure 60 : Evolutions calculées des débits moyens annuels, QMNA5 et QJXA10 en Martinique

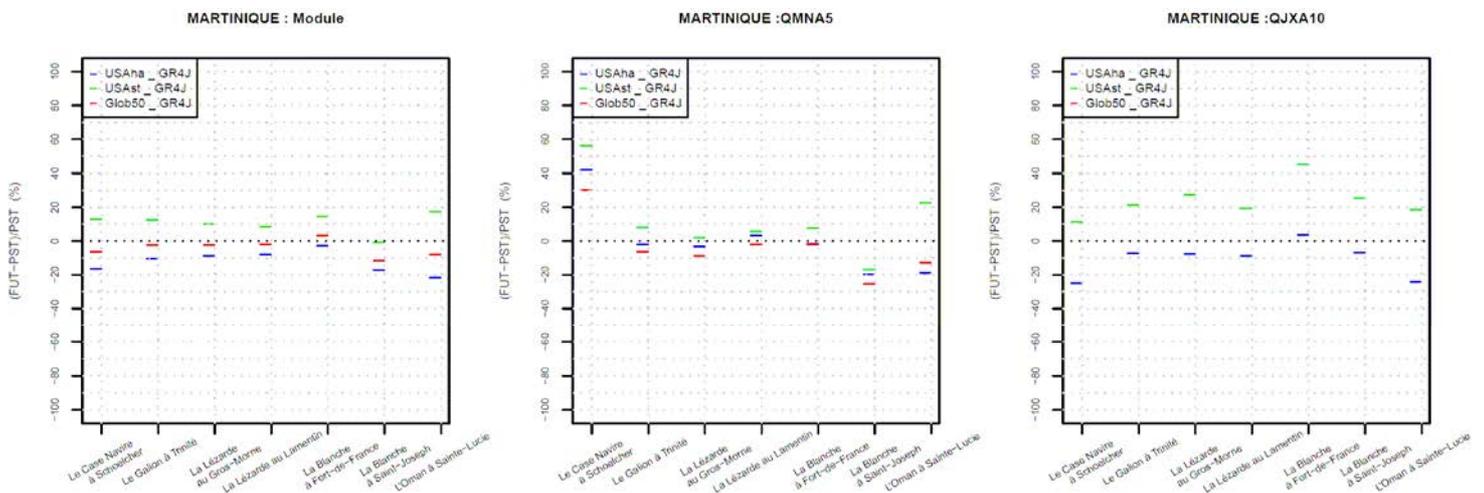
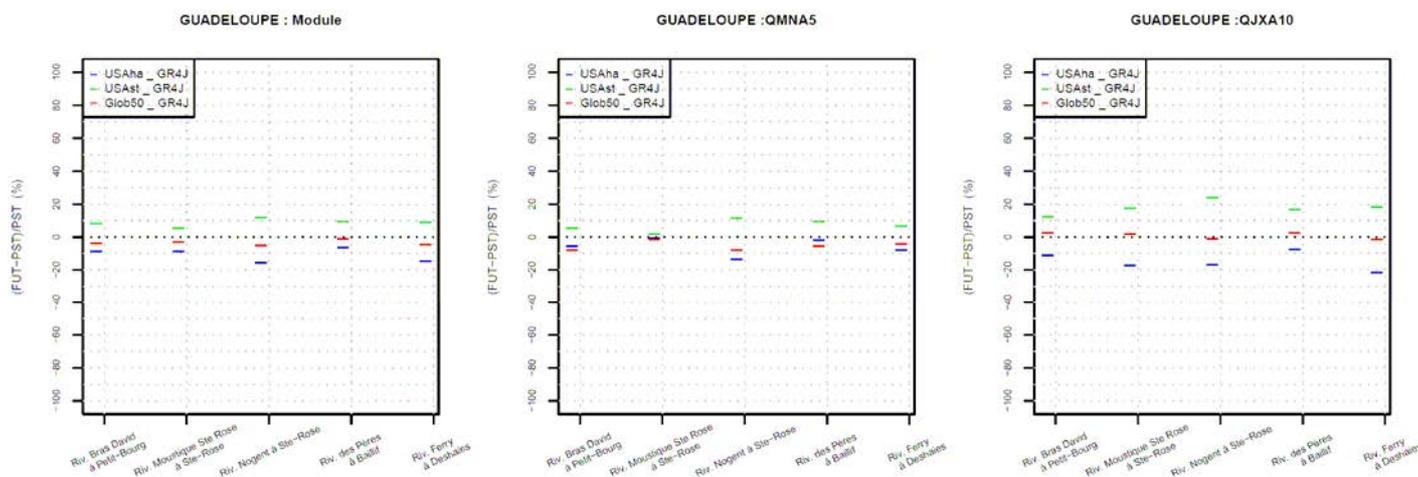


Figure 61 : Evolutions calculées des débits moyens annuels, QMNA5 et QJXA10 en Guadeloupe



2.5.4 Conclusion sur les DOM

Comme déjà décrit plus haut : les travaux de modélisation réalisés sur les DOM sont affectés de fortes incertitudes, à la fois sur le niveau d'information climatique (peu de projections, pas de méthode de descente d'échelle fine, présence d'événements cycloniques très délicats à modéliser, etc.) et sur les performances de la modélisation hydrologiques, qui restent globalement assez modestes.

Compte tenu de ces incertitudes et des résultats obtenus, il semble délicat de dégager des tendances claires à l'échelle de chacun de ces DOM, à part peut-être pour l'île de la Réunion. Il semble nécessaire de poursuivre ces travaux dans le cadre de projets de recherche si l'on souhaite dégager des tendances avec plus de confiances sur ces régions.

2.6 DISCUSSION SUR LES INCERTITUDES

2.6.1 Les sources d'incertitudes

Les incertitudes sur les résultats du Lot Hydrologie de Surface sont liées :

▶ **Aux hypothèses sur le futur :**

En particulier, la principale hypothèse posée en entrée des travaux du lot Hydrologie de Surface est l'hypothèse de **concentration future de gaz à effet de serre pour 2046-2065**, à travers l'utilisation du scénario A1B.

Pour pouvoir utiliser les modèles comme explicité plus haut, d'autres hypothèses fortes sur le futur ont du être posées. On suppose notamment que **l'état de surface et le fonctionnement des bassins versant sera inchangé à l'horizon 2050**.

▶ **A la méconnaissance du fonctionnement des hydrosystèmes (sous climats actuel et futur) et aux limitations des modélisations climatiques et hydrologiques.**

Il s'agit d'une part de **l'incertitude liée à la connaissance imparfaite des phénomènes et à leur représentation approximative dans les modèles**. Cela concerne à la fois les modèles climatiques (et leur aptitude à simuler le système climatique présent et futur), et les modèles hydrologiques (et leur aptitude à reproduire le fonctionnement des bassins versants présents et futurs). De même, la référence météorologique unique pour le climat présent (et pour la méthode DSCLIM de descente d'échelle utilisée dans le projet) est l'analyse Safran. Elle ne présente pas de biais par rapport aux observations, mais son échelle caractéristique, de l'ordre de 30 km, et des faiblesses dans la reconstitution de paramètres horaires ne lui permettent pas de représenter certains phénomènes météorologiques de fine échelle spatio-temporelle. Sa qualité dépend du nombre d'observations, qui augmente avec le temps (sauf pour les précipitations, dont le nombre est stable sur l'ensemble de la période).

D'autre part, il s'agit de **la difficulté à appréhender l'ensemble des futurs possibles**, c'est-à-dire, "l'incertitude liée à la variabilité intrinsèque et chaotique"⁶ des systèmes climatiques. La gamme des possibles dans laquelle le modèle évolue n'est pas nécessairement représentative de la gamme des possibles du monde réel.

L'utilisation d'une approche multi-modèles a pour but de tenter d'appréhender une partie de ces incertitudes.

La diversité des modèles apporte une diversité des résultats et traduit une part de l'incertitude à prendre en compte.

D'une part, les différences de résultats obtenus pour les différents modèles permettent d'appréhender une part de l'incertitude liée aux modèles. Les résultats pour lesquels l'ensemble des modèles s'accordent sont a priori plus "sûrs".

D'autre part, à défaut de connaître la distribution des futurs possibles en terme de climat et de débits, l'approche multi-modèles fournit une variabilité de résultats qui est une première approximation de cette variabilité des possibles.

Cependant, l'approche multi-modèles ne rend compte que d'une partie des incertitudes : elle ne permet pas d'appréhender les incertitudes liées aux hypothèses sur le futur (scénario GES, etc...), aux choix méthodologiques unilatéraux (méthode de descente d'échelle unique, etc.) et à certaines limites des modèles.

Quelle utilisation peut-on faire de tels résultats ?

Comme déjà indiqué en tête du rapport, l'incertitude ne doit pas empêcher de dégager les grandes tendances et d'apporter une aide à la décision pour la mise en place de mesures d'adaptation.

⁶ Se référer au rapport Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08, Pagé et al, 2008

Cependant, il est important de ne pas considérer un résultat unique. L'utilisation d'une seule valeur visant à résumer les 14 simulations sera nécessairement trompeuse et est un écueil à éviter. L'idée de privilégier *a priori* la moyenne des résultats n'est pas forcément absurde mais il est largement préférable de retenir un intervalle de confiance pour chaque résultat, rendant compte de l'incertitude liée à ces prédictions.

"(...) Si l'on prend un paramètre dont la simulation est vérifiable, quel qu'il soit ou presque, et que l'on prend l'ensemble des simulations réalisées, c'est souvent la moyenne des modèles qui donne le meilleur résultat – meilleur que le résultat de chacun des modèles pris séparément. Cela est notamment vrai avec les modèles couplés océan-atmosphère. [] Malgré tout, cette constatation [] est une idée qui donne un poids plus grand à la moyenne des simulations - tendance contre laquelle il faut lutter."

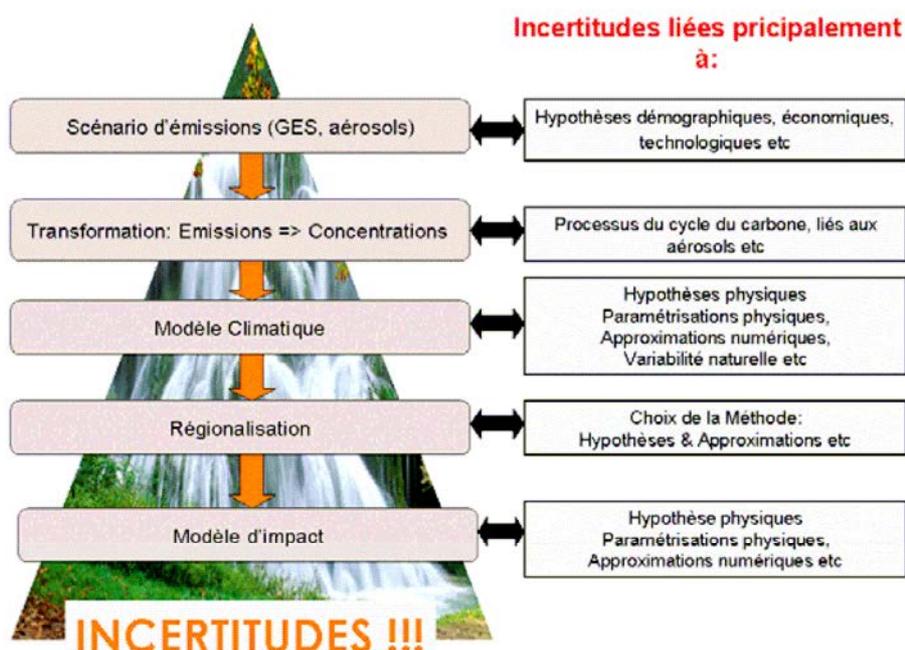
Extrait de « *Changement climatique : les savoirs et les possibles* – Jérôme Chappellaz, Olivier Godard, Sylvestre Huest, Hervé Le Treut – édition La ville brûle – collection 360 – 2010 »

Chaque étape de la chaîne de modélisation implique donc des incertitudes (en termes d'hypothèses et de limites de modélisation) qu'il convient d'appréhender. Il s'agit notamment :

- ▶ du scénario d'émission de gaz à effet de serre ;
- ▶ des modèles de circulation générale ;
- ▶ de la méthode de descente d'échelle (et de la méthode de correction de biais) ;
- ▶ du choix de formulation de l'évapotranspiration potentielle (cf. Annexes 7 et 8) ;
- ▶ des choix et paramétrages des modèles hydrologiques (GR4J et Isba-Modcou) ;
- ▶ de la non prise en compte des influences humaines (à l'exception de quelques bassins).

Ces incertitudes, qui doivent donc être évaluées pour chaque étape de modélisation, sont démultipliées au fur et à mesure de la démarche, comme schématisé à la Figure 62.

Figure 62 : Cascade des incertitudes liées à la démarche d'étude d'impact, d'après Boé (2007)



L'incertitude finale sur les résultats est la combinaison des incertitudes de chaque étape.

2.6.2 Quelles incertitudes sont liées au choix du scénario GES ?

Dans Explore 2070, seul le scénario A1B est pris en compte. Les figures ci-dessous, extraites de rapports du GIEC 2007, illustrent l'incertitude inter-scénarios de concentration de gaz à effet de serre (scénarios GIEC).

Figure 63 : Dispersion des projections des modèles climatiques en termes d'évolution de la température moyenne globale

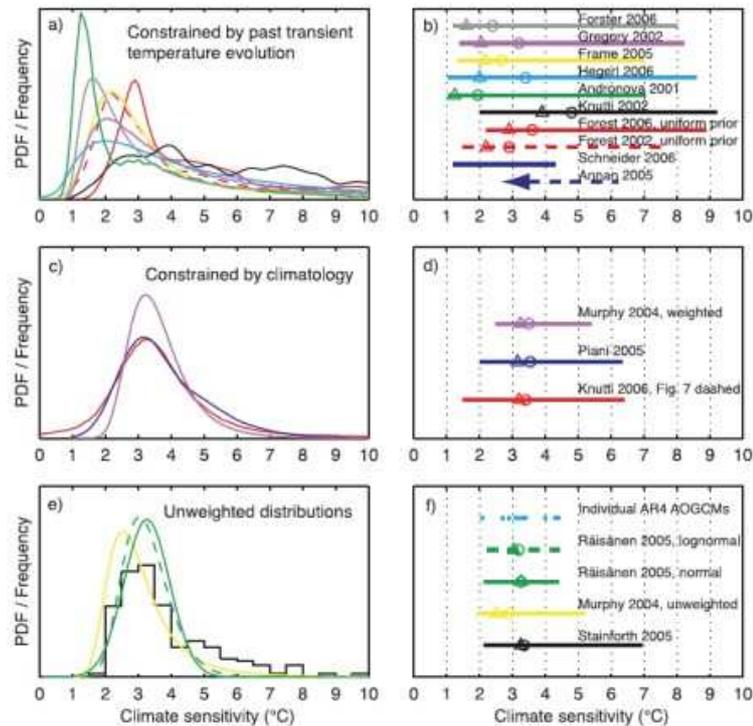


Figure 4.4 a) PDF or frequency distributions constrained by the transient evolution of the atmospheric temperature, radiative forcing and ocean heat uptake, b) as in panel a) but 5–95% ranges, medians (circles) and maximum probabilities (triangles), c/d) same but using constraints from present-day climatology, e/f) unweighted or fitted distributions from different models or from perturbing parameters in a single model (Meehl et al. 2007).

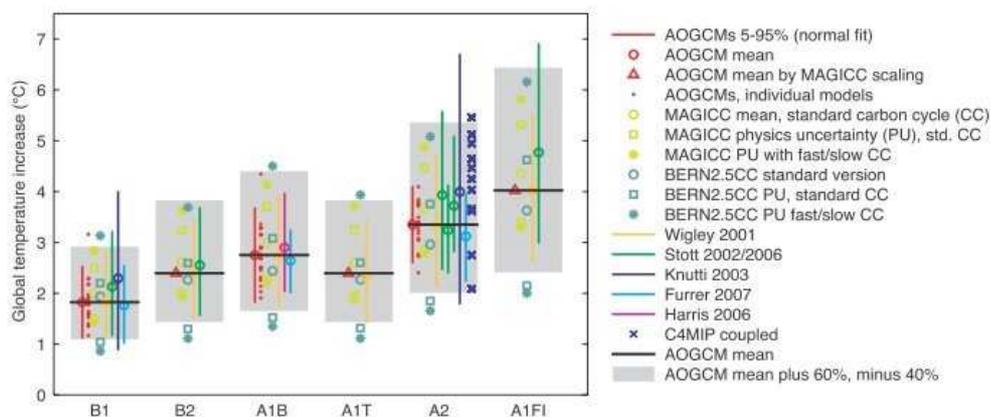


Figure 10.29. Projections and uncertainties for global mean temperature increase in 2090 to 2099 (relative to the 1980 to 1999 average) for the six SPES marker scenarios. The AOGCM means and the uncertainty ranges of the mean –40% to +60% are shown as black horizontal solid lines and grey bars, respectively. For comparison, results are shown for the individual models (red dots) of the multi-model AOGCM ensemble for B1, A1B and A2, with a mean and 5 to 95% range (red line and circle) from a fitted normal distribution. The AOGCM mean estimates for B2, A1T and A1FI (red triangles) are obtained by scaling the A1B AOGCM mean with ratios obtained from the SCM (see text). The mean (light green circle) and one standard deviation (light green square) of the MAGICC SCM tuned to all AOGCMs (representing the physics uncertainty) are shown for standard carbon cycle settings, as well as for a slow and fast carbon cycle assumption (light green stars). Similarly, results from the BERN2.5CC EMIC are shown for standard carbon cycle settings and for climate sensitivities of 3.2°C (AOGCM average, dark green circle), 1.5°C and 4.5°C (dark green squares). High climate sensitivity/low carbon cycle and low climate sensitivity/high carbon cycle combinations are shown as dark green stars. The 5 to 95% ranges (vertical lines) and medians (circles) are shown from probabilistic methods (Wigley and Raper, 2001; Stott and Kettleborough, 2002; Knutti et al., 2003; Furrer et al., 2007; Harris et al., 2006; Stott et al., 2006b). Individual model results are shown for the C4MIP models (blue crosses, see Figure 10.20).

Il ressort des figures précédentes que l'incertitude totale liée à la démarche scénarios/modèles ne sera que partiellement explorée par le projet. En effet, faute de désagrégation disponible de scénario plus pessimiste (par exemple A1FI), il faudra garder à l'esprit le caractère potentiellement "optimiste" des prédictions du projet.

Cela étant, les tendances observées sur les débits (module, étiages) sont déjà suffisamment drastiques pour être efficaces du point de vue de la sensibilisation (mais pas nécessairement du point de vue du dimensionnement de mesures et d'ouvrages).

2.6.3 Quelles incertitudes sont liées au choix des modèles de circulation générale ?

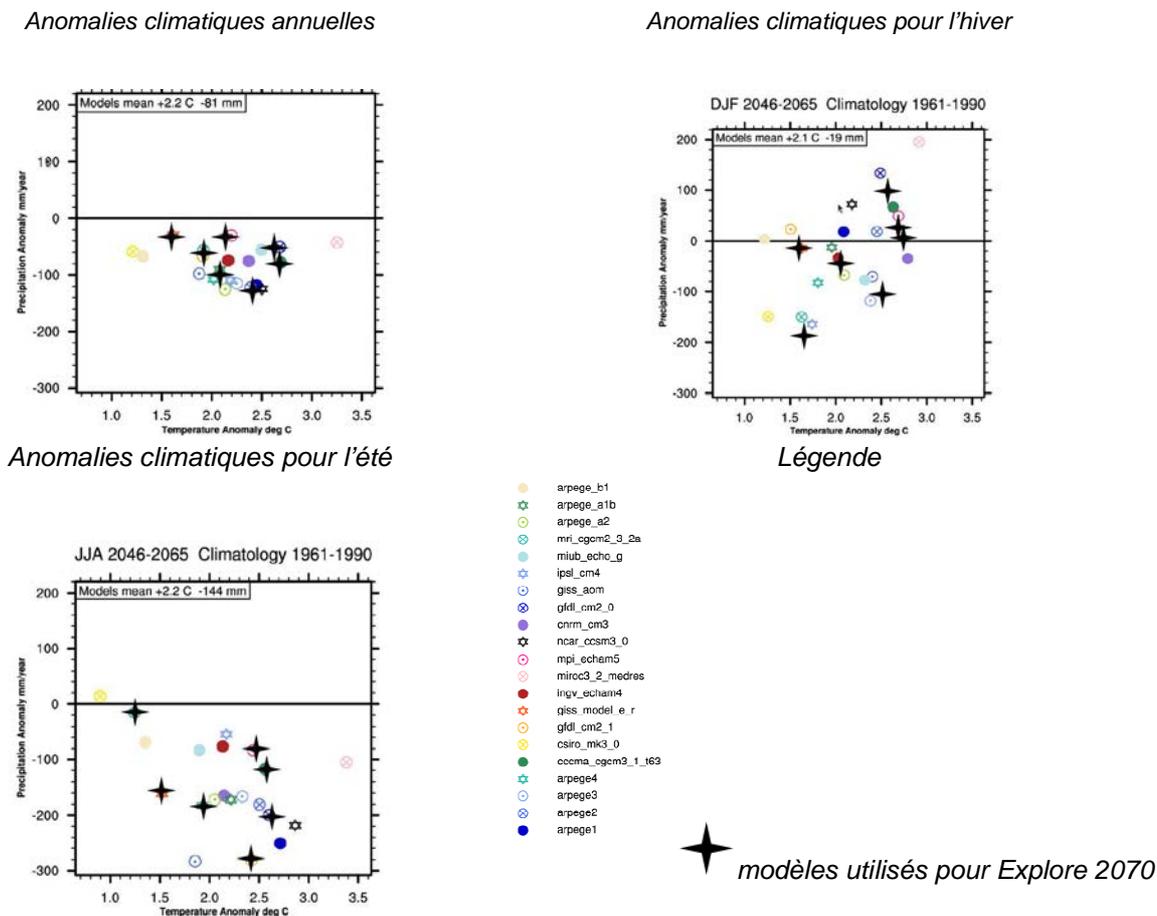
CHOIX DES 7 MODELES CLIMATIQUES

Les sept simulations climatiques utilisées pour Explore 2070 sont extraites des simulations climatiques désagrégées SCRATCH08. Les sept modèles ont été choisis de manière experte par le CERFACS pour le projet RExHySS **afin de représenter la variabilité de l'ensemble des modèles** utilisés par le GIEC⁷.

La Figure 64 permet d'identifier les **7 simulations utilisées** parmi 15 simulations du GIEC désagrégées et 7 simulations ARPEGE : ces modèles apparaissent représentatifs de la variabilité des anomalies de précipitations et de températures produites par l'ensemble des modèles entre 1961-90 et 2046-65.

⁷ Se référer au rapport *Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08*, Pagé et al, 2008

Figure 64 Anomalies climatiques annuelles et saisonnières produites par les modèles du GIEC et en particulier par les sept modèles d'Explore 2070 (source initiale : Pagé et al, 2008)



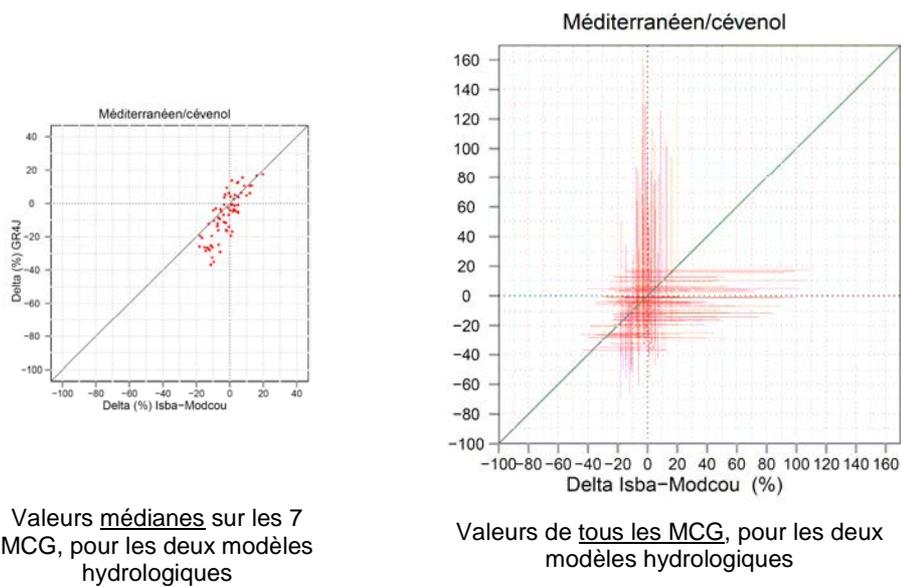
DISPERSION DES RESULTATS ISSUS DES 7 MODELES

Les résultats des 7 modèles climatiques désagrégés sur la France sont présenté sous forme de graphes et cartes des évolutions saisonnières de températures et précipitations au paragraphe 2.4.1.

L'analyse des résultats hydrologiques obtenus pour les différents modèles climatiques rend compte en partie des incertitudes liées à ces modèles. On note que :

- ▶ De façon générale, les modèles climatiques induisent des incertitudes importantes sur tous les résultats, pour tous les bassins.
- ▶ Ces incertitudes peuvent devenir très fortes pour les extrêmes sur certains bassins : c'est notamment le cas de l'évolution des crues dans la région des Cévennes, comme l'illustre la figure ci-dessous.

Figure 65 : Evolution possible du QJXA10 aux points de régime "Méditerranéen/cévenol", entre 1961-90 et 2046-65

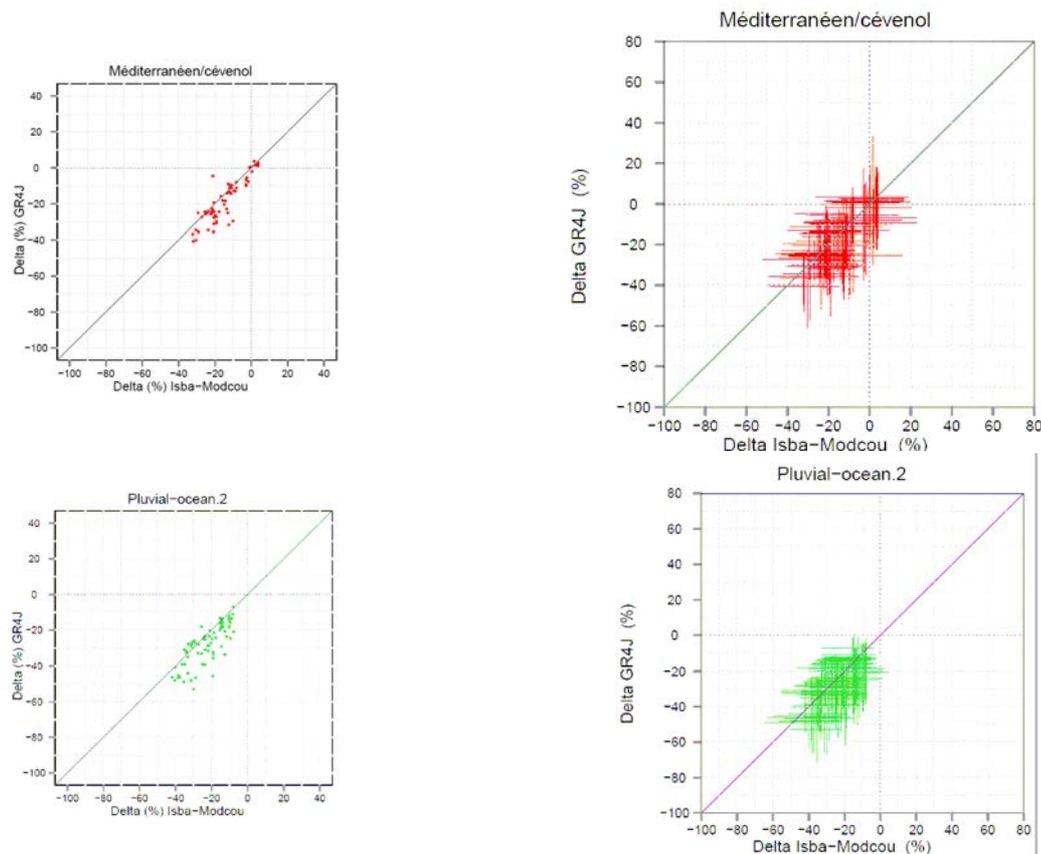


On note des divergences très marquées selon les modèles climatiques.

Pour certains bassins, le signe de l'évolution s'inverse selon les modèles. On note des écarts de l'ordre de 80 à 100 points entre les simulations issues des 7 modèles climatiques.

Ces incertitudes sont cependant moins prononcées lorsqu'il s'agit de la ressource annuelle. On note des écarts de l'ordre de 40 à 50 points entre les simulations des 7 modèles (Figure 66).

Figure 66 : Evolution possible du module aux points de régime "Méditerranéen/cévenol" et "pluvial-océanique-2", entre 1961-90 et 2046-65



Valeurs médianes sur les 7 MCG, pour les deux modèles hydrologiques

Valeurs de tous les MCG, pour les deux modèles hydrologiques

2.6.4 Quelles incertitudes sont liées au choix de la méthode de descente d'échelle ?

Plusieurs études montrent que l'étape de descente d'échelle des simulations climatiques issues des MCG induit de fortes incertitudes, qui peuvent être dans certains cas du même ordre de grandeur que les incertitudes liées aux MCG⁸.

D'après la littérature actuelle⁹, le choix de la méthode de descente d'échelle induit notamment des incertitudes en termes de précipitations saisonnières, de répartition spatiale des anomalies climatiques, et de températures, notamment en été. De façon générale, ces incertitudes sont plus fortes quand il s'agit d'extrêmes, et s'accroissent davantage en termes de moyennes.

De plus, il apparaît que ces incertitudes sont amplifiées par les modèles hydrologiques : on retrouve donc de fortes différences entre les résultats hydrologiques produits à l'aide de modèles de descente d'échelle différents.

⁸ Voit thèse M. Lafaysse

⁹ Notamment article Quintana Segui cité plus bas.

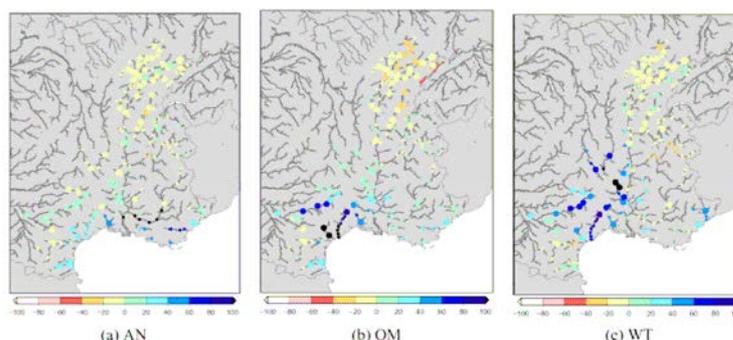
Deux études ont notamment été menées par Quintana Segui et al (2010, 2011), qui mobilisent un modèle climatique (Sea Atmosphere Mediterranean Model), trois méthodes de descente d'échelle¹⁰ (dont DSCLIM dont on a utilisé les résultats dans le présent projet) et un modèle hydrologique (Isba-Modcou).

Cette étude s'intéresse aux évolutions hydrologiques possibles sur le bassin méditerranéen français du Rhône, entre 1970-2000 et 2035-2065. Il ressort que :

- ▶ Pour certains bassins, les trois simulations ne s'accordent pas sur le sens de la tendance hydrologique (en termes de débit moyen annuel et de débits moyens mensuels, notamment pour le printemps).
- ▶ Pour les autres bassins, il existe parfois une différence de 30% entre les anomalies hydrologiques prédites par les trois simulations.
- ▶ On observe des différences concernant l'étendue spatiale des évolutions des extrêmes hydrologiques.
- ▶ Cependant, les trois chaînes de simulations s'accordent sur la tendance globale (en l'occurrence : les débits extrêmes devraient fortement augmenter dans les Cévennes), mais il n'est pas possible de statuer sur l'ampleur géographique de cette tendance.

La Figure 67 présente les résultats des trois simulations concernant l'évolution possible du QJXA10.

Figure 67 : Evolutions possibles du QJXA10 entre 1970-99 et 2035-64 : résultats issus des trois méthodes de descente d'échelle, d'après Quintana et al, 2011. (%)



Le choix de la méthode de descente d'échelle peut donc fortement influencer les résultats, à la fois en termes d'estimation et de régionalisation des évolutions hydrologiques possibles.

2.6.5 Quelles incertitudes sont liées au calcul de l'évapotranspiration potentielle ?

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est une variable climatique théorique, qui représente la demande évaporatoire de l'air, et est définie comme le volume d'eau qui serait évaporé si la surface était menée à saturation (Granger, 1989). Il s'agit de d'une donnée d'entrée climatique du modèle hydrologique GR4J, permettant de simuler l'évapotranspiration réelle, l'un des principaux composants du bilan en eau à l'échelle du bassin versant.

Il existe de nombreuses formulations qui permettent d'estimer l'ETP en fonction de variables atmosphériques mesurables (la température de l'air, la vitesse du vent, le rayonnement net, l'humidité relative de l'air). Le modèle utilisé pour le calcul de l'ETP peut constituer une source d'incertitude non négligeable pour les simulations hydrologiques, d'autant qu'il fait intervenir des variables atmosphériques difficilement estimables en temps futurs (vent, etc.).

¹⁰ Une méthode basée sur les régimes de temps, une méthode des anomalies et une méthode dite « quantile mapping »

L'analyse comparée des études Explore2070 et Rexhyss sur quelques points d'étude permet de mettre en évidence l'importance de cette source d'incertitude dans les résultats en termes d'évolution hydrologique simulée (Annexe 7).

En outre, l'Annexe 8 propose une synthèse bibliographique sur les incertitudes liées à l'estimation de l'évapotranspiration potentielle dans l'étude des impacts hydrologiques des changements climatiques.

2.6.6 Quelles incertitudes sont liées aux choix et paramétrages des modèles hydrologiques ?

Il s'agit d'évaluer la capacité des modèles hydrologiques à simuler les débits passés et futurs.

Pour la simulation des débits passés, cette évaluation est quantifiée lors des **tests de fiabilité des modèles hydrologiques** par les critères de performances, tels que les critères de Nash-Sutcliffe et le biais du modèle (rapport des volumes observés et simulés).

Cette étape d'étude de fiabilité des modèles est présentée au paragraphe 1.3.5.3. Les Figure 68 à Figure 71 rendent compte de cette analyse.

Le modèle GR4J donne des résultats globalement satisfaisants en temps présent, avec cependant des difficultés de modélisation sur la Corse, le pourtour méditerranéen, la Seine moyenne et aval et le Nord de la France.

Les performances du modèle Isba-Modcou sont globalement moyennes en temps présent, avec plus de difficultés dans la simulation des basses eaux que des hautes eaux (critère C2MLQ, Figure 71)

Comme pour GR4J, on retrouve pour Isba-Modcou des difficultés de modélisation accrues sur certaines zones du territoire, certaines étant communes à GR4J (Alpes, Seine aval).

Cette évaluation n'est cependant pas garante de la qualité de modélisation des débits futurs : un modèle peu performant en temps passé sera probablement mauvais en temps futur, mais un modèle performant en temps passé pourrait ne pas être apte à modéliser les débits futurs, d'autant que le calage du modèle reste le même (pas d'adaptation des paramètres aux conditions futures). Les résultats de l'étude de fiabilité des modèles donnent donc une **quantification partielle de l'incertitude liée aux modèles hydrologiques**.

Il est donc important de noter que, si les performances en temps présent du modèle GR4J sont meilleures que celles du modèle Isba-Modcou à la vue des tests de fiabilité, **cela n'implique pas de supériorité de ce modèle en temps futur : les deux modèles hydrologiques présentent des avantages spécifiques :**

- ▶ Le modèle GR4J donne de bons résultats en temps présent, période sur laquelle il est calé au droit de chaque bassin versant, mais l'utilisation du calage « temps présent » pour les simulations « temps futur » est une hypothèse très forte.
- ▶ Le modèle Isba-Modcou donne de moins bons résultats en temps présent mais il s'agit d'un modèle dit « à base physique », c'est-à-dire qu'il représente de manière plus précise les phénomènes physiques entrant en jeu. Il représente ainsi le bilan hydrique de surface à l'aide d'un modèle de transfert sol-végétation-atmosphère couplant les bilans d'eau et d'énergie, il n'a pas besoin comme entrée d'une variable théorique comme l'ETP. Isba-Modcou est distribué sur la France et calcule un transfert au sein d'un bassin versant explicitement. Ce type de modèle est basé sur des modules validés indépendamment, et n'est pas calé sur la série de données observées. L'absence de calage spécifique donne des degrés de libertés supplémentaires au modèle pour sa réponse en climat futur.

Figure 68 : Performances en validation du modèle GR4J avec module neige Cemaneige - Critère C2MQ

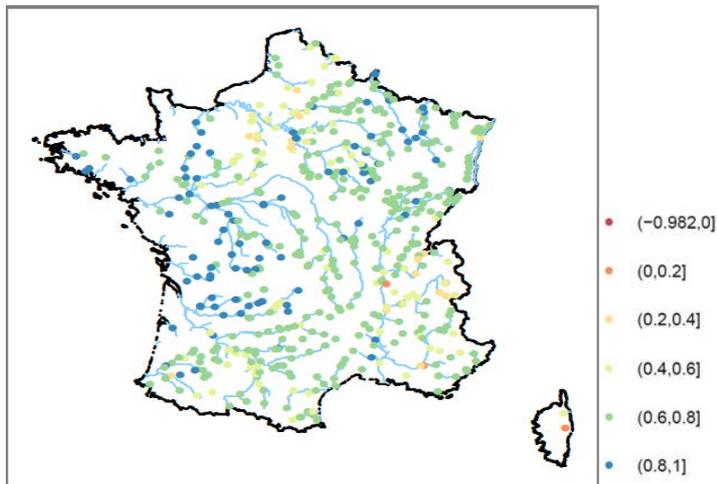


Figure 69 : Performances en validation du modèle GR4J avec module neige Cemaneige - Critère C2MLQ

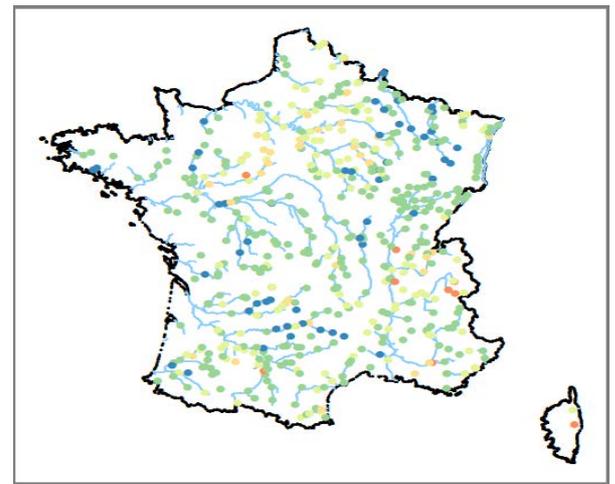


Figure 70 : Performances du modèle Isba-Modcou - critère C2MQ

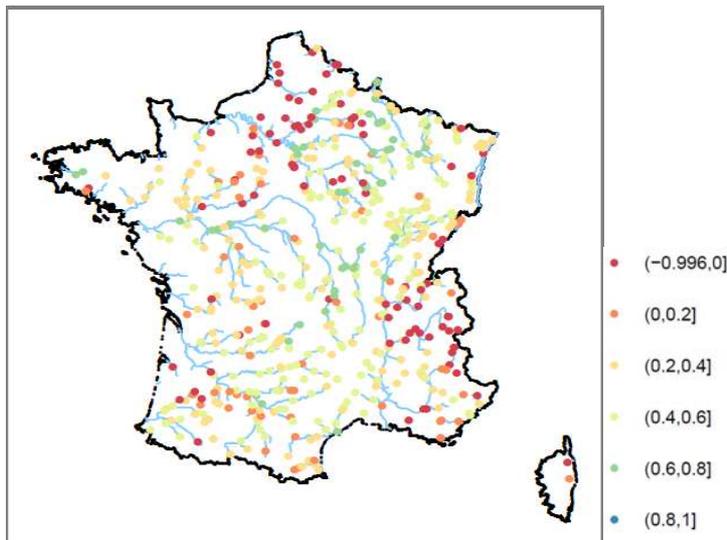
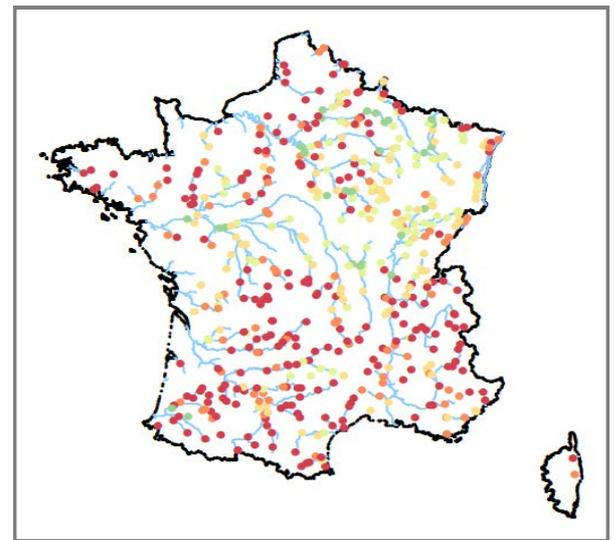


Figure 71 : Performances du modèle Isba-Modcou - critère C2MLQ



La supériorité du modèle GR4J en temps présent pourrait être en partie liée au fait que ce modèle est calé sur les débits observés pour chaque station étudiée, alors qu'Isba-Modcou ne bénéficie pas d'un tel calage. Pour tester cette hypothèse, le modèle GR4J a été testé sans calage à la station, le bassin étant alors considéré comme non jaugé. Dans ce cas, l'estimation des paramètres se fait par une technique dite de « régionalisation », en exploitant les estimations de paramètres faites sur des stations « voisines » jaugées. Ici, nous avons utilisé une approche de proximité spatiale, cette méthode ayant été jugée la plus efficace sur un large échantillon de bassins français (Oudin et al., 2008). Les paramètres des cinq stations les plus proches ont été considérés pour chaque station cible. Avec ces cinq jeux de paramètres issus des stations voisines, les simulations avec les forçages du bassin cible sont réalisées en temps présent. La moyenne des cinq simulations obtenues est alors retenue comme la simulation sur le bassin cible considéré comme non jaugé.

Les performances de GR4J en « non jaugé » (pour les forts débits avec le NS(Q) et pour les faibles débits avec NS(lnQ)) sont présentées dans le Tableau 3. A titre de comparaison, les performances de GR4J en jaugé (c'est-à-dire comme présentées précédemment) et de Isba-Modcou sont données. On remarque dans ce tableau la nette et logique détérioration des performances de GR4J lorsqu'il est utilisé en mode non jaugé. Cette moindre performance est visible à la fois pour les forts débits et pour les faibles débits. Cependant, GR4J donne toujours de meilleurs résultats qu'Isba-Modcou. Le calage à la station de GR4J n'explique donc pas à lui seul la différence de fiabilité entre les modèles en temps présent.

	NS(Q)			NS(lnQ)		
	GR4J	Isba-Modcou	GR4J en non jaugé	GR4J	Isba-Modcou	GR4J en non jaugé
Quantile 10%	0.67	-0.70	0.37	0.62	-3.7	0.18
Médiane	0.83	0.54	0.76	0.80	0.13	0.73
Quantile 90%	0.90	0.74	0.87	0.89	0.69	0.86

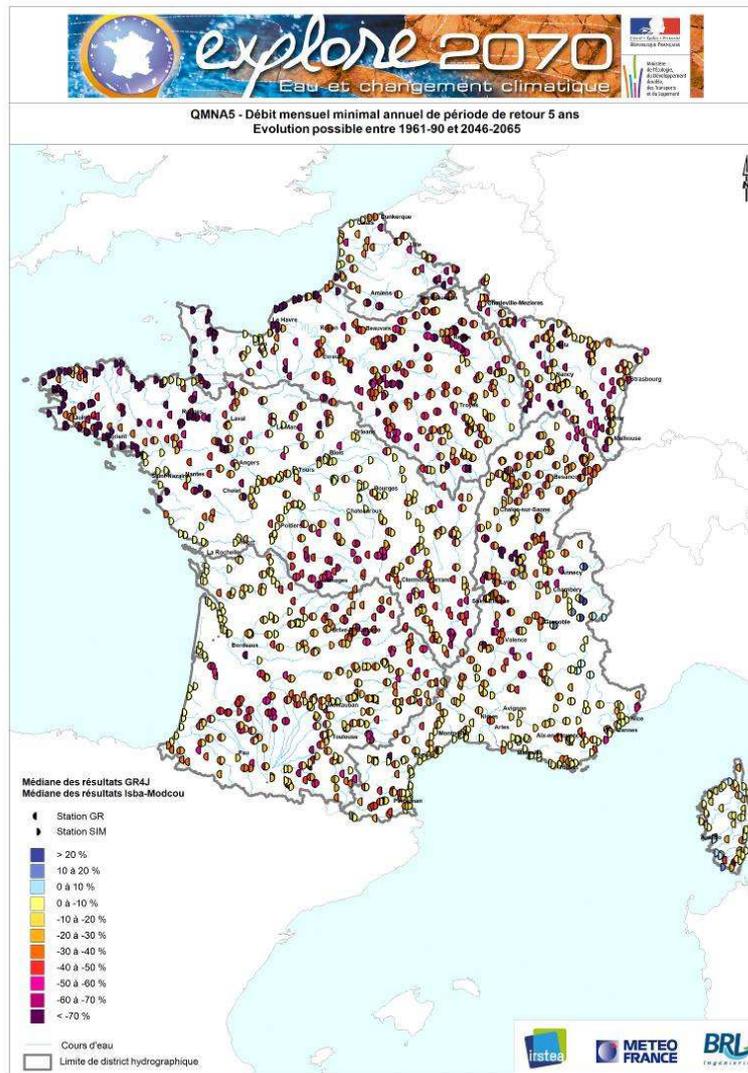
Tableau 3: Critères de Nash-Sutcliffe (NS) calculés sur les débits (Q) et sur les logarithmes des débits (lnQ) pour les modèles GR4J et Isba-Modcou, sur les 543 sous-bassins versants simulés par les deux modèles. Quantiles 10%, 50% et 90% des 543 valeurs du critère.

Pour compléter l'analyse de l'incertitude liée aux modèles hydrologiques, deux points sont à prendre en compte :

- ▶ **Il faut garder à l'esprit l'ensemble des grandes hypothèses liées à la modélisation hydrologique (voir 1.3.5.4).**
- ▶ **L'écart des résultats obtenus par les deux modèles hydrologiques peut être un indicateur intéressant. On note notamment que :**
 - **La divergence entre les deux modèles hydrologiques est particulièrement prononcée pour les débits d'étiages (QMNA5, et débits de juillet à septembre) :** pour les débits d'étiages, le modèle GR4J prédit des baisses de débits nettement plus sévères que le modèle Isba-Modcou de façon générale.
 - Les modèles sont parfois en désaccord sur le signe de l'évolution (**notamment pour certains bassins de régime nival**).
 - Pour d'autres bassins, **les valeurs de la baisse possible des débits d'étiages sont très contrastées selon les modèles hydrologiques** : pour un grand nombre de bassins, l'évolution possible du QMNA5 serait de l'ordre de 0 à 30% pour le modèle Isba-Modcou, mais de 40 à 70% pour le modèle GR4J (valeurs médianes sur les 7 MCG).
 - Pour tous les indicateurs, des écarts entre les deux modèles hydrologiques sont notables, mais ces écarts sont nettement moins prononcés pour la ressource moyenne annuelle, et les débits d'hiver (à l'exception notable des bassins de régime nival, pour lesquelles de fortes divergences apparaissent en hiver)

Ces éléments sont illustrés ci-après.

Figure 72 : Evolution possible du QMNA5 entre 1961-90 et 2046-95 : Résultats médians issus des deux modèles hydrologiques GR4j et Isba-Modcou (Carte bimodèle)



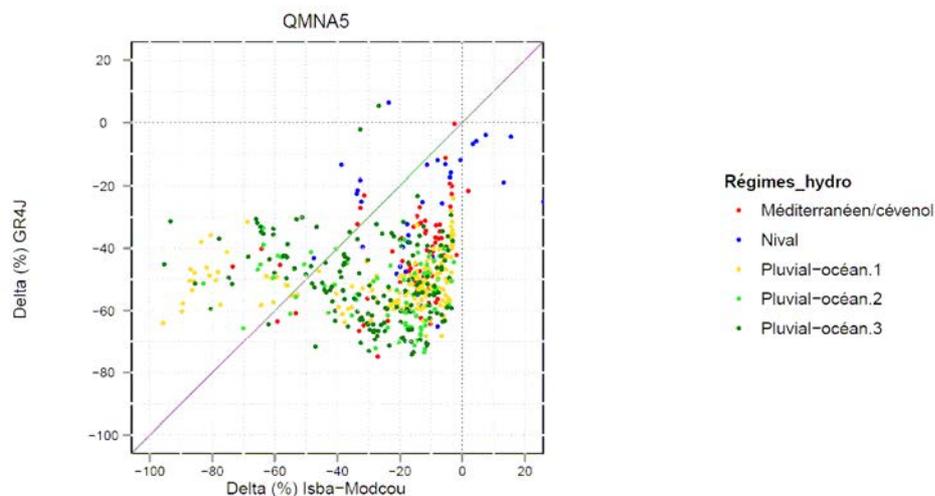
La carte de la Figure 72 présente la médiane des sept simulations GR4J (demi-cercles de gauche) et la médiane des sept simulations Isba-Modcou (demi-cercles de droite).

Elle met en évidence de forts contrastes des résultats issus des deux modèles hydrologiques en termes de débits d'étiage :

- ▶ les modèles divergent sur le signe de l'évolution en certains bassins des Alpes et de la Corse ;
- ▶ le modèle GR4J projette souvent des diminutions des débits beaucoup plus fortes que le modèle Isba-Modcou.

Les incertitudes liées aux modèles hydrologiques pèsent donc fortement sur les projections des évolutions possibles des étiages.

Figure 73 : Evolution possible du QMNA5 entre 1961-90 et 2046-95 : Résultats médians issus des deux modèles hydrologiques GR4j et Isba-Modcou (graphique par régime hydrologique)



La Figure 73 présente les médiane des sept simulations GR4J et les médiane des sept simulations Isba-Modcou, pour le QMNA5. Pour la plupart des points de calcul, on note d'importantes divergences entre les deux modèles.

Cependant, les écarts entre les deux modèles hydrologiques sont nettement moins marqués en ce qui concerne l'évolution du débit annuel (Figure 74).

Une analyse spécifique en Annexe 3 montre par ailleurs que, pour un certain nombre de points et certaines variables, **les variations simulées entre temps présent et temps futur sont de l'ordre de grandeur des erreurs relatives du modèle en temps présent, voire inférieures à ces valeurs. Il convient donc d'être attentif à la significativité des tendances mises en évidence.**

Figure 74 : Evolution possible du module entre 1961-90 et 2046-95 : Résultats médians issus des deux modèles hydrologiques GR4j et Isba-Modcou (Carte bimodèle)



2.6.7 Quelles incertitudes sont liées à l'utilisation de débits influencés ?

Compte tenu des contraintes du projet, le travail de modélisation hydrologique ne pouvait s'attacher à prendre en compte les diverses influences anthropiques sur les débits observés au droit des 1522 points de calcul.

Deux raisons principales expliquent cela :

- ▶ d'une part, il n'y a pas, à l'heure actuelle, de base de données nationale centralisée et facilement exploitable, qui permettrait de prendre en compte les diverses influences pouvant exister sur les bassins ;
- ▶ d'autre part, compte tenu des outils de modélisation utilisés, il n'y a pas de procédure automatisable permettant de prendre en compte ces influences dans les modèles.

Nous avons donc fait l'hypothèse que les débits simulés par les modèles hydrologiques pouvaient être considérés comme une estimation des débits observés.

Pour les bassins sur lesquels il y a des influences fortes en crue ou en étiage, cela peut cependant avoir pour conséquence d'entraîner un biais dans l'estimation des paramètres du modèle hydrologique (les paramètres ont tendance à s'adapter aux influences) et dans ses sorties Voir par exemple analyse sur les performances du modèle Isba-Modcou en Annexe 5.

Afin d'estimer le biais que peut introduire cette hypothèse sur les résultats du projet, un travail de désinfluencement des débits et de modélisation des états naturels a été réalisé sur quelques bassins dits « bassins zooms ». Ce travail concerne les simulations de débits avec le modèle GR4J.

En ces quelques points d'études, l'ensemble des influences anthropiques ont été évaluées (barrages, prélèvements, dépendances et impacts depuis l'amont, transfert hydraulique, etc.), et les débits naturels ont été reconstitués. Le modèle GR4J a donc été calé sur les débits naturalisés. Ce calage permet de simuler les débits passés et futurs, selon la démarche définie au chapitre 1.3.5.

La comparaison des résultats obtenus selon les deux démarches (avec et sans désinfluencement) permet de déterminer la sensibilité des résultats et leur qualité vis-à-vis du travail de désinfluencement et de rendre compte de l'incertitude liée à l'utilisation des débits influencés dans les travaux de modélisation du lot Hydrologie de Surface présentés dans le présent document.

Les bassins-zooms pour lesquelles cette analyse a été effectuée sont :

- ▶ deux petits bassins côtiers méditerranéens : les bassins de l'Orb et de l'Hérault,
- ▶ le bassin de la Seine,
- ▶ le bassin de la Garonne.

La présentation des influences anthropiques sur ces bassins et les méthodes utilisées pour le désinfluencement des débits sont précisées dans le document B2b - Rapport détaillé Hydrologie Métropole – Zooms.

L'analyse est réalisée en deux étapes :

- ▶ d'une part, on compare la fiabilité du modèle GR4J en temps présent pour les deux approches (avec et sans désinfluencement), quantifiée grâce aux critères C2MQ et C2MLQ (voir paragraphe 1.3.5.3) ;
- ▶ d'autre part, on met en regard sur les résultats issus des deux approches, afin d'évaluer le poids relatif de cette incertitude, par rapport aux autres sources d'incertitudes exposées précédemment.

COMPARAISON DE LA QUALITE DES MODELISATIONS EN TEMPS PRESENT

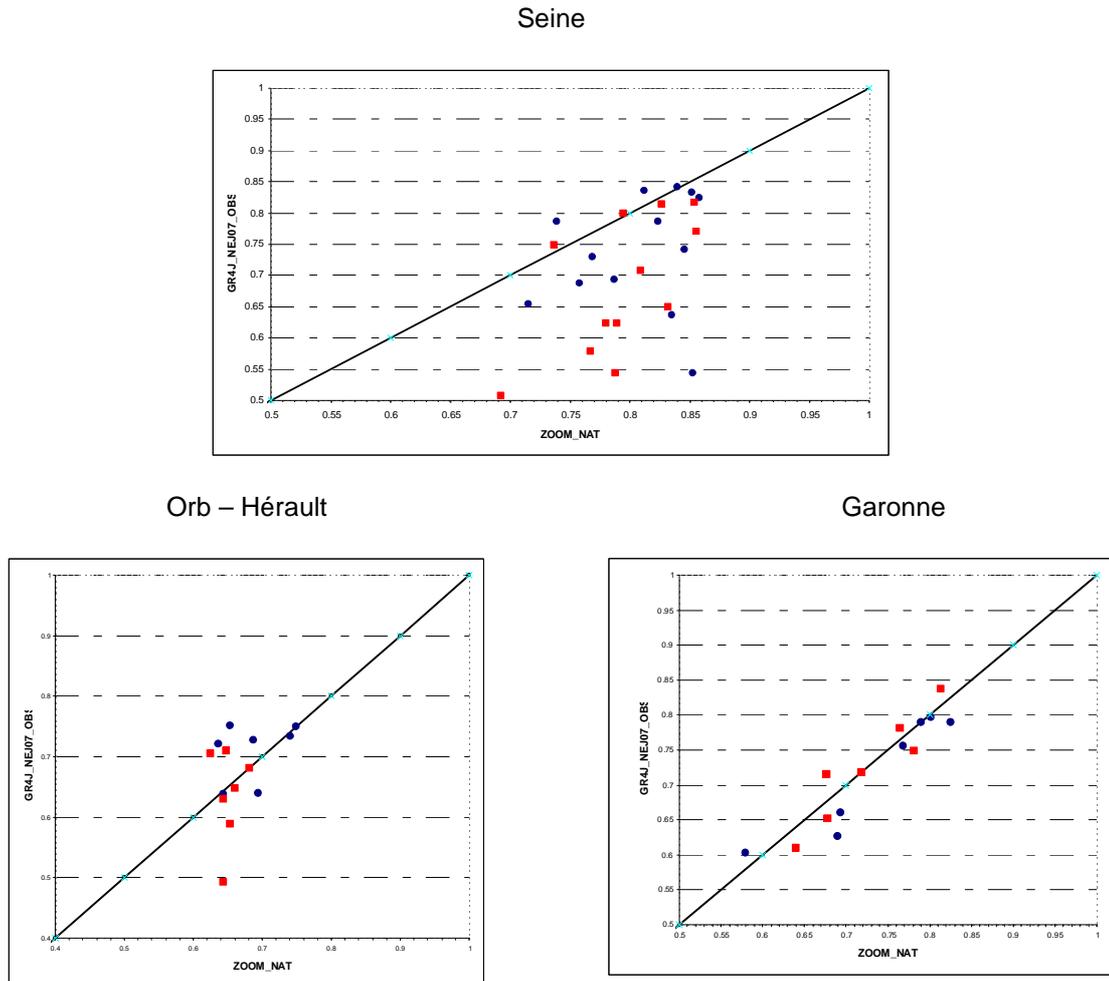
On dispose de 14 points de comparaison pour le bassin de la Seine, et de 7 points pour chacun des bassins zooms Garonne et Orb-Hérault.

Pour ces trois bassins zooms, on compare les performances de GR4J obtenues en contrôle-calage, d'après les critères C2MQ et C2MLQ. Les résultats sont donnés dans la Figure 75.

Il faut cependant noter que, en raison de la disponibilité des données, les périodes de calages utilisées pour les débits influencés d'une part et pour les débits naturalisés d'autre part sont parfois différentes : la comparaison des calages obtenus, et la comparaison des projections calculées doivent donc être reçues avec prudence, certains écarts pouvant être dus à cette différence de périodes.

Il faut noter aussi que le travaux de désinfluencement prennent en compte les prélèvements et les barrages pour l'Orb, l'Hérault et la Garonne, mais uniquement les barrages pour la Seine.

Figure 75 : Critères C2MQ (rond bleu) et C2MLQ (carré rouge) pour la modélisation avec débits naturalisés et débits influencés.



L'analyse comparative des performances avec l'utilisation ou non des débits naturalisés pour le calage du modèle hydrologique GR4J révèle des différences entre les bassins zooms.

Pour le bassin de la Seine, l'amélioration des performances de modélisation est générale et assez prononcée. Cette amélioration est plus forte pour les basses eaux (critère C2MLQ).

Pour la Garonne, les performances sont globalement inchangées tandis que pour le zoom Orb-Hérault, les performances sont très sensiblement dégradées concernant les crues (C2MQ) et sensiblement améliorées concernant les basses eaux (C2MLQ). Les résultats mitigés sur ces deux zooms peuvent avoir de multiples origines, au rang desquelles on peut citer l'inadéquation du modèle et la représentativité des forçages. Il ne faut pas sur-interpréter les différences constatées ici entre les deux approches et l'absence d'amélioration systématique est probablement le signe que, sur ces bassins, les difficultés induites par les influences anthropiques (très importantes dans le cas de chacun des deux bassins) sont du même ordre de grandeur que celles induites par la modélisation du système naturel elle-même.

COMPARAISON DES RESULTATS

Les graphiques de la Figure 76 mettent en regard les résultats issus des deux approches (GR4J avec et sans travail de désinfluencement), pour les 7 modèles climatiques.

D'après ces graphiques, **il semble que l'incertitude liée à l'utilisation de débits influencés est bien plus faible que les incertitudes liées aux modèles climatiques.**

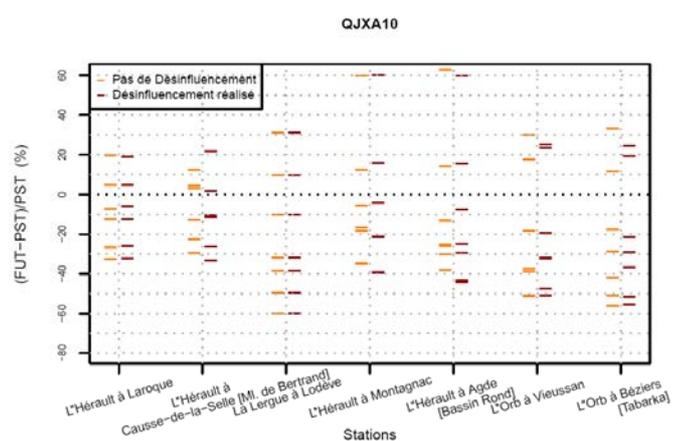
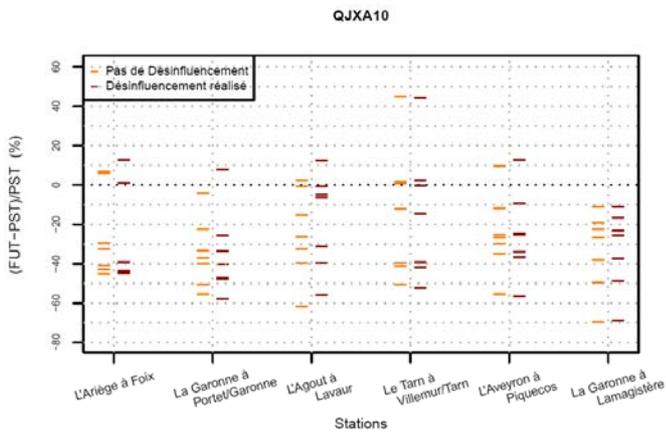
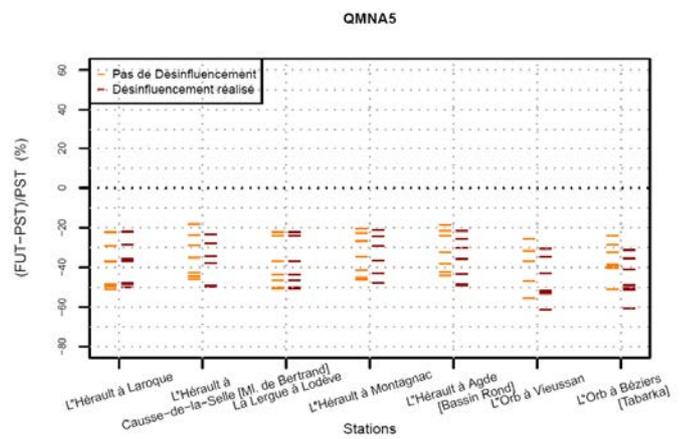
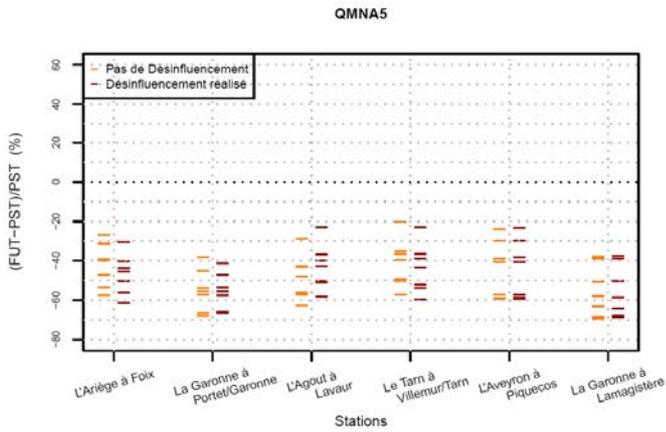
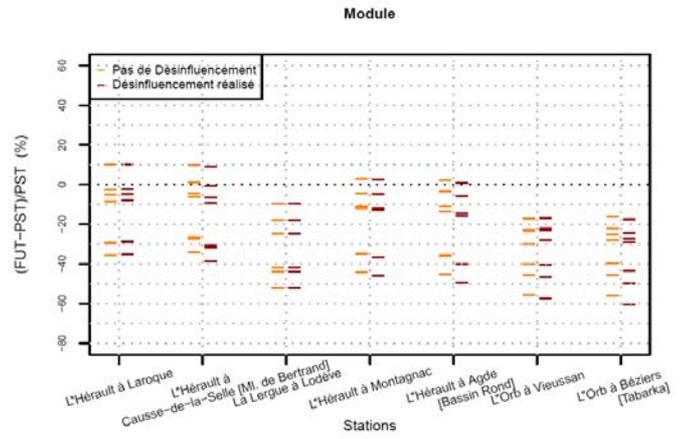
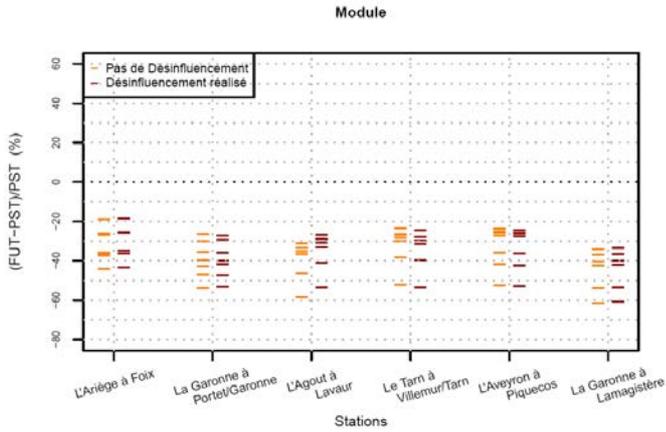
Cependant, **cette incertitude peut être importante pour certains bassins fortement influencés :**

- ▶ pour la Seine à Paris par exemple, la médiane des 7 projections donne une baisse du débit du mois d'août de 46% sans travail de désinfluencement, et de 57% après travail de désinfluencement (même période de calage) ;
- ▶ pour la Seine à Méry-sur-Seine, la médiane de 7 projections donne une baisse de module de 36% sans travail de désinfluencement, et de 25% après désinfluencement.

<p>L'utilisation de débits influencés peut donc fortement impacter les résultats, et il reste donc préférable, pour toute étude d'impact, de considérer les débits naturalisés pour avoir accès à une estimation de l'évolution de la ressource naturelle, sans introduire le bruit lié aux influences humaines.</p>

Comparaison des résultats avec désinfluxement ou non sur le bassin de la Garonne

Comparaison des résultats avec désinfluxement ou non sur les bassins de l'Orb et l'Hérault



2.6.8 Peut-on identifier des sources d'incertitudes prépondérantes ?

On ne peut identifier de façon générale, pour l'ensemble des résultats présentés ici, une source d'incertitude prépondérante. Le poids relatif des incertitudes semble être fonction de la variable considérée.

L'analyse des 14 résultats permet de comparer la variabilité des résultats pour les 7 MCG et pour les 2 modèles hydrologiques, et permet d'affirmer que :

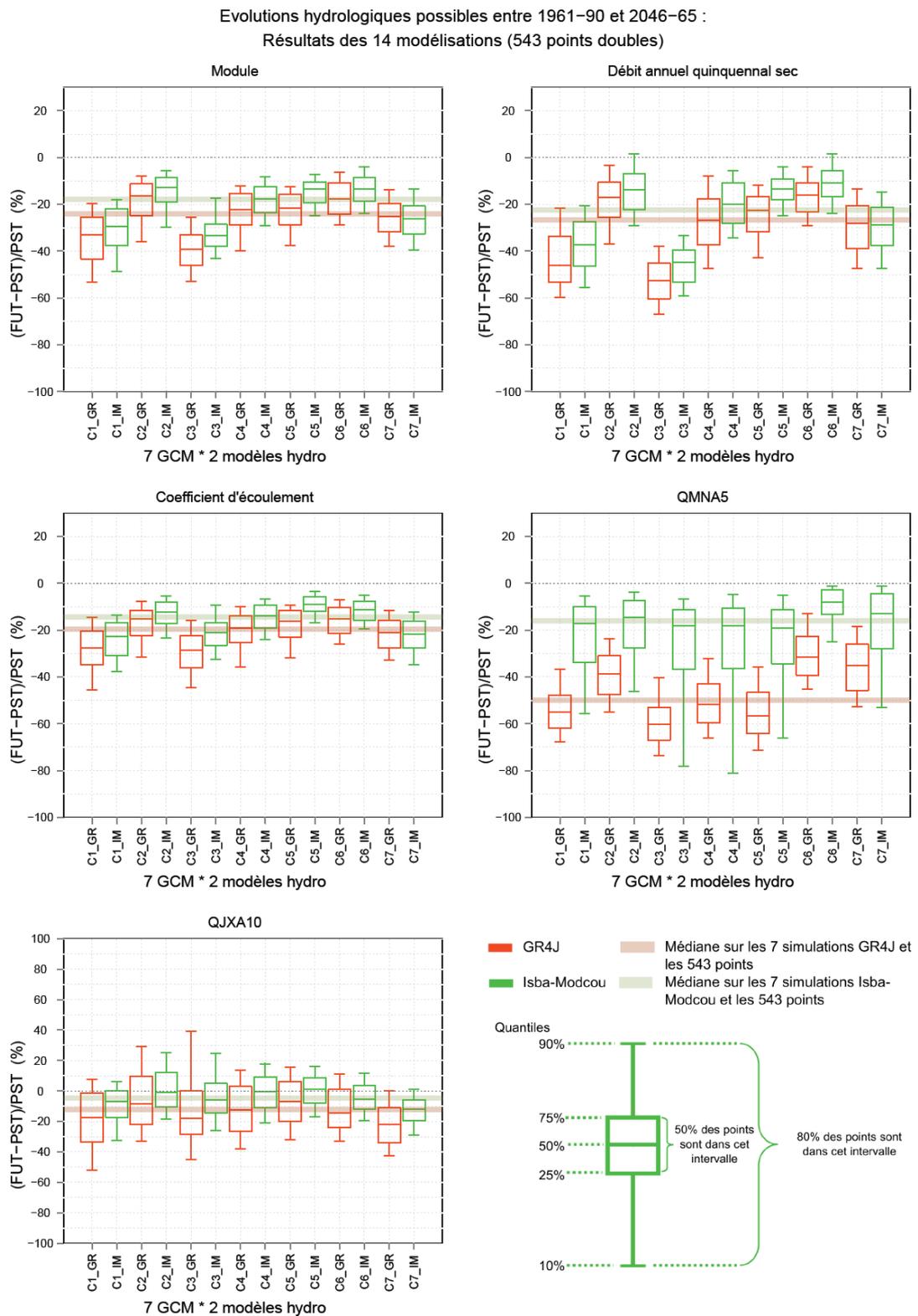
- ▶ **pour le module et le débit quinquennal sec annuel, l'écart entre les résultats semble venir de façon prépondérante des modèles climatiques, plutôt que des modèles hydrologiques ;**
- ▶ **de façon générale, les incertitudes sont moins prononcées pour les moyennes annuelles que pour les extrêmes ;**
- ▶ pour le coefficient d'écoulement et le QJXA10, on n'identifie pas de source d'incertitude prépondérante ;
- ▶ **pour le QMNA5, l'écart entre les résultats vient de façon prépondérante des modèles hydrologiques. Notons cependant que c'est en période d'étiage que la disparité des performances entre les modèles hydrologiques semble la plus forte, ce qui pourrait expliquer ce résultat.**

Les modèles climatiques et les modèles hydrologiques sont donc deux sources d'incertitudes prépondérantes dans les résultats présentés ici. **Il faut cependant garder à l'esprit que certaines sources d'incertitudes n'ont pas été quantifiées, notamment l'incertitude liée à la méthode de descente d'échelle, qui peut fortement impacter les résultats.** Chen et al (2011) montrent que la méthode de descente d'échelle peut constituer la plus forte source d'incertitude pour les débits de printemps, les débits d'étiages et les débits de crues.

Les sources principales d'incertitudes varient donc selon l'indicateur hydrologique considéré. Il est donc essentiel de considérer l'ensemble des sources d'incertitudes pour les études d'impact globales.

La Figure 77 présente les résultats issus des deux modèles hydrologiques et des 7 modèles climatiques pour différents indicateurs hydrologiques pour les 543 points d'étude, et rend compte de cette analyse en termes d'incertitudes.

Figure 77 : Evolutions hydrologiques possibles entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 modélisations



3. CONCLUSIONS

L'INCERTITUDE NE DOIT PAS EMPECHER D'AGIR

Le présent document met en avant des éléments que l'on peut imaginer déconcertants pour des décideurs. Il affirme en effet, en même temps, la possibilité d'évolutions importantes des débits en France à l'horizon de deux générations, et les fortes incertitudes qui restent attachées à la quantification précise de ces évolutions.

Comme déjà souligné plus haut, cette contradiction ne doit pas empêcher d'agir. Nous sommes d'avis que les convergences de résultats (entre projection au sein du projet lui-même et avec des projections issues de projets en cours ou précédents) sur les grandes tendances que nous nous sommes efforcés de souligner sont une base déjà solide pour initier des politiques d'adaptation.

DIMENSION NATIONALE ET NECESSAIRE ALLERS-RETOURS AVEC DES RESULTATS A L'ECHELLE LOCALE

La thèse de Julien Boé exceptée, Explore 2070 reste le premier exercice de projections hydrologiques conduit à l'échelle nationale. Les résultats d'Explore 2070 offrent ainsi une vision des possibles en termes d'évolution hydrologique sur le pays.

Les maîtrises d'ouvrage à l'œuvre pour mettre en place des politiques d'adaptation s'exercent à la fois au niveau national voire européen mais aussi, et pour beaucoup, au niveau plus local.

Explore 2070 pourra ainsi fournir des résultats de base aux territoires, charge à eux de décider de se lancer dans des exercices propres. De tels exercices pourront consister à simplement s'approprier les résultats déjà établis et/ou en établir de nouveaux pour, par exemple, s'abstenir d'influences anthropiques trop importantes, préciser le calage des modèles hydrologiques ou introduire des données de projections climatiques désagrégées plus récentes. Des exercices prenant en compte la gestion effective des ouvrages hydrauliques seront à conduire.

Ces exercices plus locaux pourront venir en retour nourrir la réflexion nationale.

GRANDS ENJEUX EN TERMES D'ADAPTATION

Les résultats établis viennent questionner en particulier les sujets suivants :

- ▶ Etat des écosystèmes aquatiques,
- ▶ Agriculture et Elevage,
- ▶ Sécurisation en eau potable,
- ▶ Production hydroélectrique,
- ▶ Refroidissement des centrales nucléaires ou thermiques,
- ▶ Risques inondation.

Pour les sujets liés à la gestion de la ressource des équilibres seront à rechercher entre des mesures de réduction de la demande (limitation des consommations d'eau par la modification des comportements, l'utilisation d'autres espèces végétales en agriculture, la limitation ou la réduction des surfaces irriguées dans certains bassins) et des mesures d'offres (nouveaux barrages, nouveaux transferts, ...).

4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET SOURCES

Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C. (2004): Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 286(1-4): 19-35.

Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I., Lavabre, J. (2001): Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 250: 206-223, doi:10.1016/S0022-1694(01)00437-1.

Merz, R., Parajka, J. and Blöschl, G., 2009. Scale effects in conceptual hydrological modeling. *Water Resources Research*, 45: W09405.

Mathevet, T., Michel, C., Andréassian, V. and Perrin, C., 2006. A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins. *IAHS Red Books Series n°307*, pp. 211-219.

Oudin, L., Michel, C., Anctil, F. (2005): Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *Journal of Hydrology*, 303(1-4): 275-289, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.09.030.

Oudin, L., Perrin, C., Mathevet, T., Andréassian, V., Michel, C. (2006): Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 320: 62-83, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.016.

Oudin, L., Andréassian, V. Perrin, C. Michel, C., Le Moine, N. (2008). - Spatial proximity, physical similarity and ungaged catchments: confrontation on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44: W03413.

Valéry, A., 2010: Modélisation précipitations – débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), AgroParisTech (Paris), 405 pp.

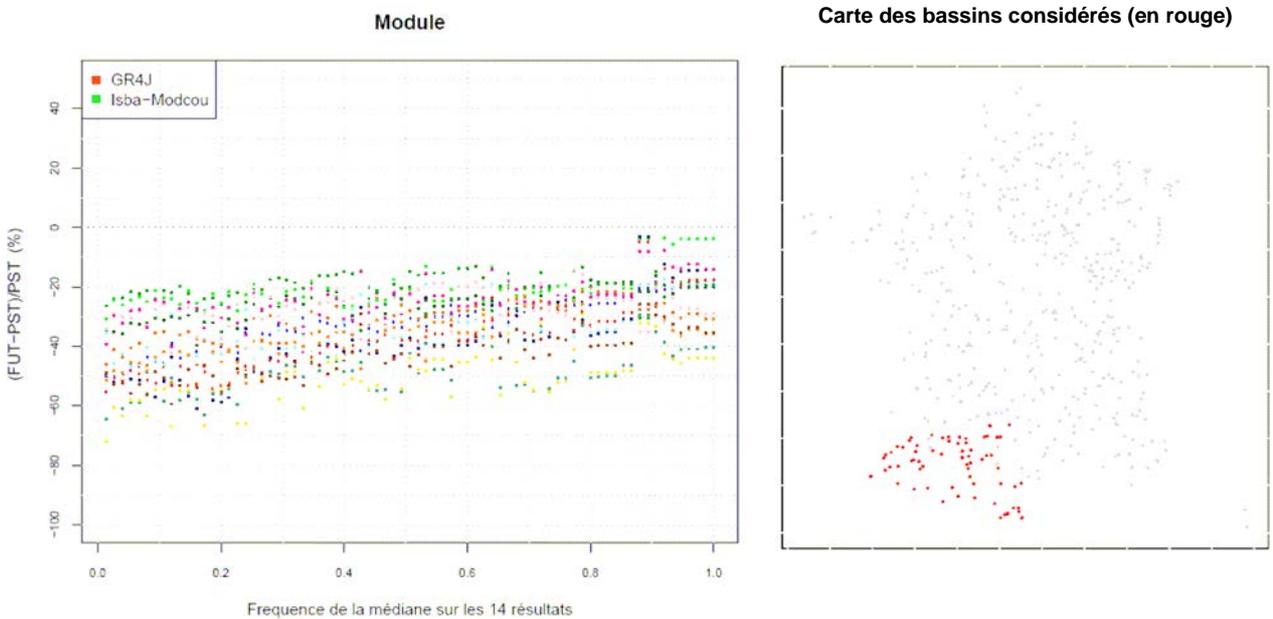
ANNEXES

Annexe 1
Compléments d'analyse des évolutions
hydrologiques possibles : Particularité régionales

RESSOURCE EN EAU

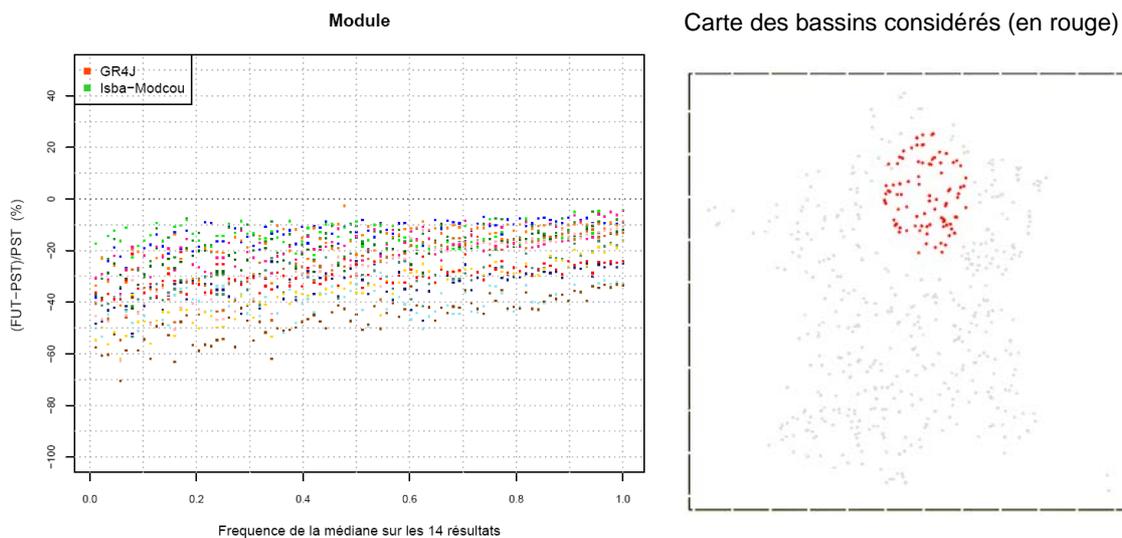
La baisse de la ressource moyenne en eau pourrait être particulièrement prononcée pour les bassins des contreforts pyrénéens et de Seine-Normandie. Les graphiques ci-après illustrent les résultats de l'ensemble des simulations en ces points, en termes de débit moyen annuel.

**Figure 78 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65 :
Résultats des 14 projections pour les bassins des contreforts pyrénéens**



Pour les cours d'eau des contreforts pyrénéens, la baisse du module serait de l'ordre de 10 à 60% selon les projections.

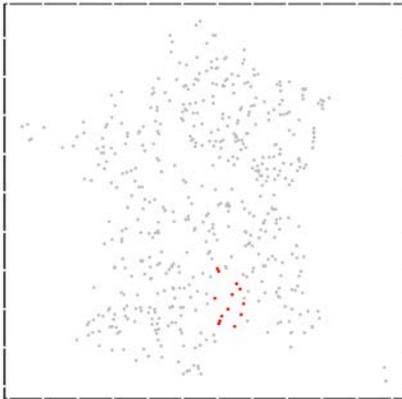
**Figure 79 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65 :
Résultats des 14 simulations (Seine-Normandie)**



Pour une majorité de bassins du district Seine-Normandie, la baisse du module pourrait être de l'ordre de 10 à 60% selon les projections.

D'après les résultats présentés au paragraphe 2.4.2, les projections sont en désaccord quant à l'évolution possible du module dans les Cévennes. L'analyse ci-après détaille les résultats des projections au pas de temps mensuel, pour cette zone. Les points d'étude sont ceux figurés sur la carte de la Figure 80.

Figure 80 : Evolutions relatives possibles (en %) des débits mensuels dans les Cévennes entre 1961-90 et 2046-65. Résultats des 14 simulations.



Evolutions hydrologiques possibles entre 1961-90 et 2046-65 : résultats des 14 projections dans les cénèmes

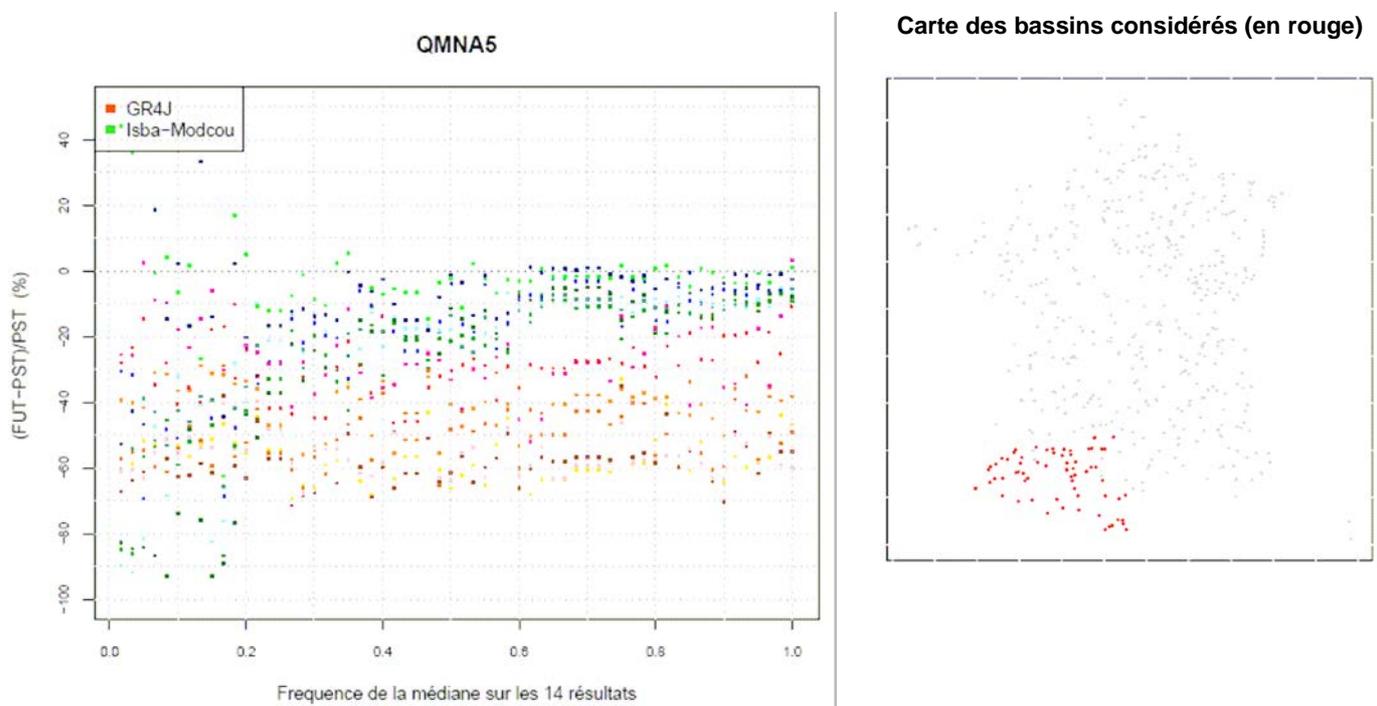


La plupart des projections s'accordent sur une baisse des débits des mois de mai à octobre.

ETIAGES

Les graphiques ci-après représentent les évolutions possibles des étiages sur deux ensembles géographiques spécifiques : les contreforts pyrénéens et les bassins de montagne.

Figure 81 : Evolutions relatives possibles (en %) du QMNA5 entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 simulations pour les bassins des contreforts pyrénéens

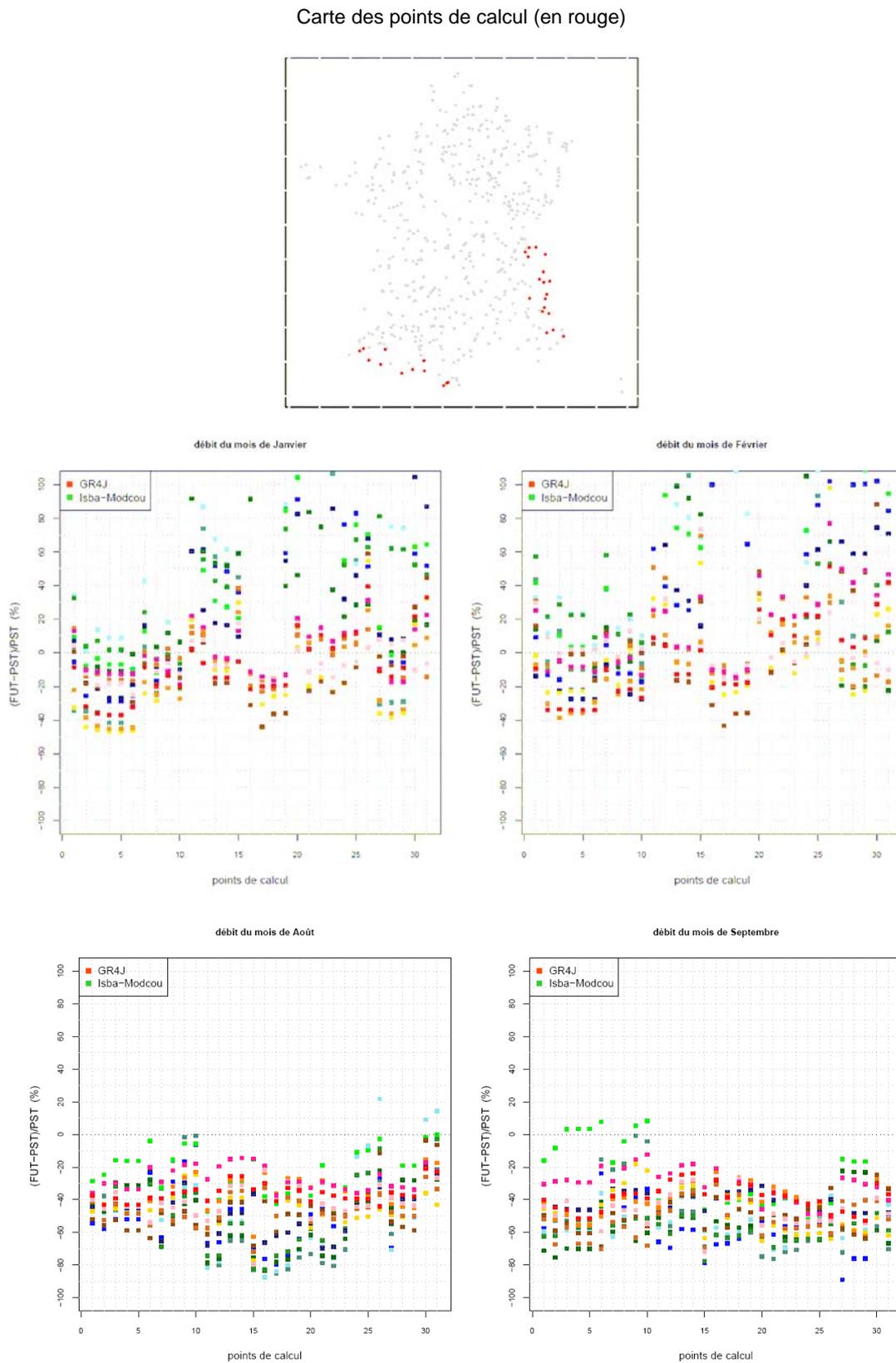


Le QMNA5 pourrait baisser de l'ordre de 0 à 65% pour la plupart des cours d'eau des contreforts pyrénéens.

D'après les résultats présentés au paragraphe 2.4.2, la baisse des débits d'étiages (analyse à l'échelle de toute l'année) pourrait être moins marquée pour les bassins de montagne. L'analyse ci-après, au pas de temps mensuel, permet de préciser ce résultat. Les points d'étude sont ceux figurés sur la carte de la Figure 82.

Les 14 projections s'accordent sur une forte baisse des débits des mois d'août et septembre. En revanche, on ne peut conclure sur l'évolution des débits hivernaux.

Figure 82 : Evolutions relatives possibles (en %) de débits mensuels dans les bassins de montagne



Annexe 2
L'évolution des débits moyens est-elle
majoritairement due à l'évolution des précipitations
ou à l'évolution des températures ?

Les projections climatiques disponibles simulent à la fois les évolutions sur les précipitations et sur les températures. Ces deux variables sont utilisées en entrée des modèles hydrologiques et ont chacune un impact sur les écoulements : l'évolution des précipitations va avoir une influence sur les quantités d'eau disponibles, l'évolution de la température va influencer la demande évaporatoire et donc l'évapotranspiration. Nous avons cherché à quantifier dans quelle mesure ces deux variables sont responsables de l'évolution sur les débits moyens.

Pour cela, nous avons réalisé un test simple permettant de dissocier l'impact de l'évolution de ces deux variables. Nous avons utilisé ici le modèle GR4J. Les simulations de référence en temps présent (PST, période 1961-1990) sont celles obtenues avec les simulations de précipitations et de températures en temps présent, pour chacun des sept MCG disponibles.

Trois configurations ont été testées pour produire les simulations en temps futur (FUT, période 2046-2065) :

- ▶ Configuration 0 : Le modèle GR4J est alimenté par les simulations de précipitations et de températures en temps futur. Cette configuration correspond à celle utilisée pour réaliser les projections dans le cadre d'Explore 2070
- ▶ Configuration 1 : Le modèle est alimenté par les simulations de précipitations sur la période temps présent et par les températures en temps futur. Cette configuration correspond à un test "à précipitations stationnaires" entre PST et FUT. Sur la période 2046-2065, on choisit ici d'utiliser les précipitations simulées sur 1962-1981.
- ▶ Configuration 2 : Le modèle est alimenté par les simulations de précipitations en temps futur et par les températures en temps présent. Cette configuration correspond à un test "à températures stationnaires" entre PST et FUT. Sur la période 2046-2065, on utilise ici les températures simulées sur 1962-1981.

La comparaison des configurations 0 et 1 permet d'évaluer la part de l'évolution des débits due à l'évolution sur les précipitations, la comparaison des configurations 0 et 2 celle due à l'évolution des températures.

La Figure 83 compare les différentes évolutions pour toutes les projections hydrologiques obtenues sur l'échantillon de bassins (7 points par bassin). On constate que :

- ▶ en considérant une évolution des températures en temps futur : le fait de considérer des précipitations sans évolution (configuration 1, qui fait l'hypothèse de précipitations dans le futur identiques à celle en temps présent) plutôt que des précipitations avec une évolution (configuration 0) conduit quasiment à la même baisse du débit moyen en moyenne sur l'échantillon de bassins entre PST et FUT (diminution de 23 % en moyenne, contre 25% pour la configuration 0) (Figure 83a). Le nuage de point est ainsi globalement centré sur la bissectrice. Cependant, il y a une forte dispersion du nuage de points, indiquant des tendances très différentes suivant les bassins. Cela traduit la sensibilité du modèle lorsque l'on change les précipitations en entrée. Globalement, toutes les évolutions sur les débits moyens sont négatives dans la configuration 1, indiquant que si l'on conservait les précipitations actuelles en temps futur, les tendances sur les débits moyens resteraient orientées à la baisse.
- ▶ en considérant une évolution des précipitations en temps futur : le fait de considérer des températures sans évolution (configuration 2, qui fait l'hypothèse de températures dans le futur identiques à celle en temps présent) plutôt que des températures avec une évolution (configuration 0) conduit à un déplacement du nuage de points vers des valeurs d'évolutions des débits moyens moitié plus faibles (diminution moyenne de 12%, contre 25% pour la configuration 0) (Figure 83b). Cette moindre diminution est quasiment systématique et s'inverse sur un nombre significatif de bassins qui voient leurs débits augmenter. Le nuage de points est globalement parallèle à la première bissectrice, indiquant qu'il y a une bonne concordance entre les évolutions, à un écart relatif près. Ces résultats indiquent que, si l'on conservait les températures actuelles, la baisse moyenne sur les débits serait moins marquée, et qu'une part significative des bassins verraient leur débit augmenter.

Le tableau ci-dessous résume le plan du test.

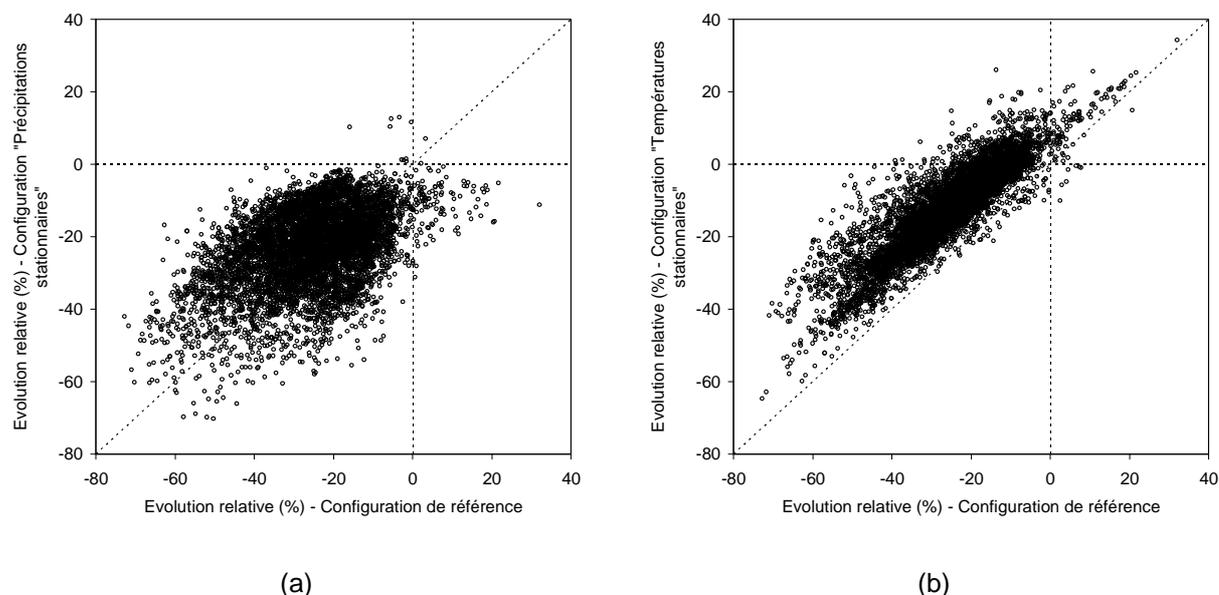
Tableau 4 : L'évolution des débits moyens est-elle majoritairement due à l'évolution des précipitations ou à l'évolution des températures ? - Plan du test et Résultats

	Hypothèse sur les pluies	Hypothèse sur les températures	Baisse moyenne du débit moyen annuel
Configuration 0 <i>Configuration de référence</i>	pluies FUT <> pluies PST	températures FUT <> températures PST	25%
Configuration 1 <i>Pluies stationnaires</i>	pluies FUT = pluies PST	températures FUT <> températures PST	23%
Configuration 2 <i>Températures stationnaires</i>	pluies FUT <> pluies PST	températures FUT = températures PST	12%

PST : "temps présent" : 1961-1990

FUT : "temps futur" : 2046-2065

Figure 83 : Comparaison des évolutions relatives des débits moyens, obtenues par le test des configurations 1 (a, "Précipitations stationnaires") et 2 (b, "Températures stationnaires") par rapport à la configuration de référence



Ces résultats indiquent que la tendance globale à la baisse des débits moyens, à l'échelle du territoire, est plus liée à l'augmentation globale de la température qu'aux évolutions sur les précipitations. L'augmentation de la température entraîne une augmentation nette de la demande évaporatoire, ce qui va limiter fortement les volumes disponibles pour les écoulements. Cependant, les variations entre bassins de l'intensité globale de la baisse semblent davantage liées à la variabilité spatiale des évolutions des précipitations.

Cette conclusion n'est probablement pas directement généralisable à d'autres variables hydrologiques, notamment celles liées aux crues, pour lesquelles il faudrait faire des analyses spécifiques.

Par ailleurs, l'exercice réalisé ici ignore les liens entre températures et précipitations simulées, puisqu'il déconnecte temporellement les simulations de ces deux variables. Les résultats semblent cependant cohérents avec ce que l'on connaît du comportement du modèle GR4J via des analyses de sensibilité (Andréassian et al., 2001; Andréassian et al., 2004; Oudin et al., 2005; Oudin et al., 2006). Notons qu'on aurait pu compléter cette analyse en faisant, de manière symétrique, les mêmes tests sur la période présente.

Annexe 3
Comparaison des erreurs relatives en temps présent
et des tendances futures. Complément sur les
incertitude et la significativité des résultats.

La capacité des modèles hydrologiques à restituer les débits observés en temps présent donne un indice de la fiabilité de ces modèles. Cette fiabilité dépend directement de l'écart entre les débits observés et les débits simulés par les modèles hydrologiques, écart qui donne une estimation de l'incertitude introduite dans les calculs et les résultats finaux.

Pour que la mise en évidence d'une tendance entre présent et futur soit significative, il est nécessaire qu'elle soit nettement supérieure au "bruit" de modélisation, c'est-à-dire à la gamme d'erreur du modèle.

Pour qualifier la significativité des tendances, on propose de comparer le biais relatif des modèles hydrologiques en temps présent et les tendances calculées. Cette comparaison est effectuée pour trois variables cibles (débit moyen annuel, QMNA5 et QJXA10). Pour chaque variable (Var), le biais relatif est donné par $|Var_{sim} - Var_{obs}| / Var_{obs}$ et la tendance entre présent et futur est donnée par $|Var_{sim_fut} - Var_{sim_pst}| / Var_{sim_pst}$. Pour chaque bassin, on considère les 14 projections (GR4J et Isba-Modcou alimenté par 7 MCG). L'analyse a été faite sur les 543 points doubles.

Nous avons réalisé une analyse graphique qualitative, en portant en abscisse les biais relatifs et en ordonnées les tendances. Sur chaque graphique, seuls les points situés au-dessus de la bissectrice présentent une tendance calculée plus grande que le biais du modèle hydrologique. Seuls ces points peuvent être considérés comme présentant une tendance significative par rapport aux biais du modèle en temps présent. Cette analyse graphique peut être considérée comme un test de significativité des tendances.

Les résultats montrent que :

- ▶ Pour le module (Figure 84), la plupart des 543 points doubles valident le test pour le modèle GR4J. En revanche, les résultats sont nettement plus mitigés pour le modèle Isba-Modcou.
- ▶ Pour le QMNA5 (Figure 85), les résultats sont nettement moins concluants pour les deux modèles hydrologiques. Dans le cas du modèle Isba-Modcou, la plupart des points ne valident pas ce test de "significativité". Pour le modèle GR4J, les tendances calculées sont supérieures au biais pour la majorité des points, mais un nombre important de points ne valident cependant pas le test.
- ▶ Pour le QJAX10 (Figure 86), les résultats sont particulièrement mauvais. Pour un très grand nombre de points, les tendances calculées sont inférieures ou du même ordre que le biais, et ce quelque soit le modèle hydrologique.

Figure 84 : Comparaison des tendances calculées et du biais des modèle hydrologiques en temps présent :
MODULE

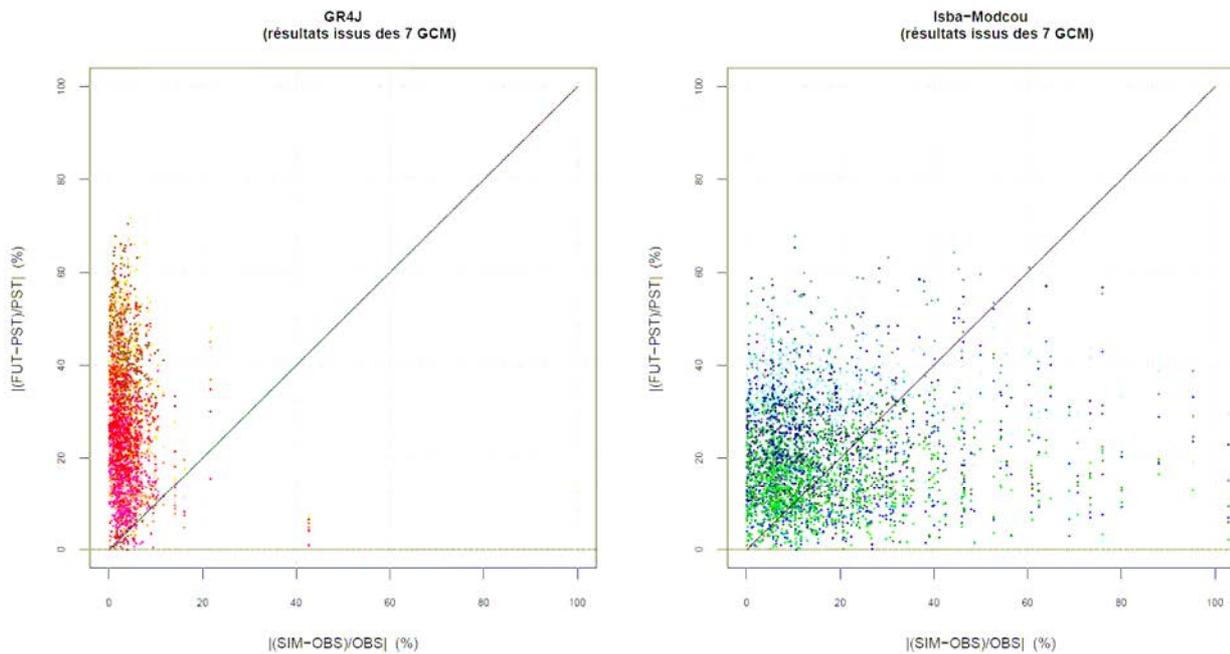


Figure 85 : Comparaison des tendances calculées et du biais des modèle hydrologiques en temps présent :
QMNA5

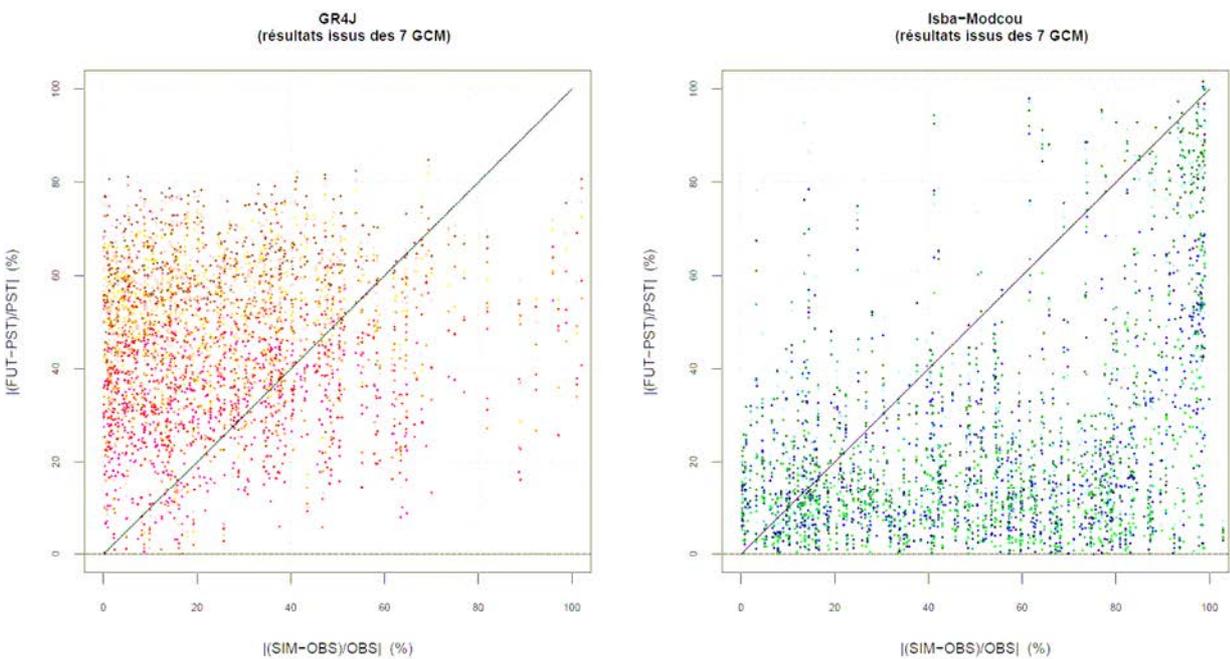
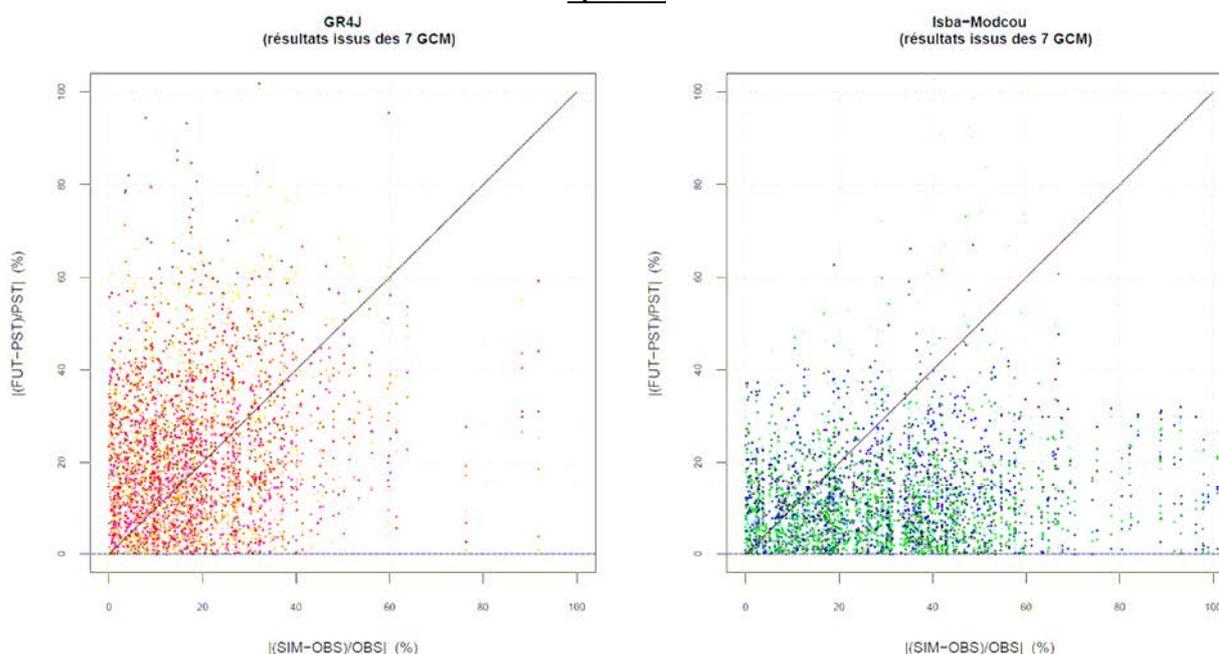


Figure 86 : Comparaison des tendances calculées et du biais des modèle hydrologiques en temps présent : QJXA10



Ce constat doit amener à tempérer les résultats obtenus en termes d'évolutions hydrologiques. Pour ce faire, de nouvelles cartes sont construites, où on l'on représente à la fois la tendance calculée et un indice de comparaison avec le biais relatif du modèle hydrologique en temps présent : la moyenne des tendances calculées par les 14 projections est représentée par une échelle de couleur, l'indice est représenté par la taille des symboles sur la carte. Cet indice est la proportion des 14 projections pour lesquelles la tendance calculée est supérieure au biais relatif du modèle hydrologique en temps présent.

Ces cartes sont comparées aux cartes du même type (couleur des pictogrammes : tendance / taille des pictogrammes : indice de « significativité ») mais où l'indice est cette fois une fonction de la convergence des 14 projections (cartes déjà présentées dans le chapitre 2.4).

On peut faire les commentaires suivants :

- ▶ De façon générale, pour le module (Figure 87 et Figure 88), les points pour lesquels on observe un bon indice de convergence et des tendances marquées (en particulier sur les bassins de la Seine et de la Garonne), sont aussi des points pour lesquels la tendance est supérieure au biais des modèles hydrologiques en temps présent.
- ▶ Pour le QMNA5 (Figure 89 et Figure 90), les résultats sont plus contrastés. Dans le bassin Seine-Normandie, les résultats sont significatifs au regard du biais des modèles en temps présent. En revanche, dans les régions du Sud-Ouest, du centre, des Pays de la Loire et du Rhône aval, pour de nombreux points pour lesquels on observe un bon indice de convergence et des tendances marquées, ces tendances sont en réalité de l'ordre de grandeur du biais. Cela tempère fortement la confiance que l'on peut apporter aux projections.
- ▶ Pour le QJXA10 (Figure 91 et Figure 92), la tendance calculée est de l'ordre de grandeur du biais pour la plupart des points. Les évolutions calculées ne sont donc pas significatives.

Ces résultats donnent donc une vision complémentaire de l'analyse des performances des modèles hydrologiques en temps présent, en reliant ces performances aux tendances simulées. S'ils indiquent la bonne robustesse des tendances sur les débits moyens, ils invitent en revanche à la prudence quant aux conclusions qui pourront être tirées sur les évolutions des crues et des étiages.

Figure 87 : Evolution moyenne du module et convergence des 14 projections

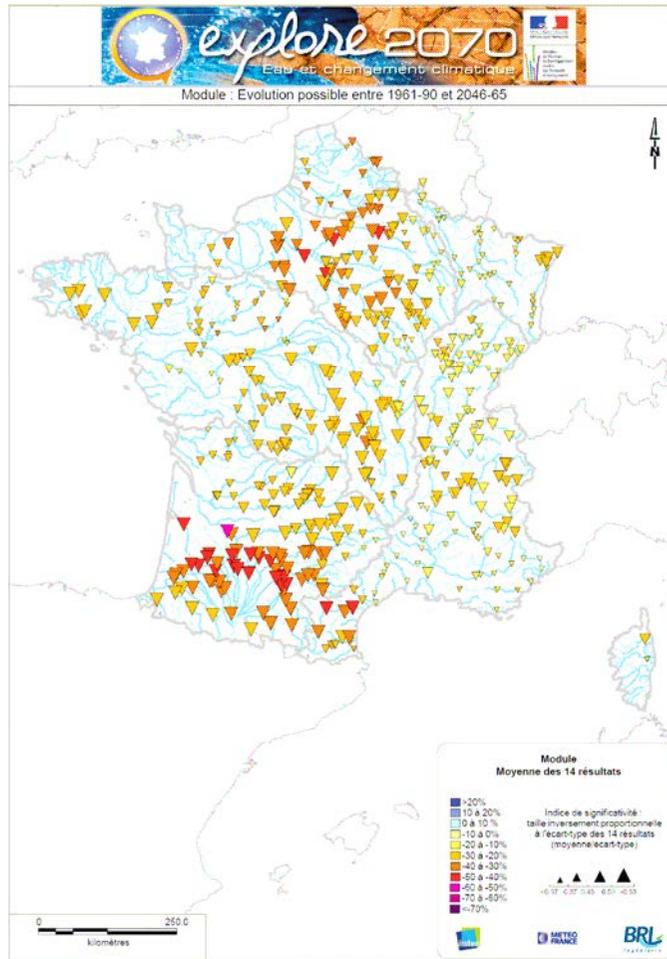


Figure 88 : Evolution moyenne du module et comparaison avec le biais des modèles hydrologiques en temps présent

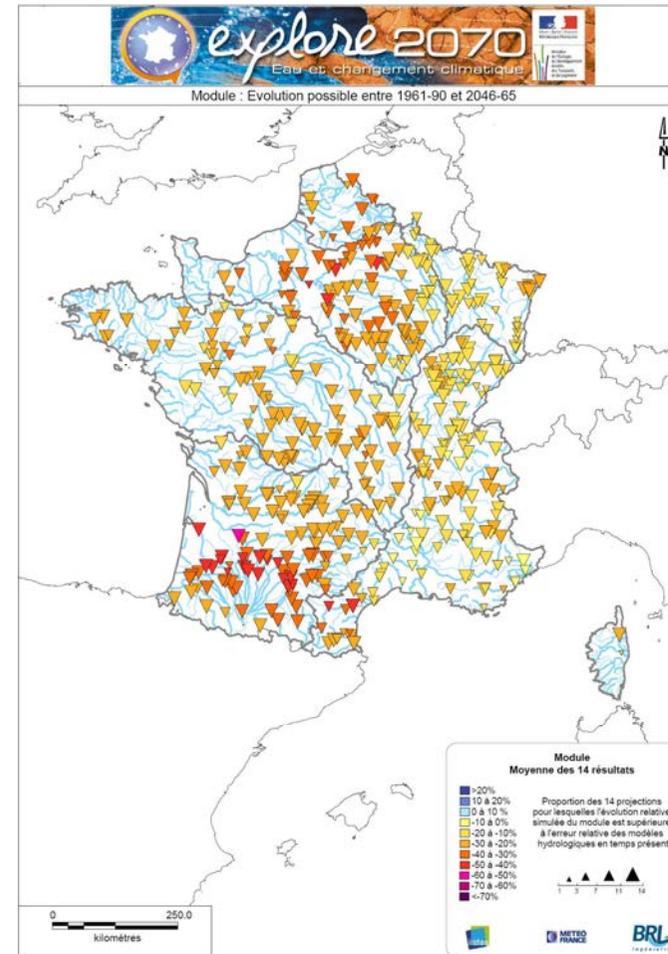


Figure 89 : Evolution moyenne du QMNA5 et convergence des 14 projections

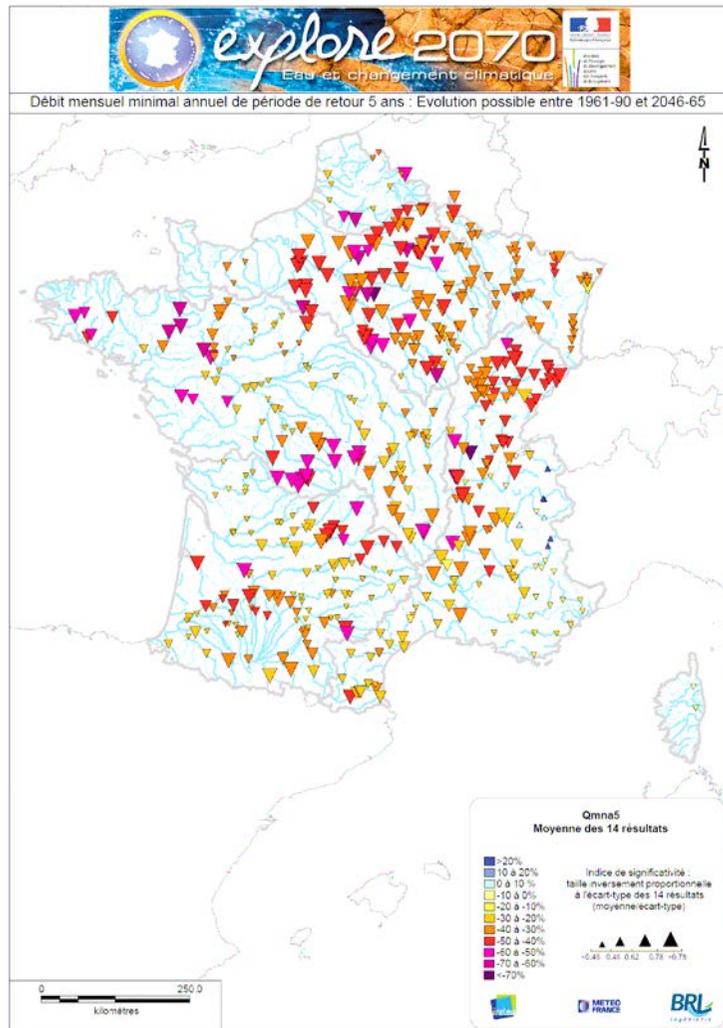


Figure 90 : Evolution moyenne du QMNA5 et comparaison avec le biais des modèles hydrologiques en temps présent

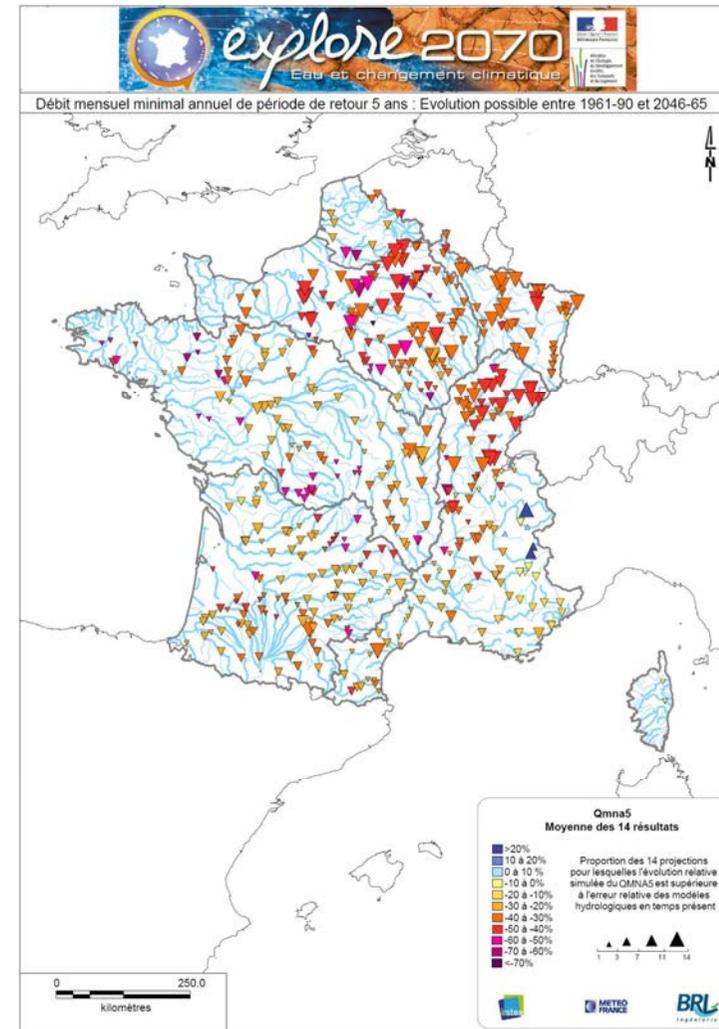


Figure 91 : Evolution moyenne du QJXA10 et convergence des 14 projections

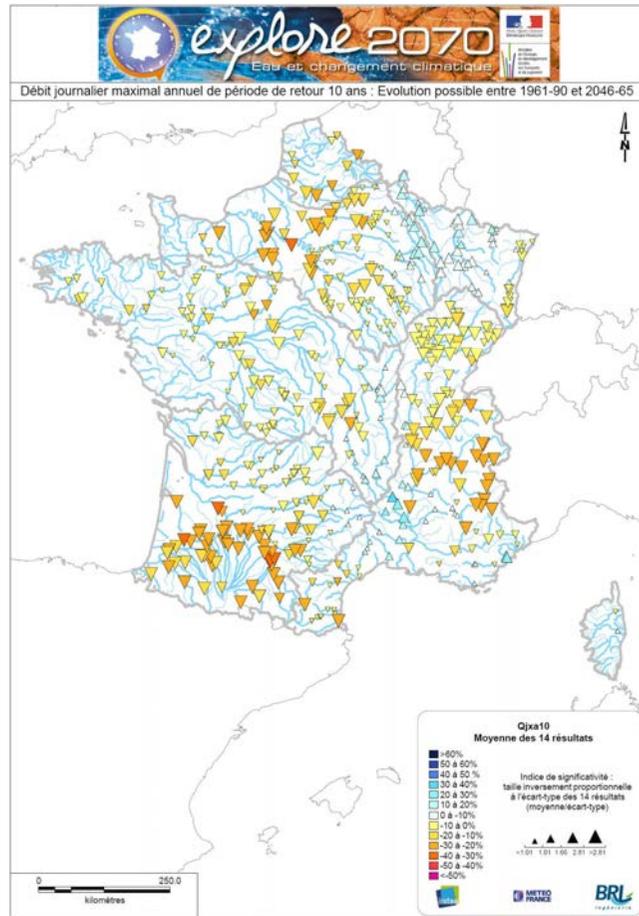
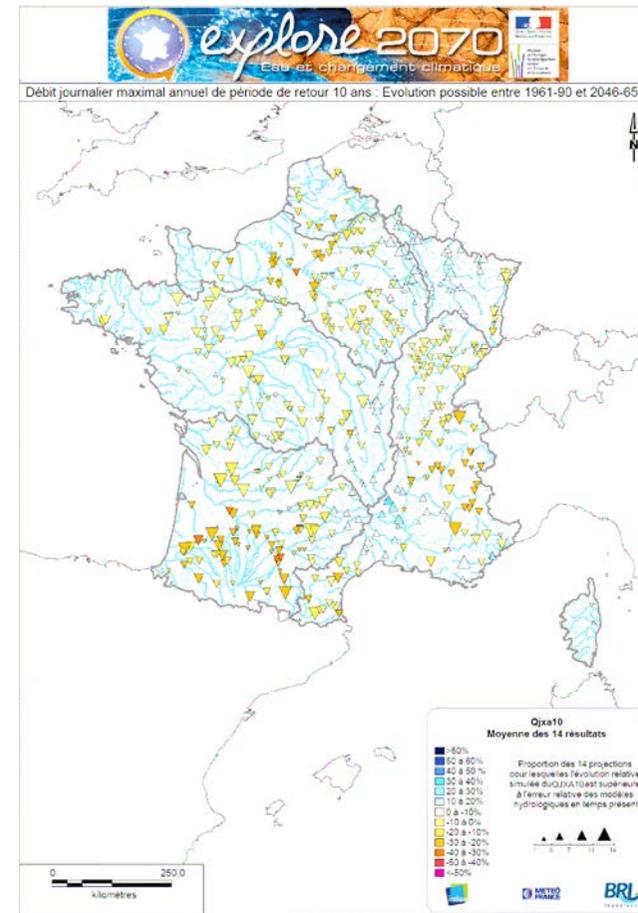


Figure 92 : Evolution moyenne du QJXA10 et comparaison avec le biais des modèles hydrologiques en temps présent



<

Annexe 4
Comparaison des résultats
Lot Hydrologie de Surface – Lot Hydrologie souterraine

Plusieurs points de calcul ont fait l'objet de modélisation hydrologique sous projections climatiques futures par le Lot 3 (*Hydrologie de Surface*) et le Lot 4 (*Hydrologie Souterraine*) dans le cadre du projet Explore 2070. L'analyse ci-après compare les résultats de ces deux Lots, issus de trois modèles hydrologiques : le modèle GR4J, et deux versions du modèle Isba-Modcou (celle utilisée par le Lot 4 modélisant plus finement des aquifères, avec un nombre de couches plus important).

La comparaison des résultats porte sur les 10 points d'étude donnés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Points de calcul commun des lots 3 et 4 pour lesquels sont comparés les résultats.

ID_EXPLORE	Nom
275	L'III à Strasbourg [Chasseur Froid, La Robertsau]
281	La Bruche à Holtzheim [2]
385	L'Avre à Moreuil
386	La Selle à Plachy-Buyon
388	La Somme à Abbeville [Epagne-Epagnette]
446	L'Yonne à Courlon-sur-Yonne
505	La Marne à Noisiel [après création grand lac]
506	La Seine à Paris [Austerlitz après création lacs]
561	La Seine à Poses [après création grands lacs]
622	Le Scorff à Plouay

La comparaison des résultats porte ici sur les tendances calculées entre la période de référence (1961-90) et la période future (2046-65) pour les débits moyens mensuels et annuels. Nous avons réalisé une analyse graphique qualitative, en portant en abscisse les tendances calculées pour les débits moyens simulés par le Lot 3, et en ordonnées les tendances calculées par le Lot 4. Les 7 projections, issues des 7 modèles climatiques, sont représentées sur le même graphique. Les douze débits moyens mensuels sont reliés entre eux. Le débit moyen annuel (module) est représenté par un point en gras sur le graphique. Plus les points sont proches de la bissectrice, plus les résultats des modélisations des deux Lots concordent.

Les résultats (Figure 93 et Figure 94) montrent que :

- ▶ En termes de débits moyens annuels, les deux versions d'Isba-Modcou (Lots 3 et 4) donnent des résultats assez similaires pour la plupart des points d'étude. Sur le bassin de la Seine, la version du Lot 3 est plus pessimiste que celle du Lot 4.
- ▶ En termes de débits moyens mensuels, les écarts entre les deux projections sont nettement plus marqués. Pour le bassin de la Seine, les projections diffèrent de 0 à 20%. Sur les autres bassins, on note des contrastes très importants, voire des divergences de tendance entre les modèles. A noter que pour les bassins 385, 386 et 388, la modélisation des débits par le modèle Isba-Modcou du Lot 3 est particulièrement mauvaise, ce qui peut expliquer ces discordances. Ces mauvaises simulations sont dues à une absence de prise en compte détaillée du souterrain, ce qui est amélioré dans la version du Lot 4.
- ▶ En termes de débits moyens annuels, les simulations de GR4J et d'Isba-Modcou (Lot 4) sont contrastées, les différences étant de l'ordre de 0 à 50% selon les modèles climatiques mobilisés. On note que GR4J est souvent plus pessimiste qu'Isba-Modcou, mais cela dépend des modèles climatiques utilisés.
- ▶ En termes de débits moyens mensuels, les écarts entre les deux projections peuvent être nettement plus marqués pour certains bassins. Ils sont compris entre 0 et 80% pour les points considérés.

Cette analyse montre à nouveau l'incertitude inhérente aux résultats produits dans le cadre d'Explore 2070 et liée aux modèles hydrologiques utilisés.

Figure 93 : Comparaison des variations de débit mensuel entre temps présent et temps futur obtenues par le Lot 3 (modèles GR4J et Isba-Modcou) et le Lot 4 (modèle Isba-Modcou). Chaque courbe lie les douze valeurs de variations de débits mensuels et les points représentent les modules. (bassins 275 à 388)

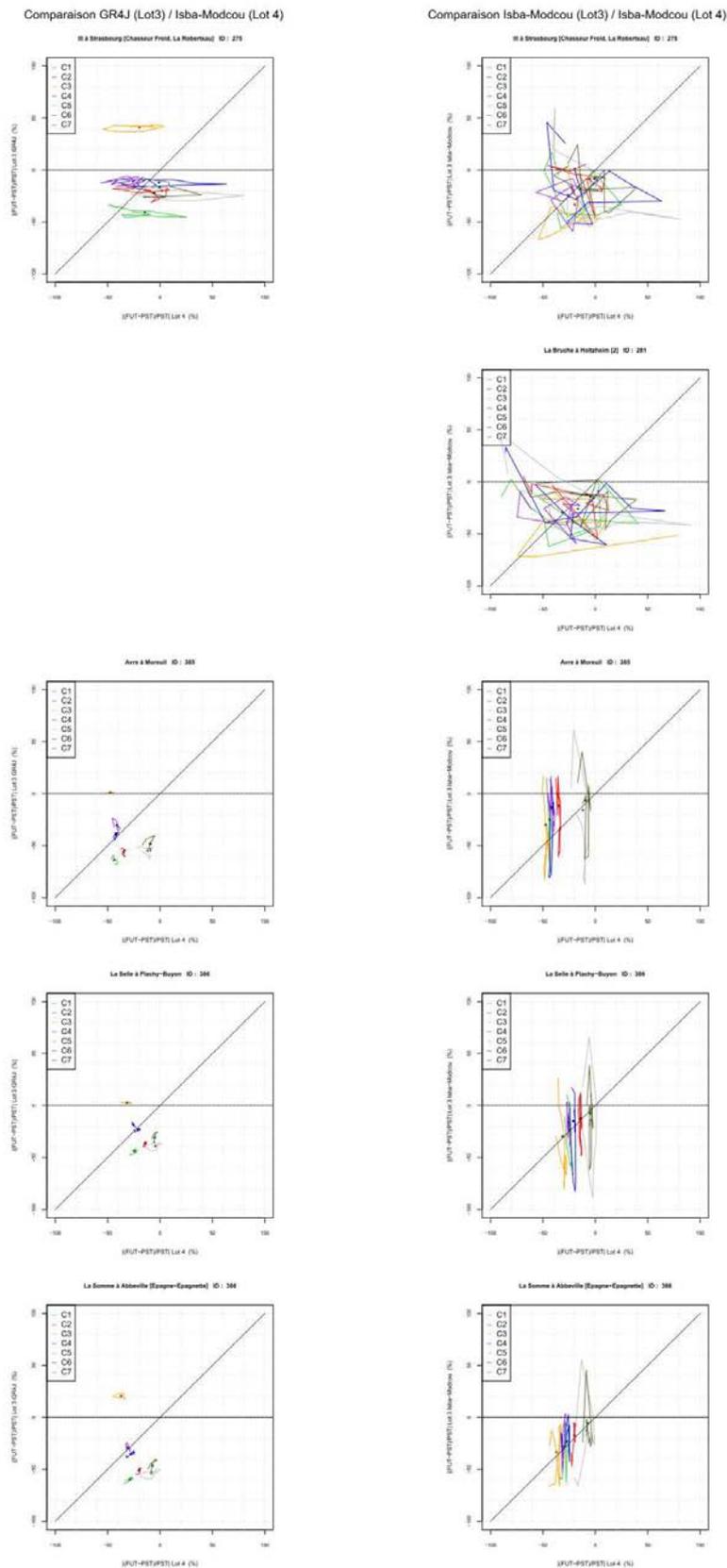
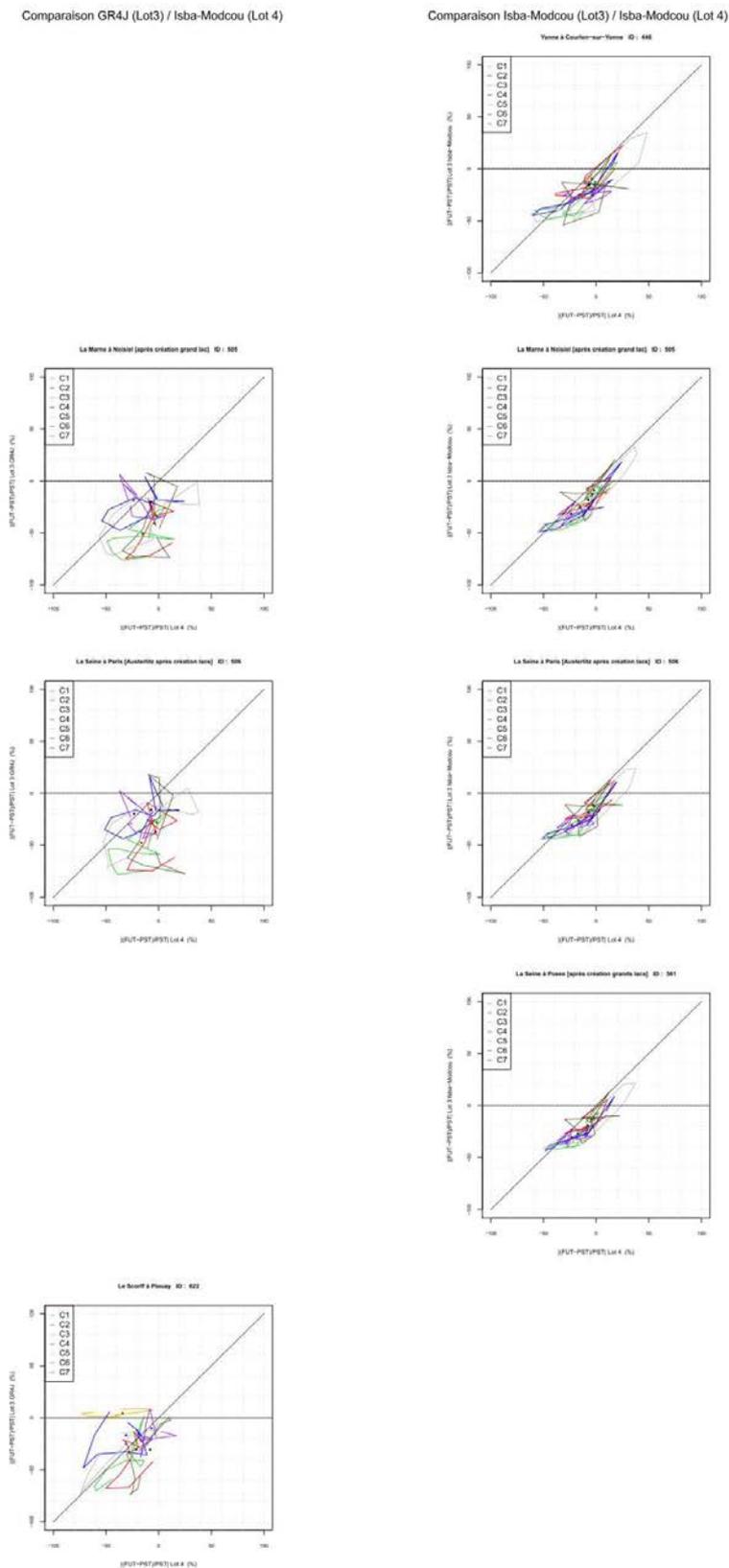


Figure 94 : Comparaison des variations de débit mensuel entre temps présent et temps futur obtenues par le Lot 3 (modèles GR4J et Isba-Modcou) et le Lot 4 (modèle Isba-Modcou). Chaque courbe lie les douze valeurs de variations de débits mensuels et les points représentent les modules. (bassins 446 à 622)



Annexe 5
Quel est l'impact de la naturalisation des débits sur les performances du modèle Isba-Modcou ?

Le modèle Isba-Modcou est un modèle destiné à représenter le comportement naturel des bassins versants, c'est-à-dire simuler des débits sans influences.

L'absence de calage des paramètres du modèle sur les débits observés induit que ces derniers ne vont pas essayer de compenser d'éventuelles influences dans les débits observés.

Inversement, le modèle GR4J est calé sur les débits observés, et les paramètres s'adaptent donc pour rendre compte d'influences lorsqu'elles existent dans les débits observés.

Dans la comparaison faite avec GR4J, le modèle Isba-Modcou a donc potentiellement pâti d'une évaluation sur les débits observés lorsque ceux-ci sont influencés.

Pour évaluer dans quelle mesure les performances d'Isba-Modcou ont été dégradées en raison de l'évaluation sur des débits influencés, nous avons cherché à évaluer les performances de ce modèle sur les bassins pour lesquels nous disposons de débits observés influencés et de débit naturalisés. C'était le cas sur les zooms du projet (Seine, Garonne, Orb, Hérault). Pour une douzaine de bassins pour lesquels nous disposons de chroniques suffisamment longues et concomitantes, nous avons calculé des critères d'efficacité du modèle sur les deux séries (influencée et naturalisée). Les critères calculés sont les critères de Nash-Sutcliffe sur les débits (NSQ), les racines des débits (NSRQ) et les logarithmes des débits (NSLQ), ainsi que le biais relatif. Pour permettre une comparaison directe des critères de Nash-Sutcliffe dans les deux configurations, l'erreur quadratique a été normée par la variance des débits simulés (et non celle des débits "observés", ces derniers étant différents dans les deux cas). Il en va de même pour le biais.

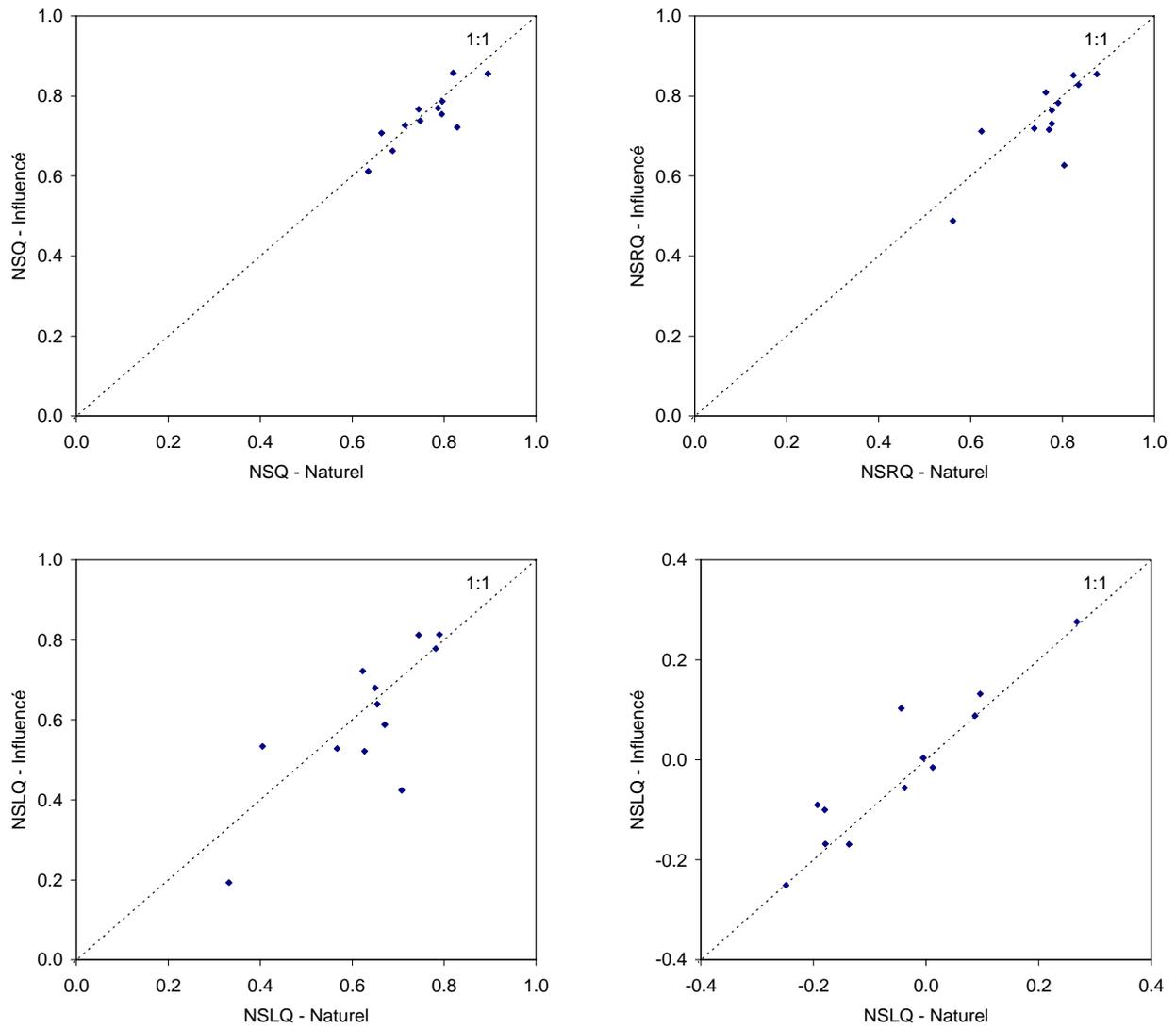
La Figure 95 compare les performances obtenues pour chaque bassin et le Tableau 6 compare les performances moyennes obtenues dans les deux cas. On constate qu'en moyenne, les critères de Nash-Sutcliffe sont un peu améliorés sur les séries de débit naturalisées par rapport aux séries influencées. Cela confirme la meilleure adéquation du modèle aux régimes naturels. Cette tendance est inverse sur le biais, mais les résultats moyens restent très acceptables. L'amélioration sur certains bassins, en passant de l'influencé au naturel, peut être très significative. Cependant, pour une majorité de bassins, les différences sont limitées et l'amélioration n'est pas systématique.

On peut conclure de ces résultats qu'il est probable que la comparaison entre GR4J et Isba-Modcou sur un large échantillon de bassins versants où les débits sont potentiellement influencés, a légèrement désavantagé le modèle Isba-Modcou. Cependant, les différences constatées ici ne semblent pas de nature à remettre en cause les conclusions générales sur la performance relative (en termes de reproduction des débits historiques) des deux modèles hydrologiques sur notre échantillon de bassins versants.

Tableau 6 : Comparaison des performances moyennes sur les douze bassins versants

	Naturel	Influencés
NSQ	0.760	0.747
NSRQ	0.762	0.740
NSLQ	0.630	0.603
Biais	-0.047	-0.021

Figure 95 : Comparaison des critères de performances du modèle Isba-Modcou sur des séries naturalisées et influencées



Annexe 6
Comparabilité des résultats d'Explore 2070 avec ceux
d'études antérieures

ADOUR-GARONNE

Étude ou projet	Conditions expérimentales communes avec Explore 2070 (rouge : aucune, jaune : certaines, et vert : toutes), conditions divergentes (texte avec fond rouge) ou conditions en commun (texte sur fond jaune)					Résultats
	Scénarios d'émissions	MCGs	Descente d'échelle	Modélisation hydrologique	Période de référence et horizon cible	
Caballero et al. (2003, 2004, 2007)	Étude de sensibilité à 2 x CO2	Autre ensemble de MCGs	Anomalies	Isba-Modcou	Périodes différentes	Baisse des débits estivaux d'environ 10%
Imagine2030 (Sauquet et al., 2009a,b ; Vidal et Hendrickx, 2010)	A1B	Autre ensemble de MCGs	Autre méthode statistique	GR4J	Périodes différentes	Baisse marquée des débits moyens et estivaux
Tisseuil et al. (2010)	A1B	ARPEGE	Autre méthode	Pas de modélisation hydrologique	Période de référence différente	Baisse marquée des débits printaniers et estivaux

LOIRE-BRETAGNE

Étude ou projet	Conditions expérimentales communes avec Explore 2070 (rouge : aucune, jaune : certaines, et vert : toutes), conditions divergentes (texte avec fond rouge) ou conditions en commun (texte sur fond jaune)					Résultats
	Scénarios d'émissions	MCGs	Descente d'échelle	Modélisation hydrologique	Période de référence et horizon cible	
ICC-HydroQUAL (Sauquet et al., 2010)	A1B	Ensemble plus large de MCGs		Différents modèles	Une période cible commune (mais référence différente)	Baisse des débits moyens et d'étiage

SEINE-NORMANDIE

Étude ou projet	Conditions expérimentales communes avec Explore 2070 (rouge : aucune, jaune : certaines, et vert : toutes), conditions divergentes (texte avec fond rouge) ou conditions en commun (texte sur fond jaune)					Résultats
	Scénarios d'émissions	MCGs	Descente d'échelle	Modélisation hydrologique	Période de référence et horizon cible	
GICC-Seine (Ducharme et al., 2003, 2004)	Scénarios différents	Autre version d'ARPEGE	Anomalies	Modèles différents	Périodes différentes	Diminution très robuste des débits d'étiages
RExHySS (Ducharme et al., 2009)	A1B	Ensemble plus large de MCGs	dsclim	Isba-Modcou	Période de référence différente	Baisse des débits, en moyenne annuelle (-50% sur la Seine avec une incertitude de 10%) et en toutes saisons

RHIN-MEUSE

Étude ou projet	Conditions expérimentales communes avec Explore 2070 (rouge : aucune, jaune : certaines, et vert : toutes), conditions divergentes (texte avec fond rouge) ou conditions en commun (texte sur fond jaune)					Résultats
	Scénarios d'émissions	MCGs	Descente d'échelle	Modélisation hydrologique	Période de référence et horizon cible	
RHEINBLICK2050 (Görgen et al., 2010)	A1B	Ensemble légèrement différent de MCGS	RCMs + correction de biais	GR4J	Horizon cible différent	Diminution des débits d'étiages
AMICE (Drogue et al., 2010)	A1B	ARPEGE	Correction de biais	GR4J	Horizon cible différent	Intensification des contrastes saisonniers

RHONE-MEDITERRANEE-CORSE

Étude ou projet	Conditions expérimentales communes avec Explore 2070 (rouge : aucune, jaune : certaines, et vert : toutes), conditions divergentes (texte avec fond rouge) ou conditions en commun (texte sur fond jaune)					Résultats
	Scénarios d'émissions	MCGs	Descente d'échelle	Modélisation hydrologique	Période de référence et horizon cible	
GICC-Rhône (Leblois, 2003)	Étude de sensibilité	Autres MCGs	Anomalies	Isba-Modcou	Période de référence différente	Diminution des débits estivaux
VULCAIN (Caballero et al., 2009)	A1B	Ensemble légèrement différent de MCGs	Anomalies	Modèles différents	Période de référence différente	Diminution des débits tout au long de l'année
Quintana Seguí et al. (2010, 2011)	A2	Autre version d'ARPEGE	dsclim	Isba-Modcou	Horizon cible différent	Intensification du cycle annuel, diminution des abs débits et augmentation des crues dans les Cévennes

Annexe 7

Comparaison des résultats Explore 2070 – RExHySS

Les projets Explore 2070 et RExHySS mobilisent des chaînes de modélisations similaires : le même scénario GES (A1B), des modèles climatiques globaux communs, la même méthode de descente d'échelle (DSclim), et des modèles hydrologiques communs (GR4J et Isba-Modcou) ont été utilisés.

Cependant, les modèles d'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP), utilisée comme donnée d'entrée pour GR4J, diffèrent pour les deux projets.

PRISE EN COMPTE DE LA DEMANDE EVAPORATOIRE

Dans les projets antérieurs à Explore 2070, une formule de type Penman a été en général utilisée (cas des projets GICC Seine et Rhône, RExHySS, VULCAIN notamment). Pour ce qui concerne le projet VULCAIN, le forçage SAFRAN avait du être modifié pour obtenir une ETP comparable aux valeurs observées à la station Météo-France de Perpignan.

Pour ce qui concerne le projet Explore 2070, et dans le but d'avoir une meilleure concordance avec les données ETP estimées à partir de la réanalyse SAFRAN et les observations, Météo-France a fourni des ETP de type Penman Monteith calculées par la division spécialiste en application agronomique (et donc en calcul de l'ETP). Elle s'est basée sur les dernières recommandations de l'organisation météorologique mondiale pour faire ce calcul à partir des données SAFRAN. Auparavant, le code de calcul de l'ETP était basé sur des formulations plus simples et cette progression a des conséquences non négligeables sur les résultats de débit.

Ainsi, conformément aux recommandations de la FAO (Food and Agriculture Organization des Nations Unies) et de l'OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie), l'ETP quotidienne est calculée via la formule de Penman-Monteith, soit :

$$\lambda \cdot ETP = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot C_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

Avec :

ETP	EvapoTranspiration Potentielle
λ	Chaleur latente de vaporisation de l'eau
Δ	Pente de la courbe de tension de vapeur en fonction de la température
R_n	Rayonnement Net
G	Flux de chaleur du sol par conduction
ρ_a	Densité de l'air
C_p	Capacité thermique de l'air
e_s	Tension de vapeur saturante
e_a	Tension de vapeur
r_a	Résistance aérodynamique
r_s	Résistance de surface
γ	Constante psychrométrique

La température, le vent moyen ainsi que le cumul de rayonnement sont pris au pas de temps quotidien. L'humidité et la température sont ensuite considérées au pas de temps horaire pour calculer les contributions à l'ETP convective.

La publitèque de Météo-France () permet l'accès en ligne aux valeurs d'ETP Penman Monteith des stations du réseau d'état, calculées selon la même méthode que les ETP fournies au projet Explore 2070.

Les figures ci-dessous illustrent les corrélations ETP publitèque/ETP Explore 2070 :

Figure 96 : Comparaison des valeurs quotidiennes d'ETP Penman Monteith entre Abbeville aérodrome (50°08'06" N, 01°50'00" E) et le point Safran 221 pour la période du 1^{er} août 1970 au 31 décembre 1995 (distance entre les 2 points environ 25km)

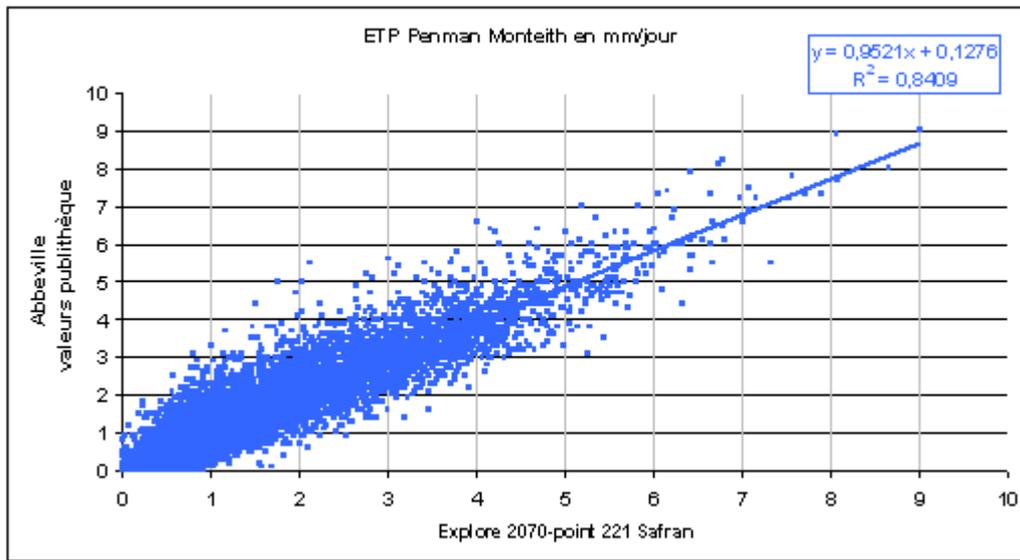


Figure 97 : Comparaison des valeurs quotidiennes d'ETP Penman Monteith entre Perpignan aérodrome (42°44'12" N-02°52'18" E) et le point Safran 9673 pour la période du 1^{er} août 1970 au 31 décembre 1995 (distance entre les 2 points environ 4km)

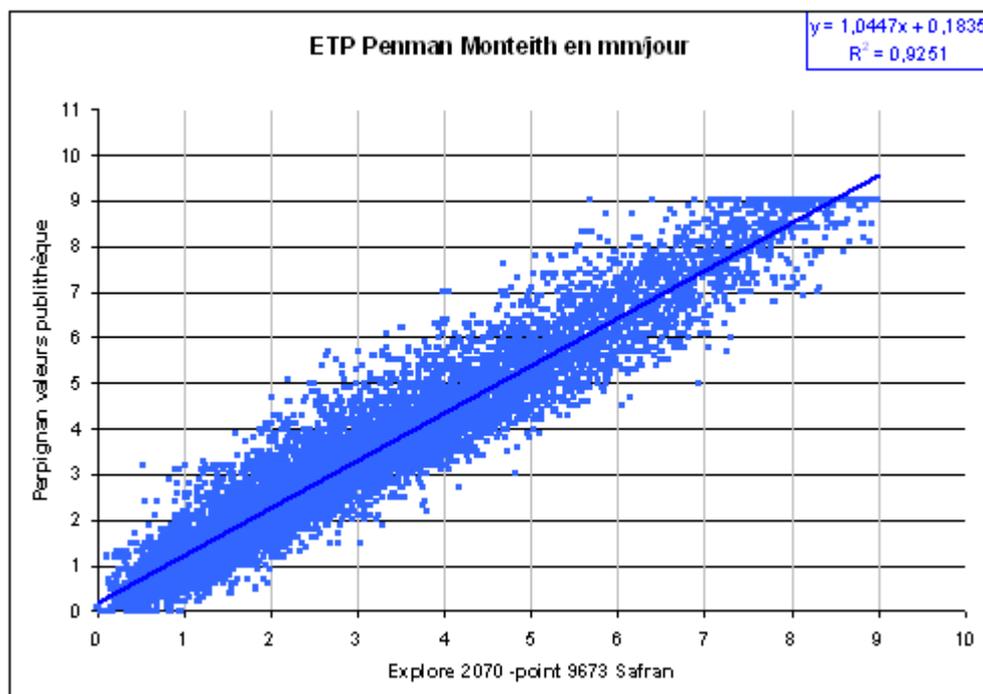


Figure 98 : Comparaison des valeurs quotidiennes d'ETP Penman Monteith entre Paris Montsouris (48°49'18" N 02°20'12" E) et le point Safran 1564 pour la période du 1^{er} août 1970 au 31 décembre 1995 (distance entre les 2 points environ 3km)

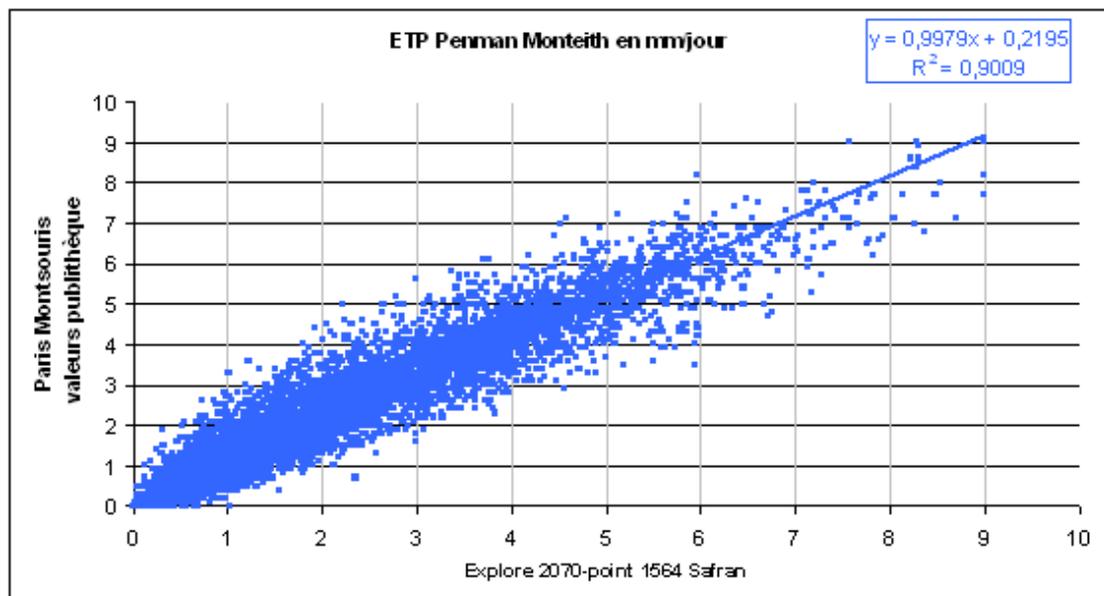
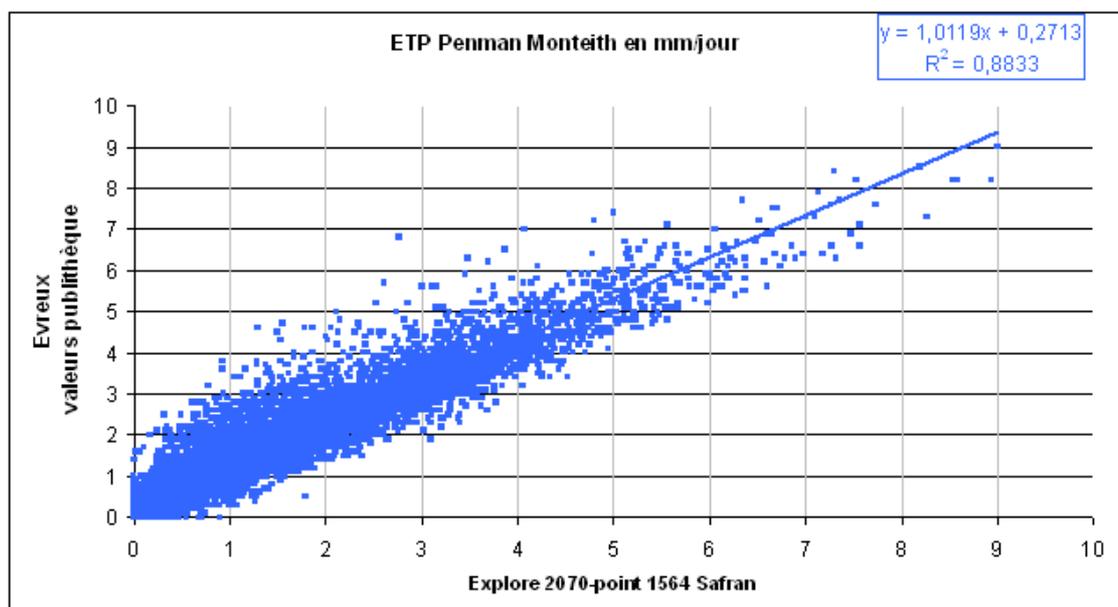


Figure 99 : Comparaison des valeurs quotidiennes d'ETP Penman Monteith entre Evreux (49°01'30" N 01°13'18") et le point Safran 1241 pour la période du 1^{er} août 1970 au 31 décembre 1995 (distance entre les 2 points environ 2km)



Dans le tableau ci-dessous les ETP annuelles des stations, comparées aux valeurs d'ETP des projets RexHySS et Vulcain sont représentées.

Tableau 7 : ETP annuelles en mm, calculées (sauf indication contraire) du 1er août 1970 au 31 décembre 1995

ETP annuelles en mm	Publithèque Météo-France	Explore 2070	RExHySS/Vulcain	Oudin
Abbeville-pt 221	617	599	801	634
Perpignan- pt 9673	1344	1223	1094*/1237**	
Evreux Huest-pt 1241	670	564		
Paris Montsouris-pt 1564	835	756		

* projet VULCAIN : forçage Safran initial (1970/2006)

** projet VULCAIN : après modification du forçage Safran (1970/2006)

COMPARAISON DES RESULTATS HYDROLOGIQUES

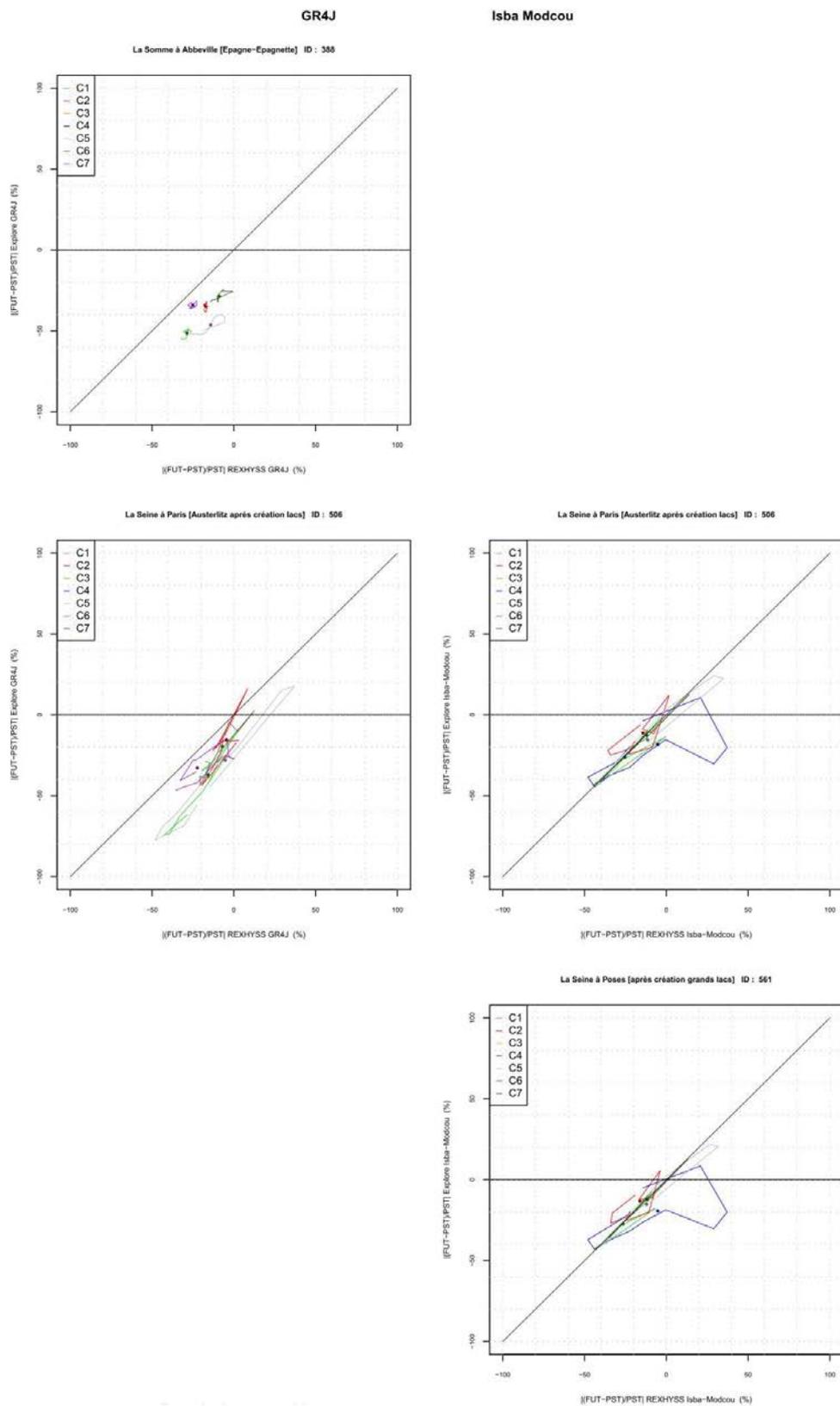
On compare ci-après les résultats obtenus par le modèle hydrologique GR4J d'une part et Isba-Modcou d'autre part par les deux projets, au droit de trois points de calcul : La Somme à Abbeville, la Seine à Paris Austerlitz, et la Seine à Poses. La comparaison des résultats porte ici sur les tendances calculées entre période de référence (1961-90) et période future (2046-65) pour les débits moyens mensuels et annuels.

Nous avons réalisé une analyse graphique qualitative, en portant en ordonnées les tendances calculées pour les débits moyens simulés par le lot Hydrologie de Surface dans Explore 2070, et en abscisses les tendances calculées dans REXHySS. Les différentes projections, issues de 6 modèles climatiques, sont représentées sur le même graphique. Les douze débits moyens mensuels sont reliés entre eux. Le débit moyen annuel (module) est représenté par un point en gras sur le graphique. Plus les points sont proches de la bissectrice, plus les résultats des modélisations des deux projets concordent.

Les résultats montrent que :

- ▶ En termes de débits moyens annuels, les résultats du modèle Isba-Modcou sont relativement proches pour les deux projets pour les deux points considérés, avec des écarts de 0 à 15%. En revanche, on observe des écarts importants entre les résultats des deux modélisations par GR4J, compris entre 0 et 35%. Les projections issues des travaux d'Explore2070 sont plus pessimistes que les résultats du projet REXHySS pour le modèle GR4J, différence qui s'explique par l'utilisation de deux modèles d'ETP différents.
- ▶ En termes de débits moyens mensuels, les écart entre les projections obtenues avec le modèle Isba-Modcou sont de l'ordre 0 à 15% pour la plupart des modèles climatiques sur les deux points considérés (à l'exception de la projection climatique C4, pour laquelle les tendances divergent certains mois). Les écarts entre les projections obtenues avec le modèle GR4J sont de l'ordre de 0 à 40%.

Figure 100 : Comparaison des variations de débit mensuel entre temps présent et temps futur obtenues par les projets Explore 2070 et RExHySS pour les modèles GR4J et Isba-Modcou. Chaque courbe lie les douze valeurs de variations de débits mensuels et les points représentent les modules.



Annexe 8
Compléments sur les incertitudes liées à l'estimation de
l'évapotranspiration potentielle (ETP)

CONTEXTE

L'évapotranspiration est l'un des principaux composants du bilan en eau à l'échelle du bassin versant. Difficilement mesurable à cette échelle, l'évapotranspiration réelle (ETR) est généralement estimée :

- ▶ soit par une modélisation physique détaillée des transferts d'eau et d'énergie au sein du continuum sol-végétation-atmosphère,
- ▶ soit par l'utilisation d'une variable intermédiaire permettant de quantifier la demande évaporatoire de l'air, appelée évapotranspiration potentielle (ETP) ou évapotranspiration de référence (ET₀), et définie comme le volume d'eau qui serait évaporé si la surface était menée à saturation (Granger, 1989). Par croisement avec la disponibilité en eau dans le sol, l'ETP permet de calculer l'évapotranspiration réelle. Notons qu'en fonction de la culture ou de la saison, on peut définir une évapotranspiration maximale (ETM) en appliquant à l'ETP un coefficient cultural K_c.

Cette seconde option d'estimation de l'ETR est très couramment utilisée en modélisation hydrologique. Elle requiert cependant l'estimation de l'ETP par des modèles (se résumant généralement à une formule) plus ou moins complexes rendant compte de la composante énergétique et/ou de celle aérodynamique du phénomène (la représentation des deux composantes correspondant à des approches combinatoires). L'estimation de l'ETP dépend essentiellement de données atmosphériques mesurables (la température de l'air, la vitesse du vent, le rayonnement net, l'humidité relative de l'air). Il existe de très nombreux modèles d'ETP, (Oudin, 2004) en répertoriant près d'une vingtaine, chacun ayant souvent des variantes et des spécificités d'application. La plupart ont été développés à des fins agronomiques pour le calcul du besoin en eau des plantes. Dans ce contexte d'utilisation, la formule combinatoire de Penman-Monteith est souvent considérée comme une référence. Dans une perspective hydrologique, plusieurs études comparatives (par ex. Oudin et al., 2006) montrent que des approches plus simples conduisent à des résultats équivalents pour la simulation des débits. Par ailleurs, un certain nombre d'analyses de sensibilité (par ex. Andréassian et al., 2004; Oudin et al., 2006) indiquent que les modèles hydrologiques ont une sensibilité plus limitée à cette variable qu'aux précipitations, les paramètres des modèles s'adaptant généralement aux différences d'entrées. Des biais d'estimation de l'ETP peuvent cependant conduire à des résultats sensiblement différents dès lors que les paramètres du modèle hydrologiques ne sont pas recalés.

Dans le cadre d'Explore2070, l'ETP est l'une des deux données d'entrée du modèle hydrologique GR4J et peut donc jouer un rôle important dans la simulation des débits présents et futurs. Nous présentons dans la suite de cette note quelques éléments de discussions quant à l'impact du choix de l'ETP sur les résultats de projections hydrologiques, sur la base d'études publiées sur ce sujet.

MODELES D'ETP EXISTANTS

Un très grand nombre de méthodes d'estimation de l'ETP ont été développées, souvent pour des usages spécifiques voire des contextes climatiques particuliers. Elles ont des degrés de complexité variés et mobilisent divers jeux de données climatiques parmi les quatre variables clefs que sont : la température de l'air, la radiation nette, la vitesse du vent et la pression de vapeur à la surface. Suivant la classification de Xu et al. (2001) et Oudin (2004), on peut citer :

- ▶ Les méthodes aérodynamiques, qui décrivent la physique du phénomène évaporatoire, et sont dépendantes de la pression de vapeur et de la résistance aérodynamique; laquelle est souvent considérée comme une fonction de la vitesse du vent.
- ▶ Les méthodes combinatoires, issues des travaux de Penman (1948) , qui combinent une approche aérodynamique et une méthode par bilan d'énergie. Parmi celles-ci, on peut citer :
 - La méthode de Penman (1948) ;
 - La formule de Penman-Monteith (Monteith, 1965), dérive de la formule de Penman et y introduite la notion de résistance de surface des végétaux;
 - La formule de Priestley–Taylor (Turc, 1955; 1972).

- ▶ Les méthodes basées sur la température de l'air. Ces méthodes empiriques sont particulièrement simples et donc largement utilisées pour la modélisation hydrologique. La formule de Thornthwaite (1948; 1955) et la formule de Oudin (2004) en sont deux exemples.
- ▶ Les méthodes empiriques basées sur le rayonnement, souvent issues du bilan d'énergie (Jensen et al., 1990), telles que la formule de Turc (1955).

L'équation de Penman-Monteith est la formulation actuellement recommandée par la FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nation), en utilisant les valeurs des paramètres préconisées et présentées dans le document de référence (Allen et al., 1998). Elle est souvent préférée aux modèles basés uniquement sur la température dans les études d'impact du changement climatique, car il s'agit d'un modèle à base physique, prenant en compte l'évolution de plusieurs variables atmosphériques (Kay et Davies, 2008; Kingston et al., 2009; Donohue et al., 2010). Cependant, cette formulation requiert des données climatiques difficilement quantifiable en contexte de changement climatique (vitesse du vent, couverture nuageuse), et est hautement sensible à la qualité des données d'entrée. Ceci peut induire des incertitudes importantes. En outre, la formule de Penman-Monteith requiert le calcul préalable d'un ensemble de variables intermédiaires (rayonnement net, résistance aérodynamique, etc.), lesquelles peuvent être estimées par différentes méthodes. Cela peut aussi entraîner des différences non négligeables dans l'estimation de l'ETP (Vannier et Braud, 2012). La pertinence du choix de ce modèle d'ETP pour les études d'impact reste donc fortement discutée à ce jour (Kingston et al., 2009; Weiland et al., 2012).

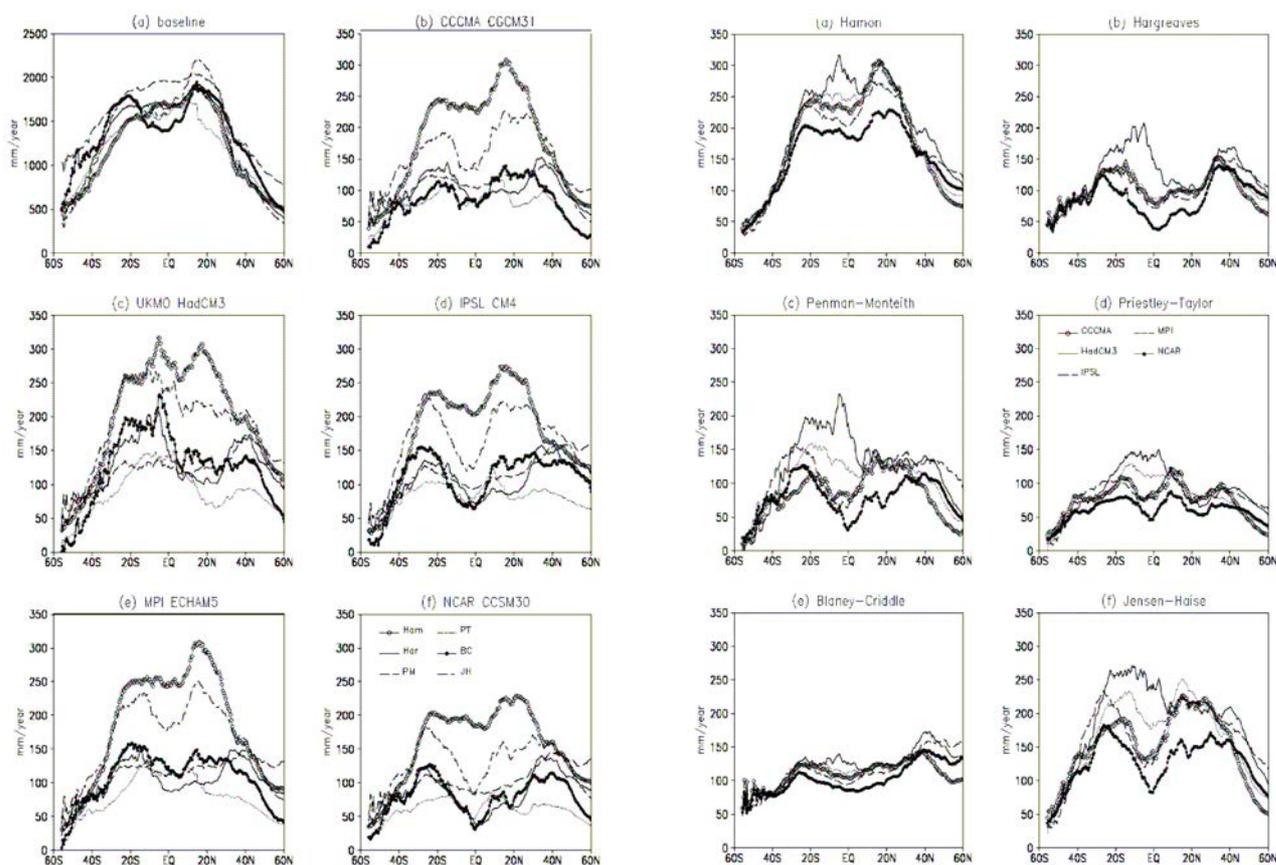
EVOLUTION DE LA DEMANDE EVAPORATOIRE EN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE : PERFORMANCES ET INCERTITUDES LIEES AUX MODELES D'ETP

Plusieurs études (Kingston et al., 2009; Bae et al., 2011) montrent que la formulation d'ETP peut constituer une source d'incertitude importante, notamment en contexte de changement climatique. (Kingston et al., 2009) analysent les signaux d'ETP calculés à partir de simulations de cinq GCM (pour un scénario d'élévation de la température de 2°C) et grâce à six formulations d'ETP, et montrent que l'incertitude liée au choix de la formulation de l'ETP peut être supérieure ou équivalente à l'incertitude liée au choix du modèle de circulation générale, dans l'estimation de l'ETP. Voir figure suivante.

Figure 101 : Signaux des cumuls annuels d'ETP calculés pour 6 GCM et 5 modèles d'ETP, pour le scénario d'élévation de 2°C de la température (source : (Kingston et al., 2009))

Représentation latitudinale de la moyenne annuelle de l'ETP pour la référence 1961-1990 et pour les projections (FUT-PST pour chaque méthode d'ETP), groupées par GCM. (modèles d'ETP : Ham, Hamon; Har, Hargreaves; PM, Penman-Monteith; PT, Priestley-Taylor; BC, Blaney-Criddle; et JH, Jensen-Haise)

Représentation latitudinale de la moyenne annuelle de l'ETP pour la référence 1961-1990 et pour les projections (FUT-PST pour chaque méthode d'ETP) groupées par méthode d'ETP.



Les différences qui apparaissent entre les estimations d'ETP, notamment à partir des simulations climatiques, sont dues à plusieurs facteurs. On peut identifier notamment les points suivants :

- ▶ D'une part, les différents modèles d'ETP prennent en compte des données atmosphériques différentes et de différentes manières. Elles ont donc des sensibilités variées à la température, le rayonnement, la vitesse du vent et la pression de vapeur, variables atmosphériques qui suivent elles-mêmes des tendances différentes et sont interdépendantes (Bormann, 2011). Plusieurs études (Kay et Davies, 2008; Donohue et al., 2010; Bormann, 2011; Milly et Dunne, 2011; Shaw et Riha, 2011) montrent que cette différence de sensibilité peut fortement impacter l'estimation de l'ETP et plus encore la dynamique de l'ETP en contexte de changement climatique.
- ▶ L'étude en contexte australien de (Donohue et al., 2010) s'intéresse à la capacité de cinq modèles d'ETP à rendre compte de la dynamique évaporatoire sur la période 1981-2006. Cette étude conclut sur une supériorité de la méthode de Penman à rendre compte de la dynamique aux pas de temps annuels et saisonniers. Elle hiérarchise la contribution des différentes variables climatique à la dynamique de l'ETP suivant l'ordre suivant : 1) Température (hausse) ; 2) vitesse du vent (baisse) ; 3) radiation nette (baisse) ; 4) Pression de la vapeur (baisse). Elle conclut sur l'importance de la prise en compte de l'évolution du vent et de l'albédo dans la dynamique de l'ETP, particulièrement en contexte de changement climatique.
 - L'étude en contexte britannique de (Kay et Davies, 2008) montre aussi d'importantes différences entre les projections d'ETP par les modèles d'Oudin (basé sur la température seule) et de Penman. Elle note des variations intra-annuelles nettement plus élevées pour l'ETP de Penman, avec une plage de valeurs plus importante.

- Les études de (Milly et Dunne, 2011; Shaw et Riha, 2011) montrent l'intérêt de ne pas considérer uniquement les évolutions de température pour rendre compte de la dynamique de l'ETP.
 - (Bormann, 2011) étudie les projections d'ETP calculées à partir de 18 modèles d'ETP classés suivant leur besoin en données d'entrée (i.e. modèle aérodynamiques, modèles basés sur la température, etc...). Il montre que la variabilité des signaux estimés par une même classe de modèles est du même ordre de grandeur que la variabilité pour l'ensemble des 18 simulations. En fait, on observe une réponse "uniforme" des modèles d'ETP de même classe uniquement lorsque la tendance climatique est significative et lorsque les évolutions des différentes variables atmosphériques mesurées à une station météorologique sont bien corrélées. Les différences de sensibilité des modèles d'ETP d'une même "classe" aux variables climatiques peut donc induire des différences importantes des signaux d'ETP.
- Par ailleurs, les différents modèles d'ETP sont soumis à des incertitudes diverses et d'amplitude variable. Ces modèles ont des sensibilités variables à la qualité des données d'entrée. De plus, certaines variables telles que la couverture nuageuse et la pression de vapeurs sont hautement incertaines en contexte de changement climatique. Déterminer quelle serait l'estimation d'ETP la plus fiable parmi les alternatives modèle physique / modèle empirique reste une question importante en contexte de changement climatique (Kingston et al., 2009).
- En conséquence des deux points précédents, l'amplitude des écarts entre modèles d'ETP est fortement dépendante des conditions climatiques et météorologiques du bassin considéré : elle dépend donc en particulier de la région et de la saison considérées. (Kingston et al., 2009; Weiland et al., 2012) montrent en particulier de larges divergences des modèles d'ETP en zones arides et semi-arides.
- Enfin, (Bell et al., 2011) montrent que la non prise en compte de l'effet de l'augmentation de la concentration en CO₂ sur la végétation (élévation du niveau de CO₂ dans les stomates, ...) dans ces modèles d'ETP pourrait aussi constituer une source d'incertitude non négligeable dans l'estimation de l'ETP future.

SENSIBILITE DES MODELES HYDROLOGIQUES AUX FORMULATIONS D'ETP EN TEMPS PRESENT ET EN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

La difficulté de prendre en compte la demande évaporatoire en contexte de changement climatique pose des problèmes liés :

- à la difficile estimation des conditions climatiques présentes et bien plus encore futures (notamment la vitesse du vent, la couverture nuageuse, etc.)
- à la difficulté de rendre compte de la demande évaporatoire et de sa dynamique par un modèle quelque soient les conditions climatiques d'étude.

Comment cela impacte-t-il la modélisation hydrologique et l'estimation des tendances hydrologiques en contexte de changement climatique ?

(Andréassian et al., 2004) étudient la sensibilité du modèle hydrologique conceptuel GR4J à la qualité de l'estimation de l'ETP en temps présent. Ils montrent que le modèle tend à adapter ses paramètres internes afin de compenser le biais de l'ETP et d'ajuster le bilan en eau. Par ailleurs, les performances des modèles calés avec des ETP de qualités différentes sont très similaires en temps présent. (Oudin et al., 2006) parviennent aux mêmes conclusions quant à la sensibilité des modèles GR4J et TOPMO vis-à-vis des erreurs systématiques sur l'ETP. En conséquence, la sensibilité du modèle au biais de l'ETP est réelle mais n'est pas détectable par une seule analyse des performances du modèle. Or, ces différences de calage du modèle pourraient affecter les simulations de débits en temps futur. En conséquence, le choix du modèle d'ETP est une question importante dans les études d'impact hydrologique :

- Est-il judicieux d'utiliser la formulation de Penman, compte tenu de sa forte sensibilité au biais des variables climatiques d'une part et de la sensibilité des modèles hydrologiques au biais de l'ETP d'autre part ?
- Est-il judicieux d'utiliser une autre formulation, moins sensible à la qualité des données mais moins performante pour rendre compte de la dynamique du climat ?

En outre, l'influence de l'estimation de l'ETP sur l'estimation de l'évaporation réelle (ETR) puis des débits est hautement dépendante des conditions climatiques du bassin (l'impact de l'ETP sur l'ETR étant fonction de l'équilibre Pluie-ETP du bassin). Sous un climat sec par exemple, l'ETR est limitée par la disponibilité en eau du sol et est donc principalement influencée par le régime des précipitations ; l'impact du biais de l'ETP sur les débits serait donc relativement faible. (Vörösmarty et al., 1998; Weiland et al., 2012) montrent que la variabilité de l'ETR est souvent nettement plus faible que la variabilité de l'ETP dans ces régions (Figure 2). (Weiland et al., 2012) ont cherché à quantifier de façon globale le transfert du biais de l'ETP vers les débits à travers le modèle hydrologique global PCR-GLOBWB en temps présent (1972-2002). Ils étudient la variabilité des résultats mobilisant 6 modèles d'ETP en termes d'ETP, d'ETR et de débits (Figure 2), et montrent que dans la plupart des régions, on observe une baisse de la variabilité au fur et à mesure de la modélisation hydrologique, à l'exception de certaines régions spécifiques (Bassins du Congo, du Mississippi, Asie du Sud-est...).

L'impact de la qualité de l'estimation de l'ETP dans les études d'impact hydrologique sous changement climatique dépend donc notamment :

- ▶ Des conditions climatiques, et par là même :
 - De la zone géographique considérée ;
 - De la période de projection étudiée ;
 - Des indicateurs hydrologiques étudiés ;
- ▶ Des méthodes mises en œuvre, dont :
 - Les modèles hydrologiques mobilisés ;
 - La qualité de l'estimation des variables climatiques ;
 - Les modèles d'ETP mobilisés.

A ce jour, la littérature sur ce sujet semble s'accorder sur les points suivants :

- ▶ La modélisation de l'ETP contribue fortement à l'incertitude qui pèse sur les études d'impact hydrologique sous changement climatique ;
- ▶ Le choix du modèle d'ETP le plus fiable et si possible validé dans les conditions climatiques de l'étude est très important pour ces études.

Figure 102 : Cartographie de la variabilité de l'ETP, l'ETR et des débits à partir de 6 modèles d'ETP et du modèle hydrologique PCR-GLOBWB (source : (Weiland et al., 2012)) (un faible coefficient CV rend compte d'une faible variabilité entre les six estimations)

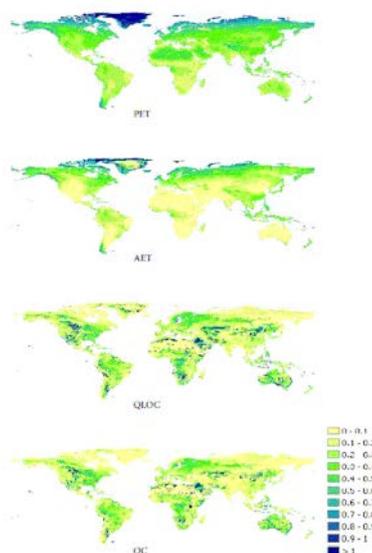


Fig. 8. Cell specific values of the coefficient of variation (CV; -) calculated from the six different potential evaporation methods for potential evaporation (PET), actual evapotranspiration (AET), local runoff (QLOC) and discharge (QC).

SYNTHESE SUR LA SENSIBILITE HYDROLOGIQUE A L'ETP

L'analyse précédente montre que le choix du modèle d'ETP peut avoir une influence forte sur le sens et l'ampleur des tendances futures calculées en termes de demande évaporatoire et donc de ressource en eau (Kingston et al., 2009; Bormann, 2011) :

- ▶ D'une part, le signal d'ETP estimé peut nettement différer selon les méthodes utilisées, que ce soit en termes de cumul annuel et de dynamique (Kingston et al., 2009; Donohue et al., 2010). Différences qui dépendent notamment des conditions climatiques de la région considérée (Weiland et al., 2012).
- ▶ D'autre part, les incertitudes liées à l'estimation de l'ETP sont variables, compte tenu notamment des jeux de données d'entrées qu'elles mobilisent (Kingston et al., 2009), en particulier pour l'estimation de l'ETP à partir de simulations climatiques (GCM).

Ces différences d'estimation de l'ETP affectent la modélisation hydrologique de différentes façons :

- ▶ Les modèles pluie-débit conceptuels ont tendance à adapter leur paramètres internes lors du calage pour absorber le biais de l'estimation de l'ETP (Andréassian et al., 2004; Oudin et al., 2006). En conséquence, si les performances en temps présent des modèles semblent insensibles à l'ETP, l'adaptation des paramètres liée au choix de l'ETP pourrait affecter les simulations des débits en temps futur.
- ▶ L'incertitude sur la dynamique du signal d'ETP pourrait impacter les simulations de débits et les tendances calculées en termes de disponibilité future de la ressource (Kay et Davies, 2008).
- ▶ En outre, la sensibilité des modèles pluie-débit à la formulation de l'ETP dépend des conditions climatiques et des propriétés du bassin versant considéré (Kay et Davies, 2008). (Weiland et al., 2012) montrent que dans la plupart des régions du monde, les écarts entre modèles d'ETP sont atténués par la modélisation hydrologique, mais la tendance inverse se produit néanmoins sous certaines conditions climatiques (bassins du Congo et de l'Amazone, Asie du Sud-Est, etc. Voir Figure 2).

Le transfert des incertitudes liées aux modèles d'ETP vers les simulations de débits est donc complexe et dépend de nombreux facteurs (qualités des entrées climatiques, conditions climatiques de la zone considérée, modèle hydrologique, etc.) (Kay et Davies, 2008; Bae et al., 2011; Weiland et al., 2012). Du fait de cette dépendance aux conditions climatiques, le degré d'incertitude est donc aussi lié à la période de projection considérée (Bae et al., 2011). En outre, l'ampleur de l'incertitude liée au modèle d'ETP dépend aussi des saisons et est donc variable selon l'indicateur hydrologique considéré (Bae et al., 2011; Weiland et al., 2012). Les incertitudes semblent en particulier moins fortes en termes de ressource moyenne annuelle, et plus accentuées pour l'estimation des bas débits (Kay et Davies, 2008; Bae et al., 2011).

En conclusion, l'estimation de l'évapotranspiration potentielle introduit une nouvelle source d'incertitude importante dans la chaîne de modélisation de l'étude d'impact hydrologique. En termes de tendances hydrologiques, cette incertitude est liée à de nombreux paramètres, dont notamment les dimensions spatiales et temporelles de l'étude. L'étude de (Kay et Davies, 2008) portant sur les tendances hydrologiques en Grande Bretagne à l'horizon 2080 montre que l'incertitude liée aux modèles d'ETP serait en général plus faible que l'incertitude due aux GCM (bien que certaines combinaisons GCM-modèle d'ETP conduisent parfois à des écarts plus forts que les écarts observés entre GCM pour un modèle d'ETP donné).

BIBLIOGRAPHIE

Allen, R. G., M. Smith, A. Perrier et L. S. Pereira (1998). "Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO, Rome, Italy." Irrigation and Drainage Paper 56: 300 pp.

Andréassian, V., C. Perrin et C. Michel (2004). "Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models." Journal of Hydrology 286: 19-35.

Bae, D.-H., I.-W. Jung et D. P. Lettenmaier (2011). "Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea." Journal of Hydrology 401: 90-105.

Bell, V. A., N. Gedney, A. L. Kay, R. N. B. Smith, R. G. Jones et R. J. Moore (2011). "Estimating Potential Evaporation from Vegetated Surfaces for Water Management. Impact Assessments Using Climate Model Output." Journal of Hydrometeorology 12: 1127-1136.

Bormann, H. (2011). "Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations." Climatic Change 104: 729-753.

Donohue, R. J., T. R. McVicar et M. L. Roderick (2010). "Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate." Journal of Hydrology 286: 186-197.

Granger, R. J. (1989). "An examination of the concept of potential evaporation." Journal of Hydrology 111: 9-19.

Kay, A. L. et H. N. Davies (2008). "Calculating potential evaporation from climate model data: A source of uncertainty for hydrological climate change impacts." Journal of Hydrology 358: 221-239.

Kingston, D. G., M. C. Todd, R. G. Taylor, J. R. Thompson et N. W. Arnell (2009). "Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change." Geophysical Research Letters 36: 1-6.

Milly, P. C. D. et K. A. Dunne (2011). "On the Hydrologic Adjustment of Climate-Model Projections: The Potential Pitfall of Potential Evapotranspiration." Earth Interactions 15: 15.

Monteith, J. L. (1965). "Evaporation and the environment, The state and movement of water in living organisms." XIXth symposium. Cambridge University Press, Swansea.: 205-234.

Oudin, L. (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Sciences de l'eau Paris, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts. Thesis: 495.

- Oudin, L., C. Perrin, T. Mathevet, V. Andréassian et C. Michel (2006). "Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models." *Journal of Hydrology* 320: 62-83.
- Penman, H. L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proc. R. Soc. London* 193: 120-145.
- Priestley, C. H. B. et R. J. Taylor (1972). "On the assessment of surface heat fluxes and evaporation using large-scale parameters." *Monthly Weather Review* 100: 81-92.
- Shaw, S. B. et S. J. Riha (2011). "Assessing temperature-based PET equations under a changing climate in temperate, deciduous forests." *Hydrological Processes* 25: 1466–1478.
- Turc, L. (1955). "Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement." *Ann. Agr.* 6: 5-131.
- Vannier, O. et I. Braud (2012). "Calcul d'une évapotranspiration de référence spatialisée pour la modélisation hydrologique à partir des données de la réanalyse SAFRAN de Météo-France." (Note de travail du plateau SOMME d'Envirhônalp).
- Vörösmarty, C. J., C. A. Federer et A. L. Schloss (1998). "Potential evaporation functions compared on US watersheds: Possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling." *Journal of Hydrology* 207: 147-169.
- Weiland, F. C. S., C. Tisseuil, H. H. Dürr, M. Vrac et L. P. H. v. Beek (2012). "Selecting the optimal method to calculate daily global reference potential evaporation from CFSR reanalysis data." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 8: 7355–7398.
- Xu, C.-Y. et V. P. Singh (2001). "Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation." *Hydrological Processes* 15(2): 305-319.