



Programme Gestion et Impact du Changement Climatique
du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie
Convention de subvention
10-GCMOT-GICC-3-CVS-102

Projet R²D² 2050

Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050

Risk, water Resources and sustainable Development within the Durance river basin in 2050

Coordinateur : Eric Sauquet (Irstea, Lyon)



Rapport de fin de contrat

Novembre 2014

Principaux contributeurs :

SAUQUET Eric (Irstea, coord.), ARAMA Yannick (ACTeon), BLANC-COUTAGNE Eugénie (SCP), BOUSCASSE Hélène (ACTeon), BRANGER Flora (Irstea), BRAUD Isabelle (Irstea), BRUN Jean-François (SCP), CHEREL Johan (SCP), CIPRIANI Thomas (Irstea), DATRY Thibault (Irstea), DUCHARNE Agnès (UPMC), HENDRICKX Frédéric (EDF – R&D), HINGRAY Benoît (LTHE), KROWICKI Florence (ACTeon), LE GOFF Isabelle (SCP), LE LAY Matthieu (EDF –DTG), MAGAND Claire (UPMC), MALERBE Florence (SCP), MATHEVET Thibault (EDF – DTG), MONTEIL Céline (EDF – R&D), PERRIN Charles (Irstea), POULHE Pascal (EDF – R&D), ROSSI Alexandra (ACTeon), SAMIE René (EDF – R&D), STROSSER Pierre (ACTeon), THIREL Guillaume (Irstea), TILMANT François (Irstea), VIDAL Jean-Philippe (Irstea)

Table des matières

Table des matières	3
Liste des figures.....	5
Le mot du coordinateur	9
1. Résumés	11
Résumé court en français (environ 200 mots)	11
Résumé court en anglais (200 mots)	12
2. Synthèse.....	13
Contexte	13
Objectifs généraux du projet.....	13
Matériels et méthodes	13
Résultats obtenus	16
Conclusions - Perspectives	20
3. Gestion et animation du projet.....	22
3. Valorisation	24
Site Web	24
Articles.....	24
Rapports	24
Participations aux colloques nationaux ou internationaux	25
Thèses.....	26
Autres	26
4. Rapport scientifique.....	27
I. Le territoire d'étude	27
II. Les bases de connaissance	29
1. Données physiques	29
2. Données climatologiques.....	29
3. Données hydrologiques	30
4. Données relatives aux usages	33
III. Le fonctionnement actuel du système Durance	34
1. Hydro-climatologie du bassin versant de la Durance.....	34
2. Dynamique territoriale et usages de l'eau	40
3. Pressions anthropiques sur la ressource en eau	49
IV. Les outils de modélisation de la ressource et des usages.....	58
1. Modélisation de la ressource en eau	58
2. Modélisation des besoins pour l'agriculture.....	72
3. Modélisation des besoins pour l'AEP	83
4. Modélisation des besoins pour l'industrie et les loisirs	86
5. Modélisation des connectivités entre points de prélèvement et lieux de consommation.....	86
6. Modélisation de la gestion des réserves, des besoins en eau pour les loisirs et les services écologiques	87
V. Les projections climatiques régionalisées.....	96
1. Projections climatiques globales.....	96
2. Régionalisation statistique	96
3. Liste des projections climatiques régionalisées disponibles pour le projet.....	97
4. Sélection de projections pour les modèles d'impact	98
VI. L'hydro-climatologie du bassin versant de la Durance en 2050	100
1. Evolution du climat	100
2. Evolution de l'hydrologie	108
3. Impact sur les dispositifs « arrêtés sécheresse »	124
VII. La réponse biologique d'un cours d'eau intermittent en 2050.....	131
VIII. Les visages du territoire en 2050	137
IX. Les besoins en eau du territoire en 2050.....	148
1. Besoins en irrigation en 2050 – demande unitaire	148
2. Besoins en irrigation en 2050 – demande globale.....	149
3. Besoins en irrigation en 2050 – demande en eau sur le périmètre de la concession régionale du Canal de Provence.....	165

4.	Besoins en AEP en 2050	170
5.	Besoins pour l'industrie en 2050.....	180
6.	Besoins pour les loisirs en 2050	182
7.	Demande globale et pression sur la ressource en 2050	183
8.	Sensibilité à l'efficacité des réseaux à surface libre et économies d'eau associées	188
X.	La gestion des ouvrages en 2050	191
1.	Préambule.....	191
2.	Ressource Sécurisée.....	192
3.	Energie	195
4.	Tourisme	198
5.	Sensibilité aux modalités de calcul des besoins en eau pour l'irrigation	200
XI.	La gestion de l'eau en 2050.....	202
1.	Satisfaction des usages liés à la ressource Durance.....	202
2.	Satisfaction des usages liés à la ressource Verdon	203
3.	La gestion de l'eau des bassins non sécurisés : l'exemple du Buëch	204
XII.	La question de l'adaptation.....	210
1.	Première réaction des acteurs sur la base des résultats du projet	210
2.	Préconisations d'adaptation issues de l'étude prospective des effets du changement climatique dans le Grand Sud-Est (Etude MDCIE).....	212
XIII.	Un regard sur les incertitudes	218
1.	Incertitudes sur la ressource et sur la demande en eau	218
2.	Propagation des incertitudes	221
3.	Incertitudes liées aux modèles et à leur variabilité interne dans un ensemble de projections hydroclimatiques.....	222
4.	Incertitudes liées à la structure et aux paramètres des modèles hydrologiques	227
XIV.	Difficultés rencontrées et limites	230
XV.	Conclusion générale	232
XVI.	Bibliographie	237

Liste des figures

Figure 1 : Différentes composantes de la chaine de modélisation.....	14
Figure 2 : Territoires d'étude, ouvrages hydrauliques d'intérêt, occupation du sol et points d'analyse des modélisations (■)	14
Figure 3 : Résultats de simulation des outils mobilisés dans R ² D ² 2050, à gauche les débits décennaux moyens interannuels observés et simulés pour la Durance à Serre-Ponçon, à droite les consommations annuelles en eau d'irrigation simulées par FIVE-CoRe et livrées sur le périmètre desservi par la SCP	16
Figure 4 : Evolution des anomalies de températures saisonnières moyennes du bassin de la Durance à sa confluence avec le Rhône (à gauche ; les anomalies des 330 projections climatiques sont tracées en gris, la médiane est en rose foncé et l'enveloppe rose est l'intervalle entre les premier et troisième quartiles ; les forçages DuO sont représentés en noir), par rapport à la période de référence 1980-2009	17
Figure 5 : Anomalies de débits mensuels exprimées en m ³ /s (à droite) sur la période 2036-2065, par rapport à la période de référence 1980-2009.....	18
Figure 6 : Principales caractéristiques des quatre scénarios prospectifs pour le territoire.....	18
Figure 7 : Evolution de la surface totale irriguée considérée dans MODIC (à gauche) et prélèvements par usage avec MODIC_CF, modalité Cycle Fixe de MODIC (à droite) selon les six scénarios socio-économiques sous les climats temps présent (Pst) et 2050 (Fut) issus de la sélection des dix projections climatiques régionalisées, à l'échelle du système Durance-Verdon. Les segments en rouge représentent la dispersion des résultats induite par les dix climats modélisés.	19
Figure 8 : Consommations annuelles moyennes et supérieures au seuil 200 Mm ³ (tranche SP) sur la ressource disponible à Serre-Ponçon (SP), estimée par les outils opérationnels (DTG) et reconstituée par les outils de R ² D ² 2050 (Histo) et simulée en temps présent (Pst) et à l'horizon 2050 (Fut) selon les six scénarios socio-économiques et les trois projections climatiques régionalisées	19
Figure 9 : Principaux ouvrages hydrauliques, occupation du sol et territoires du projet R ² D ² 2050 (en noir : les frontières naturelles du bassin versant de la Durance à sa confluence avec le Rhône).....	28
Figure 10 : Contour du bassin versant de la Durance à sa confluence avec le Rhône et échantillons de stations du projet ...	31
Figure 11 : Pluies et températures mensuelles par bassin sur la période 1980-2009 (Source : SPAZM).....	36
Figure 12 : Cycles annuels des débits journaliers pour six des sept bassins versants de contrôle. En trait épais est représentée la médiane interannuelle des débits journaliers, l'enveloppe grise définit l'intervalle entre les premier et dernier déciles (quantiles 10 et 90%)	37
Figure 13 : Comme pour la Figure 12 mais pour huit des dix bassins versants d'intérêt	38
Figure 14 : Comme pour la Figure 12 mais pour quatre des huit bassins versants bonus	39
Figure 15 : Variabilité des débits moyens annuels de la Durance entre 1901 et 2002 (d'après Kuentz, 2013).....	39
Figure 16 : Schéma hydraulique simplifié du système Durance-Verdon et règles de gestion avant 2011 (Source : Cros, 2012)	41
Figure 17 : Principales cultures sur la région PACA (Source : RGA 2010) – <i>STH désigne les Surfaces Toujours en Herbe, les cultures industrielles désignent ici principalement les plantes aromatiques et à parfum</i>	43
Figure 18 : Principales cultures irriguées sur la région PACA (Source : RGA 2010) - <i>Les céréales, les oléagineux et les protéagineux, cultures sont désignées par le terme générique «COP»</i>	44
Figure 19 : Carte des principaux aménagements du système Durance-Verdon (Source : Société du Canal de Provence)	44
Figure 20 : Modes d'irrigation en région PACA (Source : RGA2010).....	45
Figure 21 : Evolution des surfaces irrigables et irriguées en région PACA (Sources : RGA de 1950 à 2010 et AIRMF)	46
Figure 22 : Assolement irrigué en région PACA pour les années 2000 (à gauche) et 2010 (à droite) (Sources : RGA2000 et RGA2010)	47
Figure 23 : Zonage des différentes cultures irriguées et enjeux liés à l'agriculture pour la région PACA (Source : ACTeon) ...	48
Figure 24 : Evolution des prélèvements irrigation et arrose (Source : Agence de l'Eau RMC).....	50
Figure 25 : Volumes prélevés directement ou indirectement sur la Durance pour la distribution publique de 1997 à 2009 (gauche) et valeurs pour l'année 2009 (droite) (Sources : données prélèvements pour la distribution publique, Agence de l'Eau)	52
Figure 26 : Evolution de l'emploi salarié	53
Figure 27 : Volumes totaux prélevés sur le bassin Durance – Verdon - Estimation à partir des données de l'Agence de l'Eau RMC.....	56
Figure 28 : Evolution des prélèvements destinés aux loisirs sur le bassin Durance – Verdon - Estimation à partir des données de l'Agence de l'Eau RMC.....	56
Figure 29 : Evolution des prélèvements industriels sur le bassin Durance – Verdon. Estimation à partir des données de l'Agence de l'Eau RMC.....	57
Figure 30 : Cycles annuels des débits journaliers naturalisés et influencés en Basse Durance. En trait épais est représentée la médiane interannuelle des débits journaliers, l'enveloppe définit l'intervalle entre les premier et dernier déciles (quantiles 10 et 90%) (Sources : EDF, banque HYDRO)	57
Figure 31 : Représentation des performances d'un modèle donné, sur un bassin donné, par rapport aux différents critères d'évaluation	60
Figure 32 : Performances des modèles pour la Durance à Serre-Ponçon	63

Figure 33 : Débits moyens sur 10 jours interannuels observés et simulés pour la Durance à Serre-Ponçon.....	64
Figure 34 : Variation moyenne interannuelle de plusieurs variables des modèles hydrologiques, et courbe des débits classés pour la Durance à Serre-Ponçon	64
Figure 35 : Performances médianes des modèles pour l'ensemble des stations du bassin de la Durance.....	65
Figure 36 : Score de Nash-Sutcliffe sur les débits (NSQ) aux différents points d'évaluation.....	66
Figure 37 : Score de Nash-Sutcliffe sur l'inverse des débits (NSIQ) aux différents points d'évaluation	66
Figure 38 : Evaluation du KGE sur des périodes contrastées pour la Durance à Serre-Ponçon.....	67
Figure 39 : Différences de performance en Nash-Sutcliffe sur les débits selon la période de calage et d'évaluation. Médiane de l'ensemble des stations. Une valeur positive, en bleue, indique que le modèle en colonne est plus performant que le modèle en ligne.....	68
Figure 40: Comme pour la Figure 39 mais pour avec un critère de Nash-Sutcliffe sur l'inverse des débits.....	69
Figure 41 : Matrice de similarité pour les débits de la Durance à Serre-Ponçon.....	70
Figure 42 : Matrices de similarité pour la neige (gauche) et l'évapotranspiration réelle ETR (droite) de la Durance à Serre-Ponçon	70
Figure 43 : Localisation des cantons utilisés pour la comparaison réalisée sur les neuf cultures en région PACA.....	74
Figure 44 : Boxplots des irrigations annuelles calculées par les quatre modèles pour les neuf cultures sur la période 1980-2009. Les boxplots sont calculés avec les résultats des 30 années de simulations. Ils fournissent la médiane (trait horizontal épais) et les quantiles 25 et 75%. Les pointillés marquent l'intervalle à 95%	75
Figure 45 : Les bassins agricoles SCP (Thiers, 2007)	76
Figure 46 : Répartition des surfaces irriguées par assolement (exprimé en % par rapport à la totalité des surfaces irriguées en 2010 (gauche) et évolution des surfaces irriguées sur la concession SCP (Sources : RGA de 1979 à 2010, SCP)	77
Figure 47 : Consommations annuelles en eau d'irrigation simulées et livrées sur les concessions SCP	78
Figure 48 : Apports en eau d'irrigation estimés à partir des redevances et des données de suivi et obtenus après calage de MODIC.....	82
Figure 49 : Schéma méthodologique de quantification	83
Figure 50 : Schéma de principe du modèle MORGLITE (en bleu : entrées et contraintes exprimées ; en rouge : sorties)	88
Figure 51 : Schéma de principe de la modélisation intégrée de la gestion sur le bassin – AN_{BVi} i désigne les apports naturels du sous-bassin i , et Q_i le débit influencé à l'exutoire du bassin versant i , les LACs sont les trois retenues modélisées, $Pré_i$, $Restit_i$ et $Conso_i$ sont les prélèvements, restitutions au milieu et consommation associé au secteur i	89
Figure 52 : Débits réservés antérieurs à 2011 (Source : Cros, 2012)	90
Figure 53 : Répartition de sollicitations entre les trois grandes réserves hydrauliques	91
Figure 54 : Volume total d'eau dans les retenues de Castillon, Sainte-Croix et Serre-Ponçon	93
Figure 55 : Observation ponctuelle du stock de neige (équivalent en eau en mm) sur trois points de suivi EDF DTG	93
Figure 56 : Cotes simulées et observées pour les trois retenues de Serre-Ponçon, Sainte-Croix et Castillon sur la période 1993-2004	94
Figure 57 : Statistiques interannuelles sur les débits simulés et observés dans le canal usinier en aval de Cadarache calculées sur la période 1990-2004 (en trait gras : moyenne ; en trait fin : premiers et derniers déciles).....	94
Figure 58 : Prélèvements nets et consommation de la tranche d'eau sur le périmètre des usages associés à Serre-Ponçon (en bleu : résultats produits par le projet ; en rouge : estimations issus d'EDF DTG)	95
Figure 59 : Distribution statistique des variables clés sur l'échantillon de projections climatiques à chaque étape de la sélection hiérarchique. Les segments sur l'axe des abscisses représentent les dix projections retenues au dernier niveau (sur la gauche les températures, et sur la droite les précipitations totales)	99
Figure 60 : Evolution des anomalies de températures saisonnières annuelles calculées par rapport à la période de référence 1980-2009. Les anomalies des 330 projections climatiques sont tracées en gris, la médiane (quantile 50%) est en rose et l'enveloppe rose est l'intervalle entre les premier et troisième quartiles (quantiles 25 et 75%). Les températures DuO sont représentées en noir	100
Figure 61 : Comme pour la Figure 60 mais pour les précipitations	101
Figure 62 : Cycles annuels moyens des changements de précipitations sur six des sept bassins de contrôle (les boxplots précisent la médiane (trait épais horizontal), une boîte s'étendant du premier au troisième quartile).....	102
Figure 63 : Cycles annuels moyens des changements de température sur six des sept bassins de contrôle (les boxplots précisent la médiane (trait épais horizontal), une boîte s'étendant du premier au troisième quartile).....	103
Figure 64 : Cycles annuels moyens des changements d' ET_0 sur six des sept bassins de contrôle (les boxplots précisent la médiane (trait épais horizontal), une boîte s'étendant du premier au troisième quartile)	104
Figure 65 : Synthèse des changements de débits (a), de maximum de stock de neige (b) et d'évapotranspiration (c) sur le bassin de la Durance à Serre-Ponçon. 1) La première colonne présente les évolutions des moyennes annuelles de 1960 à 2065. Toutes les projections hydrologiques (330 par modèle hydrologique) sont tracées en gris et les médianes de chaque modèle sont représentées en couleur. 2) La deuxième colonne compare les distributions de changements annuels entre les cinq modèles hydrologiques. Les changements médians sont représentés par le point central des diagrammes en violon et la moyenne des cinq médianes est représentée par la ligne rouge (Source : Magand, 2014).....	110
Figure 66 : Comme pour la Figure 65 mais pour le Verdon à Sainte-Croix (Source : Magand, 2014).....	111
Figure 67 : Comparaison entre modèles hydrologiques des changements mensuels de débits, d'évapotranspiration, de maximum de stock de neige et de stock d'eau souterrain pour le bassin de la Durance à Serre-Ponçon. Les médianes de changements mensuels entre les périodes TF et TP sont représentées par les lignes de couleur. Pour chaque mois, les	

distributions des changements mensuels tous modèles confondus sont représentées en gris par les diagrammes en violon (Source : Magand, 2014)	112
Figure 68 : Comme pour la Figure 67 mais pour le Verdon à Sainte-Croix (Source : Magand, 2014).....	113
Figure 69 : Diagramme des crues des régimes observés ou renaturalisés en trois points de contrôle.....	117
Figure 70 : Distribution des normes r_θ et des dates θ - en rouge, basée sur l'ensemble des simulations GCM/MDES/MH en temps présent, en gris, basée sur l'ensemble des simulations GCM/MDES/MH en temps futur	117
Figure 71 : Boîte à moustache des valeurs de DQ95 (en jour) et de changements de Q95 (en m ³ /s), par modèle hydrologique, sur trois stations de contrôle (les boxplots précisent la médiane (trait épais horizontal), une boîte s'étendant du premier au troisième quartile)	119
Figure 72 : Comparaison des changements de débits du Verdon à Sainte-Croix issus des 330 projections climatiques régionales entre les modèles hydrologiques deux à deux. Les changements du premier modèle représentés en noir sont classés dans l'ordre croissant des changements de débits. A chaque abscisse, le changement de débit simulé par le deuxième modèle en utilisant le forçage correspondant est représenté en rouge	123
Figure 73 : Dispositif reposant sur le suivi des QC7 et seuils définis par les quantiles de VC3 décennaires (bleu : Vigilance ou Pré-alerte, jaune : Alerte, orange : Alerte renforcée, rouge : Crise, gris absence de données)	126
Figure 74 : Risque d'occurrence des niveaux d'alerte entre avril en novembre en 2050 pour l'Asse à la Clue de Chabrières (en jour dans le tableau ; sur les graphiques, les couleurs sont associés au seuil sous passé ; les traits pointillés sont relatifs à PST et les traits continus à FUT)	128
Figure 75 : Risque d'occurrence des niveaux d'alerte entre avril en novembre en 2050 pour le Buëch à Serres (en jour dans le tableau ; sur les graphiques, les couleurs sont associés au seuil sous passé ; les traits pointillés sont relatifs à PST et les traits continus à FUT	129
Figure 76 : Localisation des sites jaugés (a). Photographie de la plaine alluviale (b). Débit mensuel interannuel à la station de mesure continue de la Clue de Chabrières (la ligne discontinue indique le module à cette station) (c).....	131
Figure 77 : Relation entre la permanence de l'écoulement reconstitué et le nombre d'espèces d'invertébrés sur l'Asse, d'après Datry (2012) – en rouge : les points se rapportant à la période estivale et droite de régression associée, en bleu : ceux se rapportant à la période hivernale et droite de régression associée, en noir : droite de régression sans distinction de saison	131
Figure 78 : Simulations à la section n°13 de l'Asse disposant de jaugeages (Noticed discharge) pour l'année 2009, avant (Simulated) et après correction (QQRvised) des différents modèles hydrologiques	132
Figure 79 : Nombre moyen interannuel de jours d'assec par mois sur la période 1980-2009 pour le site n°13.....	133
Figure 80 : Evolution du Flow Permanence calculé sur la période juin-novembre, entre les simulations en temps futur (FUT, 2036-2065) et de référence (PST, 1980-2009)	134
Figure 81 : Analyse de sensibilité du Flow Permanence estival, calculé du 15 avril au 15 octobre, fonction des anomalies climatiques sur la période juin-novembre (● scénario KNN ○ année observée).....	135
Figure 82 : Positionnement de la démarche de prospective territoriale dans le projet R ² D ² 2050.....	138
Figure 83 : Principales caractéristiques des quatre scénarios prospectifs pour le territoire.....	139
Figure 84 : Boxplots des changements (période 2035-2065 – période 1980-2009) de précipitations P , d'évapotranspiration de référence ET_0 et de bilan hydrique $P-ET_0$ pour les neuf cantons associés aux neuf cultures (en haut) ; boîte à moustache des changements en irrigation estimés par les quatre modèles et les 9 cultures (en bas). Dans tous les cas, les boxplots sont calculés avec les résultats des 10 scénarios climatiques. Ils fournissent la médiane (trait horizontal gras) et les quantiles 25 et 75%. Les pointillés marquent l'intervalle à 95%.....	149
Figure 85 : Evolution de la surface totale irriguée.....	154
Figure 86 : Evolution de la surface irriguée par type de culture	154
Figure 87 : Evolution de la surface irriguée par sous-bassin	155
Figure 88 : Evolution de la surface totale arrosée.....	156
Figure 89 : Evolution de la surface arrosée par bassin	156
Figure 90 : Evolution des apports en eau d'irrigation et arrosage par périmètre, selon les deux variantes de MODIC.....	158
Figure 91 : Evolution des assolements irrigués sur le périmètre du Canal de Provence, par scénario, à l'horizon 2050.....	166
Figure 92 : Évolution de la demande en eau d'irrigation sur le périmètre du Canal de Provence, sous climat futur	168
Figure 93 : Evolution de la consommation annuelle moyenne en eau d'irrigation sur les périmètres SCP, en année moyenne, à l'horizon 2050.....	169
Figure 94 : Evolution des surfaces irriguées sur les périmètres agricoles desservis par le Canal de Provence (zoom de la Figure 87, page 152).....	170
Figure 95 : Evolution de la population desservie par le système Durance-Verdon (au moins en partie).....	171
Figure 96 : Fréquentation touristique au pas de temps mensuel selon les scénarios territoriaux (Sources : CRT PACA, ACTeon)	172
Figure 97 : Population touristique exprimée en "équivalent habitant" pour les communes alimentées par la ressource Durance-Verdon.....	172
Figure 98 : Consommation moyenne par ménage selon les scénarios	176
Figure 99 : Consommation totale en AEP sur le territoire desservi par le système Durance-Verdon	176
Figure 100 : Prélèvements en AEP dans les différents périmètres et sous-bassins hydrographiques	178
Figure 101 : Demande totale en AEP, par périmètre et par sous-bassin hydrographique	180

Figure 102 : Volumes totaux prélevés sur le système Durance-Verdon par usage et retours au milieu internes ou externes	184
Figure 103 : Volumes totaux prélevés sur le système Durance-Verdon et répartition par usage par sous-bassin	184
Figure 104 : Volumes totaux prélevés par usage pour chaque sous-bassin	185
Figure 105 : Biais introduits par la chaîne GCM/MDES sur la trajectoire de la réserve de Serre-Ponçon (en noir : Histo, en bleu : simulation en temps présent PST).....	192
Figure 106 : Qualité de la chaîne GCM/MDES pour les trois climats retenus (en haut : Serre-Ponçon / au milieu : Sainte-Croix / en bas : Castillon).....	192
Figure 107 : Sollicitations des ressources Durance et Verdon en temps présent et futur par scénario.....	193
Figure 108 : Consommation des tranches d'eau sur la ressource Durance et Verdon (valeur moyenne et dépassements des volumes contractuels).....	194
Figure 109 : Courbes de remontée (dans l'ordre de haut en bas : Serre-Ponçon, Sainte-Croix, Castillon)	196
Figure 110 : Evolution du régime et des quantiles 10 et 90% des apports à la retenue de Serre-Ponçon (Présent en bleu / Futur en rouge / Historique en noir)	196
Figure 111 : Indicateur de Valeur énergétique (rapports annuels des turbinés aux apports naturels sur les 10% des jours les plus froids).....	197
Figure 112 : Volume d'apport et volume turbiné sur les 10% des jours les plus froids.....	198
Figure 113 : Cotes non atteintes une année sur 10 sur les retenues de Serre-Ponçon (haut), Sainte-Croix (milieu) et Castillon (bas).....	199
Figure 114 : Trajectoire de la réserve de Serre-Ponçon selon deux scénarios territoriaux et selon les deux modalités de calcul de MODIC pour une projection climatique	201
Figure 115 : Cotes non atteintes une année sur 10 sur la retenue de Serre-Ponçon selon deux scénarios territoriaux et selon les deux modalités de calcul de MODIC pour une projection climatique.....	201
Figure 116 : Carte de la région PACA et position du bassin versant du Buech (en vert), à droite bassin versant du Buech à l'amont de Serres (En jaune) (Sources : K. Cros, Y. Arama, ACTeon 2013 et EVP Buech phase 5 et 6, 2012)	204
Figure 117 : Régimes hydrologique (extrait de la Figure 12, page 37) et pluviométrique du Buëch à Serres (observations temps présent 1980-2009).....	205
Figure 118 : Volumes totaux prélevés par usage (extrait de la Figure 104, page 185) (haut) et Prélèvements de l'irrigation selon les scénarios et modélisation de la demande pour la période 2050 (bas) – « TP 2010 » = Climat temps présent et territoire Niv2010 ; « TF 2010 » = Climat temps futur et territoire Niv2010.....	208
Figure 119 : Illustration schématique de la cascade d'incertitudes dans les études d'impact « top-down »	221
Figure 120 : Représentation schématique de la propagation des incertitudes dans le projet R ² D ² 2050. Les incertitudes liées à chaque étape de modélisation sont figurées par des carrés. L'emboîtement de deux carrés représente la propagation des incertitudes du plus petit vers le plus large. À noter que les aires des carrés ne sont pas proportionnelles aux incertitudes réellement modélisées.....	222
Figure 121 : Résultats schématiques de simulation pour différentes expériences climatiques historique+future. Trajectoires obtenues pour les différents membres de deux modèles de climat (1 seul membre pour GCM1, 3 membres pour GCM2). Réponses climatiques et variabilité interne correspondantes pour chaque modèle. La réponse climatique du modèle est la moyenne d'ensemble qui serait obtenue pour un grand nombre de membres (adapté de (Hingray et Saïd, 2014)).	224
Figure 122 : Températures et de précipitations interannuelles moyennes (moyennes sur 20 ans) obtenues sur la période 1860-2100 pour le bassin de la Durance supérieure sur la base d'un ensemble de 11 expériences climatiques produites à l'aide de 4 GCMs (3 et 6 membres pour 2 d'entre eux) et de 3 modèles de descente d'échelle statistique. Bas : 100 réalisations (lignes grisées) obtenus pour la chaîne de simulation DMIEH5C-1/ANALOG20 (la ligne rouge inférieure, la ligne verte et la ligne rouge supérieure correspondent respectivement aux quantiles 5, 50 et 95% ; la ligne verte correspond à l'un des 100 scénarios). Milieu et haut : scénario moyen (moyenne des 100 réalisations) obtenu avec le modèle de descente d'échelle statistique ANALOG20 lorsqu'il est forcé par les 11 expériences GCM (haut) et obtenu avec tous les modèles de descente d'échelle lorsqu'ils sont forcés par le GCM DMIEH5C-1 (adapté de (Hingray et Saïd, 2014)).....	224
Figure 123 : Gauche : Changements de température (haut - en [°C]), précipitations (bas - en [%]), pertes par évapotranspiration (ligne 3 - en [%]) et évapotranspiration (ligne 4 - en [%]) annuelles moyennes sur 20 ans en fonction de l'échéance de projection (période de référence 1980-1999) pour la Durance à Serre-Ponçon. Droite : Proportion de l'incertitude totale expliquée par chaque source d'incertitude : GCM (bleu foncé) ; MDES (vert) ; MH (gris), interaction GCM/MDES/MH (R/MI, cyan), variabilité interne grande échelle (LSIV, rouge) et petite échelle (SSIV, jaune) associées à chaque chaîne GCM/MDES (adapté de Hingray et Saïd (2014)).....	226
Figure 124 : Même chose pour les changements d'évapotranspiration (ligne 3 - en [%]) et de débit (ligne 4 - en [%]) annuels moyens sur 20 ans pour la Durance à Serre-Ponçon.....	226

Le mot du coordinateur

Ces premiers mots pour remercier l'ensemble des personnes impliquées de près ou de loin dans le projet R²D² 2050 et qui ont contribué à sa réussite... Ces personnes sont nombreuses. Je n'en ferai pas une liste détaillée. Je pense notamment aux acteurs qui ont bien voulu se prêter aux ateliers « Groupes Techniques Locaux » conçus pour construire collectivement les visions du territoire en 2050, à ceux qui ont répondu à nos demandes de données ou d'informations relatives à leur pratique en matière de gestion de l'eau et à ceux qui ont permis de faire connaître le projet dans sa phase de réalisation.

Je tiens, au nom du collectif de recherche, à remercier plus particulièrement :

- le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie au travers du programme GICC et l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse pour avoir, tous deux, soutenu financièrement ce projet ;
- l'Unité Production Méditerranée EDF, et spécialement, D. ROUX qui a contribué à l'émergence du projet et nous a facilité nos démarches sur le territoire ;
- les représentants de la Délégation de Marseille de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse (C. MONIERE et V. MAYEN) et du Service Eau et Milieux Aquatiques du Conseil Régional PACA (O. NALBONE, B. MAYEN et C. FRANCCART) que nous avons rencontrés régulièrement.

Ma profonde gratitude va également à l'ensemble de l'équipe projet. Nous avons tous embarqué en direction du système Durance-Verdon fin 2011. La trajectoire a parfois été chaotique. La principale difficulté a été d'instaurer et de maintenir un dialogue entre nous, chacun venant d'une galaxie différente (*Hydrologie, Economie, Prospective, Agronomie, Biologie*) avec son dialecte propre. Les discussions ont parfois été vives dans la salle des commandes mais enrichissantes pour tous. Je n'ai pas usé de mon sabre laser. Finalement, nous avons réussi à construire notre propre *Faucon Millenium* qui a montré ses capacités à voyager en « *hyper espace climatique* » (Hendrickx ©). Pour reboucler avec l'esprit qui a habité le projet et conclure, j'emprunte volontiers une sage parole de Maître YODA qu'il s'agit de méditer lorsqu'on investit les démarches prospectives : « *Always in motion the future is.* » (Episode V: The Empire Strikes Back, Star Wars).

Merci donc à tous.

E. Sauquet

Coordonnateur du projet R²D² 2050

1. Résumés

Résumé court en français (environ 200 mots)

Une vision prospective de la gestion de l'eau du bassin de la Durance et des territoires alimentés par ses eaux à l'horizon 2050 a été élaborée, appuyée par une chaîne de modèles. Cette chaîne inclut des représentations :

- du climat,
- de la ressource naturelle,
- des demandes en eau pour l'agriculture et l'alimentation en eau potable, et
- du fonctionnement des grands ouvrages hydrauliques (barrages de Serre-Ponçon, de Castillon et de Sainte-Croix), sous contraintes de respect des débits réservés, de cotes touristiques dans les retenues et de restitution d'eau stockée pour des usages en aval.

Cet ensemble, validé en temps présent, a été alimenté par des projections climatiques et paramétré pour intégrer les évolutions du territoire décrites par des scénarios de développement socio-économique avec une hypothèse de conservation des règles de gestion actuelles. Les résultats des simulations suggèrent à l'horizon 2050 :

- une augmentation de la température moyenne de l'air impactant l'hydrologie de montagne,
- une évolution incertaine des précipitations,
- une diminution des stocks de neige et une fonte avancée dans l'année qui induisent une réduction des débits au printemps,
- une diminution de la ressource en eau en période estivale,
- une diminution de la demande globale en eau à l'échelle du territoire, cette demande étant fortement conditionnée par les scénarios territoriaux élaborés ici,
- la satisfaction des demandes en eau en aval des ouvrages considérées comme prioritaires, au détriment de la production d'énergie en hiver (flexibilité moindre de l'hydro-électricité en période de pointe) et du maintien de cotes touristiques en été,
- une diminution de la production d'énergie due notamment à la réduction des apports en amont des ouvrages hydroélectriques.

Mots-clés : Durance, impacts hydrologiques, ressource en eau, évolution climatique, prospective, usages, impacts socio-économiques, changement global

Résumé court en anglais (200 mots)

The Durance River is one of the major rivers located in the Southern part of France. Water resources are under high pressure due to significant abstractions for various water uses (irrigation, hydropower, drinking water, industries, recreation and ecological services) within and out of the river basin. The water management with the Durance River basin will have to face global change that may question the sustainability of the current rules for water allocation.

A chain of models was developed to simulate climate at regional scale (given by 330 projections obtained by applying three downscaling methods), water resources (provided by six rainfall-runoff models forced by a subset of the 330 climate projections), water demand for agriculture and water supply for domestic purposes for different sub-basins of the Durance River basin upstream of Mallemort under present-day and future conditions. A model of water management was developed to simulate reservoir operations for the three main dams (Serre-Ponçon, Castillon, Sainte-Croix) on present-day conditions. This model simulates water releases from reservoir under constraints imposed by rule curves, ecological flows downstream to the dams and water levels in summer for recreational purposes.

Four territorial socio-economic scenarios were also elaborated with the help of stake holders to project water needs in the 2050s for the areas supplied with water diverted from the Durance River basin.

Results suggest:

- a projected increase of the average air temperature with consequences on snow accumulation and melt processes;
- no significant trends in total precipitation;
- a decrease in snowpack, which will lead to reduced flows, especially in the spring season;
- a decrease in water resources in summer;
- an increase of pressure on water resources;
- a decrease in water demand for irrigation as a consequence of the socio economics scenarios;
- a decrease in energy produced by the main dams in the Durance River basin in the 2050s mainly due to reduced annual inflows;
- a full compliance with water needs for priority uses downstream the reservoir but a lower flexibility for hydropower management during winter peak energy demand.

Keywords: Durance, climate change impact study, water resources, climate change, prospective, water uses, socio-economic impacts, global change.

2. Synthèse

Contexte

Le bassin de la Durance, cours d'eau majeur du sud-est de la France, se caractérise par une grande diversité des usages « traditionnels » de l'eau tels que l'agriculture irriguée, l'hydroélectricité, l'alimentation en eau potable et l'industrie, mais aussi par des demandes sociétales récentes (loisirs liés à l'eau, préservation de la qualité des milieux). Ces usages sont des activités importantes pour le développement du territoire, qui vont au-delà des limites naturelles des bassins versants de la Durance et du Verdon, son principal affluent.

L'évolution démographique, la montée en puissance des préoccupations environnementales (notamment au travers de l'application de la Directive Cadre sur l'Eau) et le développement économique devraient impacter les usages établis (alimentation en eau potable, énergie, irrigation) et ceux émergents (service écologique, tourisme). S'ajouterait, aux évolutions socio-économiques et démographiques du territoire, l'impact du changement climatique. Les effets combinés de demandes en eau modifiées et d'évolutions du climat devraient avoir, semble-t-il, une incidence sur la disponibilité en eau et la clef de répartition entre les usages de l'eau.

Objectifs généraux du projet

Le projet R²D² 2050 a eu pour objectif principal d'évaluer les impacts des évolutions anthropiques et climatiques sur la gestion de l'eau à l'échelle de la Durance en se focalisant sur l'équilibre offre-demande en eau des territoires sécurisés par les grandes réserves hydrauliques de la Durance et du Verdon, à l'horizon 2050. Il met à jour pour partie les connaissances sur l'effet du changement global dans la suite du projet « GICC-Rhône » (Leblois, 2002), datant de 2003, en se concentrant sur un des affluents majeurs du Rhône, parmi les plus contrastés en termes de régime hydrologique et de climat. Les analyses à l'échelle des territoires desservis par le système Durance-Verdon complètent l'étude « Explore 2070 » réalisée à l'échelle nationale (Chauveau *et al.*, 2013). Les principaux apports du projet sont :

- la construction d'une représentation fidèle du fonctionnement actuel d'un grand bassin versant (environ 13 000 km²) soumis à des influences climatiques variées et dont la ressource est fortement sollicitée par des territoires connexes via un réseau de canaux. Une autre difficulté réside dans l'intégration de la connaissance partielle des usages en présence sur le territoire (du fait de données fragmentaires) dans une logique globale de modélisation ;
- l'élaboration d'une vision prospective quantifiée du devenir de la gestion de l'eau sous hypothèse de changement global, impliquant les acteurs du territoire, appréhendée à différentes échelles emboîtées, depuis l'échelle européenne jusqu'aux entités de gestion de ce bassin ;
- la quantification des incertitudes permettant de hiérarchiser la part relative des différentes sources à l'origine de ces incertitudes (relatives notamment à la représentation des évolutions socio-économiques, climatiques, hydrologiques...), ceci afin de dégager les grandes tendances sur lesquelles les gestionnaires pourraient élaborer une stratégie d'adaptation.

Matériels et méthodes

Une chaîne de modélisation numérique a été développée et mise en place sur le territoire (Figure 1), incluant des représentations actuelles et futures : du climat, de la ressource naturelle, des demandes et prélèvements en eau pour l'agriculture, l'industrie et l'alimentation en eau potable, du fonctionnement des grandes réserves hydrauliques. L'approche multi-modèle et multi-scénario permet d'appréhender pour partie les incertitudes liées à l'exercice.

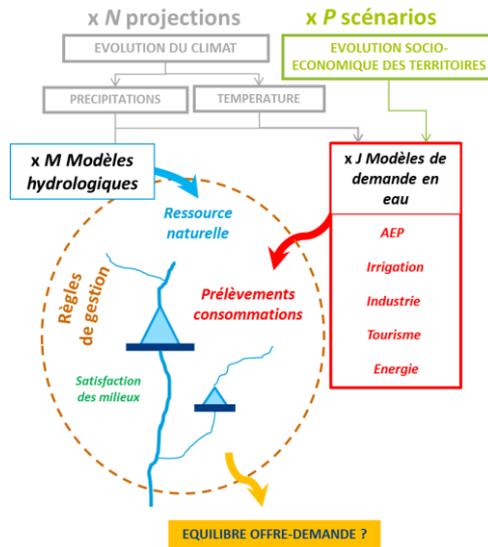


Figure 1 : Différentes composantes de la chaîne de modélisation

Les résultats sont fournis en différents points du bassin versant de la Durance en amont de Mallemort (Figure 2). Les principaux points de restitution sont des stations hydrométriques actuellement en fonctionnement : la Durance à Serre-Ponçon, à l'Escalé, à Cadarache et à Mallemort, le Buëch à Serres, le Verdon à Sainte-Croix et à Castillon.

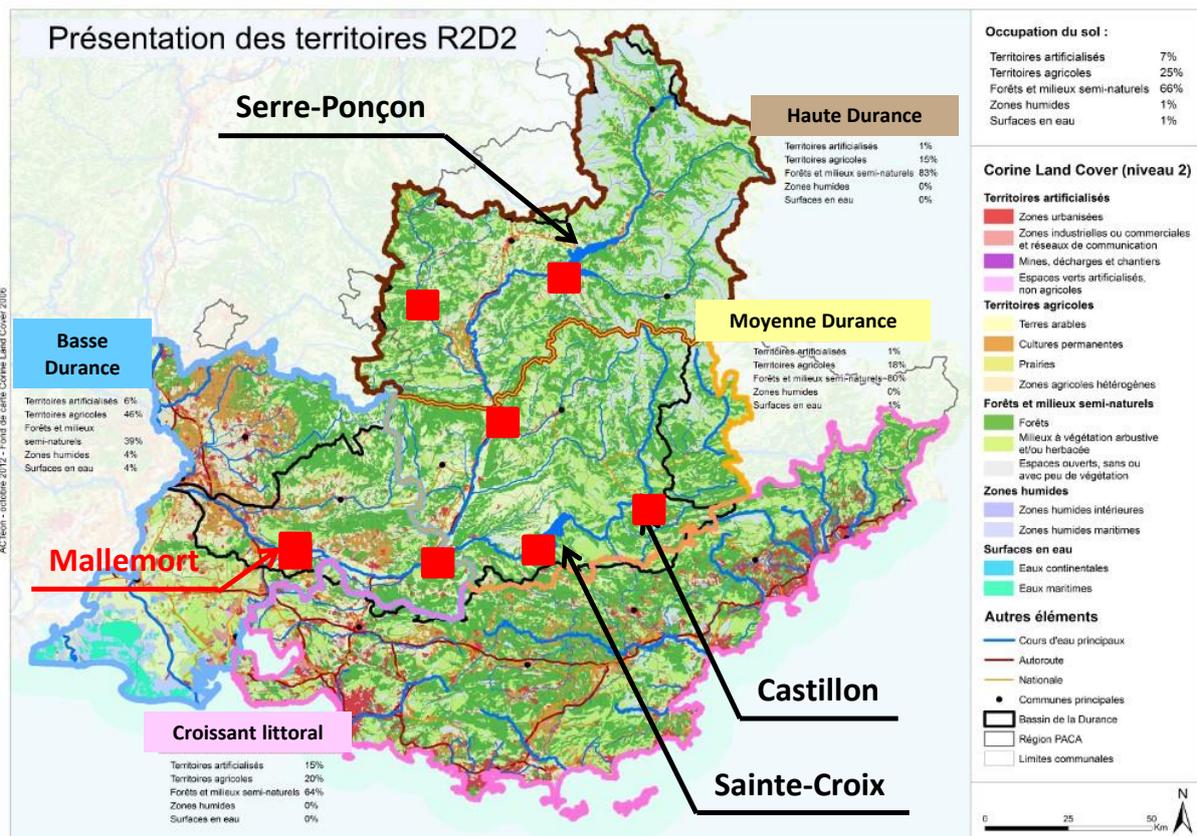


Figure 2 : Territoires d'étude, ouvrages hydrauliques d'intérêt, occupation du sol et points d'analyse des modélisations (■)

Le climat actuel est décrit par deux ré-analyses préexistantes : SPAZM (Gottardi *et al.*, 2012) et SAFRAN (Vidal *et al.*, 2010), et une nouvelle archive « Durance météo » DuO (Magand *et al.*, 2014b). DuO, fruit de l'hybridation des deux ré-analyses, cherche à tirer parti des qualités de SPAZM (résolution spatiale 1 km) et de SAFRAN (disponibilité au pas de temps horaire). La méthode utilisée pour la construire vise à conserver les

températures et précipitations mensuelles moyennes de SPAZM, et le signal horaire de SAFRAN pour ces variables, afin d'obtenir des forçages météorologiques au pas de temps horaire et à la résolution 1 km. L'évapotranspiration de référence est calculée selon la formule de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) afin de s'approcher au mieux du référentiel des agronomes.

Les projections climatiques sont générées par trois méthodes de descente d'échelle statistiques appliquées à une sélection de sorties de modèles de grande échelle (GCMs), toutes basées sur l'approche par analogie introduite par Lorenz (1969) et déjà éprouvées dans le cadre du projet ANR RIWER2030 (Hingray *et al.*, 2013 ; Lafaysse *et al.*, 2014). Dans ces trois méthodes, l'hypothèse est faite que des situations similaires en termes de circulation synoptique conduisent à des valeurs similaires en termes de météorologie locale. Pour satisfaire aux exigences des modèles d'impact, *i.e.* les modèles hydrologiques et outils simulant la demande en eau, la grille de restitution des méthodes de descente d'échelle est définie par le maillage 8x8 km de SAFRAN.

Sept modèles hydrologiques de structures différentes, et *a priori* à la sensibilité différente sous climat modifié, ont été retenus (Tableau 1) pour simuler la ressource naturelle. Ils ont tous représenté les évolutions passées. Six d'entre eux ont été forcés par des climats futurs. Un protocole commun de test de ces modèles a été mis en place afin d'évaluer leur capacité à reproduire correctement le comportement hydrologique des bassins versants dans les conditions naturelles actuelles au travers de critères de performance numériques, et pour certains, leur sensibilité aux modalités choisies pour leur calage, et les incertitudes associées à l'étape de modélisation hydrologique.

Trois modèles de complexité variée estimant les besoins en irrigation (Tableau 2) ont été appliqués sur neuf cultures emblématiques du bassin de la Durance afin d'appréhender les incertitudes liées aux demandes en eau actuelle et future. Seul MODIC a pu être adapté et généralisé à l'ensemble du territoire. Un modèle statistique sur la base d'une fonction économétrique inspirée de García-Valiñas *et al.* (2009) a été développé pour représenter la demande en eau potable (AEP).

Modèle	Partenaire	Référence	Type	Discretisation spatiale
CEQUEAU	EDF LNHE	Morin, 2002	Conceptuel	Distribué
GR5J	Irstea Antony	Le Moine, 2008	Conceptuel	Global
Isba-Durance	LTHE	Lafaysse, 2011	A bases physiques	Distribué
CLSM	UPMC	Ducharne <i>et al.</i> , 2000 ; Magand, 2014	A bases physiques	Distribué
MORDOR	EDF-DTG	Garçon, 1996	Conceptuel	Global
J2000	Irstea Lyon	Krause <i>et al.</i> , 2006	Conceptuel	Distribué
ORCHIDEE	UPMC	Krinner <i>et al.</i> , 2005	A bases physiques	Distribué

Tableau 1 : Modèles hydrologiques utilisés par les partenaires du projet

Modèle	Partenaire	Référence	Type
FIVE-CoRe	SCP	Chopart <i>et al.</i> , 2007	Modèle de bilan hydrique journalier développé par le CIRAD
MODIC	EDF LNHE	Sauquet <i>et al.</i> , 2010 ; Braud <i>et al.</i> , 2013	Modèle de bilan hydrique journalier décliné en deux versions : cycle végétatif fixe (MODIC_CF) et cycle végétatif variable avec une approche de type degré jour (MODIC_DJ)
SiSPAT	Irstea Lyon	Braud <i>et al.</i> , 1995, 2013	Modèle à base physique des transferts d'eau et de chaleur dans le système sol – plante – atmosphère auquel un module de calcul d'irrigation a été ajouté

Tableau 2 : Modèles de besoins en eau pour l'irrigation utilisés par les partenaires du projet

Un outil de simulation des grands ouvrages hydrauliques (Serre-Ponçon, Castillon, Sainte-Croix), baptisé MORGLite, inspiré de la pratique opérationnelle d'EDF et dans la continuité de premiers travaux sur la simulation de la gestion des ouvrages hydro-électrique (Hendrickx et Sauquet, 2013 ; François, 2013 ; François *et al.*, 2015), a été élaboré spécifiquement pour le projet pour représenter le lien entre leurs gestions, les sollicitations en aval du système Durance-Verdon et les objectifs de remplissage des réserves, de respect des débits réservés et de cotes touristiques. Les simulations sont conduites avec une hypothèse de conservation des règles de gestion actuelles.

Cet ensemble de modèles a permis de reproduire de manière satisfaisante le fonctionnement actuel des composantes naturelle et anthropique de l'hydrosystème prenant en compte les principaux processus, leurs interactions et leur spatialisation.

Un exercice de prospective a été mené avec le soutien d'acteurs impliqués dans la gestion de l'eau pour construire quatre scénarios de développement socio-économique des secteurs connectés au système Durance-Verdon (les quatre territoires identifiés sur la Figure 2). Ces scénarios « littéraires » ont fait l'objet d'une quantification, *i.e.* un conditionnement des valeurs assignées aux paramètres des modèles de besoin en eau (par ex. évolution des assolements, itinéraire technique pour l'irrigation, évolution démographique...).

La sensibilité des milieux au changement climatique a été examinée sur l'Asse, cours d'eau intermittent caractéristique des Préalpes du sud. Cette étude a mis en œuvre deux des modèles hydrologiques, une procédure de reconstitution d'assecs le long du linéaire, exploitant des campagnes de jaugeage et des relations empiriques établies à partir d'échantillons prélevés *in situ* entre richesse biologique et intermittence (Cipriani *et al.*, 2014).

Résultats obtenus

Connaissance et représentation de la Durance dans le contexte actuel

Le travail conséquent d'analyse des prélèvements, des transferts d'eau et des usages a permis de connaître les pressions actuelles pesant sur le système Durance-Verdon, de comprendre les principaux facteurs explicatifs des évolutions récentes et, *in fine*, de reconstituer des chroniques de débits naturalisés sur la partie aval du territoire. Ces séries n'ont pas pu être obtenues indépendamment d'outils de simulation : l'information sur les prélèvements - la source principale à l'échelle du territoire étant les redevances de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse - n'est pas disponible au pas de temps souhaité (journalier). Les séries de prélèvements, de débits observés et naturalisés disponibles sur la période 1980-2009 ont constitué la référence pour qualifier la qualité des modèles d'impact en temps présent sur des données historiques.

L'analyse des séries de débits simulés par les modèles hydrologiques montre l'existence de différences notables entre modèles sur les bassins étudiés (jusqu'à 25, aux exutoires correspondant à des stations hydrométriques). Les origines de ces différences sont partiellement expliquées en examinant les variables internes et les modalités choisies pour l'application des modèles. Hormis ORCHIDEE qui n'a fait l'objet d'aucun réajustement, aucun des modèles ne semble meilleur que les autres sur l'ensemble des critères ou des stations (ex. Figure 3, gauche), ce qui rejoint les conclusions de précédents exercices de comparaison. Le projet a mis en lumière des similitudes inattendues entre modèles aux structures pourtant fondamentalement distinctes.

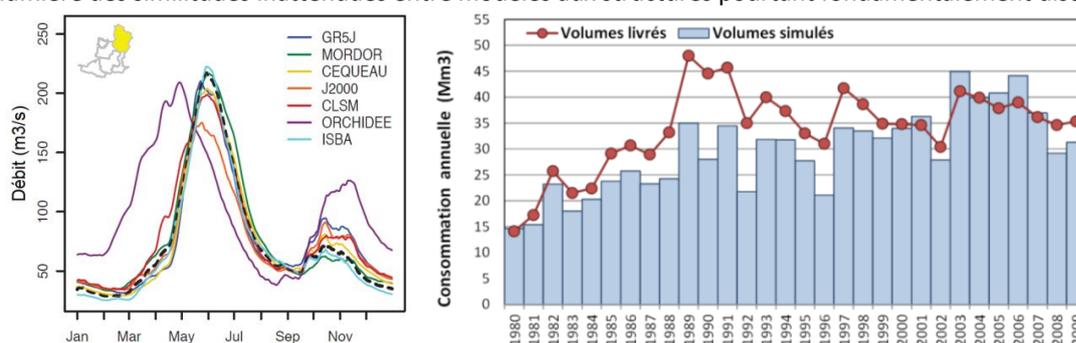


Figure 3 : Résultats de simulation des outils mobilisés dans R²D² 2050, à gauche les débits décennaux moyens interannuels observés et simulés pour la Durance à Serre-Ponçon, à droite les consommations annuelles en eau d'irrigation simulées par FIVE-CoRe et livrées sur le périmètre desservi par la SCP

Les outils de demande en eau et de gestion des ouvrages ont montré leur capacité à reconstituer l'historique (ex. Figure 3, droite). Une réelle difficulté est apparue lors de l'interprétation des données relatives aux usages, notamment sur la représentativité des chiffres présents dans le Recensement Général Agricole RGA (principale source d'information sur l'agriculture, notamment sur les pratiques d'irrigation et les besoins en eau sur un territoire), sur la localisation des lieux de prélèvements, sur les prélèvements effectifs journaliers, sur la clé de répartition entre ressources multiples pour l'alimentation en eau potable (AEP)...

Evolution de l'hydro-climatologie du bassin de la Durance à l'horizon 2050

Un ensemble de projections a été élaboré à partir de 11 simulations globales (appelées *runs*) réalisées par quatre GCMs différents dans le cadre du projet européen ENSEMBLES (van der Linden et Mitchell, 2009). Les méthodes de descente d'échelle considérées intègrent une composante stochastique, chaque run a pu ainsi être décliné en 100 réalisations possibles (d'où un total de 3300 projections disponibles). Cependant, la quantité de projections élaborées s'est révélée au-delà des capacités de calcul associées aux différents modèles d'impact. Une méthodologie (Vidal et Hingray, 2013 ; Vidal *et al.*, 2015) à base d'échantillonnage par hypercubes latins (McKay *et al.*, 1979) a donc été mise en place afin de réduire le nombre de projections qui seraient utilisées en entrée des modèles d'impact en préservant la diversité des sources d'incertitudes et les caractéristiques statistiques, en termes de changements entre le présent et le futur, présentes dans l'ensemble initial.

Le changement climatique envisagé sur la période 2036-2065 et ses effets sur la ressource naturelle, mesuré sur la base des 330 projections, se traduit par les évolutions suivantes par rapport à la période 1980-2009 :

- pour le climat, de manière assez homogène : une augmentation des températures d'au moins 1°C, et pouvant aller jusqu'à 3°C, plus importante l'été (Figure 4) et une évolution très incertaine des précipitations ;
- pour l'hydrologie naturelle, les modèles hydrologiques semblent converger vers une diminution de la ressource disponible (Figure 5). Nous notons ainsi :
 - une réduction des débits d'étiage estivaux, autour de -20 m³/s sur le débit moyen d'août à Cadarache ;
 - une réduction significative du manteau neigeux. Les modifications portant sur la dynamique du stock de neige projetées en amont de Serre-Ponçon se propagent vers l'aval ;
 - une évolution de la ressource annuelle proche de -20 m³/s à Cadarache ;
 - des évolutions incertaines des débits hivernaux, du fait notamment de la forte variabilité dans les projections sur les pluies.

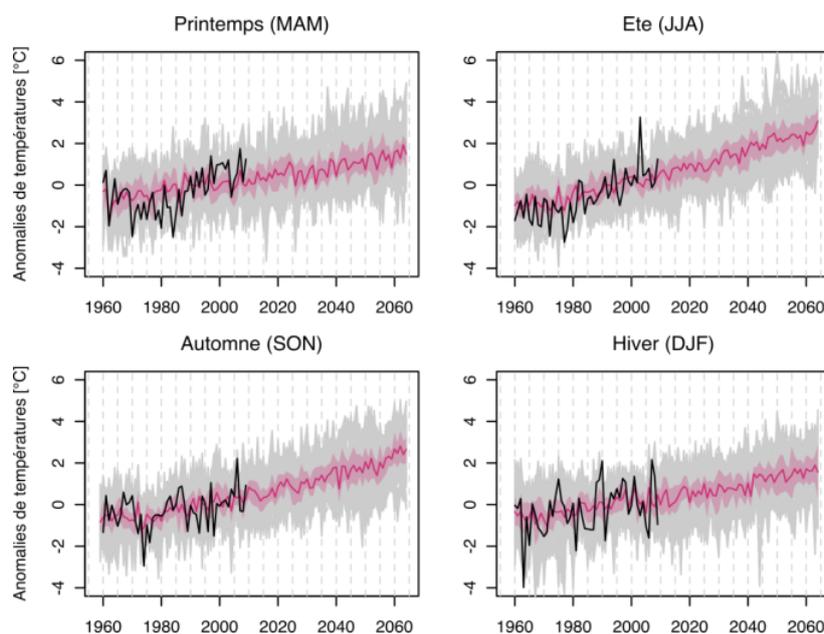


Figure 4 : Evolution des anomalies de températures saisonnières moyennes du bassin de la Durance à sa confluence avec le Rhône (à gauche ; les anomalies des 330 projections climatiques sont tracées en gris, la médiane est en rose foncé et l'enveloppe rose est l'intervalle entre les premier et troisième quartiles ; les forçages DuO sont représentés en noir), par rapport à la période de référence 1980-2009

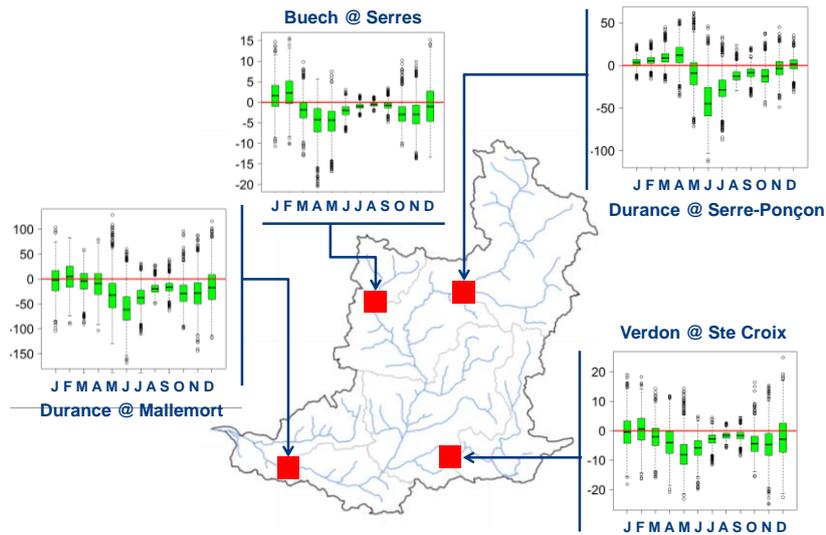


Figure 5 : Anomalies de débits mensuels exprimées en m^3/s (à droite) sur la période 2036-2065, par rapport à la période de référence 1980-2009

Evolution des usages sur le bassin de la Durance à l'horizon 2050

Une manière d'appréhender l'incertitude de l'avenir socio-économique est de s'appuyer sur un faisceau de scénarios plausibles contrastés. Deux options s'offraient : faire des scénarios de demande en eau future ou faire des scénarios de territoire et en déduire une demande en eau. C'est la seconde option qui a été choisie. Il convient de rappeler les précautions de lecture et d'interprétation de ces scénarios : (1) à l'instar du futur climatique, le devenir socio-économique du territoire n'est certainement pas parmi les scénarios élaborés, qui ne sont que des conjectures n'ayant de valeur qu'au regard de ce qu'elles essayent de tester, (2) d'autres scénarios auraient pu expliquer un même « niveau » de demande en eau, (3) les scénarios ont été construits indépendamment de l'évolution du climat. L'approche envisagée a l'avantage d'ancrer quatre scénarios dans un contexte territorial avec les cohérences internes (ex. compétition entre usages) imposées à l'heure actuelle ou émergentes dans le futur. L'exercice de prospective a mobilisé l'expertise des acteurs du territoire sur le bassin de la Durance dans le cadre de trois réunions, organisées en octobre 2012. Le résultat est quatre scénarios prospectifs pour le territoire (*Investissement, Spécialisation, Ecologie, Crise*, Figure 6). S'y ajoutent les scénarios *Tendanciel* et « business-as-usual », ce dernier, baptisé *Niv2010*, est calqué sur une photographie du territoire en 2010. Au total, six scénarios ont été proposés.

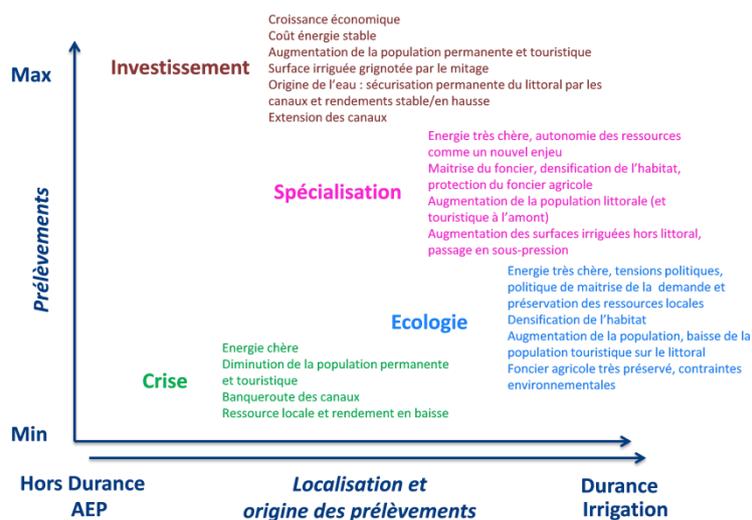


Figure 6 : Principales caractéristiques des quatre scénarios prospectifs pour le territoire

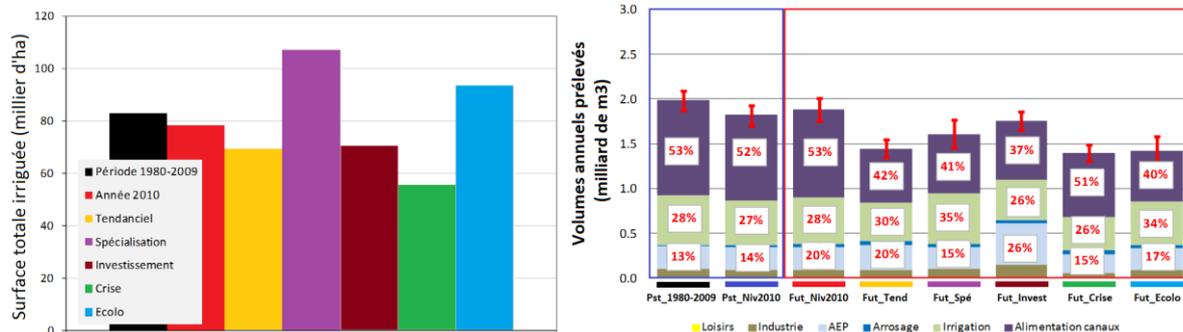


Figure 7 : Evolution de la surface totale irriguée considérée dans MODIC (à gauche) et prélèvements par usage avec MODIC_CF, modalité Cycle Fixe de MODIC (à droite) selon les six scénarios socio-économiques sous les climats temps présent (Pst) et 2050 (Fut) issus de la sélection des dix projections climatiques régionalisées, à l'échelle du système Durance-Verdon. Les segments en rouge représentent la dispersion des résultats induite par les dix climats modélisés.

L'interprétation chiffrée des scénarios socio-économiques conduit à deux futurs avec des surfaces irriguées en augmentation et deux en diminution (Figure 7, gauche). Le scénario *Tendanciel* propose une réduction en cohérence avec les évolutions récentes observées sur le territoire. Ces futurs se traduisent, à l'échelle du territoire, par des demandes en eau contrastées (total des prélèvements hors alimentation des canaux), avec une hausse sensible pour le scénario *Investissement* et une baisse prononcée pour le scénario *Crise*, et par des prélèvements réduits par rapport à la période 1980-2009 (Figure 7, droite). La demande en eau potable est très dépendante de la démographie et de l'exploitation ou non des ressources locales et conduit dans certains scénarios à des transferts accrus. La combinaison des hypothèses conduit à des baisses sensibles allant de 19% pour le scénario *Spécialisation* (amélioration des rendements des canaux) à 30% pour le scénario *Crise* (agriculture irriguée et AEP en berne). L'examen de la dispersion des résultats semble indiquer que les évolutions des prélèvements sont plus sensibles aux facteurs socio-économiques qu'au facteur climat.

La Figure 8 illustre les sorties de MORGLite obtenues sur la base d'une gestion inchangée. Sont représentées les valeurs moyennes de consommation des tranches d'eau réservées sur la Durance à Serre-Ponçon, ainsi que le nombre et l'intensité des consommations annuelles dépassant la valeur contractuelle de 200 Mm³. Sur la Durance, un territoire avec des pratiques maintenues au niveau 2010, verrait fortement augmenter la consommation moyenne (+100 %) avec de nombreux dépassements annuels de 200 Mm³. En revanche, sur les cinq autres devenirs envisagés, grâce notamment au maintien ou à l'amélioration des rendements des canaux d'irrigation, le recours à la tranche d'eau serait soit stable, soit légèrement à la baisse, du fait d'une réduction de la sollicitation par rapport à la situation en temps présent. Le constat est différent sur le Verdon. Les devenirs du territoire conduiraient à une hausse de la consommation moyenne conséquence d'une demande accrue en AEP et trois d'entre eux pourraient occasionner des dépassements fréquents de la valeur 85 Mm³, équivalent de la tranche d'eau mobilisable de Castillon, sans pour autant dépasser le cumul des tranches d'eau des deux retenues Sainte-Croix et de Castillon (225 Mm³).

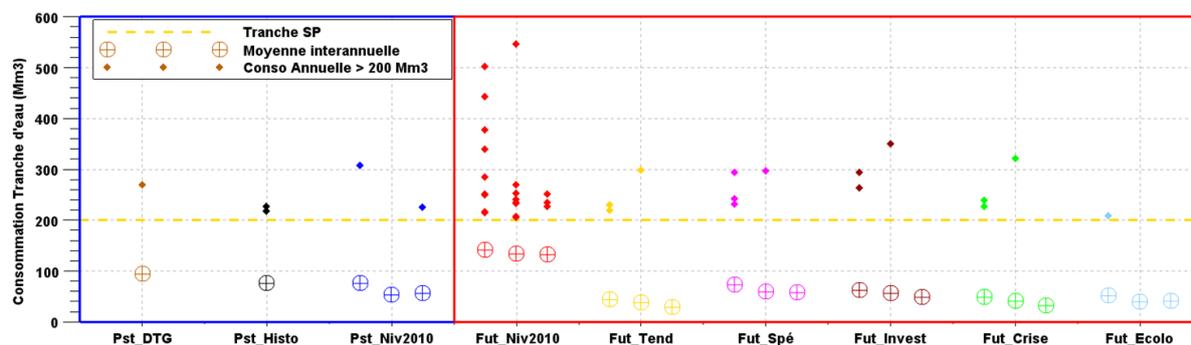


Figure 8 : Consommations annuelles moyennes et supérieures au seuil 200 Mm³ (tranche SP) sur la ressource disponible à Serre-Ponçon (SP), estimée par les outils opérationnels (DTG) et reconstituée par les outils de R²D² 2050 (Histo) et simulée en temps présent (Pst) et à l'horizon 2050 (Fut) selon les six scénarios socio-économiques et les trois projections climatiques régionalisées

Incertitudes sur le diagnostic à l'horizon 2050

La richesse des approches et disciplines abordées dans le projet a permis d'engager une réflexion sur les incertitudes sur le devenir de la gestion de l'eau du système Durance. De nombreuses sources d'incertitude sur les données et les modèles ont été identifiées. Pour certaines, nous n'avons cependant pas pu les quantifier. C'est le cas des incertitudes relatives aux données de base : forçages météorologiques, débits observés ou naturalisés et prélèvements, du fait de connaissances partielles ou de contextes météorologiques difficiles. Les écarts entre forçages issus des ré-analyses climatiques SPAZM et SAFRAN montrent la difficulté d'apprécier le climat en zone de relief (Magand, 2014).

L'examen des simulations des besoins en eau des plantes en temps présent sur neuf cultures montre une grande variabilité des estimations entre les différents modèles testés (Braud *et al.*, 2014). Ces différences s'estompent – artificiellement - dès lors que les anomalies entre présent et futur sont exploitées pour caractériser l'impact du changement climatique. La prise en compte ou non de l'évolution de la phénologie des cultures induite par le changement climatique est également une source d'incertitude partiellement examinée dans le projet. L'inclusion de la phénologie dans MODIC_DJ (Tableau 2) conduit en temps présent à des besoins en eau équivalents à l'échelle du territoire par rapport à MODIC_CF. A l'horizon 2050, MODIC_DJ envisage une diminution de ces besoins sur la période fin août – début septembre. Un arrêt anticipé des sollicitations des réserves hydrauliques est donc perceptible pour le cycle variable de 2 à 4 semaines par rapport au « cycle fixe » en 2050. Ces différences apparaissent sur une période où la gestion des réservoirs est moins contraignante du fait de la fin de la saison touristique et la prise en compte ou non de l'évolution de la phénologie des cultures s'est avérée peu impactante sur les usages énergétiques et touristiques des réservoirs

Les débits naturels futurs ont fait l'objet d'un examen détaillé des incertitudes associées grâce à l'approche multi-modèles. Il est apparu que la majeure partie des incertitudes sur les débits moyens annuels provient de la modélisation climatique globale, qui intervient via la quantité de précipitations projetée (Magand, 2014). Cette dernière est fortement incertaine du fait de la forte variabilité interne des modèles climatiques en écho à la variabilité naturelle chaotique du climat (Hingray et Saïd, 2014). Pour des variables plus intimement liées aux processus de surface, comme l'évapotranspiration ou les débits d'étiages estivaux, la part d'incertitude liée à la modélisation hydrologique s'avère loin d'être négligeable et augmente avec l'échéance des projections. Ceci souligne la divergence des processus hydrologiques implémentés dans les modèles sous un climat de plus en plus chaud. Au-delà de l'analyse de l'incertitude structurelle des modèles hydrologiques, les modalités de calage des paramètres peuvent influencer la réponse des modèles. Magand *et al.* (2014a) suggèrent cependant que les choix de calage sont de second ordre sur l'évolution des débits annuels moyens face à l'incertitude provenant des forçages.

Conclusions - Perspectives

Le projet R²D² 2050 a contribué à améliorer la connaissance du fonctionnement du bassin versant de la Durance et des territoires connectés via les transferts d'eau, par le recueil réalisé de données d'origines physique, biologique et socio-économique. Cette base de connaissance a permis la mise en place et le développement d'outils dédiés à la modélisation de la gestion de l'eau et des interactions entre ressources en eau locales et volumes stockés en amont dans les grandes réserves. Une réelle difficulté est apparue lors de l'interprétation des données relatives aux usages. Des scénarios pour le futur ont été construits, non sans difficulté, avec les acteurs, réinterprétés dans les modèles et finalement combinés avec les évolutions climatiques pour fournir une vision quantifiée des besoins en eau du territoire en 2050.

Les modifications du climat engendrent une baisse notable de la ressource naturelle à l'horizon 2050. Les évolutions du territoire induisent des demandes en eau très contrastées.

A territoire inchangé, la sollicitation de la réserve de Serre-Ponçon devrait augmenter du fait de la baisse de la ressource locale. La tranche d'eau réservée serait plus fréquemment insuffisante. Les cinq devenirs envisagés du territoire incluant la poursuite de programmes d'économies d'eau proposent une vision opposée avec une baisse de la sollicitation qui permet de contenir plus aisément l'utilisation de la réserve agricole. La vision sur le système Verdon est différente : à usage maintenu au niveau 2010, les sollicitations aval des ouvrages sont légèrement sensibles au climat affichant une faible augmentation. Seuls trois scénarios du territoire (*Spécialisation, Investissement, Tendancier*) conduisent à une augmentation de la sollicitation des réservoirs du Verdon pouvant dépasser la tranche de Sainte-Croix mais sans jamais épuiser l'ensemble des réserves allouées.

La production d'énergie est directement impactée par la baisse de la ressource naturelle. La baisse probable des apports de fonte conduit à contraindre davantage la remontée de cote avant l'été avec un objectif de remplissage lié aux cotes touristiques inchangé. La réserve énergétique saisonnière est dans ces conditions fortement réduite, quels que soient les devenir des territoires, notamment sur le Verdon.

Si l'usage touristique de Serre-Ponçon semble pouvoir être sensiblement préservé sous réserve d'une évolution du territoire fondée sur une économie d'eau substantielle, celui de Sainte-Croix et Castillon semble plus délicat à garantir dans la configuration actuelle.

Sur la base des hypothèses retenues dans le projet R²D² 2050, l'effet du changement global sur la Durance semble pouvoir être contenu sur les secteurs sécurisés par le système Durance-Verdon sous réserve que l'avenir du territoire se développe à l'intérieur du faisceau des scénarios choisis ici. Des sensibilités différentes sur la sollicitation des réserves de la Durance et du Verdon ont pu s'exprimer. Elles nécessiteront de repenser l'équilibre entre les usages et de faire évoluer les règles de gestion de la ressource en eau... Sur les territoires dépendants de la seule ressource locale (non sécurisés), la situation pourrait être critique avec des sécheresses plus fréquentes et des arrêtés de limitation des usages qui pourraient fort bien réduire la capacité à prélever. Dans tous les cas, il sera nécessaire de mettre en œuvre des mesures d'adaptation.

Les perspectives sont forcément nombreuses. Du point de vue méthodologique, les modèles, globalement satisfaisants sont tous améliorables... sous réserve de l'existence d'observations adaptées. Le projet R²D² 2050 a été l'occasion d'améliorer la représentation des processus de constitution et de fonte de la neige dans les modèles hydrologiques mais son implémentation requiert des mesures du manteau neigeux.

Seules trois projections hydro-climatiques ont présenté des qualités suffisantes pour être exploitées par le modèle de gestion des réserves, du fait de biais présents dans les simulations de débit en temps présent. La représentation fine de l'anthroposystème a en effet fait émerger un niveau d'exigence plus élevé sur la performance des modèles hydrologiques.

Tout le potentiel des outils développés aurait mérité d'être exploité plus en avant. Ainsi, la question d'un nouveau mode de gestion n'a pu être abordée. L'adaptation sur le territoire est présente implicitement au travers de la poursuite de mesures d'économie d'eau introduites dans les scénarios. D'autres stratégies restent à construire avec les acteurs.

3. Gestion et animation du projet

Le projet a été mis en œuvre par sept partenaires d'univers différents (des hydrologues et des sciences sociales ; des chercheurs et des opérationnels) sous la coordination d'Eric SAUQUET, chercheur hydrologue du centre de Lyon-Villeurbanne d'Irstea :

Partenaire	Personne	Domaine d'intervention
Irstea, centre de Lyon-Villeurbanne	Flora BRANGER Isabelle BRAUD Thomas CIPRIANI Thibault DATRY Guillaume LE GOFF Eric SAUQUET François TILMANT Jean-Philippe VIDAL	Hydrologie Hydrologie/Usages Hydrologie Biologie Biologie Hydrologie/Coordination de projet/Coordination Irstea Hydrologie Climatologie
EDF – R&D, LNHE, Chatou	Marie BOURQUI Frédéric HENDRICKX Céline MONTEIL Pascal POULHE René SAMIE Laure SANTONI	Hydrologie Hydrologie/Usages/Coordination LNHE Hydrologie Prospective/Coordination LNHE Economie/Usages/Prospective Economie/Gestion/Prospective
EDF – DTG, Grenoble	Anna KUENTZ Matthieu LE LAY Thibault MATHEVET Christian PERRET	Hydrologie/Climatologie Hydrologie/Coordination DTG Hydrologie/Coordination DTG Hydrologie
UMR METIS, UPMC, Paris	Agnès DUCHARNE Claire MAGAND Ludovic OUDIN Nicolas LE MOINE Maxime TURKO Katerina STAMATI Hajer BEN TAHAR	Hydrologie/Coordination UPMC Hydrologie/Climatologie Hydrologie Hydrologie Hydrologie Hydrologie Hydrologie
Irstea, centre d'Antony	Vazken ANDREASSIAN Pierre-Yves BOURGIN Mathilde CHAUVEAU Charles PERRIN Guillaume THIREL	Hydrologie Hydrologie Hydrologie Hydrologie Hydrologie
LTHE, Grenoble	Samuel DEBIONNE Benoit HINGRAY Abdelkader MEZGHANI	Informatique Hydrologie/Climatologie/Coordination LTHE Climatologie
Société du Canal de Provence SCP, Le Tholonet	Eugénie BLANC-COUTAGNE Jean-François BRUN Johan CHEREL Céline GEOFFROY Isabelle LE GOFF Florence MALERBE	Agronomie/Usages/Prospective Prospective/Usages/Coordination SCP Agronomie/Usages/ Usages Agronomie/Usages/ Agronomie/Usages/
ACTeon, Grenoble & Colmar	Brice AMAND Yannick ARAMA Hélène BOUSCASSE Ylang CHEVALERAUD Camille CHANARD Florence KROWICKI Alexandra ROSSI Pierre STROSSER	Prospective/SIG Economie/usages/prospective/Coordination ACTeon Economie/usages/prospective Economie/usages/prospective Economie/usages/prospective Economie/usages/prospective Economie/usages/prospective Economie/usages/prospective Economie/usages/prospective/Coordination ACTeon

La subvention octroyée pour le projet est de 421 920.68 € TTC, pour un montant global de 1 410 519 € TTC. Le projet a également bénéficié du soutien de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse qui a financé la thèse de Claire MAGAND (UPMC). Le projet s'est déroulé sur une durée de trois ans à partir de décembre 2010, avec six mois d'extension.

L'ancrage territorial est une particularité revendiquée par le projet.

Nous avons cherché, au travers de réunions et d'entretiens avec les acteurs du territoire, à articuler nos travaux avec des actions en cours - notamment le SOURSE (Schéma d'Orientations pour une Utilisation Raisonnée et Solidaire de la ressource en Eau) engagée en 2009 et pilotée par la Région Provence Alpes-Côte d'Azur (SOGREAH *et al.*, 2010). Ainsi, des représentants du Service « Eau et Milieux Aquatiques » du Conseil Régional PACA et de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse ont été conviés régulièrement aux réunions plénières organisées pour le suivi interne du projet.

L'Unité Production Hydraulique Méditerranée (UP Med EDF) a contribué à différents volets du projet. Outre son apport dans la modélisation de la gestion des ouvrages, l'UP Med a facilité les interactions avec les acteurs du territoire. Ainsi, elle a été à l'initiative de la première rencontre le 27 juin 2011 à Sainte-Tulle qui devait annoncer les objectifs généraux du projet. Vingt-deux acteurs - dont le Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance (SMAVD), des fédérations de pêche, le Conseil Régional PACA, la Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DRAAF), la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), les Conseils Généraux, la Société des Eaux de Marseille - ont bien voulu y participer sur les 50 identifiés.

Des entretiens complémentaires avec Mme Cécile HELLE, anciennement vice-présidente déléguée à l'Aménagement des Territoires, aux Politiques Territoriales et Contractuelles du Conseil Régional PACA, et avec M. Christian DODDOLI, directeur technique du SMAVD, ont également eu lieu en début de projet.

Les acteurs ont été mobilisés pour co-construire une vision prospective du devenir du territoire et des usages. A cette fin, des Groupes Techniques Locaux (GTLs) associant des acteurs clés des secteurs connectés au bassin Durance-Verdon, ont été organisés les 15, 16 et 17 octobre 2012 à Marseille, Avignon et Oraison. Les connaissances mobilisées lors de ces réunions ont permis de construire quatre scénarios prospectifs territoriaux. Un dernier atelier s'est tenu le 27 mars 2014 au Tholonet, siège de la Société du Canal de Provence ; il avait pour but de présenter l'exploitation des éléments recueillis lors des ateliers de 2012, de mettre en débat les résultats préliminaires sur la demande en eau. A l'issue de chacune de ces rencontres, un compte rendu a été élaboré et transmis aux participants. Au final, les ateliers de 2012 auront réuni près de 80 personnes, celui de 2014 près de 40 personnes.

3. Valorisation

Site Web

Le principal support de communication grand public est le site internet <http://r2d2-2050.cemagref.fr/> qui contient les productions stabilisées du projet.

Articles

Articles publiés dans des revues de rang A

Hendrickx F., Sauquet E., 2013. Impact of warming climate on water management for the Ariège river basin (France). *Hydrological Sciences Journal*, doi: 10.1080/02626667.2013.788790.

Magand C., Ducharne A., Le Moine N., Gascoin S., 2014b. Introducing hysteresis in snow depletion curves to improve the water budget of a land surface model in an alpine catchment. *Journal of Hydrometeorology*, 15, 631–649, doi:10.1175/JHM-D-13-091.1.

Hingray B., Saïd M., 2014. Partitioning internal variability and model uncertainty components in a multimodel multireplicate ensemble of climate projections. *Journal of Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00629.1

Magand C., Ducharne A., Le Moine N., Brigode P., 2014a. Sensitivity to the calibration period and transferability of the Catchment Land Surface Model parameters under changing climate: a case study in the Durance watershed, France. *Hydrological Sciences Journal*, *accepté*.

Articles soumis dans des revues scientifiques à comité de lecture

Braud I., Samie R., Cherel J., Tilmant F., Vidal J.-P., Blanc-Coutagne E., Le Goff I., Carrer D., Calvet J.-C., Moulin S., 2014. Quantifying climate change impact on irrigation requirements in south-east France: intercomparison of four models on nine typical crops. *Agricultural Water Management*, *soumis*.

Articles à soumettre dans des revues scientifiques à comité de lecture

Hingray *et al.*, 2015. Partitioning internal variability and model uncertainty in a multimodel ensemble of climate projections: influence of model replicate number. *Geophysical Research Letters*, *in prep*.

Magand C., Tilmant F., Ducharne A., Chauveau M., Vidal J.-P., Le Moine N., Mathevet T., Sauquet E., Perrin C., Oudin L., 2014. Construction par hybridation d'analyses atmosphériques adaptées aux zones de montagne : exemple de l'archive météorologique DuO dans le bassin de la Durance. *La Houille Blanche*, *in prep*.

Perrin *et al.*, 2015. Are similar hydrological simulations produced by models with similar internal behavior? Comparative evaluation on the Durance River basin under contrasted conditions. *X*, *in prep*.

Vidal *et al.*, 2015. Selecting downscaled climate projections for impact and adaptation studies. *Climatic Change*, *in prep*.

Rapports

ACTeon, IRSTEA, EDF, SCP, 2014. Compte rendu de l'atelier de restitution des résultats intermédiaires. Projet R²D² 2050, avril 2014, 57 pp.

Arama, Y., Sauquet, E., 2014. Gestion de l'eau en 2050, synthèse opérationnelle pour le bassin versant du Buëch, et les domaines Verdon et Durance. Rapport, ACTeon-Irstea, novembre 2014, 30 pp.

Ben Tahar H., 2013. Optimisation d'un modèle hydrologique en utilisant les transformées par ondelettes. Rapport de stage, M2 Hydrologie-Hydrogéologie, UPMC, 32 p.

Braud, I., Tilmant, F., Vidal, J.-P., Samie, R., Chérel, J., 2014. Modélisation des besoins en eau des cultures et intercomparaison des modèles. Contribution au W.P. 2.3 du projet R²D² 2050, Rapport de recherche, 109 p.

Cipriani T., Sauquet E., Detry T., 2014. Modélisation de l'intermittence des écoulements des bassins versants de l'Asse et de l'Albarine sous différents scénarios climatiques. Contribution au W.P. 4.3 du projet R²D² 2050, Rapport de recherche, 70 p.

Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale, 2014. Simulations des chroniques de consommations en eau d'irrigation sur les périmètres desservis par la SCP, Analyse des besoins en eau d'irrigation actuels et futurs. Contribution au W.P. 2.3 du projet R²D² 2050, Rapport de recherche, 90 p.

Cros K., 2012, La gouvernance de l'eau de la Durance : Quel avenir pour répondre aux enjeux de demain ? Rapport de stage, Mastère spécialisé « Gestion de l'Eau », AgroparisTech, 75 pages.

Hendrickx, F., 2014. Intégration Ressource / Usage / Gestion - Module de gestion MORGLite. Note de travail du projet R²D² 2050, EDF-LNHE, 41 pp.

Stamati K., 2013. What can we say about hydrological modelling uncertainties from the comparison of two models in the Durance watershed? Rapport de stage, Master 2 Water, Air, Pollution and Energy at local and regional scales, Ecole Polytechnique, 45 p.

Tilmant F., 2011. Modélisation des besoins en eau des plantes dans la vallée de la Durance. Rapport de stage, M2R Hydrologie, Hydrochimie, Sol, Environnement (H2SE), Université Paul Sabatier, Toulouse, 65 p.

Tilmant F., 2012. Extraction des données de la réanalyse SAFRAN de Météo-France, mise en place d'un décalage des séries de données, création de fichiers climatiques et calcul d'une évapotranspiration de référence au pas de temps horaire spatialisée pour la modélisation hydrologique. Contribution au W.P. 2.3 du projet R²D² 2050, Rapport de recherche, 60 p.

Tilmant F., Braud I., 2012. Analyse de la base de données sol Référentiel Régional Pédologique PACA. Les différentes étapes réalisées. Contribution au W.P. 2.3 du projet R²D² 2050, Rapport de recherche, 6 p.

Turko M., 2012. Calibration et évaluation du modèle CLSM dans le bassin versant de la Durance. Rapport de stage, Licence Sciences de la Terre, UPMC, 28 p.

UMR 6266 CNRS IDEES (Université de Rouen), UMR 8504 CNRS GEOGRAPHIE-CITES (Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne), EDF (Recherche & Développement Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement), 2014. Simulation prospective des dynamiques d'occupation des sols à l'horizon 2050 dans le triangle Aix-en-Provence – Manosque et Cavailhon, Rapport de recherche, 150 p.

Articles de vulgarisation

Ducharne A., 2013. Climat et changement climatique. In : *Tout ce que vous voulez savoir sur l'eau du robinet* (A. Euzen, Y. Levy, eds.), CNRS Editions.

Magand C., 2014. Impact du réchauffement climatique sur les ressources en eau. Le cas de la Durance. *Découverte*, 390, 16-23.

Participations aux colloques nationaux ou internationaux

Communications orales

Bouscasse H., 2013. Renforcer l'interface entre chercheurs et acteurs de l'eau: mais que nous offrent les exercices de perspectives territoriales ? In : *Entretien Jacques Cartier, Colloque 8 : Gestion des risques face aux changements climatiques*, 25-26 novembre 2013, Lyon, France.

Braud I., Samie R., Chérel J., Tilmant F., Vidal J.-P., 2013. Evaluation of theoretical crop irrigation requirements in a climate change context. Application to the Durance catchment, France. In : *HyMeX Workshop*, 7-10 octobre 2013, Cassis, France.

Braud, I., Tilmant, F., Samie, R., Le Goff, I., 2013. Assessment of the SiSPAT SVAT model for irrigation estimation in south-east France. In : *International Conference on Monitoring and Modeling Soil-Plant-Atmosphere Processes*, 19-20 juin 2013, Naples, Italie, Procedia Environmental Sciences, 19, 747-756. doi: 10.1016/j.proenv.2013.06.083.

Chanzy A., Vidal J.-P., 2013. Les projections climatiques concernant la région, les territoires. In : *Secondes rencontres RED, Changement climatique : Quels impacts en zone méditerranéenne ? Quelles adaptations pour l'agriculture régionale ?*, 4 décembre 2013, Avignon, France.

Cipriani T., Tilmant F., Branger F., Sauquet E., Detry T., 2014. Impact of climate change on aquatic ecosystems along the Asse River Network. In : *FRIEND-Water 2014, Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions*, February 2014, Hanoi, Vietnam (IAHS Publ. 36X, 2014), 463-468.

Kuentz A., Mathevet T., Cœur D., Perret C., Gailhard J., Guérin L., Gash Y., Andréassian V., 2013. Hydrométrie et hydrologie historiques du bassin de la Durance. In : *Hydrométrie 2013, congrès SHF*, 15-16 mai 2013, Paris, France, numéro HM-033.

Kuentz A., Mathevet T., Gailhard J., Garçon R., Perret C., Andréassian V., 2012. Homogénéisation et reconstitution de longues séries hydro-climatologiques sur le bassin de la Durance. In : *25ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 5-8 septembre 2012, Grenoble, France.

Kuentz A., Mathevet T., Gailhard J., Perret C., Andréassian V., 2013. More than 100 years of climatic and hydrologic variability of a Mediterranean and mountainous watershed: the Durance River. In : *IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Cold and Mountain Region Hydrological Systems Under Climate Change: Towards Improved Projections*, 22-26 July 2013, Gothenburg, Sweden, IAHS Publ. Red Books 360, 2013.

Kuentz A., Mathevet T., Perret C., Andréassian V., 2011. Uncertainty estimation of historical streamflow records of mountainous watersheds. In : *EGU General Assembly 2011, HS2.12 "Mountain hydrology: Observations, processes and models"*, 03-08 avril 2011, Vienne, Autriche, Geophysical Research Abstracts, 13, EGU2011-8592-1,

Magand C., Ducharne A., Le Moine N., 2013. Sensitivity of a physically-based LSM to the calibration period in the Upper Durance catchment. In : *Joint IAHS-IAPSO-IASPEI Knowledge for the future*, 22-26 July 2013, Gothenburg, Sweden, IAHS Publ. Red Books 360, 2013.

Magand C., Ducharne A., Le Moine N., Gascoïn S., Turko M., 2012. Adaptation of a catchment land-surface model toward a more realistic representation of snow processes in an alpine catchment. In : *AGU Fall Meeting*, 3-7 décembre 2012, San Francisco, USA, abstract C31D-08.

Magand C., Ducharne A., Le Moine N., Gascoïn S., Turko M., 2013. Adaptation du modèle de surface CLSM vers une approche plus réaliste des processus nivaux dans le bassin de la Durance. In : *Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère*, Toulouse, France, 21-24 janvier 2013.

Rosset V., Ruhi A., Detry T., 2014. Parallels and Contrasts In Biotic Responses To Drying Between Lotic And Lentic Temporary Freshwater Systems. In : *Joint Aquatic sciences meeting, Bridging Genes to Ecosystems: Aquatic Science at a Time of Rapid Change*, 18-23 mai 2014, Portland, Oregon, USA.

Samie R., Arama Y., Bouscasse H., Sauquet E., Hendrickx F., 2014. La prospective, un outil de réflexion stratégique sur la gestion future de la ressource en eau à l'échelle d'un territoire : l'exemple du bassin de la Durance (France). In : *FRIEND-Water 2014, Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions*, February 2014, Hanoi, Vietnam (IAHS Publ. 36X, 2014), 221-227.

Sauquet E., 2012. Stratégie d'adaptation au changement global et au changement climatique et gestion de la ressource en eau d'un bassin versant pour la réduction des risques. In : *Forum de l'Allenvi*, 27-28 mars 2012, Saint Mandé, France. <http://www.allenvi.fr/?p=2336>

Sauquet E., 2012. The R²D² 2050 project: Risk, water Resources and sustainable Development within the Durance river basin in 2050. In: *Side Event du Forum Mondial de l'Eau*, 15 mars 2012, Marseille, France. <http://www.youtube.com/watch?v=FQdzaWwSLO8&feature=plcp>

Sauquet E., 2013. Changement climatique et gestion de l'eau dans le bassin de la Durance. In : *Colloque sur la qualité de l'air, le développement durable et le changement climatique (ADDC)*, 4-5 avril 2013, Les Orres, France.

Sauquet E., 2014. R²D² 2050 : Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050. In : *Journée partenariale « Agir maintenant pour s'adapter au changement climatique »*, 4 février 2014, Marseille, France.

Vidal J.-P., Hingray B., 2013. Sub-sampling ensembles of downscaled climate projections. In : *12th International Meeting on Statistical Climatology*, Program & abstract, 24 juin 2013, Jeju, Corée du Sud, 126-127.

Vidal J.-P., Sauquet E., Magand C., Ducharme A., Hingray B., 2014. Hierarchy of climate and hydrological uncertainties in low flow projections. In : *6th Leonardo Conference 2014: HYPER Droughts*, 13-14 November 2014, Prague, Czech Republic.

Posters

Arama Y., Sauquet E., 2014. Impacts du changement climatique sur le système Durance en 2050 - Prospective participative et modélisée. In : *Etats généraux –L'Eau en Montagne*, 8-10 octobre 2014, Megève, France.

Cipriani T., Sauquet E., Datry T., 2013. Impact of climate change on aquatic ecosystems along the Asse river network. In : *HydroEco 2013 - 4th International Multidisciplinary Conference on Hydrology and Ecology*, 13-16 mai 2013, Rennes, France.

Kuentz A., Mathevet T., Perret C., Andréassian V., 2012. Uncertainty estimation and reconstruction of historical streamflow records. In : *EGU General Assembly 2012, HS2.13 "Hydrological change: Regional hydrological behaviour under transient climate and land use conditions"*, 22-27 avril 2012, Vienne, Autriche, Geophysical Research Abstracts, 14, EGU2012-5632-1.

Sauquet E., 2011. The R²D² 2050 project: Risk, water Resources and sustainable Development within the Durance river basin in 2050. In : *HyMeX Workshop*, 17-19 mai 2011, Punta Prima, Sant Luis, Minorque, Espagne.

Sauquet E., Chauveau M., Vidal J.-P., Perrin C., 2012. R²D² 2050: Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050. In : *Colloque du Comité National Français pour le Changement Global « Les changements globaux : enjeux et défis »*, 9-11 juillet 2012, Toulouse, France.

Vidal J.-P., Hingray B., 2014. A framework for identifying tailored subsets of climate projections for impact and adaptation studies. In : *EGU General Assembly 2014, CL6.5 "Climate Services - Underpinning Science"*, 27 avril – 02 mai 2014, Vienne, Autriche, Geophysical Research Abstracts, 16, EGU2014-7851.

Vidal J.-P., Tilmant F., Hingray B., 2013. Uncertainties in changes in potential evaporation: the formulation issue. In : *EGU General Assembly 2013, HS2.6 "Hydrological change: Regional hydrological behaviour under transient climate and land use conditions"*, 07-12 avril 2013, Vienne, Autriche, Geophysical Research Abstracts, 15, EGU2013-11231.

Thèses

Kuentz A., 2013. Un siècle de variabilité hydro-climatique sur le bassin de la Durance. Recherches historiques et reconstitutions, thèse de doctorat, AgroParisTech, spécialité Hydrologie, 373 p.

Magand C., 2014. Influence de la représentation des processus nivaux sur l'hydrologie de la Durance et sa réponse au changement climatique, thèse de doctorat, spécialité Hydrologie, Université Pierre et Marie Curie, 343 p.

Santoni L., 2014. Dynamique territoriale de la gestion quantitative de l'eau en Durance : vers une nouvelle répartition de la ressource ? AgroParisTech, spécialité Sciences de l'environnement, 361 p.

Autres

Intervention d'E. Sauquet dans le film « Paroles de chercheurs 1/3 : Le partage de l'eau face au changement climatique », projeté au Salon de l'Agriculture 2014.

Participation d'E. Sauquet au film « Eau et changement climatique : paroles d'acteurs de la Durance », réalisé par Julien Bengel et France Nature Environnement PACA avec soutien de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse et par la Région Provence Alpes Côte d'Azur, <http://vimeo.com/84942838>

Intervention de J.-F. Brun et D. Roux aux 10 ans de la fédération départementale des Structures Hydrauliques des Bouches-du-Rhône.

4. Rapport scientifique

I. Le territoire d'étude

Le secteur étudié peut être scindé en deux entités.

Une première zone est définie par les contours naturels du bassin versant de la Durance (y compris celui de son affluent principal, le Verdon) situé en amont de Mallemort, drainant près de 13 000 km². Cette zone produit l'essentiel de la ressource en eau, et sera le siège des modélisations hydrologiques et de couplages avec les demandes en eau internes et externes au bassin.

La seconde zone intègre :

- des communes desservies actuellement par les principaux canaux de transfert d'eau (canal de Provence, canal de Marseille, canal mixte Carpentras, canaux alimentés par la Durance ou par le canal EDF, en amont de Bonpas en Avignon) :
 - o l'ensemble des territoires situés en dehors de la première zone et desservis par les aménagements des canaux de la Durance et du Verdon. Ces aménagements alimentent en eau potable ou en eau d'irrigation toute la partie nord-ouest du Vaucluse, les Bouches du Rhône, le littoral varois ainsi qu'une partie des Alpes de Haute-Provence (plateau de Valensole). Ainsi les eaux superficielles importées du système Durance-Verdon constituent plus de 50% des volumes d'eau annuels utilisés par le département des Bouches-du-Rhône et 40% de ceux du département du Vaucluse (DREAL, 2010) ;
 - o les nappes alluviales de la Durance et de la Crau. La nappe de la Durance représente une ressource majeure en eau potable (elle alimente environ 400 000 habitants en haute saison). En outre, les débits d'apport dus au retour de l'irrigation et de son réseau assurent la majeure partie de l'alimentation de la nappe, ainsi que celles des régions voisines (Crau notamment) et en retour la nappe assure un soutien d'étiage important à la Durance mais aussi aux cours d'eau aval ;
- des communes qui pourraient être desservies dans le futur telles que les communes situées sur le littoral vers les Alpes Maritimes et sur le Nord Lubéron).

Les territoires de cette dernière zone n'ont été modélisés que dans leur composante « demande en eau » et joueront leur fonction d'appel sur la ressource en eau disponible produite en amont de Mallemort.

En définitive, le périmètre étudié inclut près de 650 communes sur les 963 de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, dont environ 370 dans les limites du bassin hydrographique de la Durance. Il faut évidemment noter que le nombre des communes sollicitant les eaux de la Durance et du Verdon varie selon l'usage considéré.

Un domaine spatial - plus large - contenant les deux zones précitées a été défini pour les besoins de désagrégation des projections climatiques, qui s'étend du Lac Léman (N) à la Mer Méditerranée (S), de la frontière italienne (E) à la Vallée du Rhône (O).

Dans la suite du document, il faut entendre par (Figure 10) :

- **Haute Durance**, le bassin versant en amont de la retenue de Serre-Ponçon ;
- **Moyenne Durance**, la portion de bassin versant entre le barrage de Serre-Ponçon et l'aval immédiat de la confluence avec le Verdon ;
- **Basse Durance**, la portion de bassin versant entre la confluence Durance-Verdon et l'exutoire de la Durance au Rhône, le Mont Ventoux, de Vaucluse et du Luberon, le Comtat, la plaine de Crau ;
- **Croissant littoral**, les autres secteurs alimentés par le système Durance-Verdon et les fleuves côtiers des Bouches-du-Rhône et du Var (par extension, pour certaines analyses, cette zone peut inclure les fleuves côtiers jusqu'à la frontière italienne).

Sept barrages de volume de stockage supérieur à 10 Mm³ ont été construits dans le bassin de la Durance (Tableau 3). Le projet a examiné le fonctionnement et les modes de gestion des trois plus grands ouvrages : les retenues de Serre-Ponçon, de Sainte-Croix et de Castillon, qui représentent 94% du volume de stockage des sept retenues.

Nom du barrage	Date de mise en service	Cours d'eau	Surface drainée par le barrage (km ²)	Volume de stockage (Mm ³)	Volume utile (Mm ³)	Mode de gestion
Castillon	1948	Verdon	655	149	113	Annuel
Chaudane	1952	Verdon	685	16	6	Hebdomadaire
Escale	1962	Durance	6 760	15	2	Journalier
Gréoux	1967	Verdon	1 820	80	5	Journalier
Quinson	1974	Verdon	1 660	20	8	Journalier
Sainte-Croix	1974	Verdon	1 590	767	301.5	Annuel
Serre-Ponçon	1960	Durance	3 580	1 270	1 030	Annuel

Tableau 3 : Ouvrages de capacité de stockage supérieur à 10 Mm³ de la Durance et du Verdon (Sources : Agence de l'Eau et EDF)

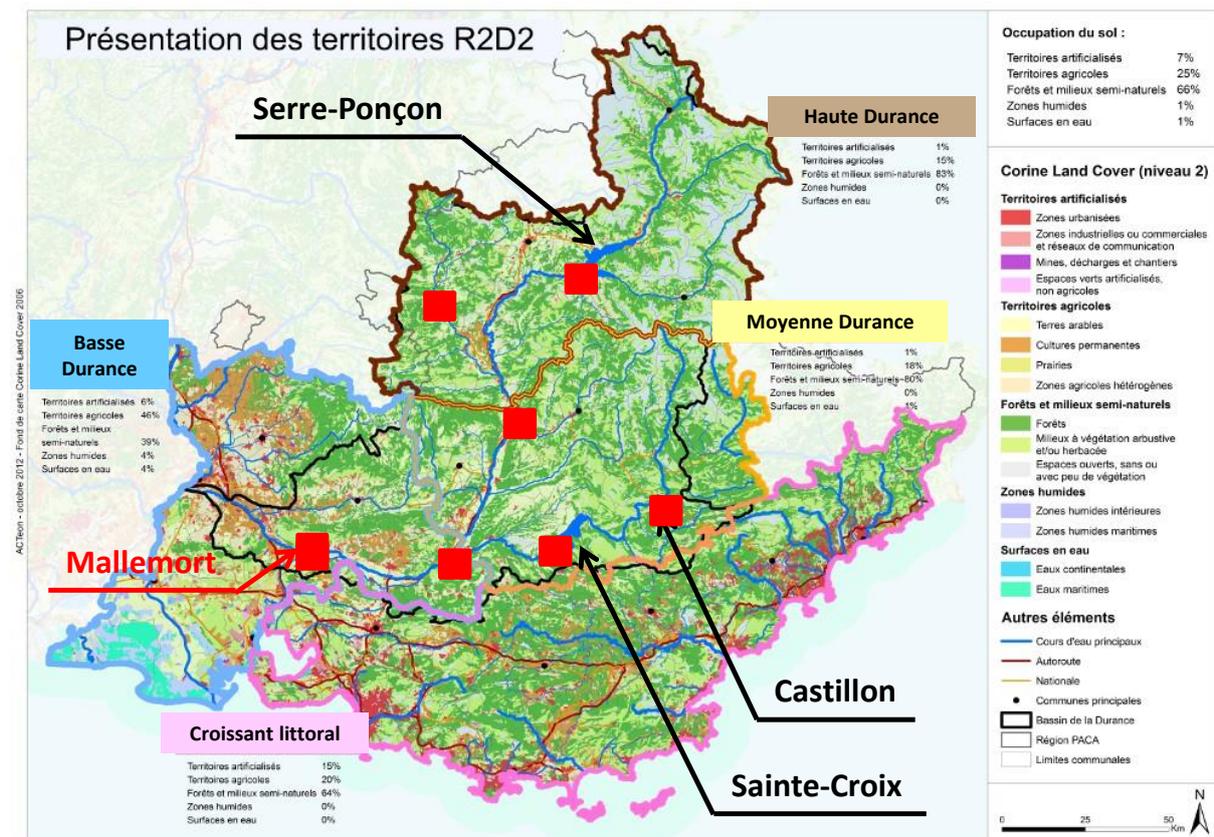


Figure 9 : Principaux ouvrages hydrauliques, occupation du sol et territoires du projet R²D² 2050 (en noir : les frontières naturelles du bassin versant de la Durance à sa confluence avec le Rhône)

II. Les bases de connaissance

1. Données physiques

La description et la représentation du fonctionnement de la Durance ont requis la collecte de données descriptives du territoire pour la modélisation hydrologique. L'information portée par ces données n'a pas forcément été exploitée par tous les modèles. Il s'agit :

- du Modèle Numérique de Terrain de la BD TOPO (<http://professionnels.ign.fr/bdtopo>) de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) de résolution 25 mètres ;
- de la BD LISA, base de données sur les Limites des Systèmes Aquifères du Bureau de Recherche Géologiques et Minières (BRGM) qui permet d'identifier les structures hydrogéologiques renseignées par le type de formation géologique, par la présence ou non d'une nappe libre ou captive, ou libre puis captive, et par un type de porosité (Seguin et Mardhel, 2012) ;
- de la base de données ECOCLIMAP à résolution de 1 km (Faroux *et al.*, 2013), qui décrit la végétation (fraction de végétation dont la « fraction active » et la « fraction verte », indice de surface foliaire, albédo, hauteur de rugosité, profondeur racinaire) et les sols (texture, valeur d'albédo, profondeur).

2. Données climatologiques

Deux ré-analyses préexistaient au démarrage du projet : SAFRAN (*Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige*) de Météo France (Quintana-Segui *et al.*, 2008 ; Vidal *et al.*, 2010) et de l'archive SPAZM (*SPAtialisation des précipitations en Zone de Montagne*) d'EDF-DTG (Gottardi *et al.*, 2012).

SAFRAN est un système d'analyse atmosphérique méso-échelle. Originellement consacré à l'étude des zones montagneuses, il a été conçu au début des années 1990 par Météo France, afin de prévenir les risques d'avalanches dans les massifs des Alpes et des Pyrénées. Le système d'analyse a ensuite été étendu à l'ensemble de la France afin de modéliser le cycle continental de l'eau à l'échelle de la France. Ce système fonctionne sur des zones géographiques considérées comme homogènes d'un point de vue météorologique, c'est-à-dire que les variables atmosphériques de cette zone ne dépendent plus que de l'altitude. Une méthode d'interpolation optimale à partir des résultats du modèle ARPEGE et d'observations est appliquée sur ces zones. Les résultats de cette analyse sont fournis au pas de temps horaire pour huit variables atmosphériques : la température à 2 m, l'humidité spécifique à 2 m, la vitesse de vent à 10 m, le rayonnement visible, le rayonnement infra-rouge, la pluie et la neige. Les précipitations calculées sont journalières, puis redistribuées au pas de temps horaire en fonction des autres paramètres météorologiques tels que l'humidité spécifique de l'air, la température et la vitesse du vent. Enfin, ces résultats d'analyse sont de nouveau interpolés sur une grille régulière en fonction de l'altitude de chaque point de cette grille, celle-ci est composée de 8585 mailles de 64 km² formant la France métropolitaine. Les données SAFRAN sont disponibles depuis le 1^{er} août 1958.

SPAZM est une réanalyse des précipitations et des températures de l'air (min. et max.), réalisée grâce à l'extrapolation d'observations sol par régressions linéaires locales appuyées par une sélection de postes d'observation. La méthode d'extrapolation des précipitations est basée sur une ébauche du champ de précipitation par type de circulations atmosphériques (moyenne interannuelle). La méthode d'extrapolation des températures considère deux saisons (été/hiver) et deux types de journées avec/sans pluie. Cette archive produit des analyses au pas de temps journalier, à une échelle de 1 km² sur la moitié sud du territoire français sur la période 01/01/1948-31/12/2010. SPAZM a été recalculée et adaptée pour les besoins du projet R²D² 2050. En effet, Gottardi (2009) a mis en évidence un biais d'estimation des précipitations en montagne, causé notamment par un biais de sous-captation des précipitations solides en montagne. Des travaux complémentaires ont montré qu'un facteur de correction global n'était pas forcément pertinent sur l'ensemble du domaine. Une nouvelle archive SPAZM a été générée avec un coefficient de sous-captation de 30% adapté aux Alpes du Sud.

Les données climatiques SPAZM existent uniquement au pas de temps journalier et, entre autres, ne sont pas adaptées aux modèles hydrologiques ou de besoin en eau des plantes fonctionnant au pas de temps horaire. Pour les besoins de la modélisation horaire, une nouvelle archive « Durance météO » DuO (Magand *et al.*, 2014b) a été créée par hybridation des deux ré-analyses. Elle cherche à tirer parti des qualités de SPAZM (résolution spatiale 1 km, meilleure estimation de la pluie en montagne) et de SAFRAN (disponibilité au pas de temps horaire, grand nombre de variables météorologiques). La méthode utilisée pour la construire vise à

conserver les températures et précipitations mensuelles moyennes de SPAZM, et le signal horaire de SAFRAN pour ces variables, afin d'obtenir des forçages météorologiques au pas de temps horaire et à la résolution 1 km. D'autres traitements décrits par Magand (2014) ont eu pour objectif de désagréger également d'autres variables météorologiques utiles pour les modèles hydrologiques les plus complexes (pression, humidité spécifique et rayonnement infra-rouge) dont la valeur dépend de leur résolution spatio-temporelle et qui sont liées également à la température de l'air.

L'évapotranspiration de référence ET_0 a été calculée sur l'ensemble du territoire selon deux formules : celle de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) au pas de temps horaire afin de s'approcher au mieux du référentiel agronomique (Tilmant, 2012) et celle de Oudin au pas de temps journalier – version avec des paramètres d'ajustement K_1 et K_2 fixés respectivement à 100°C et 5°C de l'équation (2) de Oudin *et al.* (2005) – pour quantifier les incertitudes liées à l'estimation de la variable ET_0 .

Des données de hauteur de neige mesurées à l'aide de perches à neige issues du réseau sol de Météo France ainsi que des images satellitaires MODIS hebdomadaires (<http://modis.gsfc.nasa.gov>) renseignant l'extension du manteau neigeux ont été exploitées principalement par Magand (2014).

3. Données hydrologiques

Le projet a nécessité la collecte :

- de séries de débits représentatifs du comportement naturel attendu des cours d'eau, utiles pour l'estimation de la ressource en eau disponible et références dans le processus de validation des modélisations hydrologiques,
- et,
- de séries de débits influencés qui, croisés avec les données précédentes, permettront de mesurer la pression actuelle sur la ressource en eau et de valider les modèles représentant les usages et la gestion des réserves hydrauliques.

Les sources renseignant l'hydrologie exploitées sont la base de données nationale d'hydrométrie HYDRO (<http://hydro.eaufrance.fr>) et celle propriété d'EDF. En complément, des recherches historiques sur l'hydrométrie du bassin versant de la Durance ont été menées avec l'appui de la société Acthys-Diffusion (2011-2012). Ces travaux ont permis de retrouver l'existence d'un nombre assez conséquent de points de mesure sur la Durance. En effet, les premières observations débutent avant 1850, notamment sur la Durance au pont de Mirabeau. A partir de 1872, une dizaine d'échelles limnimétriques et des essais de jaugeages sont mis en place. A partir de 1904, une trentaine de bassins est équipée afin d'explorer le potentiel hydraulique de la région. Au moins dix stations possédant une série quasi-continue au cours du XX^e siècle ont été identifiées et exploitées dans les travaux de thèse de Kuentz (2013).

Un ensemble de vingt-cinq stations satisfaisant des exigences en termes de longueur de chronique et de qualité des mesures a été finalement conservé. Les séries de débits sont de deux natures différentes :

- des observations en rivière, issues de la mesure continue de hauteurs, puis transformées en débit à l'aide de courbes de tarage ;
- des reconstitutions issues de bilans aménagements : les Apports Naturels Reconstitués (ANR), calculés par EDF-DTG au pas de temps journalier ou mensuel. Ces reconstitutions fournissent les estimations des débits qui auraient coulé au droit de l'aménagement, si ce dernier n'avait pas été construit. Ils s'appuient sur le bilan d'un aménagement, c'est-à-dire la différence entre les débits entrant et sortant (turbinés, déversés, réservés ou évaporés) et la variation de volume stocké dans le barrage et sur des débits en provenance d'un témoin naturel voisin. Les ANR ne corrigent pas des usages amont, autres que ceux liés à la gestion des ouvrages hydroélectriques sous la responsabilité d'EDF.

Les ANR disponibles en début de projet concernaient les stations de la Durance à Serre-Ponçon, l'Escale et Cadarache, et du Verdon à Castillon et Sainte-Croix. Ce mode de reconstitution fournit une bonne estimation des débits naturels reconstitués dans les secteurs où les autres influences amont sont négligeables : c'est le cas de la Durance à Serre-Ponçon et du Verdon à Castillon et – dans une moindre mesure – à Sainte-Croix. En revanche, les ANR de la Durance à l'Escale, Cadarache et Mallemort représentent de manière très imparfaite les écoulements naturels, du fait de l'importance des usages autres que l'usage hydro-électrique.

Un travail de reconstitution des débits naturels le long de la Durance a été engagé au niveau de l'Escale, de Cadarache et de Mallemort. Il s'est appuyé sur les ANR en amont de ces trois points. Cependant, cette opération n'a pu être réalisée sans le recours à la modélisation des prélèvements (page 72-87). Finalement des séries de débits naturels reconstitués journaliers exploitables ont été proposées à l'Escale et à Cadarache. En revanche, l'exercice n'a pas été jugé fiable par les experts d'EDF-DTG pour la Durance à Mallemort (absence de données hydrométriques, fortes incertitudes sur les usages). Il n'y a donc pas eu de série de contrôle à l'extrémité aval du territoire de modélisation hydrologique. Notons que : (i) le secteur situé entre Cadarache et Mallemort drainant 1111 km² est peu productif et qu'une bonne performance d'un modèle hydrologique relevé à Cadarache assure un résultat acceptable à Mallemort et (ii) qu'aucune des séries de débits naturels reconstitués, qu'il s'agisse d'ANR ou de productions propres du projet, n'a pu être assortie d'une mesure d'incertitude.

Les vingt-cinq stations considérées dans le projet sont décrites dans le Tableau 4, positionnées en Figure 10 et hiérarchisées. Les stations jugées indispensables pour les besoins ultérieurs de confrontation offre-demande sont les **sept points de contrôle** suivants :

- **la Durance à Serre-Ponçon**, bassin versant en amont du barrage de Serre-Ponçon ;
- **le Buëch à Serres**, bassin versant en amont de Serres ;
- **la Durance à Oraison (l'Escale)**, bassin versant intermédiaire entre le Buëch à Serres et la Durance à Serre-Ponçon ;
- **la Durance à Cadarache**, bassin versant intermédiaire entre la Durance à l'Escale et le Verdon à Ste Croix ;
- **le Verdon à Castillon**, bassin versant en amont du barrage de Castillon ;
- **le Verdon à Sainte-Croix**, bassin versant en amont du barrage de Sainte-Croix ;
- **la Durance au pont de Mallemort**, malgré l'absence de série naturelle de référence.

Afin d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydrologique de différents bassins versants à l'intérieur du bassin de la Durance, les 18 autres sites se répartissent entre « stations d'intérêt » ou « stations bonus ». Le groupe de bassins versants d'intérêt rassemble des bassins versants de moyenne montagne, de taille intermédiaire, disposant de chroniques relativement longues. Les stations bonus sont les exutoires de bassins de montagne, de tailles limitées, avec des chroniques relativement courtes.

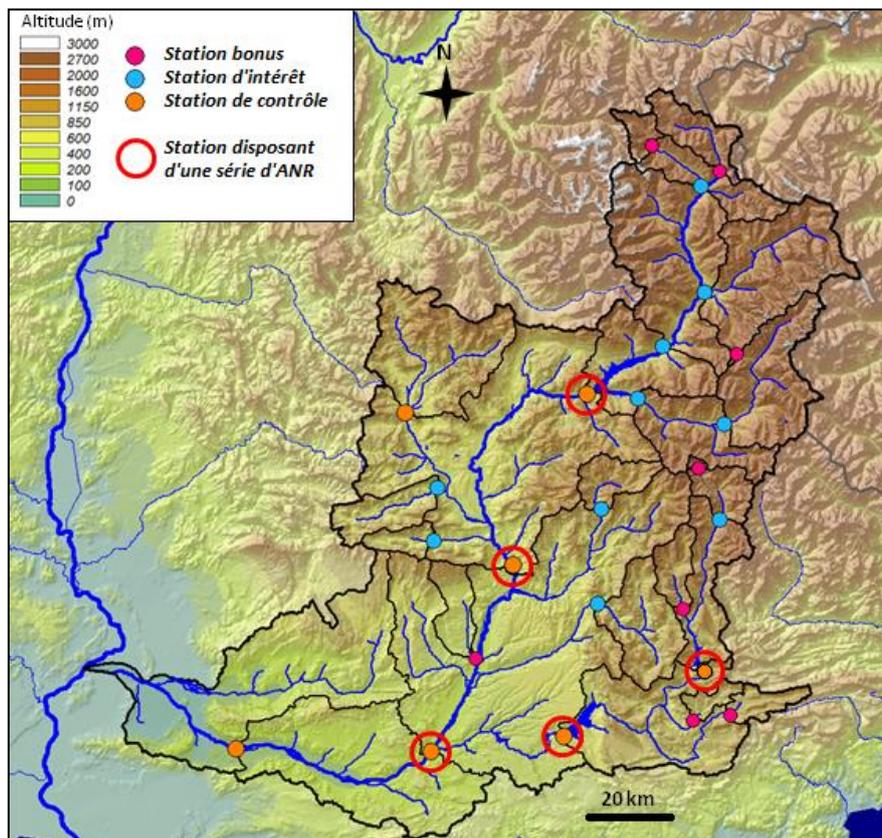


Figure 10 : Contour du bassin versant de la Durance à sa confluence avec le Rhône et échantillons de stations du projet

Bassin versant	Type de données	Type de point	Surface (km ²)	Début	Fin	Durée (an)	Producteur
La Durance à Serre-Ponçon	ANR	Contrôle	3582	1948	2009	62	EDF
Le Buëch à Serres (Les Chambons)	Observation	Contrôle	723	1971	2009	39	EDF
La Durance à Oraison (L'Escale)	Corrigé	Contrôle	6765	1980	2009	30	
Le Verdon à Castillon	ANR	Contrôle	657	1948	2009	62	EDF
Le Verdon à Sainte-Croix	ANR	Contrôle	1625	1977	2009	33	EDF
La Durance à Jouques-Cadarache	Corrigé	Contrôle	11728	1980	2009	30	
<i>La Durance au Pont de Mallemort</i>	<i>Observation</i>	<i>Contrôle</i>	<i>12839</i>	<i>1999</i>	<i>2008</i>	<i>10</i>	<i>EDF</i>
La Durance à la Clapiere	Observation	Intérêt	2170	1960	2009	50	EDF
L'Ubaye à Roche Rousse	Observation	Intérêt	946	1960	2009	50	EDF
La Durance à Briançon Aval	Observation	Intérêt	548	1953	2009	57	EDF
Le Guil à Montdauphin	Observation	Intérêt	725	1982	2007	26	EDF
La Méouge au pont de Méouge	Observation	Intérêt	221	1982	2009	28	EDF
Le Jabron à Piedguichard	Observation	Intérêt	89	1995	2009	15	EDF
Le Verdon à Colmars	Observation	Intérêt	158	1958	2009	52	EDF
L'Asse à la Clue de Chabrières	Observation	Intérêt	375	1952	2009	58	EDF
L'Ubaye à Barcelonnette	Observation	Intérêt	549	1904	2009	106	DREAL
Le Bes à la Clue de Péroure	Observation	Intérêt	165	1963	2009	47	DREAL
La Durance à Val-des-Prés	Observation	Bonus	203	1974	2010	37	DREAL
La Guisane au Monétier-les-Bains	Observation	Bonus	78.5	1978	2010	33	DREAL
Le Riou de Crachet à Saint-Paul de Vars	Observation	Bonus	3.5	1981	2008	28	DREAL
Le Lauzon à Villeneuve	Observation	Bonus	124	1965	2010	46	DREAL
Le Verdon à Allos	Observation	Bonus	10.1	1978	2010	33	DREAL
L'Issole à Saint-André-les-Alpes	Observation	Bonus	137	1958	2010	53	DREAL
Le Jabron à Comps-sur-Artuby	Observation	Bonus	66.3	1975	2010	36	DREAL
L'Artuby à la Bastide	Observation	Bonus	91	1977	2010	34	DREAL

Tableau 4 : Caractéristiques générales de l'échantillon de bassins versants (le terme « corrigé » signifie que les séries ont fait l'objet de correction pour obtenir des débits naturels reconstitués dans le cadre du projet ; la station de Mallemort est en italique pour rappeler son caractère influencé)

4. Données relatives aux usages

Les données et sources collectées relatives aux usages sont reportées dans le Tableau 5.

Données	Source
Chroniques annuelles des prélèvements 1987-2009 issues des redevances	Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (http://sierm.eaurmc.fr/telechargement/bibliotheque.php?categorie=prelevements)
Chroniques mensuelles des prélèvements Canal de Provence (1990-2010)	SCP
Chroniques annuelles de consommation par usage sur les réseaux du Canal de Provence (1976-2004)	SCP
Chroniques annuelles de consommation à l'échelle communale pour les usages irrigation et arrosage sur les réseaux du Canal de Provence (2001 – 2010)	SCP
Chroniques de mesures de teneur en eau des sols sur 14 parcelles de référence	CIRAME
Synoptique des points de prélèvements effectués sur le Canal de Provence	SCP
Dotations moyennes par habitant 2001-2009 des communes desservies en AEP par le Canal de Provence	SCP/INSEE
Référentiel pédologique IGCS PACA (http://www.gissol.fr/programme/igcs/igcs.php)	SCP
Base de données hydraulique agricole PACA HYDRA	http://www.hydra-paca.org
Recensement Général Agricole (1979, 1988, 2000, 2010)	Bases de données et rapports d'analyse http://www.agreste.agriculture.gouv.fr
Registre Parcellaire Graphique	http://www.asp-public.fr/?q=node/856
Consommations 1995-2011 par catégorie, plan du Canal de Marseille avec les différentes prises et tarifs	Direction de l'Eau et de l'Assainissement de la Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole
Prix TTC du service au m ³ pour 120 m ³ en 2010	Eaufrance (http://www.services.eaufrance.fr/observatoire/indicateurs/D102.0)

Tableau 5 : Données exploitées pour caractériser les usages

Données prélèvements : Les données issues des modes de calcul des redevances et prélèvements pour différents usages de l'eau de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse ont été utilisées essentiellement pour le calage du modèle de besoins / prélèvements en eau. Néanmoins, en dehors des données de prélèvement, la base fournit d'autres informations utiles : points de prélèvement, maître d'ouvrage, origine de la ressource, utilisations, superficies irriguées (malheureusement jusqu'en 2007).

Données Sol : Le programme « Inventaire, Gestion et Conservation des Sols » (IGCS, <http://www.gissol.fr/programme/igcs/igcs.php>) a pour but de produire une cartographie des sols de France. Une des actions de l'IGCS a pour but de produire un référentiel pédologique régional au 1/250 000^{ème}. Un des produits est la base de données IGCS PACA qui couvre toute la région Provence Alpes Côte d'Azur, sauf le département des Alpes-Maritimes. Les informations issues de cette base de données ont été traitées pour élaborer des cartes des taux de sable, d'argile, de limons, des profondeurs de sol, des réserves utiles sur la zone d'étude (Tilmant et Braud, 2012). La base de données fournit aussi des informations sur l'hétérogénéité verticale des sols et les taux d'éléments grossiers qui seront exploitées pour estimer les besoins en eau pour l'irrigation (section « besoins pour l'agriculture », page 72).

Données Assolement et Cultures : Les données du ministère de l'Agriculture sur le secteur agricole rassemblées au sein du Recensement Général Agricole (RGA2000 et RGA2010, <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/>) ont aussi été utilisées pour affiner la connaissance de l'assolement, et notamment des cultures irriguées sur le territoire. La base de données (RGA) donne une photographie ponctuelle pour l'ensemble du pays sur la base d'enquêtes décennales effectuées auprès des exploitants agricoles. Elle contient de nombreuses informations utiles : nombre d'exploitations, main-d'œuvre, surface agricole utile totale et par culture, surfaces irrigables¹

¹ Les surfaces irrigables figurant au RGA correspondent aux surfaces que l'exploitant agricole peut irriguer en fonction de son accès à la ressource en eau (existence d'un aménagement privé ou collectif) et de ses moyens en matériel d'irrigation. Elles sont à distinguer des surfaces dites équipées (bénéficiant d'un aménagement collectif mais où il n'y a pas de notion de capacité de l'agriculteur à irriguer).

globalement et les surfaces irriguées² au moment de l'enquête - ce qui est particulièrement intéressant compte tenu de l'importance des surfaces consacrées à des productions qui ne sont pas systématiquement irriguées comme le blé dur ou la vigne - par type de culture, taux d'équipement gravité / aspersion / goutte-à-goutte...

Les informations sont disponibles à l'échelle cantonale. Une mise à disposition à l'échelle des communes est aussi possible sur demande pour les études de recherche mais l'exploitation des données s'avère très compliquée du fait des impératifs de « secret statistique ». Le secret statistique appliqué aux résultats du RGA2010 pour les productions pratiquées par moins de trois exploitants par commune a requis un travail spécifique pour compléter et estimer les données ainsi brouillées. Sur la base de la SAU communale totale et des cultures pour lesquelles les surfaces cultivées et irriguées étaient renseignées, les surfaces manquantes ont été estimées de manière à :

- respecter la SAU communale totale et la SAU communale irriguée;
- retrouver des répartitions par culture et des taux de recours à l'irrigation similaires à ceux renseignés pour les communes à proximité immédiate.

Les données sont rapportées à la commune où l'exploitation est déclarée (siège de l'exploitation) alors qu'en réalité elles peuvent s'appliquer à des communes, voire à des cantons différents. Les informations délivrées par le RGA ont donc été complétées des données du Registre Parcellaire Graphique (RPG, <http://www.asp-public.fr/?q=node/856>) acquises pour les années 2006 à 2010. Certaines surfaces ont pu être corrigées sur la base des données RPG, moins complètes mais géo-référencées à la parcelle.

Les zones d'influence des réseaux d'irrigation ne correspondant pas aux limites communales, les données communales ont dû également être retraitées pour ne considérer que les surfaces et cultures appartenant effectivement aux périmètres d'irrigation.

Même si les surfaces irriguées déclarées dépendent des conditions climatiques au moment de l'enquête, du degré d'équipement des agriculteurs, de leurs choix techniques et enfin de la législation pour la vigne³, le RGA fournit un aperçu suffisant des assolements irrigués et de leur dynamique d'évolution. L'étude s'est appuyée sur les RGA de 1979, 1988, 2000 et 2010.

Données Canaux et réseaux d'irrigation : La base de données HYDRA, développée par la Chambre Régionale d'Agriculture PACA, est un référentiel cartographique qui permet de visualiser la majorité des canaux de transport d'eau et les périmètres desservis par les associations d'irrigants à l'échelle 1/25 000. Cette base contient de nombreuses informations spatialisées concernant le gestionnaire des ouvrages, le périmètre d'intervention (communes desservies) et les principales caractéristiques des activités : surfaces agricoles statutaires, irriguées, irrigables, utilisations du réseau (irrigation, assainissement, adduction d'eau potable, soutien de nappe, alimentation industrielle...), types de cultures irriguées et mode d'irrigation), les prises d'eau, les points de prélèvements (source et dotation mensuelle) et de rejet. Cette base disponible sur internet permet de visualiser grossièrement sur une carte la majorité des réseaux de transport d'eau et des surfaces irriguées par les différentes associations d'irrigants. Toutefois pour de nombreuses associations, tous les champs ne sont pas renseignés et les surfaces, quand elles sont données, sont entachées de grosses incertitudes. De plus, malheureusement, sauf en de rares exceptions, le lien avec le champ « code point de prélèvement » de la base de données de l'Agence de l'Eau n'est pas fait. La base HYDRA est complétée des informations fournies par la SCP pour les territoires qu'elle dessert (synoptique des points de prélèvement et des communes associées desservies par le Canal de Provence).

III. Le fonctionnement actuel du système Durance

1. Hydro-climatologie du bassin versant de la Durance

Le bassin versant de la Durance (environ 14 000 km² à sa confluence avec le Rhône) présente une grande variabilité spatiale et temporelle de fonctionnements hydrologiques et de processus dominants. Nous observons ainsi un gradient altitudinal et climatique majeur, du nord-est au sud-ouest, qui impacte fortement le bassin versant.

² Les surfaces irriguées correspondent aux surfaces irriguées au moins une fois dans l'année considérée (Pour le RGA, il s'agit des surfaces irriguées pendant la campagne faisant l'objet du recensement).

³ La réglementation sur l'irrigation de la vigne peut conduire, dans certains cas, à une sous-estimation des surfaces irriguées.

Le climat sur le bassin de la Durance est partiellement guidé par la topographie et la distance à la mer Méditerranée. La pluviométrie est la plus abondante et uniformément répartie dans l'année sur les bassins de tête de la Haute Durance sur le nord du bassin, sur le Massif des Ecrins et le Queyras. Les températures d'hiver y sont régulièrement négatives, ce qui induit des précipitations majoritairement sous forme solide pendant cette saison. Le caractère méditerranéen du climat s'affirme sur la partie sud du territoire : les températures mensuelles moyennes y sont plus élevées, les précipitations solides deviennent rares et les contrastes saisonniers en termes de précipitations apparaissent (faibles cumuls en été et à l'opposé, forts cumuls en automne dus à des structures convectives). Une analyse de la pluviométrie et de liens avec les circulations atmosphériques est donnée par Kuentz (2013). La Figure 11 illustre le climat auquel sont soumis différents bassins versants examinés. Il s'agit de moyennes de bassin établies à partir des données SPAZM (Gottardi *et al.*, 2012).

La variabilité des régimes hydrologiques fait écho à celle observée sur les climats. Sur les secteurs à relief, l'influence de la dynamique de constitution et fonte du manteau neigeux est forte avec des régimes nivopluviaux à pluvio-nivaux observés en Haute Durance, sur le Buëch amont ou sur le Verdon amont. Les affluents en Moyenne et Basse Durance présentent des nuances de régimes pluvio-nivaux à pluviaux, avec des influences méditerranéennes fortes et l'apparition de régimes intermittents, en fonction des caractéristiques géologiques. Concernant les crues, les bassins versants sont sensibles à différents types de circulation atmosphérique à risque de sud, d'ouest (« onde océanique ») et d'est. Les étiages des cours d'eau duranciens présentent des caractéristiques très différentes en fonction des régimes : les débits caractéristiques d'étiage des bassins à influence nivale apparaissent en hiver et sont plus importants que leurs équivalents pour les bassins à régime pluvial, observés en période estivale.

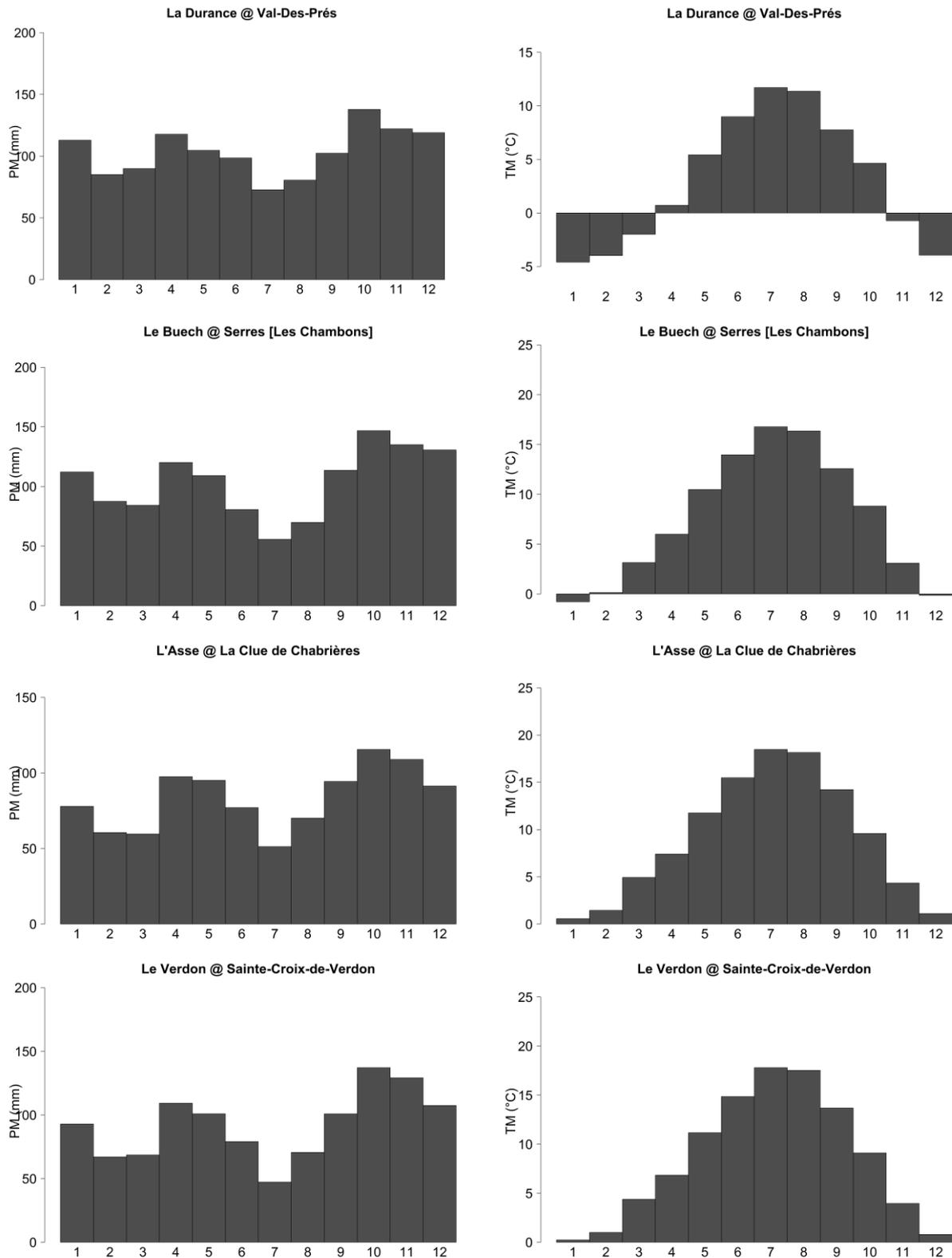


Figure 11 : Pluies et températures mensuelles par bassin sur la période 1980-2009 (Source : SPAZM)

Les Figures 12 à 14 illustrent la variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels sur le bassin versant de la Durance sur la base des données observées ou des débits renaturalisés (du régime nival présent en Haute Durance jusqu'au méditerranéen pour certains affluents du sud du bassin versant). Notons que le caractère méditerranéen se manifeste sur la variabilité des débits journaliers (le ratio interdécile y est plus fort que les

bassins à dominante nivale). Les statistiques présentées sont calculées sur la période du 01/08/1980 au 31/07/2009. C'est d'ailleurs cette période, nommée « PST », qui sera la référence pour la climatologie et l'hydrologie en temps présent. Les variables seront extraites des séries temporelles, pour ce qui est disponible entre le 01/08/1980 et le 31/07/2009 inclus.

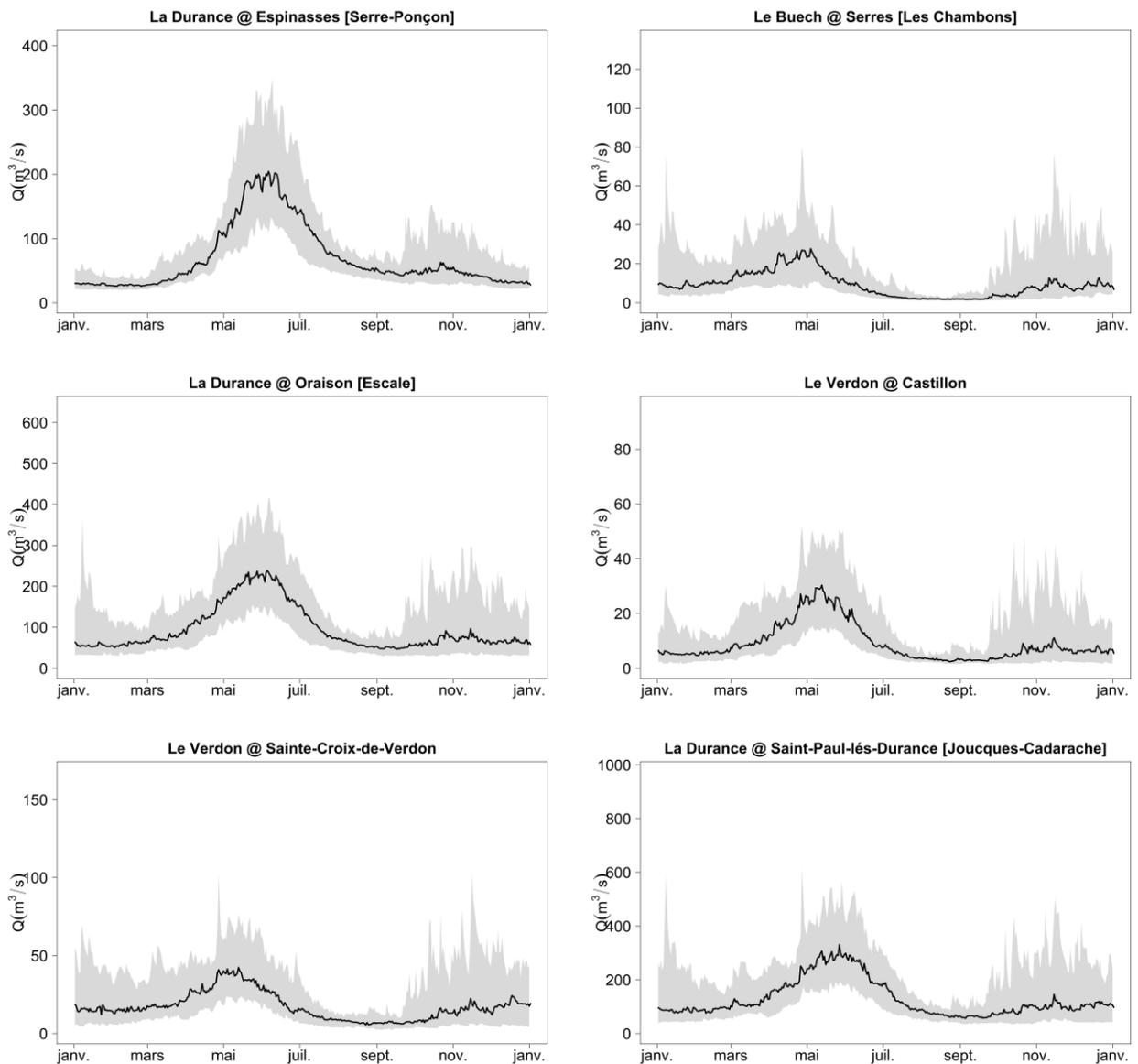


Figure 12 : Cycles annuels des débits journaliers pour six des sept bassins versants de contrôle. En trait épais est représentée la médiane interannuelle des débits journaliers, l'enveloppe grise définit l'intervalle entre les premier et dernier déciles (quantiles 10 et 90%)

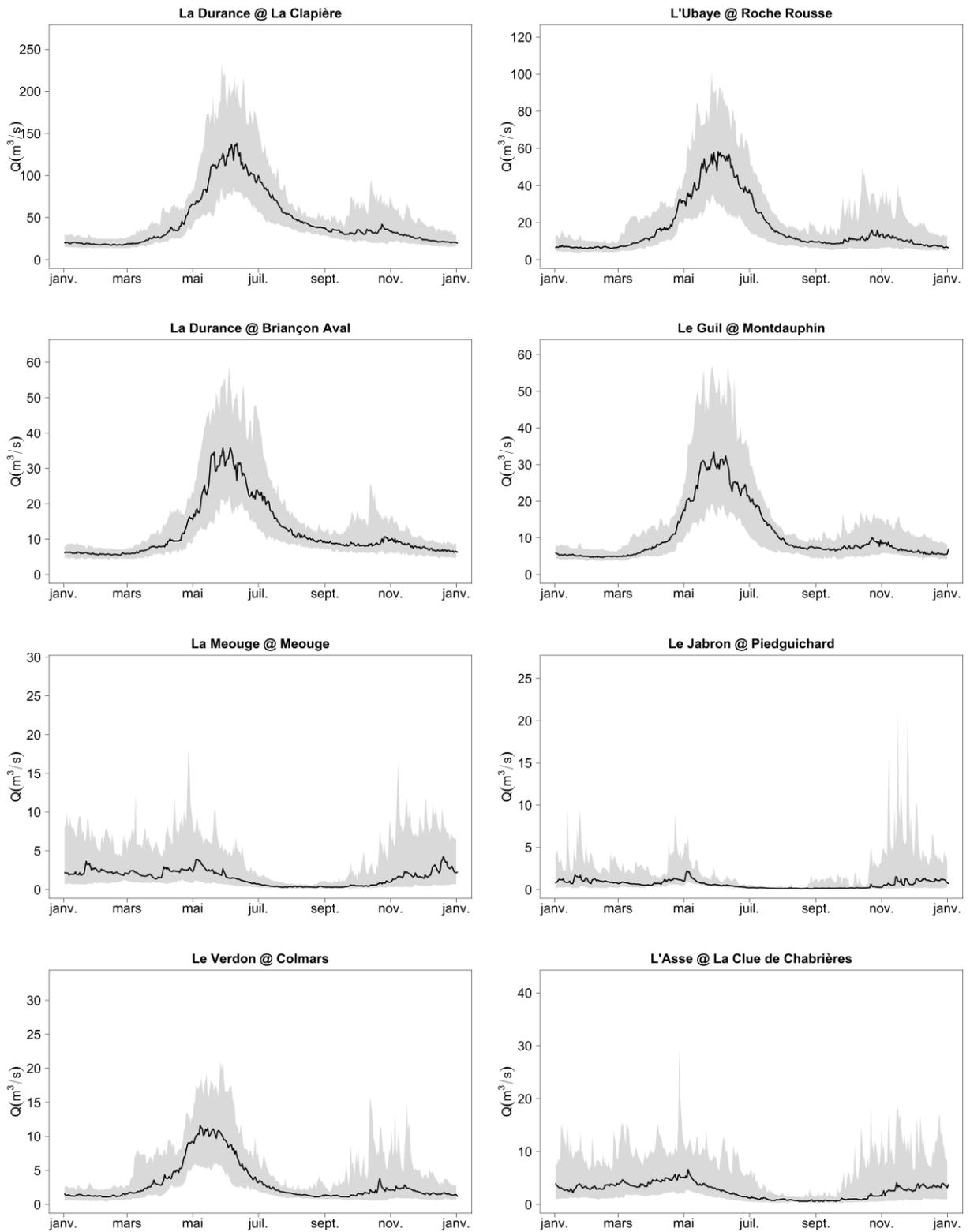


Figure 13 : Comme pour la Figure 12 mais pour huit des dix bassins versants d'intérêt

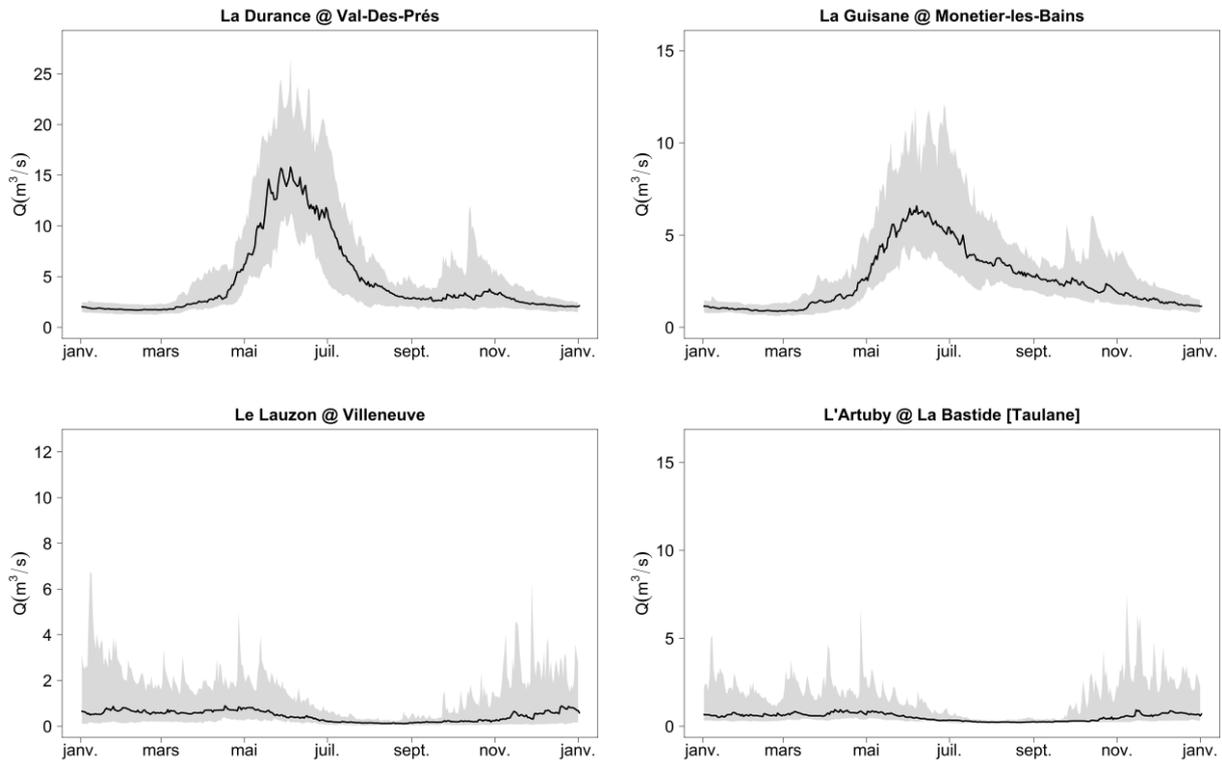


Figure 14 : Comme pour la Figure 12 mais pour quatre des huit bassins versants bonus

La Figure 15, extraite de Kuentz (2013), illustre la variabilité cette fois temporelle des débits moyens annuels de la Durance au cours du XX^e siècle. Les observations récentes de débits de la Durance à la Clapière (station d'intérêt) ont pu être complétées par des données anciennes exhumées grâce à des travaux de recherche de données historiques et numérisées. Des reconstitutions par une chaîne de modélisation, avec en entrée 50 forçages météorologiques obtenus par ré-échantillonnage de situations synoptiques analogues dans le passé, sont également représentées (« Simulated » avec l'intervalle de confiance à 90% associée défini par les limites de la plage grisée). La série des débits de la Durance à la Clapière témoigne de la variabilité climatique et hydrologique passée. Elle illustre la non-stationnarité des phénomènes et la sensibilité du bassin versant à la variabilité climatique, avec par exemple, une alternance de périodes de forts débits (1910-1920) ou de périodes de faibles débits (1940-1950). Les données exhumées et reconstituées n'ont pas été exploitées ici car notre souhait était de se concentrer sur la période récente (1980-2009) pour l'analyse et la modélisation conjointe de la ressource et des usages.

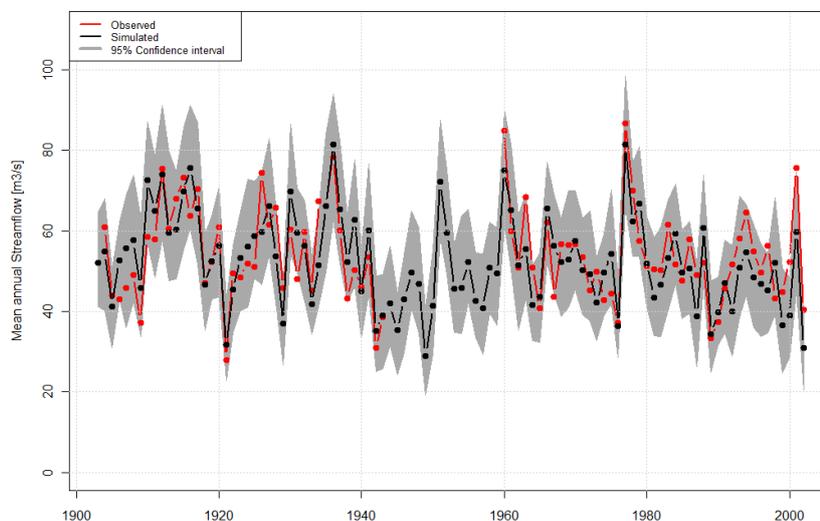


Figure 15 : Variabilité des débits moyens annuels de la Durance entre 1901 et 2002 (d'après Kuentz, 2013)

2. Dynamique territoriale et usages de l'eau

Cette section propose un état des connaissances portant sur les deux sources qui sollicitent fortement la ressource naturelle et les grandes réserves hydrauliques du système Durance-Verdon.

Energie et aménagements hydroélectriques

La Durance constitue aujourd'hui la principale ressource en eau, avec le Verdon, de la région Provence Alpes Côte d'Azur pour satisfaire les besoins de l'agriculture, de l'industrie (hors énergie) et des populations.

Dès le XII^e siècle, des concessions ont été accordées aux agriculteurs pour dériver les eaux de la Durance afin d'utiliser l'eau pour entraîner des moulins à farine et pour arroser leurs cultures. Par la suite, d'autres concessions ont autorisé des villes, comme Marseille ou Aix-en-Provence, à dériver les eaux pour l'alimentation des populations. L'aménagement d'ensemble du bassin versant de la Durance fut décidé d'utilité publique par la « loi d'aménagement de Serre-Ponçon et de la basse Durance » du 5 janvier 1955, marquant la volonté de l'Etat de coordonner les usages agricoles et énergétiques au sein d'un projet global. Actuellement, l'aménagement s'appuie sur trois grands réservoirs de stockage que sont Serre-Ponçon (volume utile de 1030 Mm³), Sainte-Croix (volume utile de 301.5 Mm³) et de Castillon (volume utile de 113 Mm³). Ainsi ont été instituées la réserve agricole de 200 Mm³ sur Serre-Ponçon et une réserve constituée⁴ pour des usages multiples de 250 Mm³ sur le Verdon, réserves devant être reconstituées au 1^{er} juillet de chaque année. L'aménagement comporte un équipement hydroélectrique complet de la Durance entre Serre-Ponçon et Mallemort, dont l'ouvrage structurant est un canal usinier d'une capacité de l'ordre de 250 m³/s qui suit le tracé de la Durance sur tout ce linéaire puis bifurque vers l'Etang de Berre qui constitue son exutoire. Les canaux agricoles ou mixtes préexistants ont tous été raccordés aux ouvrages d'aménage hydroélectriques. En Basse Durance, un débit maximum de 114 m³/s a été affecté à la réalimentation des 15 canaux (dont le canal de Marseille). La sécurité de la fourniture d'eau apportée aux canaux par les prises établies sur le canal usinier a induit des extensions de l'irrigation notamment dans la plaine de Crau.

Canal	Dotations (m ³ /s)
Canal de Peyrolles	2.9
Canal du Sud Lubéron (Pertuis - Cadenet)	4.5
Canal de Marseille	15.1
Canal de Craponne	
Prise de la Roque d'Anthéron	1.1
Prise de Charleval	0.5
Prise de Mallemort-Alleins	2.8
Canal Mixte et St Julien	19.5
Canal du Béal de Sénas	1.5
Canal des 4 communes	2.2
Canal des Alpines Septentrionales - 1ère branche	12.6
Canal de Craponne - branche d'Arles et Salon	19.2
Canal des Alpines Méridionales	16.2
Canal Crillon	4.3
Canal Hôpital	2.2
Canal Puy	1.1
Canal des Alpines Septentrionales – 2eme branche	6.7
Canal de Châteaurenard	1.6

Tableau 6 : Dotations des canaux de Basse Durance

⁴ A l'inverse de la réserve agricole de Serre-Ponçon, les réserves constituées par la SCP concernent tous les usages (urbains, industriels et agricoles), sans définition de tranche par usage.

En Moyenne Durance, l'utilisation énergétique de l'eau a été subordonnée à la réservation d'un débit de $7 \text{ m}^3/\text{s}$ (pouvant si nécessaire être porté à $11 \text{ m}^3/\text{s}$) pour permettre l'extension des irrigations dans la vallée ou sur les affluents. Le Buëch a également fait l'objet d'un aménagement à usage mixte agriculture-énergie (barrage de Saint-Sauveur).

L'aménagement sur la Durance a été complété par l'équipement mixte du Verdon, avec la construction du barrage de Sainte-Croix et d'un ouvrage de transfert et de desserte à buts multiples à partir du Verdon : le canal de Provence. La Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale a été créée pour développer et exploiter ce réseau de distribution selon un régime de concession d'Etat. Les eaux du canal de Provence sont prélevées à Boutre, au nord du département du Var, sur le canal mixte EDF – SCP issu du barrage de Gréoux ; la capacité maximale du canal de Provence est de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (correspondant aux droits d'eau de la Loi de 1923 : $16 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne et $40 \text{ m}^3/\text{s}$ en pointe), soit un prélèvement maximum de 660 Mm^3 . Au total, le volume utile des retenues de l'aménagement Durance-Verdon s'élève à $1\,444.5 \text{ Mm}^3$. La Figure 16 donne un aperçu du fonctionnement de l'ensemble du système et le Tableau 6 l'ensemble des dotations sur le réseau de canaux avant 2011.

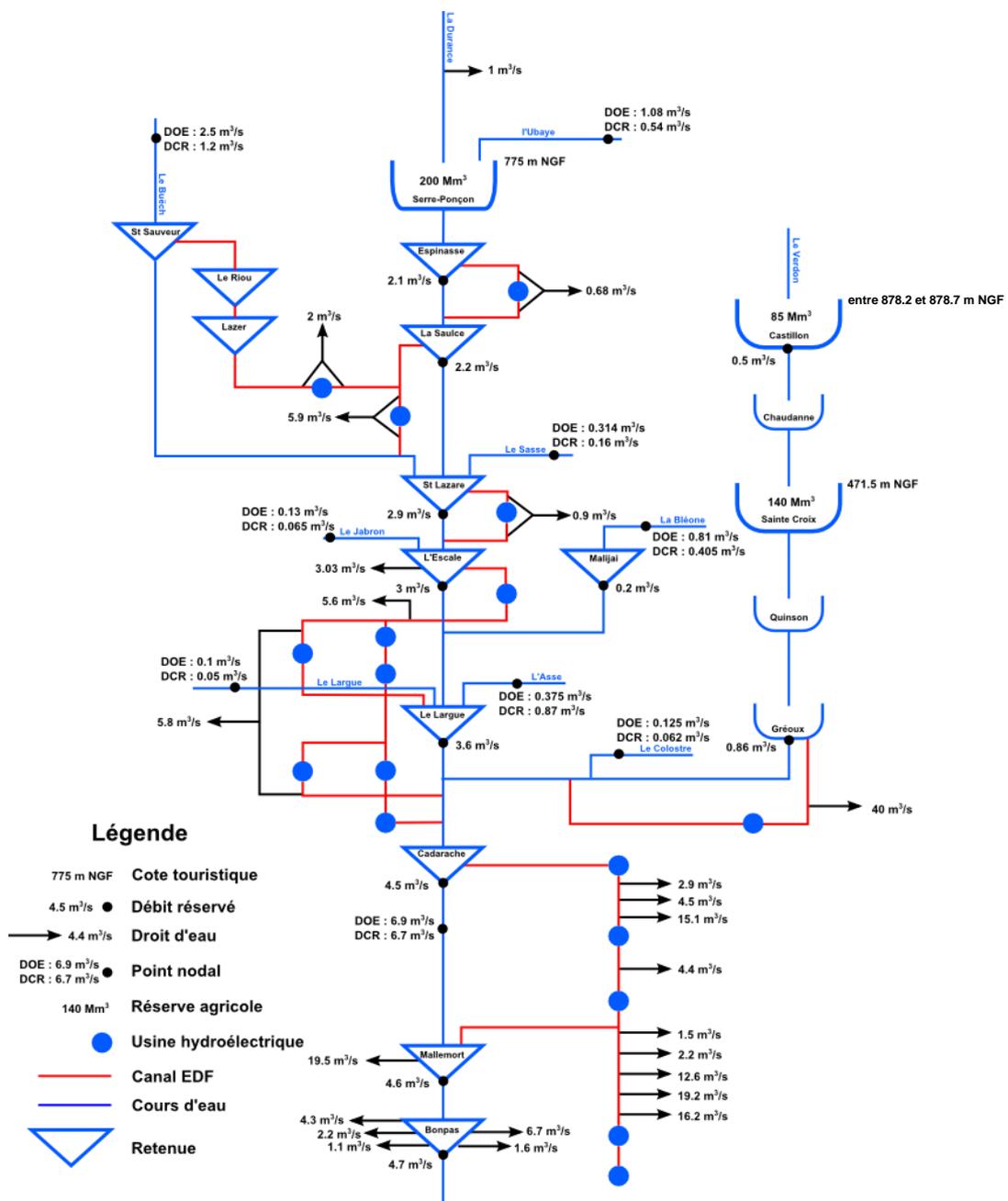


Figure 16 : Schéma hydraulique simplifié du système Durance-Verdon et règles de gestion avant 2011 (Source : Cros, 2012)

L'aménagement Durance – Verdon compte actuellement 32 centrales hydroélectriques d'une puissance totale de 2000 MW, soit l'équivalent de deux tranches nucléaires. La production énergétique de l'aménagement Durance – Verdon représente 10% de la production hydraulique nationale. Elle est stratégique pour la région PACA, très déficitaire et pénalisée par de fortes contraintes de transport d'électricité : elle représente 50% de la production d'électricité régionale et satisfait 22% de la consommation. L'intérêt des équipements duranciens réside aussi dans leur capacité à satisfaire des besoins en période de pointe ou de crise grâce à sa souplesse ; le fonctionnement coordonné de l'ensemble des usines de la chaîne permet en effet, en cas d'incident, de passer de zéro à pleine puissance en moins de 10 minutes. La chaîne Durance – Verdon constitue ainsi 15% des moyens de production en pointe sur le plan national ; elle représente une ressource énergétique majeure dans le dispositif de production courante et de sécurisation de l'alimentation.

Les conditions d'exploitation des ouvrages de la chaîne découlent des différents règlements s'imposant à EDF, en matière de production d'énergie, de débits réservés et d'approvisionnement en eau des ayants droits. Au-delà de ces obligations issues de la concession hydroélectrique et de la réglementation, EDF a pris en compte le développement du tourisme autour des retenues en intégrant dans sa gestion des objectifs de cote touristique sur les trois retenues. La gestion des équipements s'appuie sur des modèles élaborés par EDF pour évaluer et anticiper l'état de la ressource en eau à l'échelle du bassin ; à partir des données de pluie et de températures, le modèle produit des prévisions sur les stocks neigeux et les réserves en eau du bassin versant. La définition de la stratégie s'attache en limitant le déversement sur les différents ouvrages à :

- satisfaire les débits réservés et les droits d'eau pour les usages en aval des grandes réserves hydrauliques ;
- s'attacher à atteindre et maintenir une cote touristique sur les retenues en période estivale ;
- valoriser au mieux la ressource et les aménagements hydroélectriques pour les besoins énergétiques.

Agriculture

La région Provence Alpes Côte d'Azur possède une agriculture diversifiée (Figure 17) :

- le territoire quart nord-est, en zone alpine, principalement consacré à l'élevage ovin et bovin extensif ainsi qu'aux productions associées ;
- la viticulture et l'arboriculture prédominant dans le sud et l'ouest de la région, particulièrement dans le Var et le Vaucluse ;
- les secteurs dont les surfaces irriguées sont dominées par les grandes cultures, en association avec des cultures fourragères ou du maraichage (Lurs – La Brillanne, Valensole, Sisteron, Rians et Gréoux) ;
- les territoires caractérisés par une agriculture très diversifiée où la vigne est souvent prédominante (pourtour de l'Étang de Berre, Trevaresse, périphérie d'Aix, Saint Maximin et vallée de l'Arc)
- les zones côtières (Hyères, Fréjus, Bandol et Les Maures) ou fortement urbanisées caractérisées par la présence importante des cultures de fleurs, associées à la vigne, aux vergers et au maraichage.

La Figure 18 permet d'isoler les grands bassins de production irrigués :

- les plateaux céréaliers de la Moyenne Durance ;
- les cultures de vergers et le maraichage en Basse Durance, mais aussi aux abords de la Durance plus en amont ;
- la viticulture dans le Vaucluse principalement ;
- les productions fourragères de la Plaine de la Crau.

La Figure 18 fait apparaître une répartition hétérogène des surfaces irriguées sur l'ensemble du territoire de la région PACA. L'irrigation se concentre aux abords du Rhône, de la Durance et du Verdon ainsi que dans les zones bénéficiant de grands aménagements (Vaucluse et Bouches-du-Rhône) tandis que la zone littorale et l'arrière-pays provençal ont des surfaces irriguées bien moins importantes. La vigne et les Surfaces Toujours en Herbe (STH), largement présentes dans l'assolement global, sont relativement moins irriguées que les cultures fruitières ou légumières par exemple.

Les différents modes d'irrigation ne sont pas représentés de manière homogène dans toute la région (Figure 20) et sont souvent liés à certains systèmes de productions :

- l'irrigation gravitaire⁵ ou irrigation de surface, mode d'irrigation traditionnel à partir de canaux à surface libre et se trouve dans les systèmes anciens. Elle est localisée dans les zones de montagne mais sur ces territoires l'irrigation gravitaires est de plus en plus délaissée au profit de l'irrigation par aspersion. Sur le reste du bassin, ce mode d'irrigation est principalement utilisé pour les prairies. C'est surtout dans les basses vallées de la Durance et du Rhône (plain de Crau, plaine d'Avignon), où les vents fréquents sont un frein à l'irrigation par aspersion que celui-ci est employé. L'irrigation gravitaire comporte un certain nombre d'externalités positives comme le rechargement des nappes phréatiques. Elle concerne plus de 80% des volumes prélevés pour l'agriculture ;
- l'irrigation par aspersion. Principalement localisée dans la moyenne vallée de la Durance, le Comtat et la bordure littorale, où elle est réalisée à partir des réseaux sous pression exploités par la Société du Canal de Provence et les ASA (Figure 19) pour l'irrigation des grandes cultures et des vergers. Ce mode d'irrigation tend à se généraliser sur les reliefs pour l'arrosage des prairies et des fourrages ;
- l'irrigation par micro-irrigation. Nécessitant des investissements élevés, elle est présente généralement sur des cultures à forte valeur ajoutée demandant un pilotage précis (maraîchage, arboriculture, viticulture) et principalement sur les périmètres alimentés par le Canal de Provence.

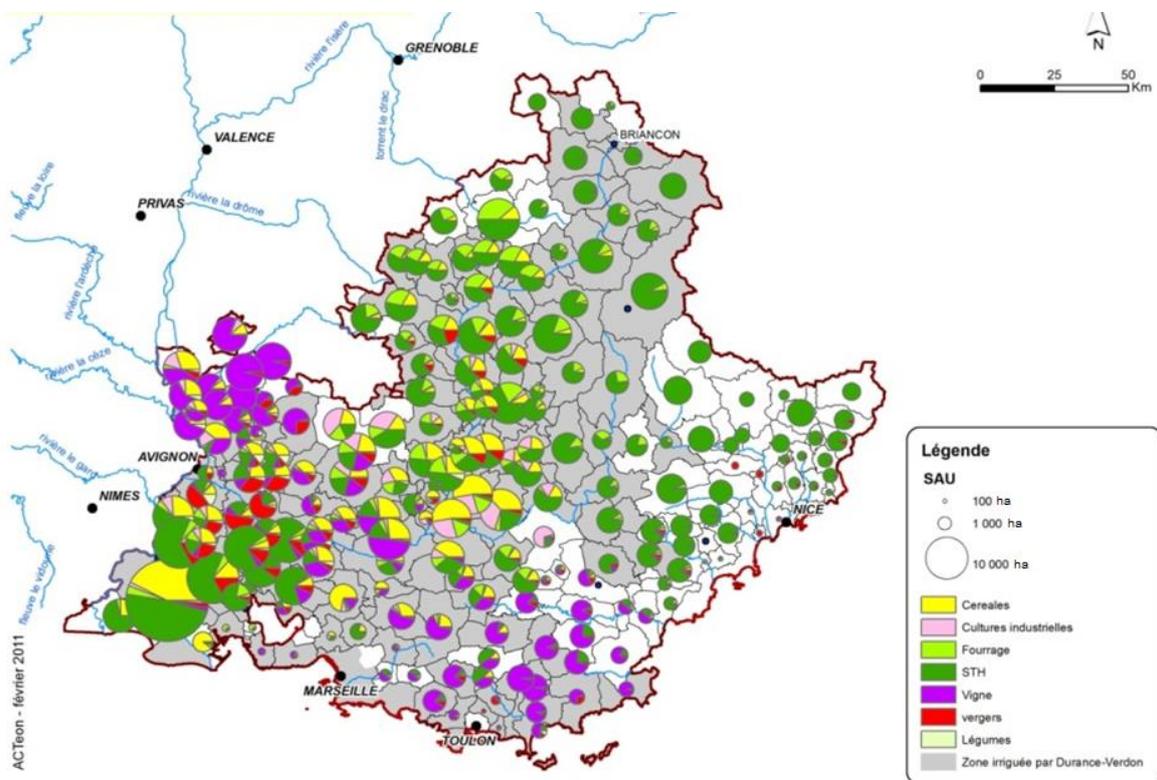


Figure 17 : Principales cultures sur la région PACA (Source : RGA 2010) – STH désigne les Surfaces Toujours en Herbe, les cultures industrielles désignent ici principalement les plantes aromatiques et à parfum

⁵ L'expression « irrigation gravitaire » désigne ici l'irrigation de surface, réalisée à partir de canaux à surface libre. Il s'agit d'un abus de langage (les réseaux sous pression peuvent fonctionner sous un mode gravitaire) mais communément pratiqué, l'expression est donc conservée dans le présent document.

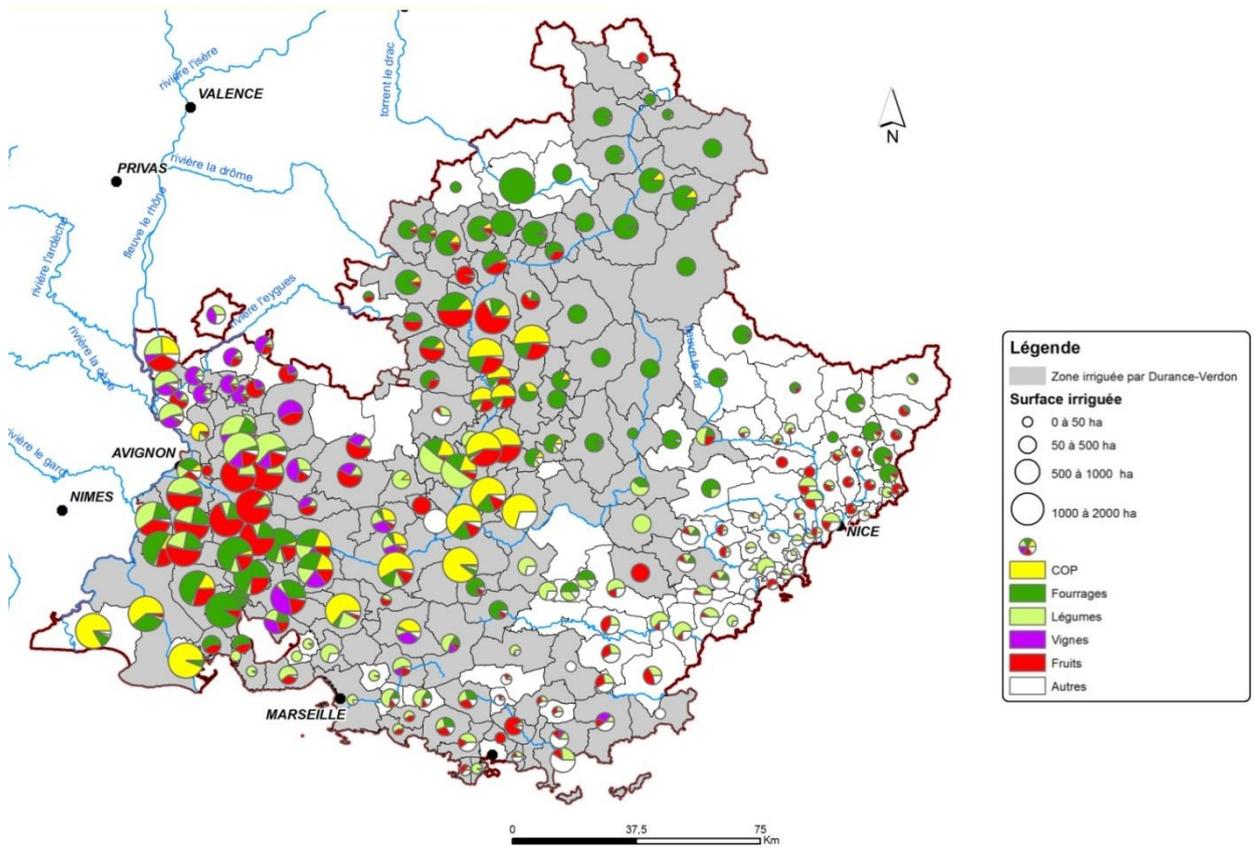


Figure 18 : Principales cultures irriguées sur la région PACA (Source : RGA 2010) - Les céréales, les oléagineux et les protéagineux, cultures «COP»



Figure 19 : Carte des principaux aménagements du système Durance-Verdon (Source : Société du Canal de Provence)

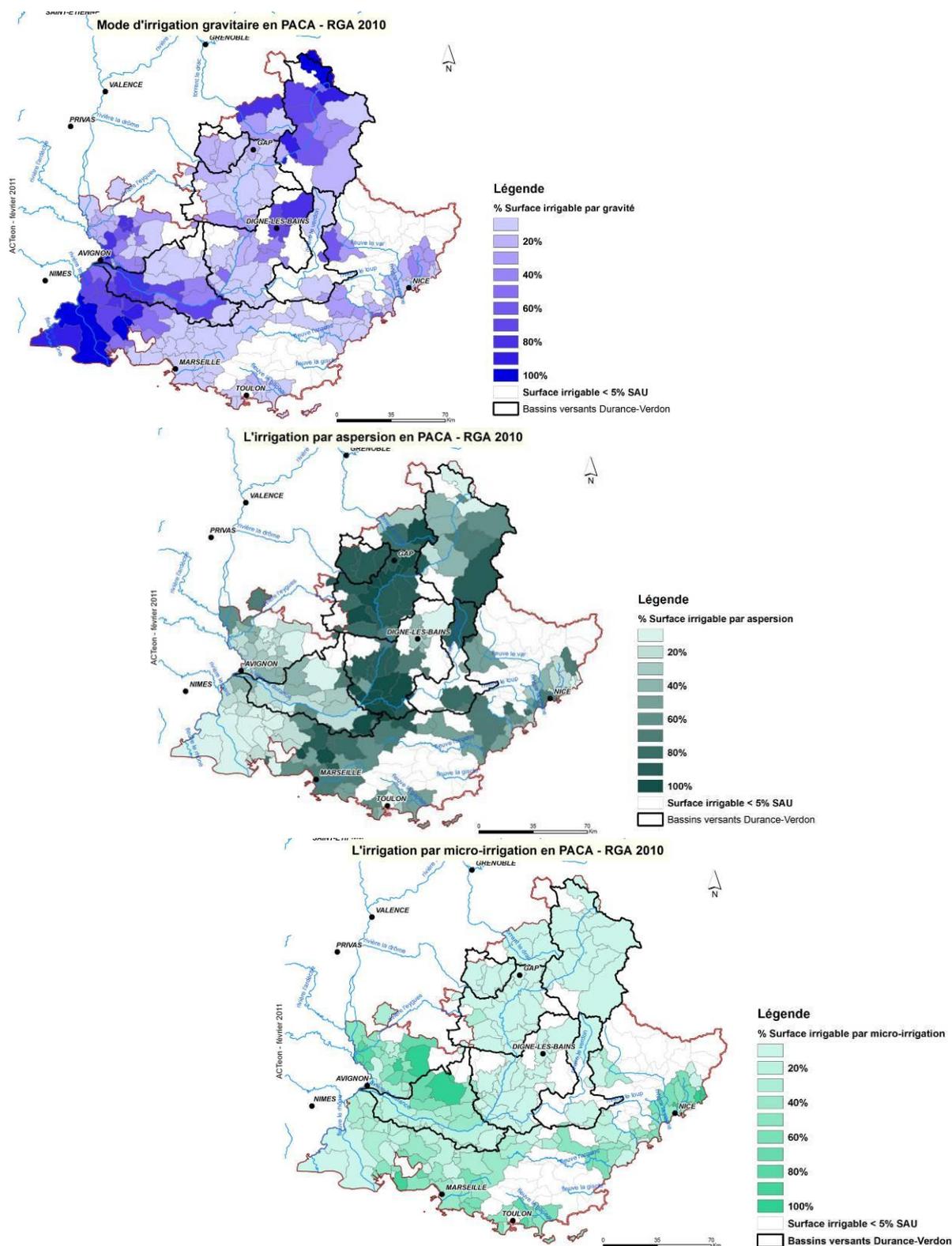


Figure 20 : Modes d'irrigation en région PACA (Source : RGA2010)

Les réseaux gravitaires ont permis depuis le XII^e siècle de répartir les eaux de surface entre les différents territoires régionaux. Toutefois, alors que la France a quasiment multiplié par cinq sa surface irriguée entre 1950 et aujourd'hui, la région PACA a vu, quant à elle, ses surfaces irriguées (et irrigables⁶) diminuer depuis les années 70 (Figure 21).

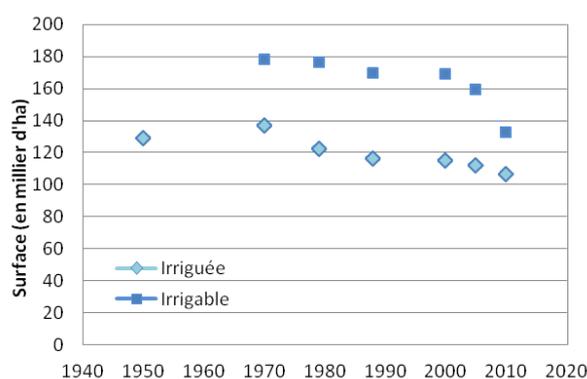
⁶ Voir définitions dans la section « Données relatives aux usages », page34.

La diminution des surfaces irrigables s'est particulièrement accentuée pendant la dernière décennie. Les évolutions sont toutefois non uniformes (Tableau 7) :

- sur l'ensemble du territoire étudié, la part de la surface irrigable dans la Surface Agricole Utile (SAU), territoire consacré à la production agricole, a baissé de 2.9% entre 2000 et 2010. Dans le même temps, la part de surface irriguée a baissé de manière moins marquée. La Moyenne Durance se détache des autres zones : la part de surfaces irrigables et irriguées par rapport à la SAU y a augmenté ;
- c'est le Croissant littoral qui a subi les diminutions relatives les plus marquées. La Basse Durance a perdu près de 20 000 ha de surfaces irrigables et 6 500 ha de surfaces irriguées.
- concernant les modes d'irrigation, les surfaces irrigables par aspersion et par voie gravitaire ont diminué de plus de 20% entre 2000 et 2010 tandis que les surfaces irrigables par micro-irrigation ont augmenté de 15% sur la même période.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces évolutions :

- l'urbanisation des périmètres en plaine constitue l'essentiel des pertes des surfaces irrigables ;
- la disparition progressive des canaux de montagne dont le maintien est difficile étant donné les contraintes de temps, de pénibilité et de coûts d'entretien ;
- la crise des filières « fruits et légumes » a entraîné une baisse de l'attractivité économique de l'irrigation de ces cultures, qui ont subi une forte érosion des surfaces.



Evolution (ha/an)	Entre 1970 et 2000	Entre 2000 et 2010
Surface irrigable	-180.8	-3638.2
Surface irriguée	-440.5	-860.0

Figure 21 : Evolution des surfaces irrigables et irriguées en région PACA (Sources : RGA de 1950 à 2010 et AIRMF)

	Surface irrigable en milliers d'ha (irrigable/SAU en %)			Surface irriguée en milliers d'ha (irriguée/SAU en %)		
	2000	2010	Evolution	2000	2010	Evolution
Haute Durance	19.5 (18%)	17.0 (14.8%)	-12.8% (-3.2 pts)	16.0 (14.7%)	13.6 (11.9%)	-14.5% (-2.8 pts)
Moyenne Durance	19.6 (15%)	17.4 (17.4%)	-11.1% (+2.3 pts)	12.4 (9.6%)	11.2 (11.2%)	-10.2% (+1.6 pts)
Basse Durance	96.7 (43.9%)	77.0 (39.4%)	-20.4% (-4.6 pts)	67.5 (30.6%)	60.8 (31.1%)	-9.9% (+0.4 pts)
Croissant littoral	12.9 (22.5%)	9.1 (16.7%)	-29.3% (-5.7 pts)	7.2 (12.5%)	5.8 (10.6%)	-20.1% (-2.0 pts)
Total	148.7 (28.8%)	120.5 (25.9%)	-19.0% (-2.9 pts)	103.0 (20.0%)	91.4 (19.7%)	-11.3% (-0.3 pts)

Tableau 7 : Evolution des surfaces irrigables et irriguées sur la zone d'étude (Sources : RGA2000 et RGA2010)

Concernant l'évolution des assolements, les principales évolutions observées (Figure 22) sont :

- une « extensification » de l'élevage ovin dans les zones montagneuses se traduisant par une baisse ou une stabilité du cheptel ovin et une augmentation des surfaces de pâturage ;
- une diminution des cultures à haute valeur ajoutée irriguées comme l'arboriculture et les cultures de légumes frais (dans les mêmes proportions que la moyenne des autres cultures, donc la part dans l'assolement irrigué est globalement stable) ;
- à l'inverse, la part des cultures fourragères dans l'assolement a augmenté.

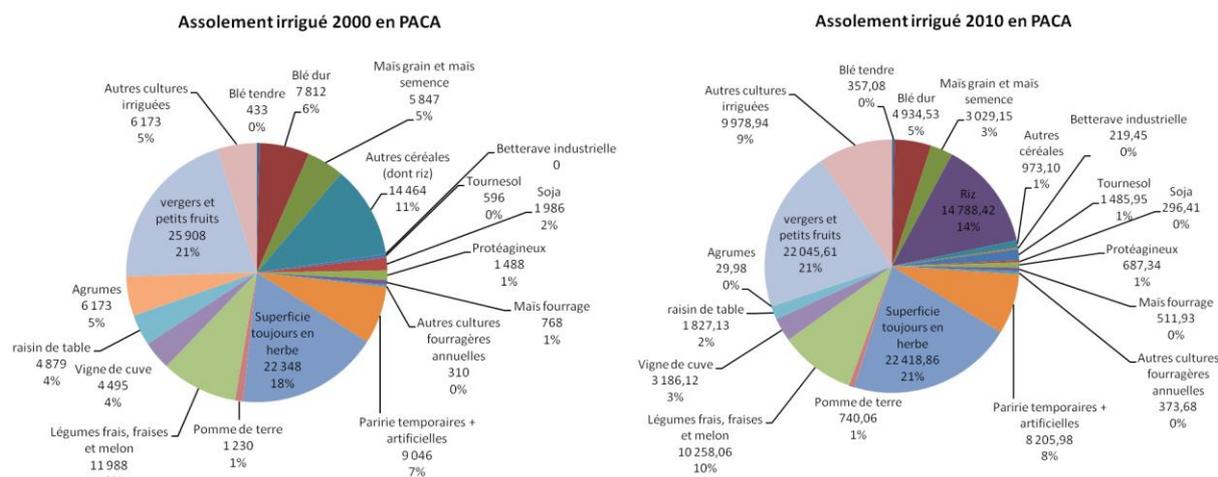


Figure 22 : Assolement irrigué en région PACA pour les années 2000 (à gauche) et 2010 (à droite) (Sources : RGA2000 et RGA2010)

La démographie

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur comptait 4 889 053 habitants en 2009 (données mise à jour par l'INSEE en décembre 2011) et a dépassé les 5 millions d'habitants en 2012. Elle abrite ainsi 8% de la population de la France métropolitaine sur un espace qui couvre 4.3% du territoire national. Depuis 150 ans, la population ne cesse de progresser (Tableau 8). La hausse est restée modeste jusqu'au milieu du XX^e siècle et s'est fortement accentuée depuis 40 ans. En 10 ans, la population régionale a augmenté de 383 000 habitants, soit près de 0.9% en moyenne chaque année. C'est un peu plus que la moyenne nationale (+0.7%) plaçant ainsi la région PACA parmi les huit régions les plus dynamiques.

Croissance annuelle moyenne en %	1962-2008	1999-2008
Haute Durance	0.96	1.08
Moyenne Durance	1.36	1.66
Basse Durance	1.35	0.94
Croissant littoral	1.18	0.84
Région PACA	1.21	0.89

Tableau 8 : Evolution de la population sur la région PACA

Ce constat à l'échelle régionale recouvre des dynamiques démographiques très contrastées à l'échelle des territoires de la Durance et sur le Croissant littoral, desservis ou sécurisés par la ressource Durance-Verdon :

- la Haute Durance avec un peu plus de 150 000 habitants, connaît une croissance de sa population de 1% par an en moyenne depuis 1962 et avec une augmentation de 12% entre 1999 et 2010. Les « portraits de territoires » établis par l'INSEE, indiquent que la population de Haute Durance, notamment sur les bassins de vie de Digne-les-Bains et Sisteron, est plutôt âgée, relativement peu diplômée et possède des revenus nettement inférieurs à la moyenne régionale. La moitié de la population travaille dans la commune où elle réside et l'autre moitié occupe pour la plupart des salariés un emploi dans le Val de Durance ;
- la Moyenne Durance connaît la croissance démographique la plus importante avec une augmentation de sa population résidente de 16% depuis 1999. La croissance annuelle moyenne atteint 1.7% sur les 50 dernières années. La commune de Saint-Paul-lès-Durance, lieu d'implantation de Cadarache fait partie de cette zone ;
- la Basse Durance affiche depuis 1962 une très forte dynamique démographique avec une croissance annuelle moyenne de 1.35% par an. Cette dynamique est plutôt en tassement puisque la hausse de sa population depuis 1999 est un peu plus faible (9%) que celle des zones situées plus au nord ;
- pour ce qui concerne le Croissant littoral : la population varoise semble augmenter au gré de l'ouverture successive des tronçons d'autoroute qui, à chaque fois, ont élargi l'influence des pôles urbains voisins (la population sur l'axe Saint-Maximin-Druguignan-Fayence a notamment triplé en 45 ans) ; le département des Bouches-du-Rhône a vu sa démographie augmenter (1 966 005 habitants en 2008, soit une progression de 7% par rapport à 1999).

Aménagement et enjeux du territoire

La région PACA est un territoire marqué par une géographie contrastée qui est essentiellement induit par la topographie du territoire (littoral, vallées, moyennes et hautes montagnes). De ce fait, des déséquilibres dans l'occupation de l'espace sont notables et opposent une périphérie de campagne et de montagne à un vaste croissant urbanisé qui concentre la majorité de la population (70%) sur 30% du territoire.

L'analyse des densités démographiques et de la répartition des activités économiques, ainsi que le repérage des structures d'aménagement du territoire, permettent de distinguer quatre grandes unités distinctes de par leurs dynamiques socio-économiques, leurs zones d'influence et leurs orientations futures au sein du territoire. Bien que différentes, ces unités proposées ont un même point commun : l'approvisionnement en eau potable de chacun de ces ensembles est lié au système Durance-Verdon. Il est alors possible de distinguer :

- **la Haute Durance**, avec de la moyenne et haute montagne, dynamisée par des pôles urbains locaux qui affiche la volonté de préserver les pratiques agricoles traditionnelles, de favoriser les connexions au reste du territoire et de canaliser les expansions urbaines afin de préserver un tourisme lié au potentiel naturel environnant ;
- **la Moyenne Durance** dont le Val de Durance influencé par l'expansion de la métropole Aix-Marseille et par le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) qui engendre des dynamiques nouvelles traduites par une croissance démographique attendue, des pressions sur le foncier agricole périurbain et la ressource en eau, etc. ;
- **la Basse Durance**, constituant l'aval du bassin versant et tournée vers Avignon, plus influencée par le Rhône que par le littoral de la région PACA ;
- **le Croissant littoral**, une zone densément peuplée regroupant les principales activités économiques (fret maritime, tourisme, industrie) et la métropolisation des grandes villes (Aix-Marseille, Toulon).

Ce diagnostic a fourni des éléments indispensables pour l'élaboration des scénarios prospectifs pour le territoire.

La Figure 23 est un des supports cartographiques de synthèse qui illustre ici le travail réalisé sur la thématique « Agriculture » : les principales productions agricoles sont rappelées avec les enjeux liés à l'irrigation, les dynamiques, interactions et contrastes rattachés à chaque unité.

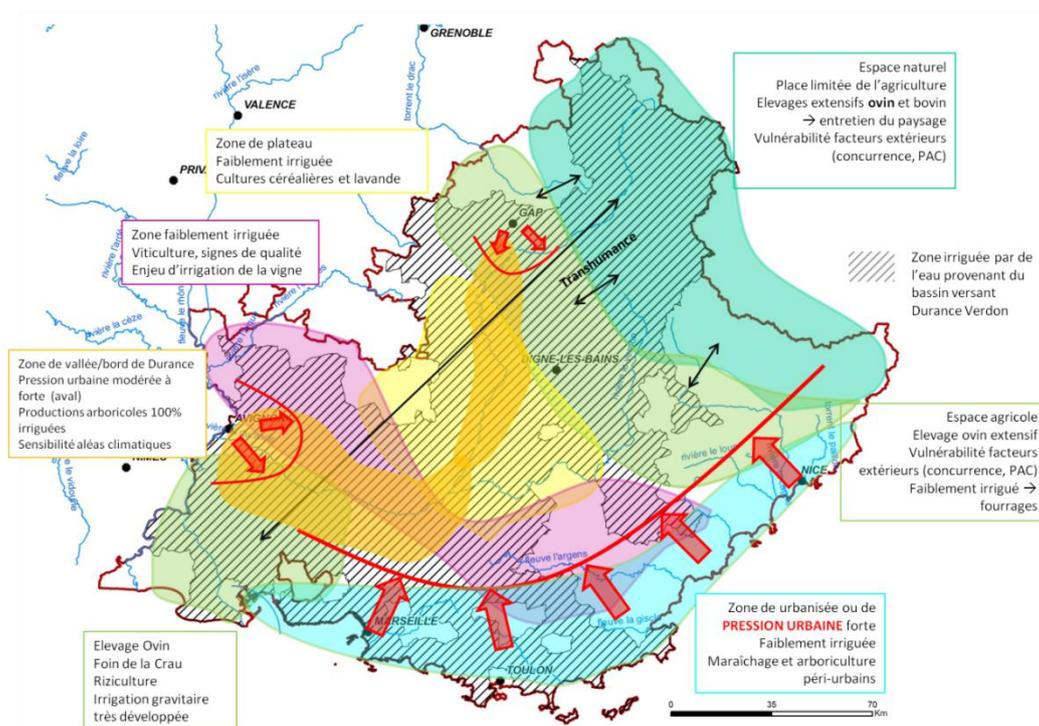


Figure 23 : Zonage des différentes cultures irriguées et enjeux liés à l'agriculture pour la région PACA (Source : ACTeon)

3. Pressions anthropiques sur la ressource en eau

Les principaux usages de l'eau recensés sur le territoire et examinés dans le projet sont l'agriculture, l'Alimentation en Eau Potable (AEP), le tourisme, l'industrie et l'énergie. Une compréhension fine de ces usages est nécessaire pour comprendre leur évolution, les facteurs déterminant cette évolution et leurs besoins en eau et finalement pour modéliser l'eau mobilisée pour satisfaire la demande.

L'analyse a été faite à partir des données redevances de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. Ces données n'ont pas vocation à être exploitées pour des modélisations. L'Agence de l'Eau précise à cet effet : « *L'utilisation [...] pour évaluer la pression exercée par les différentes activités sur le milieu naturel, doit faire l'objet d'une certaine prudence et reste de l'entière responsabilité de l'utilisateur* ». Ce sont des volumes annuels qui ne sont pas forcément géo-référencés, correspondant à des prélèvements déclarés ou à des demandes forfaitaires. En outre, un changement de nomenclature a été opéré à partir de l'année 2008, ce qui a induit des modifications dans l'affectation des prélèvements aux différents usages et ce qui complique les comparaisons des dernières années au regard de la chronique de la période précédente. Une forte incertitude pèse sur les données issues de ces données. L'équipe projet a pu sur certains secteurs mieux décrire les prélèvements, notamment sur les concessions actuellement desservies par la SCP, du fait de son implication dans le projet.

Les besoins en eau agricole

Le secteur agricole est le principal destinataire des volumes d'eau prélevés dans le bassin de la Durance. Sur près de deux milliards de m³ d'eau prélevés en moyenne (période 1980-2009, environ 1.8 milliards de m³ en 2010) 80% sont destinés à l'irrigation, 14% à l'AEP et 6% à l'industrie et aux loisirs. Néanmoins, les prélèvements pour l'irrigation intègrent aussi les volumes d'eau techniques destinés au fonctionnement des réseaux gravitaire ; or ces derniers alimentent de plus en plus souvent d'autres usages comme l'arrosage, l'AEP ou l'industrie⁷. En comptabilisant séparément les volumes de fonctionnement des canaux, la répartition des prélèvements entre les principales utilisations de l'eau est la suivante : 50% pour le fonctionnement des réseaux, 30% pour l'irrigation, 14% pour l'AEP et 6% pour l'industrie et les loisirs. Si on s'intéresse aux demandes exprimées par les utilisateurs de la ressource, 60% concernent l'irrigation, 30% l'alimentation en eau potable et 10% les usages industriels et de loisirs. Plus de 97% des volumes d'eau nécessaires à l'irrigation proviennent des eaux de surface.

Depuis les années 80, les prélèvements pour l'irrigation ne cessent de diminuer, passant de 2 milliards de m³ d'eau par an au début des années 80 à environ 1.5 milliards en 2000 et 1.3 milliards au début des années 2010 (Figure 24). Cette diminution de plus de 30% en 30 ans à plusieurs explications :

- une diminution globale des surfaces irrigables qui se fait sentir surtout les territoires desservis par les réseaux de la basse Durance (environ -20% entre 1979 et 2010) ;
- le passage de périmètres irrigués du mode gravitaire en mode par aspersion. En 1979, environ 88% des surfaces alimentées par le bassin étaient irrigués en mode gravitaire. En 2010, il n'en reste plus que 55%. Le transfert a surtout concerné les territoires de la Haute et Moyenne Durance (90% des surfaces étaient irrigués en gravitaire en 1979 contre un peu plus de 20% en 2010) et beaucoup moins les territoires desservis par la Basse Durance (plus de 80% des surfaces utilisent l'irrigation gravitaire en 2010 pour plus de 95% en 1979). Ceci s'explique d'une part par les conditions pédoclimatiques de ces territoires mais aussi par l'importance de l'irrigation gravitaire pour la recharge de la nappe de Crau. En effet, les apports dus à l'irrigation représentent 60% de la recharge alors que la pluie et les autres apports contribuent respectivement à 30% et 10%. Sans les retours d'irrigation gravitaire, la nappe ne serait plus en mesure d'assurer l'alimentation en eau potable de communes et de certaines industries de Fos-sur-Mer sans compter le maintien de la qualité des milieux et de la biodiversité de tout le territoire ;
- une gestion plus économe et une modernisation du fonctionnement hydraulique des canaux entrepris dès le milieu des années 1990-2000 avec notamment l'automatisation des prises d'alimentation de certains canaux.

En termes de répartition spatiale, la majeure partie des prélèvements se font à partir du canal usinier EDF de la Basse Durance. Ceux-ci représentent 82% (en moyenne 1980-2009) des prélèvements agricoles effectués sur le

⁷ Jusqu'en 2008, le fichier de données redevances de l'Agence de l'Eau ne faisait pas de distinction entre les volumes d'eau destinés à l'irrigation et ceux servant au fonctionnement des réseaux gravitaire. En général, ces volumes étaient affectés à l'usage « irrigation gravitaire » alors que les canaux principaux alimentaient des réseaux sous pression aussi bien pour l'irrigation non gravitaire que pour l'AEP ou l'industrie. Depuis, les volumes nécessaires au fonctionnement des canaux sont comptabilisés séparément.

système Durance – Verdon. En comparaison, les prélèvements effectués sur les bassins de la Haute Durance (Buëch, Serre-Ponçon et Verdon amont) et Moyenne Durance (Escale et Cadarache, y compris le périmètre desservi par le Canal de Provence) représentent seulement, respectivement, 4% et 14% des prélèvements agricoles. La part des prélèvements pour l'irrigation à partir de la prise de Boutre (Canal de Provence) est inférieure à 7%. A l'inverse des évolutions constatées sur l'ensemble des territoires desservis en eau par le bassin, les surfaces irriguées à partir des eaux du Verdon délivrées par le Canal de Provence ainsi que les prélèvements associés sont en augmentation du fait de l'extension des réseaux d'irrigation sur les plateaux bordiers de Valensole et Forcalquier, sur les coteaux du Luberon et sur le littoral.

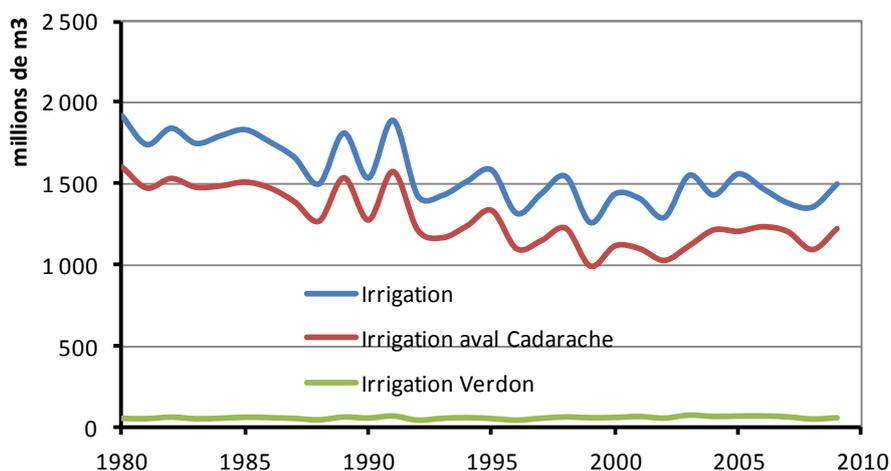


Figure 24 : Evolution des prélèvements irrigation et arrose (Source : Agence de l'Eau RMC)

Les besoins pour l'Alimentation en Eau Potable

Cet usage correspond aux prélèvements en eau domestique ou eau de distribution publique sur le système Durance-Verdon. Cette destination de l'eau couvre les besoins individuels des populations (hygiène corporelle, sanitaires, entretien de l'habitat, boisson et préparation des aliments) ainsi que les besoins collectifs : écoles, hôpitaux, lieux publics... mais aussi fontaines, arrosages, nettoyage des rues... et certaines activités industrielles raccordées au réseau de distribution public.

La compréhension de l'évolution des besoins en AEP nécessite de ramener les consommations observées à l'échelle d'un territoire à une dotation unitaire, *i.e.* au volume prélevé pour la distribution par habitant, pour s'abstraire des effets liés à la démographie des territoires desservis.

La dotation unitaire

En France, la dotation unitaire était de 106 litres par jour et par habitant en 1975, 161 litres par jour et par habitant en 1991, 158 litres par jour et par habitant en 1998 et 165 litres par jour en 2004. Les dernières évaluations de 2008 donnent une moyenne plus faible de 151 litres d'eau par jour (source : Centre d'Information sur l'EAU, <http://www.cieau.com/>). Depuis une dizaine d'années, une baisse sensible et durable des consommations est observée dans la majorité des grandes villes européennes. Ce renversement de tendance, d'abord imputé à l'augmentation du prix du mètre cube d'eau et à des « comportements citoyens » est en fait la conséquence de la tertiarisation des activités dans les grandes villes et des efforts de compression des charges des gestionnaires des immeubles d'habitation, de bureaux et des établissements publics. L'évolution à l'échelle régionale est conforme à la tendance nationale de diminution de la dotation en eau par habitant a été constatée par la SCP sur le territoire de la Communauté du Pays d'Aix (107 m³/an/hab en 2001 contre 94 m³/an/hab en 2008).

A l'échelle des départements français, le volume annuel moyen prélevé pour la distribution publique ramené à la population est compris entre 100 et 150 m³/an/hab en 2010. Sur la région PACA, les chiffres de 2010 sont les suivants : 101 m³/an/hab dans les Bouches-du-Rhône, 104 m³/an/hab dans le Vaucluse, 130 m³/an/hab dans le Var, et 151 m³/an/hab dans les Alpes-de-Haute-Provence. Ces éléments reflètent diverses situations :

- le littoral varois qui malgré l'importance de sa fréquentation touristique, présente un besoin en eau ramené à la population résidente de ce territoire conforme à la moyenne de la région ;

- l'importance de la demande en eau par habitant des territoires alpins tient sans doute au rendement des réseaux en général plus faibles dans les territoires moins densément peuplés.

La dotation unitaire est une résultante de multiples facteurs de formation de la demande en eau (voir Montginoul (2013) pour une synthèse) :

- le prix de l'eau. D'après Montginoul (2011), les évaluations économétriques de la demande en eau en France convergent et mettent en évidence une élasticité-prix de -0.18 et une élasticité-revenu de 0.42. Quand le prix du service de l'eau augmente de 1%, la demande se réduirait ainsi de 0.18%. Au niveau national français, le prix de l'eau potable (eau et assainissement) a augmenté de 50% en valeur courante entre 1994 et 2009, soit une croissance annuelle moyenne supérieure à 3%. En 2007, le prix du service de l'eau s'élevait à 2.41 €/m³ dans les deux départements alpins, 2.82 €/m³ dans les Bouches-du-Rhône et 3.06 €/m³ dans le Var ;
- le rendement des réseaux. D'après les données de l'observatoire des services publics d'eau et d'assainissement, le rendement moyen du réseau de distribution d'eau français s'élève à 76%. Cela signifie que le volume des pertes d'eau est estimé à 24%, soit un litre sur quatre litres d'eau mis en distribution. Le rendement moyen dans les services ruraux est plus faible (75%) que celui constaté dans les services urbains (79%).

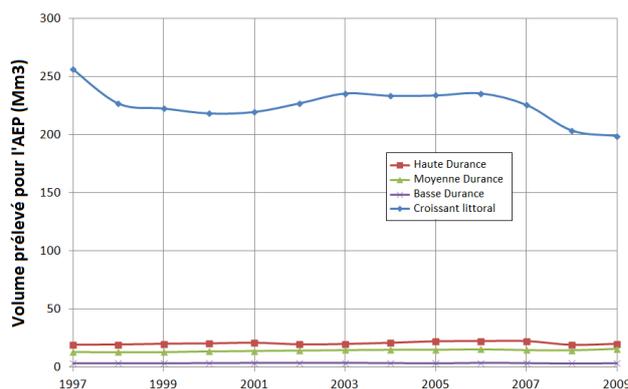
Les causes des fuites des réseaux sont nombreuses et variées (corrosion des tuyaux, déformations subies par les terrains, vieillissement des joints entre les canalisations...). Le rendement ne peut seul refléter la performance et la qualité de gestion du réseau. Il doit être mis en regard de l'indice linéaire de pertes en eau par km de canalisation (en moyenne de 3.9 m³/km/jour). La valeur et l'évolution de cet indicateur sont le reflet de la politique de maintenance et de renouvellement du réseau qui vise à lutter contre les fuites d'eau en réseau. En général, l'indice linéaire de pertes augmente avec la densité du réseau, c'est-à-dire avec le nombre d'habitants par km de canalisation. Les caractéristiques physiques et techniques constituent des facteurs explicatifs des écarts constatés entre les niveaux de l'indice linéaire de pertes moyen d'un service à l'autre, et donc du rendement global du réseau.

A l'échelle de la Région, les rendements moyens s'élèvent à : 62% dans les Hautes-Alpes, 58% dans les Alpes-de-Haute-Provence, 63% dans le Vaucluse, 82% dans les Bouches-du-Rhône, 74% dans le Var et 75% dans les Alpes-Maritimes. Des rendements élevés sont constatés dans les grosses métropoles du Croissant littoral (84.5% à Marseille et 77% à Toulon), les villes-centres du Val de Durance (80.1% à Manosque) et des rendements plus faibles dans les zones plus rurales, comme à Sisteron (70%), Château Arnoux Saint-Auban (45.3%) et Digne (48%).

Analyse à l'échelle régionale des prélèvements pour l'AEP

La ressource Durance-Verdon représente à elle seule 33% des volumes prélevés pour couvrir les besoins en AEP de la région PACA et alimente de grandes communautés d'agglomération (Marseille Provence Métropole, la Communauté du Pays d'Aix en Provence, Toulon Provence Méditerranée), quelques pôles situés à l'intérieur des terres (par ex. Manosque, Sisteron) et des zones à très forte affluence touristique comme le littoral varois.

L'historique récent des volumes recensés par l'Agence de l'Eau au titre de la distribution publique (Figure 25) montre que l'ensemble des prélèvements pour la distribution publique a très peu varié, en passant de 290 Mm³ en 1997 à 230 Mm³ en 2009. Dans une région à forte croissance démographique, cette première observation traduit, à l'échelle du bassin, une réduction de la dotation en eau par habitant. Cette réduction est observée plus largement depuis le début des années 1990 aux échelles nationale et internationale (diminution régulière constatée exception faite en 2003 pour la France métropolitaine).



	Volume prélevé en 2009 (Mm ³)
Haute Durance	20
Moyenne Durance	16
Basse Durance	3
Croissant littoral	192

Figure 25 : Volumes prélevés directement ou indirectement sur la Durance pour la distribution publique de 1997 à 2009 (gauche) et valeurs pour l'année 2009 (droite) (Sources : données prélèvements pour la distribution publique, Agence de l'Eau)

Retenons que seuls, 20% des prélèvements pour l'AEP sont destinés à un usage dans le bassin. De fait, une grande partie des volumes prélevés est exportée principalement en direction du bassin de l'Huveaune, où se trouve l'agglomération de Marseille, et vers le pourtour de l'étang de Berre et les bassins de l'Arc et de la Touloubre. Les transferts d'eau s'effectuent essentiellement via le Canal de Provence (environ 90 Mm³) et le Canal de Marseille (environ 100 Mm³). Ces chiffres pour l'année 2009 démontrent l'ampleur des transferts vers les populations concentrées dans l'espace urbain. Plus de 95% (soit près de 40 Mm³) des volumes destinés à l'alimentation en eau potable des communes situées sur le système Durance Verdon proviennent de ressources locales souterraines alors que la quasi-totalité des prélèvements effectués dans les eaux de surface est destinée aux communes du bord du littoral.

Les besoins pour l'industrie et les loisirs

Eléments de contexte pour l'industrie

L'eau est présente tout au long de la chaîne de transformation des produits. Les utilisations possibles sont nombreuses et très variées : processus industriel de fabrication, refroidissement et production et transfert de chaleur ou encore lavage et transport de matières premières et traitement des déchets.

Les secteurs situés à l'amont de la filière de production sont en principe les plus gros consommateurs d'eau. Les secteurs aval de la chaîne industrielle sont essentiellement des activités d'assemblage qui nécessitent moins d'eau et moins d'énergie.

Les activités industrielles qui prélèvent les plus grands volumes d'eau sont la chimie, le raffinage, la métallurgie, le secteur papetier et la transformation des métaux. Ces secteurs captent à eux seuls plus de 50% des volumes d'eau. L'eau industrielle est principalement utilisée dans les processus de refroidissement. Hors production d'électricité, ces derniers représentent les $\frac{3}{4}$ des volumes d'eau consommés. L'essentiel de ces prélèvements retournent au milieu naturel.

Il existe plusieurs modes d'approvisionnement en eau pour un industriel :

- l'approvisionnement autonome par des prélèvements directs dans les milieux naturels. Ce mode d'approvisionnement est principalement utilisé par les installations industrielles dont les besoins en eau sont importants (chimie, métallurgie, papeteries, centrales thermiques classiques ou nucléaires) ;
- l'approvisionnement à partir du réseau d'adduction d'eau potable. La grande majorité des industries dispose d'un raccordement à un réseau d'eau potable ne serait-ce que pour les besoins sanitaires de leurs salariés. Néanmoins, certaines d'entre elles utilisent aussi ce mode d'approvisionnement pour satisfaire aux besoins de leur activité de production, c'est le cas des petites et moyennes entreprises, notamment dans le secteur agroalimentaire ;
- l'approvisionnement à partir de réseaux industriels ou de réseaux gérés par des sociétés d'aménagement régional.

Depuis 1970, les prélèvements d'eau de l'industrie diminuent régulièrement. Plusieurs éléments sont à l'origine de cette diminution :

- une réglementation de plus en plus contraignante dans le domaine de l'usage de l'eau : bouclage des circuits de refroidissement, amélioration des process ;
- des contrôles et un encadrement plus strict des rejets dans le milieu naturel et des pollutions accidentelles ;
- des avancées dans les technologies de traitement des effluents industriels ainsi qu'une diminution des coûts associés qui font qu'une grande partie de ceux-ci sont aujourd'hui recyclés ;
- une aspiration des grandes entreprises à améliorer leurs performances environnementales.

Pour certaines régions, les mutations industrielles importantes, restructurations industrielles et fermetures de sites dans des secteurs fortement consommateurs d'eau comme le charbon et l'acier, ont contribué à la baisse des prélèvements.

Enfin, précisons que le secteur industriel a la particularité de consommer très peu d'eau. On estime en effet qu'environ 93% des prélèvements effectués sont restitués au milieu naturel.

La région PACA est essentiellement une région de consommation. Son économie est dominée par le secteur tertiaire qui contribue à plus de 82.5% à la valeur ajoutée régionale alors que le poids de l'industrie est relativement faible et ne représente que 9.5% (contre 13% en France métropolitaine). De même, la part du secteur industriel dans les emplois régionaux est seulement de 9% contre 14% en moyenne nationale. PACA fait partie des régions les moins industrialisées de France.

Néanmoins, l'ensemble des secteurs d'activités industrielles est bien représenté. Certaines activités tels que la réparation de machines et autres industries, celles liées à l'eau et aux déchets, la production d'électricité et de gaz, la chimie, la fabrication de matériel de transport (hors automobile), la fabrication de composants informatiques, électroniques et optiques, le raffinage et les industries extractives sont surreprésentés. Les activités pourvoyeurs d'emplois sont la réparation de machines et autres industries (13% de l'emploi salarié régional), celles liées à l'eau et aux déchets (11%), les IAA (11%), la fabrication de matériel de transport (9%), la chimie (9%), la métallurgie (9%), la production d'électricité et de gaz (8%) et la fabrication de composants informatiques, électroniques et optiques (7%). Le raffinage, activité historique qui s'est développée avec le complexe pétrochimique de Fos-Berre-Lavéra, assure 30% de la capacité nationale de raffinage. Cette activité représente seulement 2% des emplois régionaux.

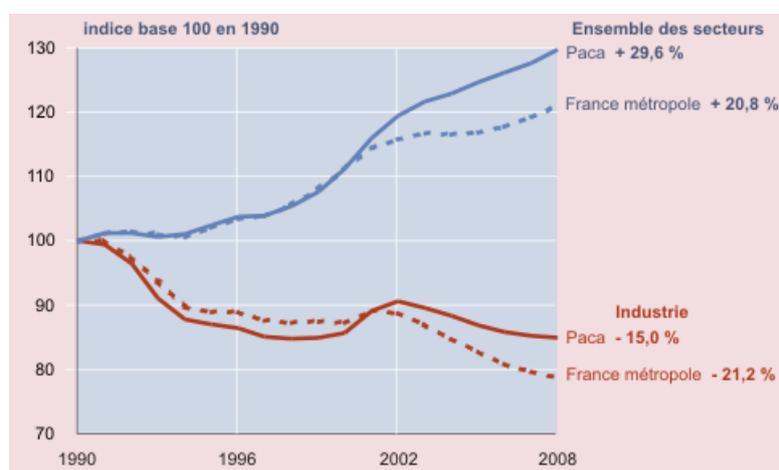


Figure 26 : Evolution de l'emploi salarié (http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=18915&page=dossier/dos07/emploi.htm)

Du fait de sa structure, l'activité industrielle a mieux résisté au cours des deux dernières décennies, en région PACA qu'en France (Figure 26). Entre 1990 et 2010, le nombre d'emplois industriels a diminué de 17% alors que sur la même période, celui-ci a reculé de 27.5% au niveau national. Par rapport au contexte national, le déclin plus prononcé dans les années 1990-2000, suite à la crise qui a particulièrement touché les chantiers navals et les industries de l'armement et de la chimie lourde très présents en région PACA, s'est inversé grâce au positionnement de la plupart des grandes entreprises dans des secteurs moins vulnérables telles que la construction aéronautique et spatiale, la chimie fine et de spécialité, les activités liées à l'énergie (ITER), à l'eau et aux déchets, ou plus résistantes au contexte économique comme l'industrie informatique et électronique,

l'agroalimentaire ou la métallurgie. La crise qui touche les plus grands groupes pétroliers mondiaux et la plupart des pays occidentaux, n'épargne pas les activités de raffinage en PACA. La raffinerie de Shell est sous cocon depuis 2011 et ceci jusqu'en 2013, mais sa réouverture n'est pas sûr. La fermeture des sites de raffinage peut constituer un risque pour l'ensemble de la filière de la chimie de base, de la parachimie et de la plasturgie. La majeure partie des entreprises est localisée sur le littoral et la basse vallée du Rhône et à un degré moindre sur la vallée de la Durance. Les industries les plus importantes (200 salariés et plus) sont concentrées sur quelques pôles proches des grandes agglomérations : Marseille/La Ciotat/ Aix en Provence, Etang de Berre/Golfe de Fos/Lavéra, Toulon/Hyères, Cannes/Nice/Sofia Antipolis/Carros et Avignon/Carpentras. Sur l'axe Durance, les quelques établissements d'importance se situent près de Sisteron (Sanofi Chimie), Château-Arnoux-Saint-Auban (ARKEMA France), Manosque (l'Occitane) et Pertuis (Pellenc SA, Soc. Européenne des Produits Réfractaires....) sans oublier le site du CEA à Cadarache.

Cette vingtaine de grands établissements employant plus de 500 salariés représente près de 20% des effectifs industriels de la région. De ces donneurs d'ordre dépendent une myriade de petites entreprises et très petites entreprises. Plus de 90% des entreprises de la région comptent moins de dix salariés. L'absence de véritable tissu d'entreprises de taille intermédiaire (ETI) capable d'investir et de se positionner sur les marchés internationaux fragilise le développement industriel de la région.

Éléments de contexte pour les loisirs

L'élévation du niveau de vie et l'allongement du temps consacré aux loisirs ont favorisé le développement rapide des activités touristiques. Ces dernières exercent des pressions importantes sur les ressources spécifiques (eau, énergie, espace) et sur l'environnement. L'urbanisation touristique, construction d'hébergements, d'infrastructures de transport, d'accueil, de communication..., d'équipements de loisirs (ports de plaisance, golf, station de ski, parc d'activités...), *ex nihilo* ou autour de sites préexistants, est, de façon générale, très consommatrice d'espace (mitage) et contribue à l'artificialisation des territoires. Non planifiée, mal gérée ou surdimensionnée, cette urbanisation constitue une menace réelle pour les milieux naturels et les paysages.

Ces phénomènes se trouvent accentués par le caractère saisonnier de l'activité touristique (période estivale, vacances scolaires, week-ends...) et par de fortes concentrations spatiales (stations de montagne, bords de mer, sites historiques ou géographiques remarquables...).

La forte affluence touristique induit une augmentation temporaire de la population et donc une augmentation des demandes en eau potable. Les infrastructures de tourisme et de loisirs (golf, piscines, patinoires, hôtels, restaurants...) et plus récemment la production de neige de culture dans les stations de montagne sont, elles-mêmes, très consommatrices d'eau.

Les activités de loisir liées à l'eau comme la baignade, les activités nautiques, la pêche et les promenades autour des retenues et le long des cours d'eau, ne prélèvent et ne consomment pas d'eau. En revanche, ces activités ont souvent un impact sur la gestion de la ressource, principalement sur les modalités de stockage et de déstockage d'eau des retenues amont : maintien de la côte des retenues en période estivale, débit minimal dans les cours d'eau pour la pratique du canoë-kayak, du rafting ou de la pêche.

Ces fortes demandes en eau s'expriment principalement en période d'étiage, *i.e.* lorsque les apports naturels sont moindres. Elles entrent en concurrence avec les autres utilisations de l'eau, principalement l'irrigation des cultures et les besoins des milieux aquatiques et peuvent entraîner ponctuellement et localement des conflits d'usage.

La majeure partie de l'approvisionnement en eau que cela soit pour répondre à la demande en eau potable ou aux besoins des infrastructures de tourisme et de loisirs se fait à partir du réseau d'adduction en eau potable. L'arrosage des terrains de golf, la fabrication de neige de culture ainsi que l'exploitation et l'utilisation des eaux thermales sont les principales utilisations susceptibles d'effectuer des prélèvements d'eau directement dans le milieu naturel. Pour ces utilisations, les prélèvements sont concentrés sur une courte période de l'année (novembre-février pour les canons à neige et mai-octobre pour les golfs et le thermalisme).

Incidence des prélèvements en eau pour la fabrication de neige artificielle : Depuis la dernière décennie, la pratique de l'enneigement artificielle s'est généralisée dans les massifs en Europe. Utilisée au départ pour

compenser le manque de neige naturelle dans les stations de basse et moyenne montagne, l'utilisation de l'enneigement artificiel est devenue un argument commercial garantissant la neige dans le domaine skiable jusqu'au « pied des pistes ». Plus de 85% des stations sur le bassin Rhône Méditerranée Corse sont aujourd'hui équipés. Selon les stations, le ratio surfaces enneigées / surfaces skiables peut varier de 5% (petites stations) à 65% (grandes stations). Certaines stations visent aujourd'hui le « tout neige de culture », ce qui signifie que le nombre de canons à neige en service devraient continuer de croître dans les prochaines années.

En termes de volumes d'eau, il faut, selon les techniques de fabrication employées, environ 1 m³ d'eau pour fabriquer 2 m³ de neige de culture, soit en moyenne 4 000 m³ d'eau par hectare enneigé (Campion, 2002). A titre de comparaison, l'irrigation d'un hectare de verger nécessite 5 000 m³ d'eau et celui d'un hectare de maïs 4 000 m³.

Les prélèvements peuvent se faire à partir du réseau d'eau potable (environ 20% des volumes pour le bassin Rhône Méditerranée Corse) ou directement dans le milieu naturel, soit dans les eaux de surface ou, plus rarement, souterraines (environ 30% des prélèvements), soit par l'intermédiaire de retenues collinaires (50% des prélèvements).

Au pas de temps annuel et en volume, l'incidence de cette utilisation est négligeable sur la ressource en eau. De même, la pression sur la ressource, caractérisée par le ratio débit d'eau nécessaire à l'enneigement sur débit dans le cours d'eau, reste globalement modérée, voire faible. Toutefois, celle-ci peut s'avérer localement élevée et entraîner quelques difficultés pour les usages des communes situées en aval immédiat.

Concernant le domaine d'étude, un peu moins d'un million de m³ d'eau est prélevé pour la fabrication de neige, soit une quantité négligeable par rapport au volume total des prélèvements (près de 2 milliards de m³). Plus de 95% des volumes sont prélevés pour les stations situées en Haute Durance (localisés dans les sous-bassins de l'Escale et de Serre-Ponçon). Le restant est prélevé en Moyenne Durance ou dans le Verdon (stations Foux d'Allos et Dévoluy).

Incidence des prélèvements en eau pour l'arrosage des golfs : L'arrosage des parcours de golf demande de grandes quantités d'eau qui peuvent varier d'un rapport 1 à 1000 entre les golfs dits « rustique » destinés à la pratique de proximité et à l'apprentissage et les golfs dits « haut-de-gamme » réservés à la compétition ou à une clientèle aisée. Les golfs « haut-de-gamme » irriguent plus de surface (en moyenne la moitié de la surface totale) que les golfs rustiques qui irriguent peu de surface, seulement les greens (surface à herbe rase où se situe le trou) et les tees (aire de départ du jeu). De plus, les golfs « haut-de-gamme » sont équipés d'un réseau de drainage qui permet d'arroser massivement sans risque de stagnation des eaux. Selon, une étude diligentée par l'Agence de l'Eau RMC (citée dans les annexes du rapport n°2152 sur la qualité de l'eau et assainissement en France de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques), le volume d'eau utilisé par les golfs « haut-de-gamme » varie dans une fourchette de 300 à 300 000 m³ arrosés avec une moyenne d'environ 13 000 m³/ha. Cette moyenne est de 3 800 m³/ha pour un golf rustique. La consommation moyenne journalière d'un golf « haut-de-gamme » de 18 trous peut atteindre 5 000 m³/jour.

Un peu plus de la moitié des parcours de golf dispose d'une alimentation autonome et prélève directement dans le milieu naturel, les autres s'approvisionnent à partir d'installation de réseaux collectifs : réseau d'eau potable, réseau d'irrigation ou autres réseaux industriels ou sociétés d'aménagement régional.

Le secteur du golf a connu une croissance rapide dans les années 1980 – 2000 entraînant une augmentation importante du nombre de parcours. Celle-ci, associée à des périodes de sécheresse rapprochées, a suscité quelques craintes pour l'équilibre offre / demande en eau dans les régions très touristiques.

Bilan à l'échelle du territoire

Hors prélèvements pour la production d'hydroélectricité, le volume annuel prélevé sur l'ensemble du bassin est d'environ 1.9 milliards de m³ (moyenne sur la période 1980-2009). Une tendance à la baisse s'observe (Figure 27) qui s'explique par une demande plus faible en eau d'irrigation.

Ces dernières années, près de 30% des prélèvements étaient destinés à l'irrigation et à l'arrosage (25% en gravitaire et 5% en non gravitaire), 6% à l'industrie et aux loisirs, 14% à l'AEP et 50% au fonctionnement des canaux gravitaires.

Une grande partie des prélèvements d'eau, environ 75%, s'effectuent en Basse Durance en aval de Cadarache, 8% sur le bassin du Verdon, 12% sur le bassin de la Moyenne Durance et 5% en Haute Durance.

La consommation d'eau est très faible par rapport aux prélèvements effectués, moins de 25%. Le ratio volumes d'eau consommés sur volumes d'eau prélevés, sensiblement plus élevé que la moyenne du territoire national, environ 18%, s'explique par l'importance des prélèvements destinés à l'irrigation. Il faut aussi noter que vue du bassin hydrographique, la consommation d'eau est nettement plus élevée du fait des transferts d'eau important en dehors du bassin. En effet, entre 60 et 68% des volumes d'eau prélevés sont restitués en dehors du bassin hydrographique Durance. Ainsi, au final, plus de 70% des volumes d'eau prélevés dans le bassin ne retournent pas dans leur bassin d'origine.

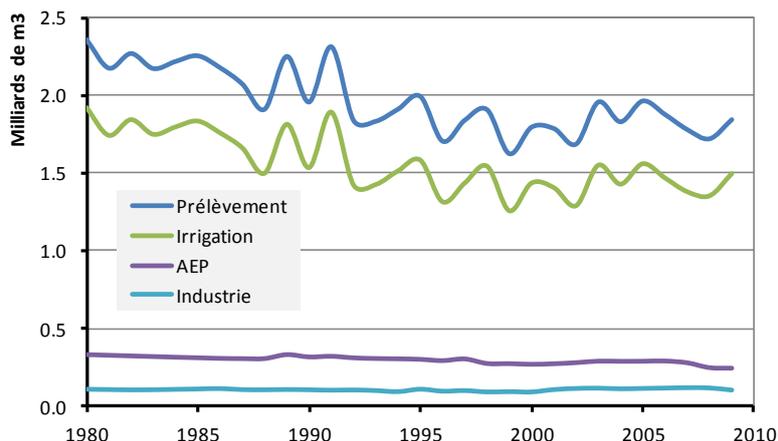


Figure 27 : Volumes totaux prélevés sur le bassin Durance – Verdon - Estimation à partir des données de l'Agence de l'Eau RMC

Les prélèvements industriels et destinés aux loisirs représentent moins de 5% des volumes d'eau prélevés sur le bassin Durance-Verdon et 95% de ceux-ci se font à partir des eaux de surface. Les prélèvements pour les loisirs sont marginaux, environ 0.25% (Figure 28). Ces dernières années, moins de 400 000 m³ d'eau par an ont été prélevés directement dans le milieu naturel (eaux de surface ou souterraines) du bassin de la Durance - Verdon pour l'arrosage des golfs.

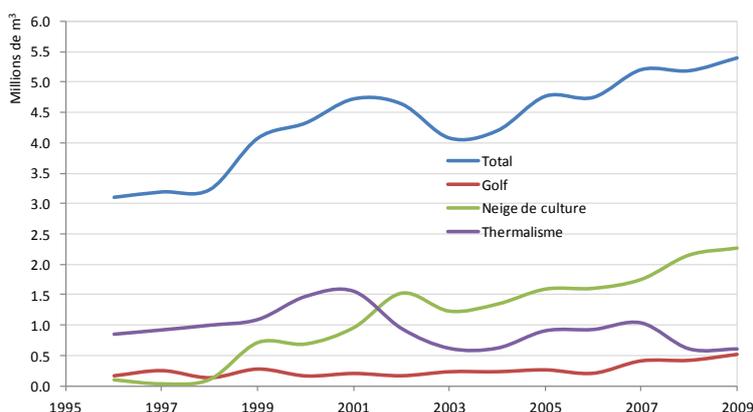


Figure 28 : Evolution des prélèvements destinés aux loisirs sur le bassin Durance – Verdon - Estimation à partir des données de l'Agence de l'Eau RMC

Concernant l'industrie, les secteurs du raffinage (27% des prélèvements industriels), de la chimie de base (18%) et de la plasturgie (15%) sont les plus gros consommateurs d'eau (hors besoins pour l'hydroélectricité), loin devant la métallurgie, l'agroalimentaire, la pharmacie et les activités d'extraction.

Plus de 97% des volumes d'eau nécessaires à l'industrie sont prélevés sur les sous-bassins de Cadarache, essentiellement ceux effectués par l'usine ARKEMA de Saint-Auban (prise canal de Manosque sur la retenue de l'Escale) et de la Basse Durance via le Canal de Marseille (prise de Saint-Estève sur le canal EDF Basse Durance),

le Canal de Provence (prise de Boutre sur le Verdon) et celui de Saint-Chamas (prise sur le canal EDF Basse Durance) (Figure 29). Les prélèvements destinés à l'industrie sont négligeables sur les autres sous-bassins.

Les plus gros préleveurs d'eau industrielle sont situés sur le pourtour de l'étang de Berre et du Golfe de Fos : Shell pétrochimie (raffinage), Naphtachimie (chimie de base), INEOS (raffinage), STD Electricité, ALCAN Aluminium (métallurgie), ATMEL ES2 (fabrication de composants électroniques)...

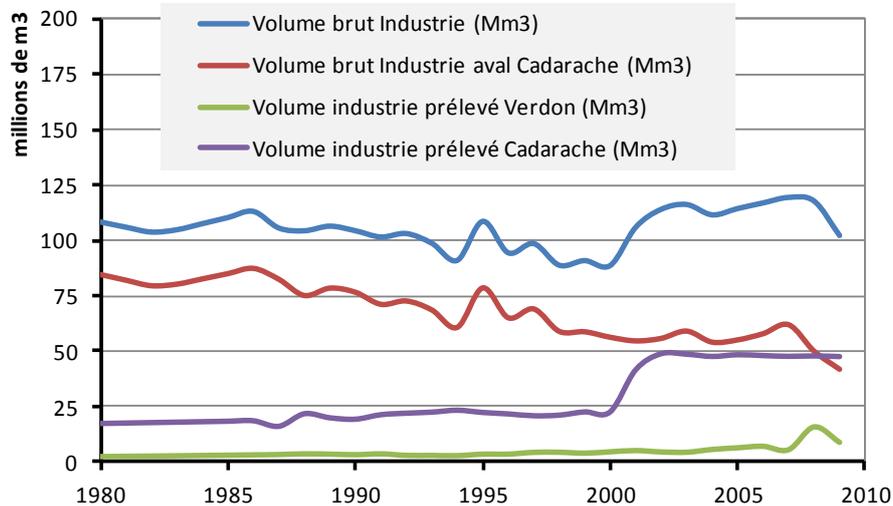


Figure 29 : Evolution des prélèvements industriels sur le bassin Durance – Verdon. Estimation à partir des données de l'Agence de l'Eau RMC

Les actions anthropiques sur le régime de la Durance sont observables sur la Figure 30 :

- le régime naturel reconstitué à l'Escale s'écarte de celui observé en aval du barrage au droit de la station de la Brillanne (8130 km²) sur la période du 21/04/1995 au 31/07/2009. Le SPC Grand Delta gestionnaire de la station précise que ce point mesure le débit réservé de la Durance à l'aval du barrage de l'Escale. En outre, le débit « prend en compte les crues et autres lâchers ou apports intermédiaires. Un seuil est en place mais il est contourné par un débit constant réservé à la commune de la Brillanne (base de loisirs), pour maintenir un niveau. Ce débit rejoint ensuite la Durance par l'intermédiaire du Lauzon » (source : banque HYDRO). Pour mémoire, les débits renaturalisés de la Durance à l'Escale sont rappelés ;
- le même constat peut être fait quelques kilomètres en amont du pont de Mallemort en comparant les débits de la Durance à Meyrargues [Pont Pertuis] (12 500 km²) à ceux renaturalisés de la Durance à Cadarache entre le 23/09/1994 et le 31/12/2009.

La comparaison n'est pas tout à fait rigoureuse car les débits ne sont pas relatifs strictement aux mêmes points. Dans les deux cas, les variations de débit sont conditionnées principalement par des crues d'automne et le signal de fonte amont a été filtré par la gestion des ouvrages.

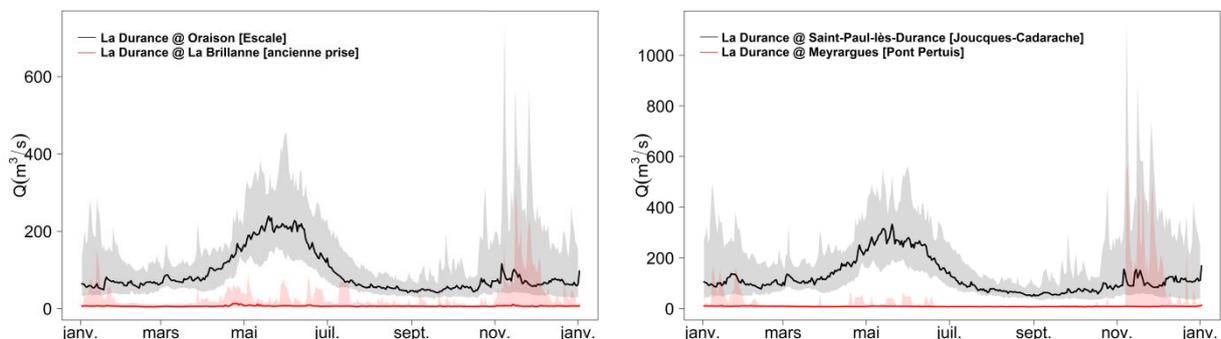


Figure 30 : Cycles annuels des débits journaliers naturalisés et influencés en Basse Durance. En trait épais est représentée la médiane interannuelle des débits journaliers, l'enveloppe définit l'intervalle entre les premier et dernier déciles (quantiles 10 et 90%) (Sources : EDF, banque HYDRO)

IV. Les outils de modélisation de la ressource et des usages

1. Modélisation de la ressource en eau

Les modèles pour décrire la variabilité spatio-temporelle de la ressource en eau à partir d'un ensemble de variables météorologiques (essentiellement pluie, évapotranspiration potentielle et température) sont ceux développés par les hydrologues. Il existe aujourd'hui une grande variété de modèles hydrologiques (par ex. Singh et Frevert, 2002a, b ; Andréassian *et al.*, 2006). Ces modèles diffèrent dans leurs fondements (empiriques, conceptuels, physiques), dans les processus décrits, dans la spatialisation des paramètres et des variables sur le bassin (approches globales, semi-distribuées, distribuées) ou encore sur les pas de temps de fonctionnement. De nombreux travaux d'évaluation existent, montrant que chaque modèle comporte ses spécificités et qu'il n'est pas possible actuellement de trouver un modèle qui soit plus performant que les autres en toutes circonstances et sur tous les cours d'eau. Une approche multi-modèle doit donc être adoptée pour quantifier les incertitudes liées au choix de la modélisation. Cette démarche s'inscrit dans la continuité du projet REXHySS centré sur les bassins versants de la Seine et de la Somme (Ducharne *et al.*, 2009).

L'objectif de cette action a été de réaliser un diagnostic sur la qualité des reconstitutions du débit naturel fournies par les différents modèles hydrologiques utilisés par les partenaires du projet sous climat présent ainsi qu'une évaluation qualitative de la simulation d'autres variables (évapotranspiration réelle, humidité du sol, stock de neige). La qualification de leur niveau de fiabilité et l'évaluation des incertitudes associées à l'étape de modélisation hydrologique ont été facilitées par la mise en place d'un cadre comparatif rigoureux. L'objectif principal commun aux modèles hydrologiques est la simulation des débits naturels reconstitués en temps présent et en temps futur en un certain nombre de points présentés dans la section « Données hydrologiques » (page 30).

Les modèles hydrologiques

Plusieurs modèles ont été sélectionnés dans l'objectif de rendre compte des incertitudes liées au choix des modèles hydrologiques. Ils représentent un échantillon assez diversifié des structures existant actuellement et ayant montré leur intérêt dans des travaux antérieurs sur le changement climatique ou des applications sur le bassin-versant de la Durance.

Sept modèles hydrologiques, de conceptions très variées, ont été utilisés dans le projet (Tableau 9). Les processus représentés au sein des modèles varient considérablement d'un modèle à l'autre. Parmi les éléments communs, notons la prise en compte des processus liés à la neige, l'évapotranspiration et les transferts vers l'exutoire. Les processus physiques liés à l'existence d'une couverture glaciaire ne sont représentés que par les modèles CEQUEAU et Isba-Durance. L'influence glaciaire sur la zone d'étude n'est pas négligeable (Lafaysse *et al.*, 2011), *a minima* pour les cours d'eau en amont de Serre-Ponçon, ce qui pourrait induire des différences entre modèles.

Modèle	Partenaire	Référence	Type	Discretisation spatiale
CEQUEAU	EDF LNHE	Morin, 2002	Conceptuel	Distribué
GR5J	Irstea Antony	Le Moine, 2008	Conceptuel	Global
Isba-Durance	LTHE	Lafaysse, 2011	A bases physiques	Distribué
CLSM	UPMC	Ducharne <i>et al.</i> , 2000 ; Magand, 2014	A bases physiques	Distribué
MORDOR	EDF-DTG	Garçon, 1996	Conceptuel	Global
J2000	Irstea Lyon	Krause <i>et al.</i> , 2006	Conceptuel	Distribué
ORCHIDEE	UPMC	Krinner <i>et al.</i> , 2005	A bases physiques	Distribué

Tableau 9 : Liste des modèles hydrologiques testés

Les structures des modules d'accumulation et de la fonte de la neige utilisés par les différentes équipes sont également bien différentes. En simplifiant, deux grandes familles coexistent : de type degré-jour pour les modèles conceptuels (GR5J, MORDOR, CEQUEAU, J2000) ou de type bilan d'énergie pour les modèles à bases physiques (Isba-Durance, CLSM, ORCHIDEE). Dans le cadre du projet, la paramétrisation de la neige de CLSM a été améliorée, par l'introduction d'une hystérésis dans la relation entre l'épaisseur moyenne et l'extension spatiale du manteau neigeux au sein des sous-bassins versants retenus comme unités de calcul, ce qui a permis

de retarder l'onde de fonte au printemps (Magand *et al.*, 2014b). Le module de neige de J2000, basé sur le principe du degré-jour, a lui aussi été amélioré.

Pour l'ensemble des modèles, le pas de temps des sorties est le pas de temps journalier, même si les modèles qui résolvent le bilan d'énergie de surface (Isba-Durance, CLSM, ORCHIDEE) sont intégrés à pas de temps infra-horaire. La restitution spatiale des variables des modèles autres que les débits (enneigement, humidité du sol, évapotranspiration réelle, etc.) est effectuée à l'échelle du bassin ou du sous-bassin versant.

Les paramètres de GR5J sont calés en utilisant l'indice d'efficacité de Kling-Gupta (*KGE* ; Gupta *et al.*, 2009) calculé sur la racine carrée des débits, pour ne pas donner trop d'importance aux forts débits.

MORDOR est calé en utilisant soit le *KGE* sur les débits (choix qui accentue la meilleure simulation des débits les plus élevés), soit une combinaison entre le *KGE* sur les débits et le *KGE* sur l'inverse des débits (choix qui représente un compromis entre forts et faibles débits).

Les paramètres de CEQUEAU sont déterminés à partir d'un algorithme de calage multicritères. Selon les stations de contrôle, quatre critères ont été utilisés : critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970) sur les débits journaliers, biais sur les débits hebdomadaires et annuels, ainsi qu'un critère sur l'étiage (calculé à partir de la comparaison des fonctions de répartition des débits observés et simulés au-dessous d'un seuil fixé). Le calage a pu être mené en utilisant les chroniques de débits présentes dans les sous-bassins pour exploiter ainsi le caractère distribué du modèle.

Les modèles Isba-Durance et ORCHIDEE ne sont pas calés, alors que CLSM présente un calage réalisé à la main. J2000 a fait l'objet d'une étude de sensibilité manuelle qui a conduit à changer quelques valeurs de paramètres.

Le protocole d'évaluation

Nous détaillons ici une procédure d'évaluation s'appliquant aux modèles ayant recours à une procédure de calage des paramètres, et qui se base sur des calages sur des sous-périodes. Les autres modèles (Isba-Durance, ORCHIDEE et J2000) ne pouvant pas avoir recours de manière aisée à un calage sur les sous-périodes, on ne considérera qu'une seule simulation produite avec les paramètres du modèle déterminés une fois pour toutes. Deux tests ont été réalisés, en s'inspirant de la procédure proposée par Klemeš (1986) :

Split sample test (test en calage-contrôle sur périodes indépendantes)

Ce test permet d'évaluer le niveau d'erreur du modèle en dehors des conditions de calage. Il s'agit d'un test en calages-contrôles croisés sur périodes indépendantes. La série totale disponible est divisée en deux périodes, P1 et P2, ayant des longueurs similaires. Le test consiste à réaliser :

- un calage du modèle sur la période P1 puis un contrôle sur la période P2 ;
- un calage du modèle sur la période P2 puis un contrôle sur la période P1.

Le modèle sera jugé acceptable sur le bassin si les résultats en contrôle sur les deux périodes sont acceptables au regard des critères d'évaluation utilisés. L'intérêt de cette procédure est qu'elle permet d'avoir une évaluation du modèle en contrôle sur l'ensemble des données disponibles. La période complète considérée s'étend de 1980 à 2009, P1 est définie de 1980 à 1994 et P2 de 1994 à 2009, chaque année *N* allant du 1^{er} août *N* au 31 juillet *N*+1.

Differential split sample test (test en calage-contrôle sur périodes indépendantes et contrastées)

Ce test reprend le principe du précédent, mais s'intéresse à des périodes présentant des caractéristiques très contrastées entre calage et contrôle (par ex. humide/sèche, chaude/froide). Est évaluée ainsi la capacité du modèle à s'adapter à des conditions très différentes de celles rencontrées au calage. Ce type de test est important pour évaluer la sensibilité du modèle hydrologique au climat et ses qualités d'extrapolation. Les périodes ont été déterminées comme détaillé dans le Tableau 10.

N°	Périodes contrastée	Précipitations	Températures	Pluies solides
3	01/08/1983 – 31/07/1988	(/)	(--)	(++)
4	01/08/1988 – 31/07/1993	(-)	(/)	(--)
5	01/08/1993 – 31/07/1998	(++)	(+)	(++)
6	01/08/1999 – 31/07/2004	(+)	(++)	(/)
7	01/08/2004 – 31/07/2009	(--)	(++)	(-)

Tableau 10 : Périodes contrastées sélectionnées pour l'évaluation des modèles hydrologiques (+ signifie supérieur à la normale, - inférieur à la normale et / proche de la normale, l'intensité des écarts est spécifiée par le nombre de signes)

Les forçages des modèles et protocole d'adaptation au contexte durancien

La réanalyse SPAZM (Gottardi *et al.*, 2012) a été utilisée par tous les modèles, excepté ceux qui requièrent un forçage infra-journalier : CLSM et ORCHIDEE ont utilisé le forçage DuO (Magand, 2014) et Isba-Durance les forçages M et N issus de SAFRAN (Vidal *et al.*, 2010). La formulation de l'évapotranspiration de référence ET_0 retenue est celle de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) et est calculée à partir du forçage DuO. Ces données ont été présentées dans la section « Données climatologiques » (page 29).

Un récapitulatif des modèles comparés, de leur forçage, et des fonctions « objectif » utilisées en cas de calage est donné dans le Tableau 11. Les deux forçages d'Isba sont issus de SAFRAN au pas de temps horaire fourni par zone Symposium avec une majoration des précipitations de 15% pour la variante « M » et avec un ajustement des valeurs mensuelles de précipitations et température sur SPAZM sur chaque sous-bassin pour la variante « N ».

Modèle	Forçage climatique	Fonction objectif	Commentaires
GR5J	SPAZM et DuO pour l' ET_0	KGE sur la racine des débits (KGERQ)	
Isba-Durance	SAFRAN décliné en deux versions M et N		Modèle non calé
MORDOR	SPAZM et DuO pour l' ET_0	(KGE sur $1/Q$ + KGE sur Q) (KINV)	Pour la Durance à l'Escale, le Bes à la Clue de Péroure, l'Asse à la Clue de Chabrières, le Verdon à Castillon et la Durance à Cadarache
		KGE sur Q (KGEQ)	Pour toutes les autres stations
CEQUEAU	SPAZM et DuO pour l' ET_0	Calage multicritère semi distribué	
CLSM	DuO	KGE sur Q (KGEQ) et biais	Calage manuel
J2000	SPAZM et DUO pour l' ET_0		Etude de sensibilité
ORCHIDEE	DUO		Modèle non calé

Tableau 11 : Modèles hydrologiques, forçages et critères numérique utilisés pour le calage éventuel

Les critères d'évaluation numériques et graphiques

Différents critères d'évaluation ont été utilisés avec pour référence les débits observés ou renaturalisés, aux différentes stations (Tableau 12, Tableau 13). Les critères se focalisent sur les performances des modèles lors des périodes enneigées (neige), lors des hautes eaux, lors des basses eaux, et caractérisent aussi le bilan ou le régime. La représentation en forme d'étoile (Figure 31) permet d'évaluer rapidement les domaines pour lesquels les modèles sont performants ou non.

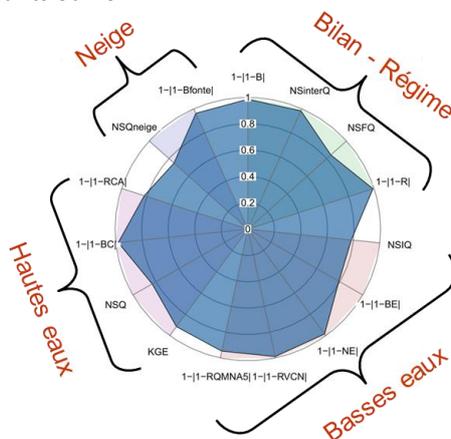


Figure 31 : Représentation des performances d'un modèle donné, sur un bassin donné, par rapport aux différents critères d'évaluation

Critère	Formulation	Intervalle	Commentaire
Critère de Nash-Sutcliffe	$NSQ = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$ avec $\bar{Q}_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{o,i}$	]-∞, 1] Parfait : 1	Evalue préférentiellement la restitution des débits de crue
Critère de Nash-Sutcliffe sur l'inverse des débits	$NSIQ = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Q_{o,i} + \varepsilon} - \frac{1}{Q_{s,i} + \varepsilon} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Q_{o,i} + \varepsilon} - \frac{1}{\bar{Q}_o + \varepsilon} \right)^2}$ avec $\frac{1}{\bar{Q}_o + \varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Q_{o,i} + \varepsilon}$ et $\varepsilon = \frac{1}{100} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{o,i}$	]-∞, 1] Parfait : 1	Donne plus d'importance à la restitution des étiages. Est préféré au critère utilisant les logarithmes des débits, car il permet de donner une importance plus grande aux débits les plus faibles
Critère de Nash-Sutcliffe sur les débits moyens interannuels*	$NSinterQ = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{365} (Qmi_{o,j} - Qmi_{s,j})^2}{\sum_{j=1}^{365} (Qmi_{o,j} - \bar{Qmi}_o)^2}$ avec $Qmi_{o,j}$ et $Qmi_{s,j}$ les débits moyens interannuels journaliers observés et simulés et $\bar{Qmi}_o = \frac{1}{365} \sum_{j=1}^{365} Qmi_{o,j}$	[0, +∞[Parfait : 1	Evalue la restitution de la courbe de régime
Critère de Nash-Sutcliffe sur les fréquences au non dépassement	$NSFQ = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (f(Q_o) - f(Q_s))^2}{\sum_{i=1}^n (f(Q_o) - \bar{f(Q_o)})^2}$	]-∞, 1] Parfait : 1	Evalue la qualité de restitution de la courbe des débits classés
Critère de bilan	$B = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{s,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{o,i}}$	[0, +∞[Parfait : 1	Evalue la capacité à bien restituer le régime moyen d'écoulement
Rapport des écarts-types	$R = \frac{\sigma_{Q_s}}{\sigma_{Q_o}}$	[0, +∞[Parfait : 1	Evalue la restitution de la variabilité des débits
Critère de Kling-Gupta	$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (B-1)^2 + (R-1)^2}$ avec r coefficient de corrélation de Pearson entre $Q_{o,i}$ et $Q_{s,i}$	[0, +∞[Parfait : 1	Evalue la restitution des débits

avec $Q_{o,i}$, $Q_{s,i}$: débits observés et simulés au pas de temps i ; n : nombre de pas de temps de la période d'évaluation
 * : Le débit moyen interannuel du jour j est calculé si l'on dispose de moins de 20% de lacune pour ce jour sur la période de validation

Tableau 12 : Critères d'évaluation continus (calculés sur toutes les erreurs de la période)

Critère	Formulation	Intervalle	Commentaire	Détails de calcul
Rapport des déficits d'écoulement en étiage	$BE = \frac{\sum_{i \in [1, n] | Q_{s,i} \leq S_e} (S_e - Q_{s,i})}{\sum_{i \in [1, n] | Q_{o,i} \leq S_e} (S_e - Q_{o,i})}$	$[-\infty, +\infty[$ Parfait : 1	Pour des applications de gestion de l'eau par rapport à un objectif donné	S_e est le quantile Q10 de la courbe des débits classés issue des observations, <i>i.e.</i> dépassé 90% du temps
Rapport des VCN7 moyens	$RVCN = \frac{VCN7_s}{VCN7_o}$	$[0, +\infty[$ Parfait : 1	Qualifie la restitution des débits minimaux	Calcul sur les années hydrologiques. Calcul de la moyenne mobile : la moyenne sur 7 jours si ces 7 jours présentent moins de 20% de lacunes. Calcul du VCN7 sur les années présentant moins de 20% de lacunes (en termes de moyennes mobiles)
Rapport des QMNA5	$RQMNA5 = \frac{QMNA5_s}{QMNA5_o}$	$[0, +\infty[$ Parfait : 1	Qualifie la restitution des débits d'étiage	Calcul sur les années hydrologiques. Calcul des débits moyens mensuels sur les mois présentant moins de 20% de lacunes. Calcul des QMNA sur les années présentant moins de 20% de mois en lacunes. Ajustement des QMNA sur une loi log-Normale
Rapport du nombre de jours d'étiage	$NE = \frac{\sum \delta_i}{nt_e} \text{ avec } \begin{cases} \delta_i = 0 \text{ si } Q_{s,i} > S_e \\ \delta_i = 1 \text{ si } Q_{s,i} \leq S_e \end{cases}$	$[0, +\infty[$ Parfait : 1	Qualifie la restitution des durées d'étiage	nt_e est le nombre de jours pour lesquels les observations sont situées sous S_e
Rapport des volumes en crue	$BC = \frac{\sum_{i \in [1, n] | Q_{o,i} \geq S_c} Q_{s,i}}{\sum_{i \in [1, n] | Q_{o,i} \geq S_c} Q_{o,i}}$	$[0, +\infty[$ Parfait : 1	Evalue la qualité de restitution des volumes de crue	
Rapport des crues annuelles	$RCA = \frac{\sum_{k=1}^q \max_{l_{sk} \leq l \leq l_{ek}} (Q_{s,i})}{\sum_{k=1}^q \max_{l_{sk} \leq l \leq l_{ek}} (Q_{o,i})}$ où l_{sk} et l_{ek} sont les pas de temps de début et de fin de l'année k et q est le nombre d'année de simulation	$[0, +\infty[$ Parfait : 1	Qualifie la qualité de restitution des maxima annuels	Calcul sur les années hydrologiques. Calcul du maximum annuel pour les années sur lesquelles on dispose de moins de 20% de lacunes d'observation
Critère de Nash-Sutcliffe sur la « période de fonte », du 1 ^{er} avril au 31 juillet	$NSQ_{fonte} = 1 - \frac{\sum_{p \in P_{fonte}} (Q_{o,p} - Q_{s,p})^2}{\sum_{p \in P_{fonte}} (Q_{o,p} - \overline{Q_{o,p}})^2}$ avec P_{fonte} , « période de fonte » fixée entre le 1 ^{er} avril au 31 juillet de chaque année	$]-\infty, 1]$ Parfait : 1	Evalue la restitution des débits durant la période de fonte.	
Critère de bilan sur la « période de fonte », du 1 ^{er} avril au 31 juillet	$B_{fonte} = \frac{\sum_{p \in P_{fonte}} Q_{s,i}}{\sum_{p \in P_{fonte}} Q_{o,i}}$ « période de fonte » fixée entre le 1 ^{er} avril au 31 juillet de chaque année	$[0, +\infty[$ Parfait : 1		

Tableau 13 : Critères d'évaluation non continus (calculés sur des périodes spécifiques)

Analyse des simulations

Cette analyse est réalisée sur les simulations des modèles obtenues grâce au « *split-sample test* » : les scores des deux périodes indépendantes sont alors moyennés. Nous commençons par détailler les résultats sur la Durance à Serre-Ponçon, puis nous présentons ensuite les résultats globalement sur l'ensemble des stations (au maximum les 25 stations définies dans la section « Données hydrologiques » (page 30)).

Résultats détaillés obtenus pour la Durance à Serre-Ponçon

Nous pouvons observer sur la Figure 32 les bons résultats de CEQUEAU et MORDOR sur les différentes composantes. CLSM et J2000 sont légèrement moins performants, en particulier sur les étiages et pendant les périodes influencées par la neige. Enfin, notons les difficultés d'Isba-Durance sur la période d'étiage, avec une sensibilité importante au forçage choisi, et celles d'ORCHIDEE (non calé) à reconstituer les débits hors période d'étiage.

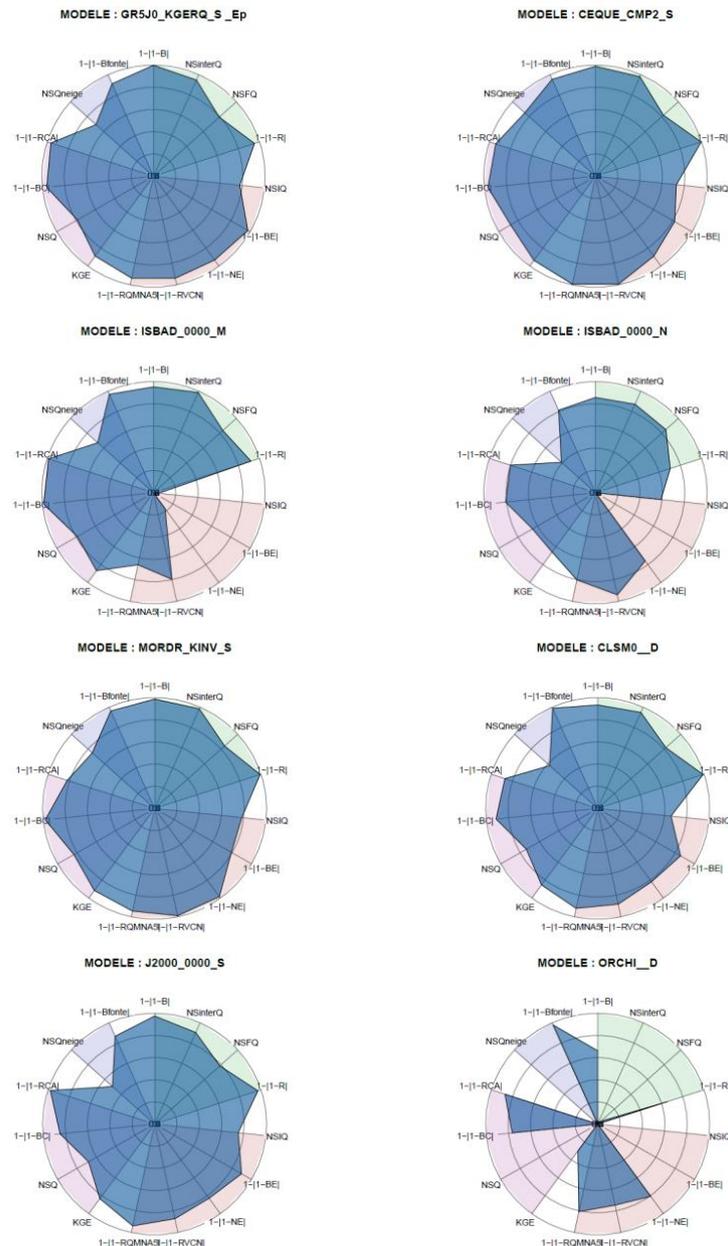


Figure 32 : Performances des modèles pour la Durance à Serre-Ponçon

Nous remarquons en Figure 33 que les débits de l'onde de fonte (mai à juillet) sont particulièrement bien reproduits par la plupart des modèles, excepté Isba-Durance (forçage N, surestimation), J2000 (légère sous-estimation) et ORCHIDEE (mauvais phasage). En observant le stock de neige de chacun des modèles (Figure 34),

nous constatons que celui simulé par ORCHIDEE est beaucoup plus faible que les autres, et que celui simulé par J2000 est légèrement plus fort. De plus, GR5J et CEQUEAU simulent une fonte plus rapide.

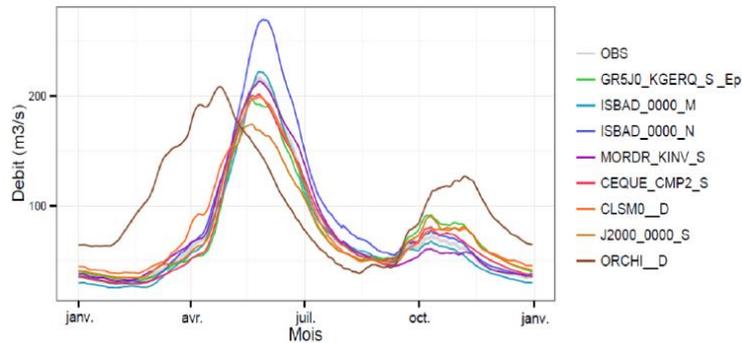


Figure 33 : Débits moyens sur 10 jours interannuels observés et simulés pour la Durance à Serre-Ponçon

La Figure 34 permet de constater que les variables internes des différents modèles peuvent évoluer de manière très diverse (relative convergence des modèles sur débits, pertes et neige, mais importantes différences entre indices d'humidité et stocks d'eau dans le sol en valeur absolue, mais des dynamiques apparemment similaires). Il faut malgré tout relativiser ces résultats du fait d'une réelle difficulté de trouver des correspondances strictes entre variables simulées par les modèles, hors débit et neige, du fait des différences entre structures et processus décrits par les modèles.

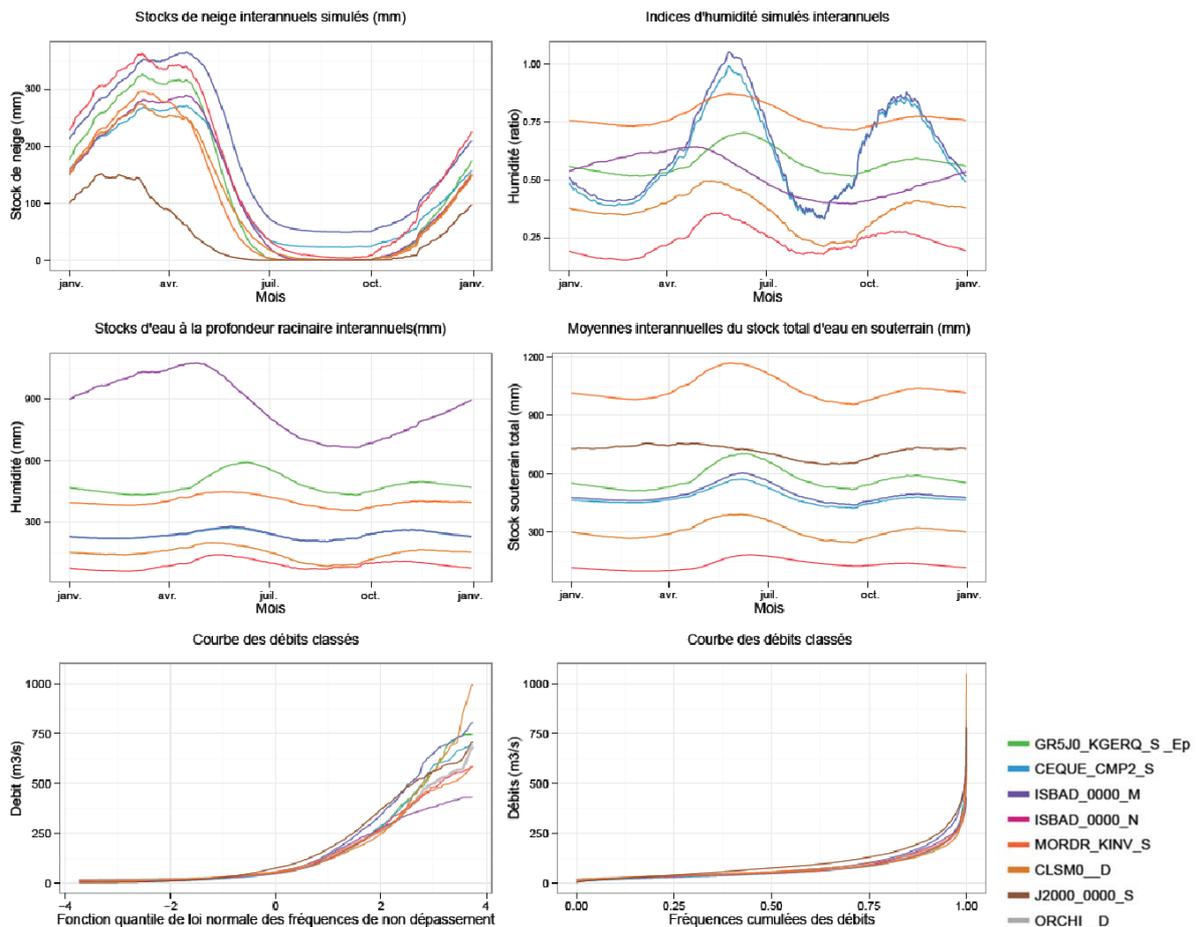


Figure 34 : Variation moyenne interannuelle de plusieurs variables des modèles hydrologiques, et courbe des débits classés pour la Durance à Serre-Ponçon

Résultats globaux sur l'ensemble des stations

La Figure 35 présente les scores médians des modèles sur l'ensemble des stations du bassin de la Durance. On voit que les modèles GR5J et MORDOR sont les plus performants, suivis d'Isba-Durance et CEQUEAU. MORDOR paraît plus performant que GR5J sur les basses eaux. Néanmoins, aucun modèle ne parvient à montrer une bonne performance sur l'ensemble des critères étudiés. Les basses eaux apparaissent globalement comme la gamme de débit sur laquelle les modèles ont le plus de difficulté.

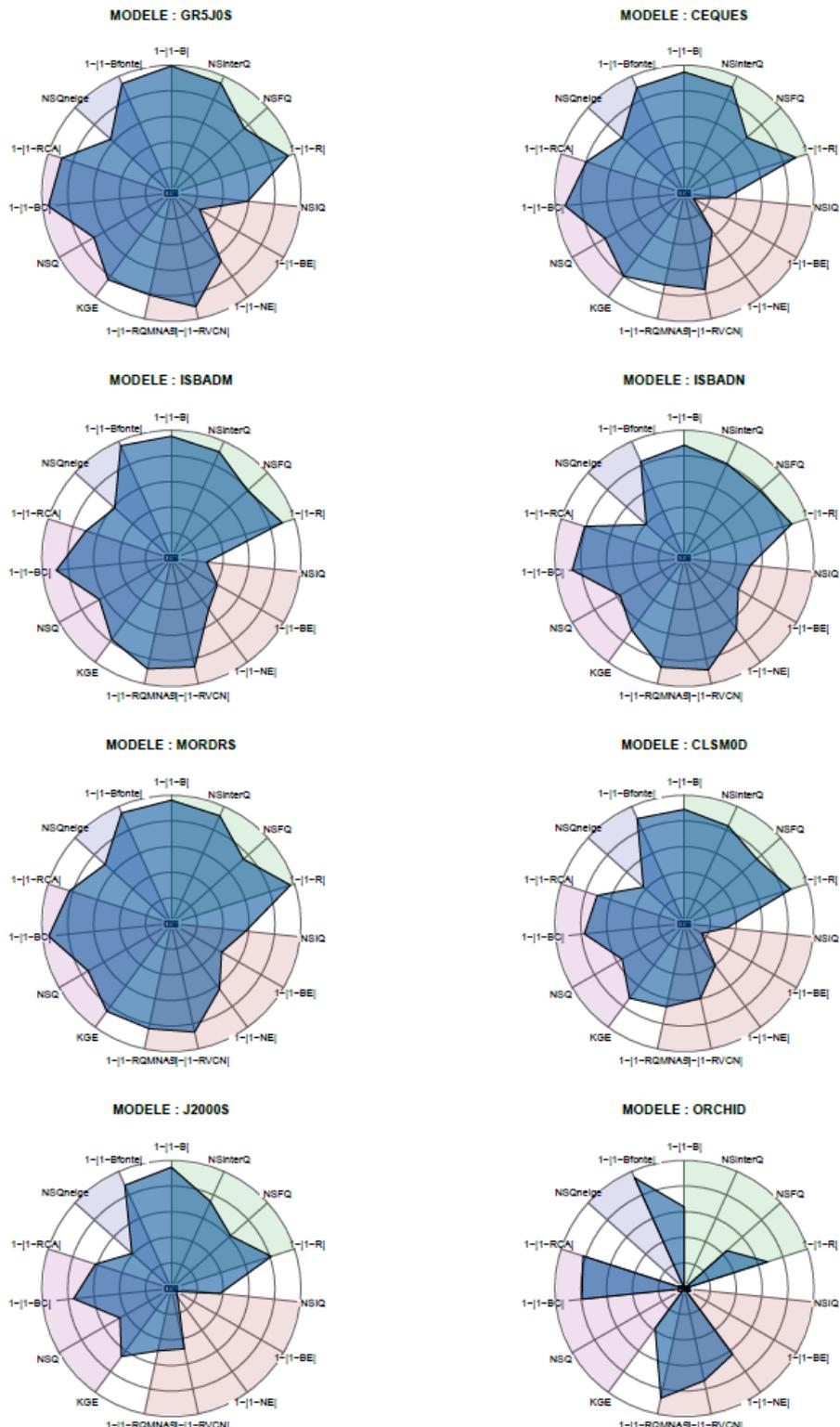


Figure 35 : Performances médianes des modèles pour l'ensemble des stations du bassin de la Durance

Les Figure 36 et Figure 37 montrent les scores de Nash-Sutcliffe respectivement sur les débits (NSQ) et l'inverse des débits (NSI/Q) pour chacun des modèles et pour chacune des stations pour lesquelles ces modèles ont fourni des simulations. Nous retrouvons la plus grande difficulté des modèles à obtenir de bonnes performances sur les basses eaux que sur les hautes eaux. L'hétérogénéité spatiale des résultats est manifeste et aucune structure ne semble se dégager.

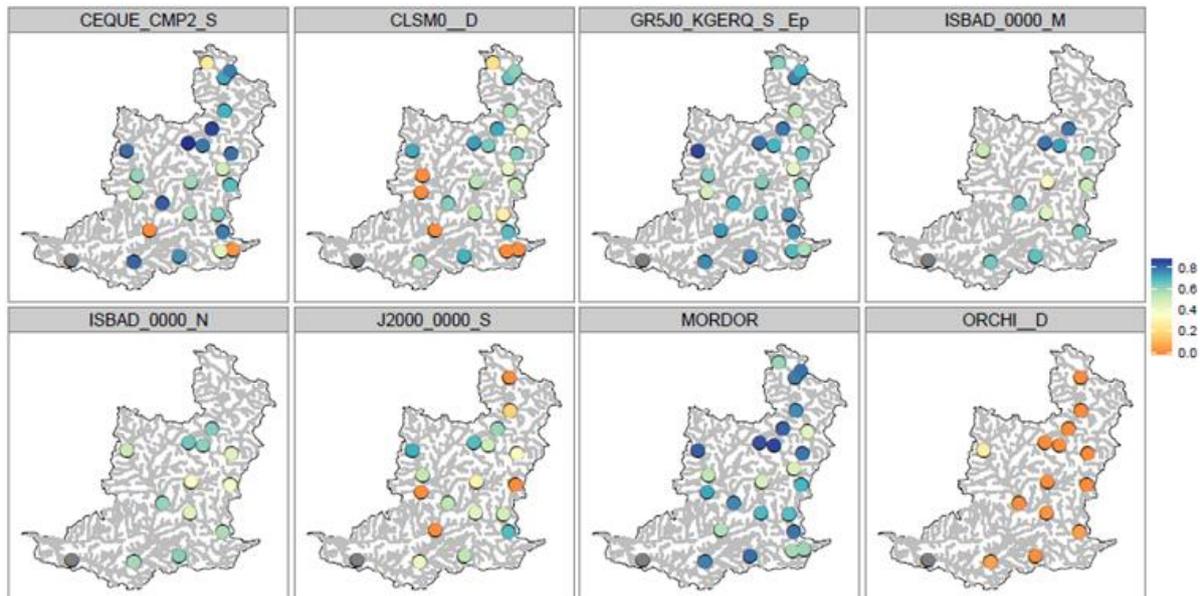


Figure 36 : Score de Nash-Sutcliffe sur les débits (NSQ) aux différents points d'évaluation

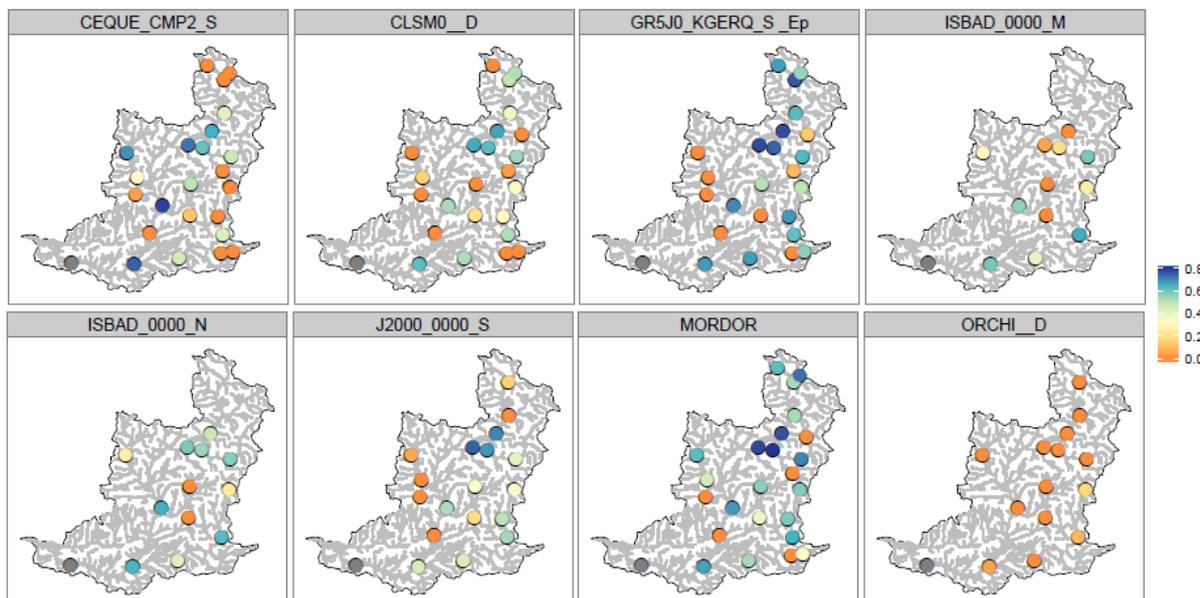


Figure 37 : Score de Nash-Sutcliffe sur l'inverse des débits (NSI/Q) aux différents points d'évaluation

Ces analyses montrent qu'il peut exister des différences notables entre modèles sur les bassins analysés. Les modalités d'application des modèles (forçage différent pour Isba-Durance, par exemple) peuvent contribuer à ces différences. L'analyse des variables internes des différents modèles permet en partie de comprendre les origines des différences de simulation. Aucun des modèles ne semble meilleur que les autres sur l'ensemble des critères ou des stations, ce qui rejoint les conclusions de précédents exercices de comparaison. Ce résultat est en partie la conséquence d'absence de variable de contrôle en dehors du débit à l'exutoire.

Analyse des résultats sur des périodes contrastées

Analyser le comportement des modèles sur des périodes contrastées permet de connaître leur capacité à s'adapter à des changements climatiques. C'est ce qui est présenté dans cette section. Les modèles GR5J, CLSM, CEQUEAU et MORDOR ont été calés sur les périodes contrastées qui sont détaillées dans le Tableau 10. Cela rend possible l'analyse de l'évolution des performances des modèles selon le calage effectué, et selon la période d'évaluation. La représentation de l'évolution du KGE selon ces périodes d'évaluation et de calage est illustrée à la Figure 38 pour le bassin de la Durance à Serre-Ponçon. Notons sur cette figure que les modèles J2000, Isba-Durance et ORCHIDEE, ne faisant pas l'objet d'un calage, sont représentés comme ayant une performance identique pour toutes les périodes de calage.

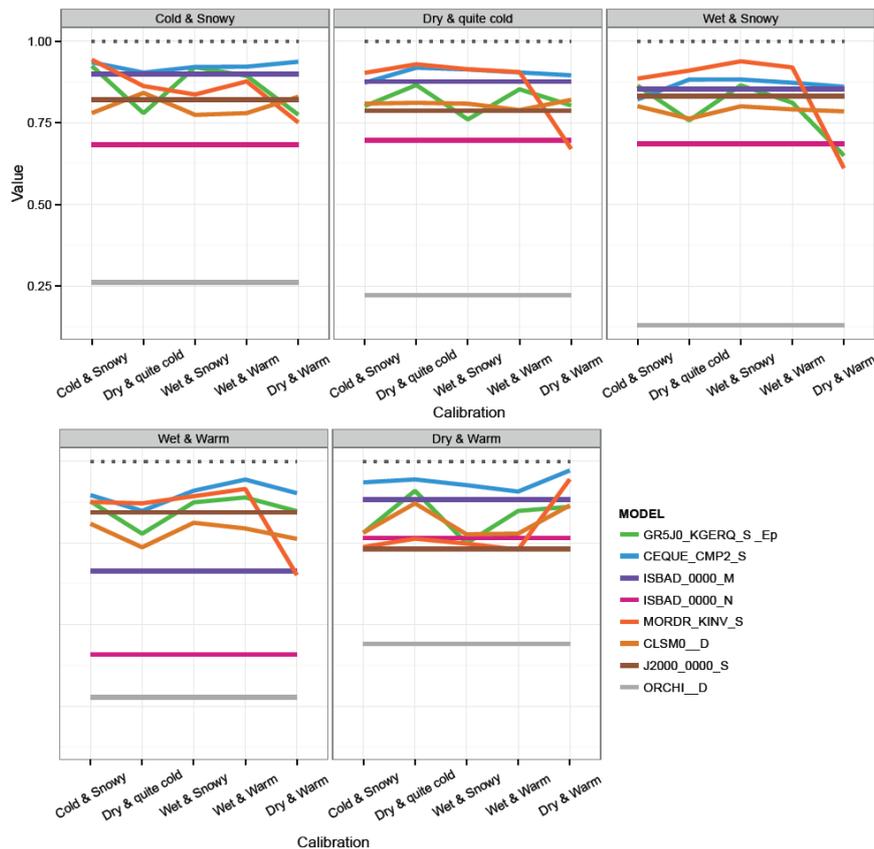


Figure 38 : Evaluation du KGE sur des périodes contrastées pour la Durance à Serre-Ponçon

Nous retrouvons sur la Figure 38 la faible performance d'ORCHIDEE, ainsi que, dans une moindre mesure, celle d'Isba-Durance utilisant le forçage N. Les performances générales des modèles varient selon la période d'évaluation : la période chaude et humide, par exemple, montre les plus faibles performances pour la plupart des modèles. La hiérarchie des modèles fluctue en fonction des périodes d'évaluation : ainsi, CEQUEAU, qui montre les meilleures performances pour la période chaude et sèche, est surpassé par CLSM sur la période humide et neigeuse. Les fluctuations en fonction de la période de calage utilisée sont, elles aussi, importantes : de manière générale, le calage réalisé sur la période chaude et sèche, qui est représenté à droite de chaque cadre, montre une moindre performance. Ceci n'est évidemment pas le cas lorsque l'évaluation a lieu sur cette même période. Cela montre que les paramètres obtenus sur cette période ne sont pas transférables sur d'autres périodes, les modèles ne sont alors pas robustes. Notons cependant que CEQUEAU présente des amplitudes de variations de performances plus faibles que les autres modèles selon la période de calage.

Les Figure 39 et Figure 40 comparent les performances des modèles sur l'ensemble des stations de la Durance. Il est évident, et conforme avec les conclusions précédentes, que le modèle ORCHIDEE semble le moins performant, alors que les modèles CEQUEAU, MORDOR et GR5J sont globalement les plus performants. La hiérarchie entre les modèles, et entre les périodes de calage et d'évaluation, semble la même sur ces deux figures (débits forts et débits faibles). Les contrastes entre périodes sont au final assez peu marqués. Il faut noter toutefois que sur la période chaude et sèche, MORDOR montre ses plus faibles performances

relativement aux autres modèles, alors qu'au contraire CEQUEAU est plus performant. En revanche, lorsqu'il est calé sur la période chaude et sèche, MORDOR a des performances satisfaisantes sur cette période, mais moins satisfaisante sur les autres.

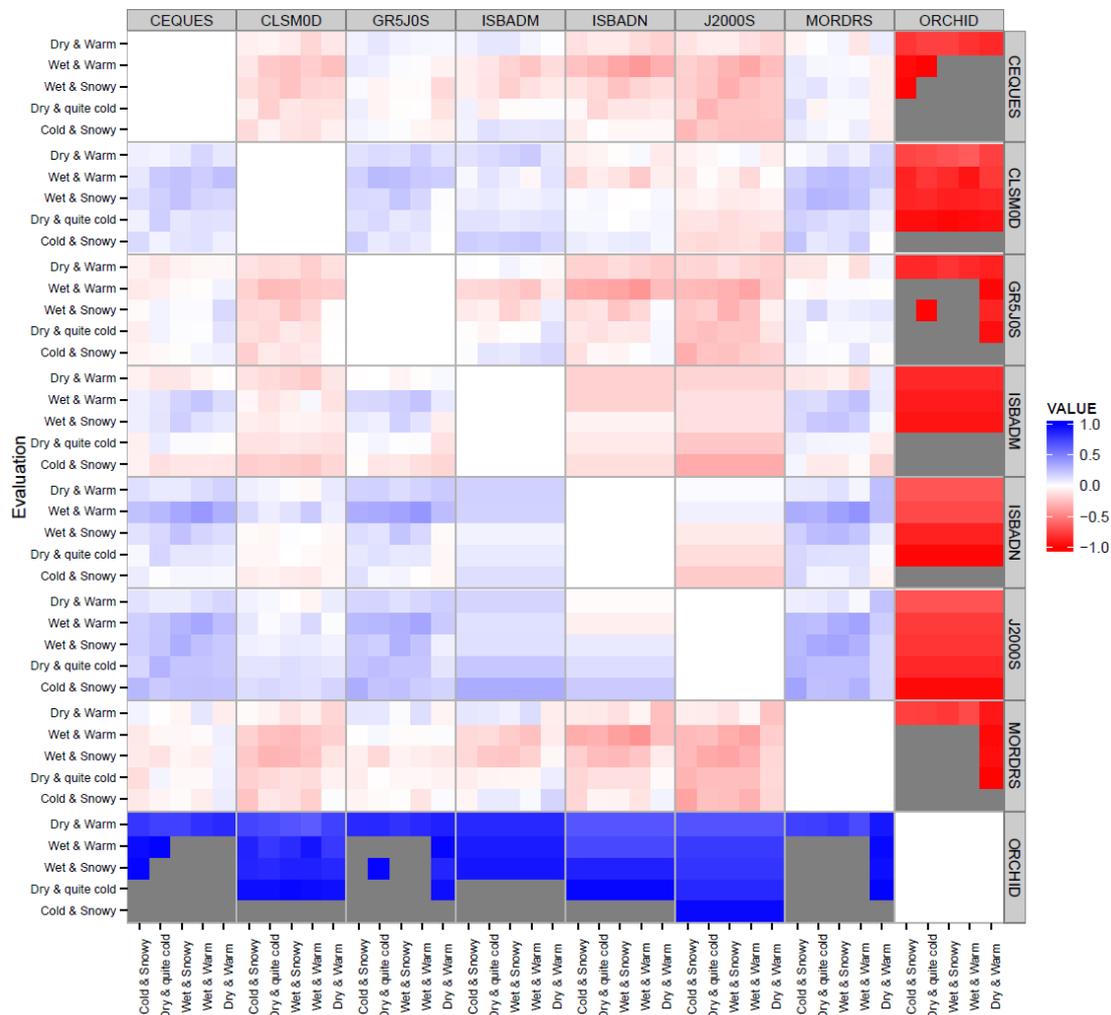


Figure 39 : Différences de performance en Nash-Sutcliffe sur les débits selon la période de calage et d'évaluation. Médiane de l'ensemble des stations. Une valeur positive, en bleu, indique que le modèle en colonne est plus performant que le modèle en ligne.

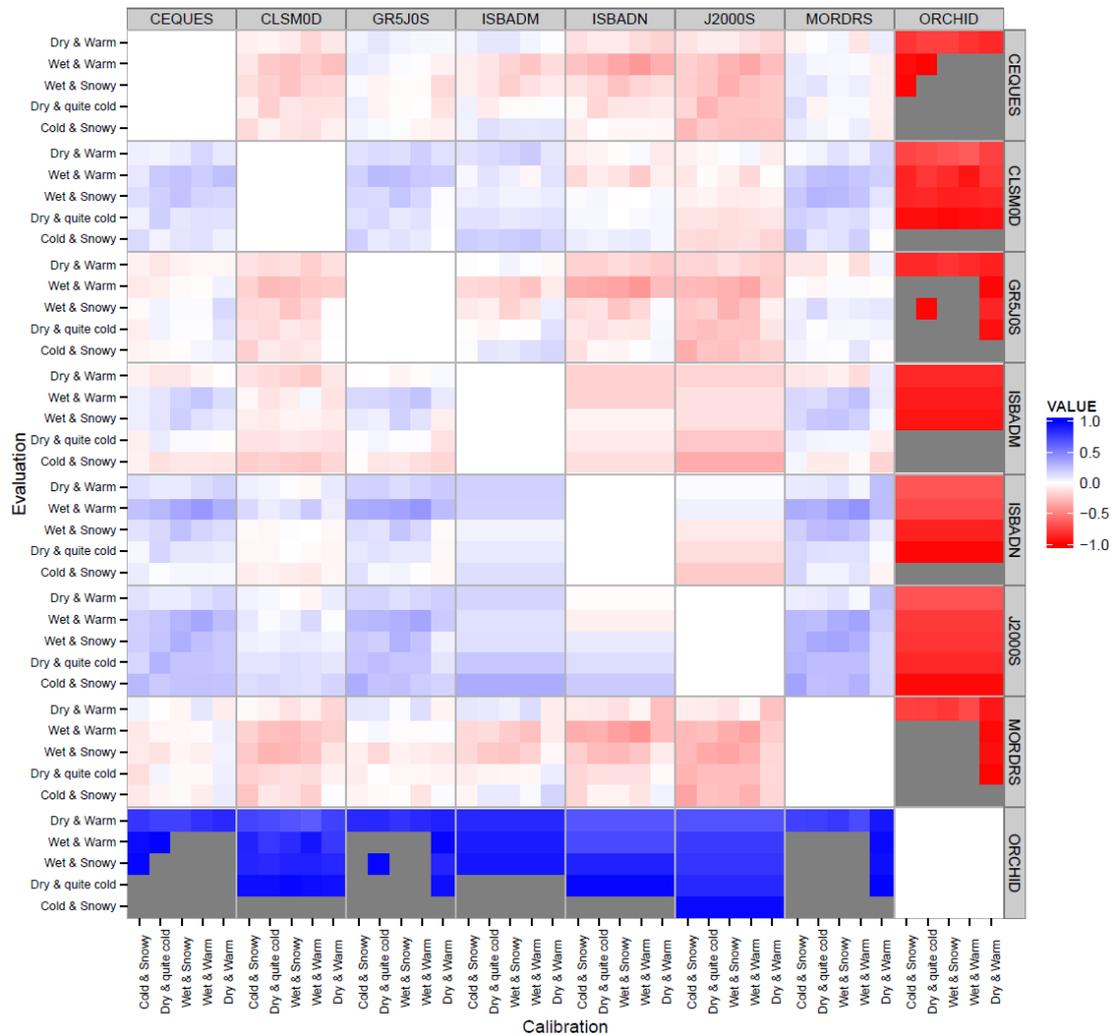


Figure 40: Comme pour la Figure 39 mais pour avec un critère de Nash-Sutcliffe sur l'inverse des débits

Analyse de la similarité des débits et variables internes des modèles

Afin de mieux comprendre le comportement des modèles en contexte de projections climatiques, nous avons analysé la proximité des simulations fournies par les modèles en temps présent. Cette comparaison, effectuée sur les débits ainsi que sur certaines variables internes des modèles, a été effectuée en dehors de toute comparaison aux observations. Comme nous pouvons le constater sur la Figure 34, certaines variables comportent des ordres de grandeur très différents selon le modèle considéré (par exemple, l'humidité du sol), voire parfois des dynamiques différentes, mais ce n'est pas forcément le cas pour les débits ou le stock neigeux.

Pour analyser la similarité entre les variables des modèles, les séries journalières simulées entre 1980 et 2009 ont été utilisées. Les simulations issues des calages sur P1 ont été utilisées, sauf pour les modèles non calés, pour lesquels nous avons évidemment choisi de prendre l'unique simulation disponible. Le critère de Nash-Sutcliffe a été utilisé pour comparer les modèles, comme indiqué dans le Tableau 14. Ici, les variables V sont les débits journaliers sont normés par la moyenne interannuelle. Les scores de chaque ligne sont ainsi comparés à la même référence, alors que les scores de chaque colonne permettent de détecter des comportements atypiques. Nous allons présenter ces résultats pour les débits, la neige, ainsi que l'évapotranspiration réelle.

	CEQUEAU	CLSM	GR5J	IsbaM	IsbaN	J2000	MORDOR	ORCHIDEE
CEQUEAU	1	NS_{12}	NS_{13}					
CLSM	NS_{21}	1						
GR5J	NS_{31}		1			NS_{ij}		
IsbaM				1				
IsbaN					1			
J2000						1		
MORDOR							1	
ORCHIDEE								1

avec $NS_{ij} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_j)^2}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V}_i)^2}$ où V_i représente la variable du modèle i , et V_j la variable du modèle j et n la longueur de la série

Tableau 14 : Matrice de similarité des modèles

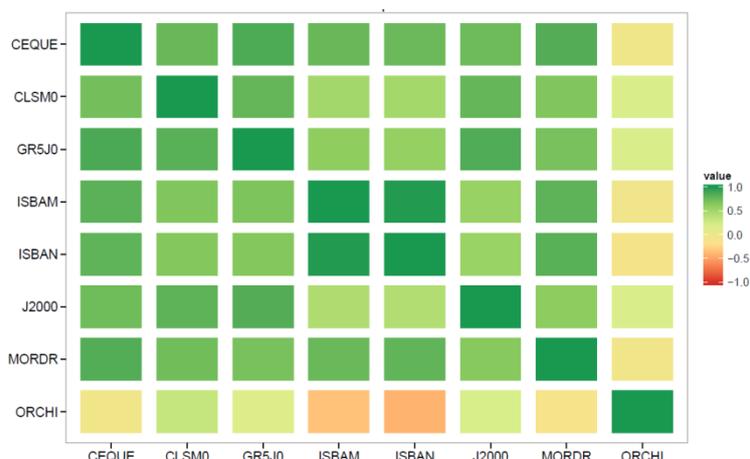


Figure 41 : Matrice de similarité pour les débits de la Durance à Serre-Ponçon

Nous avons représenté sur la Figure 41 cette matrice pour les débits de la Durance à Serre-Ponçon. La singularité d'ORCHIDEE se remarque aisément, conformément à l'allure de ses débits, sur la Figure 33. Nous pouvons observer certaines similarités : GR5J ressemble à CEQUEAU, J2000 et CLSM ; les modèles Isba-Durance M et N, en plus d'être proches, ressemblent à MORDOR, et CEQUEAU ressemble à MORDOR. Pour la neige (Figure 42, gauche), les critères sont plus élevés grâce à la forte saisonnalité du manteau neigeux. En plus d'ORCHIDEE, seul le comportement atypique d'Isba-Durance N est notable. L'évapotranspiration réelle, en revanche, montre des résultats plus disparates (Figure 42, droite). Le comportement atypique de MORDOR et CLSM est notable. De plus, de fortes similarités sont observées entre GR5J, J2000 et CEQUEAU. L'utilisation commune à ces trois modèles de la formule d'évapotranspiration de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) pourrait être une explication à ces similarités.

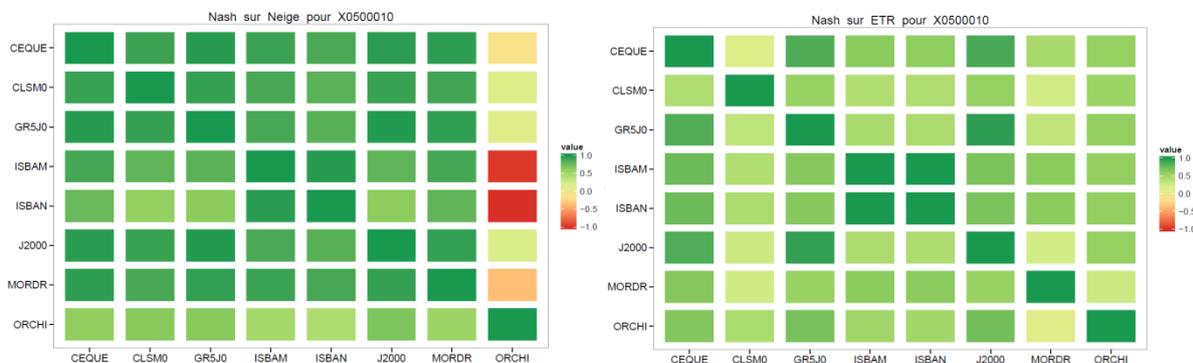


Figure 42 : Matrices de similarité pour la neige (gauche) et l'évapotranspiration réelle ETR (droite) de la Durance à Serre-Ponçon

L'examen des autres stations de contrôle pour les débits (graphes non montrés) confirme la similitude entre CEQUEAU et GR5J, ainsi que dans une moindre mesure entre CEQUEAU et Isba-Durance M et entre CLSM et J2000. Pour la neige, Isba-Durance N se démarque à nouveau, ainsi que MORDOR. Pour l'ETR, les résultats très disparates ainsi que les comportements atypiques de MORDOR et CLSM sont à nouveau observés.

Cette étude des similarités semble mettre en évidence une proximité entre les modèles GR5J, CEQUEAU et CLSM. Ceci montre que des modèles de conceptions différentes peuvent paraître proches en termes de représentation des flux d'eau sur le bassin versant, alors que l'on a aussi vu que des modèles de conceptions proches peuvent sembler assez différents. Par ailleurs, le comportement observé sur une station n'est pas nécessairement identique sur une autre. Cependant, cette étude ne nous indique pas quels modèles sont proches des états véritables, la seule observation disponible étant le débit. Un article relatif à cette étude de similarités des états des modèles est en préparation (Perrin *et al.*, *in prep.*).

Conclusion

Cette étude préalable à l'étude de l'impact du changement climatique sur le bassin de la Durance a permis d'établir un diagnostic des outils de modélisation hydrologique utilisés. En effet, ces outils comportent des incertitudes, qui auront un impact sur les conclusions des projections climatiques effectuées. Nous avons pu établir ici que tous les modèles ne produisent pas des simulations hydrologiques de qualité équivalente. De plus, la qualité des simulations est très variable selon les stations de mesure auxquelles on s'intéresse. Par ailleurs, la performance des modèles varie selon la période de calage utilisée pour l'optimisation des paramètres, mais aussi selon la période d'évaluation. Cela permet de juger de la capacité d'extrapolation des différents modèles.

Nous avons enfin essayé d'identifier des sources de comportement perfectible des modèles en jugeant de la similarité de chacun en ce qui concerne leurs variables internes. Cependant, aucune source d'amélioration évidente n'a pu être mise en avant grâce à ce travail, en raison de l'absence d'observations des variables correspondantes. En revanche, les travaux préalables sur les modèles tels que CLSM et J2000 ont permis des améliorations qui ont bénéficié au projet.

Nous avons pu identifier de nos analyses deux principaux verrous au niveau des performances des modèles : sur les étiages, et sur la neige. Ces deux points seront à améliorer dans les études futures. L'amélioration des étiages sera probablement à mettre en lien avec l'hydrométrie des étiages et la naturalisation des débits, qu'il conviendra d'améliorer, pour comparer les différentes sources d'incertitudes. En ce qui concerne les modèles de neige, l'utilisation accrue de nouvelles sources de données d'origine satellite, combinée à l'utilisation optimale de mesures in situ, pourront mener à des améliorations de la représentation quantitative et temporelle de la lame de fonte. Enfin, il pourrait être intéressant de mettre en lien la similarité des états entre modèles avec la similarité éventuelle des débits entre modèles, et d'étudier d'éventuelles similarités décalées dans le temps. Il serait alors intéressant de voir si un modèle plus performant peut d'une certaine manière aider un modèle moins performant à améliorer ses performances.

2. Modélisation des besoins pour l'agriculture

Trois modélisations de complexités variées ont été utilisées, ce qui permettra, comme pour les modèles hydrologiques, d'appréhender les incertitudes sur les résultats.

Five-CoRe (*Farm Irrigation Volumes Estimation according to Constraints and Requirements*) est un logiciel d'estimation des besoins théoriques en eau d'irrigation à l'échelle d'une exploitation ou d'un ensemble de parcelles (Chopart *et al.*, 2007). Il s'agit d'un modèle de bilan hydrique journalier utilisant en entrée, la pluie et l'évapotranspiration de référence ET_0 . L'évapotranspiration réelle (ETR) est ensuite calculée à l'aide de coefficients culturaux et du calcul du bilan hydrique des cultures. Five-CoRe permet également de modéliser les grandes caractéristiques des itinéraires techniques et des pratiques des agriculteurs. Le jour où l'irrigation est possible, la dose est calculée en fonction du taux de remplissage du réservoir en eau du sol. Les caractéristiques de chaque parcelle simulée sont réparties en trois catégories d'information :

- les paramètres liés à la parcelle, au cycle cultural et au calendrier de simulation ;
- les paramètres liés au pilotage de l'irrigation: système (goutte-à-goutte ou aspersion), fréquence et efficacité d'irrigation, taux de remplissage de la réserve utile du sol (RU) par l'irrigation et seuil de déclenchement de l'irrigation ;
- les paramètres liés au bilan hydrique et au compartiment sol : coefficient cultural des cultures (K_c), côte de drainage, front d'humectation et état de la réserve en eau du sol à l'état initial, et évolution du front racinaire.

MODIC (*Modèle de Demande en eau d'Irrigation des Cultures*) est un modèle classique de bilan hydrique à un horizon, s'appuyant sur la philosophie du modèle hydrologique CEQUEAU (Sauquet *et al.*, 2010 ; Braud *et al.*, 2014a) qui estime, au pas de temps journalier, le besoin en eau d'irrigation des cultures. Il utilise en entrée des données journalières de pluie, d' ET_0 et de température. Une évapotranspiration maximale par culture est estimée en fonction de coefficients culturaux dont le calcul prend en compte la fraction de sol nu et le mode d'irrigation (aspersion, goutte-à-goutte, gravitaire). Deux versions du modèle ont été utilisées dans le projet : la première (MODIC_CF) considère un cycle phénologique fixe et identique d'une année à l'autre (option dite « cycle fixe »). L'autre version simule la croissance de la végétation par un modèle de type degré jour (MODIC_DJ) ; dans la suite nous la désignerons sous le vocable « cycle variable ». Le modèle utilise en entrée une réserve utile maximale qui dépend de la profondeur racinaire, elle-même variable au cours du temps. Les pratiques des agriculteurs peuvent aussi être prises en compte.

SISPAT (*Simple Soil Plant Atmosphere Transfer*) est un modèle de simulation 1D des transferts couplés d'eau et d'énergie dans le continuum sol – végétation (ou sol nu) – atmosphère à l'échelle de la parcelle. Le modèle est décrit en détail dans Braud *et al.* (1995) et Braud (2000, 2002).

Le modèle SISPAT est forcé par des variables climatiques (rayonnement solaire et grande longueur d'ondes incidents, température et humidité spécifique de l'air, vitesse du vent, précipitations) avec un pas de temps inférieur à l'heure. Il opère un couplage des transferts d'eau et de chaleur dans le sol, incluant les phases liquide et vapeur (Milly, 1982) et un terme puits pour l'extraction racinaire (Federer, 1979). Il peut prendre en compte un sol verticalement hétérogène, constitué de plusieurs horizons de sol. Il calcule deux bilans d'énergie: l'un pour le sol nu, l'autre pour le couvert végétal. Les transferts d'eau et de chaleur entre le sol, la végétation et l'atmosphère ainsi que l'extraction de l'eau du sol par les racines suivent une analogie électrique. La résistance stomatique est décrite comme une fonction du déficit de pression de vapeur, du rayonnement incident et du potentiel foliaire⁸.

L'évolution de la végétation est prise en considération avec la spécification des variables suivantes : la hauteur de la végétation, l'indice foliaire (LAI) et les profils racinaires. Ces données sont interpolées à un pas de temps journalier.

Le modèle requiert, pour chaque horizon de sol, des informations sur les propriétés hydrodynamiques et thermiques du sol telles que les courbes de rétention, de conductivité hydraulique et de conductivité thermique en fonction de la teneur en eau.

⁸ Le potentiel foliaire traduit l'état de liaison de l'eau à l'intérieur des tissus végétaux. La plante transpire sans difficulté lorsque sa valeur absolue est faible (inférieure à 5 bars). En revanche lorsque le potentiel est élevé (au-delà de 10 bars), des mécanismes de régulation provoquent la fermeture des stomates (Heller *et al.*, 1991).

Le modèle fournit l'évolution temporelle des profils de pression, teneur en eau et température dans le sol, ainsi que les flux de surface (rayonnement net, flux de chaleur dans le sol, flux de chaleur latente et sensible) pour le sol et la végétation. Il distingue aussi l'évaporation du sol, la transpiration des végétaux et l'interception de la pluie par la végétation. Il est possible de calculer le bilan hydrique d'une parcelle.

Lors de l'application à la région PACA, les informations sur les sols (profondeurs des horizons, texture du sol, teneur en éléments grossiers) ont été déduites de la base de données sol IGCS PACA (section « Données relatives aux usages », page 33) et les paramètres décrivant les propriétés hydrodynamiques des sols (courbes de rétention et de conductivité hydraulique) ont été déduites de la texture et de la porosité à l'aide de fonctions de pédo-transfert (Brackensieck *et al.*, 1981 ; Rawls et Brackensieck, 1985). Pour la végétation, des cycles moyens interannuels, déduits de la base ECOCLIMAP (Faroux *et al.*, 2013) et/ou du modèle ANSWERS (Beasley et Hugins, 1991) ont été utilisés. Une évaluation de la pertinence de la modélisation avec cette spécification des paramètres a été réalisée en comparant les teneurs en eau simulées à celles mesurées sur des stations suivies par le CIRAME et par la SCP avec des résultats satisfaisants (Braud *et al.*, 2013, 2014b).

Le projet R²D² 2050 a été l'opportunité d'enrichir le modèle SiSPAT :

- par la prise en compte des éléments grossiers dans le sol (Tilmant, 2011). Cette représentation a été évaluée grâce à de séries de flux de surface et de profils de teneur en eau et de température collectées sur une parcelle de foin de Crau par l'UMR EMMAH d'Avignon ;
- par l'adjonction d'un module de calcul des besoins d'irrigation. Deux options ont été comparées par Braud *et al.* (2013). Le mode de calcul des besoins en irrigation finalement retenu ici s'appuie sur la différence entre une transpiration maximale correspondant à une résistance stomatique minimale et la transpiration réelle a , à laquelle s'ajoute l'évaporation du sol nu.

Comparaison des modèles sur la période de référence 1980-2009 sur des cultures emblématiques

Un exercice de comparaison des trois modèles sur neuf cultures représentatives de la région PACA a été conduit sur la période 1980-2009. Les neuf cultures ont été sélectionnées sur la base de l'expertise de la SCP (SCP, 2014), qui a regroupé la diversité des cultures en dix grandes classes⁹ au sein desquelles une culture représentative a été sélectionnée. Puis, le canton où la culture était la plus présente, a été sélectionné (Figure 43). La culture type retenue, la classe associée, les cantons correspondants et le type d'irrigation considérés sont finalement reportés dans le Tableau 15.

Les données climatiques sur la période 1980-2009 sont celles de la réanalyse DuO (Magand *et al.*, 2014b). Les forçages horaires ont été moyennés à l'échelle des cantons et agrégés au pas de temps journalier pour MODIC et Five-CoRe. Une évapotranspiration de référence ET_0 a été calculée à pas de temps horaire selon la méthode préconisée par la FAO (Allen *et al.*, 1998) et agrégée au pas de temps journalier pour ces deux modèles. SiSPAT exploite directement les forçages horaires DuO et n'a pas besoin de l' ET_0 puisqu'il résout directement le bilan d'énergie.

Pour Five-CoRe, la réserve utile (RU) est fixée à 1.5 mm/cm sol sauf pour la vigne, le cerisier et la prairie où elle vaut 1 mm/cm sol. Les coefficients culturaux (Cherel, 2010) sont identiques pour MODIC et Five-CoRe, ainsi que les profondeurs racinaires et, dans la mesure du possible, les réserves utiles maximales. A noter que pour FIVE-Core, les paramètres du modèle (seuil de déclenchement de l'irrigation et taux de remplissage du réservoir) ont été ajustés, pour chaque culture, pour être cohérents avec les pratiques constatées, telles que fournies par des enquêtes de terrain. En effet, prendre des valeurs théoriques, identiques pour chaque culture/mode d'irrigation conduisait à des valeurs de doses irréalistes. Comme indiqué plus haut, les paramètres nécessaires pour SiSPAT ont été déduits des bases de données sol et végétation. Les paramètres sont détaillés par Braud *et al.* (2014a).

⁹ Seule la classe des productions horticoles n'a pas fait l'objet de simulations des besoins.

Classe	Culture emblématique	Canton	Mode d'irrigation
Les vignes et les oliveraies : vigne de cuve (AOC, vin de pays), raisin de table et oliveraies	<i>Vigne de cuve</i>	Pélissanne	goutte-à-goutte
Le maïs et les cultures de semence (essentiellement maïs semence et betterave)	<i>Maïs semence</i>	Les Mées	aspersion
Les autres grandes cultures de printemps : oléagineux (sauf colza), protéagineux et sorgho. Le tournesol est majoritaire en PACA	<i>Tournesol</i>	Aix-en-Provence	aspersion
Les grandes cultures d'hiver : céréales d'hiver (sauf maïs grain/semence, sorgho et riz), colza et plantes aromatiques. Le blé dur, production prépondérante de la filière « grandes cultures » est très présent sur les plaines du bas Rhône et les plateaux bordiers de la Moyenne Durance	<i>Blé dur</i>	Rians	aspersion
Les légumes : le territoire présente une grande diversité de productions maraichères et de rotations. L'hypothèse est faite que 40% des surfaces sont occupées par des rotations de salades (2 rotations de 60 jours étalées sur l'année), 30% par une culture de tomate, et 30% une culture de melon (50% de culture précoce sous chenille et 50% de plein champ) (Agreste, 2008)	<i>Légumes (rotation salades, tomates, melons).</i>	Pernes les Fontaines	goutte-à-goutte
Les pommes de terre	<i>Pommes de terre (50% primeurs, 50% en conservation sur la base des ratios régionaux de 2008)</i>	St-Rémy de Provence	aspersion
Les vergers hors Luberon : vergers (sauf oliveraies)	<i>Pommier</i>	Orgon	aspersion
Les vergers du Luberon : vergers (sauf oliveraies)	<i>Cerisier</i>	Cavaillon	goutte-à-goutte
Les cultures fourragères : fourrages et prairies (hors STH)	<i>Prairie temporaire</i>	Gap	aspersion

Tableau 15 : Regroupements en classes de cultures irriguées et canton choisi identifié pour la comparaison

- Cantons intercomparaison calculs d'irrigation
- Aix-en-Provence (Tournesol- Aspersion)
 - Cavaillon (Cerisier - GàG)
 - Gap (Prairie - Aspersion)
 - Les Mées (Maïs - Aspersion)
 - Orgon (Pommier - Aspersion)
 - Pélissanne (Vigne - GàG)
 - Pernes-les-Fontaines (Légumes- GàG)
 - Rians (Blé dur - Aspersion)
 - St-Rémy-de-Provence (PdT - Aspersion)
- BV_Durance
-
- Cantons PACA
-
- Altitude (MNT IGN) (m)
- 3538
 - 16

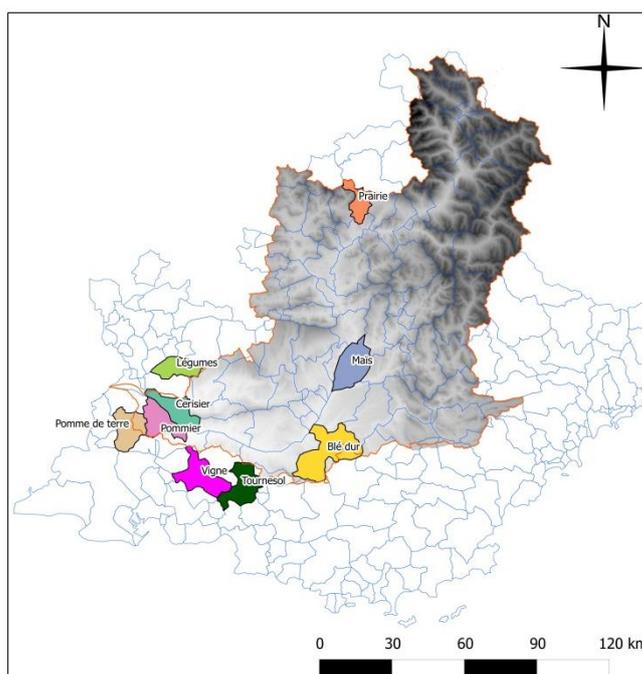


Figure 43 : Localisation des cantons utilisés pour la comparaison réalisée sur les neuf cultures en région PACA

Les résultats de cette comparaison des irrigations annuelles calculées sont présentés sur la Figure 44, où les boxplots sont calculés à partir des 30 valeurs annuelles de la période d'étude. Il ressort que les différences entre modèles sont importantes, mais il y a généralement trois estimations sur quatre assez proches. Les résultats avec les deux options de MODIC sont assez similaires, même si l'approche « cycle variable » conduit à des valeurs en général un peu plus faibles que l'approche « cycle fixe ». En particulier, les valeurs calculées par SiSPAT pour la vigne, le cerisier et les légumes (goutte-à-goutte) sont très élevées, ainsi que, dans une moindre mesure la valeur pour le pommier. Ceci est lié aux hypothèses du modèle (« big leaf » model) où la végétation surmonte systématiquement le sol nu, ce qui n'est pas le cas dans les cultures en rang. De plus, en goutte-à-goutte, l'irrigation est apportée sur toute la surface de sol nu et pas uniquement au niveau de la végétation. Le modèle devrait donc être amélioré pour mieux représenter ce type d'irrigation, par exemple en utilisant une approche de type « mosaïque », comme dans Boulet *et al.* (1999).

Mentionnons aussi que, hormis les valeurs un peu élevées de SiSPAT mentionnées précédemment, les valeurs obtenues sont cohérentes avec les valeurs de référence sur la zone. Les trois modèles sont aussi cohérents dans l'identification des années à forte (resp. faible) demande (Braud *et al.*, 2014a).

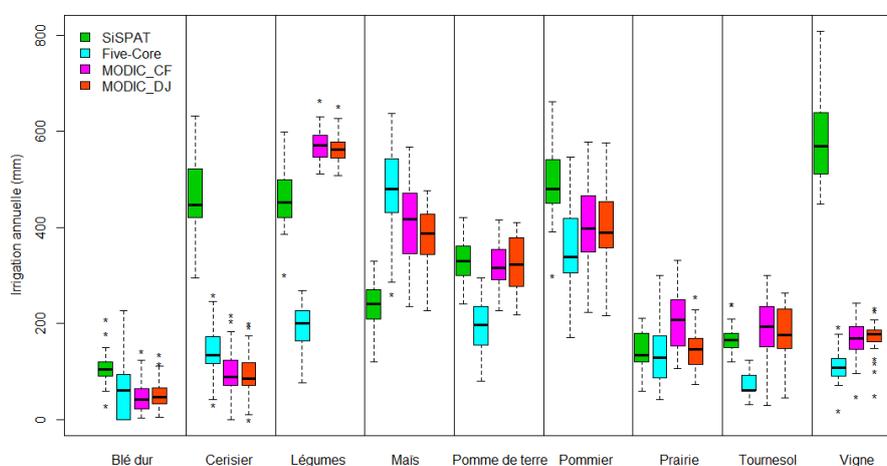


Figure 44 : Boxplots des irrigations annuelles calculées par les quatre modèles pour les neuf cultures sur la période 1980-2009. Les boxplots sont calculés avec les résultats des 30 années de simulations. Ils fournissent la médiane (trait horizontal épais) et les quantiles 25 et 75%. Les pointillés marquent l'intervalle à 95%

Sur ces simulations, nous constatons que la variabilité des estimations entre les différents modèles est importante, et qu'il y a aussi une forte variabilité interannuelle de l'irrigation (simulée par les quatre modèles). Il y a donc une forte incertitude sur les valeurs d'irrigation estimées en temps présent lorsque les modèles simulent les besoins théoriques des plantes.

Pour les simulations à l'échelle de grands territoires et plus à l'échelle de la parcelle, seuls les modèles Five-CoRe (concession régionale du Canal de Provence et concession de Vaucluse) et MODIC (ensemble du territoire) pu être mis en œuvre. Dans ces simulations, les pratiques des agriculteurs sont prises en compte, ce qui conduit à l'ajustement de certains paramètres afin que les prélèvements totaux correspondent aux données de prélèvements SCP et/ou issues des redevances de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.

Simulations des chroniques de consommations en eau pour l'irrigation sur les réseaux de la SCP (concession régionale du Canal de Provence et concession de Vaucluse)

Il faut noter, en préambule, que les volumes d'eau agricole consommés sur les territoires alimentés par le Canal de Provence constituent une faible part des volumes prélevés pour l'agriculture sur les ressources Durance-Verdon. Ils représentent en moyenne 36.5 Mm³ par an sur la période 2000-2009, à comparer aux 1500 Mm³ par an prélevés par les canaux gravitaires de Basse Durance.

Le territoire concerné (Figure 45) a été découpé en 17 bassins agricoles de manière à regrouper la diversité des exploitations agricoles desservies suivant une segmentation en bassins homogènes par rapport aux types d'exploitations et aux productions rencontrées. Ces bassins agricoles issus d'une étude antérieure sur la base

du RGA2000 (Thiers, 2007) rassemblent des communes dont les combinaisons de productions et les conditions naturelles sont proches.

Cette section est une synthèse des éléments présentés dans (Société du Canal de Provence, 2014).

Le calage de Five-CoRe et du modèle des besoins en eau totaux sur le territoire s'est déroulé de manière itérative :

- la définition des besoins unitaires à partir de la définition des paramètres de la demande à la parcelle par culture et par bassin agricole ;
- le cumul de ces besoins unitaires pour l'assolement de chaque bassin recomposé à partir des données d'assolements des différents RGA (1979, 1988, 2000 et 2010) retraités pour correspondre aux périmètres de la SCP ;
- et enfin, en ajustant les taux de recours sur surfaces équipées sur le périmètre SCP pour reproduire au mieux les volumes annuels en eau d'irrigation livrées.

Le paramétrage initial de Five-CoRe (besoins unitaires), établi à partir d'un travail bibliographique (Cherel, 2010), a été amélioré en fonction de la connaissance des pratiques d'irrigation sur le territoire. Les modifications concernent principalement les paramètres liés au pilotage de l'irrigation et notamment le taux de remplissage de la réserve utile (RU) et le seuil de déclenchement de l'irrigation. Ces paramètres, définis en pourcent de la RU, désignent respectivement le taux maximal de remplissage de la réserve utile par une irrigation et le seuil à partir duquel une dose d'irrigation est déclenchée. La combinaison de ces deux informations détermine le degré de satisfaction du besoin en eau d'irrigation des plantes. Les cultures étant rarement irriguées à l'optimum, cela permet d'intégrer au modèle des pratiques d'irrigation plus réalistes.

Les caractéristiques du compartiment sol et des cultures, en termes de cycle cultural et pilotage de l'irrigation, sont considérées comme homogènes sur le territoire.

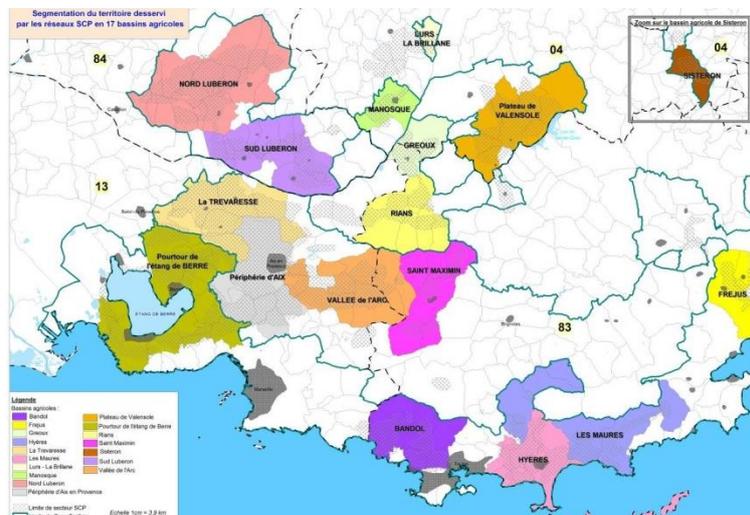


Figure 45 : Les bassins agricoles SCP (Thiers, 2007)

Les besoins en eau ont été estimés pour les neuf classes définies pour la comparaison (Tableau 15) auxquelles a été ajoutée la classe regroupant les productions horticoles (fleurs et pépinières ornementales). Pour cette dernière classe présente sur le littoral varois, il a été convenu de modéliser une irrigation avec des besoins fixés à l' ET_0 (maintien du niveau de remplissage du sol entre 95% et 100%) afin de minimiser le rôle des pluies, non effectives sous serres.

L'assolement décrivant l'importance relative des dix classes de cultures définies précédemment dans la SAU totale (SAU par classe de culture/SAU du bassin) a été déterminé pour chaque bassin, et sur la base des seules communes très largement et exclusivement desservies par la SCP. Les surfaces cultivées estimées à partir des données issues des différents RGA puis agrégées par bassin ont traitées afin de tenir compte de l'historique d'équipement des territoires. La méthodologie choisie conduit à une surface équipée cultivée recensée en

2010 d'environ 65 000 ha avec une prédominance de deux cultures majoritaires : les vignes et oliveraies (45% des surfaces) et les grandes cultures d'hiver (36% des surfaces).

Ce chiffre s'écarte de l'estimation faite pour l'année 2010 à partir du suivi effectué par la SCP (surface équipée d'environ 82 500 ha pour une surface exhaustive de près de 85 700 ha). Les raisons de cet écart pourraient être : la non prise en compte des STH et des surfaces en jachère ; la disparition des surfaces équipées qui ont perdu leur vocation agricole. Il convient de considérer avec prudence les superficies fourragères et les superficies des cultures peu représentées au sein d'un bassin.

Les taux de recours (la part des surfaces irriguées au moins une fois dans l'année) définis, pour une culture et un bassin agricole donnés, par le rapport « Surface irriguée / Surface équipée cultivée » ont été établis dans un premier temps à partir des données issues du RGA 2010. Ils se sont révélés parfois très hétérogènes et pas toujours cohérents d'un bassin à l'autre. En particulier dans le cas de la classe « vignes et oliviers », il a été fait l'hypothèse qu'au regard de la réglementation restrictive sur l'irrigation de la vigne de cuve, les déclarations de surfaces de vignes irriguées au moment du recensement agricole n'étaient pas exhaustives. De plus, sur certaines zones sur lesquelles une classe de culture est peu représentée, un agriculteur irrigant est susceptible d'avoir une influence forte sur le taux ; enfin le secret statistique a pu fausser certains résultats. Certains taux ont été retravaillés par bassin et par culture en se basant à la fois sur les données de consommations entre 2001 et 2009 (période sur laquelle les données sont disponibles) et sur la connaissance des pratiques d'irrigation sur le territoire. Les modifications ont été opérées de telle sorte que :

- l'écart entre les volumes annuels livrés et simulés par bassin soit inférieur ou égal à 15% ;
- les bassins aux profils initialement déterminés comme proches gardent une cohérence en termes de pratiques d'irrigation ;
- les volumes simulés agrégés (tous bassins confondus) restent fidèles aux volumes réellement consommés sur les concessions.

La Figure 46 illustre la répartition des surfaces irriguées en 2010 par classe de culture et montre les évolutions depuis 1979.

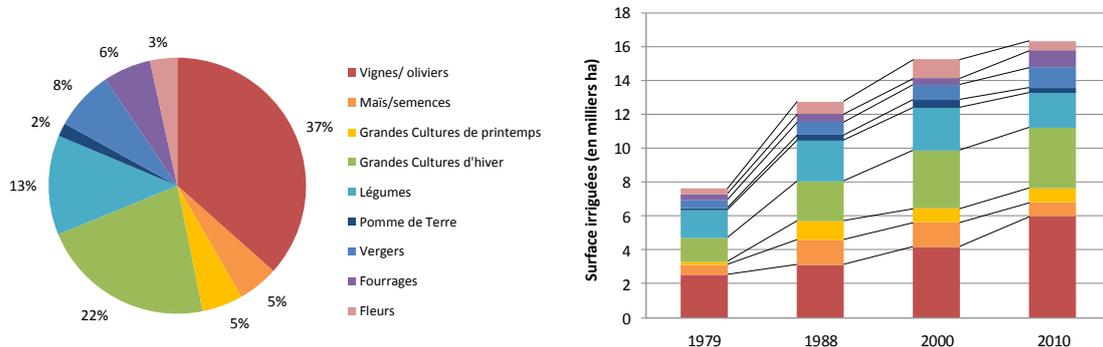


Figure 46 : Répartition des surfaces irriguées par assolement (exprimé en % par rapport à la totalité des surfaces irriguées en 2010 (gauche) et évolution des surfaces irriguées sur la concession SCP (Sources : RGA de 1979 à 2010, SCP)

À l'échelle du périmètre, les surfaces irriguées reconstituées en 2010 couvriraient environ 16 300 ha, soit 20% de l'ensemble des surfaces équipées la même année (82 500 ha). La vigne, qui représente 45% des surfaces cultivées en 2010 compte également pour près de 40% des surfaces irriguées. En revanche, les cultures d'hiver qui représentent plus d'un tiers de l'assolement en 2010 ne comptent que pour environ 20% des surfaces irriguées, au profit de cultures plus systématiquement irriguées telles que les légumes, les vergers, le maïs ou encore les fleurs.

Les surfaces irriguées auraient plus que doublé sur le périmètre entre 1979 et 2010. La part des surfaces irriguées sur les surfaces équipées serait stabilisée autour de 20% depuis 2000 (contre 27% en 1979). Alors que la SAU totale a diminué de 25% sur le périmètre d'étude entre 1979 et 2010, la surface équipée par la SCP a été multipliée par trois.

Deux tendances remarquables ont émergé : d'une part l'intensification de l'irrigation sur la vigne, les vergers et les fourrages, et d'autre part, la diminution de la part allouée au maraichage, aux fleurs et au maïs dans l'assolement irrigué. La proportion de grandes cultures d'hiver (blé dur) et de grandes cultures de printemps (tournesol) est, quant à elle, relativement stable.

Notons que pour cet exercice, en raison de l'absence de référence et de la difficulté d'estimer le recours à l'irrigation pour les différentes classes de cultures par le passé, les taux de recours calculés pour l'année 2000 ont été appliqués par défaut aux assolements de 1979 et 1988.

La Figure 47 traduit les consommations annuelles en eau d'irrigation simulées sur les concessions (tous bassins confondus) et les compare aux volumes réellement livrés à la borne par la SCP (statistiques rurales SCP).

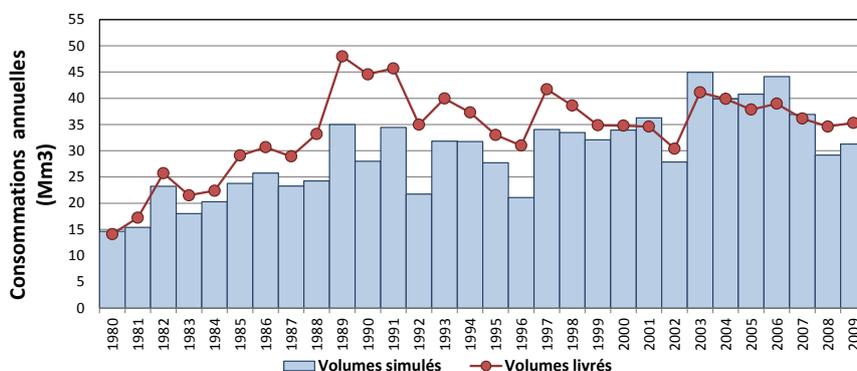


Figure 47 : Consommations annuelles en eau d'irrigation simulées et livrées sur les concessions SCP

Malgré une tendance à sous-estimer les volumes livrés entre 1980 et 2000, Five-CoRe, appliqué à l'assolement irrigué reconstitué, reproduit assez fidèlement les consommations en eau d'irrigation enregistrées sur les concessions desservies par la SCP (Figure 47), avec une erreur moyenne de 15% sur l'ensemble de la période simulée (1980-2009). Ce biais est du même ordre si les simulations sont examinées à l'échelle des différents bassins agricoles. La consommation annuelle moyenne en eau d'irrigation simulée sur l'ensemble du territoire entre 1980 et 2009 est de 29.5 Mm³ en année normale et atteint 35.3 Mm³ en année quinquennale sèche.

Pour les cultures irriguées par aspersion¹⁰, à partir de réseaux sous pression, l'analyse par assolement permet de distinguer :

- les cultures dont les besoins en eau sont les plus faibles telles que les vignes/oliviers, les grandes cultures de printemps et les grandes cultures d'hiver, dont la consommation annuelle moyenne en eau d'irrigation sur le territoire est inférieure à 1 000 m³/ha (100 mm) ;
- les cultures dont la consommation annuelle moyenne en eau d'irrigation sur le territoire est comprise entre 1 000 m³/ha (100 mm) et 2 000 m³/ha (200 mm). Il s'agit des légumes, des pommes de terre et des vergers de type cerisiers (Luberon) ;
- les cultures dont la consommation annuelle moyenne en eau d'irrigation sur le territoire est comprise entre 3 000 m³/ha (300 mm) et 4 000 m³/ha (400 mm). Il s'agit des cultures fourragères et des vergers de type pommiers (hors Luberon) ;
- les cultures dont les besoins en eau sont les plus importants telles que le maïs et les fleurs sous serres du littoral varois dont les consommations annuelles moyennes en eau d'irrigation sur le territoire avoisinent respectivement 5 500 m³/ha (550 mm) et 8 500 m³/ha (850 mm).

¹⁰ Dans le cas d'une irrigation de surface, les ordres de grandeur par cultures sont très différents, pouvant aller jusqu'à des doses de plus de 20 000 m³/ha dans le cas de prairies. Les volumes prélevés en irrigation de surface sont très largement supérieurs car ils intègrent le volume nécessaire au fonctionnement des canaux.

	Part de la superficie irriguée	Consommation (Mm ³)	
		Total	%
Vignes et oliviers	37%	5.9	20%
Maïs et semences	5%	4.6	16%
Autres GC de printemps	5%	0.4	1%
Grandes cultures d'hiver	22%	2.4	8%
Légumes	13%	4.2	15%
Pomme de Terre	2%	0.4	2%
Vergers	8%	2.8	10%
Cultures fourragères	6%	3.2	11%
Fleurs	3%	4.9	17%
Total	100%	28.8	100%

Tableau 16 : Part des cultures dans la modélisation des consommations en 2010

Comme le montre le Tableau 16, les postes de production les plus consommateurs en eau d'irrigation sur l'ensemble du périmètre du Canal de Provence sont la vigne (20%), les fleurs (17%), le maïs/semences (16%) et les légumes (15%). Bien que la consommation annuelle unitaire en eau d'irrigation de la vigne soit relativement faible (900 m³/ha en moyenne), sa forte implantation sur le territoire (près de 6 000 ha soit 37% des surfaces irriguées en 2010) en fait la première culture irriguée (20% de la consommation globale), soit 5.9 Mm³. Inversement, alors qu'elles ne représentent que 3% et 5% des surfaces irriguées, les fleurs et le maïs, dont les consommations annuelles moyennes sont les plus élevés (respectivement 8 500 m³/ha et 5 500 m³/ha), comptent chacune pour plus de 15% de la consommation totale simulée sur les périmètres SCP.

Bien qu'ils ne représentent qu'une part faible des consommations totales de l'agriculture, l'analyse réalisée sur les territoires alimentés par la SCP a permis d'apporter certains éléments (notamment en termes de taux de recours à l'irrigation) qui ont été utilisés pour affiner les modélisations sur l'ensemble du territoire d'étude, telles que détaillées ci-après.

Estimation des besoins en eau d'irrigation à l'échelle du territoire

Comme ce fut le cas pour Five-CoRe, l'étape de calage/validation du modèle MODIC a été menée en parallèle avec l'estimation des surfaces irriguées par type de cultures sur la période 1980 - 2009 avec pour objectif de parvenir à une convergence et une cohérence sur les volumes distribués par la SCP ou issus des redevances de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse pour les autres territoires, ces données étant elles aussi agrégées à l'échelle des bassins d'alimentation considérés. Cette convergence ne peut être obtenue indépendamment des surfaces irriguées par type de cultures et par bassin d'alimentation (périmètre desservi par un ou plusieurs réseaux à surface libre ou sous pression dont les points de prélèvements sont bien identifiés et localisés).

Dans un premier temps, un état des lieux de l'agriculture irriguée a été réalisé pour l'ensemble du domaine desservi par le bassin hydrographique Durance-Verdon. Ce travail a été effectué à l'échelle des cantons, voire des communes si nécessaire, en exploitant autant que possible l'ensemble des données disponibles (listées dans la section « Données relatives aux usages », page 33) en distinguant les réseaux exploités par des associations d'irrigants (ASA), les réseaux régis par la SCP (Canal de Provence) et par la SEM (Canal de Marseille). L'analyse a porté plus particulièrement sur les surfaces irriguées et non pas sur les surfaces irrigables. En effet, l'estimation des prélèvements et leur validation par rapport aux données observées repose sur les surfaces réellement irriguées. L'état des lieux a débouché sur une représentation assez complète des surfaces irriguées et des demandes en eau par type de culture et par bassin d'alimentation. Il a aussi permis d'identifier et de localiser les principaux points d'alimentation en eau ainsi que les lieux de retour au milieu, d'une part, des volumes d'eau non utilisés par les usagers qui s'écoulent des exutoires et ouvrages de décharge des réseaux et, d'autre part, des pertes par infiltration dans le sol au niveau des parcelles induites par le mode d'irrigation et les pratiques des exploitants.

Les surfaces agricoles irriguées ont été estimées pour les dix classes précédemment définies et trois types de culture spécifiques ont été ajoutés :

- les productions florales sous-abri dans le Comtat, les plaines du bas Rhône et sur le littoral ;
- les productions horticoles, essentiellement plantes à parfum, aromatiques et médicinales (PAPAM) plein champ dans le reste du domaine d'étude ;
- les protéagineux, pois, fèves (y compris quand elles sont en rotation avec des cultures de plein champ).

En dehors de l'estimation des surfaces agricoles irriguées par grandes catégories de culture et de leur mode d'irrigation, les principales difficultés ont porté sur :

- l'affectation des surfaces irriguées à un sous-bassin ainsi que l'identification et la localisation de leur source d'alimentation en eau ; en effet, les superficies agricoles de certains cantons sont situées sur plusieurs sous-bassins et/ou desservies par différents points d'alimentation et sous-bassins hydrographiques ;
- l'identification et l'estimation des surfaces irriguées par drainage qu'il soit d'assainissement pluvial ou par retour des parcelles irriguées en amont ; ces surfaces qui ne sont pas directement alimentées à partir de prélèvement dans les eaux de surface ou dans la nappe n'ont pas été retenues dans l'estimation des surfaces irriguées ;
- la localisation des points de rejet en milieu naturel, que ce soient les retours via la nappe par percolation due à l'irrigation que les retours en aval des grands canaux d'irrigation.

L'état des lieux et notamment la répartition des superficies irriguées par grand type de culture entre points de prélèvements a été effectué essentiellement sur la base des données du RGA en croisant toutefois ces données avec les informations de la base HYDRA concernant les réseaux d'irrigation et avec le fichier des communes alimentées par le Canal de Provence, sachant que celui-ci alimente des réseaux destinés à l'irrigation en mode aspersion ou micro-aspersion et non en gravitaire. De plus, des traitements particuliers ont été nécessaires :

- de nombreux cantons, échelle de base des données RGA, sont alimentés par plusieurs points de prélèvement et/ou des réseaux différents (SCP, ASA différentes...). Les données de la base HYDRA, notamment leur périmètre d'intervention (communes alimentées) combinées aux données du RGA 2010 à l'échelle communale ont permis de répartir du mieux possible les surfaces entre les différents points de prélèvement. La répartition par type de culture a été faite au prorata des surfaces totales irriguées. Les ratios ont été conservés par la suite pour la quantification des surfaces à l'horizon 2050 dans les scénarios prospectifs ;
- pour les territoires desservis simultanément par le Canal de Provence et d'autres associations d'irrigants, et en l'absence de données fiables sur leurs surfaces équipées, la répartition des surfaces et des assolements entre réseaux a été effectuée à partir des informations de la base HYDRA sur les types de cultures et le/les mode(s) d'irrigation des ASA concernées et en attribuant les surfaces des cultures irriguées principalement par aspersion, (filières horticoles et viticultures par exemple) en priorité au périmètre sous concession SCP. De même, nous avons supposé que les augmentations des surfaces constatées entre 2000 et 2010 pour les cultures irriguées du Lubéron (viticulture, arboriculture...) et des plateaux bordiers de Valensole et Forcalquier (blé dur) étaient une conséquence de l'extension des réseaux d'irrigation de la SCP et donc intégrées comme telle dans l'estimation des surfaces desservies par la SCP ;
- la répartition entre les deux modes d'irrigation retenues, *i.e.* gravitaire et aspersion (le mode micro-irrigation est ici assimilé au mode aspersion), est faite sur la base des ratios de surfaces équipées pour ces modes d'irrigation données par le RGA.

L'analyse des surfaces par type de cultures et la prise en compte de leur évolution entre 1980 et 2009 a été menée en parallèle avec l'étape de calage de MODIC avec pour objectif de parvenir à une convergence sur les volumes de prélèvement mesurés ou déclarés. Les volumes d'irrigation sont estimés à l'échelle des cantons puis agrégés à l'échelle des bassins d'alimentation afin de faciliter le calage du modèle et l'analyse des résultats.

MODIC permet de calculer les apports en eau effectués par l'exploitant pour deux modes de gestion : soit un déclenchement de l'irrigation lorsque le stock d'eau disponible pour la plante dans le sol, *i.e.* la réserve utile *RU*, est inférieur à un seuil donné, soit un apport d'eau constant à fréquence journalière régulière. Ici, le premier mode de gestion est appliqué à l'ensemble des cultures irriguées par aspersion et micro-irrigation et le deuxième aux cultures irriguées par gravité.

Pour l'irrigation par aspersion, à l'image de Five-CoRe, deux paramètres sont utilisés :

- un seuil de déclenchement de l'irrigation qui détermine la fréquence des apports. Ce seuil peut être appliqué indifféremment à la réserve facilement utilisable (*RFU*) ou à la réserve de sauvegarde (*RS*). Dans le premier cas, l'exploitant recherche un rendement maximal avec une évapotranspiration réelle de la culture (*ETR*) proche de l'évaporation maximale (*ETM*). Dans le deuxième cas, l'exploitant accepte un certain seuil de stress hydrique pour la culture avec in fine un rendement moindre.
- un taux de remplissage de la réserve utile. Plus ce taux est proche de 1 (remplissage de l'équivalent de la réserve utile), plus la probabilité que la culture soit à l'*ETM* augmente au risque toutefois que le rendement de l'irrigation, défini ici comme le rapport « volume apporté à la culture - volume percolé » / volume apporté », ne se dégrade.

Le rendement de l'irrigation est un troisième paramètre qui permet de caler et valider le modèle. Dans le cadre de cette étude, nous avons veillé à ce que le rendement pour l'irrigation par aspersion reste compris entre 70 et 85% et le rapport *ETR/ETM* compris en 0.95 et 1. Le calage du modèle nécessite un compromis assez fin entre le seuil de déclenchement et le taux de remplissage permettant d'obtenir le niveau d'évapotranspiration désiré (*ETM* ou moins) tout en conservant un bon rendement d'irrigation afin d'économiser les apports d'eau.

En ce qui concerne l'irrigation gravitaire, le paramètre à caler est le niveau d'apport journalier exprimé en millimètre. Néanmoins, partant du principe que les exploitants agricoles n'irriguent pas si les parcelles sont déjà gorgées d'eau, deux autres paramètres sont disponibles : le nombre de jours écoulés depuis la dernière pluie et le niveau de précipitation. Pour cette étude, nous avons supposé que les exploitants ne prennent pas leur tour d'irrigation s'il a plu au cours des deux derniers jours avec un niveau équivalent à la réserve utile. Enfin, le modèle est calé pour que le rendement de l'irrigation par gravité reste compris entre 40 et 60% et que le rapport *ETR/ETM* soit compris en 0.95 et 1. Quel que soit le mode d'irrigation, un jeu de paramètres a été calé par type de culture et pour chacun des territoires mentionnés dans le Tableau 17.

Périmètre	Territoire
Verdon Sainte-Croix	Périmètre desservi par les prises situées sur le bassin du Verdon en amont de Sainte-Croix
Buëch Serres	Périmètre desservi par les prises situées sur bassin du Buëch en amont de Serres
Durance Serre-Ponçon	Périmètre desservi par les prises situées sur le bassin de la Durance en amont de Serre-Ponçon
Durance Escale	Périmètre desservi par les prises situées sur le bassin de la Durance entre Serre-Ponçon et l'Escale
Durance Cadarache	Périmètre desservi par les prises situées sur le bassin de la Durance entre l'Escale et Cadarache
Durance Saint-Estève	Périmètre desservi par les prises situées sur le bassin de la Durance entre St-Estève et Cadarache
Durance Mallemort	Périmètre desservi par les prises situées sur le bassin de la Durance entre Mallemort et Saint-Estève (y compris canal Sud Lubéron, non compris Canal de Marseille)
Canal Mixte Carpentras	Périmètre desservi par les prises situées sur le canal Mixte Carpentras
Durance Salon	Périmètre desservi par les prises situées sur le canal EDF Mallemort Saint-Chamas (sauf Canal de Provence)
Durance Bonpas	Périmètre desservi par les prises situées au droit du seuil de Bonpas
SCP Verdon	Périmètre desservi par les prises du Canal de Provence sur le Verdon (Boutre, Vinon sur Verdon, Gréoux et Sainte-Croix)
SCP Escale	Périmètre desservi par les prises du Canal de Provence situées dans le Bassin de l'Escale (Salignac, Peipin/Aubignosc et Pont de Volonne)
SCP Forcalquier	Prise du Canal de Provence sur le barrage de la Haye
SCP Manosque	Périmètre desservi par les prises et pompage SCP dans le cours de la Durance et le canal de Manosque
SCP Castellane	Périmètre desservi par la prise du Canal de Provence de Castellane sur le canal du Lubéron
SCP Mallemort	Périmètre desservi par les prises du Canal de Provence sur le ruisseau du Mirail et la réserve de Nagebout
SCP Antheron	Périmètre desservi par la prise du Canal de Provence de La Roque d'Anthéron sur le canal EDF
SCP Robion	Périmètre desservi par la prise du Canal de Provence de Robion sur le canal de Carpentras
SCP Berre	Périmètre desservi par les prises du Canal de Provence de Coudoux et Giraudets sur le Canal de Marseille
SCP Saint-Chamas	Périmètre desservi par les prises du Canal de Provence de Saint Chamas et Cabardelle sur le canal EDF
SCP Saint-Cassien SEM	Périmètre desservi par le transfert Saint Cassien
	Périmètre desservi par le Canal de Marseille (non compris prises du Canal de Provence)

Tableau 17 : Bassins d'alimentation considérés pour le calage et la validation du modèle MODIC

Le calage du modèle est effectué sur la base des données climatiques de la période 1980 - 2009 issues des deux sources de données (redevance de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse ; suivi de la Société du Canal de Provence). Notons que :

- l'utilisation de ces données issues des redevances pour valider le modèle pose un problème et fait peser de lourdes incertitudes sur les résultats obtenus. Néanmoins celles-ci restent les seules disponibles permettant un calage / validation du modèle sur l'ensemble du territoire et pour le mode d'irrigation par gravité non représenté sur le périmètre desservi par le Canal de Provence ;
- les données fournies par la SCP et concernant leurs réseaux sont beaucoup plus fiables que les précédentes mais ne concernent que les modes d'irrigation par aspersion et au goutte-à-goutte. Elles ont néanmoins permis le calage du modèle pour les cultures présentes sur l'ensemble des périmètres.

Les résultats obtenus après calage de MODIC sont présentés en Figure 48. La comparaison avec les données disponibles est effectuée par grands bassins hydrographiques. Rappelons que les données de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse sont des estimations des volumes distribués (donc hors volumes nécessaires au fonctionnement des canaux à surface libre). Le bassin aval Cadarache intègre l'ensemble des bassins d'alimentation dont les prélèvements se font en aval du barrage de Cadarache (Malemort, Saint-Estève, canal Mixte Carpentras, périmètres de la Société des Eaux de Marseille et de la Société du Canal de Provence). Notons la bonne cohérence entre les résultats issus de MODIC et FIVE-CoRe sur l'ensemble des périmètres desservis par la Canal de Provence avec les évolutions constatées entre 1980 et 2009 (données déjà présentées en Figure 47).

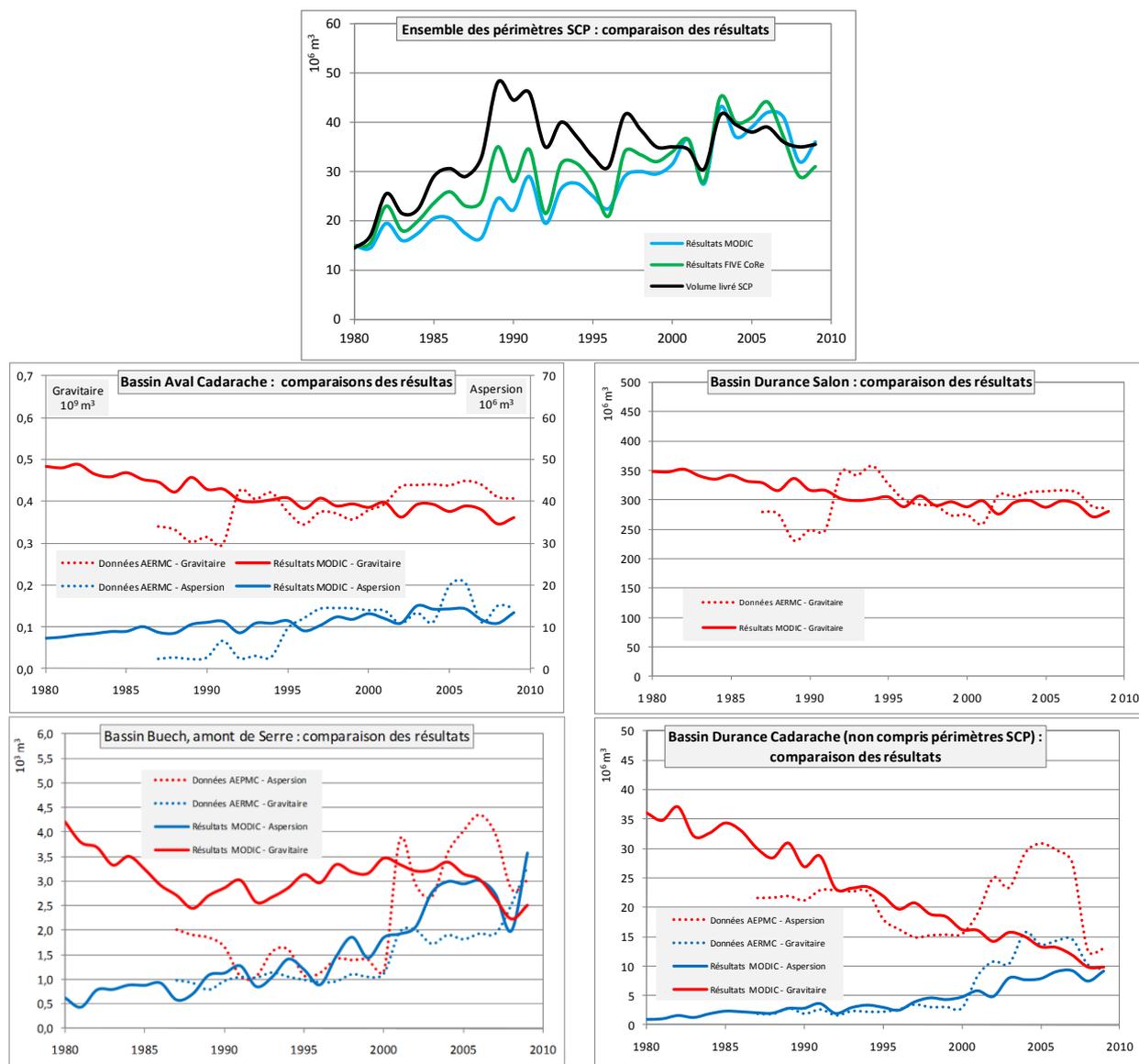


Figure 48 : Apports en eau d'irrigation estimés à partir des redevances et des données de suivi et obtenus après calage de MODIC

En ce qui concerne l'estimation des apports gravitaires, les résultats montrent des écarts avec les données issues des redevances de l'Agence de l'Eau pouvant être très importants, principalement sur les têtes de bassin (Buëch en amont de Serres, Durance en amont de Serre-Ponçon, Verdon en amont de Sainte-Croix). Ceci n'a rien de surprenant, vues les fortes incertitudes qui pèsent sur les données de l'Agence de l'Eau : les changements intervenus dans le mode de calcul des redevances et le manque d'exhaustivité sur les prélèvements ont rendu le calage du modèle très problématique. Néanmoins, les ordres de grandeur principalement sur la dernière période de calcul (2000-2009) semblent respectés. Les résultats obtenus pour

l'estimation des prélèvements par aspersion présentent moins d'incertitude, surtout pour les concessions SCP dont les données disponibles sont beaucoup plus fiables.

Les surfaces irriguées par type de culture ont été fixées aux valeurs données par les RGA et par la SCP à quelques exceptions près (réajustement local lorsque les écarts entre prélèvements comptabilisés par l'Agence et ceux simulés par MODIC étaient trop importants). Le calage a donc porté sur les paramètres techniques d'irrigation, seuil de déclenchement et taux de remplissage pour les modes d'irrigation non gravitaire et, niveaux d'apports pour le mode d'irrigation gravitaire, permettant d'obtenir des efficacités d'irrigation (rapport besoin en eau de la culture sur apports) et des rendements *ETR/ETM* par type de culture cohérents.

Ces séries de prélèvement pour l'irrigation ont été utilisées pour affiner les estimations des séries de débits naturels reconstitués sur la Durance aval, à l'Escale et à Cadarache.

3. Modélisation des besoins pour l'AEP

Le modèle exploité (Figure 49) reprend les composantes élémentaires examinées dans l'état des lieux à l'origine des prélèvements pour l'AEP. Seule la consommation unitaire a fait l'objet d'une modélisation numérique. Les autres composantes (rendements, démographie, origine de la ressource) seront des paramètres issus des scénarios prospectifs.

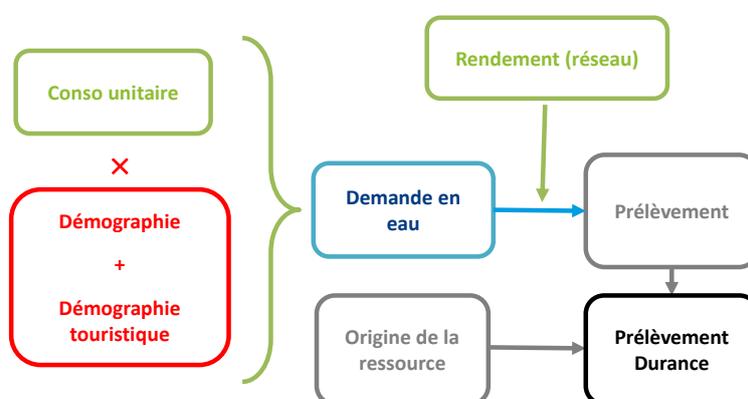


Figure 49 : Schéma méthodologique de quantification

La fonction demande en eau est la fonction économétrique proposée par García-Valiñas *et al.* (2009) appliquée sur la région PACA. Elle décrit la consommation unitaire moyenne par ménage $WUSE(i,t)$ pour l'année t et la commune i :

$$WUSE(i,t) = \gamma(i) + \beta(i,t) \frac{INCO(i,t)}{PRICE(i,t)}$$

où $INCO(i,t)$ et $PRICE(i,t)$ désignent respectivement le revenu moyen par ménage et le prix de l'eau pour l'année t et la commune i . $\gamma(i)$ rend compte de l'hétérogénéité spatiale ; c'est une fonction affine :

$$\gamma(i) = \gamma_0 + DEP(i)$$

où $DEP(i)$ est un indicateur affecté au département dans lequel se situe la commune i . Enfin $\beta(i,t)$ est une combinaison linéaire de caractéristiques socio-économiques de la commune i pour l'année t .

Les facteurs explicatifs pris à l'instant t et relatifs à la commune i , renseignant l'équation retenus sont :

- $Pop19(i,t)$: proportion de la population qui a moins de 19 ans (%) de la commune (source INSEE) ;
- $Pop60(i,t)$: proportion de la population qui a plus de 60 ans (%) de la commune (source INSEE) ;
- $TailleMén(i,t)$: taille moyenne des ménages de la commune (source INSEE) ;
- $Appt(i,t)$: proportion des appartements de la commune (%) (source INSEE) ;
- $Codurb(i,t)$: indicatrice de la commune prenant la valeur 1 si la commune est considérée comme urbaine, 0 sinon (source INSEE). L'INSEE considère comme urbaines les communes qui représentent une zone de bâti continu qui compte au moins 2000 habitants. Les données de l'INSEE sur la caractéristique urbaine des communes n'étant pas directement disponibles, les communes de plus de 2000 habitants sont ici classées « urbaines » ;

- $Codtour(i,t)$: indicatrice de la commune prenant la valeur 1 si la commune est considérée comme touristique (où le pourcentage d'emplois touristiques dans le bassin touristique est supérieur à 10%), 0 sinon (source INSEE) ;
- $INCO(i,t)$: revenu imposable moyen par ménage par commune, calculé en divisant le revenu net déclaré par les foyers fiscaux imposables par le nombre de foyers fiscaux (source INSEE) ;
- $PRICE(i,t)$: prix TTC du service au m³ pour 120 m³ en 2010 (source Eaufrance, <http://www.services.eaufrance.fr/observatoire/indicateurs/D102.0>). A défaut de données disponibles à l'échelle de la commune, la moyenne départementale des données disponibles a été utilisée. Deux exceptions pour deux départements pour lesquels aucune valeur n'était disponible sont à noter :
 - pour les Hautes-Alpes, le prix moyen de l'eau mentionné dans une étude de 2010 (DDT Hautes-Alpes, 2011) a donc été utilisé.
 - pour les Alpes Maritimes, le prix de l'eau du département en 2007, disponible sur le site de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (<http://sierm.eaurmc.fr/eau-potable/prix/>), a été exploité.

Finalement, les éléments constituant la relation sont :

$$\beta(i,t) = \frac{1}{1000} \left(3,295 - 0,022 \frac{Pop19(i,t)}{100} + 0,057 \frac{Pop60(i,t)}{100} + 0,358 TailleMén(i,t) \right. \\ \left. + 0,06 \frac{Appt(i,t)}{100} - 0,893 Codur(i,t) + 3,683 Codtour(i,t) \right) \\ \gamma(i) = 1000(0,106 + DEP(i))$$

Les coefficients sont des valeurs à pertinence nationale. Ici, le seul ajustement réalisé a été de supprimer l'indicatrice sur le tourisme $Codtour$ dans la fonction économétrique et d'intégrer la population touristique à l'étape d'estimation à l'échelle des territoires et ceci afin de mieux comprendre l'impact du tourisme sur la consommation d'eau. Un équivalent de population touristique à l'année a été estimé. Ceci a été fait grâce aux nuitées touristiques comptabilisées, traduites en équivalent d'une personne restant à l'année en divisant le nombre de nuitées par 365.

La consommation unitaire par commune par ménage est donc multipliée par le nombre de ménages (source INSEE), modulée par la population saisonnière touristique. La consommation communale est agrégée aux échelles cantonales. Les besoins en eau par canton (hors rendement des réseaux de distribution et des canaux d'adduction) ainsi obtenus à partir de la fonction de la demande ont été agrégées soit, à l'échelle des sous-bassins hydrographiques pour les prélèvements effectués en nappe souterraine, soit par périmètre desservi par le réseau d'adduction pour les prélèvements de surface et enfin exprimés pour différents périmètres (Tableau 18).

De nombreux cantons étant partagés entre plusieurs périmètres, la consommation des cantons concernés a été répartie entre périmètres en pondérant cette dernière en fonction du rapport population communale/population cantonale. Les échanges notamment entre communautés d'agglomérations ont été pris en compte quand les taux étaient connus. Concernant le rendement des réseaux de distribution, nous avons utilisé soit la donnée moyenne des départements, soit des données plus locales quand celles-ci étaient disponibles.

La modélisation a été calée et validée à l'échelle des périmètres pour l'année 2010, année pour laquelle les données des variables de la fonction économétrique et des rendements sont connues par comparaison aux données des redevances de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse de 2009 (rappelons que les données AEP sont beaucoup plus fiables que celles portant sur l'agriculture). Le diagnostic porte sur la « part inexpliquée », c'est-à-dire l'écart entre « prélèvements reconstitués à l'aide de la fonction » et « prélèvements observés », divisé par « prélèvements observés » sur les différents périmètres identifiés.

Périmètre	Origine de l'eau	Erreur de reconstitution	Observations
Bassin Durance – Serre-Ponçon	Nappe	45%	
Buëch Serres	Nappe	25%	
Verdon Sainte-Croix	Nappe	47%	
Durance Escalé	Nappe	33%	
Durance Cadarache	Nappe	13%	
Durance Mallemort	Nappe	10%	
Canal de Provence	Surface canal EDF (Boutre)	15%	Le calage est effectué à partir d'un paramètre qui donne un équivalent de population desservie (la consommation de toutes les communes desservies en totalité ou partiellement est calculée- le paramètre permet de retrouver les prélèvements données par l'Agence de l'Eau. Cette approche estime la population alimentée à 0.8 millions de ménages en 2010. Pour les échanges avec les communautés de communes, le taux d'échange est utilisé quand celui-ci était disponible, par exemple pour l'AGGLOPOLE : 15%
Canal de Marseille	Surface canal EDF	17%	Les prélèvements estimés comprennent les transferts à l'AGGLOPOLE Provence (29%), ainsi que l'alimentation des communes desservies par le canal et des communes situées dans le périmètre et la CPUM
SIVOM Durance Lubéron	Surface canal de Cadenet	20%	33% prélevés dans le canal et 66% en nappe
Agglomération Pays de Martigues	Surface canal de Martigues	20%	35% prélevés dans le canal, 30% par forage dans la nappe de Crau, 35% Canal de Marseille en secours
Agglomération Salon Etang de Berre	Surface canal EDF (station des Aubes)	20%	La part des prélèvements effectués dans le canal est de 15%, 29% est apporté par le Canal de Marseille, 15% par le Canal de Provence, le reste en nappe et divers)

Tableau 18 : Paramètres et qualité de la modélisation de la demande en AEP

Dans l'ensemble, les résultats obtenus par la fonction de demande eau en domestique sont plus que corrects. La DREAL qui a effectué cet exercice à l'échelle des départements de la région, obtient une part inexpliquée comprise entre 40% et 64% (DREAL PACA et Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, 2006). La part inexpliquée reste dans les bons ordres de grandeurs sachant que les besoins en eau potable intègrent des usages non pris en compte par la fonction économétrique de demande en eau. Les besoins en eau potable intègrent en effet non seulement les besoins destinés à la consommation domestique des ménages mais aussi ceux des APAD (usages assimilés domestiques : collectivités locales, hôpitaux, écoles, petits commerçants, tertiaires), des gros consommateurs (parfois comptabilisés à part : énergie - refroidissement de centrales à cycle combiné gaz (CCG), grosses entreprises et petits industriels, eaux potables destinés aux grandes entreprises...) et dans les territoires ruraux ceux des exploitations agricoles (abreuvements, nettoyage matériel) ainsi que la fabrication de la neige artificielle des stations de ski. Pour la région PACA, la part des consommations autres que domestiques est estimée à 20% (source : Service de l'observation et des statistiques, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>). Néanmoins, cette part est extrêmement variable selon les territoires. Dans les territoires ruraux ou l'élevage est important, la consommation pour l'abreuvement des animaux peut être supérieure à celle de la consommation des ménages (centre de la France notamment). Les échanges entre réseaux de distribution introduisent aussi des biais pouvant être importants.

Nous verrons plus loin que la modélisation conduit à une consommation actuelle moyenne d'environ 160 m³/an/ménage sur le territoire, cohérente avec la fourchette 110 à 165 m³/an/ménage obtenue en considérant un ménage de 2 à 3 personnes et une valeur de 151 litres d'eau consommée par jour par d'un Français dans sa vie quotidienne, consommation moyenne (source : SOeS – SSP-Agrete, enquête eau 2008).

4. Modélisation des besoins pour l'industrie et les loisirs

Modélisation de la demande en eau industrielle

Plusieurs facteurs peuvent expliquer l'évolution des besoins en eau industrielle sur le territoire. Le principal est l'évolution de la structure du tissu industriel et du niveau d'activité et de production en volume des différents secteurs qui le compose. Viennent, ensuite, le progrès technologique avec l'amélioration du rendement et de l'efficacité des circuits de refroidissement et de process, l'évolution du coût de la ressource en eau mais aussi de l'énergie nécessaire à sa mobilisation et son traitement si nécessaire et les politiques incitatives en matière de maîtrise des prélèvements et des rejets et de normes règlementaires en ce qui concerne les circuits d'eau.

Il est très difficile de traduire dans les faits et notamment en termes d'évolution de la demande en eau, une baisse globale d'activité d'un secteur ou encore des délocalisations ou des changements d'activités de quelques entreprises. Si la traduction de l'évolution de l'activité (en %) de grands secteurs industriels à l'échelle nationale ou régionale est possible, elle devient très problématique pour des échelles territoriales plus fines surtout si le territoire est peu industrialisé et/ou si l'activité repose sur un faible nombre de sites comme c'est le cas pour le domaine d'étude. De même, les projections d'évolutions technologiques comme l'amélioration de l'efficacité et du rendement des circuits et des équipements de refroidissement (généralisation de la fermeture des circuits) et de process, sont difficiles à appréhender, car cela nécessite des connaissances fines concernant l'utilisation de l'eau et les technologies utilisées actuellement pour chacun des secteurs d'activité. De plus, ces évolutions dépendent des possibilités de renouvellement des équipements et appareillages par les entreprises qui sont liés à la maturité technique et économique des technologies mais aussi à leur capacité de financement, facteurs qu'il est difficile d'appréhender et d'anticiper.

Dans le cadre de cet exercice, il n'a pas été fait appel à une modélisation. Le travail a consisté essentiellement à connaître les volumes en eau prélevés ainsi que le nombre d'unités de production pour les principaux secteurs utilisateurs de la ressource: raffinage, chimie de base, agroalimentaire, métallurgie, fabrication de composants, activités d'extraction...

Modélisation de la demande en eau des loisirs

Comme pour l'industrie, la demande en eau des activités de loisirs n'a pas été modélisée. Les prélèvements ainsi que le nombre d'unités ont été comptabilisés pour les principales activités : production de neige artificielle, golf, thermalisme, centre de loisirs aquatiques et parc animalier. Pour la production de neige artificielle, les prélèvements ont été rapportés à des surfaces enneigées sur la base d'un besoin en eau pour la saison hivernale de 4 000 m³/ha.

5. Modélisation des connectivités entre points de prélèvement et lieux de consommation

Le travail réalisé a consisté à construire une base de données des connectivités entre les lieux de l'usage (par exemple la surface agricole), les points de prélèvement (en général après acheminement par un réseau gravitaire ou sous pression) et le point d'alimentation du réseau de surface ou sous pression.

Le transport d'eau est un usage consommateur d'eau.

Dans le cas d'un réseau sous pression, il est raisonnable de considérer que l'eau prélevée au point d'alimentation arrive intégralement au point de prélèvement de l'usage.

Dans le cas des réseaux gravitaires, la fonction d'acheminement est plus complexe et mérite d'être modélisée. Le rendement du canal est dépendant de l'infiltration (retour d'eau vers les nappes) ainsi que de l'évaporation. Par ailleurs, l'alimentation des canaux gravitaires est supérieure aux prélèvements des usages. Il convient donc vis-à-vis de la modélisation de la gestion de l'eau de tenir compte de ces « sur débits » donnant lieu à des colatures (retour d'eau aux réseaux hydrographiques) et de bien isoler ce terme dans la demande agricole notamment pour ne pas biaiser le chiffrage de la demande agricole dans la reconstruction des usages et pour pouvoir faire évoluer les caractéristiques techniques de ces structures.

Pour un réseau gravitaire, le mode d'irrigation impose de nombreuses contraintes dont la régulation des canaux doit tenir compte. Pour les réseaux alimentant principalement de l'irrigation en mode gravitaire, l'efficacité hydraulique est en moyenne de l'ordre de 20 — 30%. Il s'agit ici d'un rendement moyen, en réalité,

celui-ci varie énormément tout au long d'année. Il peut atteindre 60-70% en pleine saison quand les appels d'eau sur le réseau sont maxima et descendre sous les 20% en période hivernale quand ceux-ci sont très faibles. Toutefois, il est possible de mettre en place des méthodes de régulation permettant d'améliorer significativement l'efficacité des réseaux gravitaires. Du fait de leurs coûts, l'application de ces techniques reste généralement limitée aux canaux principaux qui ne représentent qu'un faible pourcentage du linéaire total, les canaux de taille plus réduite (canaux secondaires et autres) restent souvent sous-équipés. De fait, les réseaux, comme celui du Canal de Provence, qui sont fortement régulés et dont le canal principal alimente essentiellement des réseaux sous pression à la demande, arrivent contrairement aux réseaux majoritairement gravitaire à présenter de très bons rendements (pratiquement 90% pour le réseau du Canal de Provence).

L'approche de modélisation envisagée ici est relativement simple. Nous avons considéré un rendement *Rend* moyen constant sur l'année pour chaque territoire à partir des données redevances des années 2008 et 2009 de l'Agence de l'Eau RMC et sur la base d'expertise locale et de rapports techniques, bilans hydrauliques (Manosque, la Brillanne, Saint-Julien...) effectués dans le cadre des contrats de canal. L'eau technique est donc estimée par $TotalDemandes/Rend$ où *TotalDemandes* est l'ensemble des demandes en eau exprimées par les différents utilisateurs de la ressource du territoire.

Notons l'existence de transferts qui résultent d'échanges d'eau entre distributeurs, qui complexifient la comptabilité des prélèvements d'eau. Le canal de Marseille prélève chaque année entre 30 et 40 Mm³ (valeurs représentatives des 15 dernières années), de la ressource Durance pour compléter et sécuriser l'alimentation par la SCP des industriels de l'étang de Berre. L'alimentation en eau potable de Marseille dont la distribution est assurée par la SEM, est principalement issue du Canal de Marseille, et partiellement par le canal de Provence qui transfère chaque année plus de 30 Mm³ de la ressource Verdon dans la réserve de Vallon Dol.

6. Modélisation de la gestion des réserves, des besoins en eau pour les loisirs et les services écologiques

L'objectif de cette modélisation est de représenter le fonctionnement des grandes réserves du système Durance-Verdon (Serre-Ponçon, Sainte-Croix et Castillon) décrit dans la section « Energie et aménagements hydroélectriques » (page 39) en intégrant les contraintes principales pesant sur la gestion coordonnée des ouvrages et de leur stock.

Principes généraux

La gestion du stock d'un barrage réservoir consiste à utiliser un équipement au jour le jour, afin de satisfaire au mieux différents usages et/ou différents objectifs (soutenir des débits pour l'irrigation et l'AEP, préserver les milieux aquatiques, produire de l'énergie ou encore permettre des activités touristiques au travers d'une cote suffisante du plan d'eau). L'intérêt du barrage réservoir se justifie dans la mise en adéquation entre l'offre en eau (hydrologie naturelle) et la demande en eau (expression d'une quantité d'eau pour le prélèvement et/ou le turbinage énergétique). La réserve utile constitue alors le moyen de transférer dans le temps des volumes d'eau entre les périodes où l'hydrologie naturelle est généreuse vers celles où s'expriment les besoins des usages énergétiques et non énergétiques.

Sur un bassin de montagne comme celui de la Durance, la période d'abondance se situe au moment de la fusion du manteau neigeux. Les besoins pour l'énergie, du fait des spécificités du système électrique français, se situent plutôt sur la période hivernale (forte demande électrique conjointe avec de fortes fluctuations journalières de la consommation), tandis que les besoins agricoles (et touristiques) s'expriment préférentiellement sur la période estivale.

Le choix au jour le jour de lâcher l'eau de la réserve ou de la garder constitue l'acte de gestion de la réserve. Cette gestion se confronte donc à la problématique de « l'intérêt » d'utiliser immédiatement l'eau ou de lui préférer un usage ultérieur. Il s'agit d'une recherche de la satisfaction des objectifs assignés à la réserve, ces objectifs étant en général hiérarchisés. Mathématiquement, il est possible d'écrire la question sous la forme d'une optimisation d'une fonction d'intérêt sur une période de gestion donnée.

En règle générale, sur la période de gestion, les aléas (apports à la réserve, besoins futurs) ne sont pas connus ce qui complique la tâche du gestionnaire. Ce dernier se doit alors de se doter d'une description des aléas futurs possibles. Une approche courante est de les trouver dans les réalisations du passé. La prévision

hydrologique peut quant à elle permettre de réduire une part de ces avenir possibles en tenant compte de l'état présent du bassin et de son inertie (stock de neige en place par exemple) dans les écoulements pour produire une visibilité des débits à venir. Cette visibilité reste malgré tout incertaine.

L'arbitrage entre une utilisation immédiate et une utilisation ultérieure nécessite le calcul d'une espérance marginale de gain futur. Cette valeur est communément appelée « valeur d'usage », sous-entendu pour demain. La connaissance de cette valeur permet à tout moment de comparer un gain immédiat de l'utilisation de la ressource versus un gain moyen futur pour cette même quantité d'eau. La connaissance sur l'ensemble des pas de temps et pour différents niveaux de remplissage de la réserve hydraulique constitue la phase de définition de la stratégie de gestion de la réserve. En termes de calcul, elle est souvent nommée phase d'optimisation. Une fois la stratégie définie, il est alors possible de simuler la trajectoire de gestion de la réserve sur des chroniques d'intérêt, d'apport, etc.

MORGLite est la brique de calcul qui vise à optimiser et simuler la gestion d'une réserve hydraulique à objectifs multiples. Elle s'inspire (tout comme son nom) des principes de l'outil exploité en opérationnel par EDF qu'est MORGANE. Vis-à-vis de l'outil opérationnel d'EDF MORGANE, elle en constitue une version simplifiée :

- mono-réserve sans vision détaillée de l'ensemble des aménagements de la vallée ;
- prise en considération de l'avenir incertain par une approche multi-scénario (Goussebaille *et al.*, 1986) ;
- fonction d'estimation d'un indicateur d'intérêt énergétique à défaut de disposer d'un calcul du coût marginal au périmètre du parc de production d'électricité français (François, 2013) ;
- prise en considération (et calcul) des contraintes de cote de manière anticipée via des courbes de remontée et de descente qui permettent le respect des objectifs de cote 9 années sur 10.

On cherche malgré tout à sauvegarder dans cette représentation les grands déterminants de la gestion. Les développements de cette brique de calcul ont débuté sur un cas d'étude dans le bassin de la Garonne pour les besoins du projet IMAGINE2030 (Hendrickx et Sauquet, 2013) et se sont poursuivis dans le cadre du projet ANR RIVER2030, bénéficiant des travaux de thèse de François (François, 2013 ; François *et al.*, 2015).

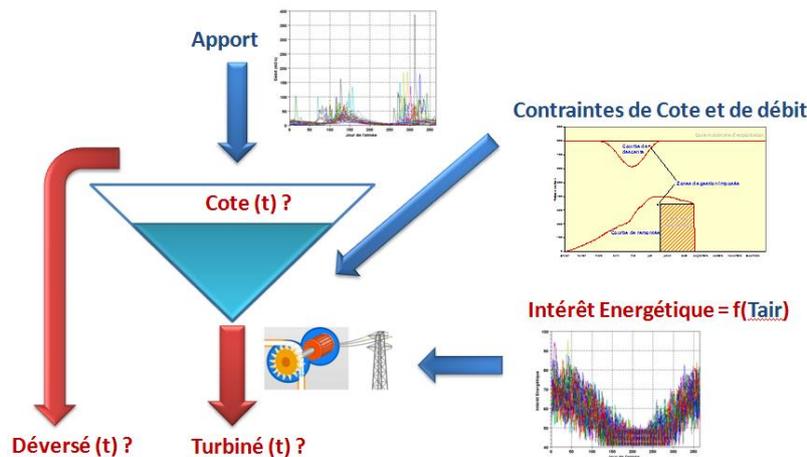


Figure 50 : Schéma de principe du modèle MORGLITE (en bleu : entrées et contraintes exprimées ; en rouge : sorties)

A partir de la connaissance des apports à la réserve, de la température de l'air que l'on convertit en intérêt à utiliser la production hydraulique pour le système électrique et des contraintes de cote et de débit qui traduisent entre autres la fourniture d'eau aux usages qui dispose de droits, MORGLite simule les débits turbinés et déversés ainsi que la cote du plan d'eau (Figure 50). MORGLite permet uniquement de traduire les grandes influences saisonnières portées par la gestion des lacs de tête. La représentation de la vallée est inexistante dans MORGLite. Pour rendre compte de cette dimension vallée, les paramétrisations des réservoirs de tête doivent se faire en cohérence avec les contraintes de la vallée : par exemple, le turbiné maximal en sortie de réservoir amont a peu de sens s'il existe une réserve de démodulation, ou si comme sur la Durance le débit du réservoir amont doit respecter un débit maximal d'un canal usinier. Dans ce cas, le débit des ouvrages hydrauliques en aval devient dimensionnant de la gestion de la grande réserve de tête.

Mise en œuvre au périmètre des grandes réserves hydrauliques du bassin Durance-Verdon

Les choix liés à la modélisation hydrologique a conduit à définir sept sous-domaines hydrologiques définis par les sept points de contrôle (Tableau 4 de la section « Données hydrologiques », page 30). Le sous-domaine n°4 (bassin versant intermédiaire amont de la confluence Durance-Verdon) a été scindé en deux pour distinguer les apports de la branche Durance de ceux de la branche Verdon. La modélisation de la gestion du système Durance-Verdon peut être vue de manière conceptuelle selon le schéma de droite de la Figure 51. Sur ce dernier, nous pouvons retrouver le découpage géographique du bassin versant en amont de Mallemort en huit sous-domaines (sous-domaine hydrologique n°4 sous divisé en deux), ainsi que les trois grandes réserves hydrauliques, *i.e.* les « LACs », qui seront prises en considération.

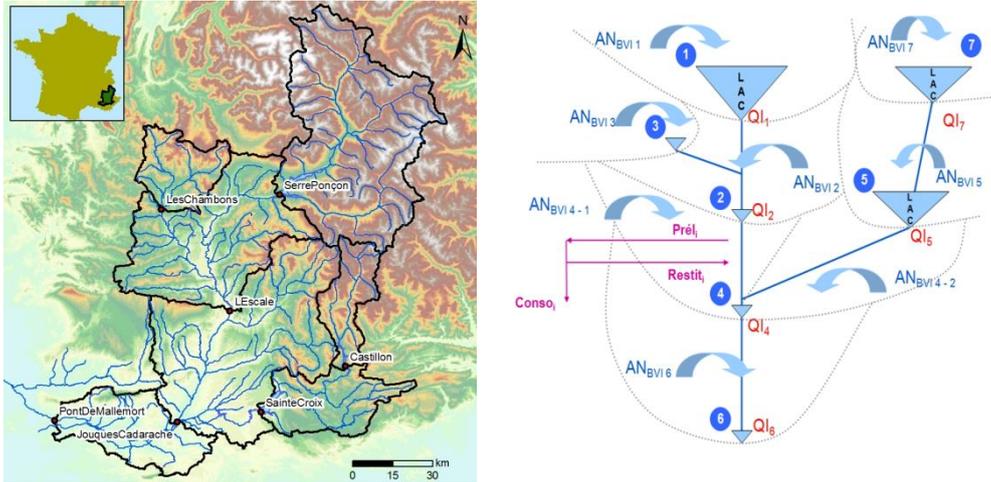


Figure 51 : Schéma de principe de la modélisation intégrée de la gestion sur le bassin – AN_{BVi} désigne les apports naturels du sous-bassin i , et QI_i le débit influencé à l'exutoire du bassin versant i , les LACs sont les trois retenues modélisées, $Prél_i$, $Restit_i$, et $Conso_i$ sont les prélèvements, restitutions au milieu et consommation associé au secteur i

Chaque sous-domaine est forcé par des conditions aux limites que sont les apports naturels du sous-bassin ($AN_{BVi(i)}$), les prélèvements ($Prél_i$) et les restitutions ($Restit_i$) d'eau des différents usages. L'objectif de la modélisation est de pouvoir produire des débits influencés (QI_i) par les consommations d'eau lié aux usages et les actions de stockage et déstockage sur les trois grandes réserves, tout cela tenant compte des contraintes et des hiérarchies entre les différents objectifs de l'aménagement hydraulique de la chaîne Durance-Verdon.

Sur le sous-domaine i , l'examen du bilan conduit à l'équation suivante :

$$QI_i(t) = \sum_{k \in IdAmon(i)} QI_k(t) + AN_{BVi(i)}(t) - Prél_i(t) + Restit_i(t) - \Delta Res_i(t)$$

avec ΔRes_i qui représente le stockage d'eau dans une grande réserve hydraulique si elle existe sur le sous-domaine i et $IdAmon(i)$ l'ensemble des domaines immédiatement à l'amont du sous-domaine i . Sur les sous-domaines disposant d'un « Lac », nous avons également :

$$QI_i(t) = Turbiné_i(t) + Déversé_i(t)$$

Le calcul des QI_i se fait par récurrence dans l'ordre hydrologique de l'amont vers l'aval, ce qui est logique avec le sens de propagation des influences.

Par ailleurs, du fait de l'existence de règles de gestion, ces débits doivent respecter certaines conditions. Le débit doit être supérieur à un débit minimum, ceci peut se traduire par les inéquations suivantes :

$$QI_i(t) \geq QObj_i(t) + \sum_{k \in EdAval(i)} Déficit_k(t)$$

$$QI_i(t) \geq QObj_i(t) + Prél_{IdAval(i)}(t)$$

avec $Déficit_k(t) = \max(Prél_k(t) - Restit_k(t) - AN_{BVi(k)}(t); 0)$ qui correspond au déséquilibre par domaine entre la ressource propre du bassin versant intermédiaire et les consommations sur ce même bassin versant intermédiaire. $EdAval(i)$ désigne l'ensemble des domaines en aval du domaine i . $IdAval(i)$ est le domaine en aval immédiat du domaine i . $QObj_i$ est ici pris dans le sens général d'un débit objectif sur le cours d'eau naturel de la

rivière par opposition aux parties canalisées. Il revêt sur le système Durance-Verdon dans les conditions actuelles de gestion, la seule dimension liée au débit réservé qui permet une protection des milieux aquatiques. A titre d'information, les valeurs des débits réservés antérieurement à 2011 sur le bassin versant de la Durance sont données en Figure 52. Soulignons cependant que les simulations de MORGLite pour le futur sont faites avec les débits réservés mis en place au 1^{er} janvier 2014.



Figure 52 : Débits réservés antérieurs à 2011 (Source : Cros, 2012)

Le débit Q_i doit aussi satisfaire le respect d'un débit maximum lié au débit maximal de gestion dans le canal usinier qui se traduit par l'équation suivante :

$$Q_i(t) \leq Q_{Obj_i}(t) + Q_{MxGest_i}(t)$$

Ainsi, la tenue de ces débits de gestion aux exutoires des différents sous-domaines se traduit de l'aval vers l'amont et ce jusqu'au trois grandes réserves. Les débits minimums que doivent fournir les réserves, désignés sous le terme « sollicitations » dans la suite, constitueront alors un élément de contraintes considérées par la brique de calcul MORGLite.

Précisons que, à l'instar des prélèvements de surface effectués dans les canaux usiniers, les prélèvements en nappe n'agissent pas directement sur les débits de surface. Leurs effets apparaissent sur les contributions du bassin versant intermédiaire qui réalimente en bas de sous domaine le canal usinier. Ainsi, les prélèvements en nappe sont défalquées en bas de sous domaine des retours d'eau que constituent les apports naturels du bassin versant intermédiaire et les colatures des réseaux de transport d'eau pour les usages du sous domaine. Ils n'auront ainsi qu'un effet sur les débits à garantir pour le sous-domaine aval (débits réservés, prélèvements). Les prélèvements en nappe ne sont donc pas sécurisés par les grandes réserves hydrauliques, d'où la relative indépendance de leur prise en compte dans le modèle de gestion.

La mise à disposition d'eau à partir des réserves hydrauliques pour satisfaire les $Prél_k$ et combler les $Déficits_k$ en aval de Cadarache mérite d'être précisée. En effet, dans le cas du système Durance-Verdon, le déficit en aval de la confluence Durance-Verdon peut être satisfait soit à partir de la réserve de Serre-Ponçon, soit à partir des deux réserves du Verdon (Sainte-Croix et/ou Castillon). Cet arbitrage est aujourd'hui défini dans les règles de gestion et ne fait pas l'objet d'un arbitrage dynamique. Il est ainsi fait une distinction entre des usages liés à la « Commission des prises d'eau de la Basse-Durance », plus connue sous le nom de « Commission Exécutive de la Durance » (CED)¹¹ qui dispose d'une tranche d'eau dans la retenue de Serre-Ponçon et des usages appartenant au périmètre sous concession SCP pour lesquels existe une tranche d'eau réservée sur la branche Verdon. Le déficit en aval de Cadarache est ainsi réparti entre la branche Durance et la branche Verdon en fonction du périmètre des usages. Actuellement, la part des prélèvements réalisés par la SCP en aval de

¹¹ Inscrite dans la loi du 11 juillet 1907, la CED a pour rôle d'assurer la répartition de la ressource en eau disponible en Durance entre les irrigants afin de prévenir les conflits. A ce titre, elle intervient dans l'utilisation de la réserve agricole dans la retenue de Serre-Ponçon (d'après Santoni, 2014).

Cadarache reste marginale devant la part CED puisque les volumes concernés sont en moyenne de seulement quelques pourcents.

Les objectifs de gestions sont traduits pour MORGLite via des chronologies de contraintes de stock minimaux / maximaux / débits minimaux / débit maximaux. Chacune de ces quatre contraintes dispose d'une pénalité, pénalité suffisamment grande pour être dominante dans l'exercice d'optimisation devant toute optimisation énergétique (l'optimisation énergétique est donc relayée comme l'objectif le moins prioritaire...). Relativement les unes aux autres, ces pénalités permettent de hiérarchiser les objectifs de gestions. Se trouvent classés ainsi par ordre d'importance : le débit minimal (soutien pour les débits réservés et les prélèvements), les cotes (qui contrôlent le remplissage estival et maîtrisent le risque de déversement sur les grands ouvrages) et enfin le débit maximal (qui permet de minimiser les déversements dans la vallée en période d'apports intermédiaires importants).

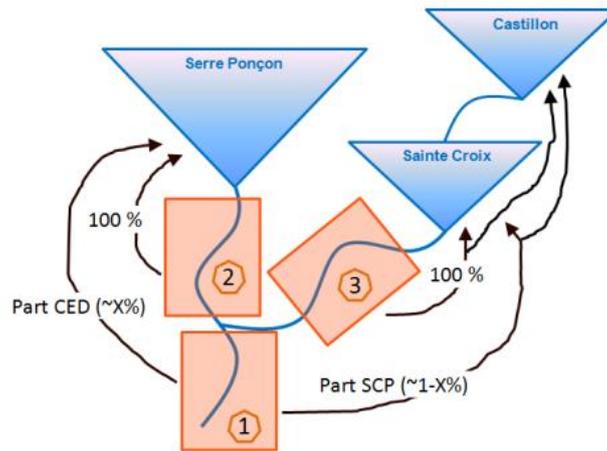


Figure 53 : Répartition de sollicitations entre les trois grandes réserves hydrauliques

Par ailleurs, la question de la répartition des sollicitations entre les deux réserves du Verdon se pose. A ce jour, et du fait de gestion estivale du lac de Castillon définie dans le cadre du SAGE Verdon visant à satisfaire les usages touristiques et les sports d'eau vive à l'aval et de la capacité du lac de Sainte-Croix à couvrir les besoins actuels de la SCP, Castillon fonctionne l'été au fil de l'eau en délivrant le débit réservé et en turbinant les apports hebdomadaires. Actuellement, sa réserve ne participe ainsi pas ou de manière très peu significative au soutien des débits pour les prélèvements en eau. Il a tout de même été considéré dans la modélisation la possibilité d'agir sur la répartition des demandes de sollicitation sur la branche Verdon entre ces deux réserves hydrauliques. Cette répartition est paramétrée par un coefficient dans l'intervalle [0 ; 1] et ne peut faire, pour le moment, l'objet d'un arbitrage dynamique dans la modélisation (Figure 53).

La simulation de la gestion des trois grandes réserves du projet se construit par une succession de recours à la brique élémentaire MORGLite et de bilans sur les sous-domaines. Pour arriver à une représentation complète du domaine, les phases d'optimisation et/ou de simulation réserve par réserve sont chaînées à l'image de la logique opérationnelle mise en œuvre au sein d'EDF. Les réserves sont traitées dans l'ordre suivant :

1. optimisation et simulation de la gestion de Castillon peu sensible aux prélèvements aval dont les effets sont concentrés sur Sainte-Croix (ceci est conforme à la gestion actuelle qui privilégie le maintien d'une cote estivale haute) ;
2. optimisation et première simulation de la gestion de Sainte-Croix, traitée indépendamment de Serre-Ponçon ;
3. optimisation de la gestion de Serre-Ponçon, intégrant les débits simulés de Sainte-Croix obtenus en 2 ;
4. simulation de la gestion conjointe de Serre-Ponçon et Sainte-Croix, du fait de la coordination avérée des deux réserves pour tenir des contraintes vis-à-vis des débits de gestion et des demandes en aval de la confluence Durance-Verdon et une question d'arbitrage « économique » à résoudre puisque chaque réserve a sa propre valeur de l'eau. Les étapes d'optimisation 2 et 3 nourrissent l'algorithme développé pour résoudre l'étape 4.

De manière à disposer d'un bon arbitrage « économique » entre Sainte-Croix et Serre-Ponçon, il faut veiller à intégrer la dimension vallée dans la relation débit / puissance des ouvrages. En effet, 1 m³/s turbiné à Serre-Ponçon ne produit pas la même puissance sur la chaîne Durance-Verdon que 1 m³/s turbiné depuis Sainte-

Croix. Au final, ce même $1 \text{ m}^3/\text{s}$ n'aura donc pas généré le même revenu. Aussi, les relations débit/puissance introduites dans MORGLite intègrent les puissances cumulées de l'ensemble des ouvrages hydrauliques sous l'influence de la grande réserve, avec l'hypothèse qu'ils soient dans une configuration de hauteur de chute optimale et de non déversement.

MORGLite ne simulant que les débits turbinés et déversés sur chaque réserve, il est nécessaire entre ces étapes de repasser par une vision à l'échelle des bassins pour prendre en considération les apports des bassins versants intermédiaires, les consommations d'eau par les usages de manière à actualiser les données et conditions servant aux optimisations et/ou aux simulations suivantes. Cette étape d'agrégation des informations sur l'ensemble des domaines étudiés est faite par de simple bilan au pas de temps journalier. Aucune considération de la dynamique de propagation des influences n'a été faite, sous-domaine ce qui semblait cohérent avec la gestion « synchrone » des aménagements.

A l'issue de ces quatre phases, de multiples informations issues de la simulation sont disponibles :

- *Ressource Naturelle* par sous-domaine ;
- *Prélèvement et restitution* par sous-domaine ;
- *Demande* de sollicitations aux trois grandes réserves ;
- *Débits influencés* tenant compte des objectifs de gestion et de leur hiérarchisation.

A partir de ces différentes informations, il est alors aussi possible de mesurer les capacités du système de trois grandes réserves à satisfaire les différents objectifs (tenue des débits objectifs / tenue des cotes touristiques / consommation de la tranche d'eau agricole / ...).

Analyse des performances

Dans l'exercice mené lors du projet, les apports naturels exploités sont ceux fournis par le modèle hydrologique CEQUEAU. Les prélèvements des consommations et des réseaux d'alimentation des usages sont issus des modèles décrits plus haut. En particulier, MODIC a été choisi pour représenter les besoins agricoles. Les résultats présentés ici concernent la variante de MODIC qui considère un cycle phénologique fixe (MODIC_CF).

L'ensemble de ces modélisations n'est conditionné que par le climat et des descripteurs physiques des territoires et des ouvrages. En temps présent, le climat est formé par les données de la réanalyse SPAZM pour les précipitations et la température, complété par la base DuO pour produire une estimation de l'évapotranspiration de référence ET_0 . La simulation en temps présent permet de produire des résultats sur la période 1981-2008. L'évaluation est faite avec des données historiques d'exploitation récupérées sur la période 1993-2004, période pour laquelle l'ensemble des informations sur l'ensemble des trois ouvrages hydrauliques étaient disponibles.

L'analyse des écarts à ces données d'exploitation doit être faite avec beaucoup de prudence. Les écarts peuvent avoir plusieurs origines. La plus évidente est bien évidemment les biais introduits par les modélisations, parce qu'inévitablement, les choix de simplification d'une réalité conduisent à des limites de la représentation (représenter l'intérêt du système électrique par une fonction de sensibilité à la température est extrêmement réducteur). Par ailleurs, les écarts peuvent aussi trouver des explications dans des facteurs dynamiques. En effet, il est possible que sur cette période les processus de gestion aient pu évoluer. Un exemple est donné par l'objectif de cote à Serre-Ponçon qui a progressivement occupé une place plus importante dans la gestion de la retenue dès 2002 et traduit en 2008 par une convention entre EDF et le Syndicat Mixte d'Aménagement et de Développement de Serre-Ponçon (SMADESEP). Ces évolutions ne se font pas indépendamment du progrès scientifique qui permet aussi de faire progresser les outils d'optimisation, de mieux prévoir les apports, d'intégrer les différentes contraintes, celles relatives aux règles de gestion des réserves et des cotes, à l'environnement ou aux besoins énergétiques, mais également aux opérations de maintenance, et au final de gérer plus finement les aménagements.

Avec ces limites, la Figure 54 montre que le modèle de gestion est capable de bien rendre compte du cycle interannuel de stockage / déstockage dans l'ensemble des trois grandes réserves du bassin. Deux écarts de la simulation aux observations peuvent toutefois être notés : une surestimation du niveau de stock sur la période hivernale et un creusement un peu plus important des retenues en fin d'été.

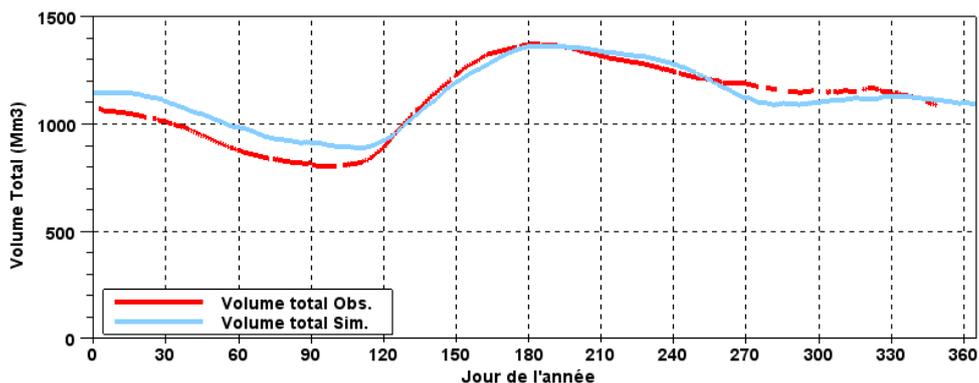


Figure 54 : Volume total d'eau dans les retenues de Castillon, Sainte-Croix et Serre-Ponçon

Ces écarts semblent trouver une part d'explication dans la modélisation des apports par le modèle CEQUEAU. Le volume de l'onde de fonte est légèrement sous-estimé par la modélisation hydrologique ce qui conduit le modèle de gestion à moins creuser les retenues pour garantir leur remplissage en lien avec les objectifs de cotes touristiques. A l'inverse, à l'automne, la modélisation hydrologique a plutôt tendance à surestimer la reprise des écoulements sous l'influence d'épisodes convectifs intenses, ce qui conduit le modèle de gestion à forcer un creusement de la retenue pour limiter le risque de déversement.

Une autre piste d'explication est celle du poids porté par quelques années particulières d'un point de vue climatique (intensément sèche ou humide) dans le calcul des courbes de remontée et de descente. Dans cet exercice numérique, l'optimisation et la simulation sont conduites sur le même panier d'années antérieures à l'année en cours. Du fait d'un nombre réduit d'années de calage, les années singulières peuvent être artificiellement surreprésentées. La Figure 55 permet, au travers des données d'observations de l'équivalent en eau du manteau neigeux sur trois postes du bassin versant de la Durance, de voir que cette année 2002 n'a pas d'équivalent dans l'historique disponible. Le très faible enneigement incite le gestionnaire à être prudent : n'utiliser l'eau (rare) que dans des situations de très fort intérêt pour le système électrique pour favoriser la remontée. Inévitablement, cette situation de faible hydraulicité conduit dans l'exercice numérique à une gestion beaucoup plus prudente dans la phase de remplissage de la réserve que la gestion historique qui ignorerait la réalisation possible d'une telle année.

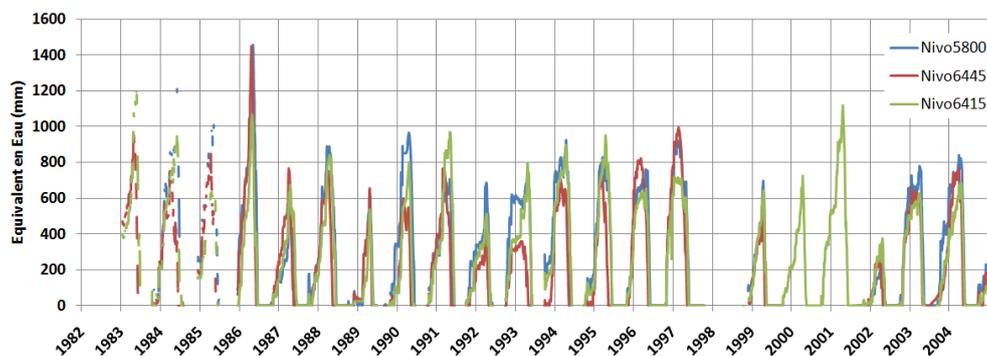


Figure 55 : Observation ponctuelle du stock de neige (équivalent en eau en mm) sur trois points de suivi EDF DTG

L'examen des cotes sur les trois retenues et leur variabilité entre les différentes années (Figure 56) montre que le modèle restitue la variabilité entre les années de manière très satisfaisante pour chacune des trois réserves hydrauliques. Le taux de respect des cotes estivales semble conforme à ce que nous renvoient les historiques d'exploitation. Les années de défaillance sont bien identifiées ; cependant, l'intensité de la défaillance n'est pas toujours bien saisie dans la modélisation intégrée.

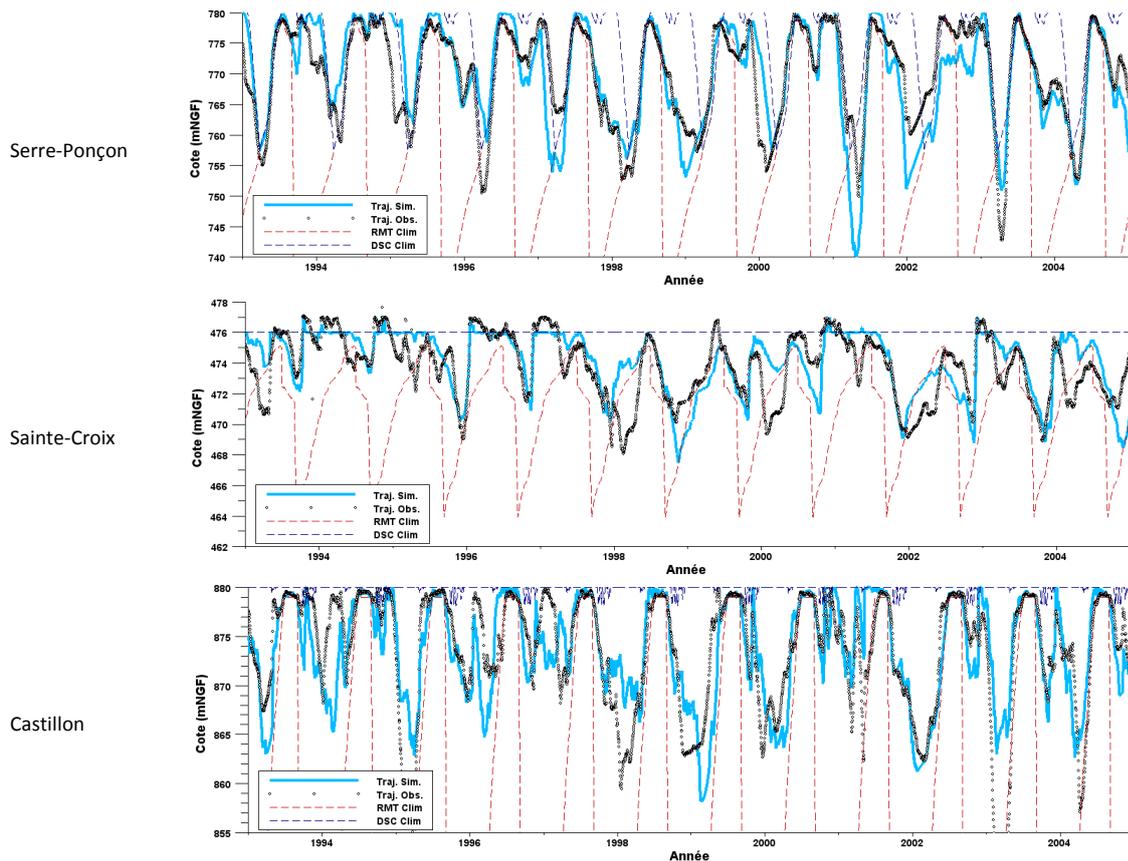


Figure 56 : Cotes simulées et observées pour les trois retenues de Serre-Ponçon, Sainte-Croix et Castillon sur la période 1993-2004

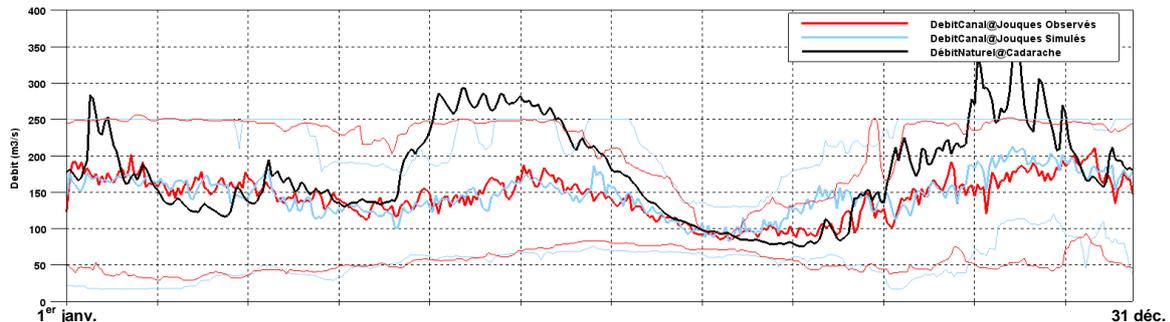


Figure 57 : Statistiques interannuelles sur les débits simulés et observés dans le canal usinier en aval de Cadarache calculées sur la période 1990-2004 (en trait gras : moyenne ; en trait fin : premiers et derniers déciles)

Il est aussi possible de s'assurer de la capacité de la modélisation aux points clés pour lesquels nous disposons d'observations. L'analyse se concentre en aval immédiat de la confluence Durance-Verdon qui constitue un nœud important de la question. La Figure 57 permet de juger de la cohérence entre débits simulés et débits observés au pas de temps journalier dans le canal usinier de l'aménagement de Cadarache-Jouques. Les résultats sont plus que satisfaisants avec des différences entre moyennes interannuelles très faibles devant l'intensité de l'artificialisation du régime hydrologique (écart au débit naturel). De même, les quantiles 10% et 90% sont très bien reconstitués et le modèle reproduit bien les saisons où l'usage énergétique est dominant (fort écart entre les deux quantiles 10% et 90%) et les saisons où la gestion est pilotée par la sécurisation des prélèvements (période estivale avec faible variance des débits). Un écart existe toutefois en fin d'été entre la simulation et l'observation. Ce point est à mettre en lien avec la tendance du modèle de gestion à creuser plus que de raison les retenues en lien avec la surestimation des débits d'automne par la modélisation hydrologique, que nous avons déjà mentionnée précédemment.

Il est aussi intéressant de s'assurer que la modélisation intégrée reproduit bien des variables « cœur » des préoccupations de la gestion de l'eau sur le bassin de la Durance et du Verdon comme le sont les volumes

prélevés et consommés des tranches d'eau réservées dans les réserves hydrauliques. Les volumes prélevés sont indicateurs de l'équilibre entre la demande en eau et l'offre naturelle locale (apport de la pluie et des bassins versants intermédiaires en aval des barrages). La consommation des tranches d'eau réservées témoigne du soutien des grandes réserves hydrauliques pour offrir un complément d'eau à l'offre naturelle en période de basses eaux. Nous illustrons ci-après ces éléments sur le périmètre de la Commission Exécutive Durance (et associé à la réserve hydraulique de Serre-Ponçon) pour laquelle il existe un recul historique conséquent pour se comparer à notre modélisation. Les données historiques disponibles au périmètre de la Commission Exécutive Durance (CED) sont issues des travaux de surveillance tenus par EDF DTG à partir de diverses stations de suivi de débits ainsi que des reconstitutions à partir des bilans d'eau sur les différents aménagements de la chaîne Durance. La consommation de la tranche d'eau réservée de Serre-Ponçon est le résultat d'un post-traitement visant à différencier les usages antérieurs à la construction de l'aménagement et qui ne sont pas consommateurs de la tranche d'eau, de ceux qui ont pu se développer depuis la création du barrage de Serre-Ponçon appliquées aux séries simulées. Le point de départ est l'information de débit naturel simulé par le modèle CEQUEAU à Cadarache et les prélèvements nets simulés au périmètre CED (le prélèvement net est défini comme la somme des prélèvements entre le barrage de Cadarache et le seuil de Bonpas situé plus en aval, moins les retours d'eau en amont de Bonpas). Le débit naturel est corrigé des influences préexistantes à la construction de Serre-Ponçon entre les barrages de Serre-Ponçon et de Cadarache pour obtenir « le débit naturel au sens CED ». La consommation de la tranche d'eau est alors le cumul des prélèvements nets au-dessus du débit naturel au sens CED. La Figure 58 permet de s'assurer sur la période 1989-2004 de la cohérence entre les simulations et les reconstitutions EDF DTG des deux séries ainsi obtenues (prélèvements nets associés au périmètre de la Commission Exécutive Durance et consommation de la tranche d'eau réservée de Serre-Ponçon).

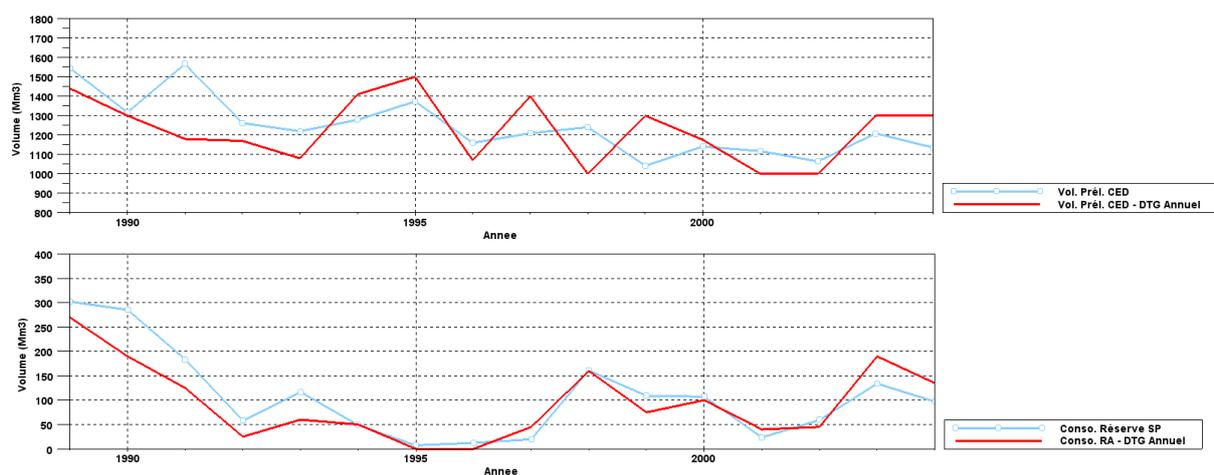


Figure 58 : Prélèvements nets et consommation de la tranche d'eau sur le périmètre des usages associés à Serre-Ponçon (en bleu : résultats produits par le projet ; en rouge : estimations issus d'EDF DTG)

Les volumes de prélèvements nets apparaissent cohérents avec ceux disponibles auprès d'EDF DTG. En moyenne sur la période, le volume annuel estimé par EDF DTG est de 1226 Mm^3 tandis que celui issu de la modélisation est de 1242 Mm^3 . Des écarts entre les années sont perceptibles ; toutefois, la tendance plutôt à la baisse des prélèvements nets est bien reproduite. Concernant la consommation de la tranche réservée de Serre-Ponçon, les écarts apparaissent très contenus par comparaison aux prélèvements nets. En moyenne sur la période considérée, le volume annuel consommé est de 94 Mm^3 pour l'estimation EDF DTG et 107 Mm^3 pour notre modélisation intégrée.

V. Les projections climatiques régionalisées

La construction de projections climatiques régionalisées pour le projet R²D² 2050 s'appuie largement sur la méthodologie développée dans le cadre du projet ANR RIWER2030 (Hingray *et al.*, 2013) et reprend en grande partie les résultats qui en sont issus.

1. Projections climatiques globales

Les projections climatiques sur la Durance s'appuient sur les simulations globales réalisées dans le cadre du projet européen ENSEMBLES (van der Linden and Mitchell, 2009). Dans la deuxième série d'expériences de ce projet (appelée STREAM2), les versions les plus récentes des modèles globaux du climat ont été utilisées pour simuler le climat entre 1860 et 2100 en s'appuyant sur des forçages observés (gaz à effet de serre, aérosols et ozone) jusqu'en 2000, et sur le scénario d'émissions A1B (Nakicenović et Swart, 2000) au-delà de l'année 2000 (Johns *et al.*, 2011). De fait, l'ensemble des projections climatiques futures utilisées dans le projet R²D² 2050 seront basées sur ce scénario qualifié de médian en termes d'émissions de gaz à effet de serre, et qui se révèle malheureusement sous-estimer les émissions réelles observées depuis le début du XX^e siècle. La différence d'impact sur la température globale des différents scénarios d'émissions est cependant limitée jusqu'au milieu du XXI^e siècle, ce qui joue en faveur de la généralité des résultats découlant du choix de ce scénario. Les projections globales utilisées sont constituées de 11 simulations, appelées *runs*, effectués par 4 GCMs différents (Tableau 19).

Acronyme	Institut	GCM	Nombre de runs	Référence
CNCM33	CNRM (France)	CNRM-CM3.3	1	Salas-Méla <i>et al.</i> (2005)
EGMAM2	FUB (Allemagne)	EGMAM+	1	Huebener <i>et al.</i> (2007)
IPCM4	IPSL (France)	IPSL-CM4_v2	3	Marti <i>et al.</i> (2010)
ECHAM5	DMI (Danemark) et MPI (Allemagne)	ECHAM5-C	6	Roeckner <i>et al.</i> (2006)

Tableau 19 : Liste des projections globales utilisées

2. Régionalisation statistique

La résolution spatiale de ces projections n'étant pas adaptée à des simulations hydrologiques sur un territoire comme la Durance, une étape de descente d'échelle (ou régionalisation) a été mise en place dans le cadre du projet ANR RIWER2030 (Hingray *et al.*, 2013). Trois méthodes de descente d'échelle statistiques (MDES) ont été utilisées. Ces méthodes sont des variantes ou s'apparentent à l'approche par analogie introduite par Lorenz (1969). Dans cette approche par analogie, l'hypothèse est faite que des situations similaires en termes de circulation atmosphérique de grande échelle (position des zones de hautes/basses pressions, etc.) et/ou en termes de configurations météorologiques à l'échelle régionale (*e.g.* précipitations régionales moyennes) conduisent à des valeurs similaires en termes de météorologie locale (précipitations, température, etc.). Les trois méthodes ont été utilisées dans d'autres études précédentes sur l'impact du changement climatique et leurs caractéristiques sont résumées dans le Tableau 20. De plus amples détails sur chacune des méthodes sont donnés par Hingray *et al.* (2013) et Lafaysse *et al.* (2014).

Plusieurs versions de ces méthodes ont été testées au cours de leur développement (*e.g.* Lafaysse, 2011). Le choix des versions retenues résulte d'une évaluation comparative approfondie. L'évaluation a d'abord porté sur leur capacité à reproduire les caractéristiques statistiques ainsi que les variations journalières des différentes variables météorologiques de surface observées pour la période récente. Pour cette évaluation, le forçage utilisé est celui donné par les réanalyses NCEP/NCAR. La capacité des méthodes à simuler des scénarios multivariés cohérents, et par suite des scénarios hydrologiques pertinents, a aussi été évaluée. Les différentes méthodes donnent des performances équivalentes pour les différents critères d'évaluation considérés. Les résultats de ces évaluations sont décrits par Hingray *et al.* (2013) et par Lafaysse *et al.* (2014).

Acronyme	Institut	Méthode	Description	Référence
ANALOG	EDF/LTHE	analog20	Analogues	Obled <i>et al.</i> (2002)
DSCLIM	CERFACS	dsclim11a2	Types de temps + fonctions de transfert	Boé <i>et al.</i> (2006)
D2GEN	LTHE	d2gen22	Fonctions de transfert + analogues	Mezghani et Hingray (2009)

Tableau 20 : Liste des méthodes de régionalisation statistique utilisées dans le projet.

Ces méthodes ont besoin de deux archives, l'un de grande échelle—ici la réanalyse atmosphérique NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996) – fournissant les *prédicteurs* caractérisant la circulation atmosphérique, et l'autre de petite échelle – ici la réanalyse météorologique hybride DuO (Magand *et al.*, 2014b) – fournissant les valeurs correspondantes des variables météorologiques de surface pertinentes pour la modélisation hydrologique, les *prédicteurs*. Les méthodes de régionalisation statistiques ont été appliquées de la manière suivante : pour chaque journée de la période simulée par le GCM considéré, la méthode recherche des situations analogues – en termes de situation atmosphérique à grande échelle, dans la réanalyse NCEP/NCAR. Les variables météorologiques de surface de ces jours analogues dans la réanalyse SAFRAN sont ainsi pris comme valeurs plausibles à associer à la situation donnée par le GCM. Ces étapes sont répétées pour l'ensemble des jours entre 1860 et 2100, et pour chaque run de GCM. La période utilisée comme source d'archive commune aux deux réanalyses est comprise entre le 1er août 1980 et le 31 juillet 2005 (Hingray *et al.*, 2013).

Pour chacun des jours cibles dans un run de GCM, chacune des méthodes de régionalisation fournit non pas 1 mais 10 jours analogues possibles, et par là-même une vision probabiliste des liens entre grande échelle et petite échelle. La construction d'un scénario sur l'ensemble de la période de simulation considérée (1860-2100) consiste à choisir au hasard, pour chacun des jours de la période, un parmi ces 10 scénarios journaliers. L'application répétée de la méthode de régionalisation et du processus de construction de chroniques-scénarios conduit donc à générer différents chroniques-scénarios plausibles des variables météorologiques locales. Pour un forçage donné (un run de GCM), 100 réalisations de ce type ont été produites pour chacune des trois méthodes de régionalisation.

Chaque date analogue s'accompagne d'une perturbation additive à appliquer à la température du jour analogue identifié afin d'assurer une cohérence de la température à échelle régionale fournie par le GCM pour le jour cible (Mezghani et Hingray, 2009 ; Hingray *et al.*, 2013). Cette perturbation journalière est appliquée de manière équivalente sur l'ensemble du bassin et à tous les pas de temps de la journée. Contrairement au projet ANR RIWER2030 qui portait seulement sur la partie amont de la Durance, nous n'avons pas appliqué de perturbations multiplicatives pour les précipitations car elles pouvaient générer des valeurs locales ponctuellement irréalistes sur ce plus grand bassin. Dans le cas où une correction de la température est nécessaire, les variables météorologiques liées sont aussi corrigées pour assurer une certaine cohérence physique du scénario multivarié, suivant l'approche proposée par Etchevers (2000) et reprise dans le projet ANR RIWER2030. Des travaux spécifiques ont de plus été réalisés dans le projet R²D² 2050 sur la variable d'évapotranspiration de référence ET_0 , requise par de nombreux modèles d'impact (Tilmant *et al.*, 2013). Une perturbation multiplicative homogène spatialement de l' ET_0 du jour analogue extrait de DuO a tout d'abord été mise en place, puis agrémentée d'un coefficient constant pour chacune des 27 zones pavant le bassin afin de prendre en compte la disparité spatiale de cette évapotranspiration. La pertinence de ce traitement a été examinée préalablement en appliquant la formule de Penman-Monteith aux variables issues des MDES de manière exhaustive. La méthode utilisée a permis d'économiser du temps de calcul et de l'espace disque.

3. Liste des projections climatiques régionalisées disponibles pour le projet

Une grande partie des expériences de régionalisation utilisées ici a été réalisée dans le cadre du projet ANR RIWER2030. Une seule variante de chaque méthode de régionalisation a par exemple été sélectionnée ici sur la base des résultats obtenus sur la Haute Durance. Des expériences complémentaires ont en revanche été produites par EDF-DTG pour le projet R²D² 2050 afin de compléter la matrice des combinaisons entre GCM et MDES et ainsi faciliter l'étude des incertitudes. L'ensemble des expériences, résumées dans le Tableau 21, est constitué de 11 (runs de GCMs) x 3 (méthodes de régionalisation) x 100 (réalisations stochastiques), soit 3300 projections climatiques, constituées chacune de chroniques journalières de dates analogues sur la période 1er janvier 1860 – 31 décembre 2100. Ces projections ont enfin été restreintes temporellement à la période 1er janvier 1958 – 31 juillet 2065, suivant un compromis entre temps de calcul et horizon temporel visé par le projet. Deux périodes listées dans le Tableau 22 ont de plus été choisies pour comparer les résultats de modélisation en climat présent et en climat futur à l'horizon 2050.

	ANALOG	DSCLIM	D2GEN
CNCM33	1	1	1
EGMAM2	1	1	1
IPCM4	3	3	3
ECHAM5	6	6	6

Tableau 21 : Nombre de runs de GCMs régionalisés par chacune des MDES et mis à disposition pour le projet R²D² 2050. Le nombre de simulations effectif est à multiplier par le nombre de réalisations stochastiques par combinaison run/MDES, soit 100. En italique sont indiquées les expériences de régionalisation effectuées dans le cadre du projet R²D² 2050

Période	Début	Fin
PST	1 ^{er} août 1980	31 juillet 2009
FUT	1 ^{er} août 2036	31 juillet 2065

Tableau 22 : Définition des périodes temporelles

4. Sélection de projections pour les modèles d'impact

La quantité de projections disponibles décrite au-dessus s'est très vite révélée au-delà des capacités de calcul associées à certains des différents modèles d'impact (modèles hydrologiques, modèles d'irrigation, modèles de gestion de l'eau). Un travail de sélection a donc été engagé dès le début du projet afin de parvenir à réduire le nombre de projections climatiques qui seraient utilisées comme forçages des modèles d'impact. Cette sélection se devait en outre d'être hiérarchique pour harmoniser au maximum les résultats entre modèles avec différents niveaux de contraintes.

Plusieurs questions difficiles ont dû être tranchées sur les objectifs, les bases, le type, et les variables impliquées de la sélection. Il faut en effet noter que très peu d'études proposent des recommandations pour effectuer ce type de sélection pour des études d'impact (voir Whetton *et al.*, 2012, pour un des rares exemples), et l'approche innovante proposée ici a fait l'objet de plusieurs communications (voir par ex. Vidal et Hingray, 2013). Deux idées principales ont guidé les choix effectués. Premièrement, conserver le plus possible la diversité des sources d'incertitudes présentes dans l'ensemble initial présenté au-dessus afin de pouvoir faire une étude d'incertitudes la plus complète possible sur les résultats des modèles d'impact. Deuxièmement, conserver un sous-ensemble de projections qui possède les mêmes propriétés statistiques que l'ensemble initial en termes de changements entre les périodes PST et FUT. Dans cette optique a été mis en œuvre un échantillonnage par hypercubes latins (McKay *et al.*, 1979), qui permet de réduire la taille d'un échantillon en conservant les distributions sur certaines variables dits *de conditionnement*. Cette approche a été adoptée à plusieurs reprises dans le domaine de la climatologie (Murphy *et al.*, 2007) et de l'hydrologie (Murphy *et al.*, 2006), et récemment pour l'échantillonnage de projections climatiques pour des études d'impact sur les ressources en eau (Christierson *et al.*, 2012).

Six variables de conditionnement ont été choisies comme clés en termes de changement climatique pour l'ensemble des études à mener et sur lesquelles se baser pour effectuer la sélection : les changements (entre PST et FUT) sur les températures et précipitations moyennes estivale et hivernale, et les changements (toujours entre PST et FUT) sur la variabilité interannuelle des températures et précipitations annuelles. De plus ces variables ont été calculées à l'échelle du bassin versant de la Durance à Mallemort, qui initialement devait représenter le plus grand bassin modélisé par les modèles hydrologiques.

La sélection hiérarchique a été effectuée suivant les étapes suivantes :

- *Réduction de 3300 à 330* afin de conserver tous les types d'incertitude présents dans l'échantillon initial (voir section « Un regard sur les incertitudes », page 218) : Cette étape de sélection visait à réduire le nombre de réalisations stochastiques des MDES de 100 à 10 pour chacune des combinaisons entre run de GCM et MDES. Elle s'est basée sur un échantillonnage par hypercubes latins conditionné par les 6 variables listées au-dessus pour chacune des combinaisons. Ce jeu de 330 projections a été utilisé par l'ensemble des modèles hydrologiques sur le bassin de la Durance.
- *Réduction de 330 à 33* : Cette deuxième étape a consisté à identifier une seule réalisation stochastique par chaîne de modélisation sur les 10 sélectionnées au-dessus. L'approche par membre exemple (voir par exemple Taylor *et al.*, 2013) a ici été adoptée, en choisissant la réalisation qui présentait le rang médian pour l'ensemble des 6 variables de conditionnement. Cet échantillonnage ne permet donc plus de

caractériser la variabilité interne petite échelle des chaînes de modélisation (voir section « Un regard sur les incertitudes », page 218). Ce jeu de projections devait initialement être utilisé par les modèles d'irrigation dont les contraintes de calculs se sont finalement révélées trop importantes.

- **Réduction de 33 à 10** : Cette dernière étape visait enfin à produire un ensemble minimal de projections utilisable par les modèles les plus coûteux en temps de calcul. L'objectif était toujours de conserver les distributions initiales des variables clés. Un nouvel échantillonnage par hypercubes latins a donc été réalisé encore une fois sur ces mêmes variables, sans tenir compte de la provenance (GCM, MDES) des projections initiales. Ce dernier échantillonnage ne permet donc plus d'effectuer d'analyse de la partition des incertitudes entre les différentes sources. A noter enfin que les dix projections échantillonnées ne sont représentatives que de 30 combinaisons GCM/ run de GCM / MDES, les simulations de la combinaison IPCM4/ANALOG ayant été mises à disposition postérieurement. Ce jeu de dix projections a été utilisé par tous les modèles de demande en eau d'irrigation et partiellement par le modèle de gestion des retenues.

La sélection hiérarchique sur les six variables clés est représentée sur la Figure 59. Vidal et Hingray (2013) ont montré que les résultats du premier niveau de sélection, s'il était par construction pertinent pour les variables clés à l'échelle du bassin entier, l'était aussi pour chacun des 27 sous-bassins composant le territoire, et pour des variables moins intégrées et liées aux ressources en eau, comme les changements sur la pluie quinquennale sèche ou sur le nombre maximal de jours secs consécutifs.

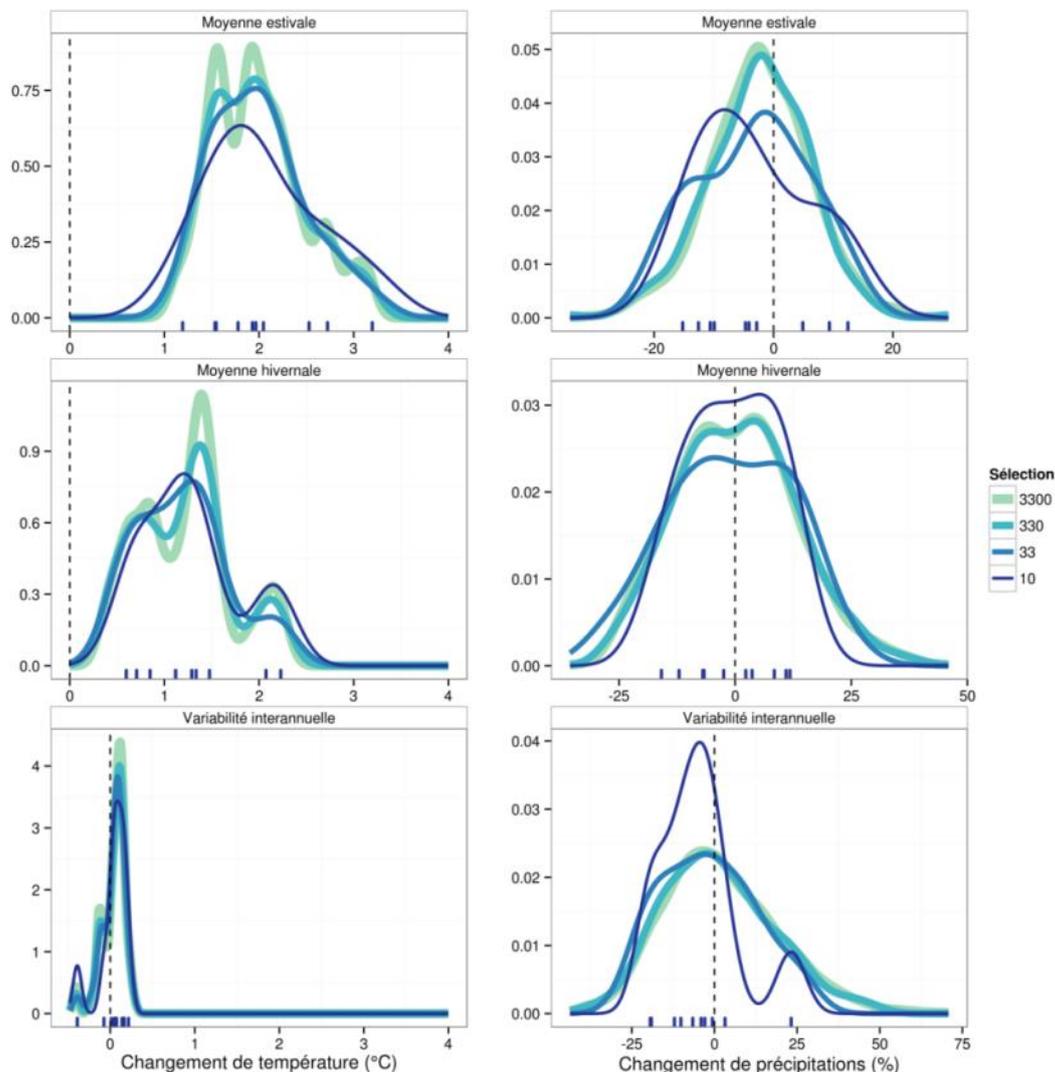


Figure 59 : Distribution statistique des variables clés sur l'échantillon de projections climatiques à chaque étape de la sélection hiérarchique. Les segments sur l'axe des abscisses représentent les dix projections retenues au dernier niveau (sur la gauche les températures, et sur la droite les précipitations totales)

VI. L'hydro-climatologie du bassin versant de la Durance en 2050

L'effet du changement climatique est mesuré sur un ensemble de variables hydrologiques (X = précipitation, température, ET_0 , débit, stock de neige...) par les différences ΔX entre la valeur en temps présent PST (01/08/1980 – 31/07/2009) et celle en temps futur FUT (01/08/2036 – 31/07/2065).

1. Evolution du climat

La Figure 60 et la Figure 61 illustrent les évolutions des précipitations et températures saisonnières et la variabilité climatique simulée par les chaînes GCM/MDES à l'échelle de la Durance. Se dessinent :

- une tendance nette à l'augmentation régulière des températures quelle que soit la saison. Ces évolutions s'inscrivent dans la continuité de tendances identifiables sur les observations (en été) ;
- une absence de tendance manifeste sur les pluies.

L'examen des différences de précipitations, de températures et d' ET_0 entre PST et FUT sur les bassins versants de contrôle aux pas de temps mensuel (PM et TM , ET_0M) et annuel (PA , TA , ET_0A) (Figure 62, Figure 63 et Figure 64) montre que :

- la dispersion des projections en termes de précipitations est forte,
- les changements de température mensuelle TM sont légèrement plus marqués en été qu'en hiver,
- peu de différences sont à noter entre les différents bassins versants.

La réponse uniforme sur les températures à l'échelle du bassin n'est en soi pas une surprise. C'est en effet une conséquence du mode d'élaboration des forçages : la température simulée de chaque jour sur chaque élément de la grille SAFRAN est obtenue par application d'une perturbation du champ des températures d'un jour analogue extrait du passé et cette perturbation définie sur le bassin versant de Serre-Ponçon est propagée sur l'ensemble du territoire.

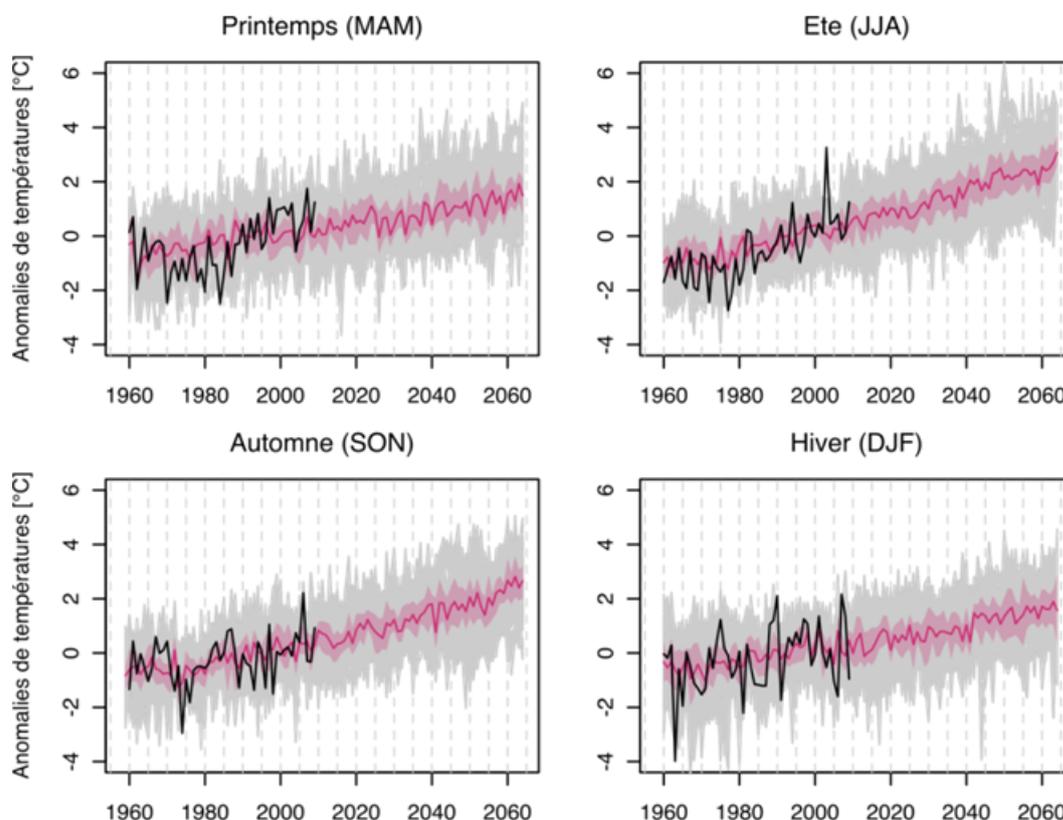


Figure 60 : Evolution des anomalies de températures saisonnières annuelles calculées par rapport à la période de référence 1980-2009. Les anomalies des 330 projections climatiques sont tracées en gris, la médiane (quantile 50%) est en rose et l'enveloppe rose est l'intervalle entre les premier et troisième quartiles (quantiles 25 et 75%). Les températures DuO sont représentées en noir

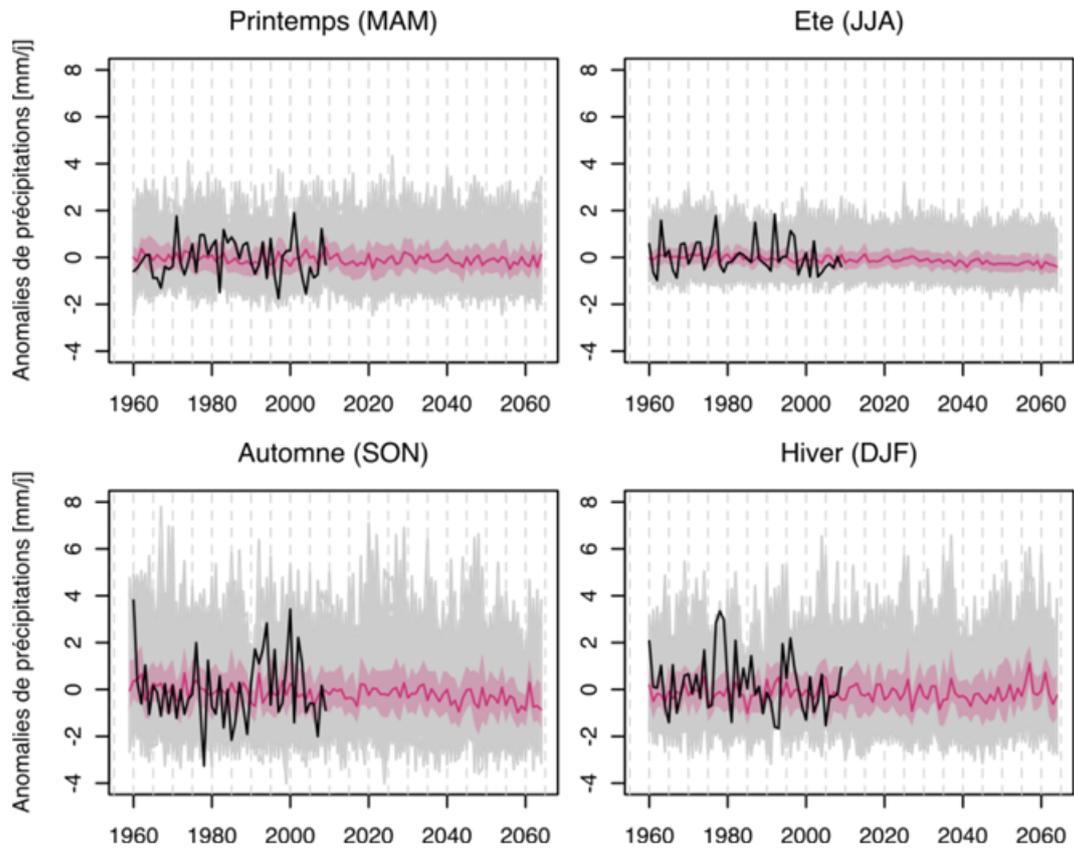


Figure 61 : Comme pour la Figure 60 mais pour les précipitations

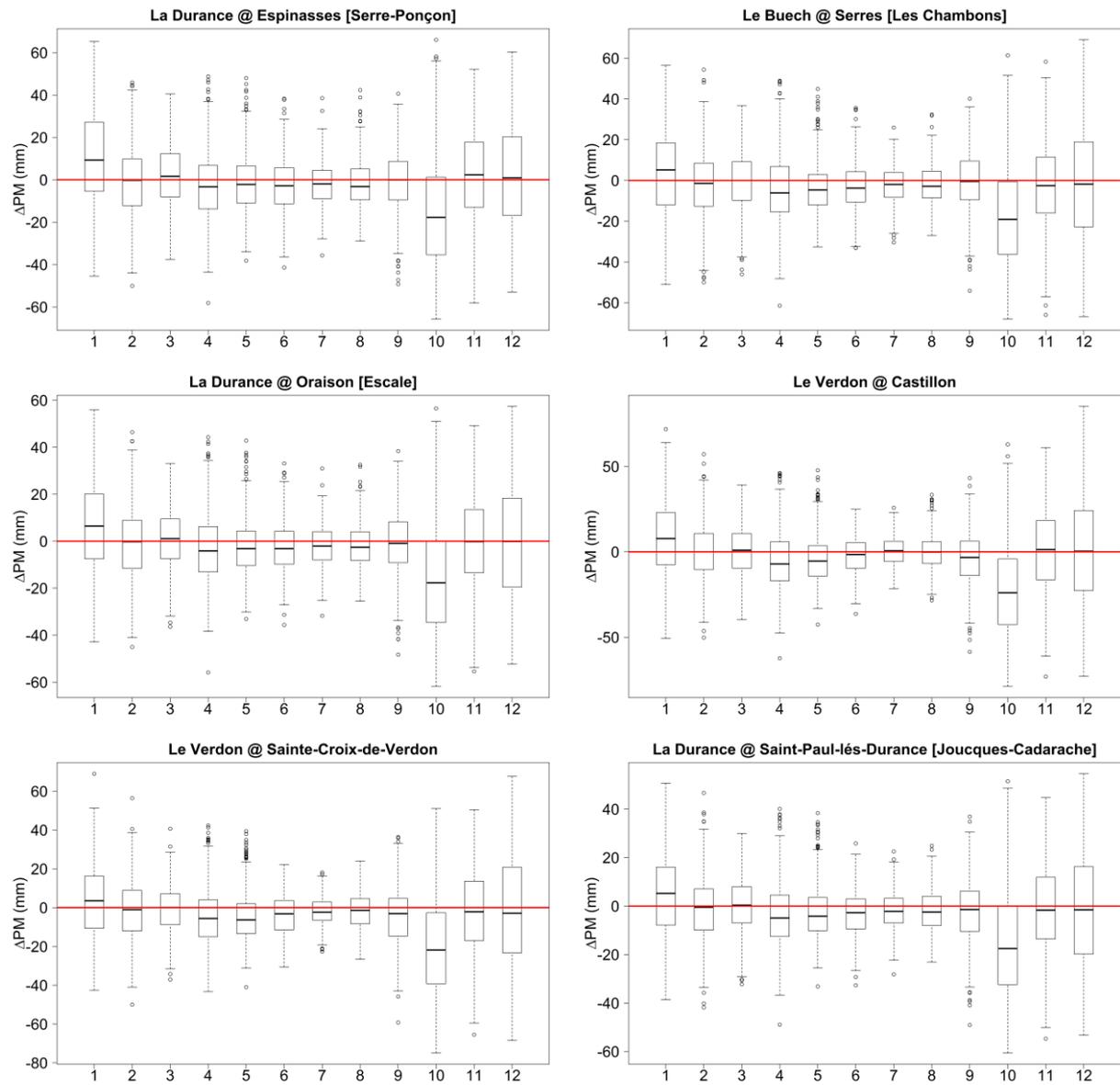


Figure 62 : Cycles annuels moyens des changements de précipitations sur six des sept bassins de contrôle (les boxplots précisent la médiane (trait épais horizontal), une boîte s'étendant du premier au troisième quartile)

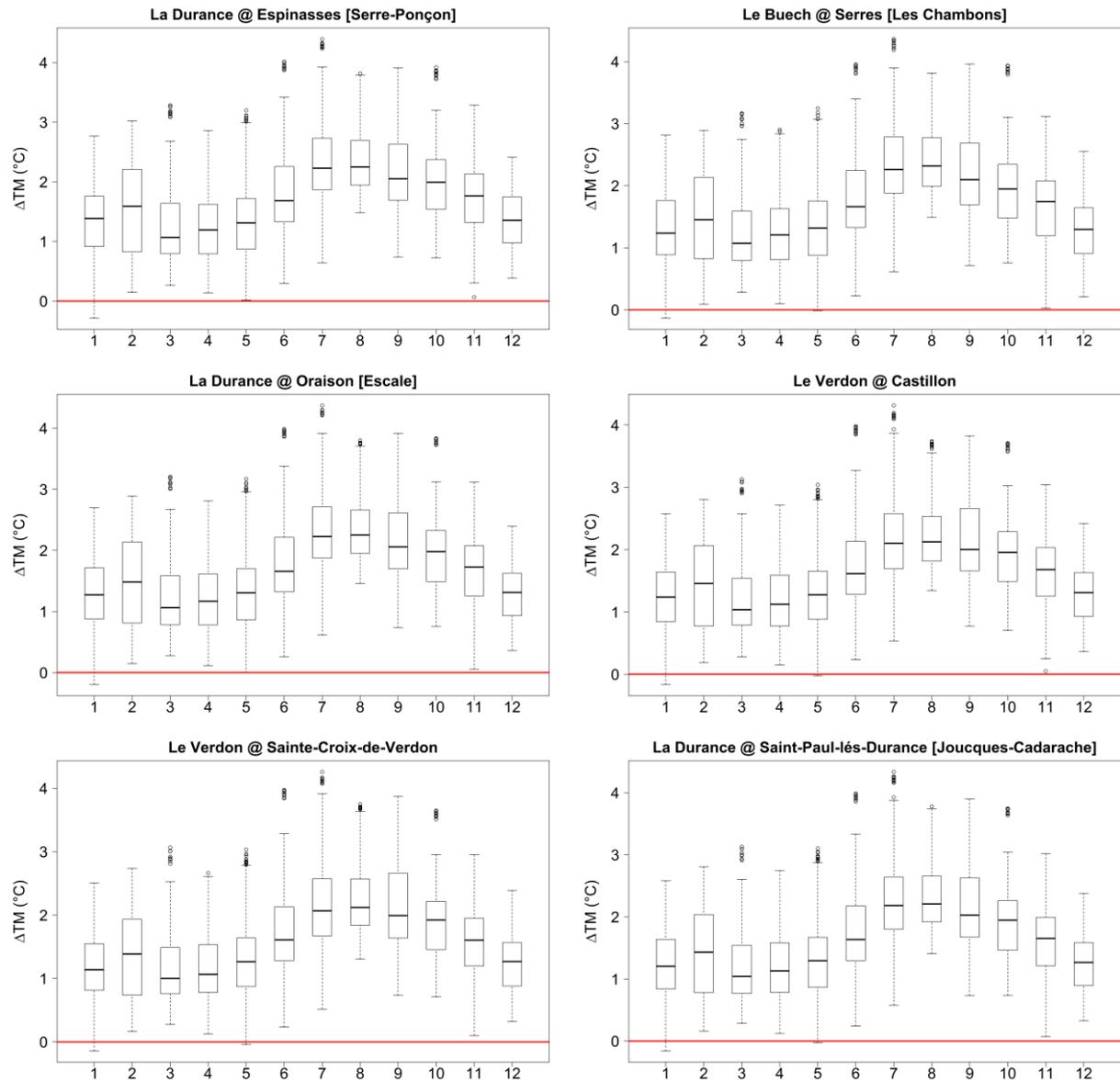


Figure 63 : Cycles annuels moyens des changements de température sur six des sept bassins de contrôle (les boxplots précisent la médiane (trait épais horizontal), une boîte s'étendant du premier au troisième quartile)

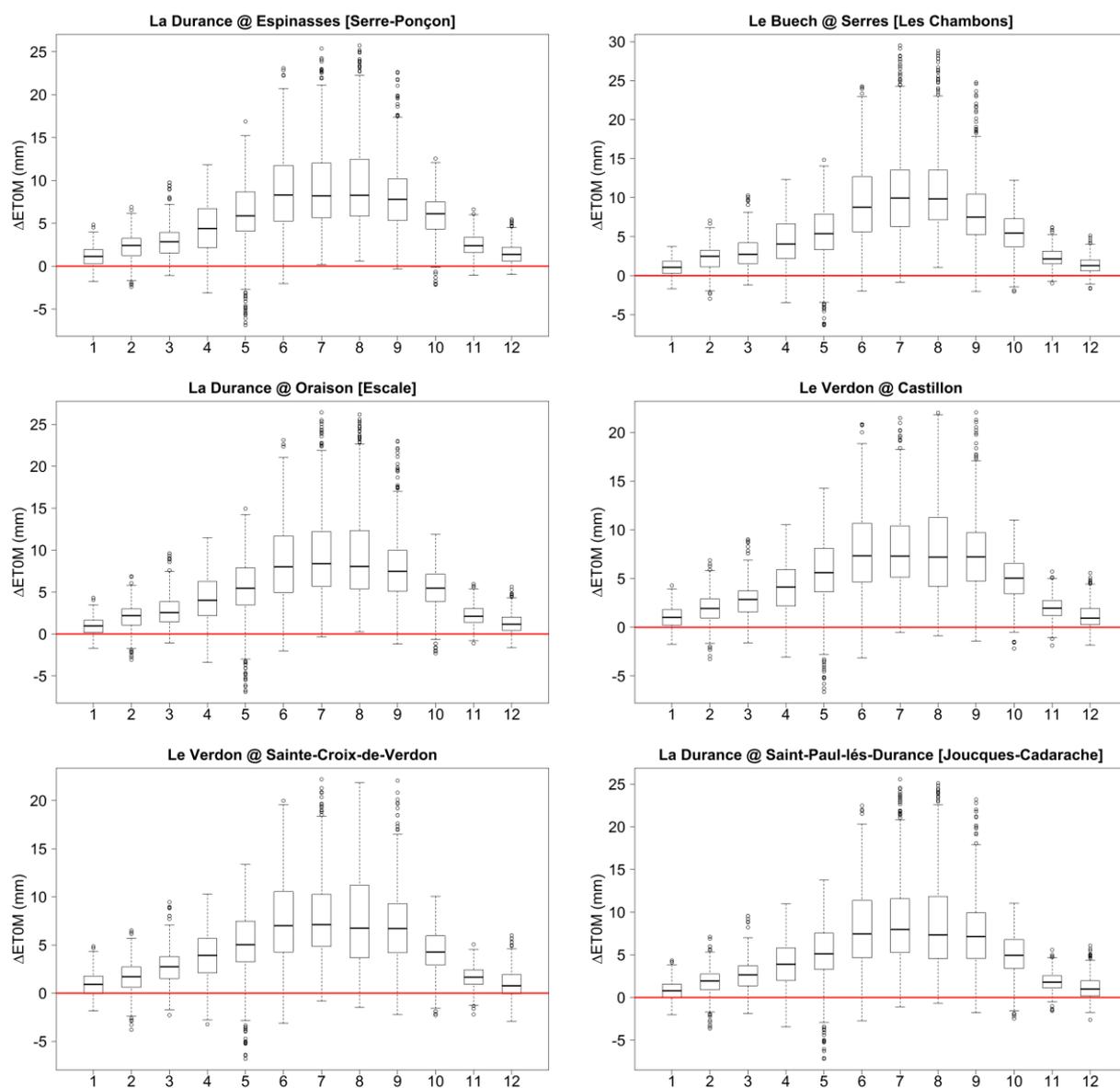


Figure 64 : Cycles annuels moyens des changements d' ET_0 sur six des sept bassins de contrôle (les boxplots précisent la médiane (trait épais horizontal), une boîte s'étendant du premier au troisième quartile)

D'autres statistiques descriptives de la variabilité sur les 330 projections GCM/MDES ont été calculées : le nombre de jours moyen dans l'année avec des précipitations de moins de 1 mm et de plus de 10 mm, la température journalière dépassée en moyenne 5% du temps (T_{05}) et la température journalière dépassée en moyenne 95% du temps (T_{95}). Les évolutions sont reportées dans le Tableau 23 et le Tableau 24. Les valeurs associées aux variables mensuelles sont rappelées. Sont précisés les bornes de l'intervalle de confiance à 90% et le rapport $|\mu|/\sigma$, valeur absolue de la moyenne des changements divisée par l'écart-type des changements. Ce dernier indicateur permet de juger de la robustesse du signe du changement. Si $|\mu|/\sigma$ est supérieur à 1, la dispersion des résultats caractérisé par σ est moins forte que le changement moyen μ annoncé ; le signe est donc robuste ; dans le cas contraire, il n'y a pas convergence sur le signe de la tendance. Les caractéristiques issues de la réanalyse DuO sont rappelées dans le Tableau 26.

Nous constatons :

- l'absence de convergence sur les précipitations que ce soit sur les moyennes comme sur les extrêmes (aucune tendance ne se dégage sur le nombre de jours au-dessus du seuil 10 mm ni en dessous) ;
- la convergence des chaînes GCM/MDES vers une augmentation des températures qui concerne tous les mois et toute la gamme des températures (T_{05} et T_{95}). Il y a un glissement vers un climat plus chaud, l'été verra des changements plus importants (autour de +2.2 °C) que l'hiver (autour de +1.4 °C), et les

températures les plus faibles subiront des changements plus conséquents que les températures faibles ($\mu(T95) > \mu(T05)$);

- les chaînes GCM/MDES suggèrent une augmentation de $l'ET_0$, conséquence pour partie de l'augmentation de la température (ce n'est pas le seul paramètre météorologique dans la formule de Penman Monteith). La tendance est robuste pour 10 des 12 mois de l'année, est plus marquée en été et est partagée par l'ensemble des bassins. Le changement se situerait entre 50 et 60 mm par an (Tableau 25).

L'absence de signal sur les précipitations est peut-être une conséquence de l'absence de perturbation des pluies historiques dans les procédures de descente d'échelle.

		ΔPA (mm)	ΔPM (mm)												Différence de nombre de jours/an	
			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	$PJ < 1$ mm	$PJ > 10$ mm
La Durance @ Serre-Ponçon	μ	-9.8	10.3	-0.4	1.8	-2.8	-1.3	-2.0	-2.1	-1.8	-0.7	-14.3	1.7	1.8	1.5	-0.4
	σ	86.7	20.6	17.7	14.0	16.8	14.4	13.0	10.5	12.2	15.4	28.6	21.0	24.9	4.9	3.5
	q10	-118.8	-17.1	-22.1	-16.3	-21.9	-18.7	-17.5	-15.7	-16.9	-20.1	-46.7	-25.7	-31.6	-3.7	-3.7
	q90	90.5	38.0	21.2	18.5	17.8	17.0	15.4	10.2	14.2	18.4	29.2	28.4	34.2	7.3	3.7
	$|\mu|/\sigma$	0.1	0.5	0.0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.5	0.1	0.1	0.3	0.1
Le Buëch @ Serres	μ	-32.5	4.3	-1.8	-0.2	-3.5	-3.3	-2.9	-2.1	-1.9	-0.8	-15.7	-2.7	-1.9	2.8	-1.0
	σ	81.8	21.2	18.2	14.4	17.7	13.3	11.9	9.8	10.6	15.5	26.7	20.9	26.9	4.6	3.2
	q10	-135.2	-24.5	-24.8	-17.7	-23.0	-18.4	-17.0	-15.0	-15.5	-20.7	-46.1	-28.4	-38.5	-3.7	-3.7
	q90	63.3	30.9	21.1	17.2	19.7	13.9	11.8	9.9	12.6	18.2	24.5	23.9	34.3	7.3	3.7
	$|\mu|/\sigma$	0.4	0.2	0.1	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.6	0.1	0.1	0.6	0.3
La Durance @ L'Escalé	μ	-20.9	6.6	-0.7	0.8	-3.1	-2.2	-2.4	-2.1	-1.7	-1.2	-14.2	-0.5	-0.3	1.5	-0.8
	σ	76.5	18.5	16.1	12.8	15.5	12.6	11.1	9.1	10.1	14.2	25.8	19.1	23.8	4.8	3.1
	q10	-120.5	-17.6	-20.9	-16.0	-20.2	-16.5	-15.5	-12.6	-14.5	-19.9	-43.9	-25.2	-31.6	-3.7	-3.7
	q90	68.2	31.1	19.7	16.0	15.9	13.0	11.2	8.9	12.3	15.4	26.7	23.4	31.5	7.3	3.7
	$|\mu|/\sigma$	0.3	0.4	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.6	0.0	0.0	0.3	0.3
Le Verdon @ Castillon	μ	-24.2	7.3	0.3	0.1	-4.7	-3.8	-2.0	0.5	0.3	-4.0	-20.2	0.2	1.7	2.9	-0.8
	σ	86.2	21.8	18.4	15.4	18.3	14.8	10.7	8.9	10.5	15.7	29.4	23.7	31.6	4.3	3.1
	q10	-134.2	-23.0	-23.5	-22.7	-25.1	-21.1	-15.9	-10.8	-12.0	-23.2	-53.6	-31.8	-40.4	-3.7	-3.7
	q90	74.6	35.8	25.2	19.0	20.3	16.8	11.4	11.7	14.3	14.3	25.0	29.4	43.9	7.3	3.7
	$|\mu|/\sigma$	0.3	0.3	0.0	0.0	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.3	0.7	0.0	0.1	0.7	0.3	0.3
Le Verdon @ Sainte-Croix	μ	-41.7	2.6	-0.6	-0.7	-4.3	-4.7	-3.5	-2.1	-1.4	-4.7	-18.9	-2.1	-1.7	3.6	-1.4
	σ	73.7	19.3	16.4	12.6	15.4	13.5	10.1	7.3	9.4	14.6	25.8	20.3	27.6	4.4	2.6
	q10	-136.3	-24.1	-19.9	-16.9	-21.2	-20.5	-16.2	-11.0	-13.1	-21.7	-48.8	-29.0	-37.9	-3.7	-3.7
	q90	54.3	27.6	22.8	15.5	17.5	13.7	9.5	7.1	11.6	11.6	20.4	22.6	35.4	7.3	3.7
	$|\mu|/\sigma$	0.6	0.1	0.0	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.3	0.7	0.1	0.1	0.8	0.5
La Durance @ Cadarache	μ	-27.7	4.3	-0.8	0.3	-3.2	-2.8	-2.9	-2.1	-1.8	-2.0	-14.3	-1.5	-1.0	1.9	-1.2
	σ	68.0	16.8	14.5	11.6	14.3	11.8	9.7	8.1	8.7	13.4	23.8	17.6	22.8	4.7	2.9
	q10	-113.7	-18.5	-19.5	-15.1	-18.9	-16.5	-15.2	-11.7	-12.7	-18.7	-41.7	-24.1	-31.5	-3.7	-3.7
	q90	53.3	26.7	17.5	15.1	16.2	12.2	9.7	8.1	9.6	13.5	25.0	20.9	29.7	7.3	3.7
	$|\mu|/\sigma$	0.4	0.3	0.1	0.0	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.6	0.1	0.0	0.4	0.4	0.4
La Durance @ Mallemort	μ	-28.4	3.8	-0.8	0.2	-3.2	-2.9	-3.0	-2.1	-2.0	-2.0	-13.6	-1.6	-1.1	1.8	-1.0
	σ	65.4	16.2	13.9	11.2	13.7	11.4	9.3	7.8	8.5	13.2	22.9	16.9	22.0	4.6	3.0
	q10	-110.9	-18.5	-18.8	-14.6	-18.2	-16.5	-14.5	-11.3	-12.6	-17.7	-40.5	-23.3	-30.3	-3.7	-3.7
	q90	51.2	24.9	17.0	14.5	15.4	11.9	8.9	7.7	8.9	13.3	23.6	20.0	27.9	7.3	3.7
	$|\mu|/\sigma$	0.4	0.2	0.1	0.0	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.6	0.1	0.1	0.4	0.3	0.3

Tableau 23 : Changement sur les caractéristiques de précipitations par bassin

		ΔTA (°C)	ΔTM (°C)												$\Delta T95$ (°C)	$\Delta T05$ (°C)
			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D		
La Durance @ Serre-Ponçon	μ	1.7	1.4	1.5	1.3	1.3	1.4	1.8	2.3	2.4	2.2	2.0	1.7	1.4	2.2	1.4
	σ	0.5	0.6	0.8	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.6	0.7	0.7	0.7	0.5	0.7	0.7
	q10	1.2	0.6	0.4	0.6	0.5	0.7	1.0	1.4	1.8	1.2	1.1	0.6	0.8	1.5	0.5
	q90	2.6	2.2	2.6	2.1	2.0	2.5	2.9	3.6	3.5	3.3	2.8	2.4	2.0	3.4	2.3
	$|\mu|/\sigma$	3.4	2.1	1.9	2.0	2.1	2.0	2.4	3.0	4.0	3.0	3.0	2.6	2.9	3.2	2.1
Le Buëch @ Serres	μ	1.7	1.3	1.5	1.2	1.3	1.4	1.8	2.4	2.5	2.2	2.0	1.6	1.3	2.3	1.3
	σ	0.5	0.6	0.8	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.6	0.7	0.7	0.7	0.5	0.7	0.6
	q10	1.2	0.6	0.4	0.6	0.6	0.7	1.0	1.4	1.8	1.2	1.1	0.6	0.7	1.5	0.5
	q90	2.6	2.0	2.5	2.0	2.0	2.5	2.8	3.6	3.5	3.3	2.9	2.3	2.0	3.3	2.3
	$|\mu|/\sigma$	3.3	2.1	1.9	2.0	2.1	2.0	2.4	3.0	4.1	3.0	2.8	2.5	2.6	3.4	2.1
La Durance @ L'Escaie	μ	1.7	1.3	1.5	1.2	1.2	1.4	1.8	2.3	2.4	2.2	2.0	1.6	1.3	2.2	1.3
	σ	0.5	0.6	0.8	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.7	0.6
	q10	1.2	0.6	0.4	0.6	0.5	0.7	1.0	1.3	1.8	1.2	1.1	0.6	0.8	1.5	0.5
	q90	2.6	2.1	2.6	2.0	2.0	2.5	2.8	3.6	3.5	3.3	2.8	2.3	2.0	3.3	2.2
	$|\mu|/\sigma$	3.3	2.2	1.9	2.0	2.1	2.0	2.4	2.9	4.0	3.0	2.9	2.6	2.8	3.3	2.2
Le Verdon @ Castillon	μ	1.6	1.3	1.4	1.2	1.2	1.4	1.8	2.2	2.3	2.2	1.9	1.6	1.3	2.1	1.3
	σ	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.6	0.7	0.6	0.6	0.5	0.7	0.6
	q10	1.1	0.6	0.4	0.6	0.5	0.7	1.0	1.3	1.7	1.2	1.1	0.6	0.7	1.4	0.5
	q90	2.5	2.0	2.5	2.0	1.8	2.5	2.8	3.4	3.2	3.2	2.8	2.3	1.9	3.1	2.2
	$|\mu|/\sigma$	3.4	2.2	1.9	2.1	2.1	2.0	2.4	2.8	3.9	3.0	3.0	2.6	2.8	3.2	2.2
Le Verdon @ Sainte-Croix	μ	1.6	1.2	1.4	1.2	1.2	1.3	1.8	2.2	2.3	2.1	1.9	1.5	1.3	2.1	1.3
	σ	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.6	0.7	0.6	0.6	0.5	0.7	0.6
	q10	1.1	0.6	0.4	0.6	0.5	0.6	1.0	1.3	1.7	1.2	1.0	0.6	0.7	1.4	0.5
	q90	2.5	2.0	2.4	1.9	1.8	2.5	2.8	3.3	3.2	3.2	2.7	2.2	1.9	3.1	2.1
	$|\mu|/\sigma$	3.3	2.2	1.9	2.1	2.1	2.0	2.4	2.8	3.9	3.0	3.0	2.6	2.8	3.2	2.2
La Durance @ Cadarache	μ	1.7	1.2	1.4	1.2	1.2	1.4	1.8	2.3	2.4	2.2	1.9	1.6	1.3	2.2	1.3
	σ	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.7	0.6
	q10	1.2	0.6	0.4	0.6	0.6	0.7	1.0	1.3	1.8	1.2	1.1	0.6	0.7	1.5	0.5
	q90	2.6	2.0	2.5	2.0	1.9	2.5	2.8	3.5	3.4	3.3	2.8	2.2	1.9	3.2	2.2
	$|\mu|/\sigma$	3.3	2.2	1.9	2.0	2.1	2.0	2.4	2.9	4.0	3.0	2.9	2.6	2.8	3.3	2.2
La Durance @ Mallemort	μ	1.6	1.2	1.4	1.2	1.2	1.4	1.8	2.3	2.4	2.2	1.9	1.6	1.3	2.2	1.3
	σ	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.7	0.6
	q10	1.1	0.6	0.4	0.6	0.6	0.7	1.0	1.3	1.7	1.2	1.1	0.6	0.7	1.5	0.5
	q90	2.6	2.0	2.5	1.9	1.9	2.5	2.8	3.5	3.4	3.2	2.8	2.2	1.9	3.2	2.2
	$|\mu|/\sigma$	3.3	2.2	1.9	2.0	2.1	2.0	2.4	2.9	4.0	3.0	2.9	2.6	2.7	3.3	2.2

Tableau 24 : Changement sur les caractéristiques de températures par bassin

		$\Delta ET_0 A$ (mm)	$\Delta ET_0 M$ (mm)											
			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
La Durance @ Serre-Ponçon	μ	62.5	1.1	2.2	3.0	4.5	6.0	8.6	9.3	9.7	8.4	5.8	2.5	1.5
	σ	23.7	1.1	1.7	2.0	3.1	4.4	4.8	5.3	5.4	4.4	2.7	1.3	1.2
	q10	36.2	-0.3	-0.1	0.7	0.5	1.0	2.5	3.9	4.0	3.5	2.1	1.0	-0.1
	q90	96.1	2.6	4.3	5.4	8.7	11.8	14.6	16.8	17.5	14.8	9.3	4.3	3.0
	$|\mu|/\sigma$	2.6	1.0	1.3	1.5	1.5	1.4	1.8	1.8	1.8	1.9	2.1	2.0	1.2
Le Buëch @ Serres	μ	64.0	1.0	2.3	3.0	4.4	5.4	9.0	10.7	11.0	8.4	5.4	2.3	1.3
	σ	26.3	1.1	1.7	2.1	3.1	4.0	5.2	6.3	5.8	4.7	2.8	1.2	1.1
	q10	31.7	-0.5	0.0	0.6	0.7	1.0	1.8	4.0	4.6	3.5	1.8	0.9	0.1
	q90	98.5	2.4	4.3	5.5	8.3	10.4	15.4	17.9	19.1	15.2	9.0	3.9	2.7
	$|\mu|/\sigma$	2.4	1.0	1.3	1.4	1.4	1.4	1.7	1.7	1.9	1.8	2.0	1.9	1.2
La Durance @ L'Escale	μ	59.7	0.9	2.0	2.8	4.2	5.4	8.4	9.5	9.6	8.2	5.4	2.2	1.3
	σ	23.6	1.1	1.6	1.9	2.9	4.0	4.8	5.6	5.7	4.5	2.7	1.2	1.2
	q10	34.0	-0.5	-0.1	0.4	0.6	0.7	2.5	3.9	3.8	3.3	1.7	0.8	-0.2
	q90	92.3	2.2	3.9	5.1	7.9	10.4	14.4	16.7	17.9	15.1	8.8	3.9	2.8
	$|\mu|/\sigma$	2.5	0.8	1.2	1.4	1.5	1.4	1.8	1.7	1.7	1.8	2.0	1.9	1.0
Le Verdon @ Castillon	μ	55.4	1.0	1.9	2.8	4.0	5.4	7.8	8.2	8.2	7.8	5.0	2.0	1.2
	σ	20.8	1.1	1.6	1.8	2.6	3.8	4.4	4.5	5.2	4.2	2.5	1.2	1.3
	q10	33.1	-0.3	-0.1	0.5	0.4	1.2	2.5	3.4	2.3	3.2	1.7	0.7	-0.3
	q90	87.8	2.5	4.0	4.9	7.3	10.0	13.3	15.8	15.3	14.0	8.4	3.6	2.9
	$|\mu|/\sigma$	2.7	0.9	1.2	1.6	1.5	1.4	1.8	1.9	1.6	1.8	2.0	1.7	0.9
Le Verdon @ Sainte-Croix	μ	51.7	0.9	1.6	2.8	3.8	4.9	7.4	8.0	7.8	7.3	4.4	1.7	1.0
	σ	20.1	1.3	1.7	1.9	2.5	3.6	4.3	4.6	5.3	4.3	2.4	1.2	1.5
	q10	30.1	-0.6	-0.4	0.4	0.1	0.7	2.4	3.1	1.8	2.5	1.6	0.4	-0.7
	q90	81.8	2.9	3.7	5.0	6.7	9.1	12.7	15.0	15.8	13.9	7.6	3.4	3.0
	$|\mu|/\sigma$	2.6	0.7	1.0	1.5	1.5	1.4	1.7	1.8	1.5	1.7	1.9	1.5	0.7
La Durance @ Cadarache	μ	56.1	0.8	1.8	2.7	3.9	5.0	8.1	9.1	9.0	7.9	5.0	1.9	1.1
	σ	22.5	1.2	1.7	1.9	2.7	3.8	4.7	5.4	5.8	4.5	2.6	1.2	1.4
	q10	32.1	-0.7	-0.2	0.2	0.2	0.7	2.4	3.6	3.0	2.9	1.5	0.5	-0.6
	q90	88.5	2.3	3.7	4.9	7.2	9.3	13.8	16.9	17.5	14.9	8.4	3.5	2.9
	$|\mu|/\sigma$	2.5	0.7	1.1	1.4	1.4	1.3	1.7	1.7	1.6	1.7	1.9	1.6	0.8
La Durance @ Mallemort	μ	55.3	0.8	1.8	2.6	3.9	4.9	8.0	8.9	8.9	7.8	4.9	1.8	1.1
	σ	22.2	1.2	1.6	1.9	2.7	3.7	4.7	5.3	5.8	4.6	2.6	1.2	1.4
	q10	31.5	-0.7	-0.3	0.2	0.1	0.6	2.4	3.6	2.8	2.8	1.5	0.4	-0.6
	q90	88.1	2.3	3.6	4.8	7.2	9.3	13.7	17.0	17.3	14.9	8.3	3.4	2.9
	$|\mu|/\sigma$	2.5	0.6	1.1	1.4	1.4	1.3	1.7	1.7	1.5	1.7	1.9	1.6	0.8

Tableau 25 : Changement sur les caractéristiques d' ET_0 par bassin

	PA (mm)	PM (mm)												Nombre de jours / an	
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	PJ <1 mm	PJ > 10 mm
La Durance à Serre-Ponçon	1254	102	77	88	124	108	104	75	84	108	147	125	113	240	39
Le Buëch à Serres	1246	112	88	84	120	109	81	56	70	114	147	135	131	254	40
La Durance à L'Escale	1153	95	73	78	113	101	88	63	74	103	137	120	109	242	36
Le Verdon à Castillon	1247	101	75	82	124	111	92	61	79	108	148	144	122	257	38
Le Verdon à Sainte-Croix	1111	93	67	69	109	101	79	47	71	101	137	129	108	261	34
La Durance à Cadarache	1071	87	66	69	105	96	79	54	70	99	128	115	100	245	33
La Durance à Mallemort	1033	84	63	66	102	93	75	51	68	98	124	111	96	247	32

	TA (°C)	TM (°C)												T95 (°C)	T05 (°C)
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D		
La Durance à Serre-Ponçon	4.4	-3.3	-2.7	-0.2	2.4	7.0	10.5	13.3	13.0	9.3	5.8	0.5	-2.7	-6.3	15.2
Le Buëch à Serres	7.5	-0.8	0.1	3.1	6.0	10.5	14.0	16.8	16.4	12.6	8.8	3.1	-0.1	-3.7	18.7
La Durance à L'Escale	6.5	-1.5	-0.7	2.1	4.8	9.2	12.8	15.7	15.3	11.5	7.8	2.3	-0.9	-4.2	17.4
Le Verdon à Castillon	6.5	-1.8	-0.9	2.5	5.0	9.4	13.0	15.9	15.6	11.7	7.2	2.0	-1.2	-4.2	17.4
Le Verdon à Sainte-Croix	8.5	0.2	1.0	4.4	6.8	11.2	14.9	17.8	17.5	13.7	9.1	4.0	0.8	-2.0	19.2
La Durance à Cadarache	7.9	-0.2	0.6	3.6	6.2	10.6	14.3	17.2	16.8	13.0	8.9	3.6	0.4	-2.6	18.8
La Durance à Mallemort	8.4	0.3	1.1	4.1	6.7	11.1	14.7	17.7	17.3	13.5	9.4	4.1	0.9	-2.1	19.3

	ET ₀ A (mm)	ET ₀ M (mm)											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
La Durance à Serre-Ponçon	796	27	34	52	65	88	108	127	112	77	49	31	26
Le Buëch à Serres	767	25	33	52	65	85	103	125	109	73	45	28	23
La Durance à L'Escale	797	27	35	53	66	88	108	128	113	76	47	30	25
Le Verdon à Castillon	839	30	38	56	69	92	114	132	118	79	50	33	27
Le Verdon à Sainte-Croix	850	32	40	59	71	92	114	133	119	79	50	34	29
La Durance à Cadarache	831	30	38	57	70	91	112	133	117	78	48	31	27
La Durance à Mallemort	838	30	38	58	71	92	113	134	118	78	48	31	27

Tableau 26 : Caractéristiques de précipitations, de température et d'ET₀ par bassin

2. Evolution de l'hydrologie

Magand (2014) a, dans sa thèse, fait une analyse détaillée des changements projetés sur le bilan en eau aux stations aux pas de temps annuel et mensuel. Nous nous appuyons en grande partie sur son expertise. Au-delà de l'examen de l'intensité des changements, Magand (2014) a appliqué le test de Wilcoxon pour en mesurer la significativité statistique. Ce test a été mis en œuvre non sur les 330 projections climatiques multipliées par les six modèles hydrologiques, mais sur la moyenne de chaque chaîne GCM/MDES/MH, pour éviter une surreprésentation de certains GCMs, qui disposent de plusieurs runs (ex. ECHAM5). Nous considérons ici 72 chaînes GCM/MDES/MH provenant de la combinaison de quatre GCMs (ECHAM5, IPCM4, CNM33 et EGMAM2), de trois MDES (D2GEN, ANALOG et DSCLIM) et de six modèles hydrologiques MH (GR5J, MORDOR, CEQUEAU, CLSM, J2000 et ORCHIDEE). Quand le nombre de chaînes GCM/MDES/MH s'accordant sur la significativité du changement est élevé (> 50% au risque d'erreur de type 1 égal à 0.05), nous pouvons considérer que le changement est robuste.

L'analyse est complétée par l'examen de changements sur des variables un peu plus extrêmes en crue et en étiage (elles se réfèrent à des débits observables et non des épisodes de périodes de retour au-delà de 10 ans) et des conséquences sur un dispositif inspiré des arrêtés cadre sécheresse appliqués sur le territoire Rhône Méditerranée.

Evolution des termes du bilan

Les résultats sont illustrés sur deux stations emblématiques : la Durance à Serre-Ponçon et le Verdon à Sainte-Croix.

L'examen des évolutions médianes des débits annuels sur la Figure 65 et la Figure 66 entre les modèles hydrologiques montre la similarité entre les réponses hydrologiques, exception faite du modèle ORCHIDEE, conséquence de biais de simulation mentionnés précédemment. Nous constatons que la dispersion inter-modèle des changements (dispersion entre les projections obtenues par les différents modèles hydrologiques) est bien plus faible que la dispersion intra-modèle (pour un modèle hydrologique donné, dispersion entre les projections obtenues pour les différents scénarios météorologiques régionalisés). Les changements médians des débits simulés à Serre-Ponçon varient entre $-4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ pour J2000 et $-10 \text{ m}^3/\text{s}$ pour CLSM alors que la dispersion des changements pour un modèle est en moyenne de $49 \text{ m}^3/\text{s}$, presque 10 fois plus (mesurée par l'extension verticale des violons sur les graphiques de droite de la Figure 65 et de la Figure 66). Les modèles MORDOR, CLSM et ORCHIDEE simulent une diminution significative pour plus de trois quarts des chaînes GCM/MDES, alors que c'est le cas pour seulement six d'entre elles concernant les débits simulés par GR5J et quatre pour les débits simulés par les modèles J2000 et CEQUEAU (Tableau 27). A Sainte-Croix, le signal est plus robuste car tous les modèles simulent une diminution significative des débits pour plus de la moitié des chaînes GCM/MDES.

Les débits aux deux stations sont partiellement pilotés par la neige. A défaut de pouvoir comparer les simulations de fonte, il est intéressant d'examiner les simulations du maximum annuel de stock de neige entre modèles hydrologiques, car il donne une indication sur le volume de fonte attendu au printemps. Il y a peu de dispersion entre les modèles hydrologiques avec une diminution du maximum annuel de stock de neige de -23% en moyenne multi-modèles. Les changements simulés par ORCHIDEE sont légèrement moins importants, du fait qu'ils simulent toujours moins de neige que les autres modèles. Sur le bassin du Verdon à Sainte-Croix où l'influence nivale sur le débit diminue, les contrastes entre modèles augmentent en particulier pour les modèles CLSM et ORCHIDEE qui se distinguent des autres avec un changement de maximum annuel de stock de neige plus faible. Cette distinction s'explique par le fait qu'ils simulent toujours moins de neige que les autres modèles. De manière générale, le signal sur les changements du stock de neige reste robuste puisque toutes les chaînes GCM/MDES/MH sauf quatre indiquent une diminution statistiquement significative sur les deux bassins. Cette diminution s'explique naturellement par l'augmentation de la température, induisant une diminution des chutes de neige.

Concernant l'évapotranspiration, les réponses aux projections atmosphériques sont beaucoup plus contrastées entre modèles hydrologiques et entre stations. La Figure 65 montre des similitudes entre GR5J, J2000 et CLSM avec des tendances « parallèles » des médianes d'évapotranspiration sur le bassin de la Durance à Serre-Ponçon. En revanche une tendance à l'augmentation plus forte est perceptible sur l'évapotranspiration annuelle simulée par MORDOR. Le modèle ORCHIDEE se démarque des autres en simulant une évapotranspiration plus faible mais une hausse est également visible avec une progression parallèle. Pour cette variable, la différence entre modèles hydrologiques peut être aussi grande que la dispersion des changements issue d'un seul modèle. Cette importante dispersion pourrait s'expliquer par le fait que les modèles sont calés par rapport à des observations de débits ; de ce fait, les paramètres contrôlant l'évapotranspiration sont moins contraints. Notons la forte augmentation de l'évapotranspiration simulée par MORDOR accompagnée d'une importante dispersion par rapport aux autres modèles. Malgré ces distinctions, tous les modèles simulent une augmentation significative de l'évapotranspiration pour la Durance à Serre-Ponçon. Sur le bassin du Verdon à Sainte-Croix, les simulations d'évapotranspiration semblent plus proches que sur bassin de la Durance à Serre-Ponçon ; néanmoins, ORCHIDEE se démarque des autres trajectoires (Figure 66) et la dispersion des changements annuels d'évapotranspiration avec MORDOR est deux à trois fois plus importante que pour les autres modèles. En moyenne, les changements simulés pour le Verdon à Sainte-Croix sont faibles et bien souvent non significatifs, sauf pour les modèles CLSM et ORCHIDEE. Une raison possible est que ces deux seuls modèles résolvent les bilans d'eau et d'énergie.

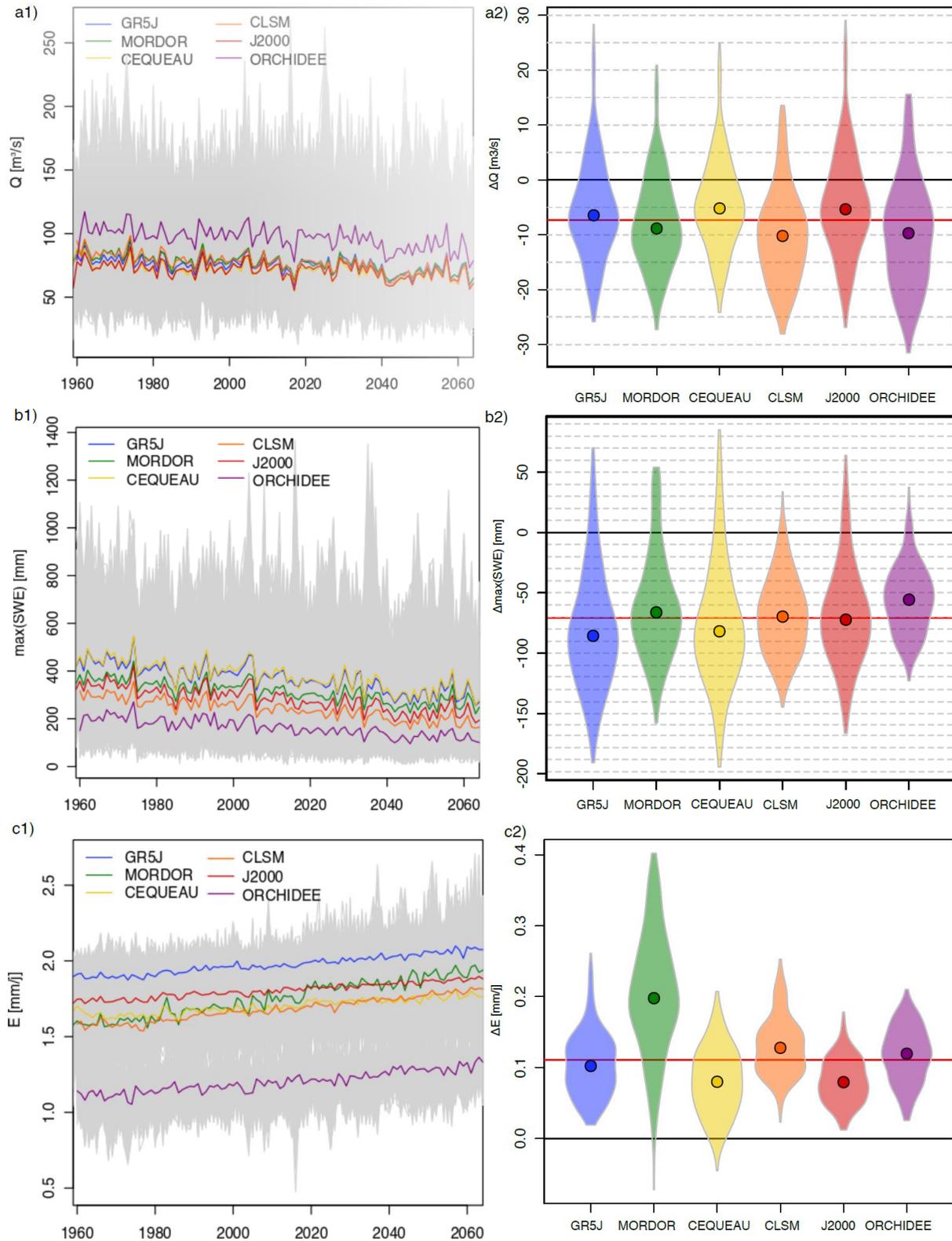


Figure 65 : Synthèse des changements de débits (a), de maximum de stock de neige (b) et d'évapotranspiration (c) sur le bassin de la Durance à Serre-Ponçon. 1) La première colonne présente les évolutions des moyennes annuelles de 1960 à 2065. Toutes les projections hydrologiques (330 par modèle hydrologique) sont tracées en gris et les médianes de chaque modèle sont représentées en couleur. 2) La deuxième colonne compare les distributions de changements annuels entre les cinq modèles hydrologiques. Les changements médians sont représentés par le point central des diagrammes en violon et la moyenne des cinq médianes est représentée par la ligne rouge (Source : Magand, 2014)

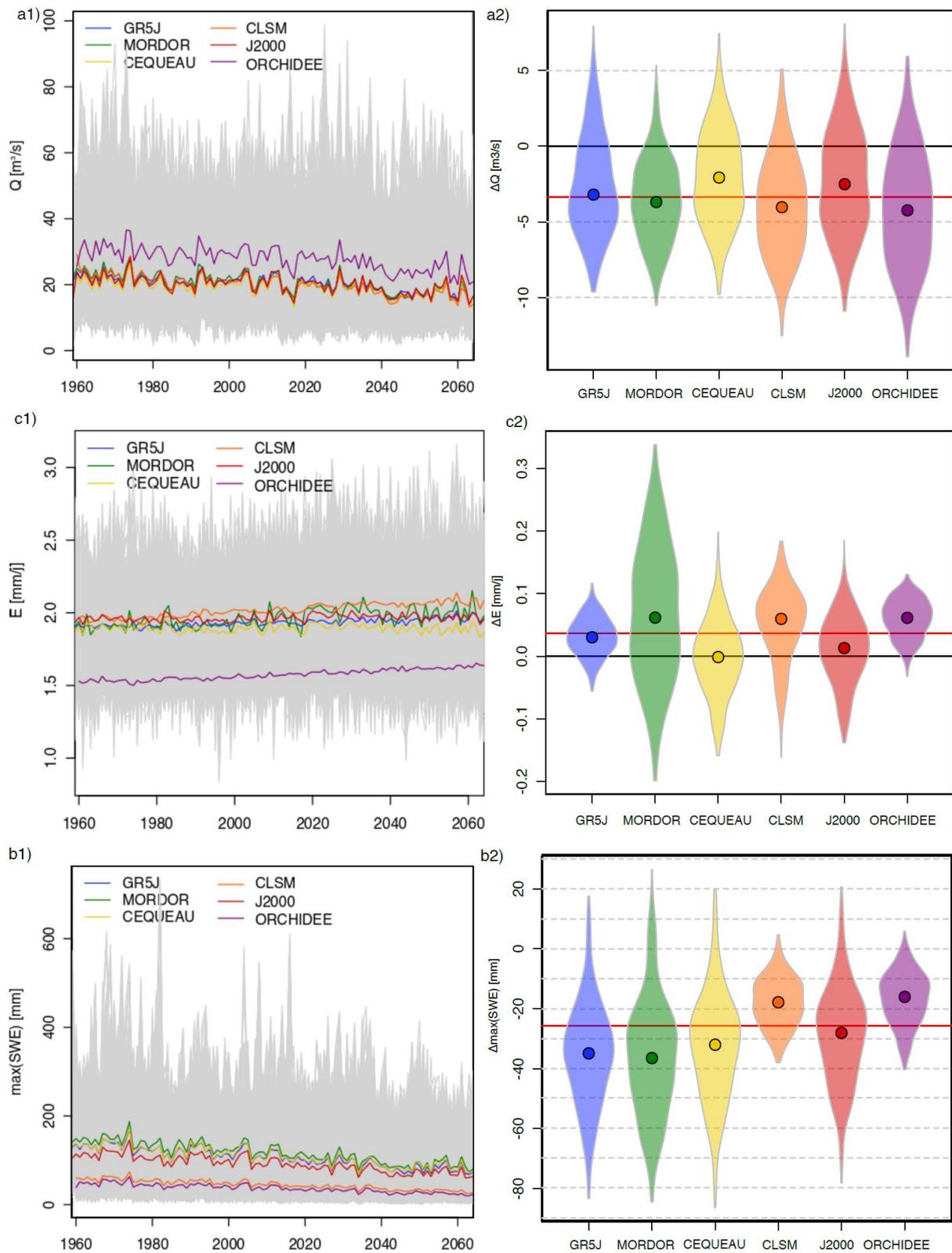


Figure 66 : Comme pour la Figure 65 mais pour le Verdon à Sainte-Croix (Source : Magand, 2014)

Modèles hydrologiques	La Durance à Serre-Ponçon					Le Verdon à Sainte-Croix				
	$\mu(QA)$	$q50$	>0	<0	NS	$\mu(QA)$	$q50$	>0	<0	NS
GR5J	79.1	-5.3	0	6	6	22.1	-2.6	0	10	2
MORDOR	81.2	-7.7	0	9	3	22.7	-3.5	0	10	2
CEQUEAU	74	-4.5	0	4	8	20.7	-2.0	0	7	5
CLSM	81.4	-10.0	0	10	2	22.3	-4.0	0	11	1
J2000	74.8	-4.4	0	4	8	21.9	-2.4	0	7	5
ORCHIDEE	101.5	-9.7	0	8	4	30.5	-4.2	0	9	3

Tableau 27 : Changements sur les débits moyens annuels sur les bassins de la Durance à Serre-Ponçon et du Verdon à Sainte-Croix. La moyenne des débits pendant la période temps présent, $\mu(Q_{PT})$, et le changement médian de débit $q50$ sont indiqués en m^3/s . Les six autres colonnes indiquent le nombre de chaînes GCM/MDES présentant des changements soit significativement positifs (>0) ou négatifs (<0), soit non significatifs (NS) (Source : Magand, 2014)

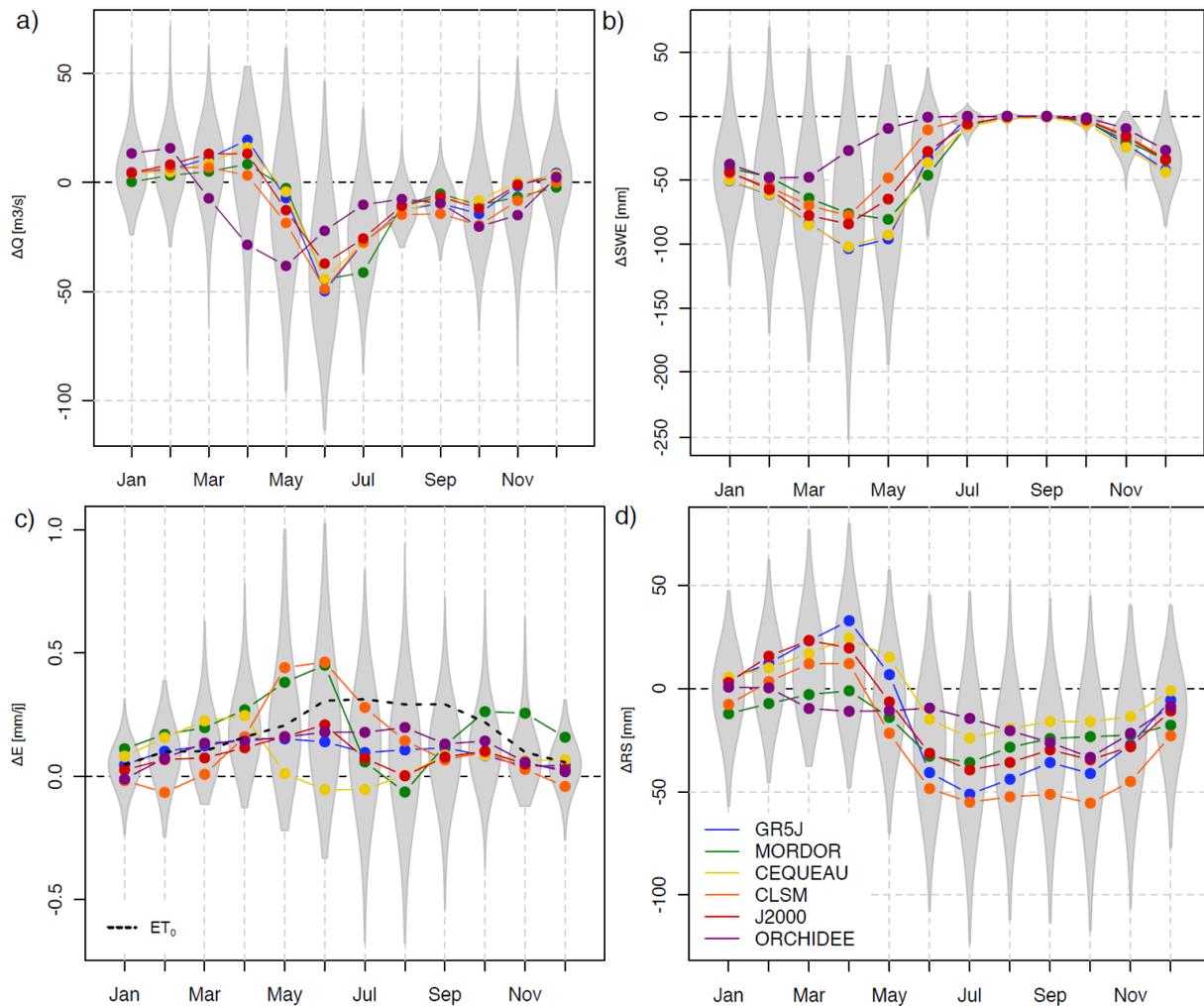


Figure 67 : Comparaison entre modèles hydrologiques des changements mensuels de débits, d'évapotranspiration, de maximum de stock de neige et de stock d'eau souterrain pour le bassin de la Durance à Serre-Ponçon. Les médianes de changements mensuels entre les périodes TF et TP sont représentées par les lignes de couleur. Pour chaque mois, les distributions des changements mensuels tous modèles confondus sont représentées en gris par les diagrammes en violon (Source : Magand, 2014)

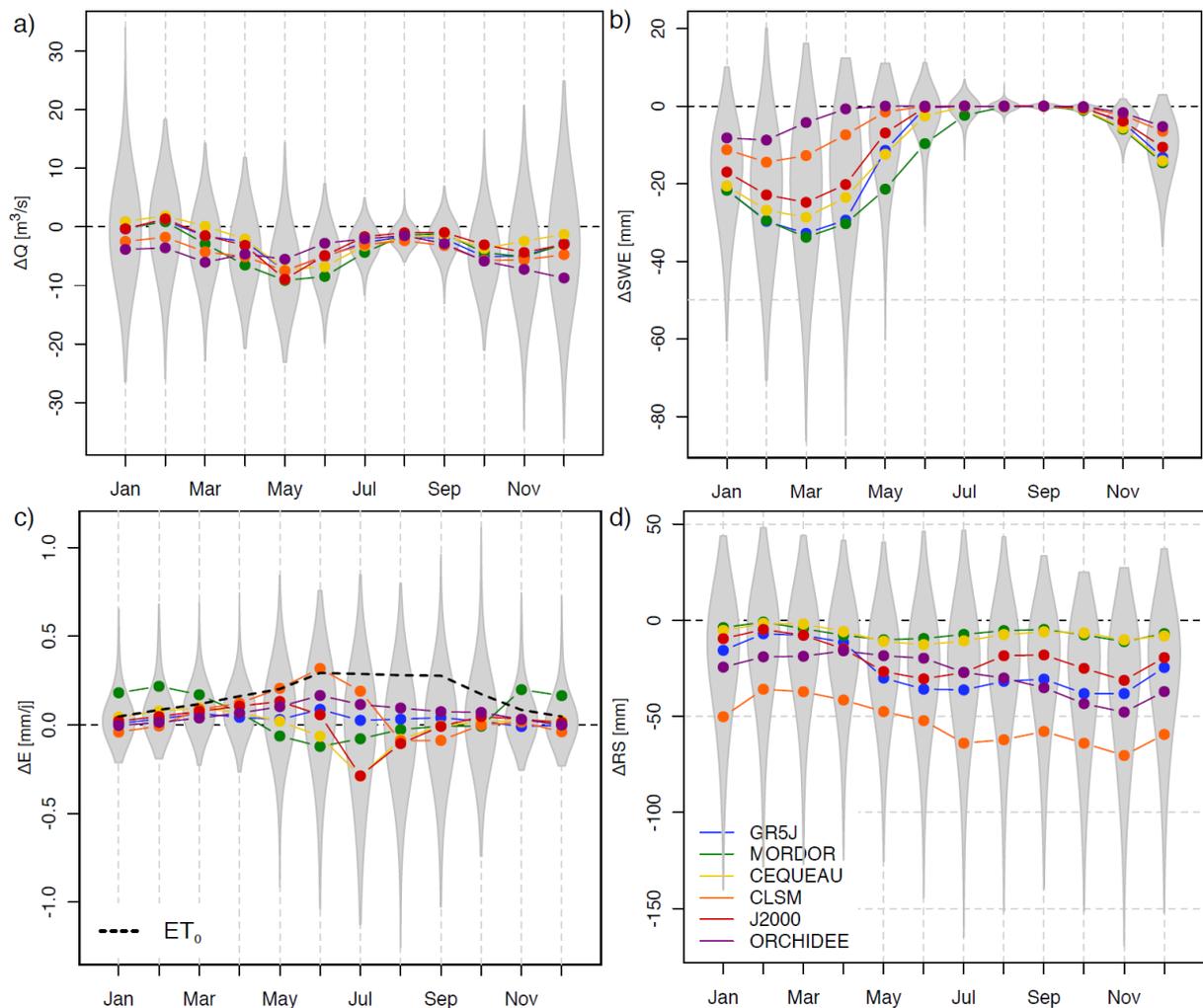


Figure 68 : Comme pour la Figure 67 mais pour le Verdon à Sainte-Croix (Source : Magand, 2014)

Au pas de temps mensuel, l'effet du changement climatique se traduit sur la Durance à Serre-Ponçon par :

- une baisse des débits mensuels de mai à décembre et une hausse des débits de janvier à avril, cette augmentation ne compensant pas la baisse annoncée ;
- une diminution du maximum mensuel d'eau stockée dans le manteau neigeux,
- une augmentation de l'évapotranspiration,
- à l'image des débits, une baisse des contenus en eau du souterrain de juin à décembre et une hausse de janvier à mai, cette augmentation ne compensant pas la baisse annoncée.

Les tendances sur les débits et les contenus des stocks souterrain et neigeux sont partagées par tous les modèles à quelques nuances près, excepté ORCHIDEE. Il faut noter en revanche des sensibilités différentes des modèles pour ce qui concerne l'évapotranspiration. Les modèles semblent s'accorder sur l'augmentation de ce terme à l'échelle annuelle (Figure 65) mais pas sur les évolutions saisonnières : ainsi en juin, CLSM projette une augmentation forte tandis qu'à l'opposé, CEQUEAU ne suggère aucun changement ; GR5J présente une hausse tout au long de l'année de manière quasi constante qui suit à peu près l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle, ET_0 , tandis que les autres modèles simulent d'abord une augmentation de l'évapotranspiration puis une diminution traduisant un stress hydrique.

Les changements sur le Verdon à Sainte-Croix annoncés sur le manteau neigeux sont similaires à ceux identifiés à Serre-Ponçon. En revanche, la baisse des débits concerne tous les mois de l'année (avec comme pour la Durance une diminution la plus conséquente entre mai et juin). Les stocks souterrains diminueraient également tout au long de l'année avec peu de différenciation entre mois. Nous retrouvons une forte disparité entre modèles sur les évolutions de l'évapotranspiration réelle, MORDOR se distinguant fortement des autres modèles.

		ΔQA (m ³ /s)	ΔQM (m ³ /s)											
			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
La Durance @ Serre-Ponçon	μ	-7.2	5.4	8.0	6.8	5.6	-14.1	-38.1	-24.3	-11.1	-9.0	-12.6	-4.6	1.1
	σ	8.9	9.8	10.9	12.9	21.0	23.5	24.8	16.3	7.2	7.5	13.7	15.4	11.1
	q10	-19.0	-4.2	-1.6	-8.0	-24.2	-45.2	-69.0	-43.4	-19.7	-18.9	-28.7	-22.7	-12.3
	q90	3.8	15.1	18.8	20.4	27.5	15.0	-5.6	-4.3	-1.8	-0.4	4.2	13.4	13.9
	$|\mu|/\sigma$	0.8	0.5	0.7	0.5	0.3	0.6	1.5	1.5	1.5	1.2	0.9	0.3	0.1
Le Buéch @ Serre	μ	-1.7	1.1	1.8	-2.2	-4.0	-4.3	-2.0	-1.0	-0.6	-0.8	-2.9	-3.4	-1.5
	σ	1.8	4.4	4.5	3.3	4.4	3.8	1.6	0.8	0.6	1.2	3.0	4.0	5.8
	q10	-4.0	-4.7	-4.0	-6.3	-9.8	-9.6	-4.0	-2.0	-1.4	-2.3	-6.5	-8.2	-8.6
	q90	0.6	6.4	7.4	1.9	1.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.6	1.0	1.6	6.0
	$|\mu|/\sigma$	0.9	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2	1.2	1.1	0.7	1.0	0.8	0.3
La Durance @ L'Escale	μ	-13.8	1.2	6.8	0.0	-3.6	-23.8	-46.0	-28.0	-14.5	-12.7	-20.0	-16.5	-8.1
	σ	14.8	20.1	20.3	18.3	24.5	29.1	29.8	17.2	8.8	10.1	19.5	24.6	25.5
	q10	-33.8	-24.1	-18.7	-22.6	-35.3	-61.4	-81.6	-48.6	-25.0	-25.1	-43.0	-46.9	-38.3
	q90	4.6	24.2	30.3	20.6	24.8	11.7	-5.5	-5.6	-3.0	-0.7	5.1	14.6	23.9
	$|\mu|/\sigma$	0.9	0.1	0.3	0.0	0.1	0.8	1.5	1.6	1.6	1.3	1.0	0.7	0.3
Le Verdon @ Castillon	μ	-1.3	1.1	1.5	0.2	-1.6	-5.2	-3.7	-1.6	-0.8	-1.0	-2.6	-1.7	-0.2
	σ	1.6	3.0	2.8	3.2	3.3	3.9	3.0	1.4	0.7	1.2	2.6	3.6	3.7
	q10	-3.4	-2.0	-1.9	-3.9	-5.9	-10.4	-7.6	-3.2	-1.7	-2.4	-5.7	-6.1	-4.7
	q90	0.6	4.3	4.9	4.0	2.4	-0.6	-0.5	-0.1	0.0	0.4	0.9	2.8	4.2
	$|\mu|/\sigma$	0.8	0.4	0.5	0.1	0.5	1.3	1.3	1.2	1.2	0.8	1.0	0.5	0.1
Le Verdon @ Sainte-Croix	μ	-3.3	-0.9	-0.2	-2.8	-4.0	-7.3	-5.3	-2.7	-1.6	-1.9	-4.5	-5.0	-2.9
	σ	3.3	6.8	6.2	5.0	5.5	5.4	3.9	2.2	1.3	2.2	4.5	6.4	8.3
	q10	-7.6	-9.1	-8.2	-9.2	-11.4	-14.0	-10.4	-5.4	-3.2	-4.6	-9.9	-12.9	-12.7
	q90	0.9	7.3	7.3	3.1	3.2	-0.6	-0.5	-0.2	0.0	0.5	0.9	3.3	8.1
	$|\mu|/\sigma$	1.0	0.1	0.0	0.6	0.7	1.4	1.4	1.3	1.2	0.8	1.0	0.8	0.4
La Durance @ Cadarache	μ	-21.6	-4.5	3.6	-8.0	-14.6	-35.4	-54.9	-34.1	-18.4	-16.8	-29.0	-30.0	-17.8
	σ	21.8	34.5	33.0	27.2	33.1	39.0	36.2	21.7	11.2	14.1	27.8	35.9	42.3
	q10	-50.6	-49.1	-40.9	-41.8	-57.8	-83.7	-97.9	-59.7	-31.7	-33.6	-63.0	-74.6	-67.7
	q90	5.4	37.9	44.7	24.0	26.6	11.5	-5.9	-6.2	-3.8	-0.2	5.7	15.5	37.6
	$|\mu|/\sigma$	1.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.9	1.5	1.6	1.6	1.2	1.0	0.8	0.4
La Durance @ Malmort	μ	-22.3	-5.2	3.5	-8.9	-14.2	-36.1	-54.9	-35.7	-19.4	-17.7	-29.5	-31.4	-18.2
	σ	22.5	36.4	34.1	28.3	33.8	40.3	37.0	23.1	11.8	14.7	28.6	37.7	44.5
	q10	-51.8	-51.9	-42.7	-43.8	-59.7	-86.3	-98.1	-64.3	-33.5	-34.7	-64.1	-76.4	-69.7
	q90	5.7	39.1	45.7	24.0	28.0	11.8	-6.1	-6.0	-3.9	0.1	6.4	16.9	40.2
	$|\mu|/\sigma$	1.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.9	1.5	1.5	1.6	1.2	1.0	0.8	0.4

Tableau 28 : Changement sur les caractéristiques de débits

		$\Delta SWEA$ (mm)	$\Delta SWEM$ (mm)											
			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
La Durance @ Serre-Ponçon	μ	-33	-43	-52	-69	-78	-63	-25	-4	-1	0	-4	-18	-35
	σ	17	25	33	38	45	42	20	5	1	1	2	9	17
	q10	-54	-70	-90	-117	-136	-120	-52	-11	-2	-1	-7	-30	-55
	q90	-12	-10	-12	-22	-21	-9	-1	0	0	0	-1	-7	-13
	$|\mu|/\sigma$	1.9	1.7	1.6	1.8	1.7	1.5	1.2	0.9	0.5	0.5	1.5	2.0	2.1
Le Buëch @ Serre	μ	-10	-21	-31	-29	-17	-4	0	0	0	0	0	-2	-10
	σ	7	15	23	26	17	6	1	0	0	0	0	2	7
	q10	-20	-43	-62	-63	-42	-13	-1	0	0	0	0	-5	-20
	q90	-2	-4	-6	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	-2
	$|\mu|/\sigma$	1.3	1.4	1.3	1.1	1.0	0.7	0.3	0.1	0.0	0.3	1.0	1.3	1.4
La Durance @ L'Escale	μ	-19	-28	-35	-43	-45	-34	-12	-2	0	0	-2	-10	-21
	σ	10	15	20	23	26	24	10	2	1	0	1	5	10
	q10	-33	-47	-61	-73	-78	-68	-25	-5	-1	-1	-4	-18	-34
	q90	-7	-9	-12	-15	-12	-5	0	0	0	0	-1	-4	-8
	$|\mu|/\sigma$	1.9	1.9	1.7	1.8	1.7	1.4	1.2	0.8	0.5	0.6	1.4	2.0	2.1
Le Verdon @ Castillon	μ	-20	-35	-45	-51	-45	-23	-5	-1	0	0	-1	-10	-24
	σ	13	22	28	35	35	23	10	2	0	0	1	7	14
	q10	-38	-66	-82	-97	-90	-52	-17	-2	0	0	-3	-20	-42
	q90	-5	-10	-13	-9	-2	0	0	0	0	0	0	-3	-7
	$|\mu|/\sigma$	1.5	1.6	1.6	1.5	1.3	1.0	0.5	0.3	0.2	0.5	1.1	1.5	1.7
Le Verdon @ Sainte-Croix	μ	-9	-18	-22	-23	-19	-9	-2	-1	0	0	-1	-4	-11
	σ	6	11	14	16	15	10	5	2	0	0	1	3	7
	q10	-18	-34	-42	-45	-39	-23	-8	-2	0	0	-1	-8	-20
	q90	-2	-5	-6	-4	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-3
	$|\mu|/\sigma$	1.5	1.6	1.6	1.4	1.3	1.0	0.5	0.3	0.2	0.2	1.1	1.6	1.6
La Durance @ Cadarache	μ	-14	-21	-26	-31	-30	-23	-7	-1	0	0	-1	-7	-15
	σ	7	11	15	17	19	17	7	2	0	0	1	4	7
	q10	-24	-35	-46	-54	-55	-48	-16	-4	-1	0	-3	-12	-24
	q90	-5	-7	-9	-10	-7	-3	0	0	0	0	0	-3	-6
	$|\mu|/\sigma$	1.8	1.8	1.7	1.8	1.6	1.4	1.1	0.8	0.5	0.7	1.3	1.9	2.0
La Durance @ Malmort	μ	-12	-19	-24	-28	-28	-21	-7	-1	0	0	-1	-7	-14
	σ	7	10	13	15	17	15	7	2	0	0	1	3	7
	q10	-21	-32	-42	-48	-50	-42	-16	-3	-1	0	-3	-11	-22
	q90	-5	-7	-8	-9	-7	-3	0	0	0	0	0	-2	-5
	$|\mu|/\sigma$	1.9	1.9	1.8	1.8	1.6	1.4	1.0	0.7	0.5	0.7	1.2	1.9	2.1

Tableau 29 : Changement sur les caractéristiques de teneur en eau dans le manteau neigeux par bassin

Les statistiques des changements sur les variables de débit et de contenu en eau dans le manteau neigeux sont reportées dans le Tableau 28 et le Tableau 29, tous modèles hydrologiques confondus (donc sur la base de 330 GCM/MDES \times 6 MH). Les modèles convergent sur le signe du changement principalement en été, du fait de contributions intermédiaires. Notons, qu'ORCHIDEE exclu (le moins fiable des modèles et atypique dans sa réponse en Figure 67), le signe du changement sur les débits mensuels s'avère robuste à Serre-Ponçon en mars qui devient le mois de fonte du manteau. Concernant le stock dans le manteau neigeux, la diminution généralisée à tous les mois est robuste (exception faite des mois d'été... pendant lesquels le manteau ne peut évoluer car il est déjà absent). Notons que les changements relatifs moyens sur l'ensemble des bassins sont de l'ordre de -10 à -15% (les premiers et derniers déciles évoluent respectivement autour de -30% et 5%). En relatif, la Durance à Serre-Ponçon résiste mieux que les autres bassins. Les baisses de ressource sur la période

juillet-août-septembre sont uniformes sur les bassins (environ -20%). Les statistiques de référence de débits naturels ou naturalisés sont reportées dans le Tableau 30. Il n'y a pas de suivi de manteau neigeux, donc pas de référence objective en temps présent.

	QA (m ³ /s)	QM (m ³ /s)											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
La Durance à Serre-Ponçon	76.0	33.2	29.4	43.7	75.0	174.8	184.8	97.9	58.5	54.0	67.2	55.9	38.4
Le Buëch à Serres	13.4	15.5	12.5	19.2	26.6	20.5	9.3	4.0	2.4	4.5	12.0	19.4	15.6
La Durance à L'Escale	112.6	84.8	69.2	92.3	138.3	228.9	207.3	103.8	61.0	64.4	96.5	114.8	89.5
Le Verdon à Castillon	11.9	8.2	7.0	12.2	20.4	28.5	16.1	6.1	3.8	5.6	11.4	14.3	9.6
Le Verdon à Sainte-Croix	22.6	23.5	19.5	24.0	33.6	41.4	25.7	11.8	8.3	10.0	20.0	29.2	24.3
La Durance à Cadarache	157.4	137.0	110.7	140.9	207.3	307.1	252.3	124.6	75.3	84.3	134.2	175.6	139.6

Tableau 30 : Caractéristiques de débits mensuels et annuels par bassin

Evolution du régime des crues

Le projet s'est concentré sur les étiages ; cependant quelques résultats sur les crues peuvent être extraits des simulations. L'analyse repose sur les échantillons de valeurs maximales annuelles pour en déduire le quantile QJXA10, débit maximal annuel journalier de période de retour 10 ans et des indicateurs sur la saisonnalité des crues.

La variable QJXA10 est issue de l'ajustement de la loi de Gumbel à l'échantillon des débits journaliers maxima annuels. Une valeur est obtenue en temps présent et en temps futur. L'effet du changement climatique est mesuré par la période de retour $T_{FUT/PST}$ du quantile QJXA10 du futur dans la loi de Gumbel ajustée en temps présent. En absence de changement $T_{FUT/PST} = 10$ ans, si les crues sont plus fortes dans le futur qu'elles ne le sont actuellement alors $T_{FUT/PST} > 10$ ans et enfin si les crues sont plus faibles dans le futur qu'elles ne le sont actuellement alors $T_{FUT/PST} < 10$ ans.

Les deux autres indicateurs s'appuient sur les dates D_j associées aux événements maxima annuels exprimées en nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} janvier (entre 0 et 365 pour les années bissextiles, entre 0 et 364 sinon), puis interprétées en angle en radian la formule suivante pour la représentation graphique présentée plus loin :

$$\theta_j = -2\pi \frac{D_j}{365} + \frac{\pi}{2}$$

Ces dates sont positionnées à l'intérieur d'un cercle unitaire. L'événement j a pour coordonnées $(F_{exp}(j)\cos(\theta_j), F_{exp}(j)\sin(\theta_j))$ où F_{exp} est la fréquence empirique au non-dépassement associée au rang i de l'épisode dans l'échantillon de n valeurs classées par ordre croissant :

$$F_{exp}(i) = \frac{i-0.5}{n}$$

Plus le point est proche du cercle unitaire, plus la crue est forte. Il est possible de caractériser le nuage par un point représentatif, défini par la moyenne pondérée de la position des points :

$$x_\theta = \frac{\sum_{j=1}^n F_{exp}(j)\cos(\theta_j)}{\sum_{j=1}^n F_{exp}(j)} \quad y_\theta = \frac{\sum_{j=1}^n F_{exp}(j)\sin(\theta_j)}{\sum_{j=1}^n F_{exp}(j)}$$

Pour caractériser l'échantillon, sont retenus finalement les coordonnées polaires du vecteur reliant l'origine au point (x_θ, y_θ) , c'est-à-dire l'angle interprétable en date :

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_\theta}{x_\theta}\right) \text{ si } x_\theta > 0 \quad \theta = \arctan\left(\frac{y_\theta}{x_\theta}\right) + \pi \text{ sinon}$$

et sa longueur :

$$r_\theta = \sqrt{x_\theta^2 + y_\theta^2}$$

Une valeur de r proche de 1 révèle un échantillon fortement saisonnalisé. Inversement, une valeur proche de 0 reflète l'absence de saison concentrant les crues. Le vecteur de norme r_θ et d'angle θ permet de matérialiser la saisonnalité.

Les analyses reposent sur trois stations : la Durance à Serre-Ponçon, le Verdon à Sainte-Croix et la Durance à Cadarache. La Figure 69 décrit la saisonnalité des crues en temps présent, observées ou reconstituées entre 1980 et 2009. La Durance à Serre-Ponçon voit ses crues se concentrer autour du 18 juin, quelques épisodes apparaissent de manière isolée en automne et la saisonnalité est marquée ($r_\theta = 0.65$). Les crues de la Durance à Cadarache et du Verdon à Sainte-Croix se répartissent entre octobre et juin avec une relative « accalmie » au cœur de l'hiver (en février) : la flèche pointe vers les 17 et 18 décembre, mais du fait de la dispersion des points, est peu développée ($r_\theta < 0.42$).

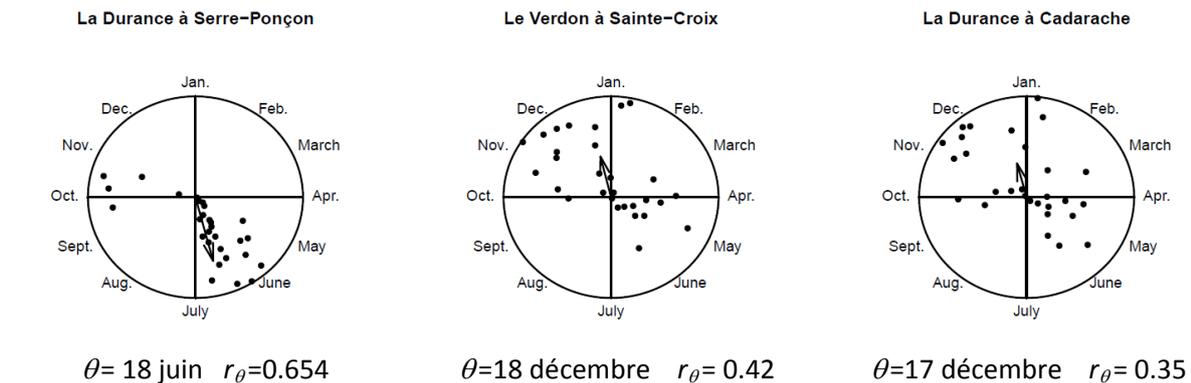


Figure 69 : Diagramme des crues des régimes observés ou renaturalisés en trois points de contrôle

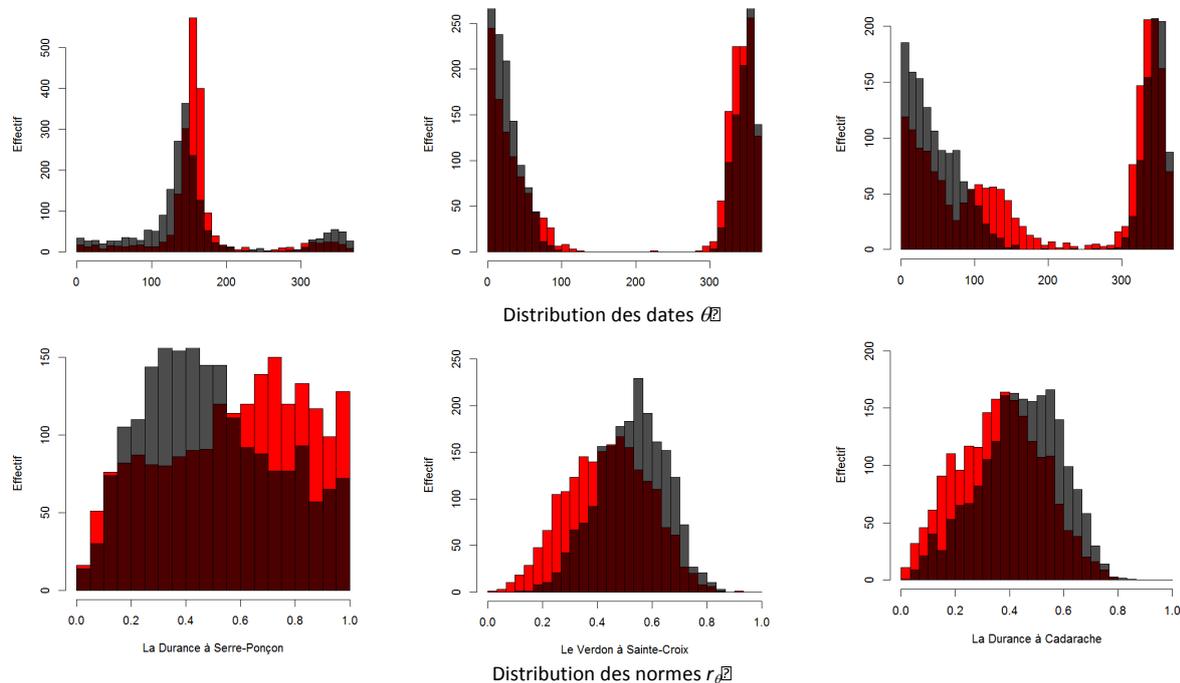


Figure 70 : Distribution des normes r_θ et des dates θ - en rouge, basée sur l'ensemble des simulations GCM/MDES/MH en temps présent, en gris, basée sur l'ensemble des simulations GCM/MDES/MH en temps futur

Du Tableau 31, du Tableau 32 et de la Figure 70 établie tous modèles confondus, il ressort :

- un décalage de la date moyenne d'environ 15 jours des épisodes pour la Durance à Serre-Ponçon : les grandes crues restent printanières à l'horizon 2050 ;
- une absence de changement notable et robuste sur les deux autres stations examinées ; cependant des crues plus tardives en automne (du fait peut être d'une diminution des précipitations en octobre, non significative mais partagée par un grand nombre de GCM/MDES) et la diminution des crues

importantes de fonte pour le Verdon à Sainte-Croix et la Durance à Cadarache (du fait de la diminution des stocks constitués) ;

- une plus grande dispersion des crues au sein de l'année (par exemple, les normes des vecteurs se rassemblent autour de 0.4 en temps futur tandis qu'en temps présent elles se situent autour de 0.6) ;
- l'absence de tendance partagée sur l'évolution des intensités des crues (la médiane des $T_{FUT/PST}$ reste proche de 10 ans), conséquence notamment de l'absence de consensus des chaînes GCM/MDES sur le devenir des pluies et l'absence de correction des cumuls historiques.

Ces conclusions font écho à celles obtenues sur le régime décrit par les débits mensuels moyens. Il y a diminution de la contribution neigeuse avec un glissement des régimes à dominante nivale (resp. nivo-pluvial) vers des régimes mixtes à dominante nivo-pluviale (resp. pluvio-nival).

	La Durance à Serre-Ponçon					Le Verdon à Sainte-Croix					La Durance à Cadarache				
	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$
CEQUEAU	-4.4	21.0	-25.8	19.8	0.2	2.7	31.9	-38.8	42.2	0.1	1.5	30.6	-33.0	32.2	0.0
CLSM	-37.3	67.9	-116.6	45.2	0.5	9.4	25.6	-20.5	41.1	0.4	5.5	27.7	-29.3	41.7	0.2
GR5J	-10.2	16.1	-28.4	8.1	0.6	0.5	43.1	-56.6	54.5	0.0	-23.4	86.3	-120.4	110.1	0.3
J2000	-25.5	35.6	-67.0	6.2	0.7	-2.4	28.4	-36.9	33.9	0.1	-30.8	48.5	-93.7	27.6	0.6
MORDOR	-11.6	9.3	-22.1	0.6	1.2	6.0	21.1	-20.0	35.0	0.3	11.2	31.2	-23.1	45.5	0.4
ORCHIDEE	-10.8	78.7	-119.1	92.3	0.1	6.9	19.7	-15.7	32.1	0.4	6.7	24.8	-23.6	40.3	0.3
TOUS	-16.6	47.6	-69.7	20.5	0.3	3.8	29.6	-31.7	39.3	0.1	-4.9	49.4	-62.6	44.0	0.1

Tableau 31 : Changement sur la date moyenne des événements de crue θ par bassin

	La Durance à Serre-Ponçon					Le Verdon à Sainte-Croix					La Durance à Cadarache				
	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$
CEQUEAU	-0.20	0.22	-0.50	0.09	0.9	0.15	0.15	-0.03	0.33	1.0	0.15	0.16	-0.04	0.36	1.0
CLSM	-0.07	0.21	-0.35	0.18	0.4	0.05	0.14	-0.13	0.22	0.4	0.10	0.15	-0.09	0.27	0.7
GR5J	-0.12	0.21	-0.37	0.15	0.6	0.13	0.15	-0.05	0.31	0.9	0.06	0.16	-0.14	0.26	0.4
J2000	-0.17	0.21	-0.43	0.10	0.8	0.11	0.13	-0.06	0.28	0.8	0.08	0.14	-0.11	0.26	0.5
MORDOR	-0.05	0.14	-0.23	0.11	0.4	0.09	0.14	-0.08	0.28	0.7	0.03	0.16	-0.18	0.25	0.2
ORCHIDEE	0.13	0.16	-0.08	0.31	0.8	-0.02	0.14	-0.21	0.17	0.1	0.03	0.15	-0.16	0.22	0.2
TOUS	-0.08	0.22	-0.37	0.20	0.37	0.09	0.15	-0.11	0.28	0.6	0.07	0.16	-0.13	0.28	0.5

Tableau 32 : Changement sur l'indice de saisonnalité r_θ par bassin

Evolution des étiages

L'analyse repose sur la caractéristique $Q95$ de la courbe des débits classés, *i.e.* le débit dépassé en moyenne 95% du temps. Les changements seront mesurés par l'écart entre les débits de la courbe des débits classés $\Delta Q95$ et par l'écart des durées moyennes sous le seuil défini par le $Q95$ estimé en temps présent $\Delta DQ95$. $Q95$ est par définition de 5% en temps présent et donc $DQ95$ en temps présent est identique et égal à environ 18 jours. $\Delta DQ95$ est exprimé en jours.

Ces deux variables s'inscrivent dans le cadre d'une analyse de défaillance « Reliability, Resilience, and Vulnerability », concepts introduits pour l'analyse de l'efficacité des réservoirs par Hashimoto *et al.* (1982). La fiabilité (« Reliability »), la résilience et la vulnérabilité quantifient respectivement la probabilité d'observer le système dans un état satisfaisant, la capacité du système à revenir dans un état satisfaisant et la sévérité du système lorsqu'il est défaillant. $dQ95$ renseigne la fiabilité et $\Delta Q95$ l'évolution de la vulnérabilité. Kjeldsen et Rosbjerg (2004) ont montré sur des données synthétiques que les indicateurs sont sensibles à la longueur de la période de calcul (une convergence serait atteinte pour des séries de 1000 ans). En traitant l'ensemble des 330 projections issues des chaînes GCM/MDES de 30 ans, nous pensons garantir la robustesse aux résultats présentés.

Les résultats sont présentés pour chaque modèle alimenté par les 330 projections.

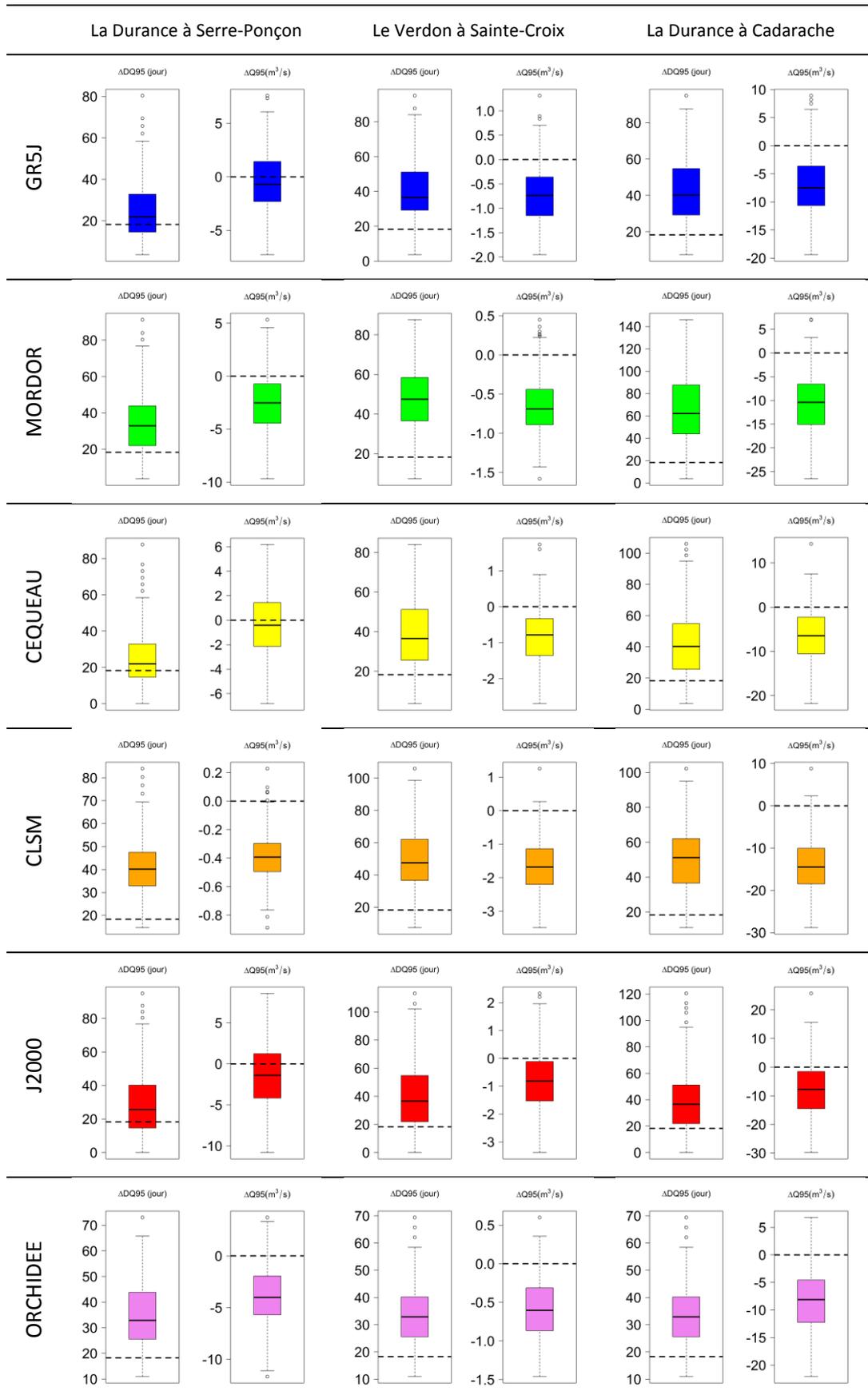


Figure 71 : Boîte à moustache des valeurs de DQ95 (en jour) et de changements de Q95 (en m³/s), par modèle hydrologique, sur trois stations de contrôle (les boxplots précisent la médiane (trait épais horizontal), une boîte s'étendant du premier au troisième quartile)

	La Durance à Serre-Ponçon					Le Buëch à Serres					La Durance à L'Escale				
	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$
CEQUEAU	25.3	15.7	7.3	43.8	1.6	30.5	7.7	21.9	40.2	4.0	38.9	18.8	14.6	65.7	2.1
CLSM	47.1	19.1	21.9	73.1	2.5	42.1	12.6	25.6	58.4	3.3	51.2	17.7	29.2	76.7	2.9
GR5J	25.4	13.7	11.0	43.8	1.8	34.4	11.0	21.9	51.1	3.1	39.0	16.6	18.3	62.1	2.4
J2000	29.5	18.2	11.0	51.5	1.6	38.9	20.8	14.6	65.7	1.9	38.3	22.3	14.6	69.4	1.7
MORDOR	35.0	16.1	18.3	58.4	2.2	43.4	14.0	25.6	62.1	3.1	62.8	30.5	25.6	105.9	2.1
ORCHIDEE	34.9	11.8	21.9	51.1	3.0	33.9	8.4	21.9	43.8	4.0	34.5	11.2	21.9	47.8	3.1
TOUS	32.8	17.6	11.0	58.4	1.9	37.2	13.9	21.9	54.8	2.7	44.1	22.6	18.3	73.1	2.0

	Le Verdon à Castillon					Le Verdon à Sainte-Croix					La Durance à Cadarache				
	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$
CEQUEAU	36.1	13.5	18.3	54.8	2.7	38.6	16.8	18.3	62.1	2.3	42.5	21.1	18.3	73.1	2.0
CLSM	44.3	15.0	25.6	62.5	3.0	50.0	17.9	29.2	76.7	2.8	51.4	17.4	29.2	76.7	2.9
GR5J	35.5	14.4	18.3	54.8	2.5	40.5	17.2	21.5	65.7	2.3	41.5	17.3	21.9	65.7	2.4
J2000	38.3	21.3	14.6	69.4	1.8	41.0	23.7	14.6	77.1	1.7	40.3	23.7	14.6	73.1	1.7
MORDOR	38.3	15.1	21.9	62.1	2.5	47.0	16.2	25.6	65.7	2.9	66.8	29.2	32.9	106.3	2.3
ORCHIDEE	32.0	9.8	18.3	44.2	3.3	33.2	10.5	21.9	47.5	3.2	34.1	11.2	21.9	51.1	3.0
TOUS	37.4	15.6	18.3	58.4	2.4	41.7	18.3	18.3	65.7	2.3	46.1	23.3	21.5	76.7	2.0

Tableau 33 : Changement sur la durée caractéristique d'étéage DQ95 (en jour)

	La Durance à Serre-Ponçon					Le Buëch à Serres					La Durance à L'Escale				
	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$
CEQUEAU	-0.5	2.5	-3.9	2.7	0.2	-0.1	0.1	-0.3	0.0	1.5	-3.5	3.6	-8.0	1.7	1.0
CLSM	-6.5	4.1	-11.5	-0.9	1.6	-0.4	0.2	-0.6	-0.2	2.4	-10.6	5.1	-16.6	-3.9	2.1
GR5J	-0.5	2.7	-4.0	3.1	0.2	-0.2	0.1	-0.3	0.0	1.5	-4.9	4.1	-9.9	1.2	1.2
J2000	-1.5	3.8	-6.7	3.1	0.4	-0.6	0.7	-1.4	0.2	0.8	-5.3	7.0	-14.4	3.8	0.8
MORDOR	-2.6	2.7	-6.4	0.8	1.0	-0.3	0.2	-0.5	-0.1	2.0	-8.1	5.2	-15.2	-1.9	1.6
ORCHIDEE	-3.8	2.8	-7.3	-0.1	1.4	-0.3	0.1	-0.4	-0.1	2.1	-6.0	4.3	-11.2	-0.4	1.4
TOUS	-2.5	3.8	-7.4	2.2	0.7	-0.3	0.3	-0.6	0.0	0.9	-6.4	5.5	-13.8	0.6	1.2

	Le Verdon à Castillon					Le Verdon à Sainte-Croix					La Durance à Cadarache				
	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$	μ	σ	q10	q90	$|\mu|/\sigma$
CEQUEAU	-0.3	0.2	-0.6	0.0	1.2	-0.8	0.7	-1.7	0.1	1.1	-6.4	5.9	-14.1	1.4	1.1
CLSM	-0.8	0.4	-1.3	-0.2	2.0	-1.6	0.8	-2.7	-0.6	2.1	-13.9	6.4	-21.4	-5.0	2.2
GR5J	-0.3	0.3	-0.7	0.0	1.1	-0.7	0.5	-1.4	0.0	1.3	-7.1	5.3	-13.5	0.0	1.3
J2000	-0.4	0.5	-1.0	0.2	0.8	-0.8	1.0	-2.1	0.4	0.8	-7.7	9.4	-20.3	4.1	0.8
MORDOR	-0.3	0.2	-0.7	0.0	1.3	-0.6	0.4	-1.1	-0.2	1.8	-10.8	6.2	-18.9	-3.4	1.7
ORCHIDEE	-0.3	0.3	-0.7	0.0	1.4	-0.6	0.4	-1.2	0.0	1.4	-8.0	5.7	-14.7	-0.5	1.4
TOUS	-0.4	0.4	-0.9	0.0	1.1	-0.9	0.8	-1.9	0.0	1.1	-9.0	7.1	-18.1	0.0	1.3

Tableau 34 : Changement sur le débit caractéristique d'étéage Q95 (en m³/s)

	Q95 (m ³ /s)
La Durance à Serre-Ponçon	22.3
Le Buëch à Serres	1.4
La Durance à L'Escale	31.3
Le Verdon à Castillon	1.8
Le Verdon à Sainte-Croix	4.0
La Durance à Cadarache	39.6

Tableau 35 : Caractéristiques d'étiage Q95 extraites des séries de débits naturels ou renaturalisés aux bassins de contrôle

Les résultats montrent :

- une augmentation de la durée $DQ95$ sous le seuil actuel $Q95$ (les projections hydrologiques suggèrent en moyenne un doublement, voire un triplement) ; le premier décile dans 27 cas sur 36 est supérieur à 18 jours ; les médianes sont toutes au-dessus de 18 jours ;
- corollairement, les valeurs de $Q95$ à l'horizon seront vraisemblablement plus faibles qu'actuellement (l'ensemble des changements médians sont négatifs) ;
- sur la base des déciles de $DQ95$, la Durance à Serre-Ponçon ne présente pas la même sensibilité vis-à-vis de $DQ95$: les changements y sont moins prégnants. Notons que les changements opérés au niveau de la Durance à l'Escale se propagent « à l'identique » vers l'aval. Les affluents Verdon et Buëch répondent de manière similaire ;
- les signes des changements sont quasiment tous robustes selon le critère $|\mu/\sigma| > 1$;
- le modèle J2000 semble le plus timoré ; les changements qu'il suggère sont moins importants que ceux portés par les autres modèles.

Les étiages projetés à l'horizon 2050 s'annoncent plus sévères qu'actuellement. Cette tendance est généralisée sur l'ensemble du territoire. Un comportement différencié entre cours d'eau à forte composante nivale et ceux avec des apports mixtes (pluie et neige) semble se dégager. Il faut toutefois modérer le jugement : nous avons pu constater que les modèles ont une plus grande difficulté à reconstituer les basses eaux que les hautes eaux (dans la section « Modélisation de la ressource en eau », page 58). A titre de comparaison avec les évolutions projetées, les valeurs observées de $Q95$ sont rappelées dans le Tableau 35.

Trajectoires et sensibilités des modèles hydrologiques

Après avoir analysé les changements projetés par chacun des modèles, nous avons cherché à identifier la proximité des modèles hydrologiques en fonction de leurs réponses aux changements atmosphériques. Nous avons pour cela calculé des coefficients de corrélation de Spearman r_{sp} (sur les rangs) entre les changements ΔX issus des 330 projections climatiques simulés par les modèles, deux à deux. Les coefficients de corrélation ont été calculés pour les 15 paires de modèles hydrologiques et pour trois variables annuelles : les moyennes annuelles de débits et d'évapotranspiration, et le maximum annuel de stock de neige.

L'analyse a été réalisée sur cinq stations de contrôle (Durance à Serre-Ponçon, Buëch à Serres, Durance à l'Escale, Verdon à Sainte-Croix et Durance à Cadarache). Globalement, l'ensemble des modèles sont proches pour les cinq bassins versants avec un coefficient de corrélation moyen de 0.84. La Figure 72 illustre les résultats de ce calcul sur le bassin du Verdon à Sainte-Croix pour les changements de débits. Ceux-ci sont bien corrélés entre les modèles avec r_{sp} compris entre 0.71 pour le couple (MORDOR ; ORCHIDEE), et supérieur à 0.99 pour le couple (CEQUEAU ; J2000).

Deux couples de modèles se distinguent : les modèles CEQUEAU et J2000, présentant des comportements très similaires sur toutes les stations ($r_{sp} > 0.99$), et les modèles ORCHIDEE et CLSM, affichant une forte similarité entre eux ($r_{sp} \in [0.94 ; 0.99]$). Les différences sont plus grandes avec les autres modèles, en particulier avec le modèle MORDOR. Cette similarité n'est finalement pas tellement étonnante si on considère leur structure. Les modèles J2000 et CEQUEAU sont tous deux « orientés processus », prenant en compte des caractéristiques topographiques et d'occupation du sol mais résolvant le bilan hydrologique de manière conceptuelle à l'aide de l'évapotranspiration potentielle. Quant aux modèles CLSM et ORCHIDEE, ce sont les deux seuls modèles à bases physiques, couplant les bilans hydrologiques et énergétiques. Il est intéressant toutefois de remarquer

que malgré leurs différences de simulations, leurs réponses en termes de changement soient similaires. Les changements simulés par ces deux modèles diffèrent particulièrement avec ceux simulés par MORDOR.

Les modèles sont également proches sur les projections de maximum de stock de neige avec un coefficient de corrélation moyen de 0.83 sur les cinq stations. Nous retrouvons les similarités de comportements entre les modèles CLSM et ORCHIDEE, en particulier en Moyenne Durance où $r_{sp} \geq 0.95$. Alors que les modèles CLSM et ORCHIDEE se rapprochent de l'amont vers l'aval, les différences entre modèles utilisant le calage s'accroissent. Moins il y a de neige, moins les simulations des stocks de neige s'accroissent entre modèles. Ceci s'explique par le fait que les paramètres des modèles sont calés par rapport aux débits. Les processus nivaux des modèles sont alors moins bien contraints dans les bassins où l'influence nivale ne pilote pas l'essentiel du régime hydrologique.

Enfin, c'est sur les changements d'évapotranspiration annuels que les modèles sont le moins cohérents entre eux, avec un coefficient de corrélation de 0.54 en moyenne sur les cinq stations. Nous retrouvons encore la similarité entre les modèles CEQUEAU et J2000 mais un peu moins entre les modèles CLSM et ORCHIDEE. Il est intéressant de remarquer dans le Tableau 36 que le coefficient de corrélation entre les modèles MORDOR et CEQUEAU soit élevé ($r_{sp} = 0.81$) pour le Verdon à Sainte-Croix bien que leurs distributions de changements annuels soient très différentes entre elles (non montré ici). Ainsi des différences de changements moyens n'impliquent pas nécessairement des différences de comportement entre les modèles hydrologiques vis à vis des forçages atmosphériques et réciproquement.

Sur les trois variables et les cinq stations choisies, les deux couples, CEQUEAU et J2000, et, CLSM et ORCHIDEE, ont indéniablement les comportements hydrologiques les plus proches. MORDOR est finalement le modèle qui a le comportement le plus atypique par rapport aux autres modèles.

Jiang *et al.* (2007) ont conclu à l'aide de six modèles conceptuels de structures différentes que des modèles ayant des comportements proches en temps présent pouvaient répondre de manière très différente à des scénarios de changement climatique. Ces conclusions sont obtenues sous un climat subtropical avec des bassins versants soumis aux épisodes de mousson. En outre, leur comparaison était relativement qualitative. Ils n'ont pas réellement quantifié les différences de comportement. Nous avons donc cherché à progresser sur cette question et ceci a motivé les travaux présentés ici et précédemment dans la section « Analyse de la similarité des débits et variables internes des modèles », page 69). Ici, les trajectoires empruntées par les modèles se rejoignent sans qu'ils soient forcément semblables en temps présent. J2000 et CEQUEAU très semblables sous forçages SPAZM/DuO le restent sur les changements. Lorsque l'analyse est menée sur les changements, le caractère atypique d'ORCHIDEE disparaît ; en revanche, MORDOR devient un modèle atypique. Notons que les métriques utilisées dans les deux sections ne sont pas strictement les mêmes (coefficient de corrélation sur les changements et coefficient de Nash sur les variables brutes). Il serait donc prématuré de conclure. Nous pouvons suggérer que pour le cas de la Durance, le caractère nival partagé par les bassins et le fait d'analyser des changements relatifs, renforcent la ressemblance des réponses sous changement climatique entre modèles. Il conviendra d'étayer cette hypothèse et de finaliser ces travaux, malheureusement en dehors du contexte du projet.

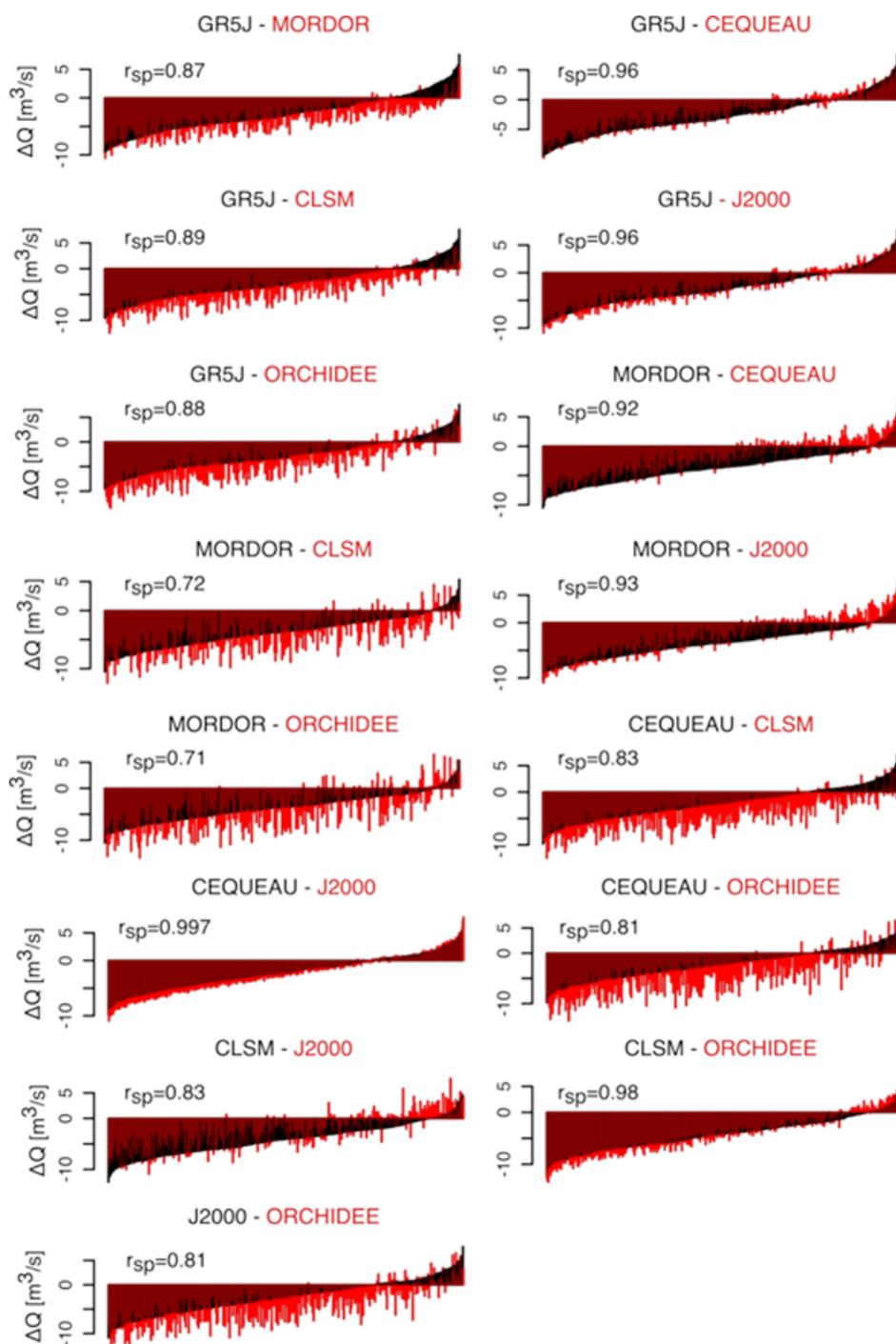


Figure 72 : Comparaison des changements de débits du Verdon à Sainte-Croix issus des 330 projections climatiques régionales entre les modèles hydrologiques deux à deux. Les changements du premier modèle représentés en noir sont classés dans l'ordre croissant des changements de débits. A chaque abscisse, le changement de débit simulé par le deuxième modèle en utilisant le forçage correspondant est représenté en rouge

	GR5J	MORDOR	CEQUEAU	CLSM	J2000	ORCHIDEE
GR5J	1	-	-	-	-	-
MORDOR	0.55	1	-	-	-	-
CEQUEAU	0.50	0.81	1	-	-	-
CLSM	0.51	0.70	0.65	1	-	-
J2000	0.34	0.76	0.97	0.62	1	-
ORCHIDEE	0.15	0.57	0.51	0.69	0.60	1

Tableau 36 : Coefficients de corrélation de Spearman calculés sur les changements d'évapotranspiration entre les modèles hydrologiques sur le bassin du Verdon à Sainte-Croix

3. Impact sur les dispositifs « arrêtés sécheresse »

Les sections précédentes font état des évolutions des variables du régime hydrologique. Pour aller plus loin, et fournir des éléments plus concrets sur les conséquences pour la gestion, nous avons souhaité mesurer l'effet du changement climatique sur un dispositif inspiré des arrêtés « sécheresse » mis en œuvre actuellement sur le bassin Rhône-Méditerranée.

L'objectif d'un arrêté cadre sécheresse est de planifier les mesures de restrictions des prélèvements d'eau des différents usagers en période de pénurie. Ces restrictions doivent respecter un certain nombre de principes. Ainsi, elles doivent :

- être déclenchées de manière progressive en adéquation avec la sévérité de l'épisode perçue au travers de mesures (débit des cours d'eau, hauteur piézométrique) en plusieurs points jugés « de référence » ;
- respecter les principes d'équité entre usagers et de solidarité « amont-aval » dans le secteur concerné ;
- avoir une durée d'application limitée dans le temps - il s'agit de gérer les déficits conjoncturels et non structurels.

Chaque entité hydrographique a adapté l'échelle de sévérité, *i.e.* les seuils, et les mesures de restriction progressives selon les spécificités du secteur et des usages en place, en conformité avec les différents guides ou circulaires (par exemple : Guide méthodologique de mars 2005 « Mesures exceptionnelles de limitation ou de suspension des usages de l'eau en période de sécheresse », éditée par la Direction de l'Eau du MEDDE). Quatre niveaux ont généralement été envisagés (« vigilance », « alerte », « crise » et « crise renforcée » ou « vigilance », « alerte », « alerte renforcée » et « crise »). Notons que le dernier seuil (niveau 3) est critique car synonyme de mise en péril de l'alimentation en eau potable et des espèces présentes dans le milieu. Tous les prélèvements effectués pour des usages non prioritaires sont suspendus. Des mesures de restrictions plus fortes, pouvant aller jusqu'à l'interdiction totale de prélèvement pourront être proposées. La mise en œuvre et l'abrogation des mesures de restriction sont de la responsabilité du ou des préfet(s).

Le site de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse propose la liste des arrêtés cadre départementaux en janvier 2014 (<http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/situation-hydrologique/infos-secheresse.php>). Le bassin Rhône-Méditerranée est presque intégralement couvert par des arrêtés conformément aux recommandations du « Plan d'action sécheresse » de mars 2004.

Il s'agit d'un dispositif évoluant dans le temps et qui présente une grande hétérogénéité dans le choix des variables et des seuils dans les arrêtés, laissé au libre arbitre des Préfets. L'examen des différents documents mis en ligne en janvier 2014 montre en effet que :

- majoritairement les niveaux d'alerte s'appuient en majorité sur le suivi des débits moyens sur 3 jours consécutifs (VC3) ou des débits dépassés en continu sur 7 jours consécutifs (QC7) ;
- les valeurs des seuils reposent quant à eux sur des quantiles VCN3 des valeurs minimales VC3 échantillonnées par décade, par mois ou par an, de période de retour entre 2 et 10 ans et sur des fractions du module QA ;
- certains arrêtés se fondent sur les Débits d'Objectif d'Etiage (DOE) issus vraisemblablement des études volumes prélevables qui n'ont pas nécessairement été rattachés à une statistique et une période de retour (c'est le cas du département des Hautes-Alpes et des Alpes de Haute Provence) ;
- une diversité d'indicateurs pluviométriques (non présentés ici) : ce sont des cumuls sur des périodes de 1 à 6 mois avec des seuils de 30 à 80% de la « normale » ;
- depuis 2004, certaines modalités ont été modifiées et que l'application des arrêtés peut être réduite à un an ou s'étendre sur plusieurs années. A l'échelle du bassin Rhône-Méditerranée, en 2014, les plus anciens arrêtés datent de 2006 et les derniers en juillet 2013. Les arrêtés cadre en vigueur en 2005 ont tous été révisés depuis leur création et leur renouvellement est assez fréquent sur les cinq départements recoupant partiellement le bassin versant de la Durance.

Dans le cadre du projet, nous souhaitons mettre en œuvre un cadre d'analyse s'approchant au mieux de la réglementation en place sur les départements interceptant le bassin versant de la Durance : les Alpes-de-Haute-Provence, les Hautes-Alpes, les Bouches-du-Rhône, le Var et le Vaucluse. Pour faciliter la mise en place de la procédure, les options choisies seront partagées par l'ensemble des cours d'eau. Nous avons constaté que le diagnostic repose sur le QC7 pour un grand nombre de départements. La variable QC7 sera la variable qui caractérise l'état des cours d'eau et ce sont les valeurs des seuils qui vont différencier les exercices de modélisation et qui sont rattachées à des statistiques dans un souci de traitement uniforme détaché d'une expertise locale. La pluviométrie intervient également pour caractériser le niveau de restriction (déficits

pluviométriques constatés rétroactivement et prévisions d'apport dans les jours à venir). Elle ne sera pas exploitée ici toujours dans une optique de simplification du processus (le poids de l'information pluviométrique dans la prise de décision dans les comités « sécheresse » par rapport à celui de l'hydrométrie n'étant pas parfaitement connu).

La validation s'appuie sur les données disponibles sur le site de l'Agence de l'Eau qui archive l'historique depuis 2005 des mesures de limitation mises en œuvre sur chaque département (emprise géographique, date d'entrée en vigueur et niveau). Notons que le site *PROPLUVIA* mis en place par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (<http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr>), lui aussi archive l'emprise spatiale des arrêtés de restriction des usages de l'eau sur l'ensemble de territoire métropolitain mais pris après janvier 2012. La pertinence du dispositif est examinée sur les données observées ou renaturalisées des stations hydrométriques (points de référence, de contrôle et bonus). Cependant la majorité des séries de débits s'achèvent en 2009 et donc seul un nombre réduit de stations permet de vérifier la pertinence du dispositif d'alerte après 2010 :

- la Guisane à Monétier-les-Bains et la Durance à Val-des-Prés implantées dans le département des Hautes-Alpes ;
- le Lauzon à Villeneuve, l'Asse à la Clue de Chabrières et le Verdon à la Foux d'Allos implantés dans le département des Alpes-de-Haute-Provence ;
- l'Artuby à La Bastide [Taulane] et le Jabron à Comps-sur-Artuby, implantés dans le département du Var.

Elles vont être, pour cet exercice, représentatives des départements auxquels les points de mesure se rattachent. Plusieurs modalités de définition des seuils ont été testées.

Les événements les plus marquants pour la région PACA sont les mois de juillet-août-septembre 2005, 2006, 2007 et 2008 de manière plus locale sur le littoral (Bouches du Rhône et Var). Notons que 2007 est une année très critique en matière de gestion des réserves : « En PACA une solution a été trouvée vis-à-vis des usages agricoles de la Basse Durance, qui avaient consommé sur la période d'étiage leur 200 Mm³ attribués fin août, et dont les besoins se sont prolongés en cette fin de saison agricole avant la jonction avec les pluies d'automne », selon le rapport dressant la situation hydrologique du bassin à la mi-octobre 2007 émis par la DREAL (http://www.donnees.rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/bassin_rmc/bsh/Secheresse/Annee-2007/intro_secheresse2007.htm).

Les différentes modalités relatives aux seuils (constants sur l'année ou modulés par le mois ou la décennie considéré(e)) n'ont pas permis de reproduire fidèlement la chronologie des arrêtés préfectoraux. La procédure mise en place fait apparaître plus de jours en état de vigilance. Cependant, conformément à la chronologie des arrêtés entre 2005 et 2012, quel que soit le mode de calcul, l'année 2007 est bien identifiée et l'année 2010, bien exempte de franchissement de seuil (Figure 73). Plusieurs explications de l'écart constaté à l'échelle des départements et les diagnostics au niveau des stations hydrométriques peuvent être avancées :

- des réglementations qui évoluent ;
- une part d'expertise sur la décision (fondée sur les pluies qu'elles soient passées ou prévues) : les mesures de limitation sont prises par les préfets à partir des données fournies à titre *indicatif* par les services départementaux de l'État, comme le rappelle le site *PROPLUVIA* ;
- des différences dans les seuils effectifs et ceux choisis dans nos trois modalités ;
- des régimes hydrologiques différents au sein d'un même département (nival = Verdon, Durance, Guisane / pluvial = Lauzon, Asse, Jabron, Artuby) ;

La modalité exploitant un seuil constant ne permet pas d'isoler des périodes de déficit relatif (elles se concentrent pendant la saison d'étiage). L'option exploitant les VC3 mensuels a tendance à faire apparaître des alertes et crises en fin de mois. Ces deux constats nous ont orientés finalement vers des seuils définis par les VCN3 décennaires de périodes de retour 2, 5, 10 et 20 ans.

Sur la période 1980-2009, sur les vingt stations du jeu de données comportant au moins 25 ans, la répartition des niveaux d'alerte en nombre de jours moyens par an par classe est donnée en Tableau 37. Les seuils sont calculés sur toute la période disponible, donc potentiellement sur les années hors 1980-2009. Notons, que près de 100 jours pourraient être dans un des niveaux d'alerte. Ce chiffre peut paraître conséquent ; en effet, ici nous n'avons pas restreint les analyses aux périodes estivales.

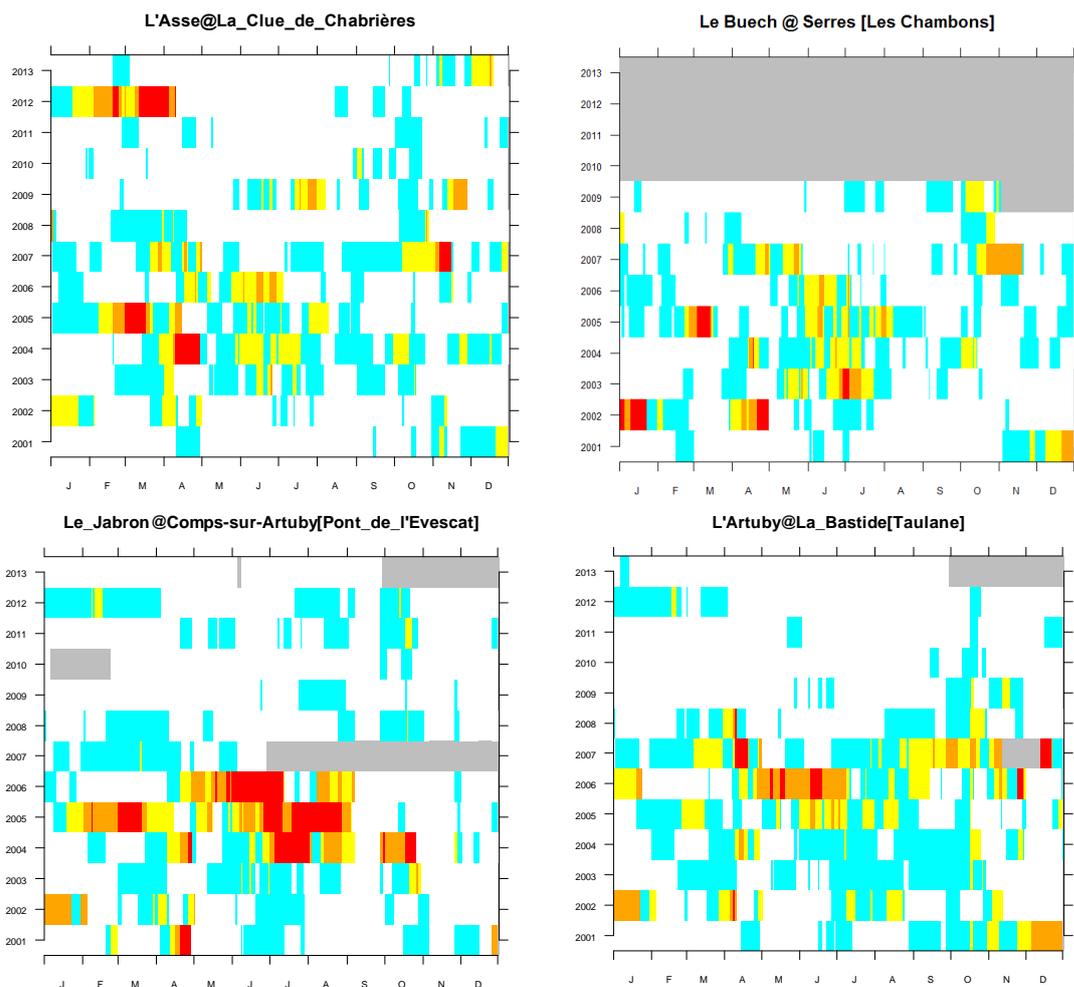


Figure 73 : Dispositif reposant sur le suivi des QC7 et seuils définis par les quantiles de VC3 décadaires (bleu : Vigilance ou Pré-alerte, jaune : Alerte, orange : Alerte renforcée, rouge : Crise, gris absence de données)

Bassin versant	Type de point	1	2	3	4
La Durance à Serre-Ponçon	Contrôle	77.4	21.0	6.0	0.4
Le Buëch à Serres	Contrôle	68.1	15.8	8.0	5.2
La Durance à L'Escale	Contrôle	65.9	17.6	7.7	3.1
Le Verdon à Castellon	Contrôle	70.0	22.0	10.2	3.8
Le Verdon à Sainte-Croix	Contrôle	69.1	18.1	10.0	5.2
La Durance à Jouques-Cadarache	Contrôle	67.6	18.6	8.4	2.8
La Durance à la Clapiere	Intérêt	72.9	19.2	5.5	0.5
L'Ubaye à Roche Rousse	Intérêt	83.8	24.0	6.4	0.7
La Durance à Briançon Aval	Intérêt	76.8	26.0	10.9	1.5
Le Guil à Montdauphin	Intérêt	73.2	19.8	6.4	2.2
La Méouge au pont de Méouge	Intérêt	78.2	25.1	11.7	5.0
Le Jabron à Piedguichard	Intérêt	76.7	23.9	7.2	5.3
Le Verdon à Colmars	Intérêt	66.8	17.1	8.1	8.6
L'Asse à la Clue de Chabrières	Intérêt	78.0	12.5	7.2	3.6
L'Ubaye à Barcelonnette	Intérêt	70.2	20.0	9.1	4.9
La Durance à Val-des-Prés	Bonus	68.9	18.7	7.7	2.6
La Guisane au Monétier-les-Bains	Bonus	76.2	14.5	11.2	5.0
Le Lauzon à Villeneuve	Bonus	64.8	24.3	8.8	5.8
Le Verdon à Allos	Bonus	50.6	10.6	4.9	5.6
L'Artuby à la Bastide	Bonus	95.9	27.8	10.8	2.7
Min		50.6	10.6	4.9	0.4
Moyenne		72.6	19.8	8.3	3.7
Max		95.9	27.8	11.7	8.6

Tableau 37 : Répartition des jours dans l'échelle de sévérité de sécheresse sur les données de référence

Dans la suite, afin de filtrer les erreurs de modélisation, les seuils de VCN3 sont calculés sur les séries simulées par les modèles à partir des forçages observés ou des sorties des chaînes GCM/MDES.

Sur la même période 1980-2009, sur les stations de contrôle ou bonus (le Bes à la Clue de Péroure et la Durance au Pont de Mallemort étant exclus faute de données en nombre suffisant), l'analyse de la répartition des niveaux d'alerte en nombre de jours moyens par an par classe par modèle alimenté par les archives SPAZM ou DuO conduit aux statistiques du Tableau 38.

Modèle	Biais moyen (jour)				RMSE (jour)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
GR5J	2.8	3.0	-0.1	1.1	8.9	6.0	2.1	3.2
MORDOR	-5.3	-1.1	0.2	2.0	8.8	5.9	3.3	3.7
CEQUEAU	12.2	4.5	4.4	5.8	19.6	6.0	6.1	7.3
CLSM	4.5	0.1	-0.2	4.1	10.8	5.7	3.1	5.6
J2000	18.9	9.6	4.3	5.8	21.9	12.2	5.5	7.2

Tableau 38 : Performance des modèles en termes de répartition au sein de l'échelle de sévérité de sécheresse sur l'ensemble des observations (RMSE : erreur quadratique moyenne)

Un écart moyen positif généralisé sur les quatre classes indique un nombre plus important de jours de vigilance et de niveau de sévérité supérieur. Les résultats montrent :

- des biais plutôt positifs partagés par quatre modèles parmi les cinq, ce qui révèle une tendance à simuler un plus grand nombre de jours de crise que celui identifié plus haut à partir des observations ;
- individuellement pour chaque modèle, des biais du même ordre sur les classes les plus sévères (2 à 4) ;
- sur la base de l'analyse des *RMSE*, une dispersion plus faible pour les modèles conceptuels globaux calés (MORDOR et GR5J) que les modèles distribués.

Trois bassins versants sont ici examinés : le Buëch à Serres et l'Asse à la Clue de Chabrières. Le dispositif est conditionné par les quantiles *VCN3* définis par séquence de 10 jours, de période de retour 2, 5, 10 et 20 ans simulés sur la période PST. Nous nous sommes intéressés à la période du 1^{er} avril au 31 octobre, comportant 214 jours. La Figure 74 et Figure 75 fournissent les probabilités d'être sous les seuils de différents niveaux en pointillés pour PST et en trait plein pour FUT. Ainsi, d'après les figures, avec J2000, le risque d'être sous le seuil 1 est de l'ordre de 40% en temps PST et de 50% en temps FUT pour l'Asse à la Clue de Chabrières. Nous constatons des réponses différenciées : CEQUEAU et J2000 se ressemblent et s'écartent du couple GR5 – CLSM qui envisagent une augmentation des probabilités mais avec un niveau de référence PST différent (autour de 25%). Les figures font apparaître des sauts brutaux qui correspondent au début et fin de décade (les seuils évoluant de manière discontinue d'une décade à une autre). Dans les tableaux figurent les moyennes des nombres de jour par classe tous modèles hydrologiques confondus entre le 1^{er} avril et le 31 octobre.

Dans l'ensemble, à l'horizon 2050 les modèles proposent en moyenne un nombre accru de jours de niveau 2 (quasiment le double). L'évolution est particulièrement sensible pour la classe de crise la plus sévère, ceci peut s'expliquer par une sévérité accrue des étiages sans modification notable de la dynamique de transition entre les débits courants et les débits les plus faibles, *i.e.* entre les différents seuils définis ici.

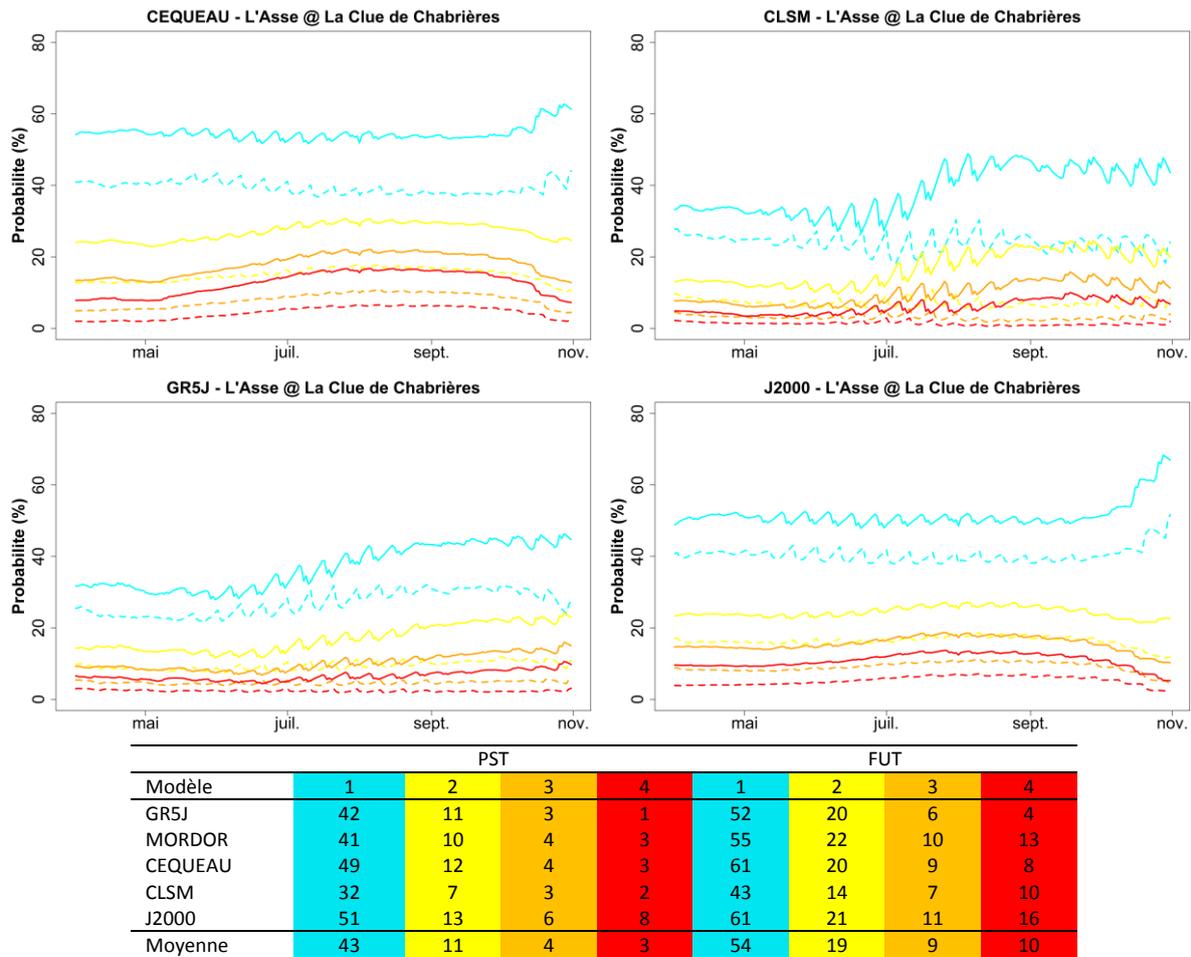
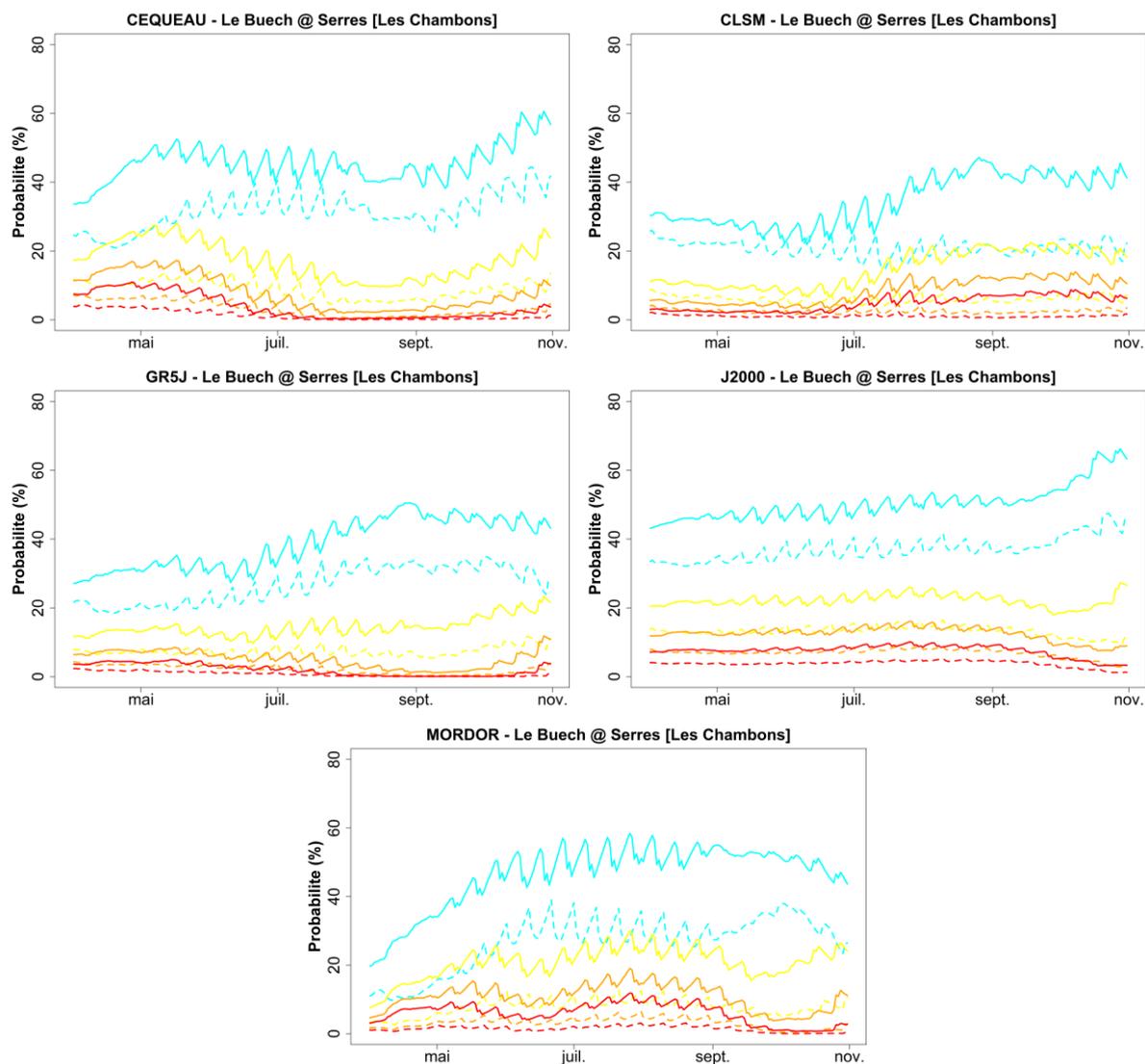


Figure 74 : Risque d'occurrence des niveaux d'alerte entre avril en novembre en 2050 pour l'Asse à la Clue de Chabrières (en jour dans le tableau ; sur les graphiques, les couleurs sont associés au seuil sous passé ; les traits pointillés sont relatifs à PST et les traits continus à FUT)



Modèle	PST				FUT			
	1	2	3	4	1	2	3	4
GR5J	37	10	5	5	43	15	8	14
MORDOR	52	15	8	9	59	20	11	27
CEQUEAU	36	9	4	3	46	15	8	13
CLSM	52	15	8	11	58	19	10	23
J2000	37	10	5	5	43	15	8	14
Moyenne	43	12	6	7	50	17	9	18

Figure 75 : Risque d'occurrence des niveaux d'alerte entre avril en novembre en 2050 pour le Buëch à Serres (en jour dans le tableau ; sur les graphiques, les couleurs sont associés au seuil sous passé ; les traits pointillés sont relatifs à PST et les traits continus à FUT

Ces résultats posent la question quant à l'adaptation des dispositifs d'arrêtés sécheresse. Des réajustements sont réalisés fréquemment, comme nous l'avons dit plus haut. Il semble que la question doive se poser sur le long terme.

La modélisation des mesures de restriction n'a pas été intégrée dans les simulations de gestion des ouvrages, ni même dans la reconstitution des prélèvements. Ceci a des conséquences sur les volumes et sur la dynamique des prélèvements (en temps présent et futur). Nous pouvons constater un effet significatif du changement climatique sur la fréquence accrue des niveaux d'alerte si les seuils de franchissement restent identiques. Les volumes prélevés des cours d'eau ne sont pas contraints par les franchissements des niveaux d'alerte. Il aurait fallu intégrer explicitement des nouveaux seuils inscrits dans une stratégie d'adaptation. Dans la suite du document, dans les simulations, les volumes prélevés sont peut-être surestimés.

Le nombre de jours dans le niveau le plus critique (synonyme de mise en péril de l'alimentation en eau potable et des espèces présentes dans le milieu ; restrictions plus fortes, pouvant aller jusqu'à l'interdiction totale de prélèvement) peut être perçu comme un indicateur de défaillance. Les résultats montrent de toute évidence que les risques de défaillance risquent d'être particulièrement accrus, ceci sera particulièrement critique pour les secteurs non sécurisés.

VII. La réponse biologique d'un cours d'eau intermittent en 2050

Dans le cadre du projet, nous avons souhaité valoriser de précédents travaux (Datry, 2012 ; Larned *et al.*, 2011) centrés sur la compréhension du fonctionnement des cours d'eau intermittents et la biodiversité. Le territoire d'étude du projet intègre le bassin versant de l'Asse, affluent rive gauche de la Durance qui connaît une intermittence répétée sur la partie aval de son bassin versant. Il fait l'objet d'un suivi régulier depuis 2008 afin de mieux connaître les facteurs impactant la biodiversité des rivières intermittentes. La rivière connaît, dans sa partie du bassin la plus élevée, un régime hydrologique partiellement influencé par la fonte des neiges, alors qu'un climat plus méditerranéen favorise l'apparition d'étiages sévères dans la plaine alluviale (Figure 76). Ces assècs sont pour partie dus aux prélèvements dans la nappe. Les débits sont mesurés en continu à la Clue de Chabrières, station considérée d'intérêt (section « Données hydrologiques », page 30). La série est complétée en aval par des campagnes de jaugeages effectués entre 2004 et 2010 (13 sites mesurés jusqu'à 14 reprises). Ce suivi certes ponctuel met en évidence des pertes au profit de la nappe alluviale entre les sites 1 et 7 puis en aval du site 8 avant la confluence avec la Durance. En complément, les invertébrés des zones benthiques et hyporhéiques sont collectés les 15 octobre et 15 avril de chaque année, de manière à obtenir des échantillons représentatifs de conditions antérieures et postérieures aux phénomènes d'assèchement.

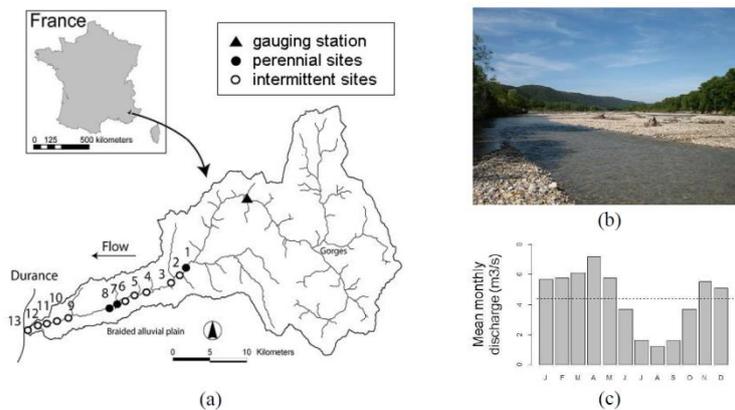


Figure 76 : Localisation des sites jaugés (a). Photographie de la plaine alluviale (b). Débit mensuel interannuel à la station de mesure continue de la Clue de Chabrières (la ligne discontinue indique le module à cette station) (c)

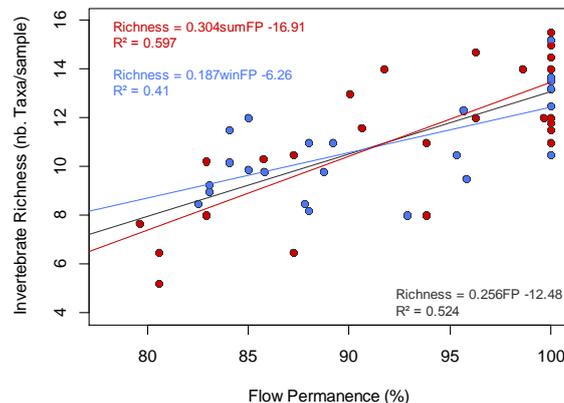


Figure 77 : Relation entre la permanence de l'écoulement reconstitué et le nombre d'espèces d'invertébrés sur l'Asse, d'après Datry (2012) – en rouge : les points se rapportant à la période estivale et droite de régression associée, en bleu : ceux se rapportant à la période hivernale et droite de régression associée, en noir : droite de régression sans distinction de saison

Grâce au dispositif de suivi hydro- et biologique, des relations ont pu être mises en évidence entre les caractéristiques des assècs et la richesse taxonomique. La principale caractéristique hydrologique liée à l'intermittence et explicative de la richesse des communautés d'invertébrés est la permanence d'écoulement ou Flow Permanence (FP), exprimé en %. La variable FP est le nombre de jours sans écoulement rapporté sur la période complète d'observation ou sur celle d'échantillonnage. Sur l'Asse, l'évolution du Flow Permanence reconstitué à partir d'un logiciel d'interpolation des débits le long du linéaire (ELFMOD ; Larned *et al.*, 2011), sur la période des jaugeages 2003-2010, a pu expliquer plus de 50% de la variance sur le nombre d'espèces

d'invertébrés (Figure 77). En supposant ces relations toujours valides en 2050, et en les appliquant aux débits simulés sous scénarios climatiques, nous aurons ainsi une vision de la biodiversité en milieu de XXI^e siècle.

Deux modèles hydrologiques GR4J et J2000 ont été utilisés afin de simuler le débit naturel à la section n°13 de l'Asse ainsi à partir des débits simulés à la Clue de Chabrières pour GR4J et en un point du découpage de J2000 à proximité immédiate. Les paramètres de GR4J ont été transférés avec de légères modifications à la section n°13 pour s'ajuster au mieux aux jaugeages. La version à 4 paramètres de GR (Perrin *et al.*, 2003) a été préférée à GR5J utilisée dans la modélisation de la ressource pour faciliter le transfert des paramètres du modèle à la Clue de Chabrières aux sites peu jaugeés. GR4J présente une performance moyenne sur les débits à la Clue de Chabrières sur les débits ($NSQ= 0.58$ pour GR4J contre 0.72 pour GR5J et 0.44 pour J2000 sur la période de référence 01/08/1980 – 31/07/2009) mais plus performant que GR5J et J2000 dans la reconstitution des étiages ($NSIQ= 0.54$ pour GR4J contre -0.61 pour GR5J et 0.15 pour J2000).

A la section n°13, les modèles sont incapables de reproduire des assecs : le débit simulé n'est jamais nul (GR4J) ou fortement surestimé (J2000). GR4J a été calé sur la racine des débits sans le contraindre à simuler des assecs. Un post-traitement des débits simulés (application d'une correction quantile-quantile sur l'ensemble de la série, *e.g.* Snover *et al.*, 2003) a été envisagée pour obtenir des débits nuls (Figure 78). La procédure a été validée sur l'Albarine, cours d'eau intermittent et affluent de l'Ain disposant d'une station hydrométrique mesurant l'intermittence en continu. Cette procédure se révèle être un moyen efficace de simuler l'intermittence sans modifier en profondeur la structure des modèles hydrologiques.

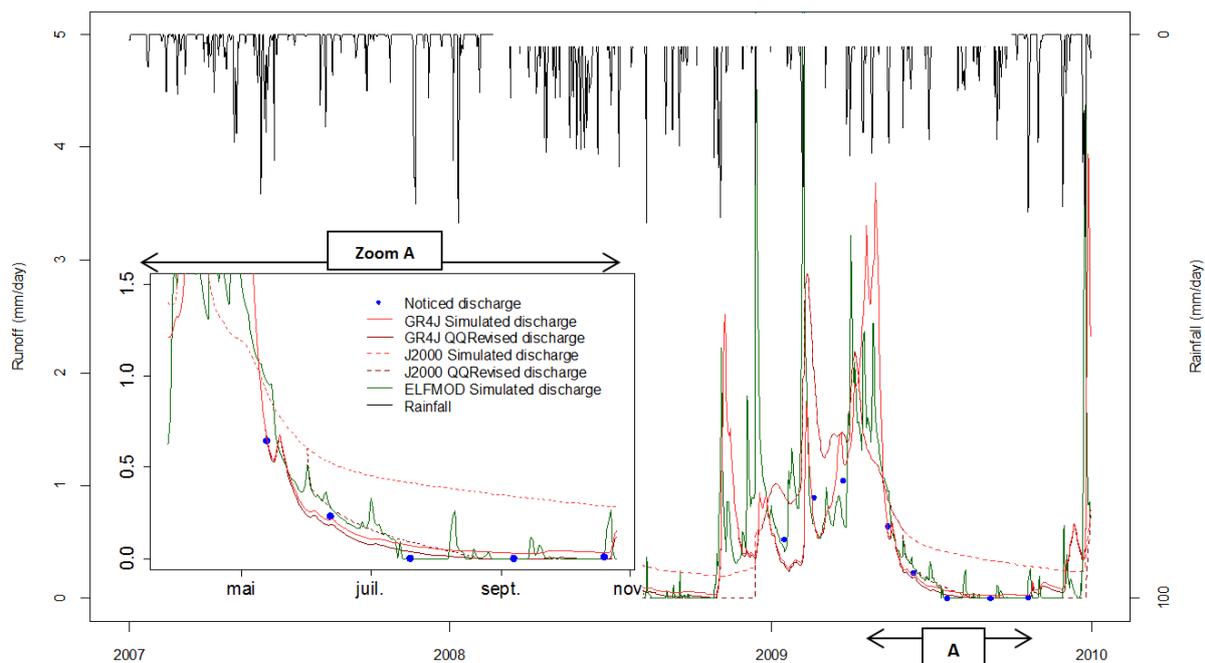


Figure 78 : Simulations à la section n°13 de l'Asse disposant de jaugeages (Noticed discharge) pour l'année 2009, avant (Simulated) et après correction (QQRevised) des différents modèles hydrologiques

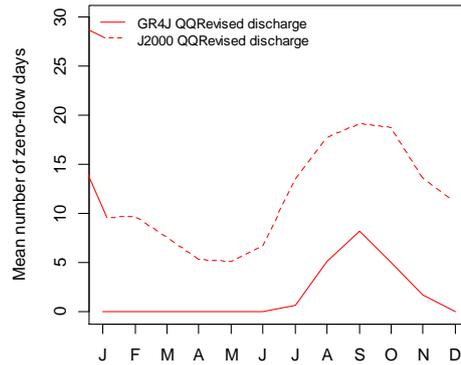


Figure 79 : Nombre moyen interannuel de jours d’assec par mois sur la période 1980-2009 pour le site n°13

Le modèle GR4J simule moins d’assecs que J2000 (Figure 79) à la station n°13 ($FP = 93\%$ pour GR4J contre 62% pour J2000). Notons que sur les 13 campagnes de jaugeages en ce point, un écoulement nul a été observé à trois reprises, d’où un Flow Permanence estimé à 77% en supposant évidemment les campagnes de jaugeage représentatives du régime de la rivière, valeur intermédiaire entre les deux estimations. Les assecs se concentrent sur la période juin-novembre, ce qui nous a incités à mettre en regard les valeurs de FP et les données climatiques calculées sur la période de juin à novembre.

Les deux modèles hydrologiques à la station n°13 ont été forcés par 330 projections climatiques, puis fait l’objet de la correction quantile-quantile calée en temps présent. Toutes les projections suggèrent une augmentation de la température de l’air ΔT entre $+0.9$ et $+3.3^\circ\text{C}$ en moyenne durant la période juin-novembre. Il y a moins de cohérence au sujet des précipitations totales ΔP qui pourraient varier de -25 à $+12\%$, ce qui rejoint le diagnostic opéré à l’échelle de la Durance (section « Evolution du climat », page 100).

La plupart des scénarios induisent pour GR4J des variations de la permanence annuelle d’écoulement FP de -14 à $+6\%$ (-3.5% en moyenne). J2000 suggère des changements drastiques et des incertitudes plus larges de -35% à $+12\%$ (-10% en moyenne). Par ailleurs, il existe un lien assez fort entre variations de FP et variations des précipitations. Des changements plus significatifs sont observés lorsque la permanence d’écoulement est calculée sur la période dite « estivale » du 15 avril au 15 octobre (min : -23% , moyenne : -5% , max : $+11\%$ pour GR4J ; min : -36% , moyenne : -11% , max : $+18\%$ pour J2000).

En exploitant la relation empirique la plus solide (sur les données estivales) de la Figure 77 et en la supposant toujours valide, les anomalies en nombre d’espèces d’invertébrés peuvent s’exprimer en fonction de l’anomalie en FP par la relation suivante :

$$\Delta Richness = 0.304 \Delta sumFP$$

Toutes choses égales par ailleurs, le nombre d’espèces d’invertébrés est amené à décroître de 3 espèces pour chaque diminution de 10% du *Flow Permanence* estival. Ceci conduirait à la perte de 1.5 taxons sur la base du changement moyen envisagé par GR4J et de 3 taxons pour J2000. Les projections les plus pessimistes de J2000 pourraient conduire à une richesse taxonomique égale à zéro.

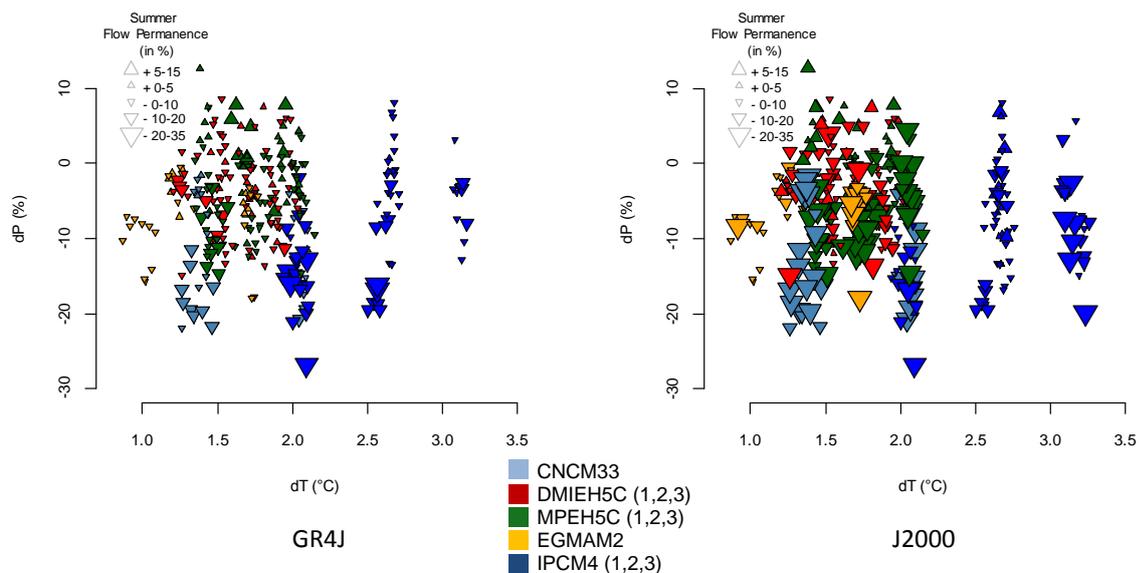


Figure 80 : Evolution du Flow Permanence calculé sur la période juin-novembre, entre les simulations en temps futur (FUT, 2036-2065) et de référence (PST, 1980-2009)

Le climat attendu à l'horizon 2050 pourrait être significativement différent du climat actuel. Ceci peut mettre en doute la stationnarité des processus hydrologiques opérant dans la transformation pluie-débit et la pertinence des paramètres des modèles hydrologiques. Afin de compléter notre étude, une analyse de sensibilité autour des conditions climatiques actuelles a été réalisée sur l'exemple de Fronzek *et al.* (2010). Les climats perturbés sont issus d'un ré-échantillonnage des observations DuO selon la méthode K-Nearest Neighbor (« K plus proches voisins ») (Hendrickx et Sauquet, 2013). Une fois définis, ils sont alors injectés comme nouveaux forçages dans les modèles GR4J et J2000 et les débits obtenus sont ensuite corrigés. Pour permettre d'obtenir une vision continue, les variations du *Flow Permanence* estival sont ajustées par un polynôme quadratique des variables ΔP et ΔT calculées sur la période juin-novembre. Il vient finalement :

- pour GR4J : $\Delta FP = 0.27(\Delta P/10) - 1.29dT - 0.0024(\Delta P/10)^2$ ($R^2 = 0.93$) ;
- pour J2000 : $\Delta FP = 0.66(\Delta P/10) - 0.0048(\Delta P/10)^2$ ($R^2 = 0.89$)

Tout comme observé précédemment en réponse aux scénarios de changement climatique (Figure 80), les modifications de précipitations conditionnent fortement les variations du Flow Permanence (Figure 81). Les anomalies pour les cinq années les plus humides et les cinq années les plus chaudes et sèches sont représentées par un cercle gris et indiquent leur Flow Permanence respectif en dessous. Les années 2002 et 2009 présentent sous J2000 des contradictions qui peuvent expliquer l'importance des pluies antérieures à la saison estivale (les réservoirs du modèle y étant particulièrement sensibles). Nous pouvons constater la sensibilité différente des valeurs de *FP* simulés par les modèles, et donc *in fine* des incertitudes fortes qui peuvent peser sur le devenir des milieux pour ce bassin versant.

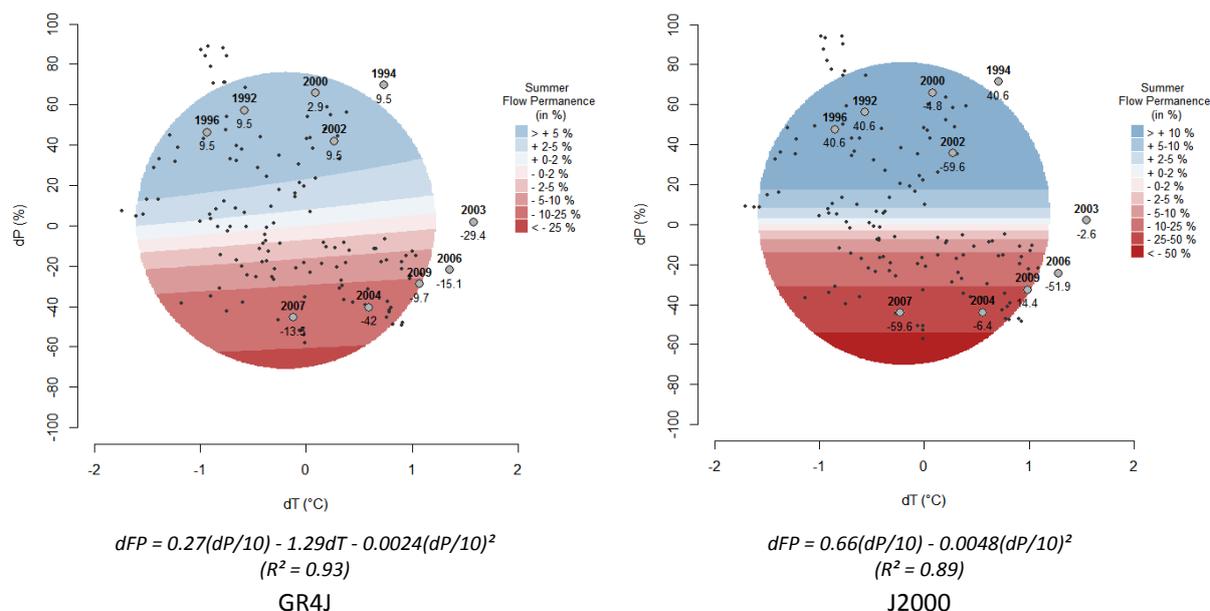


Figure 81 : Analyse de sensibilité du Flow Permanence estival, calculé du 15 avril au 15 octobre, fonction des anomalies climatiques sur la période juin-novembre (● scénario KNN ○ année observée)

Les résultats obtenus par les deux modèles hydrologiques montrent que l'estimation de l'intermittence est une tâche difficile. Ces modèles ne sont pas pleinement adaptés pour simuler des assecs sans intégrer dans le processus de calage une fonction « objectif » spécifique à la reconstitution de débits nuls. Nous avons privilégié l'emploi d'une procédure de correction qui nécessite des valeurs observées nulles. Or cette dernière peut être mise en difficulté lors d'une surestimation des débits en période d'étiage comme c'est le cas pour J2000, tel qu'il est configuré ici. Le Flow Permanence déduit est par conséquent très fortement discordant entre les deux modèles.

La température moyenne de l'air est amenée à augmenter pour les prochaines décennies sur le bassin versant de l'Asse. C'est principalement les modifications de précipitations, globalement à la baisse, qui risquent de diminuer le Flow Permanence et parallèlement, mener à la décroissance des communautés d'invertébrés. L'analyse de sensibilité confirme par ailleurs cette dépendance des deux modèles hydrologiques au régime des précipitations.

Pour l'heure, des interrogations subsistent dans le cadre de ces travaux. Il est par exemple rappelé dans la littérature que le développement des communautés d'invertébrés est fortement lié à l'évolution de la température des eaux (Ormerod, 2009 ; Heino *et al.*, 2009). Or ce paramètre, inconnu dans notre étude, n'a pu être testé. Nous pouvons tout de même supposer qu'une baisse des débits et un accroissement de la température de l'air peuvent engendrer une augmentation de la température de l'eau en rivière, ce qui pourrait éliminer les espèces psychrophiles, dont plusieurs représentantes sont parmi les groupes sensibles aux assèchements (*e.g.* mollusques, plécoptères). Par ailleurs, avec la disparition potentielle d'espèces locales, il n'est pas exclu que des espèces invasives puissent profiter de la situation et trouver refuge dans les niches libérées (Rahel et Olden, 2008). Enfin, il est très probable que la diversité régionale soit, elle aussi, affectée par ces modifications climatiques et hydrologiques ; ceci pourrait modifier complètement les dynamiques des méta-communautés aquatiques dans le bassin de l'Asse, altérant ainsi leurs résistance et résilience à tout type de perturbation. A ce stade, il est donc difficile de traduire plus en avant les changements climatiques et hydrologiques en termes écologiques.

Sachant que la diversité biologique se traduit en fonctions écologiques, une diminution de la diversité en invertébrés pourrait aussi avoir des effets cascade sur certain processus fondamentaux se déroulant dans le milieu aquatique, telle que la décomposition de litière végétale terrestre. Il est acquis que la disparition d'invertébrés en réponse à l'intermittence peut réduire considérablement les taux de décomposition de litière, altérant ainsi la production de matière organique particulaire et son export vers les chaînes trophiques aval, et les flux de matière organique vers l'exutoire du bassin (*e.g.* Datry *et al.* 2011 ; Corti *et al.* 2011). Toutefois, une modification de la diversité des espèces ne modifie pas nécessairement les fonctions établies dans cet

écosystème (Bonada *et al.*, 2007), grâce notamment à l'adaptation de certaines espèces, ou à la redondance des fonctions qui caractérise souvent les communautés (Lawton and Brown, 1993). Aussi, il conviendrait de déterminer si des espèces clef pourraient, dans le cas de leur disparition en réponse aux assecs, affecter de manière considérable l'écosystème actuel et ses fonctions, telles que la décomposition de litières. Autant d'interrogations qui rendent incertaines les prévisions des conséquences de l'évolution de la biodiversité à moyen ou long terme, alors que les effets sur la biodiversité d'une évolution de l'écoulement sont connus sur le court terme.

VIII. Les visages du territoire en 2050

Le futur n'étant pas prévisible, une des manières d'appréhender l'incertitude de l'avenir socio-économique est de s'appuyer sur un faisceau de scénarios plausibles contrastés. Deux options s'offraient : faire des scénarios de demande en eau future ou faire des scénarios de territoire et en déduire une demande en eau. C'est la seconde option qui a été choisie. La détermination des évolutions possibles des demandes en eau s'appuie sur une démarche de prospective territoriale dont les bases conceptuelles et méthodologiques ont été définies dans des travaux antérieurs (de Jouvenel, 1999 ; Durance *et al.*, 2007). Néanmoins, la démarche engagée a dû être adaptée à l'objectif recherché, aux moyens disponibles et au territoire étudié.

La démarche retenue peut se résumer aux trois points importants suivants :

- elle est basée sur une approche systémique. Celle-ci considère les territoires comme des objets abstraits et permet d'envisager la zone d'étude dans sa complexité et sa globalité. L'importance est donnée à l'étude des interactions entre les différentes composantes du territoire (sous-systèmes économique, social, politique, environnemental, spatial...) mais aussi aux interdépendances existant entre le territoire considéré et son environnement (autres échelons territoriaux ou territoires limitrophes et tiers) ainsi qu'à la compréhension des dynamiques structurantes. Cette approche permet de construire une vision simplifiée d'un monde complexe pouvant être partagée par tous ;
- elle s'appuie sur la méthode des scénarios. Deux types de scénario ont été co-construits : un scénario dit Tendanciel qui est l'évolution future compte tenu des tendances inscrites dans le système actuel et quatre scénarios contrastés dits « extrêmes » permettant « d'encadrer » l'espace des avenir possibles du territoire ;
- elle est participative : la concertation entre experts et acteurs des territoires a été envisagée dès le début avec la tenue d'ateliers mobilisant un large panel d'acteurs, dans la définition même des objectifs du projet et des résultats attendus. Cette dimension qui fait appel à des savoirs différents permet un meilleur partage des connaissances et des informations, une clarification sur les choix et les hypothèses et rend transparent les incertitudes et les controverses. Elle légitime la démarche et favorise une vision partagée des enjeux futurs du territoire.

La construction des scénarios territoriaux s'est appuyée sur l'expertise acquise par les partenaires du projet dans des prospectives sur l'eau en France achevées ou menées en parallèle (Garonne2050, Explore2070, Aqua2030, Imagine2030) et sur la connaissance territoriale transmise par les acteurs sollicités.

La démarche prospective retenue comprend trois étapes : l'élaboration d'une base de connaissance, la construction des scénarios et la quantification des variables expliquant les demandes en eau. Le positionnement global de la démarche est décrit en Figure 82.

La base de connaissance intègre un diagnostic fondé de l'état actuel des territoires desservis en eau par le système Durance-Verdon ainsi que la détermination des variables clés externes ou internes permettant de caractériser les évolutions en cours. Ces variables clés ont été regroupées (1) en variables de « contexte global », variables influentes externes qui donnent « la couleur » de chacun des scénarios, (2) en variables de « contexte territorial », variables qui font émerger des enjeux spécifiques au territoire, et (3) en « contexte sectoriel », variables influencées qui expliquent l'évolution des activités utilisatrices de la ressource. Du fait du peu de temps imparti aux ateliers participatifs, une liste de variables possibles et d'hypothèses ont été préparées ex ante par les experts du projet.

Les scénarios ont été co-construits par les experts et les acteurs des territoires en s'appuyant sur des ateliers participatifs. Trois ateliers d'une journée ont été programmés en octobre 2012 sur trois territoires différents faisant écho au découpage du territoire : « Croissant Littoral », « Basse Durance », « Moyenne et Haute Durance ». Ces ateliers sont le résultat d'une première concertation avec un panel réduit d'acteurs qui s'est tenue quelques mois après le démarrage du projet afin de faire connaître le projet et de définir les modalités de travail et les interactions avec des actions en cours - notamment le SOURCE. L'objectif de ces ateliers a été d'engager une réflexion avec les acteurs locaux sur les variables explicatives des demandes en eau et les variables de contexte et sectoriels pouvant influencer sur les activités utilisatrices de la ressource avant d'ébaucher des « *story lines* ». La base de connaissance rassemblée et présentée précédemment a été exploitée et synthétisée sous forme de document de synthèse soumis à la lecture et critique des acteurs quelques jours

Il convient de rappeler les précautions de lecture et d'interprétation de ces scénarios : (1) à l'instar du futur climatique, le futur socio-économique exact du territoire n'est certainement pas parmi les scénarios élaborés, qui ne sont que des conjectures n'ayant de valeur qu'au regard de ce qu'elles essayent de tester, (2) d'autres scénarios auraient pu expliquer un même « niveau » de demande en eau, (3) les scénarios ont été construits indépendamment de l'évolution du climat. Aucun des scénarios n'inclut de façon explicite des stratégies d'adaptation aux évolutions des contextes climatique et anthropique ; cependant, certains scénarios intègrent la poursuite de programmes d'économies d'eau. Enfin, précisons qu'aucun scénario ne recherche un futur plus souhaitable du point de vue de l'adéquation offre / demande.

L'approche envisagée a l'avantage d'ancrer quatre scénarios dans un contexte territorial avec les cohérences internes (ex. compétition entre usages) imposées à l'heure actuelle ou émergentes dans le futur. Le résultat est quatre scénarios prospectifs pour le territoire résumés par la Figure 83. S'y ajouteront dans les sections suivantes : les scénarios *Tendanciel* et « business-as-usual », ce dernier, baptisé *Niv2010*, est calqué sur une photographie du territoire en 2010. Au total, six scénarios pour le territoire ont été proposés.

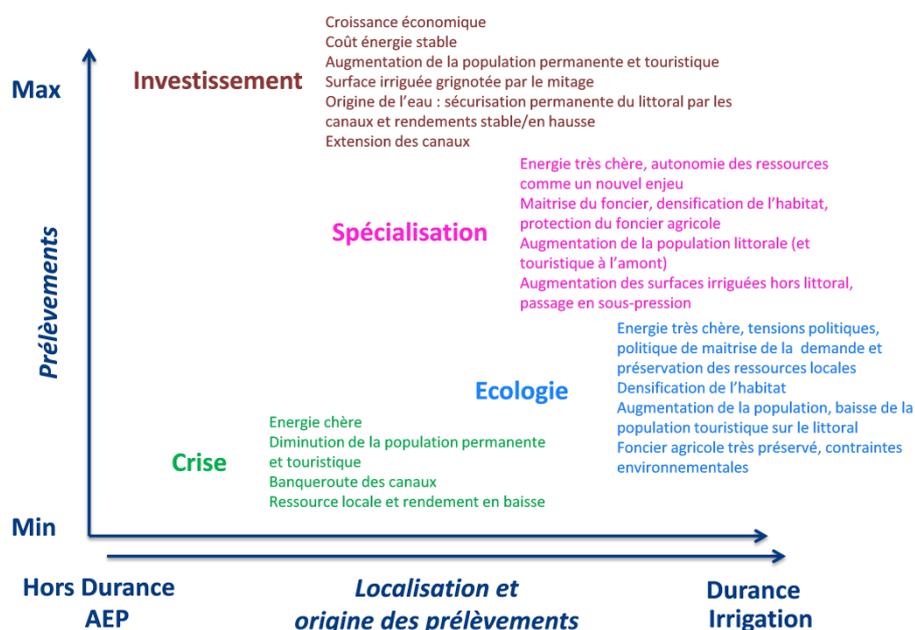


Figure 83 : Principales caractéristiques des quatre scénarios prospectifs pour le territoire

Les scénarios littéraires sont décrits dans les pages suivantes. Dans ces fiches, il est parfois mentionné des évolutions « *a priori* » ; il s'agissait en effet d'une intuition sur les évolutions attendues, confirmées ou non plus tard par les modèles.

Scénario Spécialisation

Une économie régionale compétitive, spécialisée et spatialisée

Synthèse du scénario

Dans un monde sans régulation internationale et en très forte concurrence, les priorités ont évolué. L'accès aux ressources (eau, énergie, etc.) est devenu un véritable enjeu, tant à l'échelle mondiale, qu'à l'échelle régionale. Les **prix de l'énergie sont très élevés** pour les pays non producteurs. Dans ce contexte, les **productions locales et les technologies peu gourmandes en énergie sont privilégiées**. La région PACA, forte de nouvelles attributions aux dépens de l'Etat, cherche à maîtriser son foncier pour diversifier son économie et augmenter ses revenus productifs par rapport à ses revenus résidentiels de moins en moins porteurs. De nouvelles industries à haute valeur technologique investissent le littoral au détriment des anciennes industries (pétrochimie-chimie notamment). En parallèle, le foncier rural est préservé autant que possible en vue de garantir le développement des productions agricoles destinées à améliorer l'autonomie alimentaire dans un contexte énergétique tendu.

Sur le littoral, en bordure de Rhône, dans le val de Durance (sud de Sisteron), c'est une agriculture d'entreprise qui s'est développé afin de fournir des marchés européens avec des productions très intensives ou de très haute qualité labellisée. Dans l'arrière-pays montagneux, l'agriculture **extensive de type agro pastorale** s'accompagne d'une activité de services **liés au tourisme et à la préservation des espaces patrimoniaux**. Sur les plateaux bordiers de la Durance (Forcalquier, Valensole, etc.), l'agriculture est essentiellement pilotée par les besoins **des grandes métropoles** du littoral et du sillon rhodanien. Les canaux d'irrigation sont fortement développés et modernisés et nourrissent l'ensemble du territoire. Tous sont sous pression (sauf Crau et Comtat).

Les communes alimentées par de l'eau du bassin Durance-Verdon comptent **6.1 millions d'habitants**, principalement situés dans les grands pôles urbains du littoral (Marseille, Toulon, etc.) et en basse vallée du Rhône (Avignon). **Les zones urbaines se sont densifiées** permettant ainsi de fortement diminuer les **dynamiques de périurbanisation** et de mitage observés dans les années 2000. Le **tourisme** est très présent sur le territoire avec une population touristique équivalent à 530 000 habitants sur l'année, concentrée à près de 95% sur le littoral et sur la période juillet et août (40% du tourisme annuel), malgré un transfert sensible vers l'arrière-pays.

L'eau est considérée comme une ressource vitale pour le développement économique et humain du territoire. Elle est prélevée sans véritable considération environnementale. Des canaux venant du Rhône irriguent massivement l'ouest. De nouveaux canaux se sont développés et sécurisent tout l'est du littoral jusqu'à Antibes.

La consommation en eau potable par ménage a progressivement diminué. Le prix de l'eau a en effet augmenté du fait de nouvelles infrastructures (extension des réseaux) permettant d'atteindre un rendement élevé sur la partie « littorale » (> 85%). Les barrages réservent toujours une côte estivale au tourisme et des lâchers d'eau plus importants pour l'eau vive.

Variables	Scénario actuel	Scénario Spécialisation
Perception des ressources	Abondante	Rare
Perception de la ressource en eau	Entre développement et environnement	Une ressource qui doit s'adapter aux demandes du développement
Politique de la ressource en eau	Adaptation de la ressource à un prix raisonnable	Adaptation de la ressource à tout prix
Politique sur l'origine de l'eau sur la partie littorale	Sécurisation par transferts d'eau selon un ratio cout/bénéfices	Sécurisation par transferts dans tous les cas
Population globale sur les cantons « irrigués » par Durance Verdon	4,7 millions	6,1 millions d'habitants
Spatialisation de la population	89% sur le littoral et basse Durance	95% sur le littoral et basse Durance
Mode d'urbanisation	Tendance à la métropolisation par extension des périphéries, étalement urbain	Densification du littoral et des périphéries des métropoles, préservation foncier agricole restant
Population touristique sur la zone irriguée	345 000/an	530 000/an avec « léger » transfert vers l'arrière-pays
Rendement des canaux	60% en rural 70 à 80% sur le littoral urbain	Pas de changement sur le rural 85 à 90% sur le littoral urbain
Consommation unitaire	181m ³ /men/an	Egale à aujourd'hui
Prélèvement AEP sur Bassin Durance Verdon	138 Mm ³	Résultat de la quantification AEP : A priori en baisse (prix + rendement)
Prix de l'eau	Elevé en milieu urbain, bas en zone rural, en augmentation globale	Très élevé et saisonnalisé sur le « littoral », subventionné sur le rural
SAU irriguée	78 000 ha	Résultat de la quantification Irrigation : A priori en hausse
Irrigation et canaux	Forte proportion de gravitaire	Extension du sous-pression + nouveaux cantons irrigués sur le littoral + alimentation partielle par le Rhône
Demande Agricole en eau	445 Mm ³	Résultat de la quantification Irrigation
Prélèvements des canaux	890 Mm ³	En baisse importante
Industrie	Berre et Durance actuelle	Déclin sur industrie de main d'œuvre (pétrochimie-chimie), Remplacement coulée ENR
Canons à neige	--	90% des domaines skiables
Eaux Vives	Important, convention de lâchers d'eau	Activité qui double, augmentation des lâchers de barrages
Balnéaire lacustre	Important, constitution de côtes touristiques	En forte augmentation, maintien des côtes touristiques

Scénario Investissement

Investissement et divertissement

Synthèse du scénario

Le contexte politique et financier est favorable à un « **développement maximum** ». L'exploitation du gaz de schiste ailleurs dans le monde entraîne une baisse du prix de l'énergie permettant une **croissance forte** mais déséquilibrée. La question environnementale n'est pas au premier plan et reste étudiée au cas par cas. Dans ce contexte, une dynamique de **ré-industrialisations** est en cours en Europe. Dans le secteur de l'agroalimentaire, les normes de qualité et de sûreté sur l'ensemble de la filière induisent une forme de protectionnisme ainsi qu'un certain nombre de contraintes sur les acteurs des filières dans la région. La décentralisation des pouvoirs vers l'échelon local donne une place majeure aux intercommunalités et à la Région. Cette dernière donne la **priorité au rayonnement et au développement régional**.

Le dynamisme de la région attire une population importante (+2,2 millions) à destination du croissant littoral et du val de Durance entraînant une densification des pôles urbains (6,9 millions d'habitant). La tarification de l'eau reste peu élevée, linéaire, favorisant ainsi la consommation (arrosage des espaces verts, piscines privées, etc.). La ressource Durance-Verdon est particulièrement sollicitée. Le Rhône est également mis à contribution pour la partie Est du territoire.

L'offre touristique est enrichie : des grands parcs d'attraction aux sports en eaux vives en passant par des stations de ski recherchées (équipées de canons à neige) permettent d'étendre l'offre et entraînent une forte hausse de la fréquentation (+20%).

La hausse de la demande d'énergie et l'évolution des technologies contribuent à une meilleure exploitation de l'hydroélectricité.

L'agriculture est reléguée au dernier plan derrière le tertiaire, le tourisme et l'industrie. L'étalement urbain non contrôlé se poursuit en l'absence de contrainte énergétique ou environnementale fort. Le prix du foncier agricole continue de croître du fait de la concurrence avec l'urbanisation et pénalise les installations. Dans les zones éloignées des aires urbaines, quelques exploitations régionales continuent à produire à des prix compétitifs tout en faisant face à une double contrainte : réduire l'usage des phytosanitaires et assurer un volume de production de « qualité industrielle ».

Les cultures céréalières voient leur part relative augmenter en raison de la demande croissante en aliments à base de céréales complètes. Au contraire, la production de viande diminue ainsi que les surfaces en prairie et surfaces toujours en herbe au profit de l'urbanisation et du maraîchage. De manière générale, **la plupart des surfaces irrigables actuelles sont urbanisées**. Seul le foin de Crau conserve sa place dans l'assolement irrigué. Une grande partie des canaux d'irrigation passe « sous-pression » de façon à pouvoir alimenter partiellement l'usage urbain.

Variables	Situation actuelle	Scénario Investissement
Perception des ressources	Abondante	Abondante
Perception de la ressource en eau	Entre développement et environnement	Ressource support pour le développement
Politique de la ressource en eau	Adaptation de la ressource à un prix raisonnable	Aménagement de la ressource (canaux), Satisfaction des demandes
Politique sur l'origine de l'eau sur la partie littorale	Sécurisation par transferts d'eau selon un ratio cout/bénéfices	Sécurisation par transfert comme principe structurant
Population globale sur les cantons «irrigués » par Durance Verdon	4,7 millions	6,9 millions
Spatialisation de la population	89% sur le littoral et basse Durance	Augmentation littoral, basse et val de Durance
Mode d'urbanisation	Tendance à la métropolisation par extension des périphéries, étalement urbain	Etalement, mitage
Rendement des canaux (données quantifiées a posteriori)	60% en rural 70 à 80% sur le littoral urbain	Entre 60 et 70% dans le rural, au-delà 80% sur le littoral
Consommation unitaire	181 m ³ /men/an	En forte augmentation
Prélèvement AEP sur le bassin Durance Verdon	138 Mm ³	Résultat de la quantification AEP : A priori en augmentation
Prix de l'eau	Elevé en milieux urbain, bas en zone rural, en augmentation globale	Peu élevée, linéaire
SAU irriguée	78 000 ha	Résultat de la quantification Irrigation : A priori en baisse
Irrigation et canaux	Forte proportion de gravitaire	Passage à l'aspersion sauf pour la Crau
Prélèvement agricole demandés	445 Mm ³	Résultat de la quantification Irrigation : A priori en baisse
Prélèvements des canaux	890 Mm ³	A priori en baisse
Industrie	Berre et Durance actuelle	Politique de maintien de l'industrie sur Berre et Durance, process de la consommation
Demande en eau industrielle	60 Mm ³	En légère baisse
Canons à neige	--	Quasi totalité des pistes équipées
Eaux Vives	Important, convention de lâchers d'eau	Très Important, convention de lâchers d'eau qui augmentent
Balnéaire lacustre	Important, constitution de côtes touristiques	Très important, côte touristique toujours à l'œuvre

Scénario *Crise*

Crise et développement réduit au minimum

Synthèse du scénario

L'économie mondiale s'est enfoncée dans une **crise** profonde qui dure. Les ex-pays émergents ont atteint les limites de leur modèle de croissance. Des stratégies de repli et de défense des intérêts de base entraînent des **troubles géopolitiques** persistants et des tensions sur les marchés du pétrole. Le **coût des énergies est durablement élevé**. Le poids économique de l'Europe est en recul et ses **dépenses publiques** sont sérieusement **amputées**. De l'ancienne PAC ne subsiste plus que de maigres subventions. Une crise politique a entraîné la « délégitimation » du rôle des institutions à tous les niveaux (européens, national et régional). On voit ainsi émerger des initiatives locales. **L'attractivité de la région a décliné et le moteur touristique est en panne**, largement contraint par le coût des déplacements.

Dans ce contexte, la demande s'oriente sur les produits de base peu transformés. Les exploitations cherchent l'autonomie énergétique. **Les surfaces cultivées sont divisées par deux**. En parallèle des exploitations professionnelles, **une agriculture de subsistance** s'est développée dans les zones périurbaines. Les surfaces maraîchères, l'arboricoles et viticoles ont quasiment réduit de moitié. Concernant les grandes cultures, seules les exploitations de plus de 50 ha se maintiennent. Les surfaces de Céréales et Oléo-Protéagineux ont réduit de 30 à 50%. Les surfaces de pommes de terre sont les seules à augmenter.

En montagne, la moitié des exploitations a disparu. La majorité des exploitations ont cherché des compléments de revenu, notamment dans la production d'énergie renouvelable. En raison du coût et des difficultés d'entretien des réseaux, les surfaces irrigables sont en net recul.

L'attractivité du territoire a fortement baissé et s'est traduite par **un solde migratoire négatif** pour les jeunes actifs à partir de 2020 ainsi que pour les retraités qui ne bénéficient plus des mêmes niveaux de retraite. Les territoires de périphérie des zones productives sont rapidement touchés. Sur le littoral, on assiste à un **vieillessement de la population**.

La perte d'attractivité de la région, le déclin démographique et les restrictions sur la mobilité pénalisent les services de proximité et de consommation intermédiaire et finale.

Malgré la forte **chute de la fréquentation touristique (-30%)**, les services touristiques et résidentiels se maintiennent autour de quelques bassins et des grandes villes. Les flux intercontinentaux sont quasiment inexistants et une offre concurrentielle hors de la région se développe. Les stations de ski n'ont plus les moyens d'entretenir les équipements d'enneigement. Le tourisme balnéaire et de bord de lac est en difficulté.

La **demande énergétique locale a chuté**. La production d'énergie est similaire à celle produite en 2015, mais on voit le développement complémentaire d'une multitude de projets valorisant le potentiel local d'énergie renouvelable. Les infrastructures de grandes adductions peinent à être entretenues et les réseaux se dégradent. La production d'eau domestique est subventionnée publiquement. Les consommations unitaires par ménage sont stables.

Variables	Situation actuelle	Scénario Crise
Politique de la ressource en eau	Adaptation de la ressource à un prix raisonnable	Manque de moyens, politique de subsistance
Politique sur l'origine de l'eau sur la partie littorale	Sécurisation par transferts d'eau selon un ratio cout/bénéfices	Tentative du maintien de l'existant, sécurisation par les ressources locales
Population globale « irrigués » par Durance Verdon	4,7 millions	3,3 millions
Mode d'urbanisation	Tendance à la métropolisation par extension des périphéries, étalement urbain	Friches urbaines et industrielles
Rendement des canaux	60% en rural 70 à 80% sur le littoral urbain	Baisse entre 5 et 10 points due l'impact économique
Consommation unitaire	181 m ³ /men/an	Résultat de la quantification AEP : a priori en baisse (revenus)
Prélèvement AEP sur système Durance Verdon	138 Mm ³	Résultat de la quantification AEP : a priori en baisse (population et revenus)
Prix de l'eau	Elevé en milieux urbain, bas en zone rural, en augmentation globale	Bas, voire en baisse, linéaire
SAU irriguée	78 000 ha	Résultat de la quantification Irrigation : a priori en baisse (canaux)
Irrigation et canaux	Forte proportion de gravitaire	Disparition des canaux les moins rentables, toujours en gravitaire,
Demande Agricole en eau	445 Mm ³	Résultat de la quantification Irrigation : A priori en baisse (canaux)
Prélèvements des canaux	890 Mm ³	En baisse
Industrie	Berre et Durance actuelle	Déclin des filières les plus faibles
Demande en eau industrielle	63 Mm ³	En forte baisse
Canons à neige	--	Baisse du taux d'équipement
Eaux Vives	Important, convention de lâchers d'eau	En baisse forte, fin des conventions
Balnéaire lacustre	Important, constitution de côtes touristiques	En baisse forte, maintien de la côte touristique

Scénario *Ecologie*

Ecologie urbaine et territoriale

Synthèse du scénario

Suite à plusieurs catastrophes naturelles et industrielles majeures, la société dans son ensemble prend progressivement conscience de la **nécessité d'entrer dans une logique de croissance durable**. L'amélioration de la qualité de vie de la population mondiale est désormais l'objectif recherché à tous les niveaux. La préservation de l'environnement et des ressources naturelles ainsi que la réduction des émissions des gaz à effet de serre deviennent des priorités non négociables pour l'ensemble des pays. La raréfaction des énergies fossiles entraîne des **tensions sur les prix de l'énergie**. Cette volonté d'entrer dans une société durable passe par la mise en place de normes imposant des standards de haute qualité. La production agricole européenne est tournée vers le marché intérieur. Malgré la dégradation du cadre de vie (hausse des températures, du prix de l'énergie et de la densité de population en bord de mer), PACA voit émerger une expertise dans « l'ingénierie de l'écologie » et dans « l'amélioration du cadre de vie » grâce aux politiques volontaristes de la région. La lutte contre l'étalement urbain est un enjeu de premier ordre et se concrétise par une politique de densification des centres urbains.

Malgré les évolutions climatiques, la région continue à attirer des migrants. En 2050, la population du territoire atteint 4,8 millions d'habitants. La « spatialisation » est largement guidée par la prise de conscience écologique (logiques de déplacement de courtes distances, densification des centres, etc.). La politique des prix sur le territoire vise à l'incitativité maximale à la réduction de la consommation. On cherche à améliorer les rendements de réseaux au maximum et la priorité est donnée aux ressources locales.

Le domaine agro-alimentaire est très structuré par l'orientation « croissance verte ». Les filières s'orientent désormais vers les demandes plus régionales. On voit sur le territoire un éventail de modèles d'exploitation pouvant combiner haute productivité à des productions sous label de qualité. **Le foncier agricole est préservé** et s'étend même par endroits. Autour des grandes villes, des « parcs agricoles » ont vu le jour. Les productions agricoles sont toujours diversifiées, mais les itinéraires techniques se sont adaptés aux nouvelles contraintes environnementales.

La consommation énergétique est centrée sur la sobriété, l'efficacité et la minimisation. Le potentiel de production d'énergies renouvelables du territoire est utilisé. La production d'hydroélectricité est particulièrement recherchée. L'orientation « verte » impacte également l'économie. Les prix de l'énergie tendus induisent une baisse de la fréquentation de la clientèle internationale. Sur le littoral, on observe un baisse de près de 10% de la population touristique. En parallèle, la promotion d'un tourisme vert axé sur le terroir et l'authenticité a favorisé le développement de la fréquentation en montagne et dans l'arrière-pays, tant en hiver qu'en été.

Variables	Situation actuelle	Scénario Ecologie
Perception des ressources	Abondante	Rare
Perception de la ressource en eau	Entre développement et environnement	Environnement prioritaire
Politique de la ressource en eau	Adaptation de la ressource à un prix raisonnable	Incitativité maximale à la réduction de la consommation
Politique sur l'origine de l'eau sur la partie littorale	Sécurisation par transfert d'eau selon un ratio cout/bénéfices	Ressources locales prioritaires
Population globale sur les cantons «irrigués» par Durance Verdon	4,7 millions	4,8 millions
Spatialisation de la population	89% sur le littoral et basse Durance	70% sur le littoral et basse Durance
Mode d'urbanisation	Tendance à la métropolisation par extension des périphéries, étalement urbain	Lutte contre l'étalement urbain, politique de densification des centres urbains
Rendement des canaux	60% en rural 70 à 80% sur le littoral urbain	80% rural, 90% littoral urbain
Consommation unitaire	181 m ³ /men/an	Résultat de la quantification AEP : a priori en baisse (prix)
Prélèvement AEP sur système Durance Verdon	138 Mm ³	Résultat de la quantification AEP : a priori en baisse (prix + rendement)
Prix de l'eau	Elevé en milieu urbain, bas en zone rural, en augmentation globale	Tarification croissante et saisonnée. « L'eau paye l'eau »
SAU irriguée	78 000 ha	Résultat de la quantification Irrigation : a priori en hausse (sauvegarde foncière)
Prélèvement agricole en eau	445 Mm ³	Résultat de la quantification Irrigation
Rendement et itinéraire technique des canaux	Forte proportion de gravitaire	Sous-pression majoritaire. Canaux gravitaires patrimoniaux
Prélèvements des canaux	890 Mm ³	En baisse importante
Eaux Vives	Important, convention de lâchers d'eau	
Balnéaire lacustre	Important, constitution de cotes touristiques	Cotes touristiques de 14 semaines/an

IX. Les besoins en eau du territoire en 2050

1. Besoins en irrigation en 2050 – demande unitaire

L'exercice de comparaison des quatre modèles d'estimation des besoins en irrigation des neuf cultures sur l'historique 1980-2009 a été poursuivi. L'incertitude liée aux scénarios de changement climatiques a été intégrée sur la base des dix scénarios régionalisés parmi les 3300 disponibles. La Figure 84 illustre les différences entre les moyennes interannuelles de précipitations P , d'évapotranspiration de référence ET_0 , de bilan hydrique $P-ET_0$ et de besoins en eau d'irrigation calculées entre la période FUT (2036-2065) et PST (1980-2009). Les boîtes à moustache traduisent la distribution liée aux dix scénarios climatiques.

Nous constatons que :

- bien que les quatre modèles fournissent des besoins en irrigation en temps présent assez différentes, leurs estimations des variations entre présent et futur sont beaucoup plus cohérentes (pour SiSPAT, FIVE-CoRE et MODIC_CF) ;
- bien que les estimations de MODIC_CF et MODIC_DJ soient proches en temps présent, MODIC_DJ suggère un accroissement de l'irrigation beaucoup plus faible que MODIC_CF, voire, pour certaines cultures, une diminution. Ceci est lié à des différences dans la phénologie des plantes qui est simulée par MODIC_DJ : le cycle végétatif démarre plus précocement et dure moins longtemps (Braud *et al.*, 2014a).

L'impact de la prise en compte des évolutions de phénologie sous changement climatique, ainsi que l'impact de l'effet anti-transpirant lié à l'augmentation du CO_2 (*e.g.* Calvet *et al.*, 2008) ont été approfondis en exploitant, avec SiSPAT, deux types de simulations disponibles pour le maïs, issues de modèles simulant la croissance de la végétation. Les premières simulations proviennent du projet CLIMATOR (Brisson et Levraut, 2010) pour le climat d'Avignon. Elles ont fourni des séries de LAI, hauteur de végétation et profondeur racinaire, calculées avec le modèle de végétation STICS (Brisson *et al.*, 2008) et le climat associé (les projections climatiques utilisées dans CLIMATOR étaient différentes de celles de R²D² 2050). Les secondes simulations ont été réalisées avec le modèle ISBA-Ags incluant un module de calcul de l'irrigation (Calvet *et al.*, 2008), qui permet de déterminer l'évolution du LAI et prend en compte les rétroactions avec le CO_2 dans le calcul de la résistance stomatique. Ce modèle calcule aussi les besoins en irrigation. Il a été utilisé avec les 10 scénarios de données climatiques du projet R²D² 2050. Les LAI simulés par ISBA-Ags ont aussi été utilisés en entrée de SiSPAT pour les 10 scénarios et les résultats comparés. Ces analyses, détaillées dans Braud *et al.* (2014a) confirment l'importance de prendre en compte l'évolution de la phénologie de la végétation dans un contexte de changement climatique. La prise en compte de l'effet anti-transpirant du CO_2 a aussi un impact notable. Les deux effets tendent à limiter l'accroissement des besoins en irrigation sous changement climatique. Les simulations réalisées avec MODIC_DJ seraient donc les plus représentatives de l'ensemble des processus mis en jeu. A noter cependant que, dans le calcul de l' ET_0 réalisé dans R²D² 2050, la diminution d' ET_0 induite par l'augmentation du CO_2 n'a pas été prise en compte, comme elle l'a été, de manière simple, dans les simulations du projet CLIMATOR (Oliosio *et al.*, 2010).

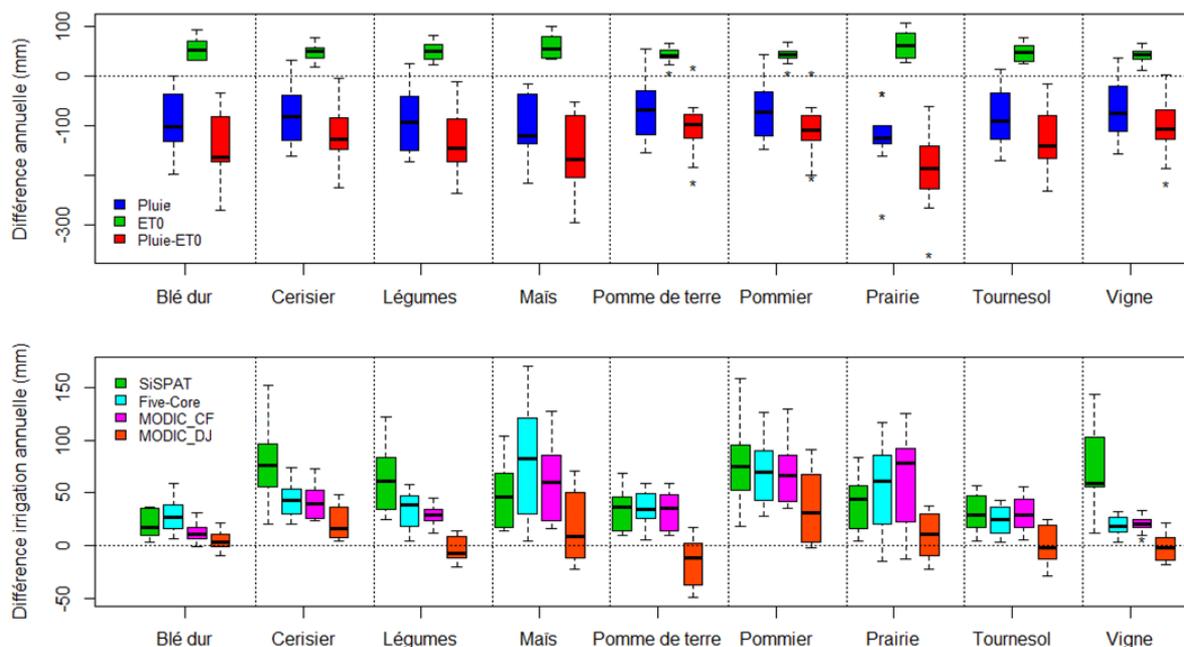


Figure 84 : Boxplots des changements (période 2035-2065 – période 1980-2009) de précipitations P , d'évapotranspiration de référence ET_0 et de bilan hydrique $P-ET_0$ pour les neuf cantons associés aux neuf cultures (en haut) ; boîte à moustache des changements en irrigation estimés par les quatre modèles et les 9 cultures (en bas). Dans tous les cas, les boxplots sont calculés avec les résultats des 10 scénarios climatiques. Ils fournissent la médiane (trait horizontal gras) et les quantiles 25 et 75%. Les pointillés marquent l'intervalle à 95%

Pour conclure, l'exercice de comparaison mené, pour neuf cultures typiques de la zone d'étude, sur les modèles calculant les besoins en irrigation montre qu'une grande incertitude reste associée à cette modélisation en temps présent et dans le contexte d'évolution climatique. Selon les options de modélisation, en particulier la prise en compte ou non de l'évolution de la phénologie des cultures induite par le changement climatique, les estimations des évolutions des besoins en irrigation en contexte de changement climatique peuvent être assez différentes. Il apparaît aussi important de prendre en compte les incertitudes sur les projections climatiques car ces incertitudes – non négligeables - induisent une grande variabilité dans les estimations.

2. Besoins en irrigation en 2050 – demande globale

L'estimation de la demande agricole à l'échelle régionale a été réalisée sur les concessions SCP avec FIVE-CoRe et sur l'ensemble du territoire alimenté par le système Durance-Verdon avec MODIC. Elle repose sur l'estimation des surfaces irriguées issue d'un chiffrage des quatre scénarios littéraires et des valeurs extrapolées des évolutions récentes pour le scénario *Tendanciel*.

Evolution des assolements et des pratiques d'irrigation

Le point de départ de la quantification est l'établissement d'une typologie basée sur l'état de l'agriculture régionale en 2010 qui croise les principaux systèmes de cultures irriguées et le taux d'irrigation, la surface agricole par type de culture, l'occupation humaine des sols (pression démographique et urbaine en 2010) et les principales caractéristiques physiques et climatiques locales. De fait, on identifie assez bien plusieurs grandes zones présentant une identité culturelle spécifique (type d'exploitation et de culture et niveau d'irrigation) et un niveau de pression urbaine. Les principales unités retenues sont les suivantes :

- zones montagneuses peu influencées par la pression urbaine, sauf localement à proximité des grandes retenues et des stations de ski, où prédominent des surfaces en herbe et des cultures fourragères peu irriguées ;
- sur la zone littorale, cultures floristiques et à un degré moindre maraîchage sous serre et viticulture (Var), fortement irriguées et soumis à une intensification de l'activité touristique et de la pression urbaine ;
- sur les plaines de la Crau et de la Camargue, prédominance des surfaces en cultures fourragères et céréales, fortement irriguées (sauf blé dur) sur fond d'extension urbaine ;
- sur les plateaux bordiers de Valensole et de Forcalquier, cultures industrielles (PAPAM) associées à des cultures de blé dur et à un degré moindre d'oléagineux avec un développement récent de l'irrigation, sous contrainte modérée et localisée de l'urbanisation ;

- sur la diagonale Tricastin, versant du Lubéron, coteaux varois et massif des Maures, viticulture et arboriculture irriguées soumises à une forte pression urbaine sur le Comtat Venaissin et le bord du littoral ;
- sur la vallée et les plaines irriguées de l'axe durancien, prédominance des vergers en association avec des céréales et des oléagineux.

Les scénarios sont interprétés en termes de contraintes et d'environnements spatiaux propices à la réalisation des processus caractérisant l'évolution des assolements et des modes d'irrigation. Le travail de quantification est effectué à l'échelle des cantons sur la base des hypothèses contenues dans les scénarios (voir ci-dessous), de l'historique d'évolution des assolements irrigués entre 1978 et 2010 (RGA 1978 – 1989 – 2000 et 2010) et de l'évolution récente des réseaux d'irrigation. Les principaux éléments de quantification des besoins / prélèvements en eau sont repris ci-dessous.

De façon générale, les scénarios n'induisent pas de rupture car les principales caractéristiques agricoles locales et régionales n'ont pas été fondamentalement remises en question : diversité des types de culture du fait de la variété du relief et du climat de la région, prédominance des cultures spécialisées et intensives par rapport aux grandes cultures céréalières et à l'élevage et spécialisation des géo terroirs en termes d'importance des terres agricoles, d'orientation technico-économique des exploitations et de systèmes agricoles. De fait, les évolutions portent essentiellement sur une redistribution des types de cultures prédominants au profit d'autres types avec parfois la réémergence de cultures majoritaires dans les années 80 et plus ou moins délaissées depuis. De même, les scénarios induisent des irrigations plus ou moins ciblées sur certaines cultures (viticulture, blé dur...).

Aucun des scénarios n'assume l'hypothèse d'une disparition complète à l'horizon 2050 du mode d'irrigation gravitaire, ceci pour plusieurs raisons :

1. l'objectif serait, pour certains territoires, très difficile à tenir techniquement et économiquement et très peu acceptable du point de vue social et environnemental ;
2. en Moyenne et Basse Durance et dans la vallée du Rhône, l'aspersion reste possible pour les grandes cultures mais est peu efficace du fait des conditions pédoclimatiques ;
3. surtout, l'irrigation gravitaire est essentielle au fonctionnement de la nappe de Crau (celle-ci contribue à 60% à la recharge de la nappe, les eaux de pluie à 30% et les autres apports à 10%). Sans ces apports, la nappe ne serait plus en mesure d'assurer l'alimentation en AEP des communes et de certaines industries du pourtour de l'Etang de Berre et du Golfe de Fos ainsi que le maintien de la biodiversité sur tout le territoire.

Aussi, pour les surfaces irriguées situées dans les plaines alluviales de la basse Durance et du bas-Rhône, l'hypothèse d'une transition vers un mode d'irrigation non gravitaire est envisagé seulement pour les cultures pour lesquelles l'utilisation de la micro-irrigation reste techniquement et économiquement possible. A l'inverse, le développement et la généralisation des modes d'irrigation par aspersion et micro irrigation sont envisagés sur les contreforts montagneux des Alpes, les plateaux bordiers de la Durance et les pentes du Lubéron.

Les principaux éléments des scénarios qui sous-tendent la quantification des besoins / prélèvements en eau d'irrigation sont repris ci-dessous.

Scénario Tendancier

Pas de rupture par rapport à l'évolution récente des assolements. Poursuite des dynamiques en cours. Le mode d'irrigation évolue peu à peu du gravitaire vers de l'aspersion et goutte-à-goutte pour les territoires et les cultures où ces modes d'irrigation sont actuellement utilisés. La modernisation des canaux traditionnels, pour limiter les prélèvements à la source, se fait à rythme plutôt lent. Pour le périmètre desservi par la Canal de Provence, les surfaces irriguées augmentent de 10% par rapport à 2010 du fait de la montée en puissance de réseaux nouveaux et de la fin d'aménagements en cours.

Scénario Spécialisation

La politique régionale, notamment en matière de maîtrise du foncier qui freine drastiquement le développement à outrance de la périurbanisation et de l'artificialisation, favorise le maintien d'une agriculture forte sur le territoire.

Activités : essentiellement productive même si une diversification vers les activités de services liés au tourisme ou/et à la préservation des paysages est possible notamment sur les territoires alpins et plateaux bordiers.

Caractéristiques : fonctionnelle et compétitive.

Marchés : régional et international (bassin méditerranéen).

Productions : essentiellement tournée vers les cultures emblématiques / stratégiques (foin de Crau, blé dur, PAPAM et olives) et dominantes (vins AOC, fruits et légumes).

Organisation : regroupement des exploitations et recours accru aux nouvelles technologies. Forte intégration dans les filières agroalimentaires (industries, grandes distribution, collectivités...).

Recours à l'irrigation : maintien des rendements et d'une qualité moyenne requise par les filières.

Evolution de l'irrigation : augmentation des surfaces irriguées (celles-ci augmentent plus que les surfaces cultivées) et extension vers les coteaux du Ventoux et du Lubéron ainsi que les plateaux bordiers de Valensole et Forcalquier. L'irrigation par aspersion se généralise sur l'ensemble du territoire sauf pour les systèmes fourragers et prairiaux et les grandes cultures des basses vallées de la Durance et du Rhône (arrosage par aspersion inadaptée aux conditions pédoclimatiques).

Réseaux d'irrigation : répond essentiellement aux besoins de l'agriculture et à un degré moindre de l'arrosage. Les ASA se regroupent en grande association pour moderniser les réseaux d'irrigation et préserver leur « rentabilité ». Pour autant, les grands canaux d'adduction de la Moyenne et Basse Durance se maintiennent sous leur forme actuelle même si une partie des réseaux d'irrigation à surface libre (canaux secondaires et filiales) qu'ils alimentent tend à être remplacée par des conduites sous pression du fait de la généralisation des modes d'irrigation par micro irrigation pour les cultures qui s'y prêtent et de l'augmentation de l'usage arrosage. L'extension des réseaux desservis par le Canal de Provence se poursuit et la pratique de l'irrigation se développe, permettant ainsi une augmentation de 37% des surfaces irriguées qui atteignent 22 400 ha.

Scénario Investissement

Le développement de l'agriculture n'est pas une priorité régionale face à la ré-industrialisation et au développement des services résidentiels et touristiques (loisir, tourisme, santé, aide à la personne...).

Activités : en déclin sur le littoral et des vallées du Rhône et de la Basse Durance du fait de l'intensification de la périurbanisation et du mitage.

Caractéristiques : qualité et sécurité alimentaire au service de la demande urbaine régionale.

Marchés : demandes locale et régionale, bassin méditerranéen pour certaines filières reconnues.

Productions : forte régression des surfaces cultivées sur les territoires fortement urbanisés du littoral, des plaines du Bas Rhône, du Comtat et de la Basse Durance. Sont principalement concernées les productions traditionnelles non dominantes (grandes cultures céréalières). Sur les zones fortement urbanisées du littoral et de la vallée du Rhône, seules l'horticulture maraîchère et la floriculture arrivent à se maintenir.

Organisation : arrêt de la concentration des exploitations, diminution du nombre d'exploitations agricoles.

Recours à l'irrigation : permet de maintenir la qualité des productions horticoles (maraîchage, arboriculture et floriculture) et viticoles (vins AOC et pays).

Evolution de l'irrigation : diminution globale des surfaces agricoles irriguées sous la pression urbaine remplacées en partie par des jardins domestiques irrigués.

Réseaux d'irrigation : tendance à la multifonctionnalité : arrosage, AEP, assainissement, tourisme. Les réseaux alimentés par le Canal de Provence subissent également cette baisse d'intérêt et les surfaces irriguées chaque année diminuent de 27% pour être ramenées à 12 000 ha.

Scénario Crise

Dans un marché fortement restreint, chaque territoire recherche une autosuffisance alimentaire. Le prix est l'élément prépondérant des choix alimentaires. La quasi disparition des aides à la production remplacées en partie par des soutiens de la part des collectivités locales, une demande plutôt atone en fruits et légumes frais et en produits laitiers et carnés, le renchérissement des intrants (engrais, nitrate...), l'augmentation des coûts d'accès aux technologies, en particulier aux nouvelles variétés végétales, à l'énergie et à l'eau, ont mis à mal l'agriculture régionale.

Activités : en déclin sur l'ensemble du territoire principalement sur l'arc Avignon, Aix, Marseille, Toulon, Nice,

Caractéristiques : production peu spécialisée pour répondre à une demande alimentaire en produits de base peu transformés, recours à des activités para agricoles permettant d'apporter un complément de revenu : activités artisanales, travaux à destination des collectivités locales ou des particuliers (entretiens des jardins et paysages...), voire production d'énergie pour des usages locaux.

Marchés : marchés locaux et régional, économie de proximité diversifiée, économie de subsistance. Peu de débouché en dehors de ces marchés du fait de la baisse de production et de la déspecialisation hormis quelques niches pour des productions très spécialisées et de renommée.

Productions : Coté grandes cultures, les grandes exploitations restées très spécialisées assurent une production de masse à faible valeur ajoutée à destination des marchés externes ou de la grande distribution. La plupart des autres exploitations ont misé sur une diversification de leur production en recherchant des complémentarités cultures – cultures.

Cultures maraichères sous abris et sous serres en fortes régression du fait de l'augmentation des coûts de production mais les productions de plein champ se maintiennent à proximité des agglomérations et métropoles.

Forte diminution des productions arboricoles, notamment pour les productions à coût élevé (cerise, pêche, Reine Claude...) dans les premières années de crise puis stabilisation de fait de la baisse de la concurrence des productions étrangère et interrégionale.

Baisse considérable de la production de raisins de cuve quel que soit le type de vin, conséquence de la diminution de la demande et de l'évolution des modes de consommation, même si les coûts de transport ont atténué en partie la concurrence des vins du « nouveau monde ». Diminution particulièrement sensible dans les Bouches-du-Rhône et le Vaucluse (Côte du Rhône, Lubéron, Ventoux,...), légèrement moins dans le Var du fait de la part importante de production de rosé.

Agriculture de montagne en forte déprise.

Organisation : d'un côté groupements de producteurs et association et à l'inverse multiplication des petites exploitations de subsistance et semi subsistance.

Recours à l'irrigation : avec parcimonie du fait des coûts élevés et réservé aux productions très spécialisés.

Evolution de l'irrigation : diminution globale des superficies agricoles irriguées,

Réseaux d'irrigation : disparition des petits canaux laissés à l'abandon dans les zones montagne et de piémont ainsi que dans les zones sous influence urbaine. Les surfaces encore irriguées sur les réseaux alimentés par le Canal de Provence ne concernent plus que le maraichage et se réduisent à 9 000 ha, soit une baisse de 44% par rapport à 2010.

Scénario Ecologie

Dans un contexte où les échanges de produits alimentaires sont moins importants du fait des coûts de transport important, les territoires locaux recherchent avant tout la sécurité alimentaire. Les consommateurs sont devenus très sensibles à la qualité des produits ainsi qu'à la préservation de l'environnement et du bien-être animal. Les politiques de soutien s'accompagnent d'un durcissement des politiques environnementales et d'une législation stricte sur la production agricole qui comprend notamment des taxes et quotas sur les intrants. La production de protéagineux, dont les atouts sur les plans économique, agronomique, environnemental et nutritionnel sont reconnus, est fortement subventionnée.

Activités : essentiellement productives mais à faible impact climatique et environnemental. Cette activité s'accompagne souvent d'activités secondaires dans le cadre de projets de territoire : accueil, services ruraux, services environnementaux, recyclage des déchets pour la production de bioénergie à utilisation locale... L'activité agro pastorale traditionnelle est présente dans les zones montagneuses où elle permet de maintenir la diversité et la richesse des milieux naturels mais aussi dans la plaine de la Crau et de la Camargue reflétant là une activité de transhumance très dynamique.

Caractéristiques : modèles de cultures moins intensives, plus grande autonomie des exploitations vis à vis des intrants, de l'énergie et des ressources, recherche de complémentarités cultures / cultures et cultures / élevages à l'échelle de l'exploitation ou entre exploitations voisines, recours accru aux systèmes herbagés (foin) plutôt qu'aux systèmes maïs/fourrages...

Marchés : production agricole avant tout orientée vers le marché local/régional, seules les productions excédentaires et/ou de niche s'échangent sur le marché national et européen.

Productions : diversifiées du fait de la variété importante des géo terroirs, mais généralisation des cultures fixatrices d'azote (utilisation de légumineuses, tels que pois, sainfoin, comme cultures de rotation), recours plus important au semis direct, utilisation de variétés plus adaptées aux caractéristiques pédoclimatiques locales. Le blé dur reste une culture importante concentrée sur les plaines du Bas-Rhône et les plateaux bordiers de la Moyenne Durance où elles côtoient celles de lavande et de lavandin, mais cette culture est de plus en plus intégrée dans des rotations longues. La viticulture, l'arboriculture et l'horticulture constituent toujours les principaux systèmes agricoles de la région.

Organisation : nombreuses formes d'exploitations agricoles allant de la grande entreprise à fort niveau de productivité, capables de se positionner sur les marchés régionaux (Espagne, Maghreb...) avec des

productions de qualité et/ou de niche, aux exploitations de taille plus modeste, pouvant combiner production sous label de qualité, production de 1^{ère} et 2^{ème} transformation et/ou vente directe et commercialisation sur des marchés locaux.

Recours à l'irrigation : plus utilisée pour maintenir la qualité des productions, notamment horticoles (maraîchage, arboriculture et floriculture) et viticoles (vins AOC et pays) que pour obtenir un rendement maximal. Le niveau de production est surtout assuré par la stabilité et l'augmentation des surfaces de cultures.

Evolution de l'irrigation : tout est mis en œuvre pour préserver et économiser la ressource. Amélioration des performances des réseaux d'irrigation qu'ils soient sous pression ou gravitaire, optimisation des itinéraires techniques d'irrigation (utilisation de tensiomètre et de modèle analytique permettant d'évaluer les paramètres d'arrosage optimaux) afin de limiter les stagnations d'eau et les pertes.

Réseaux d'irrigation : même si l'irrigation reste l'usage principal, les réseaux tendent à devenir multifonctionnels. En dehors des usages AEP et industrie, les canaux servent aussi aux usages récréatifs (promenade, VTT, pêche...), à la réalimentation de la nappe phréatique (celle-ci permet de sécuriser les ressources en eau potable), à l'assainissement pluvial et à lutte contre les inondations ou encore à la mise en valeur du patrimoine culturel et historique que constituent certains ouvrages remarquables. Les réseaux alimentés par la Canal de Provence s'étendent à un rythme accéléré et le recours à l'irrigation se développe avec une nette amélioration des performances.

Evolution des surfaces irriguées

La Figure 85 présente l'évolution de la surface totale irriguée à partir des eaux du bassin hydrographique Durance-Verdon selon les scénarios. La Figure 86 et la Figure 87 montrent respectivement les surfaces irriguées par type de culture et par bassin. Les bassins Lubéron, amont Mallemort et aval Mallemort constituent l'ensemble des territoires desservis par les eaux de la Basse Durance (points de prélèvement situés en aval du barrage de Cadarache).

Pour le scénario *Tendanciel*, l'ensemble des surfaces irriguées par le bassin hydrographique Durance-Verdon représente un peu moins de 70 000 ha, soit une baisse de 12% par rapport à la période 2010. Le scénario opte pour une stabilisation de la baisse des surfaces irriguées, soit un taux de décroissance annuelle moyen de 0.3% identique à celui constaté durant la période 1979-2010. Il n'a pas retenu une option de décroissance accélérée telle qu'observée durant la période 2000-2010. Durant cette dernière période, les surfaces irriguées avaient diminué de 9%, soit un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de -0.7%. Dans la continuité de la dynamique observée ces dernières années, les surfaces irriguées diminuent pour l'arboriculture, le maraîchage et les pommes de terre (près de 40%) alors qu'elles augmentent nettement pour la viticulture (plus de 50%) et à un degré moindre pour les oléagineux (40%) et le blé dur (20%).

Dans la logique des scénarios, les surfaces irriguées augmentent pour les scénarios *Spécialisation* et *Ecologie* et diminuent pour les deux autres, *Crise* et *Investissement*.

Le scénario *Spécialisation* aboutit à une SAU irriguée de plus de 100 000 ha, soit une surface bien plus importante que celle des années 1980 (environ 86 000 ha). La croissance par rapport à l'année 2010 est de 40% (TCAM de 0.8%). Les surfaces irriguées augmentent pour l'ensemble des cultures mais plus fortement, plus de 40%, pour les productions traditionnelles dominantes, maraîchage, arboriculture et viticulture (près de 80%) et stratégiques (horticultures et PAPAM) ainsi que pour le blé dur. L'augmentation est plus nuancée pour les autres types de cultures, entre 20 et 25%.

La superficie irriguée obtenue pour le scénario *Ecologie* est de 94 000 ha. La hausse de 20% (TCAM de 0.45%) est deux fois moins importante que celle du scénario précédent. L'augmentation porte principalement sur les productions dominantes (maraîchage, arboriculture et viticulture), entre 30 et 50%. Du fait, d'un scénario axé sur le développement des rotations longues, les surfaces irriguées de protéagineux (sainfoin, luzerne, lentilles, pois protéagineux..) sont en forte augmentation, près de 80%, alors que celles des autres céréales sont en baisse, fortement pour le maïs et plus modérément pour les oléagineux. Néanmoins, les surfaces de blé dur irrigué, mis en place tous les deux ans dans la rotation chez de nombreux agriculteurs, représentent toujours 50% de l'assolement et continuent de croître mais à un rythme moins soutenu.

Le scénario *Crise* induit une diminution de la SAU irriguée de près de 30%. En 2050, la surface irriguée n'est plus que de 56000 ha. Avec une décroissance annuelle de 0.8% sur la période 2050-2010, la dynamique de

disparition des surfaces irriguées est similaire à celle observée sur la période 2000-2010. Les surfaces diminuent pour l'ensemble des cultures, sauf en ce qui concerne les protéagineux, modérément pour la viticulture, les plantes sarclés (pomme de terre), les légumes et les prairies - fourrages et plus fortement pour les autres cultures.

Le scénario *Investissement* envisage une surface irriguée intermédiaire, entre *Crise* et *Ecologie*, d'environ 70000 ha, soit une baisse de 10% par rapport à l'année 2010. Toutefois, la décroissance annuelle est moins importante que celle du scénario tendanciel (TCAM de -0.2%). Les céréales, maïs et oléagineux, l'arboriculture, les plantes sarclées voient leurs surfaces irriguées diminuer sensiblement, de 17% pour le maïs à plus de 50% pour les plantes sarclées. Pour les autres cultures, la baisse est relativement modérée. Les surfaces irriguées de vigne augmentent toujours mais très faiblement (6%). Celles des protéagineux croient de 25% mais pour cette culture, les surfaces en jeu sont peu importantes.

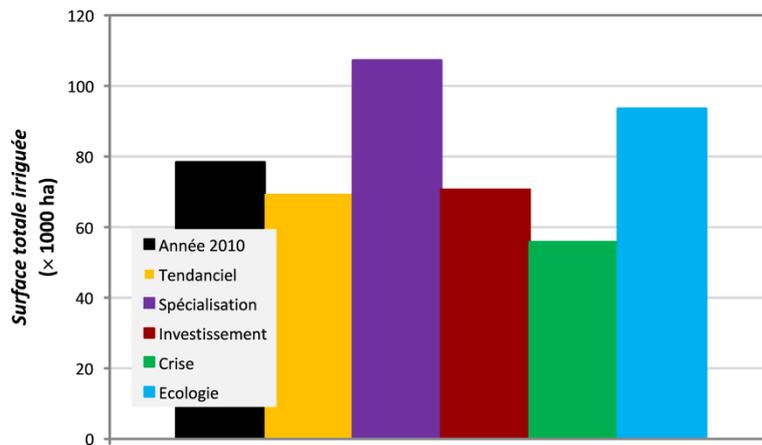


Figure 85 : Evolution de la surface totale irriguée

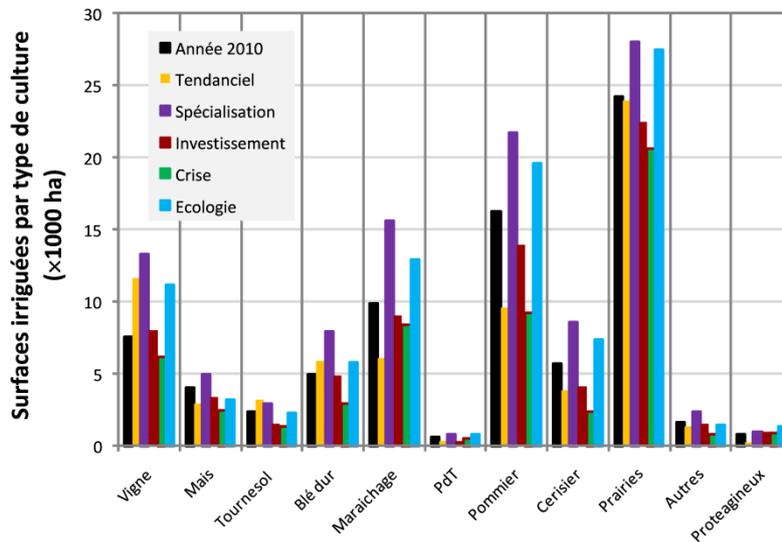


Figure 86 : Evolution de la surface irriguée par type de culture

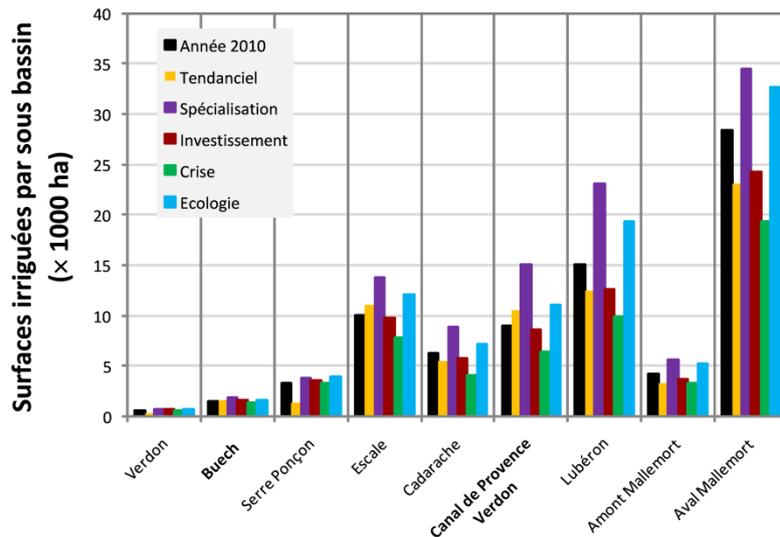


Figure 87 : Evolution de la surface irriguée par sous-bassin

L'analyse par sous-bassin montre que le scénario *Tendanciel* conduit à une hausse de près de 20% des surfaces irriguées des périmètres alimentés par le Canal de Provence (prise de Boutre) qui reste sur sa dynamique actuelle d'extension de ces réseaux dans le nord Lubéron, le Var et les plateaux de Valensole et Forcalquier, alors que celles-ci sont en baisse sur la plupart des autres bassins.

Le scénario *Spécialisation* entraîne une augmentation de la SAU irriguée pour l'ensemble des territoires mais plus fortement sur ceux desservis par le Canal de Provence (prise de Boutre) et celui du Lubéron (périmètres desservis par le canal Sud Lubéron, le canal Mixte Carpentras, les prises d'Anthéron, Robion et Castellane), territoires dont les principales cultures sont le blé dur, la viticulture, le maraîchage et l'arboriculture.

Le scénario *Investissement* conduit à une forte baisse des surfaces irriguées dans les territoires très urbanisés (basse Durance, vallée du Rhône, littoral, Lubéron). Elles diminuent modérément pour les territoires desservis par le Canal de Provence (prise de Boutre), même si l'analyse par canton montre que les surfaces situées en bordure du littoral et sur le pourtour de l'étang de Berre ainsi que dans la zone de Pertuis et Manosque où la pression urbaine est sensible, sont aussi en forte diminution. Sur les bassins de l'Escal et de Cadarache où la pression urbaine est moins forte, les surfaces irriguées restent stables. A l'inverse, les surfaces augmentent légèrement sur les têtes de bassin de la Durance, du Verdon et du Buëch.

Le scénario *Crise* conduit à une diminution des superficies irriguées sur l'ensemble des bassins. Celle-ci est importante pour les bassins situés en aval de Serre-Ponçon, de 20% à 40%, et plus faible pour les territoires ruraux des têtes de bassin.

A l'instar du scénario *Spécialisation* mais dans une moindre mesure, la SAU irriguée augmente dans le scénario *Ecologie* pour l'ensemble des bassins.

Prise en compte de l'arrosage

L'arrosage est une utilisation en pleine expansion du fait de la périurbanisation et du transfert de terres agricoles en jardins d'agrément qui continuent d'être irrigués mais dont les superficies ne sont plus déclarées au titre du RGA. Les volumes prélevés pour cette activité étaient jusqu'en 2010 intégrés dans les volumes d'irrigation non gravitaire et déclarés comme tels à l'Agence de l'Eau pour le calcul des redevances. Depuis 2010, ces prélèvements sont à déclarer au titre « autres usages économiques » tout comme les prélèvements industriels.

Les données de la SCP, qui portent sur les volumes distribués mesurés entre 2001 et 2010, montrent que la part relative de l'arrosage par rapport aux prélèvements dédiés à l'irrigation (agricole + arrosage) peut être relativement importante selon les territoires desservis mais surtout que celle-ci ne cesse d'augmenter avec l'extension de la périurbanisation. Sur les périmètres desservis par la SCP, cette part représentait plus de 30%

en 2001 et 43% en 2010 (l'arrosage représente 14% des volumes totaux distribués par la SCP en 2010, soit 21 Mm³).

Peu d'études ont porté sur le développement de cet usage et, de fait, il est difficile d'estimer, pour l'ensemble des bassins, les volumes dédiés à cette activité dont l'évolution dépend de nombreux facteurs (croissance et répartition de la population, type d'urbanisation, mode de logement, politique foncière, attrait du territoire...).

Toutefois, une estimation de ces prélèvements et de leur évolution possible selon les scénarios a été faite sur la base de l'évolution des superficies agricoles irriguées sous-entendu que cette dernière dépend en partie du type d'urbanisation et des modes de logement. Les résultats ont été calés par rapport aux données SCP et aux informations recueillies auprès de quelques associations d'irrigants (entretiens téléphoniques et/ou échanges de mails). Les surfaces entre 2000 et 2009, sont estimées en équivalent « surface de gazon » sur la base des volumes de prélèvement pour l'usage arrosage fournis par la SCP et en faisant l'hypothèse d'un taux d'arrosage de 4000 m³/ha/an.

Sur l'ensemble du périmètre desservi par le bassin Durance-Verdon, les hypothèses conduisent à des superficies stables pour les scénarios *Spécialisation* et *Ecologie*, maîtrise du foncier et de l'expansion urbaine, en hausse sensible pour le scénario *Investissement*, une partie des surfaces agricoles irriguées étant transformée en jardins du fait de l'urbanisation, et en forte hausse pour le scénario *Crise*, transfert d'une partie des surfaces irriguées en tant qu'exploitations agricoles, en agriculture de subsistance non déclarée (Figure 88). Sans surprise, les évolutions les plus significatives se retrouvent sur les bassins de plaine plus fortement urbanisés (Figure 89).

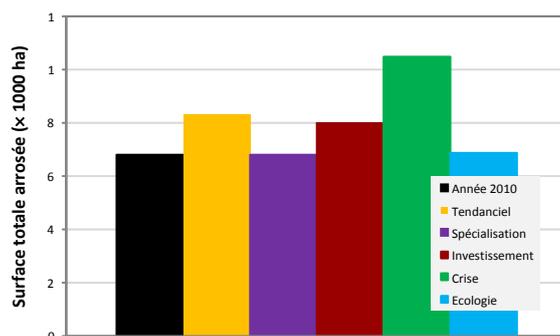


Figure 88 : Evolution de la surface totale arrosée

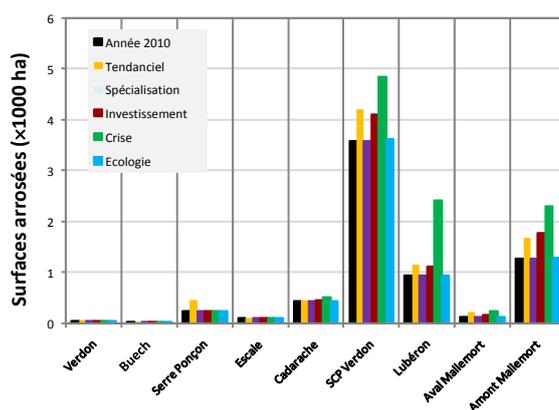


Figure 89 : Evolution de la surface arrosée par bassin

Analyse de l'incidence du changement climatique sur la demande en eau des plantes

Les calculs sont effectués à l'échelle du territoire à l'aide du modèle de besoin en eau MODIC avec les deux variantes. Les paramètres de calage notamment les seuils de déclenchement et les taux de remplissage des réserves pour le mode d'irrigation non gravitaire et les niveaux d'apports en mode gravitaire, sont inchangés et

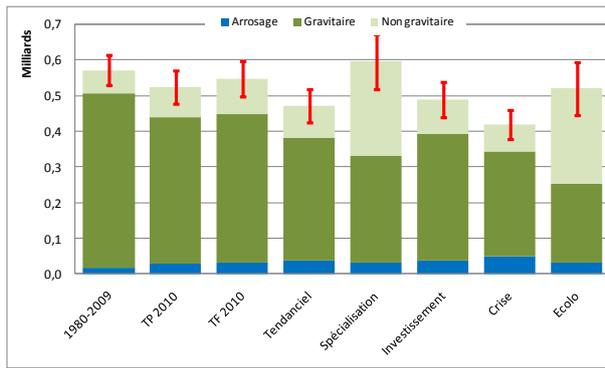
restent identiques pendant toute la période de calcul. Ceci suppose que les exploitants ne modifient pas leur pratique.

Les éléments présentés dans la Figure 90 complétés par le Tableau 39 donnent l'évolution des apports en eau d'irrigation et arrosage par périmètre selon les scénarios et pour les deux modes de calcul (« cycle fixe » CF et « cycle variable » DJ). Les barres rouges représentent les incertitudes climatiques associées sur la base des 10 projections climatiques échantillonnées. « 1980-2009 » est le besoin en eau moyen sur la période 1980-2009 et prend en compte l'évolution des usages sur cette période (évolution des surfaces irriguées et des assolements par exemple). « TP 2010 » et « TF 2010 » donnent les besoins en eau moyens sur les périodes temps présent, 1980-2009, et temps futur, 2034-2065, mais sans prise en compte de l'évolution des paramètres explicatifs des besoins en eau des usages. La valeur des paramètres est constante sur la période et identique à celle de l'année 2010. Ce scénario, que l'on retrouvera plus loin dans les simulations de la gestion des ouvrages sous l'appellation *Niv2010*, assimilable à un scénario « *business as usual* », permet de s'intéresser à la seule influence de l'évolution du climat sur les besoins en eau d'irrigation indépendamment de toute autre évolution de contexte. Pour distinguer les horizons de simulation, Pst_Niv2010 correspond à TP 2010 et Fut_Niv2010 à TF 2010.

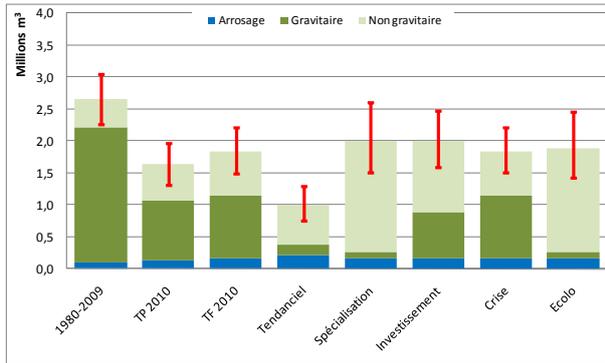
Scénario	Surfaces irriguées								Demandes exprimées (Cycle Fixe)							
	Irrigation gravitaire		Irrigation non gravitaire		Arrosage		Total		Irrigation gravitaire		Irrigation non gravitaire		Arrosage		Total	
	ha	Variation (%)	ha	Variation (%)	ha	Variation (%)	ha	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)
1980-2009	59245		23504		3853		86602		489.97		64.99		16.03		570.99	
Pst_Niv2010 (TP 2010)	43991		34084		6767		84842		410.31		84.9		27.86		523.08	
Fut_Niv2010 (TF 2010)	43991		34084		6767		84842		418.23	1.9	98.69	16.2	31.46	12.9	548.39	4.8
Tendanciel	32047	-45.9	37098	57.8	8328	116.1	77473	-10.5	341.65	-30.3	91.31	40.5	38.45	139.9	471.41	-17.4
Spécialisation	23153	-60.9	84018	257.5	6770	75.7	113941	31.6	301.76	-38.4	263.72	305.8	31.48	96.4	596.96	4.5
Investissement	35503	-40.1	34882	48.4	8029	108.4	78414	-9.5	354	-27.8	97.83	50.5	37.73	135.4	489.56	-14.3
Crise	30210	-49.0	25451	8.3	10716	178.1	66377	-23.4	294.04	-40.0	74.87	15.2	49.69	210.0	418.6	-26.7
Ecologie	13594	-77.1	79954	240.2	6819	77.0	100367	15.9	221.06	-54.9	268.8	313.6	31.71	97.8	521.57	-8.7

Scénario	Surfaces irriguées								Demandes exprimées (Cycle Variable)							
	Irrigation gravitaire		Irrigation non gravitaire		Arrosage		Total		Irrigation gravitaire		Irrigation non gravitaire		Arrosage		Total	
	ha	Variation (%)	ha	Variation (%)	ha	Variation (%)	ha	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)
1980-2009	59245		23504		3853		86602		509.89		64.74		15.88		590.51	
Pst_Niv2010 (TP 2010)	43991		34084		6767		84842		423.4		84.85		27.68		535.93	
Fut_Niv2010 (TF 2010)	43991		34084		6767		84842		403.41	-1.7	88.37	4.1	29.23	4.9	521.01	-0.4
Tendanciel	32047	-45.9	37098	57.8	8328	116.1	77473	-10.5	328.12	-33.0	81.28	25.1	35.6	122.1	445	-22.1
Spécialisation	23153	-60.9	84018	257.5	6770	75.7	113941	31.6	290.39	-40.7	241.07	270.9	29.25	82.5	560.71	-1.8
Investissement	35503	-40.1	34882	48.4	8029	108.4	78414	-9.5	341.64	-30.3	87.35	34.4	35.09	118.9	464.07	-18.7
Crise	30210	-49.0	25451	8.3	10716	178.1	66377	-23.4	283.31	-42.2	67.28	3.5	46.59	190.6	397.19	-30.4
Ecologie	13594	-77.1	79954	240.2	6819	77.0	100367	15.9	211.37	-56.9	247.99	281.6	29.47	83.8	488.82	-14.4

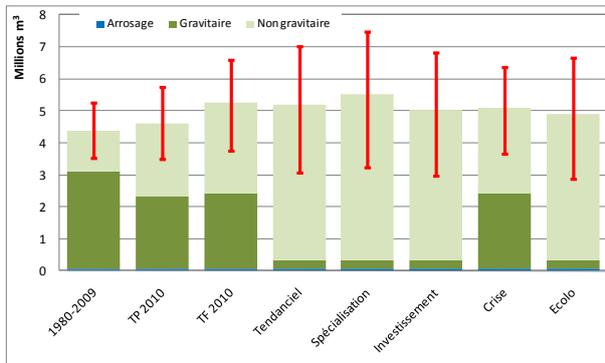
Tableau 39 : Synthèse des simulations de la demande annuelle moyenne en eau d'irrigation selon les deux variantes de MODIC (les deux premières lignes sont relatives aux simulations temps présent, les lignes suivantes présentent les résultats pour le futur)



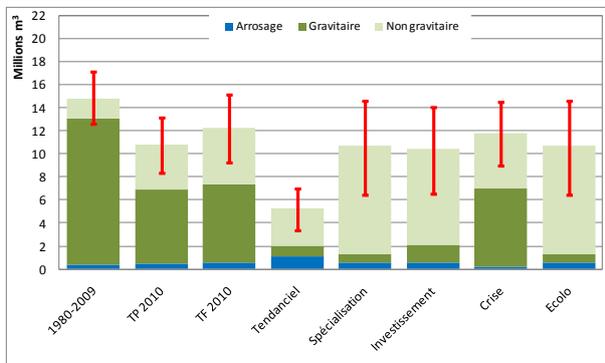
Ensemble du bassin Durance-Verdon – Cycle fixe



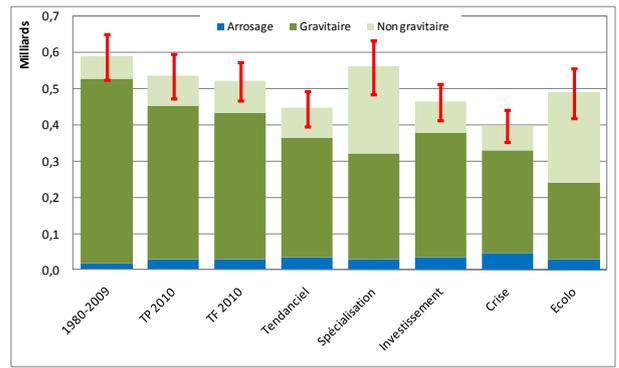
Bassin Verdon à Sainte-Croix – Cycle fixe



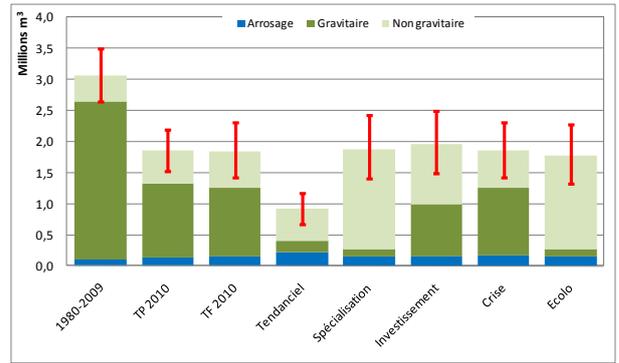
Bassin Buëch à Serres – Cycle fixe



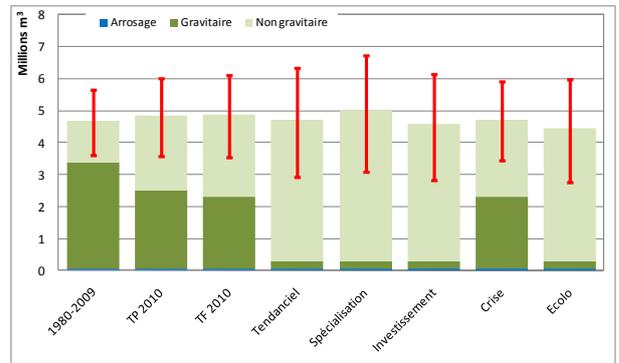
Bassin Durance à Serre-Ponçon – Cycle fixe



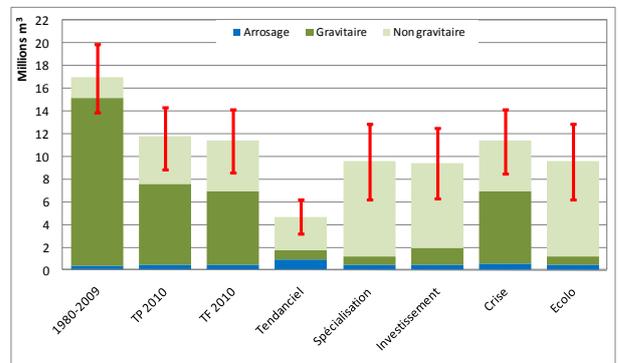
Ensemble du bassin Durance-Verdon – Cycle variable



Bassin Verdon à Sainte-Croix – Cycle variable

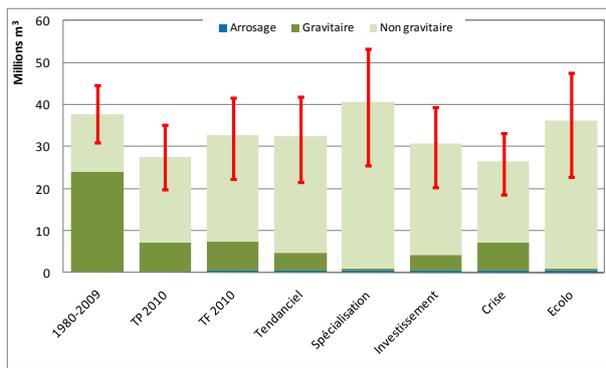


Bassin Buëch à Serres – Cycle variable

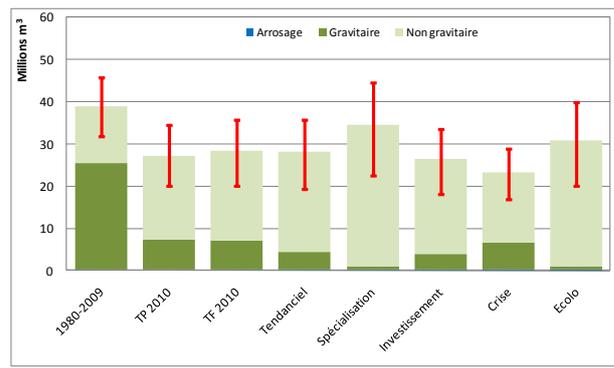


Bassin Durance à Serre-Ponçon – Cycle variable

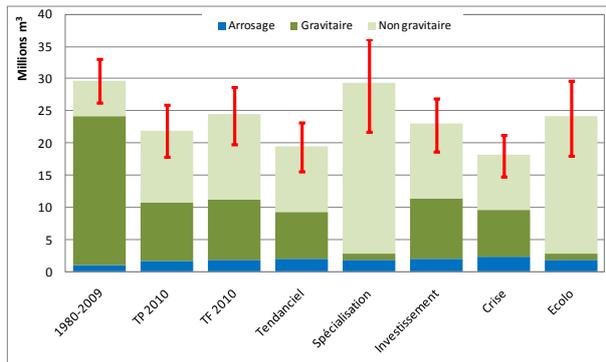
Figure 90 : Evolution des apports en eau d'irrigation et arrosage par périmètre, selon les deux variantes de MODIC



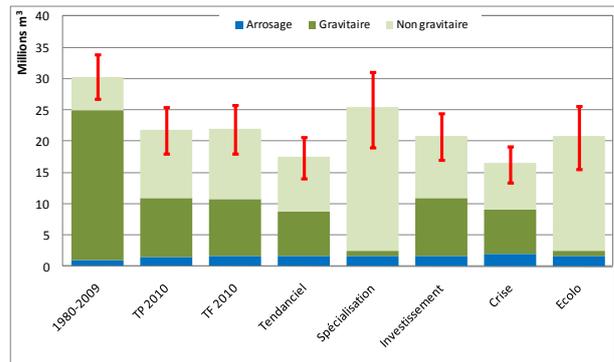
Bassin Durance à l'Escale – Cycle fixe



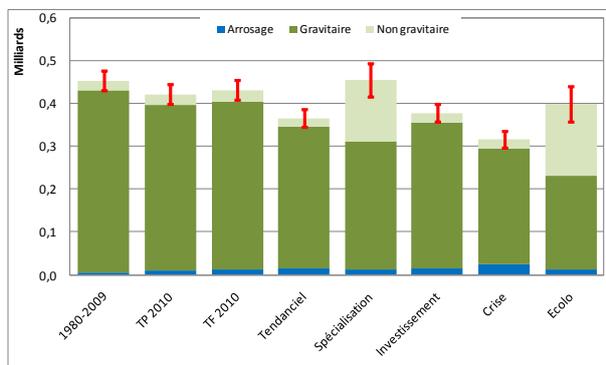
Bassin Durance à l'Escale – Cycle variable



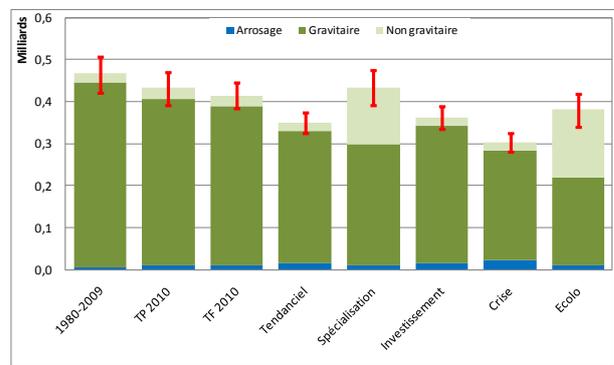
Durance à Cadarache – Cycle fixe



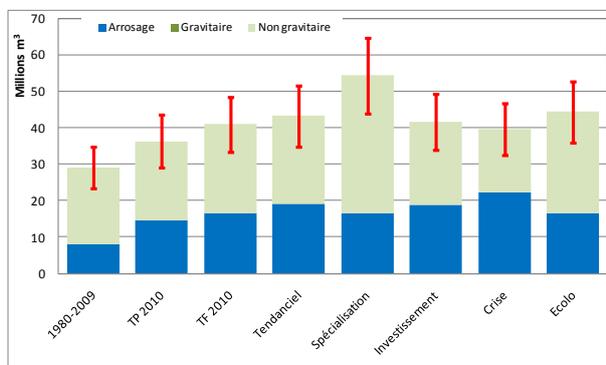
Bassin Durance à Cadarache – Cycle variable



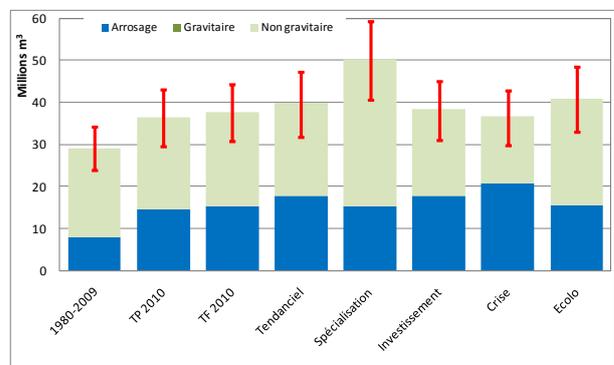
Bassin de la Basse Durance – Cycle fixe



Bassin de la Basse Durance – Cycle variable



Bassin Canal de Provence Verdon – Cycle fixe



Bassin Canal de Provence Verdon – Cycle variable

Figure 90 : Evolution des apports en eau d'irrigation et arrosage par périmètre, selon les deux variantes de MODIC (suite)

Pour l'ensemble du territoire, la simulation des dix projections climatiques retenues montre une augmentation moyenne de la demande en eau d'irrigation d'environ 5% ($\pm 0.3\%$) par rapport au climat actuel avec l'approche « cycle fixe », et à l'inverse, une diminution de -3% ($\pm 1.25\%$) avec l'approche « cycle variable ». Néanmoins, les résultats diffèrent selon le mode d'irrigation.

Pour le mode gravitaire, ceux-ci montrent un impact relativement faible de la variabilité et du changement climatique sur la demande en eau d'irrigation du fait même des modalités d'irrigation choisies : apports constants à fréquence régulière sauf s'il a plu de façon significative lors des deux jours précédant le tour d'eau. L'approche « cycle fixe » conduit à une augmentation des besoins en eau de moins de 1.85% ($\pm 0.15\%$) en moyenne qui s'explique par la diminution des précipitations, alors que l'approche cycle variable obtient une diminution des besoins de -5.2% ($\pm 1.8\%$) due à la diminution de la durée du cycle végétatif des plantes et donc de la période d'irrigation.

Pour le mode d'irrigation par aspersion, l'apport en eau des plantes est lié aux caractéristiques climatiques (température, évapotranspiration et précipitations). Les simulations montrent une augmentation de la demande variant entre 16 et 22% à l'horizon 2050 avec l'approche « cycle fixe » et entre 4 et 5.5% avec l'approche « cycle variable ». La prise en compte de l'évolution de la phénologie des plantes dans l'approche cycle variable conduit à une diminution de la demande en eau en période de fin de cycle, fin août – début octobre, qui peut être significative pour certaines cultures.

Pour l'usage arrosage, les simulations avec l'approche « cycle fixe » montrent une augmentation de la demande en eau par rapport au climat actuel de 12 à 16.5%. Avec l'approche « cycle variable », l'augmentation obtenue est moins importante et se situe entre 5.6 et 8.2%.

De fait, l'évolution de la demande en eau d'irrigation, à surfaces et assolements identiques, par sous-bassin dépend principalement du mode d'irrigation majoritaire. Concernant le périmètre desservi par le Canal de Provence via la prise de Boutre, toutes les parcelles sont irriguées par aspersion ou micro-irrigation. Les simulations utilisant l'approche « cycle fixe » montrent que le changement climatique conduirait à une augmentation de la demande en eau d'irrigation allant de 12.5 et 14.8%. Celles utilisant l'approche « cycle variable » obtiennent une augmentation moindre, située entre 4 et 5.5%.

A l'opposé, pour le sous-bassin de la Basse Durance où l'irrigation par gravité est le mode d'irrigation prépondérant, les résultats des simulations montrent un impact très faible de la variabilité et du changement climatique sur la demande en eau, entre 2.5 et 2.6% d'augmentation avec l'approche « cycle fixe ». L'approche « cycle variable » projette une diminution des apports en eau due au raccourcissement de la durée d'irrigation, située entre 2.7 et 6.2% par rapport au climat présent.

L'évolution de la demande en eau d'irrigation des autres sous-bassins, suit des processus identiques à ceux décrits ci-dessus. Par rapport au climat présent, le niveau des apports à l'horizon 2050 varie entre 11 et 20% selon les bassins pour les simulations avec l'option « cycle fixe » et entre -2.6% et 4% pour les simulations en « cycle variable ».

L'impact des scénarios agricoles sur la demande en eau d'irrigation est beaucoup plus important que celui de la variabilité et du changement climatique. En dehors du facteur climatique, les paramètres explicatifs de l'évolution des demandes en eau sont principalement les types d'assolement irrigués, les surfaces des périmètres irrigués et les techniques d'irrigation (y compris le choix du matériel) utilisées qui ont une incidence importante sur la demande en eau unitaire dans la mesure où chacune possède une efficacité intrinsèque (définie comme le rapport des volumes d'eau effectivement utilisés par les plantes aux volumes d'eau délivrés à la borne des parcelles). Selon la perméabilité des sols, l'efficacité d'une irrigation de type gravitaire se situe entre 40% et 60%, alors que l'efficacité d'une irrigation par aspersion varie entre 60 et 85% et celle d'une irrigation localisée entre 80 et 95%. Toutefois, le choix des techniques d'irrigation dépend de nombreux déterminants telles que le type d'exploitation (taille, capital humain, contraintes budgétaires, objectifs poursuivis, connaissances, aversion aux risques, contexte pédoclimatique...) et les caractéristiques des technologies d'irrigation pouvant être utilisées (coûts du matériel et adaptabilité aux besoins de l'exploitant, aux cultures irriguées, à la nature des sols, au climat...).

Les hypothèses faites pour chaque scénario sont principalement :

- des surfaces irriguées en forte augmentation pour les scénarios *Spécialisation* et *Ecologie* par rapport à l'année 2010, et, en diminution sensible pour les autres scénarios sauf pour le périmètre SCP Verdon où les surfaces irriguées du scénario *Tendanciel* sont en hausse suivant en cela la dynamique actuelle d'extension du réseau du Canal de Provence,
- pour les deux scénarios *Ecologie* et *Spécialisation*, la vigne, le maraichage, l'arboriculture, le blé dur et les fourrages sont les principales cultures qui voient leurs surfaces irriguées augmenter. Pour les autres cultures, les surfaces irriguées sont plutôt stables. A l'inverse, les surfaces irriguées des scénarios *Investissement* et *Crise* sont en baisse pour l'ensemble des cultures notamment les vignes, les vergers et les cultures maraichères.
- dans la dynamique actuelle, les scénarios *Tendanciel*, *Ecologie* et *Spécialisation* tablent sur un transfert progressif du mode d'irrigation non gravitaire sur l'ensemble du territoire desservi sauf en ce qui concerne les territoires de la plaine alluviale de la Basse Durance et de la plaine du bas Rhône (Crau et pourtour de l'étang de Berre) où les grandes cultures (foin de Crau, prairies/fourrages, céréales...) restent irriguées en mode gravitaire.

De façon générale, les simulations montrent que la combinaison des hypothèses conduit à des demandes en eau en baisse significative pour l'irrigation en mode gravitaire et en hausse sensible pour l'irrigation en mode non gravitaire et pour l'usage arrosage. Les calculs effectués avec les deux approches « cycle fixe » et « cycle variable » montrent des tendances identiques quel que soit le bassin et le scénario considéré. L'approche « cycle variable » donnent des évolutions à la baisse plus marquées que celles obtenues avec l'approche « cycle fixe », à l'inverse les évolutions à la hausse sont sensiblement moins importantes.

Pour l'ensemble du bassin versant, les simulations « cycle fixe » montrent que les demandes futures en eau d'irrigation plus arrosage (moyenne 2035-2064) se situeraient entre 0.42 milliards de m³ pour le scénario *Crise* et 0.6 milliards de m³ par an pour le scénario *Spécialisation*, soit une évolution allant de -27% à 5% par rapport à la situation actuelle (moyenne 1980-2009). Les simulations « cycle variable » montrent des demandes en eau sensiblement moins importantes que celles obtenues avec l'approche précédente, 0.4 milliards de m³ pour le scénario *Crise* et 0.56 milliards de m³ par an pour le scénario *Spécialisation*, et à la baisse quel que soit le scénario, de 5% à 33%. Sur la période 1980 – 2009, la demande en eau sur le bassin était de 0.57 milliards de m³ par an en moyenne, mais en forte diminution au cours de la dernière décennie, moins de 0.52 milliards de m³ par an. Pour le scénario *Tendanciel*, les demandes sont estimées à respectivement 0.47 et 0.45 milliards de m³ par an pour le « cycle fixe » et le « cycle variable ». Ces évolutions relèvent principalement des scénarios socio-économiques (et donc des hypothèses retenues en termes d'évolution des surfaces irriguées, des assolements et des techniques d'irrigation) et, dans une moindre mesure, de l'effet du changement climatique sur la demande unitaire, et plus faiblement des options de calcul de la demande.

Concernant l'évolution des demandes par sous-bassin, les résultats montrent des situations très contrastées.

En Basse Durance, la tendance est plutôt à une baisse de la demande quel que soit le scénario. Pour les calculs « cycle fixe », les résultats montrent des demandes en eau variant entre 0.4%, scénario *Spécialisation*, et -30%, scénario *Crise*, par rapport à la demande actuelle. L'approche « cycle variable » donne des demandes à la baisse de 7% pour le scénario *Spécialisation* à 35% pour le scénario *Crise*. Les demandes pour l'agriculture irriguée en mode gravitaire restent importantes, entre 55 et 91% des demandes totales en eau pour les usages irrigation et arrosage, selon le scénario. Toutefois, celles-ci sont en baisse significative pour les scénarios *Investissement* et *Ecologie*, respectivement de 20% et 53% alors que les demandes pour l'irrigation non gravitaire gagnent du terrain pour les scénarios *Ecologie* et *Spécialisation*, respectivement +700% et +535%, par rapport à la période 1980-2009. De même, les demandes pour l'usage arrosage progressent de 88% pour le scénario *Spécialisation* à 280% pour le scénario *Crise*. Toutefois, la demande pour cet usage reste très faible, moins de 7% de la demande totale.

Pour le périmètre Canal de Provence Verdon, la demande augmente quel que soit le scénario du fait de l'augmentation des surfaces irriguées pour les scénarios *Ecologie* et *Spécialisation* et des besoins pour l'usage arrosage pour les scénarios *Crise* et *Investissement* qui compensent la diminution de la demande en eau d'irrigation (pertes de surfaces irriguées pour ces deux scénarios). Les calculs avec l'approche « cycle fixe » montrent une augmentation de la demande globale par rapport à la période présente, allant de 36% pour le scénario *Crise*, à 87% pour le scénario *Spécialisation*. Pour le scénario *Crise*, la baisse de 20% de la demande en eau pour l'agriculture est compensée par une augmentation de +182% de la demande en eau pour l'usage

arrosage. Pour ce scénario, la part eau destinée à l'arrosage qui représentait en 2010, 40% de la demande irrigation et arrosage, atteindrait 56% à l'horizon 2050. L'approche « cycle variable » montre des tendances identiques avec des évolutions moins marquées : augmentation de la demande globale variant de 25.5% pour le scénario crise à 73% pour le scénario *Spécialisation*. Pour le scénario *Crise*, la baisse sensible de 25.5% de la demande en eau d'irrigation est compensée par l'augmentation de la demande en arrosage de 165%.

Les simulations effectuées pour les autres sous-bassins montrent des futurs très différenciés.

Pour le bassin Verdon amont, la demande en eau obtenue avec l'approche « cycle fixe » varie entre 1 Mm³ pour le scénario *Tendanciel* et 2 Mm³ pour le scénario *Investissement*, soit une diminution variant de 25 à 63% par rapport à la situation présente. L'approche « cycle variable » donne des résultats similaires avec une demande variant de 0.9 Mm³ pour le scénario *Tendanciel* (baisse de 70%) à moins de 2 Mm³ pour le scénario *Investissement* (baisse de 36%).

Pour le bassin du Buëch amont, l'approche « cycle fixe » obtient un niveau de demande allant de 4.9 Mm³ pour le scénario *Ecologie* à 5.5 Mm³ pour le scénario *Spécialisation*, soit une augmentation par rapport à la situation présente variant entre 12 et 26%. Le niveau de demande obtenu avec l'approche « cycle variable » évolue peu par rapport à la période 1980-2009 quel que soit le scénario, entre -4.7% pour le scénario *Ecologie* et +7% pour le scénario *Spécialisation*. La demande légèrement plus faible que celle obtenue par l'approche « cycle fixe », varie entre 4.5 (scénario *Ecologie*) et 5 Mm³ (scénario *Spécialisation*).

Pour le bassin de la Durance en amont de Serre-Ponçon, les scénarios induisent une baisse sensible de la demande en eau d'irrigation due à la généralisation du mode d'irrigation non gravitaire sur ce secteur. La baisse de la demande est significative pour le scénario *Tendanciel* mais beaucoup moins marquée pour les scénarios d'évolution du contexte agricole. L'approche « cycle fixe » montre une diminution de près de -65% de la demande pour le scénario *Tendanciel*, un peu plus de 5 Mm³ en 2050 pour 15 Mm³ en moyenne sur la période 1980-2010. Les autres scénarios induisent une diminution allant de -20 à -30% par rapport à la situation présente, soit une demande variant autour de 10.4 - 12 Mm³. L'approche « cycle variable » montre des tendances identiques avec toutefois des évolutions à la baisse de la demande en eau beaucoup plus marquées que celles obtenues avec l'approche « cycle fixe » : -72% pour le scénario *Tendanciel* avec un niveau de demande inférieur à 5 Mm³ et entre -44.5 et -32.8% pour les scénarios de contexte avec des demandes en eau variant entre 9.4 et 11.4 Mm³.

La demande en eau du bassin de la Durance entre Serre-Ponçon et l'Escale est plutôt en diminution quel que soit le scénario considéré. Comme pour le bassin précédent, cette diminution est en partie due à la généralisation de l'irrigation par aspersion sur l'ensemble du territoire. Ce développement était déjà bien avancé à la fin des années 2010, puisque la demande en eau d'irrigation gravitaire était inférieure à 7 Mm³ en 2010 alors qu'elle était de plus de 25 Mm³ en moyenne sur la période 1980-2009. Dans le même temps, la demande en irrigation non gravitaire est passée de 13 Mm³ à 20 Mm³ pour une demande totale d'environ 39 Mm³. La demande en eau obtenue avec l'approche « cycle fixe » varie entre 26.5 pour le scénario *Crise* et 40.6 Mm³ pour le scénario *Spécialisation*. Tous les scénarios conduisent à une baisse de la demande, entre -4% pour le scénario *Ecologie* et -30% pour le scénario *Crise*, hormis le scénario *Spécialisation* qui induit une hausse légère de +7.3% par rapport à la période actuelle. L'approche « cycle variable » conduit dans tous les cas à une baisse de la demande allant de 40% pour le scénario *Crise* à 11.5% pour le scénario *Spécialisation*, soit un niveau de demande variant entre 23 et 34.5 Mm³.

L'évolution de la demande en eau du bassin de la Durance entre l'Escale et Cadarache suit la même tendance que celle décrite pour le bassin précédent. L'approche « cycle fixe » montre que la demande qui était de l'ordre de 30 Mm³ par an en moyenne sur la période 1980-2009 pourrait varier, selon le scénario considéré, entre 18 Mm³, scénario *Crise*, et 30 Mm³, scénario *Spécialisation*, sur la période future 2035-2064, soit une baisse insignifiante de -0.9%, pour le scénario *Spécialisation* et plus conséquente pour les autres scénarios, entre -39%, scénario *Crise*, et -18%, scénario *Ecologie*. Les calculs avec l'approche « cycle variable » montrent aussi des baisses sensibles, supérieures à celles obtenues avec l'approche précédente, allant de -46% pour le scénario *Crise* à -16% pour le scénario *Spécialisation*. Le niveau de demande en eau varie selon les scénarios de 16.5 à 25.5 Mm³.

Analyse de l'incidence du développement de l'irrigation non gravitaire pour le scénario Spécialisation

Pour le scénario *Spécialisation*, un calcul complémentaire a été effectué afin d'évaluer l'apport du développement de l'irrigation non gravitaire. La simulation est faite en conservant les mêmes conditions et paramètres d'entrée que le scénario original mais sans évolution des modes d'irrigation, *i.e.* le rapport superficie irriguée par aspersion sur superficie totale irriguée par type de culture reste constant et égal à celui de l'année 2010.

En termes de résultats sur l'ensemble du territoire et par rapport à la situation 2010 :

1. sans évolution des modes d'irrigation, la demande en eau augmente de 30%. Dans le même temps, la superficie totale irriguée augmente de 37%, induisant au final une augmentation des surfaces irriguées en mode non gravitaire et gravitaire respectivement de 50% et 30% ;
2. en faisant évoluer les modes d'irrigation, l'économie d'eau est de 12%. Par rapport à l'année 2010, la demande augmente de 14% seulement au lieu de 30%. Dans le même temps la part des surfaces irriguées en mode non gravitaire passe de 44% en 2010 à 78% en 2050 (soit une augmentation de 150% des surfaces irriguées en mode non gravitaire et une diminution de -50% de celles irriguées en mode gravitaire).

Plus particulièrement sur les deux principaux périmètres irrigués, celui alimenté par le Canal de Provence via la prise de Boutre et celui alimenté par le bassin hydrographique de la Basse Durance (Lubéron, Comtat, plaine du Bas Rhône, pourtour Etang de Berre, Basse Durance...), nos hypothèses et résultats suggèrent :

- pour le périmètre SCP, une évolution de la demande en irrigation non gravitaire de 50% pour une augmentation de la surface irriguée de 66% (identique pour les deux cas, puisque l'ensemble des parcelles irriguées par la SCP, le sont en mode non gravitaire). La différence s'explique par les changements d'assolement, notamment la forte augmentation des surfaces de blé dur irriguées, culture dont le besoin en eau est plutôt faible.
- pour le périmètre alimenté par la Basse Durance, l'augmentation de la demande, sans évolution des modes d'irrigation, est de 26%. Avec l'hypothèse d'un développement de l'irrigation par aspersion et localisée, les économies d'eau représentent près 14% et la demande n'augmente plus que de 8% au lieu de 26% pour le scénario original. L'augmentation des surfaces irriguées par rapport à 2010 est de 33%. La part des surfaces irriguées en mode non gravitaire est de 20% sans évolution (augmentation des surfaces irriguées en mode non gravitaire et gravitaire respectivement de 50% et 30%) et de 65% avec évolution des modes d'irrigation (soit une augmentation de 370% des surfaces irriguées en mode non gravitaire et une diminution de -40% de celles irriguées en mode gravitaire).

Conclusion

Les demandes potentielles en eau d'irrigation et arrosage à l'horizon 2050 ont été estimées pour les différents scénarios d'évolution de contexte agricole, le scénario *Tendanciel* et un scénario sans évolution de contexte sur la période de calcul temps présent - temps futur. Pour ce dernier scénario, le contexte agricole est celui de l'année 2010. Les scénarios induisent uniquement des modifications dans l'assolement et des évolutions des surfaces agricoles irriguées et de mode d'irrigation. Aussi pour ce scénario, l'évolution de la demande en eau est uniquement due à l'impact du changement climatique.

L'évolution de la demande en eau pour l'usage arrosage est aussi étudiée. L'arrosage se fait uniquement par aspersion et le type de plantation envisagé est équivalent à celui d'une surface en herbe qui serait arrosé sur la période s'étalant entre le 1^{er} avril et le 30 septembre.

Pour les modes d'irrigation étudiés, gravitaire et aspersion plein champ ou sous abri et micro-irrigation, les pratiques d'irrigation, seuil de déclenchement et taux de remplissage pour l'irrigation par aspersion, apports constants sous condition de pluie dans les deux jours précédents le tour d'eau dans le cas d'une irrigation gravitaire, restent identiques sur toute la période de simulation. Les valeurs utilisées sont celles obtenues lors de la phase de calage / validation du modèle sur la période passée 1980 – 2009.

Enfin, deux approches d'estimation du besoin en eau des plantes sont utilisées dans MODIC. La première, la plus couramment employée, dite « cycle fixe », fait l'hypothèse que le développement des plantes est fonction du nombre de jours écoulés entre deux stades phénologiques. Avec cette approche, le rythme de croissance des plantes reste stationnaire malgré la variabilité du climat.

La deuxième dite « cycle variable » suppose que le développement et la croissance de la plante sont en grande partie fonction de ces caractéristiques métaboliques et qu'il est donc nécessaire de tenir compte des effets thermiques, radiatifs et hydriques. MODIC ne prend pas en compte l'incidence de l'augmentation du CO₂. Le modèle utilise par contre le concept de degrés-jours qui permet de prendre en compte l'effet de la température sur la vitesse de croissance des plantes. Avec cette approche, l'apparition des différents stades phénologiques dépend du cumul des températures au-delà d'une température de base qui dépend de la plante.

Les résultats obtenus montrent que : l'incidence du changement climatique sur la demande en eau est bien moins importante que celle de l'évolution du contexte agricole. L'analyse des résultats montre toutefois, que ceux-ci diffèrent en fonction de l'approche utilisée (« cycle variable », « cycle fixe ») mais aussi selon le mode d'irrigation et les hypothèses faites sur les modalités d'irrigation.

Pour l'irrigation par aspersion, l'impact de la variabilité et du changement climatique sur la demande en eau est beaucoup plus marqué que dans le cas d'une irrigation gravitaire. En effet, dans le cas d'une irrigation par aspersion ou micro irrigation, la demande en eau est fonction des caractéristiques climatiques (température de l'air, précipitations et évapotranspiration) et des paramètres de déclenchement de l'irrigation et du niveau de remplissage de la réserve au sol. Dans le cas d'une irrigation gravitaire, les apports sont constants quelques soient les caractéristiques climatiques et effectués à fréquence régulière sauf s'il a plu de façon significative durant les jours précédents le tour d'eau, dans ce cas l'hypothèse faite est que les exploitants passent leur tour d'eau. Les apports effectués sont donc quasiment indépendants du climat.

Pour le mode d'irrigation par aspersion, l'approche « cycle variable » conduit à une incidence du changement climatique sur les besoins et donc sur les demandes en eau, moins importante que celle obtenue avec l'approche « cycle fixe ». Cette différence est conforme aux résultats obtenus lors du calage du modèle qui montrent que l'approche « cycle variable » aboutit à une stabilisation du besoin en eau des cultures à l'horizon 2050, voire à une diminution pour certaines, du fait d'une part de l'avancée des dates de semis et de début de végétation, et, d'autre part, du raccourcissement du cycle végétatif des plantes. Ce résultat ne préjuge pas de la qualité des produits et des rendements potentiels.

Pour le mode d'irrigation gravitaire, les simulations utilisant l'approche « cycle fixe » montrent une légère augmentation des apports d'eau d'irrigation sous changement climatique qui s'explique par la diminution des précipitations (les exploitants passent moins souvent leur tour d'eau). A l'inverse, les simulations basées sur l'approche « cycle variable » conduisent à une diminution des apports par suite du raccourcissement du cycle végétatif. Cette diminution peut être significative en fin de cycle dans le cas de cultures tardives (période fin août – début octobre).

De fait, l'incidence du changement climatique sur la demande en eau d'irrigation et d'arrosage des sous-bassins dépend du type d'assolement mais surtout du mode d'irrigation prédominant. Pour le périmètre alimenté par le Canal de Provence via la prise de Boutre sur le Verdon, où toutes les cultures sont irriguées en mode non gravitaire, les résultats des simulations montrent une augmentation de la demande allant de 16 à 22% pour l'approche « cycle fixe » et de 4 à 5.5% pour l'approche « cycle variable ».

Pour le périmètre alimenté par le bassin versant de la Basse Durance où le mode d'irrigation gravitaire est prépondérant, les calculs utilisant l'approche « cycle fixe » conduisent à une augmentation de la demande allant de 1.7% à 2%, alors que ceux basés sur l'approche « cycle variable » montrent plutôt une diminution des apports d'eau compris entre -3.4% et -7%.

Sur l'ensemble du bassin, les calculs montrent une augmentation de la demande en eau d'irrigation d'environ 5% par rapport au climat présent pour l'approche « cycle fixe » alors qu'à l'inverse l'approche « cycle variable » conduit à une diminution de -3%. Ce résultat est cohérent avec les constatations précédentes. En effet, l'essentiel de la demande en eau exercée sur le bassin provient de l'irrigation gravitaire (environ 75% de la demande totale, irrigation plus arrosage).

L'agriculture est un des secteurs économiques les plus vulnérables au changement climatique. Les évolutions, qu'elles soient d'ordre climatique ou socio-économique, nécessiteront la mise en œuvre de mesures

d'adaptation spécifiques permettant de réduire la vulnérabilité à long terme du secteur. Le recours accru à l'irrigation, y compris sur des cultures actuellement peu ou pas irriguées, afin de maintenir le rendement et la qualité des productions, peut être une solution. D'autres alternatives sont possibles comme l'évolution des assolements et l'utilisation de variétés plus sobres en eau, la recherche d'une meilleure efficacité de l'irrigation, le choix de modèles de cultures moins intensifs, la recherche de complémentarité culture / élevage et/ou culture / culture. Coté offre, des mesures structurelles plus « lourdes » comme le développement de retenues collinaires ou des transferts d'eau entre bassins hydrographiques peuvent être envisagées, encore faut-il identifier des secteurs suffisamment pourvus en ressource en eau pour les permettre...

Ces mesures d'adaptation renvoient à des types de réponse déjà connues visant à répondre aux enjeux actuels et de court/ moyen terme d'équilibre offre / demande, à réduire les tensions existantes entre usagers de la ressource (concurrence entre usages de l'eau principalement en période d'étiage et assecs sévères ou les années de sécheresse) ou encore à répondre aux effets de la variabilité spatio-temporelle du climat observée aux cours des années précédentes.

Certains scénarios, en fonction de leur tendance générale, des enjeux spécifiques au territoire et au secteur d'activité considéré, intègrent une partie de ces mesures, principalement les mesures dites « sans regret », qui répondent aux enjeux cités ci-dessus mais aussi aux évolutions de contextes socio-économiques et politiques telles que les contraintes de marchés et de coûts de production (mains d'œuvre, énergie, eau, intrants...), les contraintes techniques et environnementales (réduction des impacts sur l'environnement) ou encore d'acceptabilité sociale. L'étude n'assure pas que ces mesures, qui sont intégrées dans les différents scénarios, et qui, à ce stade, ne forment qu'un corpus d'hypothèses d'évolution possible de l'agriculture, soient suffisantes pour répondre aux enjeux à long terme de quantité et de qualité d'eau, au vu des projections climatiques et hydrologiques.

Comme énoncé plus avant, l'incidence des évolutions du contexte agricole sur la demande en eau d'irrigation et d'arrosage est plus importante que celle due au réchauffement climatique. Les facteurs explicatifs sont principalement les types de culture, les surfaces irriguées par type de culture et les modes d'irrigation.

Pour les scénarios *Spécialisation* et *Ecologie*, l'augmentation de la demande en eau due à l'accroissement des surfaces irriguées est en partie compensée par les économies d'eau réalisées grâce au développement du mode d'irrigation non gravitaire. Ainsi, pour le scénario *Spécialisation*, l'accroissement de 32% de la superficie irriguée à partir de la ressource Durance-Verdon, par rapport à l'année 2010, conduit à une augmentation proche de 20% de la demande sans évolution des modes d'irrigation (part des superficies irriguées en mode non gravitaire et gravitaire par type de culture inchangée) et seulement d'environ 5% avec l'hypothèse d'un développement de l'irrigation non gravitaire, soit une « économie » d'eau proche de 15%.

Par rapport à la période 1980-2009, les scénarios conduisent globalement à une baisse de la demande en eau d'irrigation exercée sur le bassin Durance-Verdon, compte tenu notamment des hypothèses faites sur l'évolution des modes d'irrigation et notamment le développement de l'irrigation non gravitaire. L'approche « cycle fixe » conduit à une augmentation de 5% de la demande pour le scénario *Spécialisation* (augmentation due en grande partie à l'incidence du changement climatique) et à une diminution allant de -9% pour le scénario *Ecologie* à -27% pour le scénario *Crise*. L'approche cycle variable donne des tendances identiques avec une baisse de la demande qui varie entre -2% pour le scénario *Spécialisation* et -31% pour le scénario *Crise*. Ces variations de la demande induites par les scénarios de contexte agricole sont bien supérieures à celles dues au changement climatique, lesquelles sont inférieures à 5%.

3. Besoins en irrigation en 2050 – demande en eau sur le périmètre de la concession régionale du Canal de Provence

Le modèle FIVE-CoRe a été mis en œuvre sur le périmètre de la concession régionale du Canal de Provence (Société du Canal de Provence, 2014). L'intérêt était de montrer la sensibilité des résultats au modèle de demande en eau. Les simulations obtenues par MODIC et FIVE-CoRe ont partagé les hypothèses des scénarios territoriaux littéraires interprétés parfois différemment en termes d'assolement agricole. Les résultats qu'ils délivrent sont globalement comparables sauf pour le scénario *Ecologie* du fait d'une appréciation différenciée en termes d'évolution du secteur agricole sur la concession desservie par le Canal de Provence.

Traduction des scénarios prospectifs dans les bassins agricoles desservis par le Canal de Provence.

Dans le cadre des analyses spécifiques qui ont été conduites sur le périmètre du Canal de Provence, les scénarios prospectifs ont été traduits en surface irriguée par culture à partir d'une analyse par bassin agricole desservi¹².

Chacun des scénarios se caractérise donc par une surface agricole irriguée totale, en augmentation ou réduction par rapport à la situation actuelle, et par un assolement le quel varie également, mais sans grande rupture, comme le montre la Figure 91.

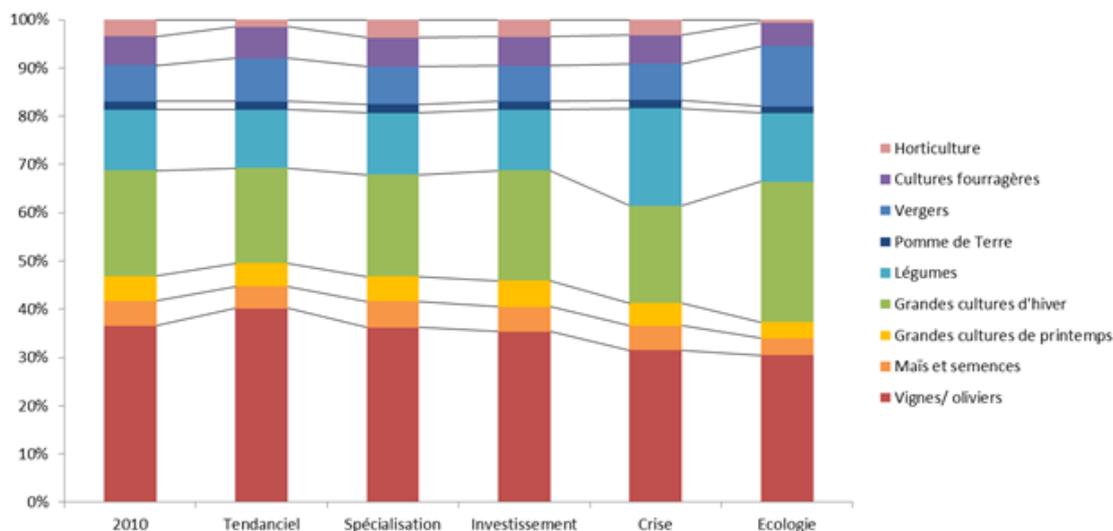


Figure 91 : Evolution des assolements irrigués sur le périmètre du Canal de Provence, par scénario, à l'horizon 2050

Les paragraphes qui suivent précisent ces évolutions par scénarios.

Scénario Tendanciel

Contexte agricole dans le bassin Durance/Verdon à l'horizon 2050

Le scénario tendanciel projette les évolutions observées au cours des trente dernières années. Malgré une préservation relative de l'agriculture, les espaces agricoles sont en recul en raison de l'étalement urbain, de l'ouverture des marchés et du découplage de la PAC, centrée sur l'environnement et la sécurité alimentaire.

Assolement irrigué et pratiques d'irrigation à l'horizon 2050

Ce scénario reporte jusqu'en 2050 l'évolution annuelle de la superficie irriguée observée entre 1979 et 2010. À l'échelle du bassin Durance/Verdon, on observe une extension ponctuelle des réseaux d'irrigation qui n'empêche par une baisse de la SAU irriguée totale qui passe de 70 000 ha actuellement à 60 000 ha en 2050. Sur le périmètre départementales et régionales de la SCP, la surface irriguée évolue jusqu'à 18 000 ha, traduisant une légère augmentation par rapport à 2010 (+10%) qui résulte de deux mouvements inverses : la fin des équipements sur le Luberon et une diminution de surfaces sur d'autres bassins du fait de l'urbanisation.

Les pratiques d'irrigation sont très proches des pratiques actuelles. Toutefois, le scénario littéraire considère la rationalisation et la mécanisation de l'exploitation des vergers ainsi que la progression des cultures maraichères hors/sol et des ouvrages de haute technicité. Afin d'assurer la cohérence entre le scénario et le paramétrage de l'irrigation, l'efficacité du matériel d'irrigation a été légèrement améliorée pour ces cultures. D'autre part, les prairies n'ayant plus un rôle productif, les volumes dédiés à leur irrigation ont été diminués.

Scénario Spécialisation

Contexte agricole dans le bassin Durance/Verdon à l'horizon 2050

Dans ce scénario, la politique régionale favorise une agriculture compétitive, caractérisée par l'intensification et la spécialisation des exploitations le long de la Durance et sur les plateaux bordiers. Les espaces agropastoraux sont préservés pour leur valeur patrimoniale et touristique.

¹² Cette traduction n'a été que partiellement reprise dans les simulations sur l'ensemble du territoire.

Assolement irrigué et pratiques d'irrigation à l'horizon 2050

Concernant l'irrigation, les réseaux sous pression sont étendus, de nouveaux cantons sont irrigués sur le littoral, et des compléments de ressource sont mobilisés à partir du Rhône. Dans ce contexte, la SAU irriguée totale progresse pour atteindre 90 000 ha sur le bassin Durance/Verdon. Sur le périmètre de la SCP, elle est de 22 400 ha, traduisant une augmentation de plus de 6 000 ha (soit +37%) par rapport à 2010, du fait de nouveaux investissements.

La rénovation et l'instrumentalisation des systèmes d'irrigation existants, afin de réduire les pertes en eau, sont traduites par l'augmentation de l'efficacité du matériel d'irrigation pour l'ensemble des postes de production dans le paramétrage de l'irrigation.

Scénario Investissement

Contexte agricole dans le bassin Durance/Verdon à l'horizon 2050

Ce scénario décrit un territoire attractif où la priorité est donnée au développement et au rayonnement régional par la diversification du tourisme, la relance de l'industrie, et le développement d'activités à forte valeur ajoutée (hautes technologies). L'agriculture passe au second plan et l'espace agricole est fragmenté.

Assolement irrigué et pratiques d'irrigation à l'horizon 2050

Dans ce contexte, les réseaux d'irrigation sont peu entretenus et la superficie irriguée diminue pour ne représenter que 50 000 ha sur le bassin Durance/Verdon. Sur le périmètre SCP, la surface irriguée n'est plus que de 12 000 ha sur, soit une perte de près de 4 400 ha (-27%) par rapport à 2010.

Les pratiques d'irrigation sont très proches des pratiques actuelles. Toutefois, les vignes sont moins irriguées en raison de leur concentration sur le marché AOC, et les cultures emblématiques de la région (blé dur / PAPAM) sont plus systématiquement irriguées afin de répondre aux objectifs de production des filières agro-industrielles.

Scénario Crise

Contexte agricole dans le bassin Durance/Verdon à l'horizon 2050

Ce scénario fait état d'une situation de crise économique globale où la PAC est quasi inexistante. Du fait de la forte contraction des échanges, d'une part, et de l'augmentation des coûts d'accès aux intrants, d'autre part, les territoires recherchent une plus grande autonomie alimentaire et énergétique. L'agriculture est très peu spécialisée et la productivité est faible.

Assolement irrigué et pratiques d'irrigation à l'horizon 2050

Les réseaux d'irrigation sont peu entretenus. L'augmentation du coût de l'eau entraîne une baisse du recours à l'irrigation (seules les cultures maraichères sont irriguées en priorité) et le développement de cultures non irriguées, adaptées au contexte pédoclimatique local. La superficie irriguée diminue jusqu'à 40 000 ha sur le bassin Durance/Verdon et 9 100 ha sur le périmètre SCP (soit une perte de 7 250 ha, représentant 44% par rapport à 2010).

Scénario Écologie

Contexte agricole dans le bassin Durance/Verdon à l'horizon 2050

Dans ce scénario, la politique environnementale forte, le soutien de la Région et la concentration des aides de la PAC sur le 2^{ème} Pilier favorisent la préservation des espaces agricoles et le développement des territoires. Les filières sont structurées autour de la demande régionale et les formes d'exploitations sont très variées. L'agriculture, dite « écologiquement intensive », se caractérise par la diversification des productions, l'adaptation des itinéraires techniques et des variétés, et un pilotage plus fin de l'irrigation afin de réduire la consommation en eau.

Assolement irrigué et pratiques d'irrigation à l'horizon 2050

Dans ce contexte, l'irrigation des cultures est plus ciblée, les surfaces en cultures maraichères, vergers et cultures diverses progressent, le matériel d'irrigation est amélioré et l'ensemble des réseaux d'irrigation sont convertis en sous-pression. On considère que les irrigations sont alors à l'optimum, avec une efficacité maximale à la parcelle. La SAU irriguée totale progresse sur le bassin Durance/Verdon pour atteindre 77 000 ha, elle atteint 30 700 ha sur le périmètre de la SCP (soit +88%).

Impact du changement climatique sur la demande eau d'irrigation

Les simulations avec les assolements et cultures actuelles ont permis d'estimer l'impact direct du changement climatique sur la consommation annuelle moyenne en eau d'irrigation du périmètre desservi par la SCP à l'horizon 2050, sans autre variation en termes de surfaces irriguées, d'assolement ou de pratiques d'irrigation.

La consommation annuelle en eau d'irrigation sur le périmètre a été simulée en année normale et en année sèche en confrontant les assolements et les pratiques d'irrigation observés en 2010 aux différentes projections climatiques pour la période 2035-2064¹³. L'écart observé sur la consommation annuelle moyenne simulée avec la réanalyse DuO entre 1980 et 2009 sur le même assolement traduit l'impact du changement climatique sur la demande en eau.

Nous observons une légère tendance à la hausse des consommations en eau d'irrigation sous climat futur, cette tendance est plus marquée en année moyenne qu'en année sèche (Figure 92) :

- la moyenne des consommations annuelles simulées en année normale sur l'assolement 2010, entre 2035 et 2064, atteint 30.9 Mm³, représentant une progression de 7% (2 Mm³) relativement à celle estimée entre 1980 et 2009 (28.9 Mm³) sur le même périmètre ;
- la moyenne des consommations annuelles simulées en année quinquennale sèche sur l'assolement 2010 entre 2035 et 2064 atteint 35.7 Mm³, représentant une augmentation de 4% (1.4 Mm³) par rapport à celle estimée entre 1980 et 2009 (34.3 Mm³) sur le même périmètre.

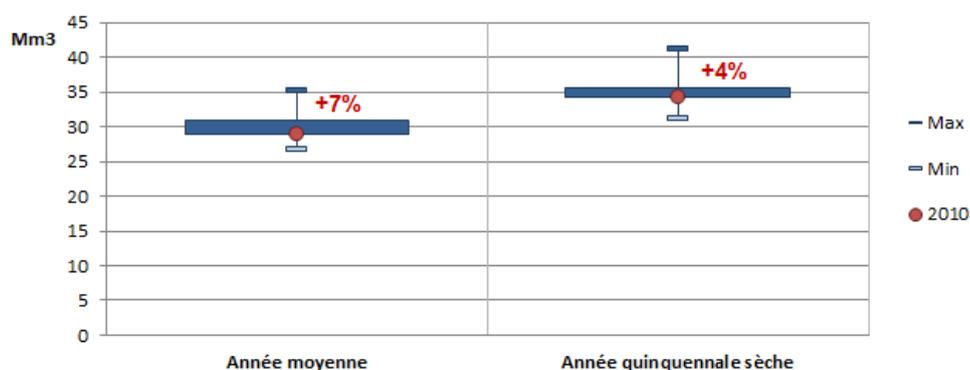


Figure 92 : Évolution de la demande en eau d'irrigation sur le périmètre du Canal de Provence, sous climat futur

D'une manière générale, une tendance similaire se dessine sur l'ensemble des différents bassins agricoles constituant le périmètre : la consommation en eau augmente jusqu'à 10% suivant le territoire. Seul le bassin de Valensole fait exception avec des consommations qui évoluent en moyenne de 40% à 50% en année moyenne et en année sèche. Ce résultat s'explique notamment par la très forte augmentation du besoin en eau d'irrigation des grandes cultures d'hiver (blé dur et PAPAM), qui représentent près de 80% de l'assolement irrigué sur ce bassin en 2010.

Simulation des demandes en eau d'irrigation futures sur les périmètres desservis par le canal de Provence, pour les scénarios prospectifs de 2050.

La demande en eau d'irrigation est calculée pour les cinq scénarii territoriaux, chaque simulation est caractérisée par la combinaison d'un scénario agricole spécifique et du jeu de projections climatiques sur la période 2035-2064.

Les résultats traduisent une diminution des consommations agricoles annuelles moyennes dans trois des cinq situations étudiées (scénarios *Tendancier*, *Spécialisation* et *Ecologie*). Les scénarios *Investissement* et *Crise* présentent la tendance inverse.

Comme le montrent le Tableau 40 et la Figure 93, les variations moyennes observées s'étendent de -47% (-14 Mm³) à +37% (+11 Mm³) par rapport aux consommations annuelles moyennes observées entre 1980 et 2009. Comparativement à l'impact du changement climatique (entre +4 et +7% en moyenne), l'évolution de la

¹³ Il s'agit de l'équivalent de TF 2010 dans les simulations MODIC.

consommation en eau d'irrigation à l'horizon 2050 est plus fortement conditionnée par le scénario agricole que par le changement climatique seul.

Période et Scénario à l'horizon 2050	Surface irriguée		Consommation en année moyenne		Consommation en année sèche	
	ha	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)
1980 - 2009	16 320	-	29.5	-	35.3	-
Tendancier	17 960	+10%	28.6	-3%	33.7	-5%
Spécialisation	22 390	+37%	40.5	+37%	46.7	+32%
Investissement	11 930	-27%	22.2	-25%	25.7	-27%
Crise	9 080	-49%	15.6	-47%	18.1	-49%
Ecologie	30 715	+88%	37.5	+27%	45.3	+28%

Tableau 40 : Évolution de la surface irriguée et de la consommation annuelle moyenne en eau d'irrigation sur les périmètres agricoles desservis par le Canal de Provence à l'horizon 2050

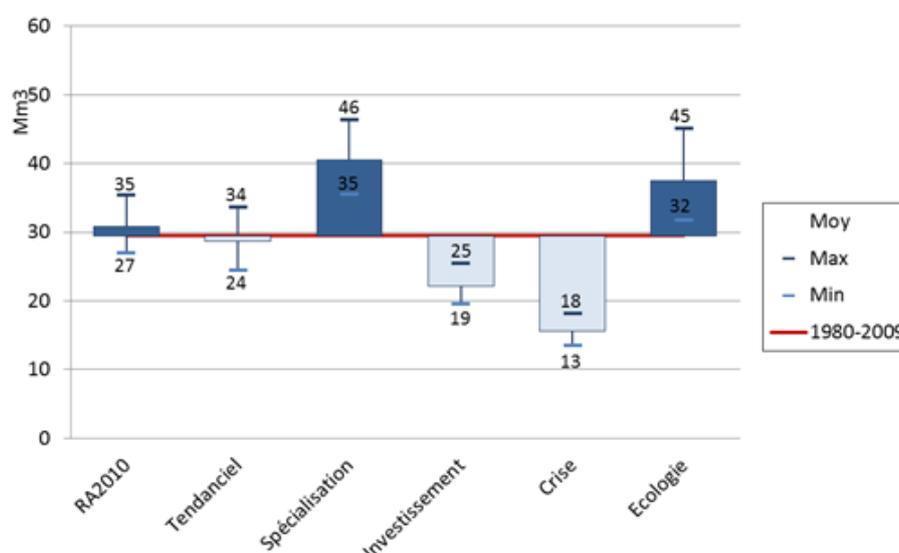


Figure 93 : Evolution de la consommation annuelle moyenne en eau d'irrigation sur les périmètres SCP, en année moyenne, à l'horizon 2050

Nous pouvons remarquer que les consommations minimales et maximales varient en année moyenne (Figure 93,) de -54% (scénario *Crise*) à +53% (scénario *Spécialisation*). En année sèche ces variations sont légèrement plus marquées, allant de -56 (scénario *Crise*) à +55% (scénario *Spécialisation*). La variation des surfaces irriguées totale ne suffit pas à expliquer les écarts de consommation. Il convient de raisonner l'évolution de la surface irriguée en termes de productions agricoles, en intégrant à la réflexion l'apport en eau associé, lui-même conditionné par le besoin en eau des cultures et les pratiques d'irrigation.

L'exercice effectué en parallèle avec les deux modèles MODIC et Five-CoRe permet de mesurer les incertitudes sur la demande en eau agricole. La comparaison de la Figure 93 avec le graphique dédié au périmètre alimenté par le Canal de Provence de la Figure 93 (page 169) montre la cohérence des chiffres annoncés par MODIC et Five-CoRe avec toutefois la réserve sur le scénario *Ecologie* qui, en termes de surfaces irriguées, est extrême pour Five-CoRe et intermédiaire pour MODIC situés entre *Investissement* et *Spécialisation*. Les surfaces en temps présent sont déjà fort différentes du fait d'appréciations non cohérentes des surfaces associées à la vigne dans les bases de données sur les assolements. Les ordres de grandeur sont comparables mais des écarts sont perceptibles (Figure 94). L'exercice de comparaison sur la demande unitaire montre que les besoins en eau sont relativement proches en temps présent sur les types de culture (sauf cerisier et vigne, section « Modélisation des besoins pour l'agriculture », page 72) et que les sensibilités des modèles sont semblables (section « Besoins en irrigation en 2050 – demande unitaire », page 148). Ceci conduit à suggérer que les différences constatées sont principalement du fait d'une interprétation différente des scénarios en termes.

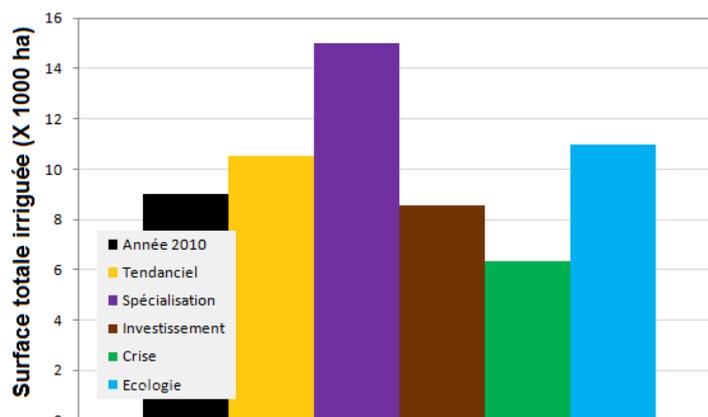


Figure 94 : Evolution des surfaces irriguées sur les périmètres agricoles desservis par le Canal de Provence (zoom de la Figure 87, page 155)

Pour compléter l'analyse, le détail des résultats par scénario est donné dans le Tableau 41.

Scénarios	Principales caractéristiques et résultats
Tendanciel	Légère baisse de -3% à -5% des consommations en eau d'irrigation sur le périmètre en année normale et en année sèche (soit respectivement -0.9 Mm ³ et -1.6 Mm ³), alors que la surface irriguée augmente de 10% (soit 1 600 ha) par rapport à 2010 Augmentation de surfaces irriguées sur le Luberon et Saint-Maximin (notamment en vignes/oliviers et vergers) compensée par les pertes de surfaces en horticulture - culture la plus consommatrice en eau (8500 m ³ /ha)
Spécialisation	Hausse moyenne des consommations en eau d'irrigation sur le périmètre à l'horizon 2050 de près de 40% (soit +11 Mm ³) en année normale et de plus d'un tiers (soit +11.4 Mm ³) en année sèche avec une augmentation de surface irriguée équivalente de +37% (6 000 ha) par rapport à 2010 Assolements retenus en 2050 identiques à ceux de 2010. La hausse de consommation est donc proportionnelle à la hausse de surfaces irriguées envisagées dans les hypothèses littéraires
Investissement	Baisse moyenne d'un quart des consommations en eau d'irrigation sur le périmètre à l'horizon 2050 en année normale et en année sèche (soit respectivement -7.3 Mm ³ et -9.6 Mm ³ avec une diminution de la surface irriguée de -27% (soit 4 390 ha) par rapport à 2010 Assolements retenus en 2050 identiques à ceux de 2010. la baisse de consommation est proportionnelle à la baisse de surface irriguée
Crise	Baisse moyenne de près de la moitié des consommations en eau d'irrigation sur le périmètre à l'horizon 2050 en année normale et en année sèche (soit respectivement -14 Mm ³ et -17.2 Mm ³). La surface irriguée diminue quant à elle de 49% (soit 7 240 ha) par rapport à 2010 Baisse de surface irriguée plus forte sur les vignes et oliviers (-3100 ha), alors que les surfaces en maraichage sont <i>a minima</i> préservées (-220 ha, soit -11%), sur les autres cultures la baisse de surfaces est de l'ordre de -45%
Ecologie	Hausse moyenne d'environ 28% des consommations en eau d'irrigation sur le périmètre à l'horizon 2050 en année normale et en année sèche (soit respectivement +8 Mm ³ et +10 Mm ³) pour une hausse de surface irriguée de +88%, soit +14 400 ha par rapport à 2010 Evolution de la consommation en eau sur le périmètre évolue de manière moins importante, lié à une baisse importante des surfaces en horticulture (-67% soit -370 ha) et une augmentation limitée des surfaces en maïs et semences. De plus l'amélioration de l'efficacité des pratiques limite les consommations unitaires à l'hectare

Tableau 41 : Détails des résultats par scénario sur le périmètre du Canal de Provence

4. Besoins en AEP en 2050

Des hypothèses ont en premier lieu été faites sur l'évolution de la population, variable essentielle pour calculer la consommation totale en AEP (Figure 95). A noter que ces populations correspondent aux populations dans les communes desservies, *en tout ou partie*, par les ressources du système Durance-Verdon. Une partie de ces populations sera donc alimentée en eau venant d'autres sources complémentaires. Afin de mieux intégrer l'impact du tourisme sur la demande en AEP, un équivalent de population touristique a aussi été calculé.

Population permanente

Appliquant les taux passés d'évolution dans le futur, la population sur l'ensemble du territoire est estimée à 3.4 M d'habitants en 2050 dans le scénario *Tendanciel*.

La population augmente davantage dans le scénario *Investissement* de par la forte migration de jeunes actifs et le maintien d'une population plus âgée et aisée. La faible disponibilité foncière notamment dans le Croissant littoral et la densification des pôles urbains un peu plus éloignés, décrites dans les scénarios littéraires, sont

traduites par une augmentation plus importante de la population dans les territoires proches des grandes villes en Basse et Moyenne Durance.

Dans le scénario *Crise*, la baisse d'attractivité et de revenus pour les retraités sont traduits par des taux négatifs pour l'évolution de la population. Nous supposons que la population baisse de -1%/an dans le Croissant littoral et de 0.5%/an dans le reste du territoire.

Dans le scénario *Ecologie*, il est supposé que les habitants se localisent davantage dans les grandes villes afin de minimiser les distances parcourues. Ceci se traduit par une diminution de la population en périphérie des grands centres urbains (-1%/an) et par une augmentation plus forte (4%) dans le cœur des villes, le territoire restant attractif.

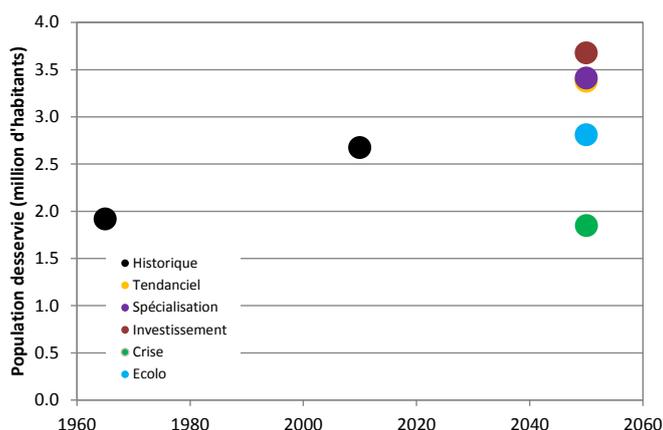


Figure 95 : Evolution de la population desservie par le système Durance-Verdon (au moins en partie)

Population touristique

La population touristique est issue des données du Comité Régional du Tourisme de 1992 à 2011 (CRT PACA et BET Marchand, 2012), calculée selon la méthode des flux touristiques. Cette méthode comptabilise les flux entrant et sortant de chaque département à l'échelle journalière. Elle prend donc en compte le tourisme marchand et non marchand ainsi que les flux sortant de la population résidente. Ce bilan étant journalier, il ne prend pas en compte les séjours à la journée.

Les données touristiques étant disponibles à l'échelle mensuelle et départementale il a fallu opérer une méthode de désagrégation à la commune et à la journée. Concernant cette dernière, les hypothèses mensuelles « 2050 » ont été ventilées par jour à partir de la ventilation journalière 2011. La ventilation journalière 2050 est donc un invariant. La variabilité ainsi introduite permet de simuler des pics journaliers de la fréquentation touristique globale autour notamment des week ends et des jours fériés (fixés par leur occurrence en 2011).

La population touristique communale a été reconstituée à partir du poids de l'emploi touristique dans chaque bassin touristique, puis de la population dans chaque commune. Par hypothèse, la population touristique des grandes villes est surestimée, et le tourisme communal non marchand également.

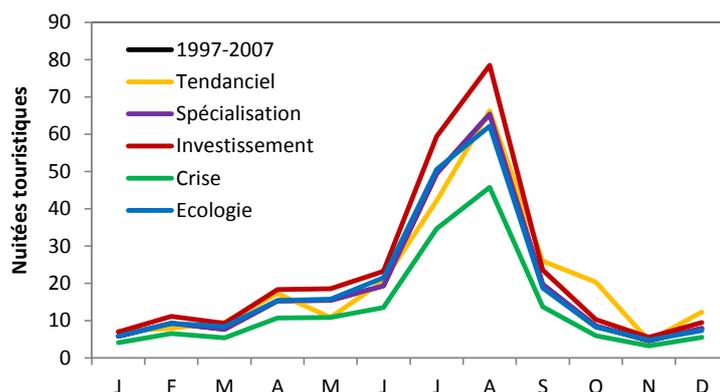


Figure 96 : Fréquentation touristique au pas de temps mensuel selon les scénarios territoriaux (Sources : CRT PACA, ACteon)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total PACA	Total Durance (04, 05, 84)	Total Littoral (06, 13, 83)
1997-2007	5.8	9.3	7.7	15.3	15.5	19.4	49.5	65.4	19.7	8.6	4.6	7.9	229	59	170
Tendanciel	7.2	7.9	9.6	17.2	10.8	20.6	42.2	66.2	25.9	20.4	4.6	12.3	245	55	190
Spécialisation	5.8	9.3	7.7	15.3	15.5	19.4	49.5	65.4	19.7	8.6	4.6	7.9	229	67	161
Investissement	7.0	11.2	9.2	18.4	18.6	23.2	59.4	78.5	23.6	10.3	5.5	9.5	274	71	204
Crise	4.1	6.5	5.4	10.7	10.8	13.6	34.7	45.8	13.8	6.0	3.2	5.5	160	41	119
Ecologie	5.8	9.3	8.4	15.4	15.8	21.5	50.6	62.2	18.8	8.2	4.8	7.4	228	75	153

Tableau 42 : Répartition dans le temps et dans les territoires de la fréquentation touristique dans les scénarios territoriaux (Sources : CRT PACA, ACteon)

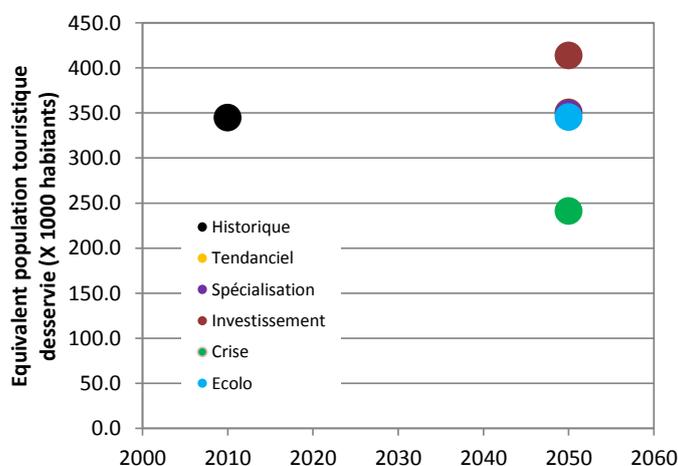


Figure 97 : Population touristique exprimée en "équivalent habitant" pour les communes alimentées par la ressource Durance-Verdon

Selon les scénarios, le nombre de nuitées total à l'année évolue, ainsi que sa répartition intermensuelle et géographique. La Figure 97 permet de constater que les hypothèses des scénarios prospectifs impliquent une hausse de la fréquentation modérée pour les scénarios *Tendanciel* et *Spécialisation*, forte pour le scénario *Investissement* et une baisse pour le scénario *Crise*. Le Tableau 42 permet de comprendre que seuls les scénarios *Spécialisation* et *Ecologie* projettent une « remontée » du tourisme balnéaire de la côte vers l'arrière pays de la Durance.

La population touristique communale à l'échelle de la région PACA a ensuite été appliquée aux seules communes alimentées en partie par la ressource Durance-Verdon.

Paramètres de la consommation unitaire

Les quatre scénarios territoriaux ont été quantifiés pour ce qui concerne chacune des variables impliquées dans le calcul de la dotation unitaire. Des informations sur les évolutions passées ont été rassemblées afin de

prendre des hypothèses pour le scénario *Tendancier*. Les consommations par ménage ont été calculées avec et sans la variable explicative du caractère touristique des communes, donnant ainsi un intervalle de consommation par ménage dans chaque scénario.

Scénario Tendancier

Les taux d'évolution passée de chacune des variables utilisées dans la fonction de consommation d'eau potable ont été recherchés. Ces taux ont ensuite été projetés. L'évolution a été considérée comme homogène à travers le territoire pour la majorité des variables.

Nous supposons que la proportion de plus de 60 ans évolue différemment entre deux parties du territoire : le Croissant Littoral et la Basse Durance d'une part, la Moyenne et Haute Durance d'autre part.

La proportion de la population de plus de 60 ans a augmenté de 0.8%/an de 1999 à 2004 (DRE PACA, 2007). Ainsi nous supposons que la proportion augmente de 1% dans le Croissant littoral et dans la Basse Durance et de 0.6% dans la moyenne et haute Durance.

Suivant la description qualitative du scénario tendancier la part de l'emploi touristique des bassins touristiques du Vaucluse augmente. Nous considérons donc que les communes du Vaucluse deviennent touristiques. La part de l'emploi touristique des bassins Briançon, Alpes Mercantour et Verdon diminue mais reste au-dessus des 10% de l'emploi total.

La caractéristique urbaine d'une commune est déduite du nombre d'habitants. Les communes de plus de 2000 habitants sont considérées comme urbaines. Cette même méthode est appliquée pour chaque scénario.

La proportion de population âgée de moins de 19 ans a diminué de 0.5%/an de 1999 à 2004 dans la région PACA (DRE PACA, 2007), nous appliquons le même taux pour obtenir la proportion par commune en 2050.

Pour les effets départementaux nous avons gardé les mêmes que pour 2010, et ce pour tous les scénarios.

La taille moyenne des ménages est considérée comme globalement constante à travers le temps quel que soit le scénario.

Le nombre de ménages est calculé en divisant la population en 2050 par la taille moyenne des ménages.

Le prix moyen de l'eau a augmenté de 4.5%/an de 1992 à 2007 dans le bassin Rhône Méditerranée Corse (<http://sierm.eaurmc.fr/eau-potable/prix/#evolution>), ce qui est au-dessus de la moyenne nationale (autour de 3%). Beaucoup de rénovations ont été faites pour respecter les exigences de la Directive Eaux Résiduaires Urbaines, surtout dans les grandes villes. Ainsi moins d'investissements devraient être nécessaires dans les années proches à venir surtout pour les communes urbaines. Nous supposons que le prix de l'eau augmente de 2%/an en moyenne d'ici 2050 pour les communes urbaines et de 2.5% pour les communes rurales.

Les taux passés d'évolution des proportions du nombre d'appartements par commune sont projetés dans le futur et ramenés à 100% si le pourcentage obtenu était supérieur à 100%.

La consommation moyenne par ménage est estimée entre 163 et 169 m³.

Scénario Spécialisation

Au niveau touristique, le nombre de nuitées touristiques reste stable par rapport au tendancier. Cependant la pression foncière pousse le tourisme légèrement dans les terres. Le tourisme urbain et événementiel est favorisé, la part du tourisme dans l'emploi du bassin Haute-Provence augmente mais n'atteint cependant pas les 10%. Inversement le tourisme rural diminue sur le littoral. Ces deux effets ne sont pas assez importants pour impacter la caractéristique touristique des communes comme défini ici.

Le prix de l'eau augmente plus que dans le tendancier. Nous prenons l'hypothèse qu'il augmente de 3%/an en moyenne. Le prix moyen de l'eau en 2050 dans ce scénario est de 4.4 €/m³.

L'écart de revenu par ménage entre les ménages les plus riches et les ménages les plus pauvres s'agrandit. Le revenu augmente de 1.8%/an dans le tendanciel. Ainsi nous prenons pour hypothèse que les communes avec un revenu supérieur à la moyenne de l'ensemble du territoire en 2010 connaissent une évolution de 2.4%/an jusqu'en 2050, alors que les communes au revenu inférieur à la moyenne connaissent une augmentation de revenu de 1.8%/an. Ainsi globalement le revenu augmente plus que dans le passé mais bien plus au profit des communes les plus riches en 2010.

La proportion de population de plus de 60 ans augmente de 1%/an dans le Croissant Littoral et 0.6%/an en Moyenne et Haute Durance dans le tendanciel. Due à une forte migration de jeunes travailleurs, la proportion de retraités augmente moins vite que dans le tendanciel. Ainsi nous supposons que la proportion de plus de 60 ans augmente de 0.8%/an dans le Croissant littoral et la Basse Durance et 0.5%/an en Moyenne et Haute Durance.

Si le taux de natalité augmente dans ce scénario, l'augmentation de jeunes travailleurs ayant plus de 19 ans augmente beaucoup donc nous gardons le même taux que dans le tendanciel.

La pression foncière ainsi qu'une volonté de garder une agriculture forte entraîne une densification des agglomérations, surtout dans le Croissant Littoral, la Basse et la Moyenne Durance. Ainsi nous supposons que la proportion d'appartements dans les cantons proches d'une grande ville dans ces parties du territoire augmente fortement. La proportion d'appartements augmente moins rapidement dans les parties rurales de ces trois sous régions et dans la Haute Durance.

La consommation moyenne par ménage en 2050 est alors entre 170 et 176 m³, ceci est légèrement au-dessus de la moyenne de consommation estimée pour le tendanciel. Ceci peut s'expliquer notamment par l'augmentation de revenus.

Scénario Investissement

Le tourisme se développe beaucoup dans ce scénario. Rappelons qu'une commune est considérée comme touristique si la part de l'emploi touristique du bassin touristique dans lequel elle se situe est supérieure ou égale à 10%. Ainsi nous prenons comme hypothèse que les bassins touristiques avec plus de 10% d'emplois touristiques en 2010 auront au moins autant d'emplois touristiques en 2050. Nous prenons aussi l'hypothèse que les bassins touristiques avec une part de l'emploi touristique entre 6 et 10% en 2010 auront une part supérieure à 10% en 2050.

Le prix de l'eau est bien plus bas dans ce scénario puisque les prix se rapprochent de ceux des années 2000. Les communes urbaines reçoivent plus de subventions que les communes rurales, ce qui implique une baisse de prix plus importante dans les communes urbaines que dans les communes rurales. Ainsi nous prenons l'hypothèse que le prix de l'eau dans les communes urbaines, baisse en moyenne de -0.03%/an, alors que le prix de l'eau dans les communes rurales baisse en moyenne de -0.01%/an.

Le revenu moyen augmente plus vite que dans le tendanciel, cependant il devrait augmenter moins vite que le revenu des ménages les plus aisés dans le scénario Spécialisation, ainsi nous supposons que le revenu augmente de 2%/an.

La population de plus de 60 ans continue d'augmenter. Face à la pression foncière de nouveaux retraités s'installent davantage dans le nord du territoire. Ici nous supposons que la proportion de personnes de plus de 60 ans augmente en moyenne de 0.8% dans le Croissant littoral et de 1% dans le reste du territoire.

Une forte migration de jeunes actifs peut expliquer que la proportion de la population qui a moins de 19 ans ralentit moins rapidement. En effet cela peut entraîner une augmentation du nombre d'enfants en bas âge par ménage. Ainsi nous supposons la proportion de moins de 19 ans ralentit moins vite que dans le tendanciel avec un taux négatif de 0.3%/an.

Face à la pression foncière, on construit moins dans le sud et davantage dans le nord. Seuls les retraités les plus aisés continuent de s'installer dans le Croissant littoral. Nous supposons que la proportion d'appartements évolue de la même manière que dans le tendanciel. Dans le reste du territoire, une forte demande des jeunes

actifs notamment, en logements individuels fait que la proportion d'appartements augmente très peu par rapport au tendanciel. Nous prenons un taux de 1.9%.

La consommation moyenne par ménage en 2050 est alors entre 215 et 265 m³, ceci est bien plus élevé que la moyenne de consommation estimée pour le tendanciel. Une telle augmentation s'explique par la baisse importante du prix de l'eau et le développement maximum que connaît l'économie.

Scénario Crise

Le territoire, très affecté par la crise, est beaucoup moins attractif. La population totale, et donc le nombre de ménages, baissent fortement.

Le tourisme sur le littoral mais aussi le tourisme de ski sont fortement impactés. Nous supposons que les bassins touristiques où la partie de l'emploi touristique était entre 10 et 20% en 2010, connaissent une baisse importante, la proportion devenant inférieure à 10%. Les communes des bassins touristiques où la part de l'emploi était supérieure à 20% en 2010 sont encore touristiques en 2050.

Les services publics sont fortement impactés. Cependant une tarification sociale pour les plus démunis ainsi qu'une tarification de « relance de l'économie » permettent quand même de ne pas trop augmenter les prix. Nous supposons que les communes urbaines et rurales sont tout de même différemment affectées. Ainsi nous supposons que les prix de l'eau augmentent en moyenne de 1.9%/an dans les communes urbaines et 2.3%/an dans les communes rurales.

Le revenu moyen est en baisse dans le Croissant littoral, suite à un arrêt massif du tourisme. Dans le reste du territoire, un fossé se creuse entre les ménages les plus aisés et les ménages les plus démunis. Ainsi nous supposons que le revenu moyen baisse de -0.5%/an dans le croissant du littoral. Dans le reste du pays le revenu des ménages les plus aisés augmente en moyenne de +1%, celui des plus démunis diminue de -0.5%/an.

Du fait du départ massif des jeunes travailleurs notamment, la proportion de personnes de plus de 60 ans connaît une forte augmentation. Nous supposons qu'elle augmente de 1.2%/an.

Suite au coup d'arrêt porté par la crise sur l'économie de la région, très peu d'investissements en constructions de nouvelles infrastructures et bâtiments sont maintenus. Les appartements représentant un avantage économique, ne serait-ce qu'en termes d'énergie, ils sont légèrement favorisés par rapport aux logements individuels. Nous prenons l'hypothèse que la proportion d'appartements augmente de 0.5%/an.

La consommation moyenne par ménage en 2050 est autour de 152 m³, ceci est plus faible que la moyenne de consommation estimée en 2010 et en 2050 selon le tendanciel. Cette consommation moins importante peut s'expliquer par la baisse importante des revenus des ménages et d'une augmentation plus faible du prix de l'eau.

Scénario Ecologie

Le prix de l'eau augmente fortement pour assurer la préservation de la ressource. Nous supposons qu'elle augmente plus que dans le scénario spécialisation, nous prenons un taux moyen de 4%/an.

Le revenu moyen dans le croissant littoral augmente moins rapidement que dans le tendanciel, nous supposons une augmentation de 1%/an. Le revenu dans le reste du littoral augmente davantage, nous supposons un taux de 1.5%/an.

La représentation des classes d'âge est assez similaire à celle du tendanciel, nous gardons donc les mêmes taux d'évolution des proportions des personnes de moins de 19 ans et de plus de 60 ans.

Le tourisme est réorienté en faveur de régions plus vertes. Ainsi nous supposons que la part de l'emploi touristique dans le croissant littoral baisse, alors que cette part augmente en Basse, Moyenne et Haute Durance. Si la part de l'emploi touristique des bassins en Basse, Moyenne et Haute Durance est entre 6 et 10% en 2010, nous supposons qu'elle passera la barre des 10% d'ici 2050.

La densification des grandes villes existantes se traduit notamment par une augmentation plus rapide de la proportion d'appartements (appartements de taille modeste mais nombreux) dans les communes proches des grandes villes. Par souci d'efficacité environnementale, la proportion d'appartements augmente globalement plus rapidement que dans d'autres scénarios.

La consommation moyenne par ménage en 2050 est estimée entre 137 et 142 m³. Ceci est assez proche des consommations moyennes dans le scénario *Crise*. Notons que les motifs diffèrent cependant. La consommation baisse fortement dans le scénario *Ecologie* suite à la forte augmentation du prix de l'eau, alors que la baisse de consommation dans le scénario *Crise* s'explique davantage par la baisse de revenus.

Synthèse des consommations moyennes par ménage

La Figure 98 présente les consommations moyennes par ménage sur l'ensemble du périmètre d'étude Durance-Verdon. La consommation moyenne varie entre 137 et 215 m³ selon les scénarios. Ces variations traduisent des hypothèses différentes sur les différentes variables explicatives de la consommation en eau.

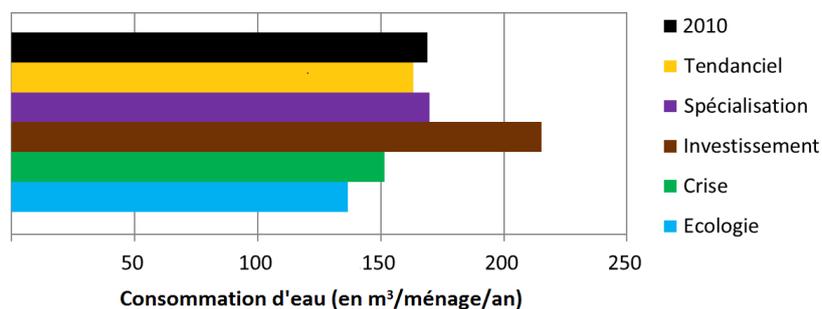


Figure 98 : Consommation moyenne par ménage selon les scénarios¹⁴

Les consommations d'AEP par ménage, la population permanente et la population touristique (Figure 98) permettent d'estimer les demandes en AEP des communes alimentées, en moins en partie par les eaux de la Durance (Tableau 18). L'utilisation de la fonction économétrique et des scénarios littéraires permet donc de quantifier des consommations variant beaucoup d'un scénario à l'autre. Il ressort tout de même que la population, le prix de l'eau et le revenu des ménages sont les trois variables permettant vraiment de faire varier les consommations totales entre scénarios (Figure 99).

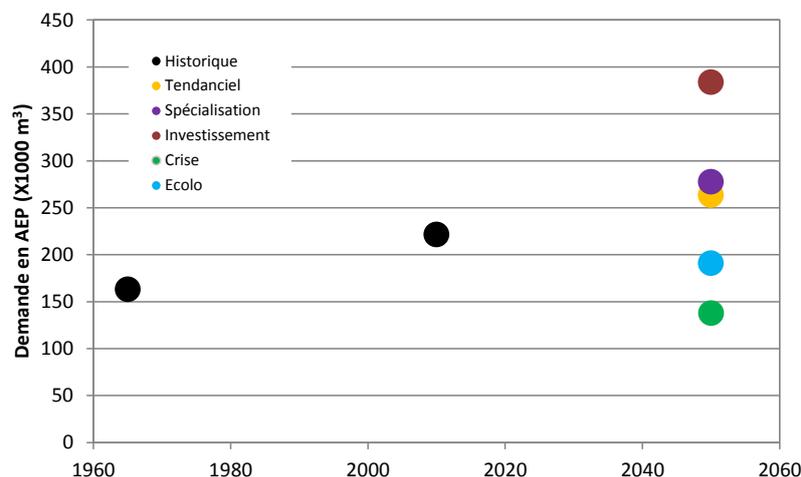


Figure 99 : Consommation totale en AEP sur le territoire desservi par le système Durance-Verdon

Pour accéder aux prélèvements totaux, il reste à multiplier la demande totale par les rendements de réseau et à isoler les prélèvements qui ont effectivement lieu sur le système Durance.

¹⁴ Ces données n'intègrent pas la variable touristique de la fonction économétrique.

Rendements

Les rendements connus pour l'année 2010 servent de référence. Il s'agit de rendements moyens à l'échelle départementale estimés à partir des informations disponibles. Les rendements en 2050 dépendent du scénario, de la zone d'habitat, rurale ou urbaine, mais aussi du rendement initial (année 2010). Pour le scénario *Ecologie*, dont le souci est la préservation de la ressource, l'objectif est d'atteindre un rendement maximal des réseaux de distribution de 80% pour les zones rurales et de 88% pour les zones urbaines. Le scénario *Crise* fait l'hypothèse d'une légère dégradation des rendements. Le scénario *Investissement* table sur une amélioration des rendements à un rythme annuel deux fois moins soutenu que celui du scénario *Ecologie*. Enfin le scénario *Spécialisation* différencie nettement les zones rurales des zones urbaines. Les taux d'amélioration pour les zones urbaines sont identiques à ceux du scénario *Ecologie* mais avec pour raison d'assurer la qualité de l'eau et la sécurité d'approvisionnement. Pour les zones rurales, l'objectif est bien moindre et les taux d'amélioration restent très faibles, inférieurs à ceux du scénario tendanciel.

Le Tableau 43 présente les rendements utilisés pour les différents scénarios.

Communes alimentées par :	Département	1965	2010	Tendanciel	Spécialisation	Investissement	Crise	Ecologie
Buëch Serres	Alpes-de-Haute-Provence	59%	60%	68%	65%	73%	58%	80%
Verdon Sainte-Croix	Alpes-de-Haute-Provence	51%	58%	65%	60%	73%	51%	80%
	Alpes-Maritimes	69%	75%	85%	85%	80%	72%	85%
	Var	68%	74%	83%	83%	79%	66%	85%
Durance Serre-Ponçon	Alpes-de-Haute-Provence	49%	55%	62%	60%	67%	53%	73%
	Hautes-Alpes	52%	58%	65%	63%	71%	56%	77%
Durance Escale	Alpes-de-Haute-Provence	51%	58%	65%	60%	73%	51%	80%
	Hautes-Alpes	54%	62%	70%	65%	75%	55%	80%
Durance Cadarache	Alpes-de-Haute-Provence	51%	58%	65%	60%	73%	51%	80%
	Var	68%	74%	83%	83%	79%	66%	85%
Durance Mallemort	Alpes-de-Haute-Provence	51%	58%	65%	60%	73%	51%	80%
	Bouches-du-Rhône	78%	82%	88%	88%	85%	73%	88%
	Vaucluse	56%	63%	77%	66%	74%	56%	85%
Canal de Provence	Alpes-de-Haute-Provence	51%	58%	65%	60%	73%	51%	80%
	Hautes-Alpes	54%	62%	70%	65%	75%	55%	80%
	Bouches-du-Rhône	78%	82%	88%	88%	85%	73%	88%
	Var	68%	74%	83%	83%	79%	66%	85%
Canal de Marseille	Bouches-du-Rhône	58%	82%	88%	88%	85%	73%	88%
SIVOM Durance Lubéron	Vaucluse	58%	72%	78%	75%	81%	66%	85%
Agglopoie	Bouches-du-Rhône	70%	82%	88%	88%	85%	73%	88%
Pays de Martigues	Bouches-du-Rhône	56%	76%	82%	86%	82%	69%	88%

Tableau 43 : Evolution de rendements des réseaux de distribution d'eau potable selon les scénarios territoriaux

Hypothèses sur l'origine de l'eau

Selon les scénarios, différentes hypothèses sont prises sur l'origine de l'eau. Ainsi une partie des consommations ne sont pas alimentées par le bassin Durance-Verdon. De nombreuses communes des Bouches-du-Rhône et du Var par exemple, ne sont qu'en partie alimentées par le bassin.

Pour les demandes en eau effectivement alimentées par le bassin, des hypothèses sont prises sur l'origine de l'eau dans le bassin (surface ou souterraine) :

- Scénario *Tendanciel* :
 - o Canal de Provence : +5% en direction des départements des Bouches-du-Rhône et du Var ;
- Scénario *Spécialisation* :
 - o Canal de Provence : +20% en direction du département des Bouches-du-Rhône et +25% en direction du département du Var ;
- Scénario *Investissement* : l'hypothèse est que les canaux assument des usages multiples. Entre autres, ceux-ci alimentent des réseaux de distribution d'eau potable. Les évolutions à l'horizon 2050 sont :

- SIVOM Durance Lubéron : la part prélèvement dans le canal passe à 66% au lieu de 33% ;
- Canal de Provence : extension vers les communes du littoral et passage d'une alimentation de secours à une alimentation pérenne pour la plupart des communes déjà desservies par le réseau : +25% en direction du département des Alpes-de-Haute-Provence et +10% vers les départements des Bouches-du-Rhône et du Var ;
- Bassin de l'Escale : 20% des besoins sont prélevés en surface via le canal de Brillanne plutôt que dans les nappes ;
- Bassin de Cadarache : 20% des besoins sont prélevés dans les eaux de surface via le canal de Manosque plutôt que dans les nappes ;
- Périmètre canal Mixte Carpentras + Canal de Provence Robion : 30% des prélèvements se font par les canaux de surface (Mixte Carpentras et Canal de Provence Robion) plutôt que par la nappe ;
- Agglopolé : les prélèvements sur le canal sont portés à 25%, au lieu de 15% actuellement, au détriment des prélèvements en nappe ;
- Pays de Martigues : 45% de prélèvements sont assurés par le canal ;
- Scénario *Crise* : arrêt de l'alimentation des communes qui étaient desservies partiellement (en secours) par le Canal de Provence en 2010 ;
- Scénario *Ecologie* : la stratégie est plutôt la recherche de sources locales que des transferts (Canal de Provence : - 5% quel que soit le département desservi).

Résultats pour les différents périmètres pour chaque scénario

La Figure 100 présente l'évolution de la demande en eau potable pour les différents périmètres étudiés et la Figure 101 la demande totale en eau potable par scénario.

La demande est plutôt stable pour le scénario *Tendanciel* (+10%) et les scénarios *Spécialisation* et *Ecologie* (entre -5 et -6%). Pour ces deux derniers scénarios, l'augmentation des besoins due à la croissance de la population est compensée par l'amélioration du rendement des réseaux et aussi une demande unitaire plus faible pour le scénario *Ecologie*. Deux scénarios se distinguent, le scénario *Crise* avec une demande en baisse de 30% due principalement à la diminution de la population et de la demande unitaire (effet baisse des revenus) et le scénario *Investissement* avec une augmentation de la demande de plus de 75% justifiée par plusieurs éléments : une forte croissance de la population, une amélioration modérée du rendement des réseaux et une demande unitaire en hausse de 30% (effet conjugué de la baisse du prix de l'eau, de l'augmentation de l'habitat pavillonnaire et de la demande touristique importante).

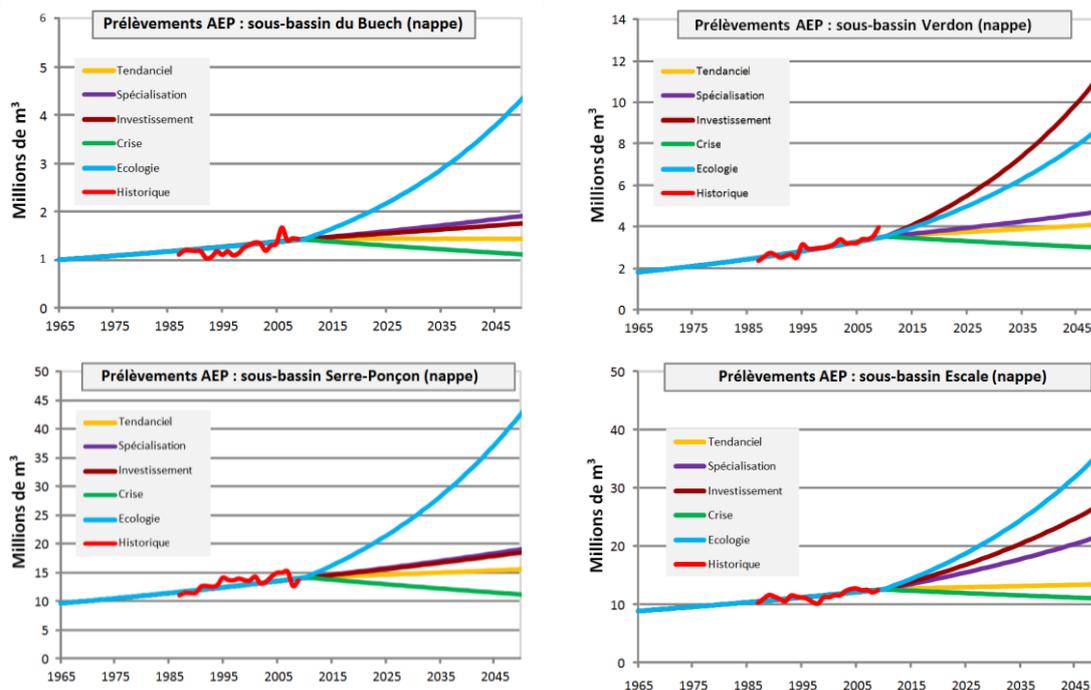


Figure 100 : Prélèvements en AEP dans les différents périmètres et sous-bassins hydrographiques

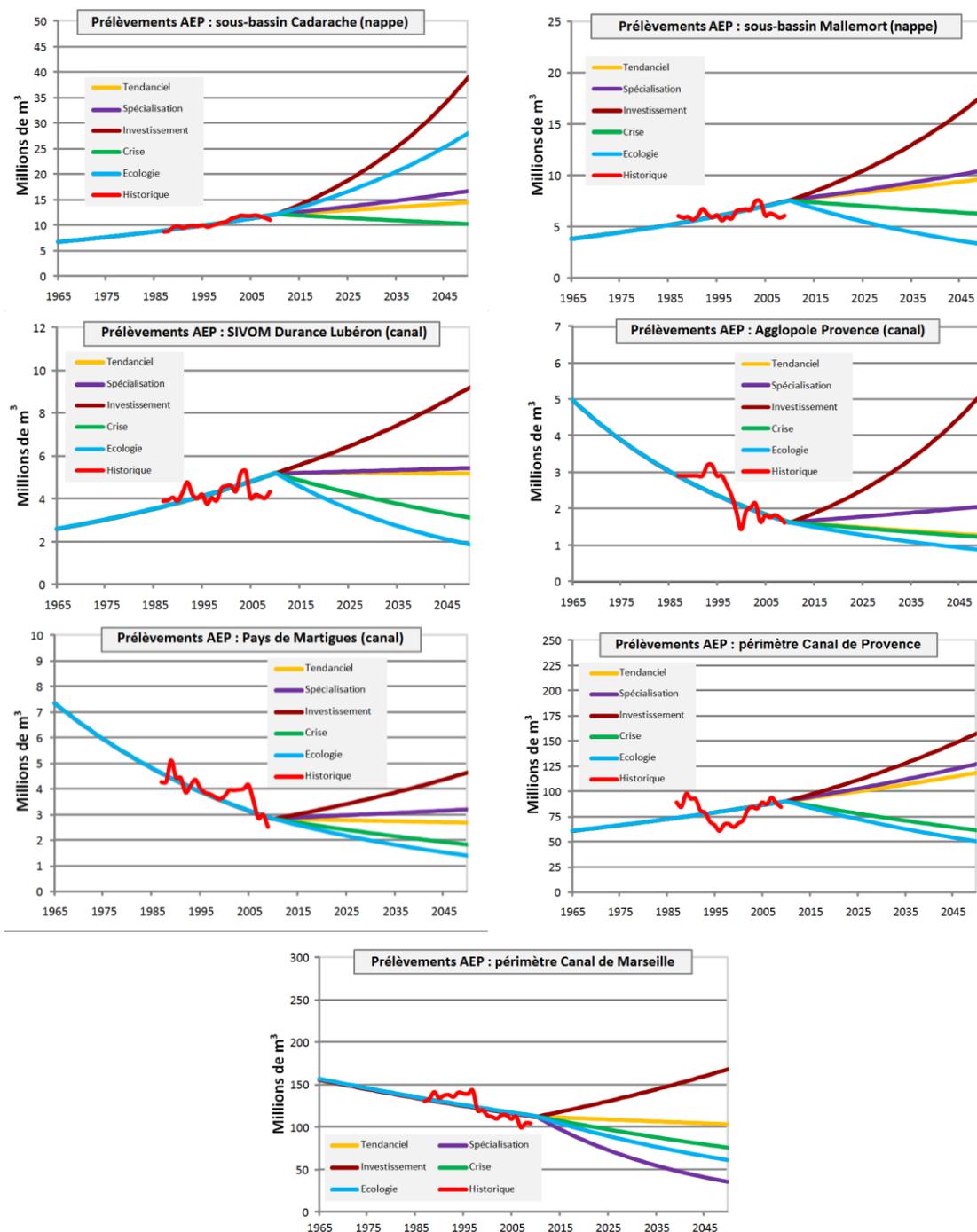


Figure 100 : Prélèvements en AEP dans les différents périmètres et sous-bassins hydrographiques (suite)

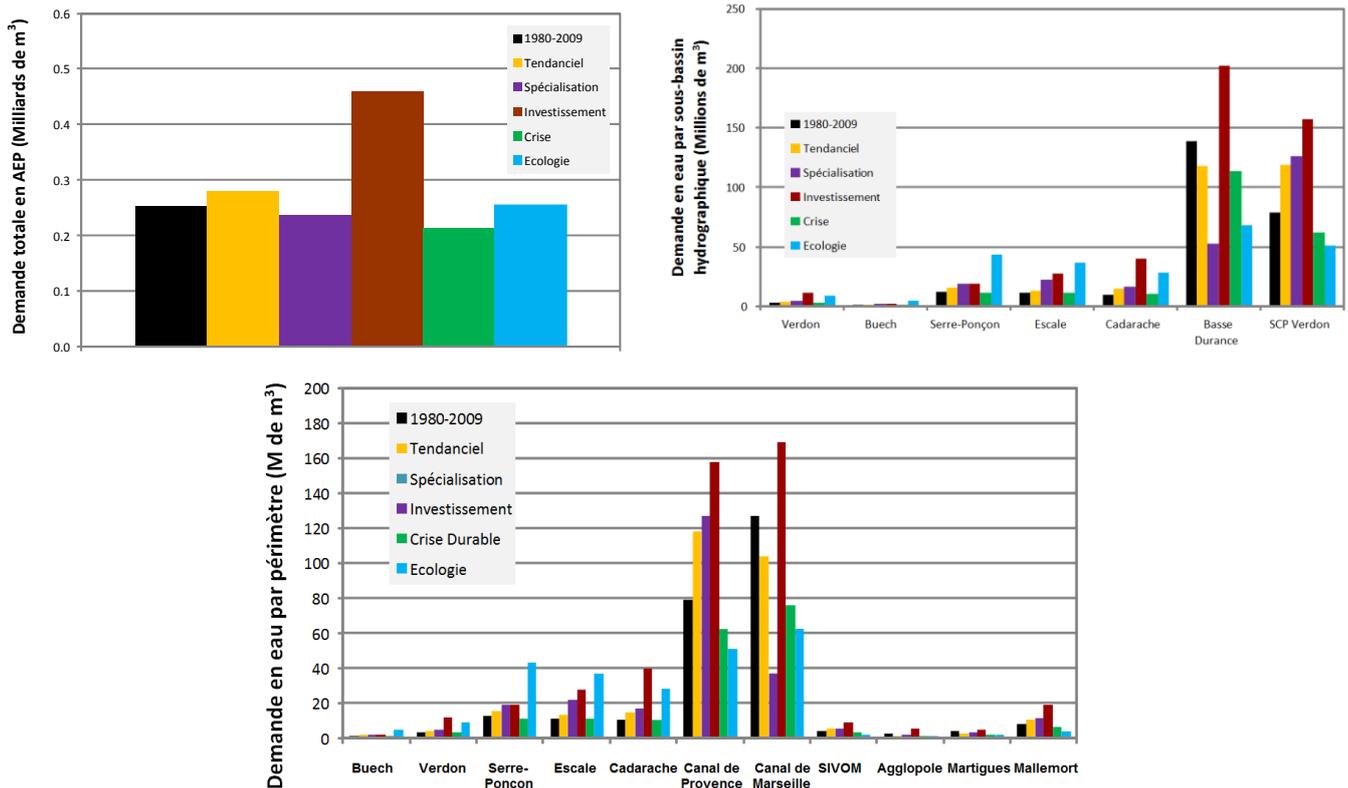


Figure 101 : Demande totale en AEP, par périmètre et par sous-bassin hydrographique

La Figure 101 fait la synthèse du niveau de demande en eau potable par périmètre pour les scénarios. Sans surprise, les demandes les plus importantes viennent des réseaux du Canal de Provence et du Canal de Marseille qui alimentent en grande partie les communes les plus denses du littoral et du pourtour de l'étang de Berre et du Golfe de Fos. Ces deux demandes représentent entre 50% pour le scénario *Ecologie* et 80% pour le scénario *Tendanciel* de la demande totale en eau potable. Pour le scénario *Ecologie*, la Figure 101 montre bien une distribution plus « équilibrée » des demandes entre les périmètres du canal de Marseille et du Canal de Provence et les sous-bassins intermédiaires de Cadarache, Escale et Serre-Ponçon due à une meilleure répartition de la population entre zones urbaines et zones rurales que suppose le scénario *Tendanciel*. La Figure 101 présente aussi la répartition des demandes en fonction des sous-bassins hydrographiques. Là aussi nous constatons que les demandes en eau potable se concentrent sur le bassin du Verdon *via* le Canal de Provence et le bassin de la Durance. En comparaison, les demandes sur les autres sous-bassins sont faibles.

5. Besoins pour l'industrie en 2050

La quantification de l'évolution des prélèvements industriels s'appuie sur l'évolution historique et les éléments de contexte induits par les différents scénarios. En termes de quantification, ces évolutions se traduisent par des baisses ou des augmentations de la demande en eau équivalent à des fermetures ou à des créations d'unités de production pour différents secteurs d'activité (unité de raffinage, de construction d'équipement, de chimie – plasturgie....

Du fait, des échanges de volumes entre le Canal de Provence (prises de Boutre et de Saint-Chamas) et du canal de Marseille, l'évolution des prélèvements industriels est traitée globalement à l'échelle de l'ensemble des périmètres desservie par ces réseaux puis répercutée de façon identique sur chacune des prises (rapport des volumes distribués par chacune des prises identique à celui de 2010).

De plus tous les scénarios prennent en compte l'évolution prévue des prélèvements pour les sites Cadarache, CEA et ITER, et notamment l'alimentation des systèmes de refroidissement des réacteurs nucléaires RJH et RES du CEA et du réacteur Tokamak d'ITER ainsi que l'alimentation de l'unité de production en eau potable (UPEP) du CEA. A l'échelle du bassin, notons que cette demande future compense en partie la diminution globale des prélèvements industriels induite par certains scénarios.

Scénario Tendanciel

Le processus de délocalisation des activités manufacturières se poursuit ainsi que la fermeture d'unités de pétrochimie du fait de la contraction de la demande en fioul lourd. A l'échelle de la région, l'industrie s'articule toujours autour des filières historiques, énergie, transport aéronautique, chimie... regroupant quelques grands groupes d'envergure autour desquels gravite une myriade de petites et très petites entreprises dépendantes de ces donneurs d'ordre. En parallèle, sous la contrainte de la réglementation, les grands établissements très consommateurs cherchent à faire des économies d'eau en faisant évoluer leurs circuits de refroidissement et de process.

Du point de vue quantitatif, la baisse des prélèvements industriels se poursuit sur le même rythme que celui constaté durant la période 1965-2009. Cette évolution entraîne une baisse globale des prélèvements industriels effectués sur le bassin de 18% (-17 Mm³) sur la période 2050-2009. Cette baisse est de -54% sur le périmètre desservi par la SCP et la SEM, soit une diminution des besoins en eau d'environ 33 Mm³ (le besoin en eau d'une unité de pétrochimie et raffinage est d'environ 12 Mm³). La baisse des besoins en eau industrielle induite par le scénario *Tendanciel* est compensée par l'augmentation des besoins en eau du site de Cadarache.

Scénario Spécialisation

Comme pour le scénario *Tendanciel*, le processus de délocalisation des activités manufacturières se poursuit jusqu'en 2015. A partir de 2016, la région qui s'était jusqu'alors positionnée en faveur des activités de haute technologie et de pointe mais aussi des services aux entreprises, opte pour le maintien *a minima* d'activités de production dans les secteurs très spécialisés considérés comme essentiel pour le développement des activités de recherche et de développement.

Les marges de manœuvre d'économie d'eau sont faibles du fait des coûts d'amélioration des techniques. Dans ce domaine, la région et l'Agence de l'Eau RMC préfèrent financer des actions permettant d'améliorer l'efficacité des réseaux d'irrigation gravitaire.

Du point de vue quantitatif, ces évolutions entraînent une quasi-stabilité de la demande en eau, +2% entre 2009 et 2050. La baisse globale des besoins en eau industrielle entre 2009 et 2015, étant compensée par l'augmentation des prélèvements sur le site de Cadarache. Sur le périmètre SCP /SEM, la baisse des besoins est deux fois plus faible que pour le scénario *Tendanciel*, environ -24% (14.5 Mm³).

Scénario Investissement

Le processus de délocalisation des activités manufacturières se poursuit jusqu'en 2015. A partir de 2016, l'objectif de la région est de construire une politique industrielle cohérente sur le territoire afin de profiter de la dynamique de ré-industrialisation en cours au niveau européen. Par rapport aux années antérieures, la région change radicalement de position en mettant en œuvre un arsenal de mesures destinées à favoriser l'implantation d'activités de production autour des secteurs historiques mais aussi le développement d'entreprise à taille intermédiaire (ETI) capables de s'organiser, de se spécialiser et d'investir pour se positionner sur des marchés nationaux et internationaux.

La question environnementale n'étant pas une priorité ainsi que le faible coût de l'eau n'incitent guère les entreprises utilisatrices de la ressource à économiser celle-ci et à investir dans l'amélioration de l'efficacité des circuits de refroidissement et de process.

Du point de vue quantitatif, la reprise industrielle entraîne une augmentation de la demande industrielle sur le bassin de 43% (environ 138 Mm³). Sur le périmètre SEM / SCP, le niveau de prélèvement est identique à celui de la période 90-2009. L'effet de la ré-industrialisation est surtout sensible en Moyenne Durance (bassin de Cadarache) autour des agglomérations Manosque / Pertuis / Saint-Paul-lès-Durance, avec une augmentation de 30% des besoins en eau industrielle (non compris l'augmentation due à l'extension du site de Cadarache).

Scénario Crise

Depuis l'année 2015, la région connaît un processus approfondi de désindustrialisation avec en toile de fond une crise économique durable comme facteur aggravant. La poursuite des délocalisations des industries manufacturières a fini par priver les activités de recherche et de développement. Le développement des activités high-tech ainsi que les services aux entreprises a été interrompu par l'affaiblissement du secteur

industriel. L'économie s'est recentrée encore plus sur les activités liées au patrimoine et au tourisme mais la perte d'attractivité globale de la région ainsi que le déclin de la démographie pénalisent durement ces activités. Restent quelques activités subalternes de support aux grandes firmes internationales (centre d'appels, traitement, recyclage...). Au niveau local, quelques activités artisanales dans le travail du textile, de l'ameublement, du bois, de l'alimentaire se développent mais ces métiers restent peu consommateurs d'eau.

Du point de vue quantitatif, ces évolutions entraînent la fermeture ou la baisse de production de plusieurs unités sur l'ensemble du territoire. La diminution des prélèvements sur le bassin est de -48%.

Scénario Ecologie

Le déroulement de ce scénario est identique à celui du scénario *Spécialisation*. La seule différence est que la protection de l'environnement est devenue une priorité qui s'impose à tous les secteurs d'activités. Dans ce contexte, la réglementation promeut l'utilisation des meilleurs techniques disponibles (MTD) pour les nouvelles unités de production ou lors du renouvellement des équipements.

Par rapport au scénario spécialisation, la demande en eau industrielle continue de diminuer légèrement après l'année 2015. Au final, la diminution des prélèvements sur le bassin est d'environ -13%.

L'examen des évolutions (Tableau 44) montre que seul le scénario *Investissement* propose une hausse sensible des prélèvements, à l'opposé, et sans surprise, le scénario *Crise* est le moins consommateur.

Scénario	Total		Verdon		Buëch		Serre-Ponçon		Escale		Cadarache		Mallemort*		SCP/SEM**	
	Mm ³	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)
1980-2009	96.48		0		0		0.85		1.8		28.63		2.94		62.26	
Pst_Niv2010 (TP 2010)	91.65		0		0		0.34		1.77		46.5		2.67		40.37	
Fut_Niv2010 (TF 2010)	91.65		0		0		0.34		1.77		46.5		2.67		40.37	
Tendancier	79.14	-18.0	0		0		0.09	-88.9	1.72	-4.3	46.07	60.9	2.11	-28.3	29.15	-53.2
Spécialisation	98.41	2.0	0		0		0.27	-68.6	1.76	-2.1	46.33	61.8	2.21	-24.9	47.84	-23.2
Investissement	137.9	42.9	0		0		0.44	-48.4	1.97	9.7	69.52	142.8	3.4	15.5	62.57	0.5
Crise	50.86	-47.3	0		0		0.31	-62.9	0.82	-54.6	19.03	-33.5	2.05	-30.4	28.65	-54.0
Ecologie	83.9	-13.0	0		0		0.44	-48.4	1.77	-1.5	45.16	57.7	2.13	-27.7	34.4	-44.7

Tableau 44 : Evolution des prélèvements industriels (* Les prélèvements Mallemort représentent l'ensemble des prélèvements à usage industriel des territoires alimentés à partir du bassin de Mallemort (Basse Durance) à l'exception des prélèvements effectués sur le Canal de Provence et le Canal de Marseille ; ** Les prélèvements SCP/SEM intègrent les prélèvements à usage industriel effectués sur le Canal de Provence (prises de Boutre et de Saint-Chamas) et le Canal de Marseille)

6. Besoins pour les loisirs en 2050

La quantification des besoins pour les activités de loisir utilisatrices de la ressource suit la même méthodologie que celle employée pour l'industrie. Le travail a donc consisté à ajouter des activités ou étendre celles en place (golfs, thermes, bases de loisirs aquatiques, parcs animaliers), les besoins futurs étant estimés à partir de ratios moyens par type d'activités (exemple : 300 000 m³/an pour un golf 36 trous, 100 000 m³/an pour un centre aquatique, 100 000 m³/an pour un établissement thermal...). Pour la production de neige artificielle, des hypothèses d'évolution de surfaces enneigées ont été faites sur la base d'un ratio de 4 000 m³/ha.

Hormis le scénario *Crise*, tous les scénarios anticipent un développement plus ou moins important des activités de loisir et donc une augmentation des besoins en eau (Tableau 45). Toutefois, comme dit plus avant, les demandes restent très marginales par rapport aux demandes des autres secteurs d'activité.

Scénario	Total		Verdon		Buëch		Serre-Ponçon		Escale		Cadarache		Mallemort		SCP/SEM	
	Mm ³	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)
1980-2009	4.87		0.13		0.04		0.58		0.32		0.78		0.83		2.17	
Pst_Niv2010 (TP 2010)	8.71		0.15		0.15		2.34		0.63		0.3		1.6		3.55	
Fut_Niv2010 (TF 2010)	8.71		0.15		0.15		2.34		0.63		0.3		1.6		3.55	
Tendancier	11.04	126.8	0.32	139.0	0.33	678.0	2.47	323.3	0.63	93.8	0.3	-61.7	2.9	249.4	4.1	88.7
Spécialisation	8.93	83.5	0.36	168.6	0.33	678.0	2.47	323.3	0.63	93.8	0.3	-61.7	1.6	92.8	3.25	49.5
Investissement	14.7	202.0	0.5	278.3	0.45	968.6	2.58	342.5	0.82	153.0	1.5	91.5	4.15	400.1	4.7	116.2
Crise	2.16	-55.6	0.08	-39.9	0	-90.1	0.01	-98.1	0.16	-50.6	0.15	-80.2	0.65	-21.7	1.1	-49.4
Ecologie	12.18	150.1	0.17	26.9	0.28	562.6	2.41	314.0	0.74	129.9	0.95	21.6	3.64	338.3	3.98	83.1

Tableau 45 : Comme pour le Tableau 44, mais pour les prélèvements dédiés au tourisme

7. Demande globale et pression sur la ressource en 2050

Les volumes de prélèvements obtenus pour les différentes utilisations sont agrégés à l'échelle des différents périmètres (Tableau 17). Les volumes restitués au milieu naturel sont aussi calculés en utilisant des taux de consommations (ratio entre le volume non restitué et le volume prélevé) données par le Service de l'observation et des statistiques (SOeS, ex IFEN), 24% pour l'AEP et 7% pour l'industrie sauf pour les rejets directs, ou le taux est 1%. Pour l'irrigation et l'arrosage, les volumes infiltrés dans le sol sont donnés par le modèle de besoin en eau (voir chapitre précédent). Nous avons tenu compte du bassin dans lequel l'eau non consommée est restituée, bassin d'origine, bassin en aval ou hors domaine (le retour se fait à l'extérieur du bassin hydrographique Durance – Verdon).

En dernier ressort, le rendement des canaux d'irrigation ou d'adduction a été introduit dans le modèle d'agrégation. Un rendement global par périmètre a été estimé sur la base des données de l'Agence de l'Eau. Pour les principaux canaux, les lieux de rejet ont aussi été identifiés à l'aide de la base HYDRA afin d'établir des ratios de volumes rejetés dans les différents bassins. Différentes hypothèses d'évolution de ces rendements ont été faites en fonction des scénarios (Tableau 46).

Périmètre	2010	Tendanciel	Spécialisation	Investissement	Crise	Ecologie
Verdon Sainte-Croix	50	60	65	60	50	65
Buëch Serres	41	50	55	50	41	55
Durance Serre-Ponçon	30	36	40	36	30	40
Durance Escale	42	50	55	50	42	55
Durance Cadarache	30	36	40	36	30	40
Durance Saint-Estève	32	39	42	39	32	42
Durance Mallemort	26	31	35	31	26	35
Canal Mixte Carpentras	20	25	30	25	20	30
Durance Salon	40	48	52	48	40	52
Durance Bonpas	20	25	30	25	20	30
Canal de Provence Verdon	88	88	88	88	88	88
Canal de Marseille	76	82	87	82	76	87

Tableau 46 : Evolution des rendements des canaux de transport par secteur et par scénario (rendement moyen global pour l'ensemble des réseaux gravitaires du périmètre considéré)

En ce qui concerne les retours dans le milieu naturel, nous avons considéré que ceux-ci se faisaient à l'exutoire du bassin de prélèvement pour l'ensemble des réseaux, sauf en ce qui concerne :

- les périmètres du Canal de Provence, où la totalité des retours des différents réseaux se font hors bassin sauf pour les périmètres situés dans les bassins de l'Escale, Cadarache et Mallemort (périmètre de Castellane seulement),
- le périmètre du Canal Mixte Carpentras où 30% des volumes d'alimentation des canaux sont rejetés hors domaine,
- le périmètre de Durance Salon où 92% des volumes d'alimentation sont rejetés hors domaine,
- le périmètre de Bonpas où les restitutions se font hors bassin,
- le périmètre du canal de Marseille où les restitutions se font hors bassin.

Les Figure 102, Figure 103 et Figure 104 présentent l'évolution de l'ensemble des prélèvements par type d'usage (irrigation, arrosage, AEP, loisirs, industrie et alimentation des canaux) effectués sur le bassin hydrographique Durance-Verdon puis par grand sous-bassin : bassin du Buëch à l'amont de Serre, bassin de la Durance à l'amont de Serre-Ponçon, bassin de la Durance entre Serre-Ponçon et l'Escale, bassin de la Durance entre l'Escale et Cadarache et bassin aval de Cadarache (jusqu'au seuil de Bonpas) ainsi que le bassin du Verdon à l'amont de Sainte-Croix et celui situé entre Sainte-Croix et Cadarache. Il s'agit de moyenne de prélèvements sur les périodes 1980-2009 et 2035-2064. Nous avons retenu l'option « cycle fixe ». Le Tableau 47 et le Tableau 48 font la synthèse chiffrée des prélèvements moyens par scénario territorial.

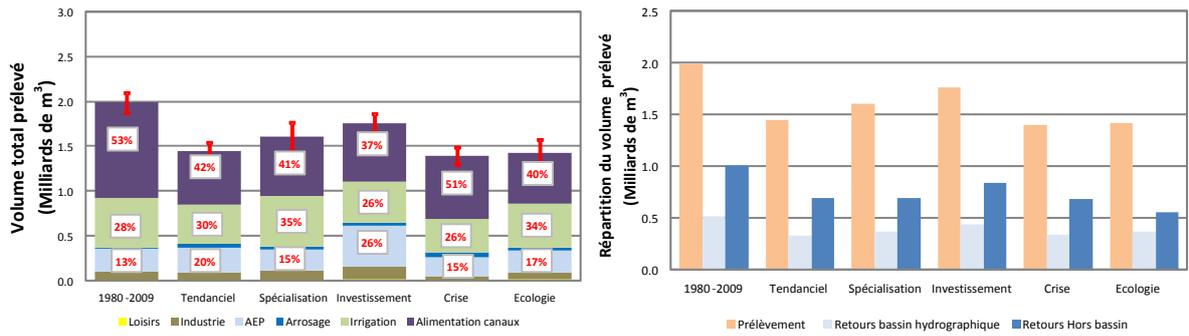


Figure 102 : Volumes totaux prélevés sur le système Durance-Verdon par usage et retours au milieu internes ou externes

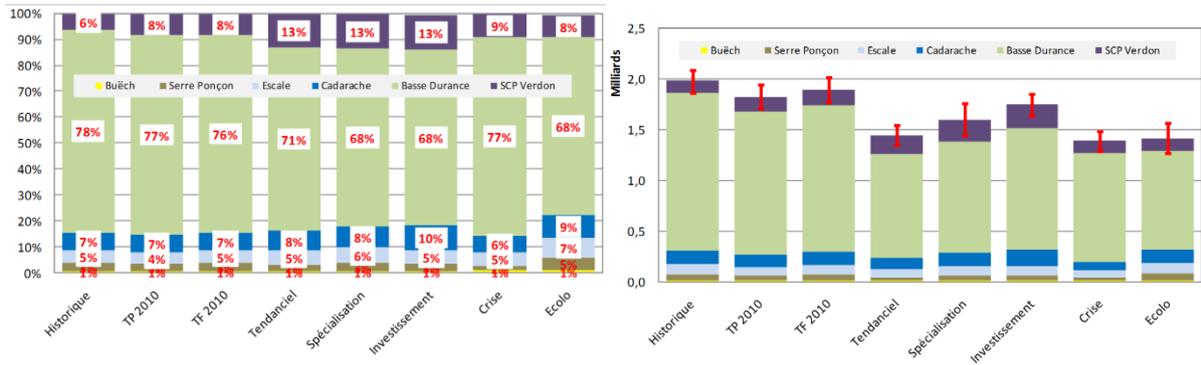


Figure 103 : Volumes totaux prélevés sur le système Durance-Verdon et répartition par usage par sous-bassin

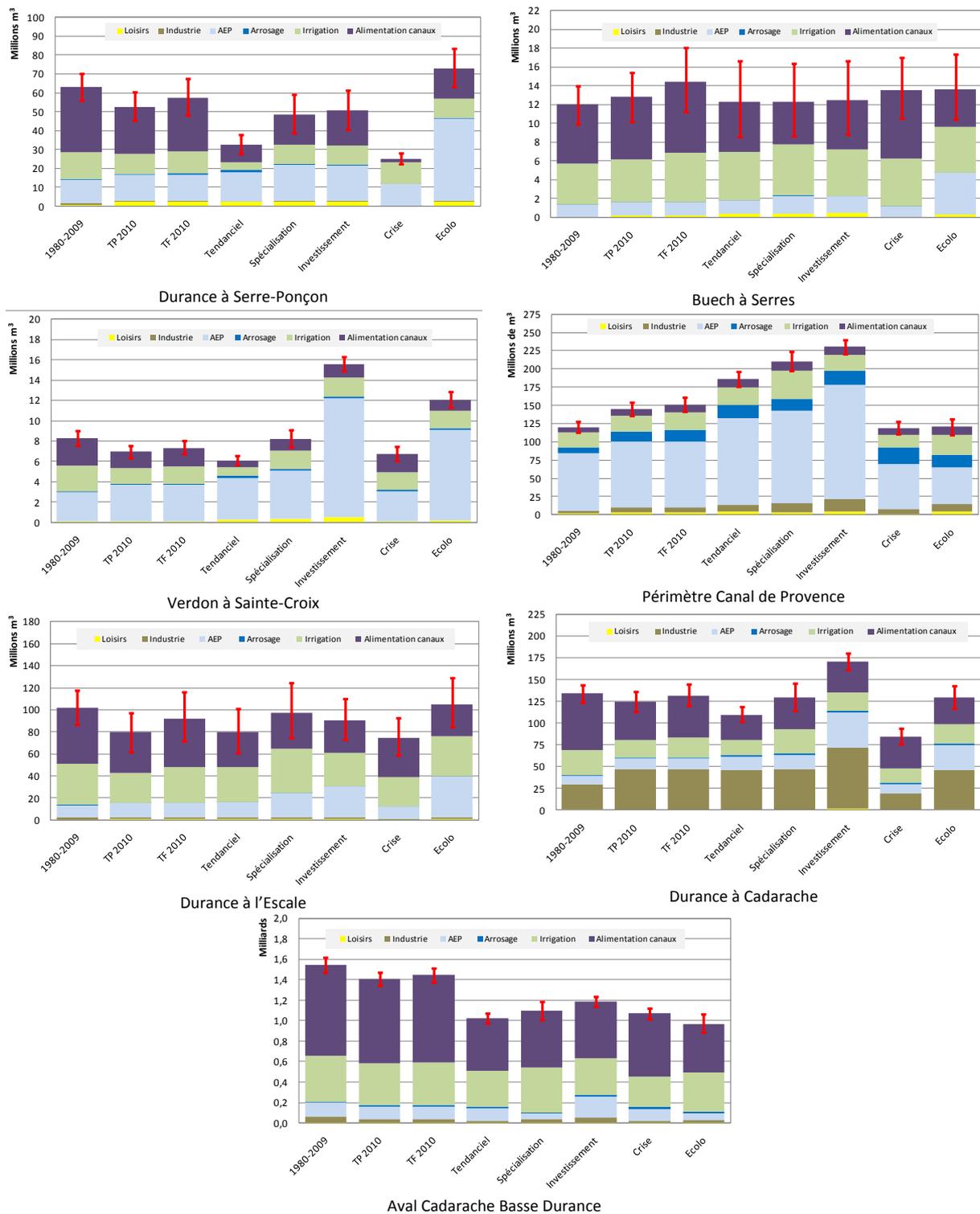


Figure 104 : Volumes totaux prélevés par usage pour chaque sous-bassin

La première conclusion est que les quatre scénarios proposés, tout comme le scénario *Tendanciel*, n'entraînent pas d'augmentation des prélèvements sur le bassin hydrographique par rapport à la période 1980-2010. La combinaison des hypothèses conduit donc plutôt à des baisses sensibles allant de -19% pour le scénario *Spécialisation* à -30% pour le scénario *Crise*. Le scénario *Tendanciel* conduit, lui, à une diminution de -26%. Concernant les utilisations de l'eau, les prélèvements destinés à l'arrosage augmentent pour tous les scénarios de 100 à 210%. Les prélèvements destinés aux loisirs sont aussi en hausse sauf pour le scénario *Crise*. Néanmoins, pour ces deux utilisations les volumes en jeu restent très faibles. La demande en eau d'irrigation seule est stable pour le scénario *Spécialisation* (+2%) mais en diminution sensible pour les autres scénarios (-

35% pour le scénario *Crise* et -22% pour le scénario *Tendanciel*). Ce dernier résultat n'a rien de surprenant. En effet, les deux scénarios *Ecologie* et *Spécialisation* qui anticipent une augmentation significative des surfaces irriguées et par conséquent des besoins en eau pour les cultures, font aussi l'hypothèse d'un passage plus ou moins important du mode d'irrigation gravitaire à celui par aspersion ; hypothèse qui conduit à une économie et à une utilisation plus efficace de la ressource.

Concernant l'AEP, l'évolution de la demande est fortement dépendante de deux paramètres, la population et sa répartition sur le territoire et le rendement des réseaux de distribution. Le niveau de consommation unitaire a aussi une incidence non négligeable sur la demande totale. Le scénario *Tendanciel* estime une demande légèrement supérieure à celle de la période 1980-2009, respectivement 0.28 et 0.26 milliards de m³ par an. La demande supplémentaire induite par l'augmentation de la population anticipée par l'INSEE est en partie compensée par l'amélioration du rendement des réseaux. De même, la demande évolue très peu pour les scénarios *Spécialisation* et *Ecologie*, 0.24 - 0.25 milliards de m³ par an. Là aussi, l'amélioration des rendements des réseaux permet de limiter la hausse des besoins en eau potable. Le scénario *Crise* se traduit par une baisse sensible de la demande, -0.25 milliards de m³, du fait d'un arrêt de la dynamique démographique alors que le scénario *Investissement*, à l'inverse, induit une forte augmentation de la demande, 0.45 milliards de m³, du fait de la forte croissance de la population résidentielle mais aussi touristique et d'une consommation unitaire plus importante que pour les autres scénarios induite par des revenus plus élevés et un faible coût de l'eau.

Enfin, la demande pour l'industrie augmente fortement pour le scénario *Investissement* qui fait de la reprise industrielle une de ces priorités, 0.14 milliards de m³, alors qu'elle était de moins de 95 Mm³ sur la période 1980-2009. Elle diminue considérablement dans le scénario *Tendanciel*, 80 Mm³ et encore plus pour le scénario *Crise*, 51 Mm³. Le scénario *Spécialisation* qui fait l'hypothèse d'une stabilisation de la crise industrielle à partir de 2025 avec un maintien *a minima* d'activités de production, support à des activités de recherche et développement estime la demande à 98 Mm³. Le scénario *Ecologie* fait la même hypothèse que le scénario précédent mais favorise aussi les investissements dans l'amélioration de l'efficacité des circuits de refroidissement et de process. Pour ce scénario, la demande s'établit à 84 Mm³.

En termes de répartition des prélèvements entre les différentes utilisations considérées (Figure 104), les scénarios n'induisent pas de différences très significatives. Hormis les volumes d'eau nécessaires au fonctionnement des canaux d'adduction dont la part varie entre 36% pour le scénario *Investissement* et 50% pour le scénario *Crise*, les prélèvements agricoles restent les plus importants. Par rapport à la période de référence ou ils représentent un peu moins de 30% des prélèvements totaux, leur part s'établit à 35-36% pour les scénarios *Ecologie* et *Spécialisation* et reste stable pour les autres. Tous les scénarios conduisent à une part des prélèvements AEP relativement plus importante que celle de la période 1980-2009, de 15% pour le scénario *Spécialisation* à 26% pour le scénario *Investissement* qui induit une augmentation plus forte de la population comparativement aux autres. Enfin, la part des prélèvements destinés aux autres usages reste très faible, 4 à 10% pour les usages industries / loisirs, voire marginal dans le cas de l'arrosage, moins de 4%.

Quel que soit le scénario considéré, un quart des prélèvements effectués sur le bassin sont réellement consommés. Les 3/4 retournent donc au milieu naturel. Ce ratio sensiblement plus élevé que la moyenne du territoire national, environ 18%, s'explique par l'importance des prélèvements pour l'irrigation. Il faut aussi noter que vu du bassin hydrographique, la consommation d'eau est nettement plus élevée du fait des transferts d'eau et retours au milieu importants en dehors du bassin. Vu sous cet angle, la consommation d'eau représente plus de 70% des prélèvements. Entre 60 et 68% des retours se font hors bassin hydrographique Durance-Verdon.

Les scénarios montrent toutefois des situations contrastées selon les sous-bassins. Sans surprise, une grande partie des demandes en eau sont prélevées en Basse Durance en aval du barrage de Cadarache, plus des 2/3 des volumes prélevés sur le système Durance-Verdon quel que soit le scénario. Entre 6 et 13%, le sont sur le bassin du Verdon, un peu moins de 10% sur le bassin de Cadarache et environ 5% sur le bassin de l'Escale. Les prélèvements effectués dans les bassins amont sont très faibles entre 6 et 10% selon les scénarios.

Périmètre desservi par le bassin Durance - Verdon

Scénario	Total		Loisir		Industrie		AEP		Arrosage		Irrigation		Fonctionnement des canaux		Retour dans le milieu naturel	
	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)
1980-2009	1988		4.87		96.48		255		16.03		554.96		1060.19		561.77	1003.04
Pst_Niv2010 (TP 2010)	1832		8.71		91.65		258		27.86		495.21		950.16		496.13	921.72
Fut_Niv2010 (TF 2010)	1897	3.6	8.71	0.0	91.65	0.0	258	0.0	31.46	12.9	516.93	4.4	990.41	4.2	521.81	929.27
Tendanciel	1449	-27.1	11.04	126.8	79.14	-18.0	284	11.3	38.45	139.9	432.95	-22.0	602.72	-43.1	362.63	695.87
Spécialisation	1603	-19.4	8.93	83.5	98.41	2.0	243	-4.7	31.48	96.4	565.48	1.9	655.32	-38.2	397.62	695.52
Investissement	1758	-11.6	14.7	202.0	137.9	42.9	458	79.3	37.73	135.4	451.83	-18.6	658.3	-37.9	467.24	835.88
Crise	1396	-29.8	2.16	-55.6	50.86	-47.3	212	-17.1	49.69	210.0	368.91	-33.5	713.07	-32.7	372.67	679.84
Ecologie	1423	-28.4	12.18	150.1	83.9	-13.0	241	-5.8	31.71	97.8	489.86	-11.7	564.8	-46.7	398.09	557.71

Tableau 47 : Prélèvements sur le système Durance-Verdon par scénario

Sous-bassin Durance Serre-Ponçon

Scénario	Total		Loisir		Industrie		AEP		Arrosage		Irrigation		Fonctionnement des canaux		Retour dans le milieu naturel	
	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)
1980-2009	63.17		0.58		0.85		12.4		0.36		14.44		34.54		34.54	0
Pst_Niv2010 (TP 2010)	52.69		2.34		0.34		14.09		0.45		10.32		25.14		25.14	0
Fut_Niv2010 (TF 2010)	57.55	9.2	2.34	0.0	0.34	0.0	14.09	0.0	0.58	27.9	11.66	12.9	28.55	13.5	28.55	0
Tendanciel	32.63	-48.4	2.47	323.3	0.09	-88.9	15.52	25.1	1.07	195.1	4.17	-71.1	9.31	-73.0	9.31	0
Spécialisation	48.49	-23.2	2.47	323.3	0.27	-68.6	19.07	53.7	0.58	59.6	10.1	-30.1	16.01	-53.6	16.01	0
Investissement	50.56	-20.0	2.58	342.5	0.44	-48.4	18.53	49.4	0.58	59.6	9.86	-31.7	18.57	-46.2	18.57	0
Crise	25.15	-60.2	0.01	-98.1	0.31	-62.9	11.21	-9.6	0.17	-54.3	11.61	-19.6	1.84	-94.7	1.84	0
Ecologie	72.86	15.3	2.41	314.0	0.44	-48.4	43.28	249.0	0.58	59.6	10.11	-30.0	16.03	-53.6	16.03	0

Sous-bassin Buëch Serres

Scénario	Total		Loisir		Industrie		AEP		Arrosage		Irrigation		Fonctionnement des canaux		Retour dans le milieu naturel	
	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)
1980-2009	11.97		0.04		0		1.26		0.05		4.32		6.29		8.09	0
Pst_Niv2010 (TP 2010)	12.8		0.15		0		1.42		0.06		4.54		6.62		8.57	0
Fut_Niv2010 (TF 2010)	14.4	12.6	0.15	0.	0		1.42	0.	0.08	23.5	5.18	14.2	7.57	14.3	9.47	0
Tendanciel	12.29	2.7	0.33	678.	0		1.42	12.4	0.08	42.1	5.11	18.3	5.36	-14.9	7.15	0.0
Spécialisation	12.24	2.2	0.33	678.	0		1.9	50.7	0.08	42.1	5.43	25.7	4.5	-28.4	6.66	0.0
Investissement	12.42	3.8	0.45	968.6	0		1.74	37.7	0.08	42.1	4.96	14.8	5.2	-17.4	7.31	0.0
Crise	13.53	13.	0	-90.1	0		1.12	-11.4	0.08	42.4	5.01	16.0	7.32	16.3	8.87	0.0
Ecologie	13.61	13.7	0.28	562.6	0		4.4	248.7	0.08	42.1	4.83	11.9	4.02	-36.2	7.97	0.0

Sous-bassin Verdon Sante-Croix

Scénario	Total		Loisir		Industrie		AEP		Arrosage		Irrigation		Fonctionnement des canaux		Retour dans le milieu naturel	
	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)
1980-2009	8.28		0.13		0		2.83		0.09		2.57		34.54		2.66	0
Pst_Niv2010 (TP 2010)	6.95		0.15		0		3.52		0.13		1.51		25.14		1.64	0
Fut_Niv2010 (TF 2010)	7.33	5.5	0.15	0.0	0		3.52	0.0	0.16	20.5	1.67	10.8	28.55	13.5	1.83	0
Tendanciel	6.08	-26.6	0.32	139.0	0		4.09	44.50	0.22	137.60	0.79	-69.40	9.31	-73.00	0.67	0
Spécialisation	8.18	-1.3	0.36	168.6	0		4.73	67.30	0.16	75.00	1.85	-28.10	16.01	-53.60	1.08	0
Investissement	15.54	87.6	0.5	278.3	0		11.71	314.10	0.16	75.00	1.84	-28.50	18.57	-46.20	1.33	0
Crise	6.75	-18.6	0.08	-39.9	0		2.99	5.70	0.17	80.20	1.67	-34.90	1.84	-94.70	1.84	0
Ecologie	12.04	45.3	0.17	26.9	0		8.95	216.60	0.16	75.00	1.73	-32.60	16.03	-53.60	1.02	0

Tableau 48 : Prélèvements par secteur et par scénario

Périmètre desservi par le Canal de Provence (prises de Boutre et Vinon)																
Scénario	Total		Loisir		Industrie		AEP		Arrosage		Irrigation		Fonctionnement des canaux		Retour dans le milieu naturel	
	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)
1980-2009	120.32		2.17		2.85		78.93		7.92		21.18		7.27		0	843.88
Pst_Niv2010 (TP 2010)	145.26		3.55		6.29		90.06		14.55		21.73		9.07		0	810.23
Fut_Niv2010 (TF 2010)	151	4.0	3.55	0.0	6.29	0.0	90.06	0.0	16.41	12.8	24.47	12.6	10.22	12.7	0	817.78
Tendancier	185.91	54.5	4.1	88.7	9.67	239.2	118.16	49.7	19.24	143.1	23.93	13.0	10.79	48.4	0	594.95
Spécialisation	210.59	75.0	3.25	49.5	13.07	358.4	126.34	60.1	16.41	107.3	37.93	79.1	13.59	86.8	0	628.78
Investissement	230.19	91.3	4.7	116.2	16.57	481.3	156.96	98.9	18.95	139.3	22.62	6.8	10.39	42.9	0	652.14
Crise	119.2	-0.9	1.1	-49.4	6.63	132.5	62.04	-21.4	22.31	181.8	17.23	-18.7	9.88	35.9	0	577.61
Ecologie	120.51	0.2	3.98	83.1	10.22	258.5	50.94	-35.5	16.57	109.3	27.72	30.9	11.07	52.2	0	485.34

Les retours vers le milieu hors bassin intègrent les retours par infiltration de l'ensemble des surfaces irriguées alimentées via le bassin Durance - Verdon et situées en dehors de celui-ci plus les retours des autres usages alimentés via le canal de Provence. Les retours dans le bassin sont marginaux.

Sous-bassin Durance Escale																
Scénario	Total		Loisir		Industrie		AEP		Arrosage		Irrigation		Fonctionnement des canaux		Retour dans le milieu naturel	
	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)
1980-2009	102		0.32		1.8		11.2		0.27		37.44		51.01		68.64	0
Pst_Niv2010 (TP 2010)	79.61		0.63		1.77		12.6		0.32		27.18		37.13		52.46	0
Fut_Niv2010 (TF 2010)	91.86	15.4	0.63	0.0	1.77	0.0	12.6	0.0	0.38	19.6	32.33	19.0	44.17	18.9	59.48	0
Tendancier	79.54	-22.1	0.63	93.8	1.72	-4.3	13.4	19.6	0.38	39.1	32.18	-14.1	31.25	-38.7	46.79	0
Spécialisation	97.46	-4.5	0.63	93.8	1.76	-2.1	21.9	95.5	0.38	38.0	40.22	7.4	32.6	-36.1	54.42	0
Investissement	90.33	-11.5	0.82	153.0	1.97	9.7	27.4	144.8	0.38	39.1	30.24	-19.2	29.54	-42.1	57.9	0
Crise	74.43	-27.1	0.16	-50.6	0.82	-54.6	11	-1.3	0.39	42.7	26.1	-30.3	35.91	-29.6	48.84	0
Ecologie	104.7	2.6	0.74	129.9	1.77	-1.5	36.8	229.4	0.38	38.0	35.9	-4.1	29.06	-43.0	61.84	0

Sous-bassin Durance à Cadarache																
Scénario	Total		Loisir		Industrie		AEP		Arrosage		Irrigation		Fonctionnement des canaux		Retour dans le milieu naturel	
	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)
1980-2009	133.83		0.78		28.63		9.95		0.96		28.66		64.84		104.69	0
Pst_Niv2010 (TP 2010)	124.33		0.3		46.5		12.09		1.63		20.29		43.53		96.99	0
Fut_Niv2010 (TF 2010)	131.51	5.8	0.3	0.0	46.5	0.0	12.09	0.0	1.88	15.7	22.53	11.1	48.21	10.7	101.47	0
Tendancier	109.69	-18.0	0.3	-61.7	46.07	60.9	14.5	45.8	1.99	106.6	17.52	-38.9	29.31	-54.8	83.22	0
Spécialisation	129.23	-3.4	0.3	-61.7	46.33	61.8	16.65	67.4	1.88	95.5	27.48	-4.1	36.58	-43.6	92.04	0
Investissement	170.16	27.1	1.5	91.5	70.52	146.3	39.67	298.7	1.99	107.2	20.98	-26.8	35.5	-45.2	135.19	0
Crise	84.7	-36.7	0.15	-80.2	19.03	-33.5	10.24	3.0	2.22	130.3	15.93	-44.4	37.13	-42.7	64.07	0
Ecologie	129.02	-3.6	0.95	21.6	45.16	57.7	28.18	183.3	1.88	95.5	22.28	-22.3	30.56	-52.9	93.79	0

Périmètre desservi par le bassin de la Basse Durance - Aval Cadarache																
Scénario	Total		Loisir		Industrie		AEP		Arrosage		Irrigation		Fonctionnement des canaux		Retour dans le milieu naturel	
	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm^{3}	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)	Mm ³	Variation (%)
1980-2009	1548		0.83		62.35		138.74		6.37		446.34		893.57		326.63	159.17
Pst_Niv2010 (TP 2010)	1410		1.6		36.74		124.47		10.72		409.65		827.02		296.46	111.5
Fut_Niv2010 (TF 2010)	1444	2.4%	1.6	0.0%	36.74	0.0%	124.47	0.0%	11.98	11.7%	419.09	2.3%	849.86	2.8%	306.4	111.5
Tendancier	1022	-34.0%	2.9	249.4%	21.59	-65.4%	117.21	-15.5%	15.48	143.0%	349.26	-21.8%	516.03	-42.3%	198.03	100.93
Spécialisation	1097	-29.2%	1.6	92.8%	36.98	-40.7%	52.61	-62.1%	11.99	88.3%	442.47	-0.9%	550.96	-38.3%	206.49	66.74
Investissement	1189	-23.2%	4.15	400.1%	49.4	-20.8%	201.72	45.4%	15.59	144.8%	361.33	-19.0%	557.77	-37.6%	220.68	183.74
Crise	1073	-30.7%	0.65	-21.7%	24.07	-61.4%	113.03	-18.5%	24.37	282.7%	291.36	-34.7%	619.15	-30.7%	235.8	102.23
Ecologie	970.3	-37.3%	3.64	338.3%	26.3	-57.8%	67.97	-51.0%	12.07	89.5%	387.28	-13.2%	473.03	-47.1%	175.17	72.37

Les retours vers le milieu hors bassin ne comprennent pas les retours de l'irrigation (ceux-ci sont comptabilisés sur le périmètre desservi par le Canal de Provence)

Tableau 48 : Prélèvements par secteur et par scénario (suite)

8. Sensibilité à l'efficacité des réseaux à surface libre et économies d'eau associées

Cette section veut apporter des compléments sur l'effet des hypothèses d'amélioration du fonctionnement et de la performance des réseaux (conception - modernisation - régulation du réseau - entretien des installations, règle de gestion collective, pilotage des arrosages...). La faisabilité de ces améliorations n'est pas l'objet de cette section.

Ainsi, pour les scénarios *Spécialisation* et *Ecologie*, une amélioration des rendements de 10 à 15% en 35 ans, hypothèse est envisagée. Elle s'inscrit dans une logique territoriale : dans le scénario *Spécialisation* notamment, il est précisé que la région qui dispose de nombreuses prérogatives pour mettre en œuvre ces choix de développement est riche et prospère et que sa politique est basée sur la conservation, voire le développement de son agriculture aidée en cela par des subventions et des aides adéquates.

Pour rappel :

- l'efficacité de conduction ou hydraulique d'un réseau de distribution est égale au rapport « volumes d'eau distribués aux usagers / volume d'eau prélevé dans le milieu, un barrage ou un canal maître », *i.e.* ce terme ne tient pas compte des pertes au niveau des parcelles, pertes dues au mode d'irrigation (gravitaire, aspersion ou micro irrigation) et aux pratiques des exploitants (débit, durée et fréquence des arrosages...);
- l'alimentation d'un canal représente donc le volume d'eau « perdu » par infiltration dans le sol et par évaporation sur le linéaire du réseau et par colature en bout de réseaux (canaux primaires, secondaires ou tertiaires);
- les pertes par colature représentent l'eau non utilisée par les usagers qui s'écoule gravitairement vers les exutoires et ouvrages de décharge en aval. Ces pertes sont de loin les pertes les plus importantes et constituent la principale voie d'amélioration de l'efficacité d'un réseau de distribution.

Pour un réseau dit « gravitaire », l'efficacité hydraulique est en moyenne de l'ordre de 30 - 40%. La plupart des études réalisées montre qu'il est techniquement et financièrement possible d'atteindre des rendements proches de 60%. Certaines techniques d'amélioration, comme par exemple une régulation automatisée par l'amont, ne sont pas forcément coûteuse.

Une étude du CEMAGREF (1997) réalisée sur plus de 300 canaux d'irrigation en France conduit au même constat. Une amélioration de l'efficacité de 10 à 15% sur 35 ans des réseaux, dont les rendements sont actuellement très faibles, semble être un objectif possible à atteindre dans le contexte des scénarios *Spécialisation et Ecologie*. Nous ne disposons pas de retour sur le niveau d'amélioration obtenu par les travaux de régulation entrepris ces dernières années dans le cadre de partenariats canaux/EDF, ni sur les coûts des travaux. Néanmoins, notons que selon le SOURCE (SOGREAH *et al.*, 2010), la modernisation de quelques périmètres agricoles a permis des économies de l'ordre de 100 à 200 Mm³/an, l'information est plutôt incomplète car il faudrait connaître les volumes distribués pour vraiment se faire une idée de l'amélioration du fonctionnement du canal.

A titre de comparaison, les résultats obtenus dans le cadre du projet R²D² 2050 donnent en termes d'économie d'eau sont présentés dans le Tableau 49. Ils permettent de mesurer la sensibilité du système aux modifications des rendements. Etant données les hypothèses d'amélioration (sauf pour le scénario *Crise*), ils conduisent tous à des économies d'eau par rapport à la situation « Sans » modification de l'efficacité des réseaux.

En complément, en partant de l'hypothèse d'une amélioration globale moyenne de 15% de l'efficacité des réseaux d'irrigation, en dehors des périmètres desservis par le Canal de Provence et par le Canal de Marseille et pour les conditions historiques de la période 1980 – 2009, l'économie moyenne d'eau est estimée à 400 Mm³/an. Le volume total prélevé pour l'usage irrigation passerait ainsi de 1631 Mm³/an à 1224 Mm³/an. L'usage irrigation comprend l'irrigation gravitaire et non gravitaire, l'arrosage ainsi que l'alimentation des canaux (ce qui n'est pas vrai pour les canaux à vocation multi-usages). Pour rappel : le volume total distribué actuellement (moyenne des années 1980-2009), pour l'irrigation et l'arrosage par le système Durance/Verdon est d'environ 571 Mm³/an. L'efficacité moyenne des réseaux de l'ensemble du bassin qui est aujourd'hui de l'ordre de 36% serait donc de 48% en 2050.

	Volume irrigation distribué (Mm ³)	Volume irrigation prélevé (Mm ³)	Efficacité moyenne des réseaux (%)	Economie d'eau (Mm ³)
Historique 1980-2009	571	1631	36	
Scénario <i>Tendancier</i>	471			
Sans		1310	36	
Avec		1074	44	235
Scénario <i>Spécialisation</i>	597			
Sans		1662	36	
Avec		1252	48	410
Scénario <i>Investissement</i>	490			
Sans		1370	36	
Avec		1148	43	221
Scénario <i>Crise</i>	409			
Sans		1130	36	
Avec		1130	36	0
Scénario <i>Ecologie</i>	522			
Sans		1457	36	
Avec		1086	48	370

Tableau 49 : Economies d'eau liées au rendement des réseaux par scénarios de territoire

L'amélioration du fonctionnement des réseaux, notamment par optimisation / modernisation de la régulation, est une mesure d'ordre structurel qui, historiquement et grâce aux économies d'eau réalisées, permet de réduire des tensions préexistantes entre usagers de la ressource. Quel que soit le contexte climatique, elle s'insère dans une logique d'utilisation raisonnée de la ressource disponible. Elle apparaît dans les objectifs des contrats de canaux et mobilise techniquement ou/et financièrement, outre les bénéficiaires directs connectés aux canaux, différents opérateurs du territoire (Agence de l'Eau, Conseil Régional, Conseils Généraux, SCP, EDF, etc.). La volonté d'économie d'eau est ancrée sur le territoire depuis de nombreuses années. Il semblait difficile d'occulter la dynamique ainsi engagée dans les trajectoires socio-économiques proposées. Elle est uniquement absente dans le scénario *Crise* pour des raisons de moyen. Dans certains scénarios élaborés, la politique de modernisation a même été renforcée en cohérence avec l'hypothèse d'un maintien ou d'un développement des activités agricoles accompagnées d'une extension des surfaces irriguées, sans pour autant que les actions engagées n'apparaissent sous le label « stratégie d'adaptation ». Il est acquis que ce sont des mesures dites « sans regret » qui, de fait, devraient s'avérer efficaces dans un contexte d'évolution du climat. Elles sont présentes même si nous n'avons pas pu mesurer le réalisme des investissements à réaliser pour atteindre les objectifs affichés en termes de rendement des canaux.

A la lumière des résultats (notamment ceux obtenus sous scénario Niv2010), la poursuite des travaux de modernisation des canaux semble capitale pour le système Durance-Verdon car les économies d'eau induites pourraient offrir des marges de manœuvre dans la gestion de l'eau et limiter les effets négatifs du changement global au cours du XXI^e siècle, et ceci quelle que soit la trajectoire socio-économique du territoire.

X. La gestion des ouvrages en 2050

Le modèle de gestion des grandes réserves hydrauliques présenté précédemment (section « Modélisation de la gestion des réserves, des besoins en eau pour les loisirs et les services écologiques », page 87) permet d'accéder à une modélisation du lien entre la ressource naturelle, sa mise à disposition pour des usages, sa valorisation pour le système électrique et les possibilités offertes par le plan d'eau en période estivale pour le tourisme (Hendrickx, 2014).

Il est exploité pour examiner les incidences du changement de climat et du territoire sur la capacité des trois grandes réserves hydrauliques de Serre-Ponçon, Sainte-Croix et Castillon à satisfaire les différents objectifs qui leur sont actuellement assignés dans leur exploitation sous hypothèses et hiérarchisation des objectifs actuellement en place sur le bassin et décrites précédemment.

Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les séries simulées du devenir de la ressource en eau naturelle, ainsi que sur les séries simulées de demande en eau des usages sur les différents sous-domaines. Tenant compte des contraintes de temps calcul, il a été nécessaire de limiter l'exploration des futurs possibles. Le futur hydro-climatique est décrit par un seul modèle hydrologique CEQUEAU (faute de temps) et par les dix projections climatiques échantillonnées. La demande en eau des usages est simulée aussi sur la base de ces dix climats et de six devenirs possibles du territoire et des usages évoqués dans la section : *Tendancier, Spécialisation, Investissement, Crise, Ecologie*. A ces cinq évolutions possibles, est adjoint le scénario *Niv2010* qui considère le territoire et les usages figés sur le niveau de l'année 2010. Les résultats sont obtenus avec la variante de MODIC considérant l'option « cycle fixe » (MODIC_CF).

Nous disposons donc au final de 60 futurs possibles pour l'étude des impacts du changement sur la gestion des grandes réserves hydrauliques. En temps présent, nous avons considéré une référence baptisée « *Histo* » qui permet d'avoir un regard sur l'historique du climat et des usages avec leur dynamique effectivement observée. Cet historique s'étend sur la période 1980-2004, plus courte que la référence 1980-2009 adoptée pour les simulations en temps présent PST. Le temps futur FUT correspond comme précédemment à la période de 30 ans correspondant à 2035-2064.

1. Préambule

La modélisation de la gestion des grandes réserves hydrauliques se situe au bout de la chaîne des simulations mise en place par le projet. De ce fait, elle cumule l'ensemble des biais et incertitudes des différents modèles mis en œuvre.

Or la gestion est très sensible aux caractéristiques statistiques des aléas : l'espérance d'apport à la fonte conditionne la capacité à « creuser » la retenue en période hivernale. Mais la distribution autour de l'espérance de cette fonte est un élément clé de pilotage du remplissage de la retenue avant l'été au risque 1/10 ou encore pour contrôler le déversement. En ce sens le modèle de gestion est assez exigeant sur les qualités de simulation de la chaîne de modélisation qui vont l'alimenter.

Parmi l'ensemble de dix combinaisons associant un modèle climatique (GCM) à une méthode de descente d'échelle statistique (MDES), alimentant le modèle hydrologique CEQUEAU, tous n'ont pas permis d'atteindre en temps présent la capacité à reproduire une trajectoire proche de celle obtenue par simulation à l'aide des données météorologiques observées. Ce point est illustré sur deux climats en Figure 105. Cette dernière montre la cohérence entre la trajectoire simulée avec les données météorologiques historiques et la trajectoire simulée avec la météorologie générée par la chaîne GCM/MDES/CEQUEAU sur le graphique de gauche. En revanche sur le graphique de droite, il y a un net décalage entre les courbes noire et bleue indiquant des biais importants dans la statistique des débits et / ou de la demande en eau des usages.

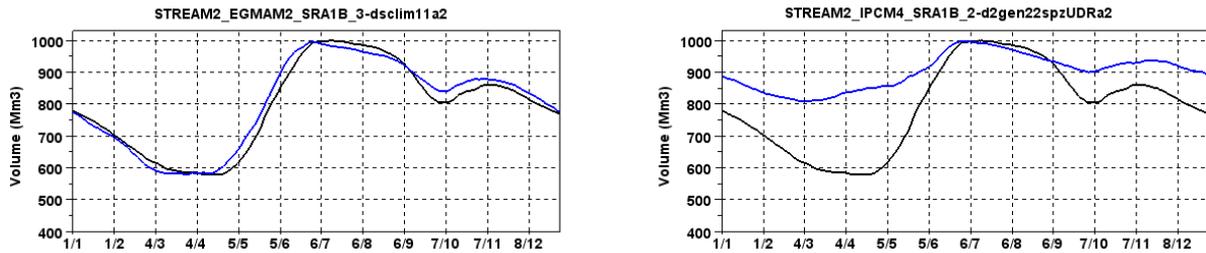


Figure 105 : Biais introduits par la chaîne GCM/MDES sur la trajectoire de la réserve de Serre-Ponçon (en noir : Histo, en bleu : simulation en temps présent PST)

Ces écarts inattendus risquent de limiter l'analyse des impacts. En décalant le niveau de la trajectoire en temps présent, il modifie potentiellement la sensibilité de la gestion au changement de ressource ou de demande en eau. Il paraît difficile d'exploiter ces simulations en temps présent trop biaisées sur un facteur clef de la gestion pour analyser les impacts sur la gestion.

Pour la suite, seuls trois climats parmi les dix qui offraient une représentation acceptable des trajectoires en temps présent sur les trois ouvrages considérés ont été conservés. La Figure 106 montre la qualité des trois chaînes GCM/MDES finalement conservés en termes de trajectoires simulés en temps présent (1980-2009).

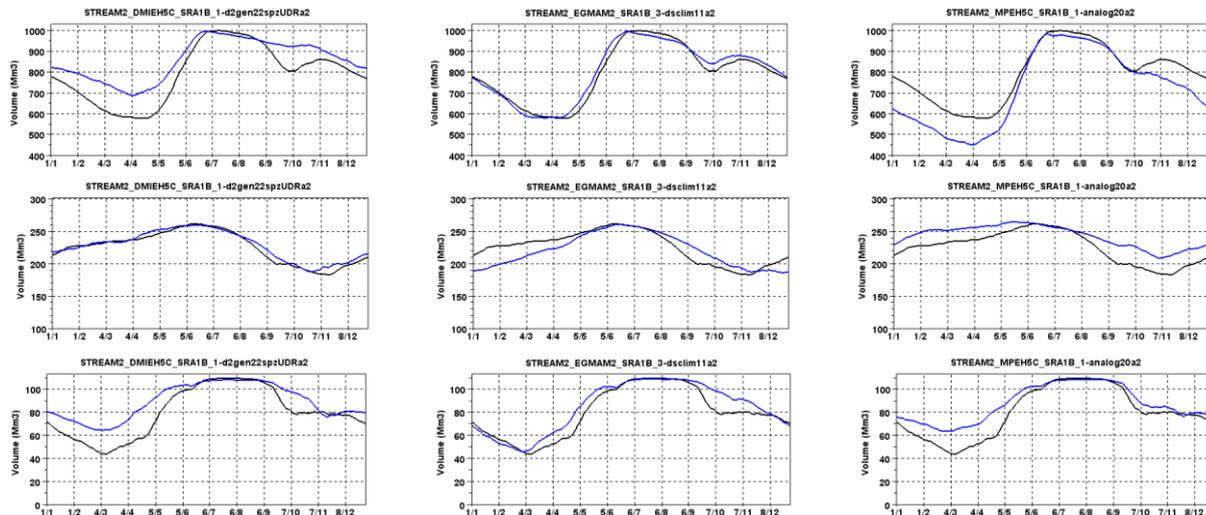


Figure 106 : Qualité de la chaîne GCM/MDES pour les trois climats retenus (en haut : Serre-Ponçon / au milieu : Sainte-Croix / en bas : Castillon)

2. Ressource Sécurisée

La ressource sécurisée correspond à la quantité d'eau exprimée par les usages en aval des grands ouvrages hydrauliques au-delà des apports naturels et qui ne peut être entièrement satisfaite autrement que par un volume contractuel de soutien depuis une réserve hydraulique.

Ce soutien est assuré dans la limite d'une tranche d'eau définie sur les différents aménagements. Un besoin au-delà de cette tranche d'eau pourrait être satisfait s'il y a physiquement suffisamment d'eau dans la réserve et moyennant un accord entre les différentes parties puisque au-delà des conventions existantes. Pour nos simulations, nous n'avons pas considéré de limitation par les tranches d'eau de manière à voir si physiquement il pouvait y avoir suffisamment d'eau et de manière aussi à pouvoir mesurer l'intensité du dépassement des limites actuelles.

Notons également que :

- la sollicitation des réservoirs correspond à l'eau manquante localement pour que les usages qui disposent d'un droit puissent assurer leurs prélèvements. Elle est donc le fruit d'un bilan entre la demande et l'offre locale en eau indépendamment de celle qui est à la main de la gestion des ouvrages hydrauliques de tête qui disposent d'un débit entrant et d'un stock mobilisables ;

- la sollicitation intègre l'ensemble des prélèvements pour lesquels existe un droit d'eau. La sollicitation ne doit pas être confondue avec la consommation de la tranche d'eau réservée qui s'adresse à un ensemble de droits d'eau plus restreints et qui sont nés depuis la construction des ouvrages hydrauliques. Il faut aussi noter que la sollicitation intègre le maintien des débits réservés dans les différents tronçons hydrauliques de la Durance et du Verdon.

La sollicitation est examinée sous l'angle de sa moyenne annuelle ainsi que sur les maxima et minima des périodes simulées (Figure 107). Les valeurs de gauche correspondent au temps présent (Pst) : les estimations opérationnelles d'EDF-DTG (disponible uniquement sur la Durance), les estimations obtenues à partir des informations historiques (Pst_Histo) et celles obtenues de la chaîne complète en temps présent (Pst_Niv2010) pour les trois chaînes GCM/MDES retenues. A droite se trouve la vision du climat futur pour ces trois chaînes et pour les six devenirs envisagés du territoire.

En temps présent, nous disposons d'une référence historique (GCM/MDES et usages historiques) et d'une référence niveau 2010 (GCM/MDES + usages au niveau 2010). Ces deux premières références permettent déjà de constater les dynamiques actuelles sur les deux ressources Durance et Verdon. L'évolution du territoire conduit sur la Durance à une diminution de la sollicitation moyenne ainsi que de ses minimums et maximums. Par contre, la tendance est inverse pour la ressource Verdon avec une hausse liée au développement du réseau d'abonnés de la SCP pour quatre scénarios du territoire sur six.

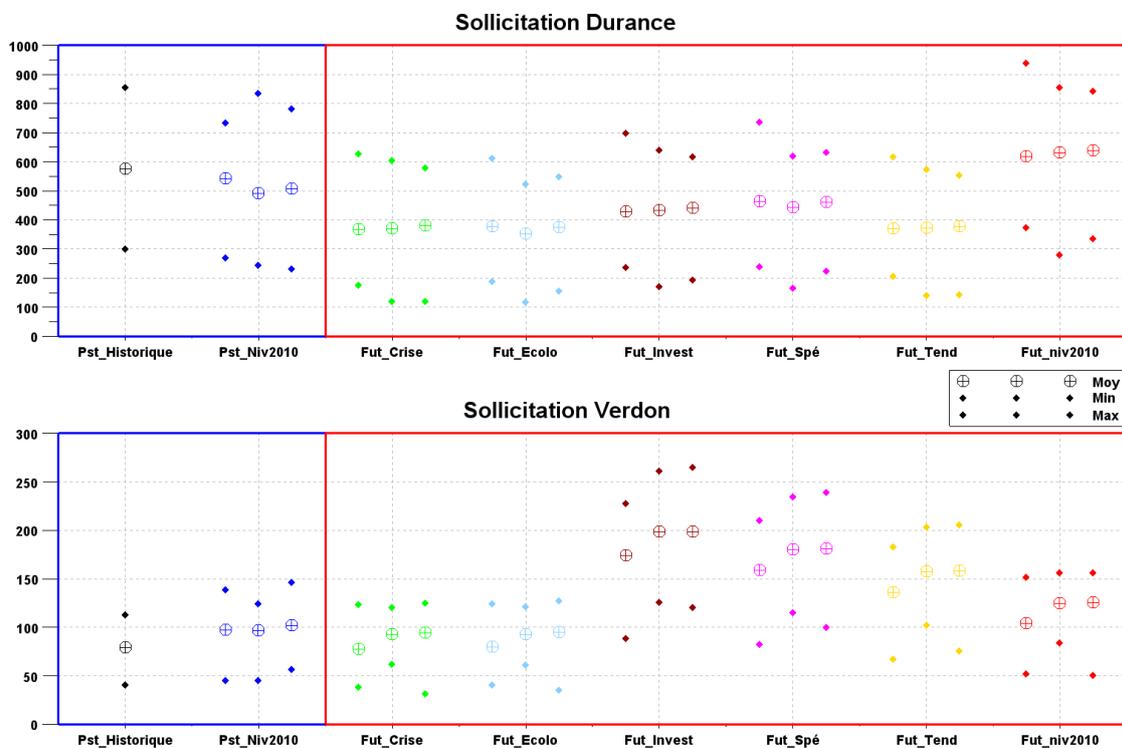


Figure 107 : Sollicitations des ressources Durance et Verdon en temps présent et futur par scénario

En climat futur sur la Durance, nous constatons tout d'abord qu'à niveau 2010, la sollicitation devrait augmenter de l'ordre de 100 Mm^3 en moyenne. Cet accroissement semble peu dépendant du climat considéré. A l'inverse, pour les cinq devenirs envisagés du territoire, la baisse de la sollicitation (-20 à -125 Mm^3) semble systématique. Dans tous les cas, la distribution des valeurs autour de la moyenne semble peu affectée.

Sur le Verdon, les évolutions sont assez différentes. A niveau 2010, la sollicitation Verdon augmenterait légèrement ($+25 \text{ Mm}^3$). Dans les devenirs du territoire correspondant aux hypothèses *Crise* ou *Ecologie*, la sollicitation resterait stable malgré l'effet climat. Les scénarios *Tendanciel*, *Spécialisation* ou encore *Investissement* conduisent à un accroissement de la sollicitation de $+50$ à $+100 \text{ Mm}^3$, ce qui représente au maximum quasiment un doublement de volume de la sollicitation.

Dans toutes ces évolutions, nous constatons que le facteur climat apparaît secondaire devant le devenir du territoire.

La simulation de la gestion des grandes réserves a été réalisée sur l'ensemble des devenirs possibles. Pour mémoire, la satisfaction de ces sollicitations a volontairement été définie dans le cadre de ce projet comme prioritaire sur l'usage énergétique et l'usage touristique des retenues. Dans ces conditions, le premier constat est que les réserves ont pu (dans leurs limites physiques) satisfaire les sollicitations.

La défaillance concernant la fourniture d'eau s'analyse par rapport à la consommation des tranches d'eau réservées sur les deux ressources afin de noter l'intensité des besoins au-delà de la tranche d'eau contractuelle.

Sur la Durance, la tranche d'eau contractuelle est de 200 Mm³ disponible dans la réserve de Serre-Ponçon (Tranche SP). Sur le Verdon, la tranche d'eau est de 225 Mm³ (Tranche SCX+CAST), répartie entre l'ouvrage de Castillon (Tranche CAST = 85 Mm³) et de Sainte-Croix (Tranche SCX = 140 Mm³). La consommation de ces tranches d'eau est estimée par calcul en étant au plus proche des éléments utilisés par EDF en opérationnel. Le principe général de ce calcul est de comptabiliser les volumes d'eau mis à disposition au-delà du débit naturel, augmentés des prélèvements nets correspondant aux droits d'eau antérieurs à la construction des aménagements.

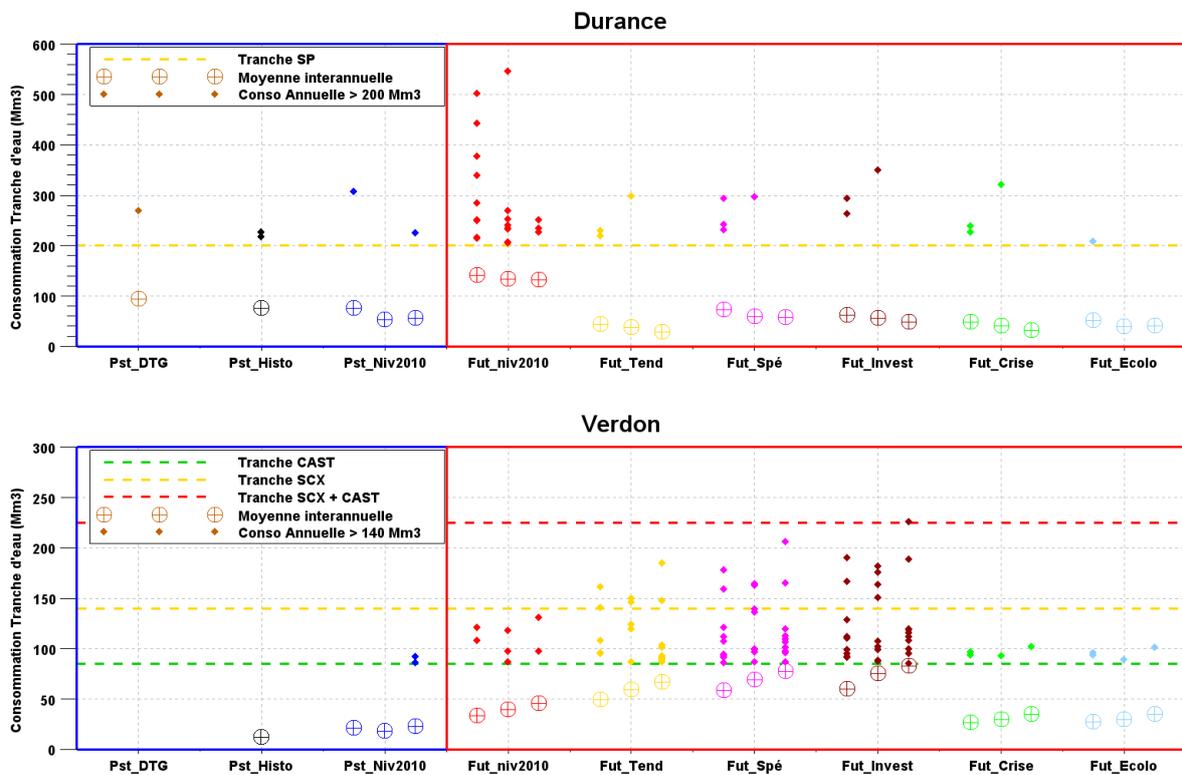


Figure 108 : Consommation des tranches d'eau sur la ressource Durance et Verdon (valeur moyenne et dépassements des volumes contractuels)

La Figure 108 présente avec les mêmes conventions que la Figure 107, pour différentes hypothèses, les valeurs moyennes de consommation des tranches d'eau réservées sur la Durance et sur le Verdon, ainsi que les consommations annuelles dépassant les valeurs contractuelles ce qui permet à la fois de les dénombrer (sachant que le nombre total d'années est de 30) et de mesurer leur intensité. Les estimations opérationnelles passées d'EDF-DTG, disponibles uniquement sur la Durance, sont également présentées pour comparaison sur les reconstitutions de MORGLite.

Sur la Durance, un territoire qui se maintiendrait au niveau 2010 verrait fortement augmenter la consommation moyenne de la tranche d'eau à Serre-Ponçon (+100%) avec de nombreux dépassements annuels de la valeur contractuelle de 200 Mm³ (7 années sur 30, soit presque 1 année sur 4 sur une des chaînes

GCM/MDES). Par contre, sur les cinq autres devenirs envisagés, le recours à la tranche d'eau serait soit stable, soit légèrement à la baisse.

Sur le Verdon, le constat est différent. Trois devenirs du territoire (*Niv2010, Crise, Ecologie*) conduiraient à une légère hausse de la consommation moyenne avec quelques petits dépassements de la tranche agricole de Castillon mais sans pour autant dépasser la tranche d'eau de Sainte-Croix de 140 Mm³ (et donc loin d'atteindre le cumul des deux tranches de Sainte-Croix et Castillon). Les trois autres devenirs du territoire conduisent à une hausse plus marquée de la consommation moyenne (> +100%) et à quelques dépassements de la tranche d'eau de Sainte-Croix (1 à 2 années sur 15 ans, en moyenne tous scénarios confondus) et surtout à des dépassements réguliers de la tranche d'eau de Castillon (proche de 1 année sur 3 en moyenne pour les scénarios *Investissement* et *Spécialisation*). La consommation maximale pour ces trois futurs envisagés ne dépasse toutefois jamais le cumul des tranches d'eau de Sainte-Croix et de Castillon (225 Mm³).

Dans tous les cas, que ce soit pour la Durance ou pour le Verdon, le climat considéré a un impact intrinsèque, mais il apparaît plutôt comme un facteur secondaire devant la dynamique que pourrait suivre les territoires et les usages.

3. Energie

L'usage énergétique correspond à une valorisation optimale de l'eau disponible pour les besoins du système électrique. Le premier déterminant de cet usage énergétique est la quantité d'eau turbinable sur l'ensemble de l'année. Elle est peu dépendante de la gestion (au déversement prêt) et est grandement déterminée par le devenir de la ressource naturelle dont nous avons vu qu'elle est à la baisse pour les trois aménagements mais aussi sur l'ensemble de la chaîne. Les gammes pour les trois climats considérés sont de : de +2% à -24% pour Serre-Ponçon, de +8 à -32% pour Sainte-Croix et de +3% à -25% pour Castillon. A Mallemort (ensemble du domaine étudié), les gammes de variation sont assez comparables avec de -23% à +1 à d'écoulement annuel sur les projections considérées. Ces variations de l'écoulement annuel étant assez homogènes, nous pouvons considérer ces gammes comme celles des variations possibles du productible hydraulique pour la chaîne Durance-Verdon faute de pouvoir en faire une analyse détaillée à partir de la description de l'ensemble des usines.

Le service rendu par la retenue pour l'usage énergétique est celui de pouvoir offrir un stock d'eau, et donc un stock d'énergie, utilisable dans le processus d'optimisation des moyens de production sur le système électrique. Le recours à la production hydroélectrique se fait en période de pointe ou de fortes fluctuations de la consommation en remplacement de moyens de production chers ou peu manœuvrants. Cette réserve d'énergie est limitée à la fois par la capacité utile du réservoir mais aussi par les apports à la retenue qui assurent son renouvellement. De ce fait, l'usage de ce moyen de production fait lui aussi l'objet d'une optimisation, et ce d'autant plus qu'il existe comme sur la chaîne Durance-Verdon d'autres objectifs non énergétiques.

Dans l'usage énergétique, nous considérons ici essentiellement l'impact du changement de climat et des territoires sur les services rendus par les réservoirs au travers du déplacement saisonnier des volumes d'eau vis-à-vis des périodes de pointe de la consommation d'électricité.

L'optimisation se fait en tenant compte de la hiérarchisation des objectifs assignés à l'exploitation des réservoirs, telle que pratiquée actuellement en mode opérationnel par EDF. Dans le contexte Durance-Verdon, la maîtrise des déversements, la construction d'un stock pour satisfaire les droits d'eau et l'atteinte d'une cote touristique apparaissent comme des contraintes à cette valorisation énergétique saisonnière. Plus ces contraintes limitent les trajectoires de la retenue, plus l'optimisation énergétique se réduit.

Dans le cas d'une raréfaction de la ressource, l'indicateur pouvant traduire l'accroissement du degré de contrainte de la gestion en vue d'une valorisation énergétique est celui de la courbe de remontée climatologique, *i.e.* en l'absence d'une prévision hydrologique à partir du manteau neigeux en place sur le bassin. Il témoigne d'un stock minimal qu'il convient de garantir dans la retenue pour assurer les droits d'eau et la tenue de la cote touristique 9 années sur 10.

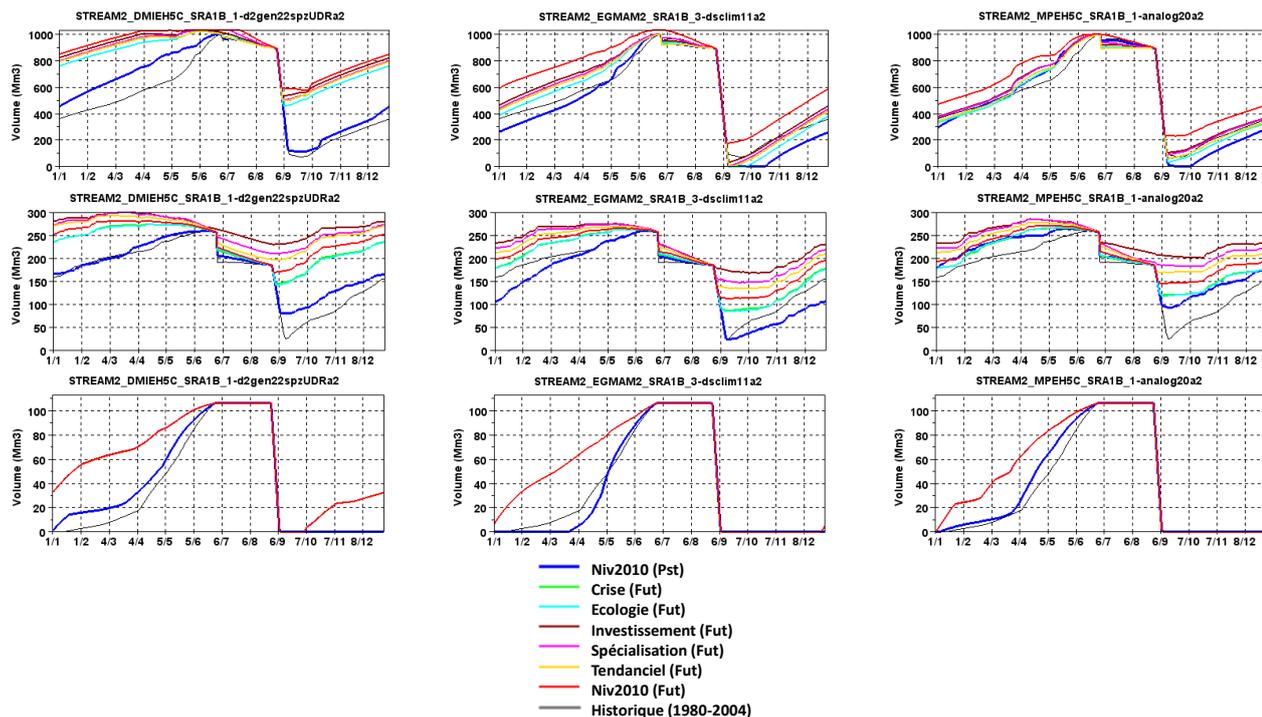


Figure 109 : Courbes de remontée (dans l'ordre de haut en bas : Serre-Ponçon, Sainte-Croix, Castillon)

Sur l'ensemble des réservoirs, pour l'ensemble des climats et des devenirs du territoire, nous ne constatons pas d'abaissement de cette courbe de remontée mais de fortes hausses (Figure 109). La gestion énergétique dans ses modalités actuelles sera donc potentiellement plus contrainte et la valorisation moindre. Les climats ont été classés de gauche à droite en fonction de l'écoulement annuel (stable pour DMIEHC_D2gen2 jusque -25% pour MPEH5C_analog20a2). Étonnamment, les plus grandes modifications de la courbe de remontée (perte d'une grande partie de la réserve utile pour Serre-Ponçon et Sainte-Croix, dès l'automne) se produisent pour le climat qui offre la plus faible variation de l'écoulement moyen annuel (DMIEHC_D2gen2) : si le régime de ce climat évolue peu, la distribution des débits et notamment des bas débits de printemps - qui sont dimensionnant pour la remontée - est fortement modifiée. Cette situation est extrêmement contraignante pour l'hydroélectricité mais aussi pour la maîtrise du risque de déversement. À l'inverse, le climat qui offre la plus grande modification du régime est aussi celui qui montre le moins de changement sur le quantile 10% du débit de printemps.

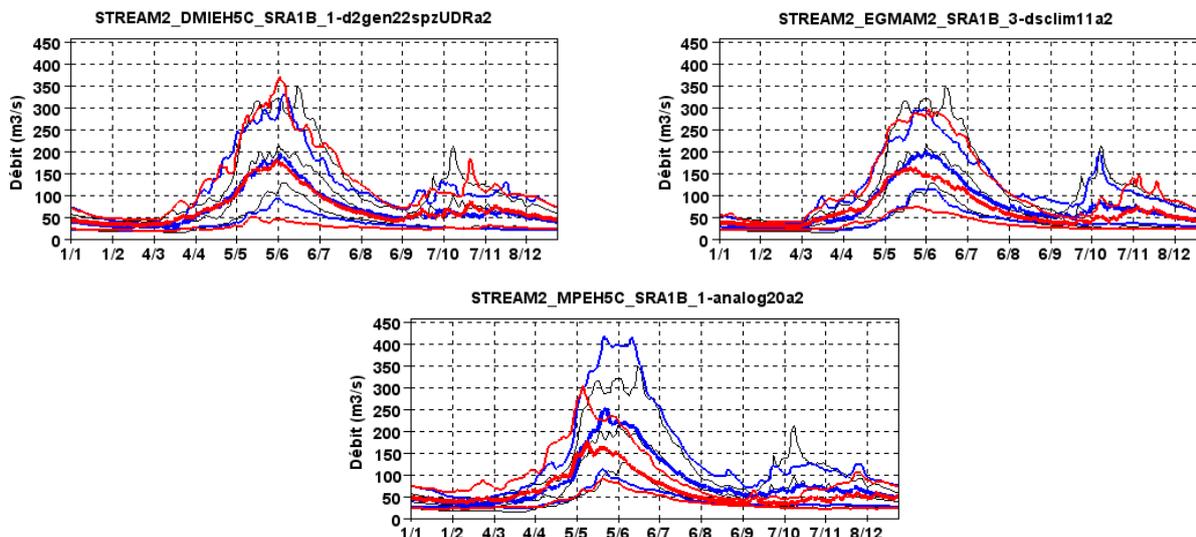


Figure 110 : Evolution du régime et des quantiles 10 et 90% des apports à la retenue de Serre-Ponçon (Présent en bleu / Futur en rouge / Historique en noir)

L'accroissement de la contrainte liée à la courbe de remontée reste un indicateur très qualitatif. L'exercice opérationnel de gestion et notamment la prise en compte de la prévision hydrologique moyen terme permettent de relaxer ces contraintes sur les années d'abondance. Le modèle de gestion développé et déployé dans le cadre du projet a pour vocation de proposer une représentation simplifiée de l'ensemble de ces processus opérationnels de gestion. Les simulations des débits turbinés tenant compte de cet ensemble de processus opérationnels est alors utile pour mieux mesurer la capacité des aménagements à placer la ressource en face des périodes d'intérêt énergétique.

Dans le contexte actuel, la valeur de l'hydraulique pour le système électrique est de pouvoir offrir un stock d'énergie disponible pour aider à l'équilibre offre-demande à moindre coût en période de pointe. Le stock d'eau de la retenue est donc mis à contribution durant ces périodes spécifiques, permettant d'offrir, quand les contraintes ne sont pas limitantes, des débits turbinés supérieurs aux entrants naturels dans la retenue. Le rapport des volumes turbinés aux volumes des apports naturels pendant les jours froids constitue donc une métrique pertinente du service que peut rendre la retenue pour l'énergie. Plus ce rapport est grand et supérieur à 1 plus, le service énergétique est grand (mise à contribution saisonnière du stock pour les besoins énergétique en période de pointe). Pour un rapport de 1 (*débit entrant = débit turbiné*), aucun déplacement saisonnier du stock n'est mis à profit et l'ouvrage se comporte comme un ouvrage au fil de l'eau. Dans ce cas, l'usage du réservoir est peu optimal puisque la capacité de la réserve à transférer de manière saisonnière des volumes d'eau pour les besoins du système électrique n'est pas exploitée. Pour un rapport inférieur à 1, la réserve tend à stocker de l'eau sur les périodes d'intérêt. C'est le cas de figure d'une retenue qui se trouve contrainte par d'autres objectifs prioritaires devant l'usage énergétique, par exemple dans un contexte d'apports naturels insuffisants avec l'anticipation (via la courbe de remontée) de la construction d'un stock pour satisfaire les prélèvements sécurisés. Cela peut aussi être le cas d'une chaîne aval saturée par les apports intermédiaires et qui se doit de retenir l'eau en amont pour maîtriser les déversements. Dans ces deux contextes, la retenue est au service d'objectifs non énergétiques qui imposent un stockage contrairement à ce que l'intérêt énergétique nécessiterait (déstockage). Le rapport est calculé sur les 10% des jours les plus froids de chaque année de manière à disposer de durées équivalentes entre le climat présent et le climat futur pour le calcul des volumes. L'analyse est synthétisée en Figure 111 avec représentation de la valeur moyenne de cet indicateur ainsi que les valeurs des quantiles 10 et 90% pour les différentes simulations.

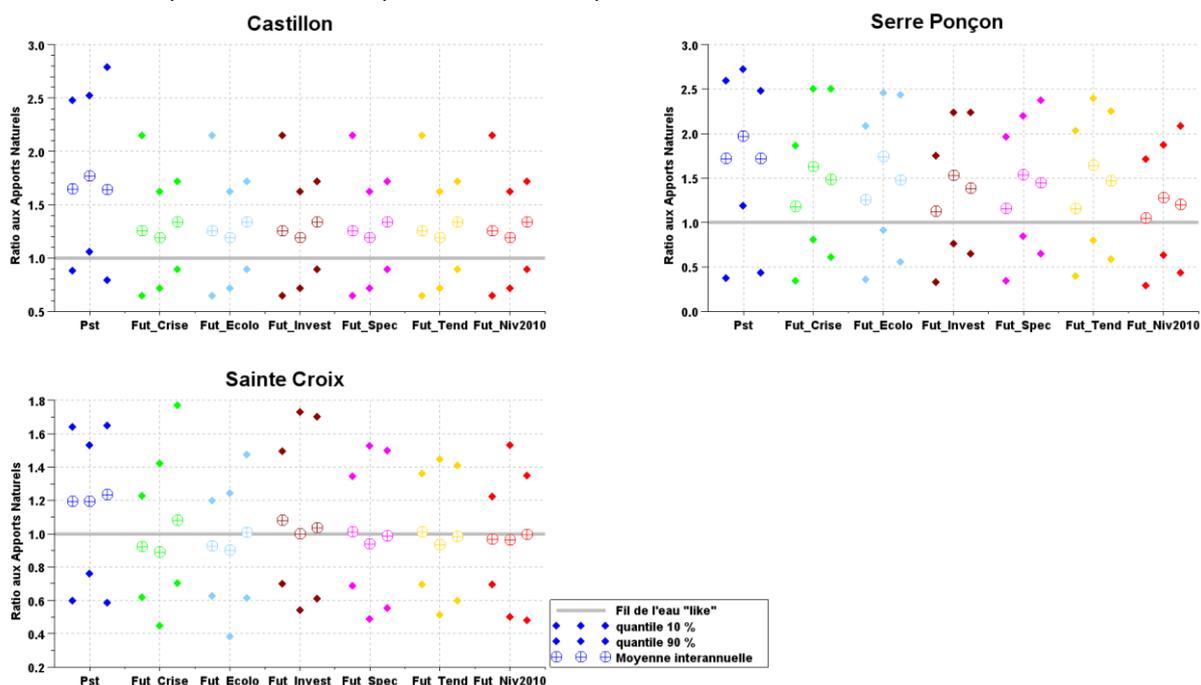


Figure 111 : Indicateur de Valeur énergétique (rapports annuels des turbinés aux apports naturels sur les 10% des jours les plus froids)

Il ressort de la Figure 111, une baisse généralisée du service rendu par les trois réserves. Cette baisse s'explique par les contraintes de remontée, vu ci-avant, qui limitent le déstockage sur les périodes d'intérêt. A l'extrême, notons que la réserve de Sainte-Croix est, en climat futur et en moyenne sur les années, équivalente à l'échelle

saisonnaire, à une retenue au fil de l'eau ce qui s'explique par le niveau de contraintes important pesant sur cette réserve dans l'hypothèse utilisée, à savoir où la retenue de Castillon n'est pas mobilisée pour les demandes aval sur le Canal de Provence. La distribution des quantiles 10 et 90% est aussi modifiée en cohérence avec les valeurs moyennes. Il faut remarquer, pour Serre-Ponçon et Castillon, la disparition d'années « fastes » dans le futur (rapports supérieurs à 2.5), avec de plus sur Serre-Ponçon une nette dépendance de l'indicateur au devenir du territoire. Les quantiles 10% baissent globalement sur les ouvrages de Castillon et Sainte-Croix et sont stables pour Serre-Ponçon hormis pour l'hypothèse d'un territoire qui resterait au niveau 2010.

La capacité à déplacer des volumes d'eau dans le temps pour les besoins énergétiques va se réduire. Toutefois, durant ces périodes de pointe (Figure 112) les débits d'apport aux retenues vont globalement augmenter. Cette opportunité permet de limiter un peu l'impact sur le volume qu'il sera possible de turbiner, *i.e.* l'énergie produite, durant les périodes de pointe. En moyenne, sur les trois climats considérés, nous constatons une baisse de volume turbiné sur les 10% des jours les plus froids de presque -10 Mm³ pour Castillon (~ -20%), de presque -50 Mm³ (~ -20%) pour Serre-Ponçon et de presque -20 Mm³ (~ -25%) pour Sainte-Croix. En moyenne sur les 10% des jours les plus froids des 30 années simulées, le volume déstocké en moyenne sur des périodes de 30 années (écart des turbinés aux apports) passe de 10 Mm³ à quasiment 0 Mm³ pour Castillon, de 100 Mm³ à 50 Mm³ pour Serre-Ponçon et de 0 Mm³ à -10 Mm³ pour Sainte-Croix.

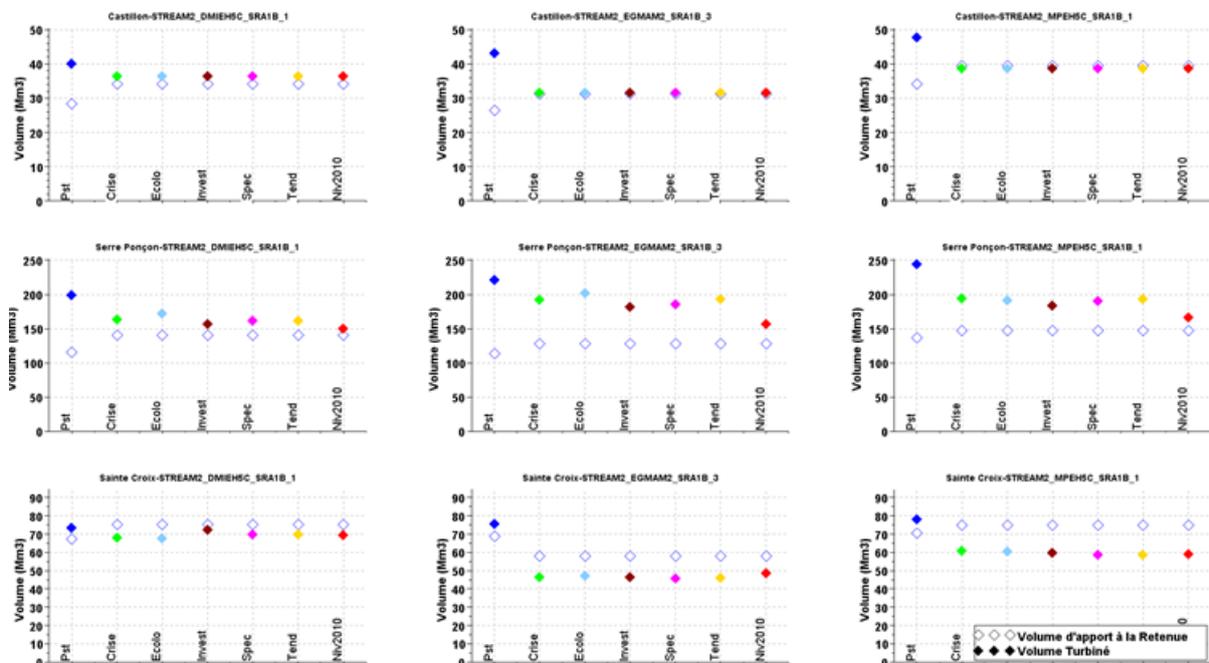


Figure 112 : Volume d'apport et volume turbiné sur les 10% des jours les plus froids

4. Tourisme

Le tourisme est porté dans notre analyse sur l'usage offert par les différents plans d'eau. Cet usage est conditionné à l'existence d'une cote suffisante dans les retenues pour assurer les accès à l'eau pour la baignade et la navigation. Les valeurs de référence sur les différentes retenues sont :

- Serre-Ponçon : cote supérieure à 775 m NGF du 1/07 au 15/08 (20/08 avant 2014), 9 années sur 10 et au 31/08, 8 années sur 10 ;
- Sainte-Croix : cote supérieure 471.5 m NGF du 1/07 au 31/08, 9 années sur 10 ;
- Castillon : cote comprise entre 878.20 et 878.70 m NGF du 1/07 au 31/08, à 9 années sur 10. Sur la période 15 juin - 15 septembre, la retenue est aussi contrainte à ne pas dépasser un débit maximum de 13 m³/s.

L'impact sur le tourisme est donc l'analyse de la capacité à assurer demain des niveaux d'eau compatibles avec les usages. Les valeurs actuelles de cote minimale touristique sur les trois retenues sont considérées inchangées pour l'avenir. Les objectifs actuels sont d'essayer d'assurer cette cote minimale au moins 9 années sur 10.

L'analyse des trajectoires simulées des retenues (Figure 113) permet d'identifier le niveau estival empirique non atteint 1 année sur 10, soit un total de 3 années pour les 30 années simulées.

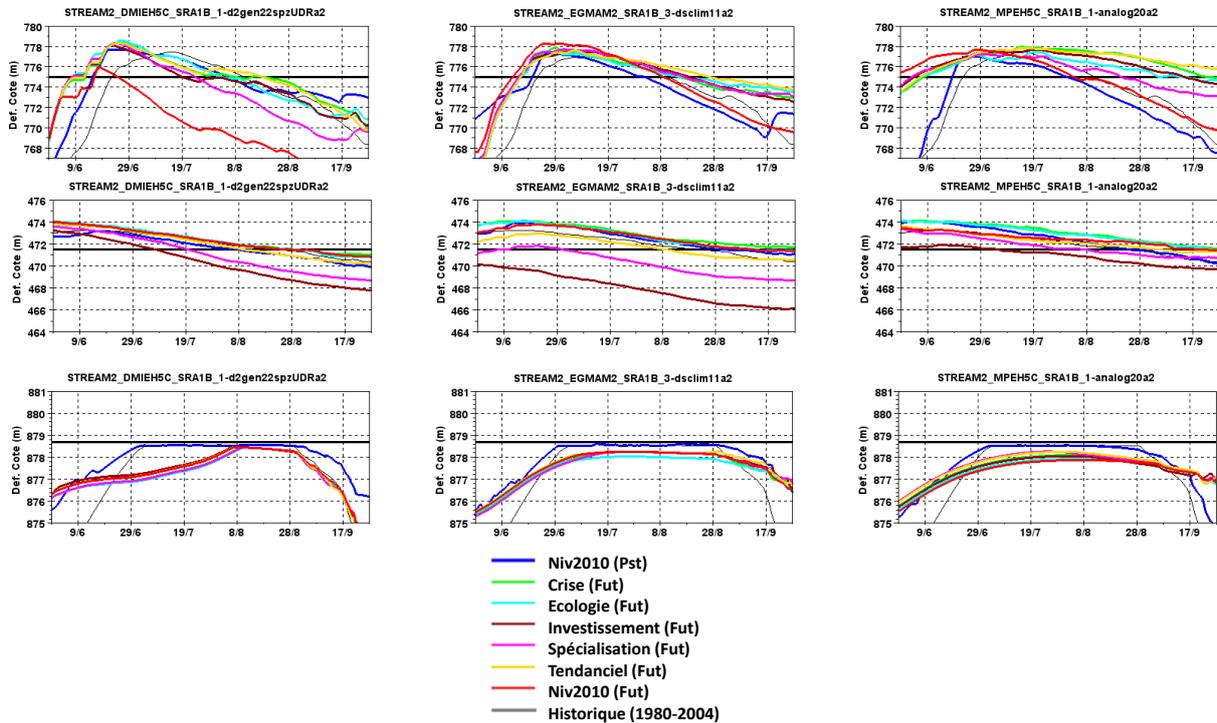


Figure 113 : Cotes non atteintes une année sur 10 sur les retenues de Serre-Ponçon (haut), Sainte-Croix (milieu) et Castillon (bas)

Sur la retenue de Serre-Ponçon, hormis un territoire qui resterait au niveau 2010, nous constatons plutôt une amélioration de la capacité à tenir la cote de compatibilité touristique (liée à la baisse des prélèvements en eau). Dans le scénario *Niv2010*, et pour le premier climat, la cote touristique de 775 m NGF au 1^{er} juillet ne serait pas atteinte plus souvent qu'une année sur 10 et, 1 année sur 10, l'écart à la cote de référence en fin de saison devrait être de -7 m. Pour les deux autres climats, la capacité à tenir la compatibilité touristique semble plutôt stable (défaillance 1 année sur 10 de -2 à -2.5 m contre -3 m en temps présent, voir *Historique* courbe en gris).

Sur la retenue de Sainte-Croix, les scénarios *Spécialisation* et *Investissement* conduisent à ne pas pouvoir assurer la compatibilité touristique sur une très grande partie de la saison (*a minima* le mois d'août). Pour les autres devenirs, la capacité à tenir la cote touristique est proche de la situation actuelle à quelques nuances près. Les plus grandes défaillances 1 année sur 10 sont atteintes sur le second climat avec une valeur de -5.5 m pour le devenir *Investissement* et -2.5 m pour le devenir *Spécialisation*.

Sur la retenue de Castillon, aucune simulation n'a conduit à pouvoir tenir l'objectif de cote 9 années sur 10 sur l'ensemble de la saison. La contrainte de débit maximal de 13 m³/s conjointe à une cote touristique proche du plein bord semble rendre difficile le pilotage de la remontée sans être exposé au déversement de la retenue (surtout pour le premier climat). Une cote de compatibilité entre 877 et 878 m NGF semblerait plus appropriée pour espérer être respectée 9 années sur 10.

L'ensemble de ces commentaires est à relativiser par les hypothèses utilisées pour la simulation :

- le dépassement des volumes des tranches d'eau réservée est autorisé dans la simulation ;
- sur la ressource Verdon, seule la retenue de Sainte-Croix est mise à contribution en période estivale à l'image de la gestion actuelle. Le dépassement du volume de la tranche d'eau de Sainte-Croix devrait appeler à décrire une modalité de gestion qui fasse appel à la réserve de Castillon ce qui n'a pu être intégré dans les temps du projet.

La vulnérabilité des cotes touristiques est donc à relativiser. Pour ce qui concerne Serre-Ponçon, une régulation sur la base de la consommation de la tranche d'eau réservée peut améliorer la capacité à tenir la compatibilité touristique. Pour ce qui concerne la retenue de Sainte-Croix, la vision proposée ci-dessus est plutôt pessimiste car il n'est pas fait recours en été à la tranche d'eau existante dans la retenue de Castillon A l'opposée, la vision proposée pour la retenue de Castillon est optimiste car elle devrait à terme être impliquée dans la satisfaction des demandes en eau du périmètre desservi par le Canal de Provence, *i.e.* pas de raison de la mobiliser vus les déstockages de solliciter la retenue de Castillon actuellement en été.

5. Sensibilité aux modalités de calcul des besoins en eau pour l'irrigation

Les résultats présentés précédemment ont été obtenus avec MODIC_CF, modalité « cycle fixe » de MODIC. Des exercices complémentaires ont eu lieu pour mesurer la sensibilité au choix du mode de calcul des besoins en eau agricole sur les évaluations que peut produire le projet notamment sur les variables de gestion. Des simulations ont donc été réalisées en substituant MODIC_DJ (« cycle variable ») par MODIC_FC. Elles ont été présentées dans la section « Besoins en irrigation en 2050 – demande globale » (page 149). Pour explorer la sensibilité des résultats au choix de la méthode de calcul, l'axe Durance avec la réserve hydraulique de Serre-Ponçon a été privilégié, la dimension agricole y est en effet dominante. De même, l'analyse s'est centrée sur les trois climats retenus. Les conclusions sont les suivantes.

Il y a très peu d'écart entre les deux approches sur la sollicitation de l'ouvrage de Serre-Ponçon, les faibles différences apparaissent en début et fin de cycle de culture en cohérence avec les hypothèses des deux modélisations.

En temps futur, à usage stable *Niv2010*, les différences sur les sollicitations de Serre-Ponçon sont manifestes en début de cycle et surtout en fin de cycle (sollicitations en moyenne en avance de 2 à 3 semaines par rapport au « cycle fixe ») mais restent faibles (inférieures à 10 m³/s en moyenne). Les sollicitations sont assez équivalentes entre les deux approches et le maximum des prélèvements moyens toujours situé courant juillet avec une intensité équivalente entre les deux approches. En revanche, les écarts en fin de cycle sont très importants : les sollicitations de la réserve de Serre-Ponçon sont réduites de l'ordre de 30 à 40 m³/s pendant une durée de 2 à 4 semaines avec les options de MODIC_DJ.

Au niveau de Serre-Ponçon, le scénario *Niv2010* conduit à un accroissement de la sollicitation de 20 à 30% dans le cadre de l'approche « cycle fixe » sans modification du phasage dans le temps des sollicitations. Avec l'approche « cycle variable », la sollicitation annuelle évolue peu (moins de 10% à la hausse), par contre le cycle est avancé de 2 à 3 semaines.

A l'opposition d'une vision où les usages n'évoluent pas se trouve le scénario *Ecologie* qui conduit à la plus forte réduction des sollicitations. Dans cette prospective, le volume de sollicitation de la réserve est clairement à la baisse. Selon l'approche de modélisation du besoin en eau considérée, cette diminution est plus ou moins marquée. L'approche « cycle variable » et l'approche « cycle fixe » sont quasiment identiques du début du cycle cultural jusqu'à la mi-août. A partir de la mi-août, les deux approches produisent des sollicitations très contrastées avec un arrêt des sollicitations anticipé pour le « cycle variable » vis-à-vis du cycle fixe (2 à 4 semaines). La sollicitation, pour le scénario *Ecologie*, est alors plus à la baisse dans le cas d'une approche « cycle variable » (-35 à -40%) que dans l'approche « cycle fixe » (-25 à -30%).

Les incidences sur les trajectoires de la réserve de Serre-Ponçon de l'approche considérée se retrouvent essentiellement en fin d'été, ce qui est cohérent avec les constats formulés précédemment sur les sollicitations de la réserve. En temps présent les différences entre les deux approches sont imperceptibles (en toute logique, la période fixée dans MODIC_CF est calée sur la phénologie actuelle). En temps futur, les écarts de sollicitations durant la période de contrainte de cote estivale conduisent pour l'approche « cycle fixe » à tenir la retenue à un niveau supérieur à celui avec l'approche « cycle variable ». Ceci est cohérent avec la nécessité de pouvoir tenir de beaucoup plus fortes sollicitations durant le mois d'août selon l'approche « cycle fixe » (versus « cycle variable ») tout en garantissant l'objectif de cote estivale. Toutefois globalement, les écarts sur la trajectoire moyenne de la réserve de Serre-Ponçon restent très faibles comparativement aux évolutions attendues de cette trajectoire en lien avec l'évolution du climat ou en lien avec l'évolution des usages.

Concernant la cote dépassée en moyenne 9 années sur 10, le diagnostic est similaire : en temps présent, les deux approches convergent vers les mêmes valeurs. En temps futur, il apparaît clairement une différence avec

une remontée possible de ce quantile dans le courant du mois d'août en « cycle variable » alors que cela n'est pas le cas avec l'approche « cycle fixe ». Pour autant, cela ne remet pas fondamentalement en cause les conclusions sur la capacité à tenir la cote touristique à partir du « cycle fixe ». Seul un (DMIEHC/D2GEN22) des trois climats avec l'hypothèse d'absence de changement sur les usages (*Niv2010*) conduit à une plus grande difficulté à tenir la cote estivale, les autres étant dans une situation stable ou plutôt optimiste vis-à-vis du temps présent. La considération « cycle fixe » ou « cycle variable » a peu d'effet sur la période estivale et ne se fait réellement sentir qu'à partir du mois de septembre.

Les résultats sur la sensibilité sont présentés à titre d'exemple pour le premier climat sur les trajectoires de la réserve (Figure 114) et la cote non atteinte 1 année sur 10 (Figure 115).

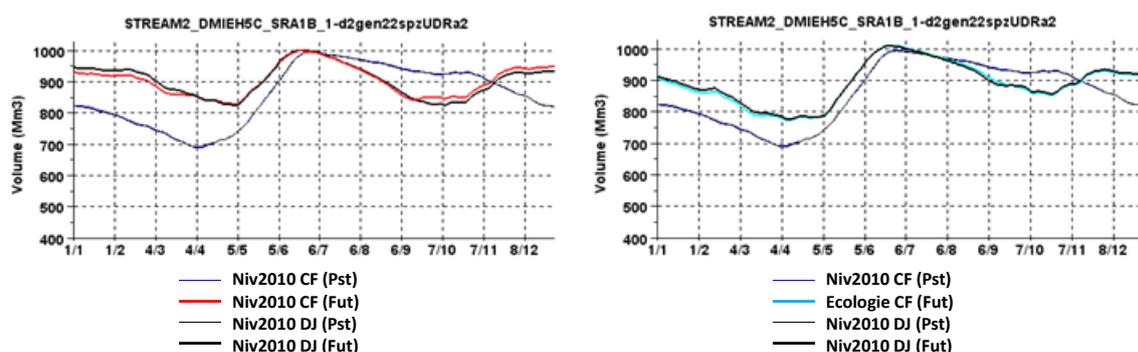


Figure 114 : Trajectoire de la réserve de Serre-Ponçon selon deux scénarios territoriaux et selon les deux modalités de calcul de MODIC pour une projection climatique

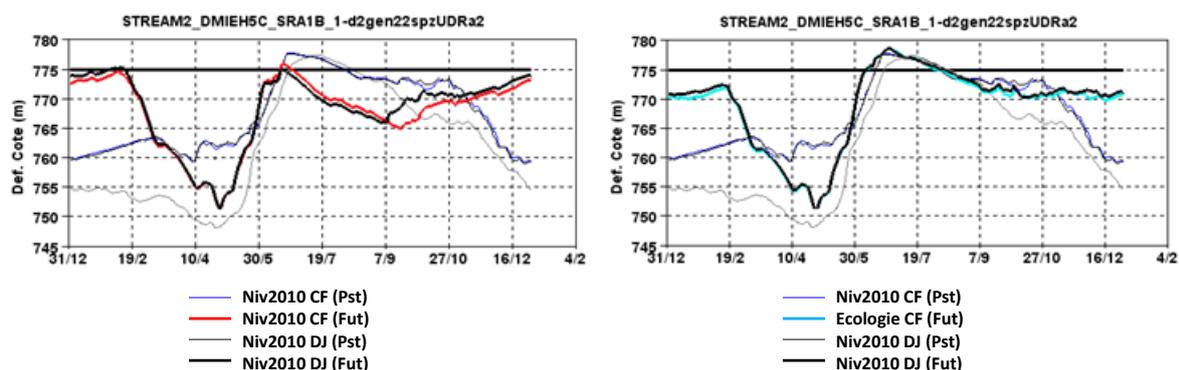


Figure 115 : Cotes non atteintes une année sur 10 sur la retenue de Serre-Ponçon selon deux scénarios territoriaux et selon les deux modalités de calcul de MODIC pour une projection climatique

Pour conclure, il apparaît donc que le choix de modélisation du cycle végétatif n'est pas neutre sur le niveau de sollicitation de la retenue de Serre-Ponçon : en « cycle variable », les résultats suggèrent une avance dans l'année de l'expression des besoins. Toutefois, cette avance conduit à modérer l'évolution à la hausse en climat futur de la sollicitation (+25 à +30% en « cycle variable » contre +35 à +40% en « cycle fixe »). En s'intéressant aux trajectoires simulées des retenues, l'effet apparaît moins spectaculaire. Le choix de l'approche modifie peu les conclusions que nous pouvons apporter sur la gestion simulée en changement global. Cette dimension semble donc assez secondaire devant les considérations climat et prospective des usages.

XI. La gestion de l'eau en 2050

Nous proposons ici trois zooms géographiques : les territoires alimentés par la Durance, les territoires alimentés par le Verdon et la partie amont du bassin du Buëch, afin d'examiner les résultats non plus sous l'angle sectoriel, mais sous un angle territorial.

La non-satisfaction des demandes en eau sur les territoires Durance et Verdon est analysée par le biais du modèle MORGLite, un modèle de gestion des grandes réserves hydrauliques. Il permet d'accéder à une modélisation du lien entre i) la ressource naturelle, ii) sa mise à disposition par les réserves pour des usages aval, iii) la valorisation de cette ressource pour le système électrique et iv) les possibilités offertes par le plan d'eau en période estivale pour le tourisme (Hendrickx, 2014). Les deux premières sous-sections reprennent des résultats présentés plus haut. La dernière partie dédiée au Buëch reprend également des éléments déjà évoqués, complétés de réflexions issues de l'étude Volume prélevable commanditée par l'Agence de l'Eau. Ce sous-bassin permet d'aborder la question de la gestion de l'eau sur un territoire non sécurisé par le système Durance-Verdon.

1. Satisfaction des usages liés à la ressource Durance

Effet Climat sur la mobilisation de la réserve

En climat futur sur la Durance, nous constatons qu'à niveau territorial 2010, la sollicitation devrait augmenter de l'ordre de 100 Mm³ en moyenne.

Les mêmes hypothèses climatiques futures, cette fois analysées à l'aune des scénarios prospectifs 2050, montrent une baisse de la sollicitation (-20 à -125 Mm³). Dans tous les cas, la distribution des valeurs autour de la sollicitation moyenne semble peu affectée.

Capacité des retenues et des tranches d'eau actuelles à satisfaire les demandes futures

Sur la Durance, la tranche d'eau « agricole » contractuelle est actuellement de 200 Mm³, à prendre dans la réserve de Serre-Ponçon.

Sur la Durance, en climat futur, un territoire qui se maintiendrait au niveau 2010, cette tranche d'eau réservée est fortement sollicitée et s'avère plus fréquemment insuffisante pour satisfaire les usages associés. En revanche, grâce notamment à l'amélioration des rendements des canaux d'irrigation et le changement de pratiques d'irrigation, les cinq devenirs envisagés du territoire proposent une vision opposée avec une baisse des demandes et donc de la sollicitation (-100 Mm³) et un maintien de la consommation de la tranche d'eau sensiblement au niveau du temps présent.

Valorisation hydroélectrique en temps et scénarios futurs

L'usage énergétique sur la Durance correspond à une valorisation optimale de l'eau disponible pour les besoins du système électrique et le volume produit en 2050 est directement impactée par le devenir de la ressource naturelle dont on sait qu'elle est à la baisse sur l'ensemble de la chaîne.

L'anticipation et la baisse des apports de fonte conduisent à contraindre davantage la phase de reconstitution de la réserve avant l'été avec un objectif de remplissage lié aux cotes touristiques inchangé. La valorisation énergétique est ainsi fortement réduite, notamment l'hiver et au printemps où la capacité de la retenue à fournir une réserve énergétique saisonnière (énergie de pointe) en période d'intérêt énergétique, est fortement amputée. En moyenne sur les trois climats considérés, le modèle MORGLite envisage une baisse de volume turbiné sur les 10% des jours les plus froids de de presque -50 Mm³ (environ -20%). Néanmoins dans cette période énergétique une légère hausse des apports naturels pourrait permettre de limiter la diminution de la production d'énergie. Les contraintes de remontée plus fortes ont également pour conséquence d'accroître le risque de déversement en cas de crue ou d'apports soutenus en phase de remplissage et une incidence potentielle sur le risque inondation à l'aval.

Capacité des ouvrages à tenir les cotes touristiques

Sur la retenue de Serre-Ponçon, hormis un territoire qui resterait au niveau 2010, nous constatons plutôt une amélioration de la capacité à tenir la cote de compatibilité touristique. Ceci résulte pour l'essentiel d'une baisse

des prélèvements. Dans le scénario *Niv2010*, et pour une des projections climatiques, la cote touristique de 775 m NGF au 1er juillet serait atteinte moins d'une année sur 10.

La tenue des objectifs de cote estivale semble donc toujours possible en conservant les principes de gestion actuels, hormis dans l'hypothèse d'un territoire qui n'évoluerait pas. Elle requiert une évolution du territoire fondée sur une économie d'eau substantielle.

2. Satisfaction des usages liés à la ressource Verdon

Effet Climat sur la mobilisation de la réserve

En climat futur sur le Verdon, nous constatons qu'à niveau territorial 2010, la sollicitation des retenues augmenterait légèrement (+25 Mm³) par rapport au climat actuel.

Les mêmes hypothèses climatiques futures, cette fois analysées à l'aune des scénarios prospectifs, montrent que :

- dans les scénarios *Crise* et *Ecologie*, impliquant une demande annuelle stable ou en légère baisse, la sollicitation resterait stable malgré l'effet climat ;
- dans les scénarios *Tendanciel*, *Spécialisation* et *Investissement*, l'accroissement de la sollicitation augmenterait de +50 à +100 Mm³ annuellement (*Spécialisation* > +100 Mm³, *Investissement* > +75 Mm³, *Tendanciel* > +50 Mm³).

Capacité des retenues et des tranches d'eau actuelles à fournir les demandes futures

Sur le Verdon, la réserve constituée par la SCP est de 225 Mm³, répartie entre l'ouvrage de Sainte-Croix (140 Mm³) et de Castillon (85 Mm³).

L'effet du changement global sur les ouvrages du Verdon est sensiblement différent de celui perçu à Serre-Ponçon sur la Durance. Durance et Verdon subissent des diminutions de leurs apports annuels.

A territoire inchangé, la demande des usages envers la retenue est légèrement sensible au climat, affichant une faible augmentation. Les devenirs du territoire conduiraient à une hausse de la consommation moyenne, conséquence d'une demande accrue en AEP, et trois d'entre eux (*Spécialisation* > +100 Mm³, *Investissement* > +75 Mm³, *Tendanciel* > + 50 Mm³) pourraient occasionner des dépassements fréquents de la valeur 85 Mm³, équivalent de la tranche d'eau mobilisable de Castillon, ou de Ste-Croix (140 Mm³), sans pour autant jamais dépasser le cumul des tranches d'eau des deux retenues (225 Mm³).

Nous pouvons donc estimer que dans le cas d'une augmentation tendancielle des demandes (+50% à l'échelle annuelle) sur le périmètre, le système Sainte-Croix-Castillon parvient à fournir l'eau en période d'étiage pour les usages à l'aval via les tranches d'eau réservées. Dans le cas d'une rupture dans les évolutions tendanciennes, amenant à une demande encore plus élevée (+90%), les tranches réservées parviendraient toujours à fournir l'eau demandée.

Valorisation hydroélectrique en temps et scénarios futurs

Comme sur la Durance, le premier déterminant de l'usage énergétique est la quantité d'eau que l'on pourra turbiner sur l'ensemble de l'année. La production d'énergie en volume est directement impactée par la baisse de la ressource naturelle (sensiblement entre -30% et +10% sur les trois scénarios testés avec MORGLite) que l'on peut à peu près considérer comme la perte de productible hydraulique pour la chaîne Durance-Verdon.

L'anticipation et la baisse des apports de fonte conduisent à contraindre davantage la phase de reconstitution de la réserve avant l'été avec un objectif de remplissage lié aux cotes touristiques inchangé. Cela impacte directement les deux retenues du Verdon qui voient leur réserve énergétique saisonnière fortement réduite quels que soient les devenirs du territoire. En période énergétique, les deux retenues auront peu de capacité à turbiner un volume supérieur aux apports naturels. Pour certains climats simulés, elles seront peut-être dans une logique de stockage en période énergétique du fait des contraintes de remontée, avec potentiellement un risque accru de déversement en cas d'apports importants

Capacité des ouvrages à tenir les cotes touristiques

Sur la retenue de Sainte-Croix, les scénarios *Spécialisation* et *Investissement* (+60 et +90% de demande en eau annuelle) conduisent à ne pas pouvoir respecter l'objectif de compatibilité touristique sur une très grande partie de la saison (à minima le mois d'août). Pour les autres devenirs, la capacité à tenir la côte est proche de celle que l'on connaît aujourd'hui.

Sur la retenue de Castillon, aucune simulation a conduit à pouvoir tenir l'objectif de cote 9 années sur 10 sur l'ensemble de la saison. La contrainte de débit maximal de 13 m³/s conjointe à une cote touristique proche du plein bord semble rendre difficile le pilotage de la remontée sans être exposé au déversement de la retenue. Une cote de compatibilité entre 877 et 878 m NGF semblerait plus appropriée pour espérer être respectée 9 années sur 10. La tenue des objectifs de cote estivale sur Sainte-Croix est plus difficile et ce d'autant plus que le territoire engendre une sollicitation accrue de la ressource Verdon.

L'ensemble de ces commentaires est à relativiser par les hypothèses utilisées pour la simulation :

- le dépassement des volumes des tranches d'eau réservées est autorisé dans la simulation ;
- sur la ressource Verdon, seule la retenue de Sainte-Croix est mise à contribution comme pour la gestion actuelle. Le dépassement de la tranche d'eau de Sainte-Croix devrait appeler à décrire une modalité de gestion qui fasse appel à la réserve de Castillon, ce qui n'a pu être intégré dans le modèle utilisé.

Il paraîtrait nécessaire à la lecture de ces résultats de décliner une modalité de gestion qui mobilise la réserve de Castillon, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui du fait des marges existantes en temps présent. Cela implique potentiellement de plus grandes difficultés encore à tenir la cote touristique de la retenue de Castillon mais devrait en contre-partie soulager les contraintes de cote sur la retenue de Sainte-Croix

3. La gestion de l'eau des bassins non sécurisés : l'exemple du Buëch

Le bassin versant du Buëch draine près de 1500 km² à sa confluence avec la Durance (Figure 116). Pour l'essentiel les ressources exploitées sont locales. Quelques communes pour l'AEP et quelques ASA pour les besoins en irrigation situées en aval de Serres bénéficient des ressources du système Durance-Verdon. Les modélisations réalisées sur le Buëch à Serres permettent d'aborder la question de la gestion du devenir de l'équilibre offre-demande sur un territoire non sécurisé par le système Durance-Verdon.

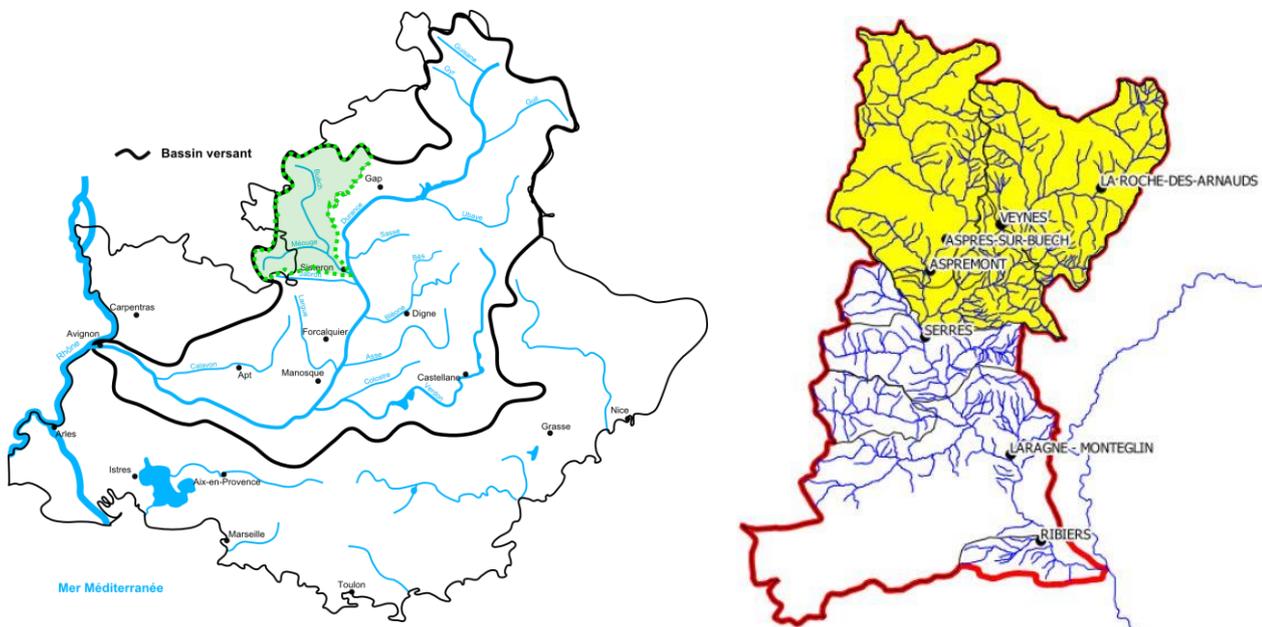


Figure 116 : Carte de la région PACA et position du bassin versant du Buech (en vert), à droite bassin versant du Buech à l'amont de Serres (En jaune) (Sources : K. Cros, Y. Arama, ACTeon 2013 et EVP Buech phase 5 et 6, 2012)

De par sa localisation géographique, ce bassin-versant présente un régime pluvio-nival (Figure 117) avec des écoulements maximum en avril et mai, période de fonte du manteau, et des étiages centrés en aout. Un

maximum local s'observe en novembre, lorsque les températures y sont encore suffisamment élevées pour que des précipitations sous forme liquides soient possibles. Sont rappelées les caractéristiques mensuelles et annuelles des principales variables hydro-climatiques du Buëch à Serres (pour mémoire les anomalies sont mesurées par les écarts entre 1980-2009 et 2036-2065). En moyenne, en 2050, la hausse des températures de l'air des mois de juillet à octobre dépasserait 2°C, l'évapotranspiration de référence ET_0 augmenterait de 10% et le mois d'août serait amputé de 25% du débit actuel.

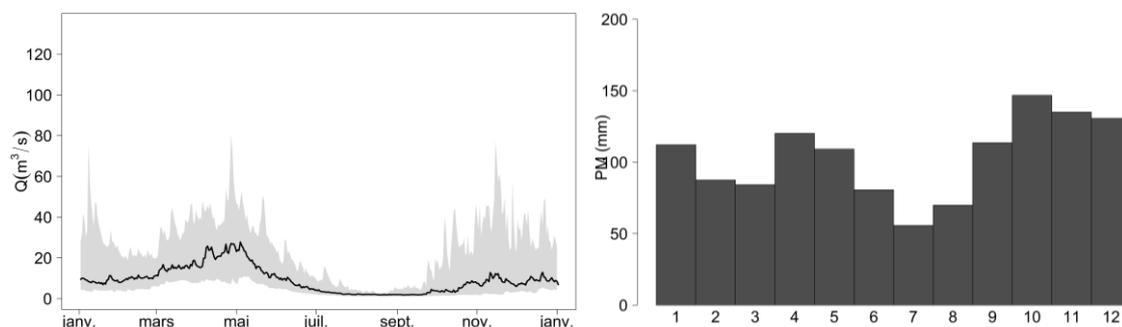


Figure 117 : Régimes hydrologique (extrait de la Figure 12, page 37) et pluviométrique du Buëch à Serres (observations temps présent 1980-2009)

	QA (m ³ /s)	QM (m ³ /s)											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1980-2009	13.4	15.5	12.5	19.2	26.6	20.5	9.3	4.0	2.4	4.5	12.0	19.4	15.6
Anomalie	-1.7	1.1	1.8	-2.2	-4.0	-4.3	-2.0	-1.0	-0.6	-0.8	-2.9	-3.4	-1.5
	PA (mm)	PM (mm)											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1980-2009	1246	112	88	84	120	109	81	56	70	114	147	135	131
Anomalie	-32.5	4.3	-1.8	-0.2	-3.5	-3.3	-2.9	-2.1	-1.9	-0.8	-15.7	-2.7	-1.9
	TA (°C)	TM (°C)											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1980-2009	7.5	-0.8	0.1	3.1	6.0	10.5	14.0	16.8	16.4	12.6	8.8	3.1	-0.1
Anomalie	1.7	1.3	1.5	1.2	1.3	1.4	1.8	2.4	2.5	2.2	2.0	1.6	1.3
	ET ₀ A (mm)	ET ₀ M (mm)											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1980-2009	767	25	33	52	65	85	103	125	109	73	45	28	23
Anomalie	64.0	1.0	2.3	3.0	4.4	5.4	9.0	10.7	11.0	8.4	5.4	2.3	1.3

Tableau 50 : Caractéristiques temps présent et futur pour le Buëch à Serres (extrait du Tableau 23, du Tableau 24 et du Tableau 25, pages 105-107)

Le bassin-versant du Buëch est un des 75 secteurs recensés en déficit quantitatif sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse. Entre 2003 et 2013, seules trois années (2008, 2010 et 2013) ont échappé à la promulgation d'arrêtés sécheresse (source : Agence de l'Eau RMC). De ce fait, ce secteur a fait l'objet d'une étude d'estimation des volumes prélevables (EVP), dont la partie étude quantitative a été réalisée par le bureau d'étude *Risques & Développement* (2011-2013). Cette étude doit fournir des « éléments qui doivent permettre un ajustement des autorisations de prélèvement d'eau dans les rivières ou les nappes concernées, en conformité avec les ressources disponibles et sans perturber le fonctionnement des milieux naturels » (source : <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/usages-et-pressions/gestion-quant/EEVPG.php>). Les résultats attendus sont :

- des valeurs pour le Débit Objectif d'Étiage (DOE, valeur de débit d'étiage au-dessus de laquelle il est considéré que l'ensemble des usages en aval est en équilibre avec le bon fonctionnement du milieu aquatique, et cela huit années sur dix) sur un ensemble de points de gestion ;
- des scénarios de répartition des prélèvements compatibles avec un bon fonctionnement des milieux.

Les principaux déterminants de la gestion de l'eau sur le Buëch ont été examinés sur les éléments d'un découpage en sous-bassin-versants dont celui en amont de Serres (723 km², soit environ la moitié de la surface totale du bassin). En effet, la station hydrométrique de Serres (Les Chambons) a été retenue parmi les huit points de gestion. Elle fait partie également des points nodaux du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), c'est-à-dire stratégiques pour la gestion de la ressource en eau.

Avant de proposer des répartitions des prélèvements, l'étude EVP a, en préambule, recensé et quantifié les prélèvements sur l'ensemble du bassin. Les principaux usages (AEP, industrie, agriculture) ont été examinés et ont fait l'objet de modélisation. Il est possible, en théorie, de comparer les valeurs, même si le bureau d'étude « Risques et Développement » insiste sur les incertitudes liées aux estimations et sur le fait que les valeurs produites ne peuvent servir de référence (phase II, page 25 ; phase V et VI, page 16).

Les modèles d'usage sont similaires dans leur « philosophie » : les représentations de la demande en AEP reposent sur les mêmes déterminants (population, demande unitaire, rendement des réseaux, source du prélèvement) et les besoins agricoles s'appuient sur des modèles de bilan hydrique à la parcelle.

L'AEP est assurée en grande partie par des prélèvements en nappe alluviale, dont celle du Buëch (25 à 35% selon l'EVP, phase II, page 23) et les compléments proviennent de captage de sources ou de forages. Dans R²D² 2050, l'AEP a été modélisée en considérant des prélèvements en nappe (Tableau 18, page 85). Les valeurs de rendements de l'EVP (référence 2009) oscillent entre 28 et 90% et, en absence d'information, la valeur affectée au canton est de 50%. Cette dernière valeur correspond à la moyenne des rendements pour les communes de moins de 400 habitants en France. Le rendement net global à l'échelle du bassin versant est évalué à 41%. Les prélèvements d'après les redevances de l'Agence de l'Eau atteignent 3.5 Mm³ sur la période 2003-2009 et ont été relativement stables sur cette période. Sur la base des rendements moyens de 0.41 pour l'étude EVP sur l'ensemble du territoire, les estimations conduisent à une demande égale à $2.20 \times 0.41 = 0.90$ Mm³ (cf. fiches de synthèse de l'EVP, phase V et VI, pages 36 à 72). Le même calcul reprenant, cette fois, les hypothèses de R²D² 2050 (rendement de 60% en 2010, Tableau 43, page 177) conduit à $0.60 \times 1.26 = 0.76$ Mm³, soit un écart relatif entre valeurs de 17%. Compte tenu des incertitudes, ce chiffre semble tout à fait cohérent.

L'usage dominant est l'irrigation avec des demandes maximales de juillet à septembre. Les deux études s'accordent sur le poids de l'irrigation gravitaire. A l'échelle de l'ensemble du bassin, 10% des surfaces irriguées sont sous système gravitaire mais les parcelles concernées se concentrent sur la partie nord (EVP, phase II, page 36 et page 49). Ceci semble cohérent avec le chiffre de 20% considéré dans R²D² 2050 (Figure 20, page 45). La comparaison des volumes prélevés est plus délicate. Selon l'EVP, 12.9 Mm³ sont prélevés pour l'irrigation en amont de Serres contre 10.6 Mm³ pour MODIC, soit un écart de 20%. Les volumes d'eau technique n'ont pas été isolés dans l'analyse de l'EVP, il est donc difficile de faire une analyse plus détaillée.

L'EVP considère une restitution des volumes prélevés à hauteur de 70% pour l'AEP (phase V et 6, page 17) et de 84% pour l'irrigation gravitaire (phase II, page 74). Le projet R²D² 2050 se fonde sur des valeurs générales de taux de consommations du SOeS (ex IFEN) - 76% de l'AEP retournent ainsi au milieu (cf. « Modélisation des besoins pour l'AEP », page 83) - et sur les simulations de MODIC pour estimer les restitutions. Les retours au milieu selon l'EVP sont plus élevés que ceux annoncés par R²D² 2050. Au final, l'EVP annonce une consommation de 5.5 Mm³ contre 3.9 Mm³ pour R²D²2050.

Cette comparaison montre, s'il en est besoin, que les estimations des prélèvements et des influences sont très incertaines. Les chiffres obtenus sont globalement cohérents mais les écarts ne sont pas négligeables. Un effort de bancarisation et de modélisation est nécessaire.

Au-delà de ce bilan, l'EVP propose des valeurs de DOE, ajustées sur le débit biologique du tronçon. Pour le Buëch à Serres, ces valeurs évoluent dans l'année : 1.6 m³/s en juillet, 1.4 m³/s en août et 1.6 m³/s en septembre. Ces valeurs pourraient à terme être un des seuils de référence de l'arrêté cadre sécheresse sur le Buëch. Nous avons donc cherché à estimer la fréquence de dépassement du seuil le plus faible en temps présent et en temps futur. Les modélisations ne sont pas parfaites. Les modèles ne parviennent pas à reconstituer les débits ; en revanche, ils sont plus aptes à reproduire la hiérarchie des valeurs. Il est illusoire de vouloir replacer les valeurs de DOE dans le régime des débits simulés. Nous avons donc défini des valeurs propres à chaque GCM/MDES/MH : tout d'abord, la fréquence au dépassement du seuil dans les observations

est estimée sur les observations ($F_{1.4}$); elle est ensuite associée au quantile $q_{F_{1.4}}$ correspondant en temps présent de chaque chaîne GCM/MDES/MH et finalement pour qualifier le futur, nous avons extrait les fréquences de dépassement associées à ces quantiles sur l'année ($F_{q_{F_{1.4}}}$). Le « hasard » fait que la fréquence de dépassement de $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ est 95%, il s'agit donc du q_{95} et l'analyse est celle déjà effectuée plus haut. Le Tableau 51 reprend les résultats obtenus sur sa partie gauche (Tableau 33, page 120).

En moyenne, les débits se situeront sous seuil de $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ environ 55 jours par an contre 18 jours actuellement. Sur la partie droite du Tableau 37 (page 126), nous avons rappelé les résultats de l'application du dispositif d'arrêtée sécheresse de la section « Impact sur les dispositifs « arrêtés sécheresse » » (page 124). L'utilisation du seuil $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ pourrait être plus contraignante que considéré le seuil de niveau 2 (premier seuil déclenchant des restrictions). Les résultats des simulations des modèles hydrologiques montrent que la fréquence naturelle des débits sous $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ sera plus élevée. Quoi qu'il arrive, le milieu sera peut-être fragilisé du fait du seul changement climatique (ressource moins abondante et qualité certainement moindre).

	$\Delta DQ95$ (jour)					Nombre de jour dans chaque classe FUT				
	μ	σ	q_{10}	q_{90}$	|\mu/\sigma|$	(2+3+4)	1	2	3	4
CEQUEAU	30.5	7.7	21.9	40.2	4.0	36	46	15	8	13
CLSM	42.1	12.6	25.6	58.4	3.3	52	58	19	10	23
GR5J	34.4	11.0	21.9	51.1	3.1	37	43	15	8	14
J2000	38.9	20.8	14.6	65.7	1.9	37	43	15	8	14
MORDOR	43.4	14.0	25.6	62.1	3.1	58	59	20	11	27
ORCHIDEE	33.9	8.4	21.9	43.8	4.0					
TOUS	37.2	13.9	21.9	54.8	2.7					
Nombre de jours sous le seuil	55.5	32.2	40.2	73.1	21.0	44	50	17	9	18

Tableau 51 : Changement sur la durée caractéristique d'étiage $DQ95$ (en jour) (extrait du Tableau 33) - Evolution du risque d'occurrence des niveaux d'alerte entre avril en novembre en 2050 pour le Buëch à Serres (en jour) (extrait du Tableau 37)

L'EVP conclut en proposant cinq pistes de répartition des volumes prélevables entre usages, conçus pour mieux atteindre un équilibre entre ressource disponible et besoins exprimés par les usages (services écologiques y compris). Elles requièrent des réductions des prélèvements. Les enjeux sont autour de l'irrigation car la demande en AEP est faible. Les solutions proposées ne parviennent à garantir le DOE. Il est intéressant de rappeler que des économies d'eau ont été intégrées dans nos scénarios (changement de pratique d'irrigation et amélioration des rendements). Aucune des trajectoires ne conduit à une baisse sensible de la demande en eau sur ce territoire. Au mieux elle reste à un niveau équivalent à celui actuel.

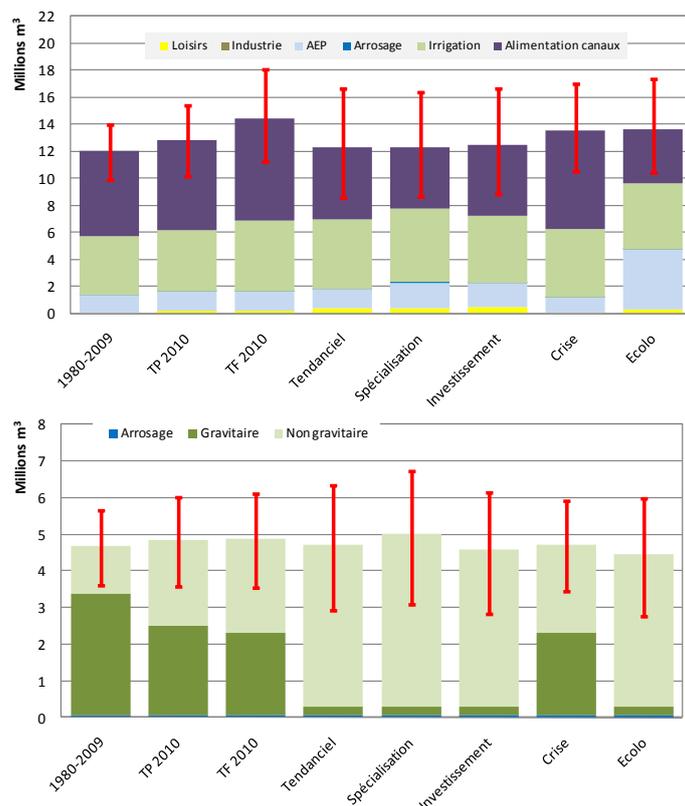


Figure 118 : Volumes totaux prélevés par usage (extrait de la Figure 104, page 185) (haut) et Prélèvements de l'irrigation selon les scénarios et modélisation de la demande pour la période 2050 (bas) – « TP 2010 » = Climat temps présent et territoire Niv2010 ; « TF 2010 » = Climat temps futur et territoire Niv2010.

Le croisement des contraintes de gestion actuelle exprimés par l'EVP et des projections hydro-climatiques du projet R²D² 2050 fait craindre des risques de déséquilibres plus prononcés à l'horizon. La ressource naturelle sera diminuée, comme sur les bassins voisins, et sera tout autant sollicitée qu'actuellement. Sans action sur le territoire (Niv2010, cf. TF 2010 sur la Figure 118), la demande en eau sera accrue d'environ 2 Mm³. Les économies d'eau intégrées dans les scénarios permettent, dans le meilleur des cas, de maintenir la pression au volume actuel (soit 12 Mm³/an). Cette demande ne sera pas forcément garantie car des restrictions d'usage pourraient être plus fréquentes (que ce soit en calant le dispositif arrêté sécheresse sur le modèle simplifié développé dans le projet, ou en intégrant le DOE d'août comme un des seuils dans l'échelle de sévérité). Le Buëch dans sa partie amont est un des territoires non sécurisés, l'aval pouvant bénéficier du barrage de Saint-Sauveur ou de la proximité au canal usinier de la Durance. Même si il est délicat de généraliser l'analyse développée, il est vraisemblable que la situation des bassins déconnectés de la Durance pourrait être critique sous l'effet conjugué des changements climatiques et anthropiques. Des pistes d'adaptation devront être envisagées pour réduire le niveau de pression sur les milieux sur des secteurs actuellement en déficit quantitatif. Eu égard à l'aggravation du déséquilibre entre offre future et demande future, les adaptations possibles de plusieurs ordres :

- en termes de connaissance et de gouvernance :
 - o l'évaluation régulière des trajectoires des variables clés jouant sur l'équilibre offre-demande et l'actualisation régulière des études sur la ressource ;
 - o la confirmation et le maintien de l'existence d'une instance représentative à l'échelle du bassin versant des intérêts liés aux prélèvements en eau garantissant la capacité d'anticipation collective ;
- en termes de demande en eau :
 - o la mise en œuvre de politiques de maîtrise (voir de réduction) de la demande en eau à l'échelle des enjeux intermédiaires (2020, 2030 et 2040) anticipant les tendances à venir ;
 - o si la hausse de la population devait se confirmer, elle devra s'accompagner d'une augmentation importante des rendements des réseaux et d'un maintien de la consommation unitaire et d'une maîtrise de la demande agricole et des canaux. L'ensemble de ces éléments nécessiterait une continuation du soutien technique et financier au renouvellement des

- réseaux, une politique de densification de l'habitat et la mise en œuvre d'une politique tarifaire progressive, saisonnalisée et en adéquation avec les investissements nécessaires ;
- la demande en eau agricole ne pourra pas croître à l'horizon 2050 sauf dans le cadre d'une politique de transfert ou d'une baisse des objectifs environnementaux ;
 - le passage sous pression pourrait permettre de dégager des marges de manœuvre en termes de consommation finale d'eau et d'impact socio-économique sur l'activité locale. Un programme d'investissement public devra fortement soutenir cette évolution eu égard à l'incapacité des agriculteurs à soutenir les investissements induits.
- en termes d'allocation aux milieux aquatiques : la décision de maintenir certains débits biologiques et DOE actuels ou de les faire évoluer avec l'évolution de la ressource naturelle devra être prise à mi-parcours.

XII. La question de l'adaptation

Le projet avait l'ambition d'examiner, à l'issue des résultats de modélisation, la question de stratégies possibles sur le territoire pour atténuer les effets négatifs du changement global. Cette question n'a pas pu être abordée pleinement, principalement faute de temps. Nous avons cependant rassemblé des éléments de natures diverses qui pourraient alimenter des débats et discussions futurs, présentés dans les deux sous-sections suivantes. Le premier élément est une contribution du territoire et de ses acteurs, recueillie lors de l'atelier de restitution des résultats du projet en mars 2014. Le second élément est une synthèse de préconisations d'adaptation issues d'une expertise précédente. Ces éléments n'ont pas pu être exploités plus en avant dans le projet.

1. Première réaction des acteurs sur la base des résultats du projet

Pour asseoir des mesures d'adaptation efficaces et acceptées par les acteurs, le territoire peut s'inspirer de ses propres analyses. C'est dans cette optique que l'équipe projet a réuni les acteurs locaux de la gestion de l'eau du système Durance le 27 mars 2014. Les objectifs étaient de partager les résultats et d'envisager leurs implications. Trente-cinq personnes ont assisté à cette journée. Ces personnes avaient participé à la construction des scénarios territoriaux. Cette sous-section est un extrait du compte-rendu de la journée (ACTeon *et al.*, 2014). Aucun document n'avait été transmis avant la journée ; les acteurs ont donc découvert les résultats en séance sans avoir le temps pour prendre le recul sur les analyses et les chiffres présentés. Les propos et conclusions appartiennent aux seuls participants. Nous avons recueilli les réactions « à chaud » et les avons restituées telles quelles dans le compte-rendu. Le Tableau 52 fournit le programme des discussions et présentations de la journée.

Début d'activité	Activités
09:30	Accueil de l'ensemble des participants
09:45	Ouverture de l'atelier Rappel du projet
10:05	L'offre naturelle future Présentation des travaux autour de la climatologie et l'hydrologie du futur : Méthodes et enseignements
11:00	La demande en eau future Présentation des travaux autour des scénarios territoriaux contrastés et leur traduction en termes de demandes et prélèvement en eau : méthodes, enseignements et résultats intermédiaires
13:00	Pause
14:15	Confrontation offre-demande Présentation des travaux autour de la modélisation des retenues et de leur capacité à fournir les services attendus
15:45	Débats ouverts autour des résultats
16:45	La suite
17:00	Fin de l'atelier

Tableau 52 : Programme de la journée « Atelier de gestion » du 27 mars 2014 organisé au siège de la SCP

La dernière heure a donné lieu à une série d'échange autour des enjeux **d'adaptation au regard des résultats présentés. Quatre types d'enjeux ont émergé dans la prise en compte du changement climatique.**

Des enjeux de redéfinition des arbitrages sur l'allocation de la ressource et notamment des points sensibles :

- Globalement, les participants retiennent que les résultats posent une question autour de la capacité du territoire à redéfinir les solidarités et priorités sur le système Durance Verdon (entre territoires et entre usages).
- Spécifiquement, les participants retiennent :
 - Une tension sur la cote touristique entre Sainte-Croix et Castillon et le fait que le système ne pourra pas satisfaire les deux en même temps ;

- Une tension entre les usages « hydroélectricité » et « tourisme » (cote touristique et baisse du productible et faible capacité à produire aux moments de pointe ou maintien du productible)

Des enjeux sur la mobilisation de ressources alternatives :

- Un participant retient le fait que le territoire pourrait manquer de ressource en eau dans le futur. Se pose la question des ressources alternatives. Sont citées
 - le **Rhône** (« avec peu de plausibilité tout de même ») ;
 - les **ressources souterraines locales** à examiner pour soulager la sollicitation de la ressource Durance et Verdon notamment en période de pointe. A ce titre une personne explique qu'il y a 10 ans les communes du Var utilisaient l'eau du Canal de Provence uniquement en situation de pointe. Elles favorisaient globalement leurs ressources locales le reste de l'année. Aujourd'hui, la SCP est en concertation pour utiliser la ressource du Verdon tout au long de l'année et utiliser les ressources locales pour les périodes de pointes. Cela pourrait permettre d'éviter de déstocker en moment de la pointe. Cette option nécessite une gestion concertée très efficace.
- Une autre personne réagit en expliquant que le **changement climatique ne se limite pas qu'au territoire d'étude**. En terme relatif d'autres régions pourraient avoir besoin d'eau : la Durance pourrait offrir une alternative. Cela implique une redistribution entre usages sur le bassin si la nécessité d'une **solidarité inter-régionale** s'impose.

Des enjeux de méthode autour de la définition des priorités futures d'allocation internes et externes au système Durance-Verdon actuel :

- Si la ressource viendra à manquer, chaque grande catégorie d'usage devra réfléchir aux questions de rééquilibrage éventuel entre usages. Si le besoin de rediscuter ces éléments se confirme, il sera nécessaire d'éclairer l'espace décisionnel en **évaluer les impacts économiques et sociaux** de ces changements et des bénéfices portés par chacun (privés et publics) ;
- Un participant insiste sur la nécessité d'arbitrer l'allocation future de la ressource entre usages **en fonction de leur valorisation productive** ;
- En parallèle, d'autres acteurs évoquent l'importance d'**évaluer l'ensemble des aménités positives**, y compris celles « indirectes » des demandes et allocations en eau pour certains usages. La nappe de la Crau est donnée en exemple. Globalement, il s'agira d'évaluer les **coûts et bénéfices à l'échelle publique et collective** ;
- La nécessité d'évaluations coût/bénéfices pose globalement la question de l'**échelle de l'intérêt public à évaluer**. Un certain nombre d'enjeux se joue au-delà du bassin à une échelle intra-régionale voire nationale. A ce sujet, un participant interpelle l'assemblée en demandant : « à quoi sert l'hydroélectricité à l'échelle du mix énergétique national » ? Deux arbitrages sont en jeu ici : **arbitrage entre « eau et énergie »** et un autre entre **« local et national »**.

Des enjeux de processus de suivi et de gestion de l'évolution de la ressource et de mise à jour des allocations des prélèvements

- Une personne exprime le fait qu'aujourd'hui « les aménagements sont à buts multiples » mais que cette situation pourrait ne pas être tenable dans le futur. L'obligation d'opérer des rééquilibrages entre usages posera de « grosses questions ». Il existe une nécessité d'**aborder ces questions avant 2050**, pour avoir le temps d'opérer les bons arbitrages et ne pas attendre que « la crise advienne ».
- Certains participants rappellent qu'entre 2014 et 2050, il y a une trentaine d'années. « Aujourd'hui la ressource est là et elle ne va pas disparaître du jour au lendemain ». S'il faut **agir avant la crise**, il faut **prendre le temps** de bien poser les problèmes.
- D'autres évoquent le **caractère incertain** du devenir du territoire autant que du devenir des ressources naturelles en eaux (incertitudes des résultats).
- Le groupe évoque l'enjeu de mettre en place une « **cellule de suivi** » pour « voir dans quelle direction on va » **par rapport aux résultats de l'étude** et « pour faire le point sur la nécessité de **revoir les modalités de gestion** ». S'il existe des espaces de discussion collectifs stratégique à l'échelle infra-territoriale et supra-territoriales (Région PACA), les lieux de discussion pour une gestion opérationnelle sont plutôt bilatéraux aujourd'hui. Par ailleurs, ces espaces sont centrés sur la gestion du court terme et non pas du long terme. Il « faudrait d'autres modes d'organisation pour se projeter dans du plus lointain et pour dialoguer plus efficacement ». « Beaucoup de dimensions restent à aborder et à construire ». Si les démarches des dernières années vont plutôt dans ce sens, l'organisation actuelle n'est pas encore en place pour discuter efficacement des implications des résultats de l'étude. A ce stade on peut citer :

- le SMAVD qui a vocation à terme de mettre en place une institution pour répondre à la question de la gestion de la ressource de la Durance. Cette démarche ne fait que commencer ;
- la préfecture de région a voulu relancer le Plan Durance. La question du périmètre du futur SAGE pourrait être préparée par le Plan Durance ;
- la région PACA, dans le prolongement du SOURCE, met aujourd'hui en place l'AGORA, un espace de discussion pour débattre et partager à une échelle plus large de la gestion de l'eau.

EN RESUME

- ▶ UN ARBITRAGE ACTUEL DE L'ALLOCATION DE LA RESSOURCE FUTURE QUI SERAIT A REVOIR
- ▶ DES METHODES DE DEFINITION DES PRIORITES A DISCUTER EN AMONT DE TOUTE DECISION
- ▶ UNE DEMANDE A REORIENTER VERS D'AUTRES RESSOURCES
- ▶ UN COMITE DE SUIVI DE L'EVOLUTION DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE A L'ECHELLE DU SYSTEME DURANCE-VERDON A METTRE EN ŒUVRE

2. *Préconisations d'adaptation issues de l'étude prospective des effets du changement climatique dans le Grand Sud-Est (Etude MDCIE)*

Les réflexions sur l'adaptation ont commencé à émerger depuis quelques années, que ce soit à l'échelle nationale (étude Explore2070) ou régionale. Nous nous sommes arrêtés sur les travaux récents réalisés dans le cadre de la Mission d'Etude et de Développement des Coopérations Interrégionales et Européennes (MEDCIE) Grand Sud-Est qui a engagé en 2008, en collaboration avec la DATAR, un vaste programme sur la question de l'adaptation au changement climatique. Celui-ci a abouti à la définition d'une liste de préconisations d'orientations pour une stratégie d'adaptation sur ce territoire interrégional (MEDCIE Grand Sud-Est, 2011). Huit grands enjeux, croisant composante sectorielle et composante milieu ont été identifiés, le premier portant sur « *L'optimisation de la gestion de la ressource en eau, dans le temps et dans l'espace* ».

Afin de répondre à cet enjeu d'optimisation de la ressource en eau, huit mesures ont été définies, en partant du postulat que « *des mesures "agressives" d'économie d'eau seront incontournables et un arbitrage sera probablement à trouver entre agriculteurs, producteurs d'énergie, habitants et touristes en période critique, ainsi que des échanges inter-régionaux* ». Ces orientations, qui portent d'une part sur **une optimisation de la production** et d'autre part sur **une optimisation de la consommation**, sont déclinées par mesures et comportent un certain nombre de recommandations de mise en œuvre détaillées dans les tableaux ci-après.

En outre, **deux axes de recherche** ont été identifiés sur le dessalement de l'eau de mer et sur la relation entre eaux de surface et eaux souterraines.

Parmi l'ensemble des orientations proposées pour répondre à l'enjeu d'optimisation de la gestion de la ressource en eau, trois sont jugées particulièrement prioritaires et pertinentes. Il s'agit de :

- **la mise en place d'un programme de réduction des fuites d'eau** : nécessite des mesures d'aménagement qui concernent tout le territoire, sa faisabilité est considérée comme élevée ;
- **le déploiement d'infrastructures de réutilisation des eaux usées à usage agricole** : à déployer prioritairement en zone urbaine, cette orientation nécessite le déploiement de normes et de réglementation et peut ainsi être complexe à mettre en œuvre ;
- **la modification de la taxation sur l'eau pour plus de responsabilité** : cette orientation qui concerne tout le territoire peut s'avérer complexe à mettre en œuvre puisqu'elle nécessite une modification des subventions et de la fiscalité.

La thématique de l'eau, qui constitue le premier enjeu identifié dans l'étude de la MDCIE, s'avère être essentiel et en interrelation direct avec l'ensemble des sept autres enjeux définis dans l'étude : attractivité touristique du territoire, augmentation des risques naturels, confort thermique estival en ville, santé des populations, approvisionnement énergétique, pratiques agricoles et forestière, préservation de la biodiversité et des écosystèmes remarquables.

OPTIMISATION DE LA PRODUCTION					
ORIENTATIONS	MESURE	PILOTES	PARTENAIRES	ECHELLE TEMPORELLE	ECHELLE GEOGRAPHIQUE
Mettre en place un programme ambitieux pour la réduction des fuites	Programme volontariste de renouvellement des réseaux à l'échelle régionale, en concertation avec les gestionnaires de réseaux en lien avec les obligations réglementaires	Services de l'Etat	Communes, communautés de communes, agences de l'eau, concessionnaires ou délégataires de service public	Echéance 2013 pour le diagnostic des réseaux et 2016 pour le début de la mise en œuvre (75 % des contrats de gestion du service d'eau arrivent à échéance en 2015).	Déploiement sur l'ensemble du périmètre Grand Sud-Est en commençant par les zones sous tension, soit 20% des communes en 2012, avec progression jusqu'à 100 % en 2020
	Soutien technique et financier pour les communes partant d'un rendement particulièrement bas, avec en conséquence un objectif probable de renouvellement plus élevé	Services de l'Etat	Région, agences de l'eau, mécanismes spécifiques de soutien financier (ex. Fonds de Solidarité Rurale)	Identification des communes en 2013 lors de la phase de diagnostic des réseaux et mise en place d'un dispositif de soutien d'ici 2015.	Communes avec un taux de perte particulièrement important (par exemple, > 40%), identifiées en 2013
Déployer un dispositif de stockage des eaux pluviales	Projets pilote de « réseaux d'eau intelligents » (zones sous tension)	Communes, communautés de communes	Services de l'Etat, Région, communes, communautés de communes, agences de l'eau	2012 – 2015	Tout le territoire, ciblage plus spécifique des zones sous tension
	Subvention complémentaire dans zones à risques pour la mise en place de dispositifs de collecte d'eau pluviale ; Définition de zones spécifiques de vulnérabilité en termes de pénurie d'eau (dans le cadre de scénarios sur la Ressource en eau), Généralisation de subventions qui viennent compléter le crédit d'impôt	Préfet, dans le cadre des réflexions portées par le MEEDDTL	Conseils Régionaux (dispositifs de subventions), Agences de l'eau Partenaires impliqués dans la définition de scénarios sur la ressource en eau		

ORIENTATIONS	MESURE	PILOTES	PARTENAIRES	ECHELLE TEMPORELLE	ECHELLE GEOGRAPHIQUE
	Définition d'une réglementation sur la collecte des eaux pluviales en zone urbaine : dispositif combinant taxe sur les eaux pluviales à l'échelle individuelle et exonération si mise en place d'un dispositif adéquat	Etat via DGALN (cf. projet de décret « taxe pluviale »)	Services de l'Etat déconcentrés, agences de l'eau, communautés urbaines et d'agglomérations		
Déployer des dispositifs de transfert des eaux mobilisables en cas de déficit ponctuel local	Intégration des pratiques actuelles et potentielles de transfert d'eau dans des scénarios régionalisés	Préfecture	DREAL, agences de l'eau		
	Définition des conditions spécifiques pour le recours aux pratiques de transfert d'eau et l'encadrement réglementaire conséquent	Préfecture	DREAL, agences de l'eau		
Déployer les dispositifs de recyclage des eaux usées hors eau potable	Dans le cadre de la révision des SAGE, définition d'un objectif de pourcentage de réutilisation des eaux usées à différents horizons temporels, prioritairement dans les zones sous tension	Agences de l'Eau	Services de l'Etat, collectivités locales	2012	Zones sous tension
	Projets pilotes exemplaires de réutilisation des eaux usées urbaines , par exemple réalisation de nouveaux projets urbains	Communautés urbaines	Services de l'Etat, collectivités locales, agence de l'eau	Projet à identifier en 2012	Zones urbaines (grandes zones)
	Communication sur les bénéfices et les risques (maîtrisés) de la REU	Préfet	Services de l'Etat	2012	Tout territoire

OPTIMISATION DE LA CONSOMMATION					
ORIENTATIONS	MESURE	PILOTES	PARTENAIRES	ECHELLE TEMPORELLE	ECHELLE GEOGRAPHIQUE
Modifier les taxations de l'eau pour plus de responsabilité	Cadre harmonisé de tarification fixant les tranches et la progressivité des tarifs d'une tranche à l'autre, tout en prenant en compte localement la question de la qualité de l'eau, Elaboration de seuils communs de consommation ; à titre d'illustration, un premier seuil fixé à 80 m ³ , avec progression des tarifs	Communes, communautés de communes	Services de l'Etat, agences de l'eau, concessionnaires ou délégataires de service public	2012, en parallèle à la révision des redevances par les agences de l'Eau	Tout territoire
	Mise en place d'une tarification incitative de l'eau en commençant par les zones sous tension (tarification progressive de manière générale ; tarification saisonnière pour les zones touristiques)	Communes, communautés de communes	Services de l'Etat, agences de l'eau, concessionnaires ou délégataires de service public	20% des communes en 2012, avec progression jusqu'à 100% en 2020	Zones sous tension dans un premier temps, puis élargissement à tout le territoire
Mettre en place une expérience de "Neutralité en eau" à l'échelle d'un territoire	Appel à projets pour une (des) expérience(s) à l'échelle d'un territoire pour réaliser une expérimentation pilote (3 ans) avec l'objectif d'en préciser les conditions de déploiement au niveau national	Préfecture, en lien avec services de l'Etat	Collectivités locales, entreprise distributrice, agence de l'eau, ANR (piste de financement "investissements d'avenir")		
	Cadre de contractualisation entre l'Etat et les distributeurs d'eau pour des objectifs de maîtrise de la demande en eau, sur le modèle d'accord cadre ADEME – EDF sur la maîtrise de la demande en énergie	DGALN/DEB	Entreprises distributrices, agences de l'eau, ADEME		

ORIENTATIONS	MESURE	PILOTES	PARTENAIRES	ECHELLE TEMPORELLE	ECHELLE GEOGRAPHIQUE
Rendre obligatoire l'évaluation prospective des besoins en eau correspondant aux projets de ZAC / d'aménagement	Cahier type de prescription pour une gestion intégrée de l'eau à l'échelle d'un projet d'aménagement	Préfecture, en lien avec services de l'Etat	Collectivités locales, agence de l'eau, acteurs du secteur		
	Projets « exemplaires » , prenant en compte une phase d'expérimentation	Préfecture, avec services de l'Etat	Collectivités locales, ANR (piste "investissements d'avenir")		
	Etude spécifique pour tout projet d'aménagement au regard de l'étude d'approvisionnement en énergie	MEDDE	Services de l'Etat, collectivités		
Réaliser des scénarios prospectifs "opérationnels" à horizons 2010 et 2050 pour confronter la ressource future et la demande multi-acteurs en eau à l'échelle locale	Méthodologie commune d'élaboration de scénarios prospectifs sur l'évolution de la ressource et de la demande en eau, en mutualisant les diverses expériences en cours	Services de l'Etat / DREAL de bassin	Agences de l'eau, laboratoires de recherche, Centre d'Analyse Stratégique		
	Déploiement progressif de ces scénarios sur l'ensemble de ces territoires en lien avec le processus de révision des SDAGE	Services de l'Etat / DREAL de bassin	Agences de l'eau, laboratoires de recherche		

Parmi l'ensemble des orientations proposées pour répondre à l'enjeu d'optimisation de la gestion de la ressource en eau, trois sont jugées particulièrement prioritaires et pertinentes. Il s'agit de :

- la mise en place d'un programme de réduction des fuites d'eau : nécessite des mesures d'aménagement qui concernent tout le territoire, sa faisabilité est considérée comme élevée ;
- le déploiement d'infrastructures de réutilisation des eaux usées à usage agricole : à déployer prioritairement en zone urbaine, cette orientation nécessite le déploiement de normes et de réglementation et peut ainsi être complexe à mettre en œuvre ;
- la modification de la taxation sur l'eau pour plus de responsabilité : cette orientation qui concerne tout le territoire peut s'avérer complexe à mettre en œuvre puisqu'elle nécessite une modification des subventions et de la fiscalité.

La thématique de l'eau, qui constitue le premier enjeu identifié dans l'étude de la MDCIE, s'avère être essentiel et en interrelation direct avec l'ensemble des sept autres enjeux définis dans l'étude : attractivité touristique du territoire, augmentation des risques naturels, confort thermique estival en ville, santé des populations, approvisionnement énergétique, pratiques agricoles et forestière, préservation de la biodiversité et des écosystèmes remarquables.

XIII. Un regard sur les incertitudes

1. Incertitudes sur la ressource et sur la demande en eau

Tout exercice prospectif véhicule de nombreuses incertitudes, et le projet R²D² 2050 s'est attaché à identifier les sources de ces incertitudes, les prendre en compte dans les exercices de simulation, et quantifier leurs contributions aux résultats.

Identification des incertitudes

Quatre types d'incertitudes sont généralement distinguées dans les études d'impact du changement climatique (Collins, 2007 ; Stainforth *et al.*, 2007). Ces types d'incertitudes ainsi que leur prise en compte dans le cadre du projet sont détaillées ci-dessous et synthétisées dans le Tableau 53.

Type	Socio-économique	Structurelle	Paramétrique	Variabilité interne
Nature	Ambiguïté	Épistémique	Épistémique/ Aléatoire	Aléatoire
Approche	Multi-scénarios	Multi-modèle	Multi-paramètres	Multi-réalisations
	Forçages anthropiques externes			
	Modélisation globale du climat			
Niveau		✓		✓
	Régionalisation statistique du climat			
		✓		✓
	Modélisation de la ressource en eau			
	✓	✓	✓	
	Modélisation de la demande en eau			
	Modélisation de la gestion de l'eau			

Tableau 53 : Identification des types d'incertitudes, leur nature et l'approche communément adoptée pour les prendre en compte à différents niveaux de la chaîne de modélisation. Les cases grisées correspondent aux combinaisons pas ou très peu rencontrées dans de telles études. Les coches dénotent les combinaisons type/niveau prises en compte dans le projet R²D² 2050

Incertitude socio-économique

Ce type d'incertitude provient de la non connaissance *a priori* de la société future et est pris habituellement en compte en considérant plusieurs scénarios.

En début de chaîne de modélisation, ce type d'incertitude se retrouve dans le choix entre différentes trajectoires d'émission de gaz à effet de serre qui servent de forçages aux modèles climatiques globaux. Dans le cadre du projet R²D² 2050, seul le scénario d'émission « médian » A1B a été considéré. L'incertitude sur les scénarios d'émission n'est donc pas traitée dans le projet, mais elle devrait être faible au regard des autres sources d'incertitudes, puisque les réponses du système climatique global ne divergent que dans la deuxième partie du XXI^e siècle. Se basant sur l'ensemble des projections climatiques globales CMIP3 (Meehl *et al.*, 2007), Hawkins et Sutton (2009) estiment à environ 10% la part de variance due à cette source d'incertitudes sur les changements de température moyenne décennale à l'horizon 2050 à l'échelle des îles Britanniques. Pour les précipitations, cette part de variance apparaît négligeable devant le choix du modèle climatique globale et sa variabilité interne (voir ci-après), même à l'échelle de l'Europe (Hawkins et Sutton, 2011).

En fin de chaîne de modélisation, et plus précisément dans l'étape de modélisation des ressources en eau, ce type d'incertitude apparaît à deux endroits. Tout d'abord, dans le choix des scénarios prospectifs de demande en eau à l'échelle du bassin. Cette incertitude est prise en compte dans le projet au travers du développement de six scénarios (cinq correspondant à différentes évolutions territoriales et un correspondant à une situation figée en 2010).

L'incertitude socio-économique se retrouve aussi dans le choix des règles de gestion de la ressource ; c'est-à-dire ici dans les règles de gestion des retenues. Dans le projet, ces règles ont été considérées comme constantes au cours du temps, sans prise en compte d'une éventuelle adaptation future aux changements globaux sur le bassin.

Incertitude structurelle

L'incertitude structurelle est liée à l'imperfection de la structure d'un modèle, que ce soit un modèle climatique global, une méthode de régionalisation statistique, un modèle hydrologique, ou un modèle de gestion de la ressource. De telles imperfections peuvent être une conséquence de la représentation manquante d'un processus physique dans un GCM (Oreskes *et al.*, 1994 ; Smith 2002), ou celle d'un prédicteur important dans une méthode de régionalisation statistique (Wetterhall *et al.*, 2006). L'approche communément adoptée pour

prendre en compte ce type d'incertitude est de considérer un ensemble de structures différentes, et ce à chacun des niveaux de la chaîne de modélisation. Une telle approche est qualifiée d' « ensemble d'opportunité » par Tebaldi et Knutti (2007) car ne sont considérées que les structures disponibles au moment de l'étude. Le point important est de sélectionner des structures le plus différentes possibles afin d'échantillonner au maximum l'espace des possibles.

Dans le cadre du projet, cette approche a tout d'abord été utilisée au niveau de la modélisation climatique globale, en considérant des projections de quatre GCMs différents issus du projet ENSEMBLES (van der Linden et Mitchell, 2009). Des analyses de similarité entre GCMs ont été réalisées sur ceux ayant participé à l'exercice d'intercomparaison CMIP3 (Meehl *et al.*, 2007). Les versions des GCMs mises en œuvre dans le cadre du projet ENSEMBLES et considérées ici sont très proches de celles ayant participé à l'exercice CMIP3, seul EGMAM2 n'est pas présent dans ces analyses de similarité. Masson et Knutti (2011) montrent ainsi qu'ECHAM5 et IPCM4 sont très semblables en termes de champs de température mensuels à l'échelle du globe sur la période de contrôle, avec un comportement très différent de CNCM3. Pour les précipitations, CNCM3 et IPCM4 apparaissent proches et assez différents de ECHAM5 (Mason et Knutti, 2011). Les résultats de Pennel et Richler (2011) montrent que ces trois modèles échantillonnent de façon satisfaisante la diversité des GCMs de l'exercice CMIP3 sur la base d'un critère multi-variables saisonnier de corrélation avec la moyenne d'ensemble multi-modèles. Enfin, Johns *et al.* (2011) fournissent des éléments d'intercomparaison des GCMs du projet ENSEMBLES repris en partie dans le Tableau 54. Ces éléments montrent une grande diversité de réponses aux forçages anthropiques du scénario A1B pour la fin du XXI^e siècle, avec deux modèles très sensibles en termes de température et précipitations (IPCM4 et ECHAM5), et EGMAM2 beaucoup moins sensible sur ces deux variables. En résumé, les quatre GCMs considérés ici semblent suffisamment différents pour capturer une grande partie de la diversité des GCMs de cette génération-là.

GCM	ΔT (°C)	ΔP (mm/j)
CNCM3	1.95	0.105
EGMAM2	1.76	0.045
IPCM4	3.15	0.171
ECHAM5	3.28	0.152

Tableau 54 : Réponse des GCMs considérés au scénario A1B en termes de changements moyens globaux entre les périodes 1980-1999 et 2080-2099, d'après Johns *et al.* (2011)

L'utilisation d'un ensemble de structures différentes a aussi été adoptée pour l'étape de régionalisation du climat, en considérant trois méthodes différentes (voir Tableau 20, page 96). Il est ici difficile de se prononcer sur leur représentativité dans l'ensemble des méthodes existantes. En effet, de nombreuses techniques de régionalisation statistique ont été développées au cours des dernières décennies, selon trois grandes approches (Perfect Prognosis, Model Output Statistics, Générateurs de temps) en plus de l'approche dynamique mettant en œuvre un modèle régional de climat (Fowler *et al.*, 2007 ; Maraun *et al.*, 2010). Les trois méthodes (ANALOG, DSCLIM, D2GEN) sont de types Perfect Prognosis et sont des variantes de la méthode de rééchantillonnage dite des analogues où les variables futures sont extraites d'une archive observée sur la base d'analogie des prédicteurs. En conséquence, l'incertitude structurelle sur cette étape de régionalisation peut être sous-estimée. Il est cependant important de souligner que l'incertitude structurelle liée à cette étape a longtemps été considérée comme négligeable devant celle associées aux modèles climatiques. Les analyses effectuées dans le cadre du projet ont permis d'explorer la validité de cette affirmation en considérant trois méthodes de régionalisation importantes développées et utilisées en France au cours des années passées.

L'étape de modélisation hydrologique tire elle aussi partie de cette approche multi-modèle pour estimer l'incertitude structurelle. Sept modèles hydrologiques (CEQUEAU, GR5J, Isba-Durance, CLSM, MORDOR, J2000, ORCHIDEE) sont considérés dans le cadre du projet et présentent un éventail très large de structures sous-jacentes, du modèle conceptuel global (GR5J) au modèle distribué à base physique (ORCHIDEE). Ces modèles sont décrits en détail dans la section « Modélisation de la ressource en eau » (page 58), et leurs caractéristiques listées dans le Tableau 9 (page 58). L' « ensemble d'opportunité » utilisé ici permet donc a priori de balayer de façon satisfaisante la gamme des structures possibles, même si atteindre l'exhaustivité est là encore impossible. À noter qu'Isba-Durance n'a été utilisé que dans la phase de modélisation sous climat observé.

Concernant l'étape de modélisation de la demande en eau, une approche multi-modèles a aussi été utilisée, mais pour l'aspect agriculture seulement (voir section « Modélisation des besoins pour l'agriculture », page 72). Trois modèles (Five-CoRe, MODIC et SiSPAT) résultant de philosophies de modélisation très différentes, du bilan hydrique à un horizon (MODIC, dont deux versions ont de plus été considérées) à un modèle de transfert eau-énergie dans le continuum sol-végétation- atmosphère (SiSPAT) en passant par un modèle utilisé de manière opérationnelle par les acteurs du bassin (Five-CoRe) ont ainsi été mis en œuvre. On peut effectuer ici les mêmes remarques que pour l'approche multi-modèles hydrologiques.

Un seul type de modèles a en revanche été utilisé pour modéliser la demande en eau par adduction en eau potable (voir section « Modélisation des besoins pour l'AEP », page 83), et aucune incertitude n'a ainsi pu être prise en compte.

Enfin, un seul modèle de gestion de l'eau et des réservoirs MORGLite a pu être mis en œuvre dans le cadre du projet, l'incertitude structurelle sur cette étape n'a donc pas pu être étudiée. Les travaux effectués pour une étude similaire suggèrent que ces incertitudes ne sont pas négligeables mais qu'elles sont très inférieures aux incertitudes structurelles associées aux modèles climatiques globaux et aux modèles de régionalisation (François *et al.*, 2015).

Notons un travail effectué sur l'évapotranspiration de référence ET_0 . Toutes les modélisations hydrologiques et agronomiques du projet se sont basées sur un calcul de l'évapotranspiration potentielle (ET_0) basé sur la formule de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), pour assurer une compatibilité avec les modèles agronomiques. Une autre formulation a été évoquée au début du projet, celle d'Oudin *et al.* (2005), plus simple et basée uniquement sur la température. Des calculs préliminaires ont montré que la sensibilité des changements d' ET_0 au choix de la formule était très importante. Vidal *et al.* (2013) ont ainsi montré par une analyse de variance que le choix entre la formule de Penman-Monteith et celle d'Oudin *et al.* (2005) comptait pour la moitié des incertitudes totales sur le climat (structure et runs des GCMs, structure et réalisations des MDES, plus formulation de l' ET_0) à l'horizon 2100. La formulation d'Oudin donne des changements beaucoup plus importants que la formulation de la FAO, comme noté par Shaw et Riha (2011). Cette problématique de la robustesse de la formulation de l'évapotranspiration potentielle dans un cadre de changement climatique fait actuellement l'objet d'un nombre croissant de travaux (*e.g.* Prudhomme et Williamson, 2013).

Incertitude paramétrique

L'incertitude paramétrique est reliée au choix d'un jeu de paramètres pour une structure de modèle donné. Ce type d'incertitude n'a pas été exploré dans le cadre du projet au niveau de la modélisation du climat, même si des ensembles de projections climatiques globales avec des paramètres différents ont récemment été proposés (Shiogama *et al.*, 2012 ; Lambert *et al.*, 2013).

Il n'a pas non plus été exploré au niveau de la régionalisation statistique du climat. En revanche, les paramétrages des méthodes de descente d'échelle utilisés ici sont un sous-ensemble de celles testées dans le cadre du projet RIWER2030 (Hingray *et al.*, 2013 ; Lafaysse *et al.*, 2014). Il est donc *a priori* possible d'évaluer cette incertitude en analysant ces résultats sur le bassin versant à l'amont de Serre-Ponçon.

L'incertitude paramétrique a en revanche été étudiée au niveau de la modélisation hydrologique, au travers d'un ensemble de paramétrisations obtenues pour représenter au mieux l'hydrologie de différentes périodes temporelles (voir section « Modélisation de la ressource en eau », page 58). A noter que cette méthode de prise en compte est conceptuellement très différente des approches liées à l'estimation statistiques des paramètres, qu'elles soient formelles ou plus empiriques comme la méthode GLUE (Beven et Binley, 1992).

Enfin, l'incertitude sur les paramètres des modèles de demande en eau et de gestion de la ressource n'ont pas pu être explorés.

Variabilité interne

La variabilité interne du climat est une représentation de la variabilité naturelle du climat dans le monde des modèles globaux de climat (GCMs), due aux processus dynamiques non linéaires du système couplé océan-atmosphère (Deser *et al.*, 2012a, 2012b, 2014). La connaissance de cette variabilité interne est primordiale dans le cadre du changement climatique, car elle peut constituer une grande part des incertitudes sur les

changements projetés, en fonction de l'horizon temporel et des échelles temporelle et spatiale considérés (Hawkins et Sutton, 2009) et apporte un éclairage sur la significativité des changements projetés. La part de cette incertitude dépend de plus de la variable considérée, et Hawkins et Sutton (2011) l'estiment à environ 50% pour les précipitations décennales moyennes sur l'Europe à l'horizon 2050, ce qui implique a priori un pourcentage plus élevé à l'échelle locale. Un autre type de variabilité interne est celle liée à des processus de plus petite échelle et a été plus récemment mise en évidence au travers de l'utilisation de modèles régionaux de climat (RCMs) forcé par des modèles globaux, mais avec des conditions initiales différentes (Braun *et al.*, 2012 ; Simon *et al.*, 2013).

La variabilité interne est dans ce projet considérée tout d'abord au niveau de la modélisation globale du climat en prenant en compte plusieurs runs de chacun des GCMs considérés dans l'archive du projet ENSEMBLES (van der Linden et Mitchell, 2009 ; Johns *et al.*, 2011) (voir Tableau 21, page 98). Il faut noter que ce nombre reste limité, et bien en dessous des seuils théoriques nécessaires à une bonne estimation de la variabilité interne d'un modèle (Daron et Stainforth, 2013).

L'étape de régionalisation statistique du climat bénéficie elle aussi de la prise en compte de la variabilité interne à cette échelle par l'intermédiaire des propriétés stochastiques des méthodes de régionalisation utilisées. Dix réalisations de chaque méthode de régionalisation sont ainsi considérées pour chacun des runs de chaque GCM. Lafaysse *et al.* (2014) et Hingray et Saïd (2014) ont récemment montré que cette incertitude était loin d'être négligeable, en particulier pour les précipitations.

2. Propagation des incertitudes

L'approche « top-down » (Wilby et Dessai, 2010) adoptée dans le projet s'inscrit dans la continuité des précédents projets portant sur l'impact du changement climatique sur les grands bassins versants français : la Seine (RExHySS, Ducharne *et al.*, 2009), la Garonne (Imagine2030, Sauquet *et al.*, 2010), et la Loire (Moatar *et al.*, 2010). Dans ce cadre-là, les incertitudes se propagent le long de la chaîne de modélisation par le biais de la cascade d'incertitudes représentée sur la Figure 119 et dont le concept a été introduit par Mitchell et Hulme (1999).

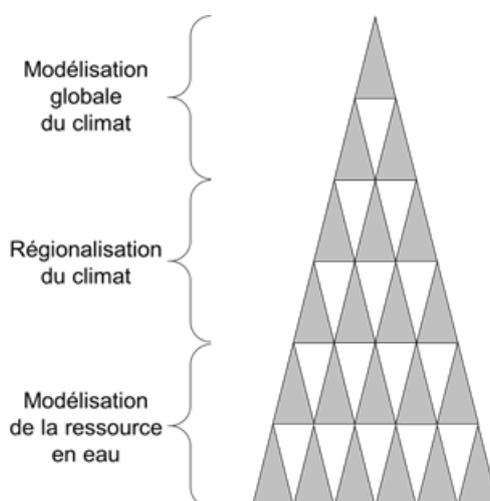


Figure 119 : Illustration schématique de la cascade d'incertitudes dans les études d'impact « top-down »

La cascade d'incertitudes représentée sur la Figure 119 est en réalité uniquement valable sur les études d'impact sur l'hydrologie naturelle. La propagation des incertitudes dans de études combinant projections de la ressource en eau et projections sur la demande en eau comme le projet R²D² 2050 s'avère beaucoup plus complexe. En effet, chaque composante de la demande en eau future (eau potable, agriculture, loisir, industrie, etc.) est potentiellement influencée non seulement elle aussi par les projections climatiques, mais aussi par les scénarios socio-économiques à l'échelle du bassin.

La Figure 120 présente de façon schématique la propagation des incertitudes telle que prise en compte dans le projet. Nous y retrouvons la cascade d'incertitudes pour l'estimation de la ressource en eau (Figure 119) représentée ici par l'emboîtement des carrés en dégradé de bleu. La demande en eau s'appuie elle sur les scénarios prospectifs de l'évolution du bassin et prend aussi en compte une partie des incertitudes sur le climat

régional. Il faut ici distinguer les composantes de cette demande en eau : la modélisation des secteurs loisir, industrie et eau potable dépend uniquement des scénarios prospectifs. En revanche, la modélisation du secteur agriculture à l'échelle du bassin dépend de plus du climat. En effet, dix projections climatiques régionales et croisées avec les scénarios prospectifs ont été considérées pour la modélisation de la demande en eau agricole à l'échelle du territoire (voir section « Besoins en irrigation en 2050 – demande globale », page 149).

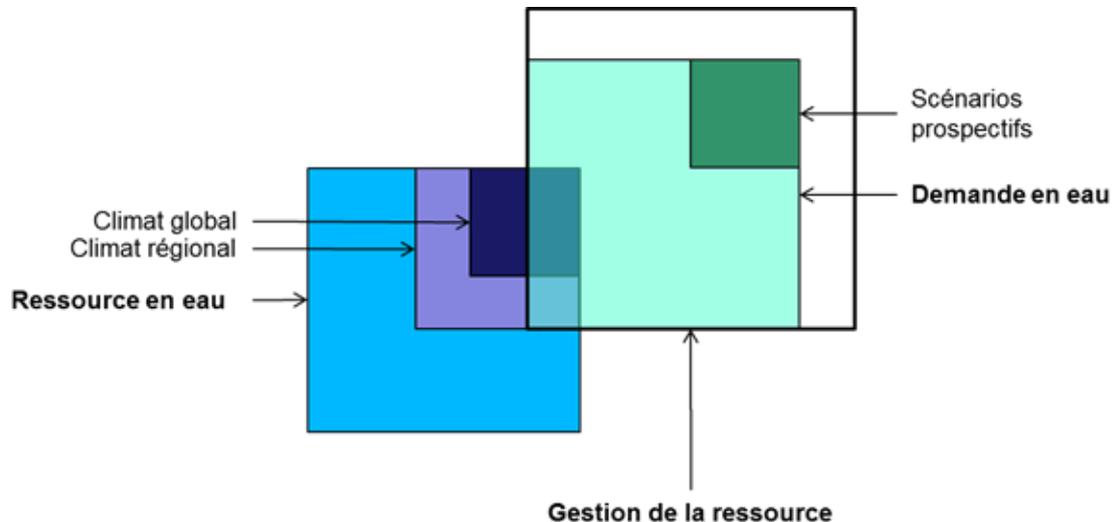


Figure 120 : Représentation schématique de la propagation des incertitudes dans le projet R²D² 2050. Les incertitudes liées à chaque étape de modélisation sont figurées par des carrés. L’emboîtement de deux carrés représente la propagation des incertitudes du plus petit vers le plus large. À noter que les aires des carrés ne sont pas proportionnelles aux incertitudes réellement modélisées

Il faut noter que les modélisations de la demande en eau agricole par type de culture discutées dans la section « Besoins en irrigation en 2050 – demande unitaire » (page 148) ne sont pas représentées sur la Figure 120 dans un souci de simplicité. En effet, elles ne dépendent pas des scénarios prospectifs – qui effectuent simplement une pondération spatiale des différentes cultures sur le bassin – mais prennent en revanche en compte un plus grand nombre de projections climatiques possibles.

La modélisation de la gestion de la ressource telle que présentée dans la section « La gestion de l’eau en 2050 » (page 202) prend enfin en compte deux sources d’incertitudes :

- les six scénarios au travers de la demande en eau de l’ensemble des secteurs ;
- la modélisation du climat global et du climat régional (trois projections) propagée au travers de la demande en eau agricole à l’échelle du bassin et de la ressource en eau.

Deux spécificités de l’exercice identifiables sur la Figure 120 sont ainsi à noter :

- les scénarios prospectifs sont indépendants du climat futur. Ceux devraient idéalement être développés en cohérence avec les scénarios socio-économiques globaux qui servent de forçage à la modélisation globale du climat, en l’occurrence ici le scénario A1B. L’horizon temporel du milieu de siècle choisi pour ce projet permet de négliger cette incohérence car la divergence du climat global en fonction des scénarios d’émissions ne s’effectue que durant la deuxième partie du XXI^e siècle ;
- la modélisation de la gestion de la ressource ne prend pas en compte l’incertitude sur la modélisation de la ressource en eau. En effet, un seul modèle hydrologique a été considéré dans cette partie de l’exercice en raison de contraintes de temps de calcul et du caractère spatialisé requis pour l’exploitation des modèles hydrologiques.

3. Incertitudes liées aux modèles et à leur variabilité interne dans un ensemble de projections hydroclimatiques

Les projections hydroclimatiques réalisées pour le projet couvrent la période 1959-2065 avec différentes chaînes de simulations obtenues pour quatre Modèles Globaux de Climat (GCM) du projet européen ENSEMBLES (avec plusieurs runs pour 3 d’entre eux), trois Modèles de Descartes d’Echelle Statistique (MDES) du projet ANR RIWER2030 (analog (EDF), dsclim (cerfacs), d2gen (LTHE) ; Lafaysse *et al.*, 2014) et six Modèles

Hydrologiques (MH). Nous avons de plus considéré plusieurs membres (3 ou 6) pour 2 GCMs, de même que plusieurs réalisations (10) pour chaque chaîne GCM-run/MDES. L'incertitude associée au scénario d'émission n'a pas été considérée. Pour l'échéance 2050, les projections obtenues pour différents scénarios d'émission sont généralement similaires.

Un challenge actuel important consiste à séparer et à quantifier les différents types d'incertitudes associées à un ensemble multi-modèle multi-réalisation tel que celui considéré dans le projet R²D² 2050. Les enjeux sont multiples. Cela permet par exemple d'identifier les sources d'incertitude principales et d'évaluer la nécessité et/ou la possibilité de les réduire. Cela permet aussi d'estimer la significativité des changements projetés au vu de la variabilité interne du climat.

Comme mentionné ci-dessus, la dispersion des projections dans un ensemble d'opportunité multi-modèle résulte 1) des incertitudes liées aux modèles (structure, paramétrisation) et 2) de la variabilité interne des modèles.

Les premières se traduisent par le fait que différents modèles présentent des réponses climatiques différentes aux mêmes forçages : différents modèles de climat produisent différents climats pour le même scénario d'émission, différents modèles de régionalisation produisent différents climats régionaux pour les mêmes sorties d'un modèle de climat donné (Figure 121).

La variabilité interne d'un modèle se traduit par la dispersion, autour de la réponse climatique du modèle des différents membres obtenus pour ce modèle, pour les mêmes forçages (Figure 121). Cette variabilité interne résulte de la nature chaotique climat. Elle est sensée correspondre à la variabilité naturelle du climat pour des conditions de forçage constantes. Une part majeure de la variabilité interne est portée par les GCMs et se traduit par des fluctuations multidécadales potentiellement importantes même à conditions de forçage constantes. Par suite, plusieurs expériences climatiques (les membres) effectuées avec le même GCM pour le même scénario d'émission donnent, pour une période future donnée, des réalisations différentes du climat aux échelles globales et régionales. La variabilité interne se manifeste à grande échelle mais aussi à petite échelle. Pour un jour donné par exemple, une même situation atmosphérique de grande échelle peut conduire à différentes situations météorologiques locales. Les MDES utilisés dans R²D² 2050 prennent en compte cette incertitude et la régionalisation d'un GCM donné avec un même MDES conduit à des réalisations différentes du climat local lorsqu'elle est réalisée plusieurs fois (Figure 122).

La dispersion entre les réponses climatiques des différentes chaînes de simulation permet d'estimer l'incertitude modèle due aux différentes chaînes. Lorsqu'une chaîne est composée en cascade de différents types de modèle, les réponses climatiques permettent aussi, si le jeu d'expérience est correctement équilibré, d'estimer la part de l'incertitude modèle expliquée par chaque type de modèle. Pour R²D² 2050 par exemple, nous pouvons distinguer l'incertitude liée aux différents GCM, celle associée aux différents MDES, et celle associée aux différents MH.

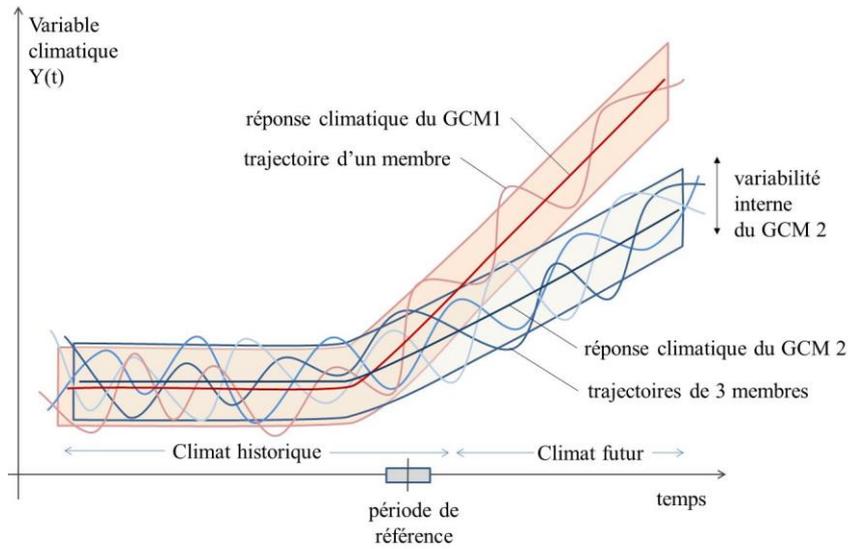


Figure 121 : Résultats schématiques de simulation pour différentes expériences climatiques historique+future. Trajectoires obtenues pour les différents membres de deux modèles de climat (1 seul membre pour GCM1, 3 membres pour GCM2). Réponses climatiques et variabilité interne correspondantes pour chaque modèle. La réponse climatique du modèle est la moyenne d'ensemble qui serait obtenue pour un grand nombre de membres (adapté de (Hingray et Saïd, 2014)).

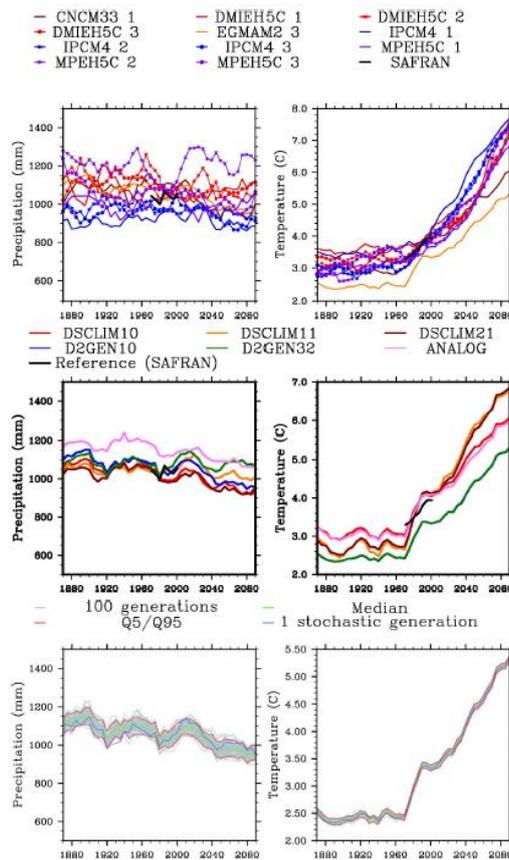


Figure 122 : Températures et de précipitations interannuelles moyennes (moyennes sur 20 ans) obtenues sur la période 1860-2100 pour le bassin de la Durance supérieure sur la base d'un ensemble de 11 expériences climatiques produites à l'aide de 4 GCMs (3 et 6 membres pour 2 d'entre eux) et de 3 modèles de descente d'échelle statistique. Bas : 100 réalisations (lignes grisées) obtenus pour la chaîne de simulation DMIEH5C-1/ANALOG20 (la ligne rouge inférieure, la ligne verte et la ligne rouge supérieure correspondent respectivement aux quantiles 5, 50 et 95% ; la ligne verte correspond à l'un des 100 scénarios). Milieu et haut : scénario moyen (moyenne des 100 réalisations) obtenu avec le modèle de descente d'échelle statistique ANALOG20 lorsqu'il est forcé par les 11 expériences GCM (haut) et obtenu avec tous les modèles de descente d'échelle lorsqu'ils sont forcés par le GCM DMIEH5C-1 (adapté de (Hingray et Saïd, 2014))

Quantifier les différentes sources d'incertitude nécessite donc de pouvoir séparer, pour chaque chaîne de simulation, la réponse climatique de la chaîne et sa variabilité interne, ou, en d'autres termes séparer le signal de changement du bruit induit par la variabilité interne.

Séparer la réponse climatique d'une chaîne de sa variabilité interne est aisé lorsque le rapport signal sur bruit est important. Elle est beaucoup moins triviale dans le cas contraire. L'estimation de la réponse est souvent estimée, pour une période future donnée par la moyenne des projections obtenues pour les différents membres disponibles pour la chaîne. Cependant, quand le rapport signal sur bruit est faible, le nombre de membre est généralement insuffisant pour une estimation robuste du signal (Hingray *et al.*, 2015).

Cette limitation peut être partiellement levée dès lors que l'on a à disposition des projections hydro-climatiques couvrant de longues périodes de temps. De longues chroniques permettent une estimation plus robuste de la réponse climatique de chaque chaîne, et par suite une estimation plus robuste de la variabilité interne de la chaîne. C'est le cas des projections hydroclimatiques réalisées pour le projet R²D² 2050 couvrant la période 1959-2065.

Le cadre statistique QEANOVA, développé dans RIWER2030 et consolidé dans R²D² 2050, permet d'exploiter au mieux, sur ce principe, ces longues chroniques (Hingray et Saïd, 2014 ; Lafaysse *et al.*, 2014). Il se base sur l'hypothèse de quasi-ergodicité pour les simulations climatiques transitoires d'un ensemble de projections multimodèle, multiréalisation. Il permet de séparer et quantifier les composantes de l'incertitude modèle liées à chaque type de modèle (GCM, MDES, MH) ainsi que les composantes grande et petite échelle de la variabilité interne des modèles (celle induite par les GCMs, celle induite par les MDES). L'ensemble des projections disponibles peut être valorisé même lorsqu'il est non équilibré (*e.g.* lorsque le nombre de réalisations est différent selon les chaînes de simulation). L'utilisation de plusieurs membres pour une chaîne donnée permettant une estimation plus robuste de sa réponse climatique et de sa variabilité interne.

La Figure 123 illustre les résultats obtenus avec QEANOVA pour les changements estimés des températures et précipitations interannuelles moyenne (moyennes sur 20 ans). La courbe centrale est la moyenne d'ensemble des réponses climatiques obtenues pour les différentes chaînes. La zone de couleur correspond à la somme des incertitudes (modèles + variabilité interne). Chaque couleur illustre la fraction de l'incertitude totale résultant de l'une ou l'autre des sources d'incertitudes. Pour les températures, l'incertitude liée au GCM domine largement et celle liée à la variabilité interne des modèles est négligeable¹⁵. Un réchauffement significatif et par suite des changements significatifs du couvert neigeux, des pertes par évaporation et de la saisonnalité des débits à l'exutoire du bassin, sont obtenus.

Pour les précipitations, l'incertitude liée au GCM et au MDES sont équivalentes. Malgré une incertitude « modèle » importante, la réponse climatique des chaînes de simulation est significativement non nulle et une baisse des précipitations annuelles moyenne est attendue. Cependant, de larges valeurs sont obtenues pour les composantes grande et petite échelle de la variabilité interne héritées respectivement des GCM et des différentes réalisations d'une MDES donnée.

De ce fait, l'incertitude sur les valeurs qui pourraient être observées pour une période future donnée est très importante, le signe du changement des futures réalisations étant lui-même incertain à 90%. Notons enfin que pour les projections hydrologiques, l'incertitude liée au MH est non négligeable, en particulier pour les projections des pertes par évapotranspiration (Figure 124).

De même que pour les GCM, l'incertitude sur les MDES et sur les MH ne peut donc pas être négligée. La même chose s'applique pour les deux composantes de la variabilité interne des modèles. Les études d'impact basées sur une réalisation unique d'un MDES donné sont susceptibles d'être aussi peu pertinentes que celles basées sur un membre unique d'un GCM donné (ou un ensemble réduit).

¹⁵ On pourra noter que l'incertitude sur les projections de température liée à la méthode de régionalisation du climat est non négligeable devant celle liée aux GCMs. Ceci est dû aux différents prédicteurs utilisés pour les trois méthodes, ces prédicteurs couvrant des domaines spatiaux également très différents. Cette limitation n'a pas été détectée lors de l'évaluation des MDES sur le climat récent. La capacité des méthodes à reproduire les variations observées passées est de loin bien meilleure pour les températures que pour les précipitations. De ce fait, nos recherches et développements passés ont essentiellement visé l'amélioration de leur capacité prédictive pour les précipitations. Les présents résultats nous montrent qu'il sera aussi nécessaire d'accorder à l'avenir plus d'attention à leur performance pour la variable température.

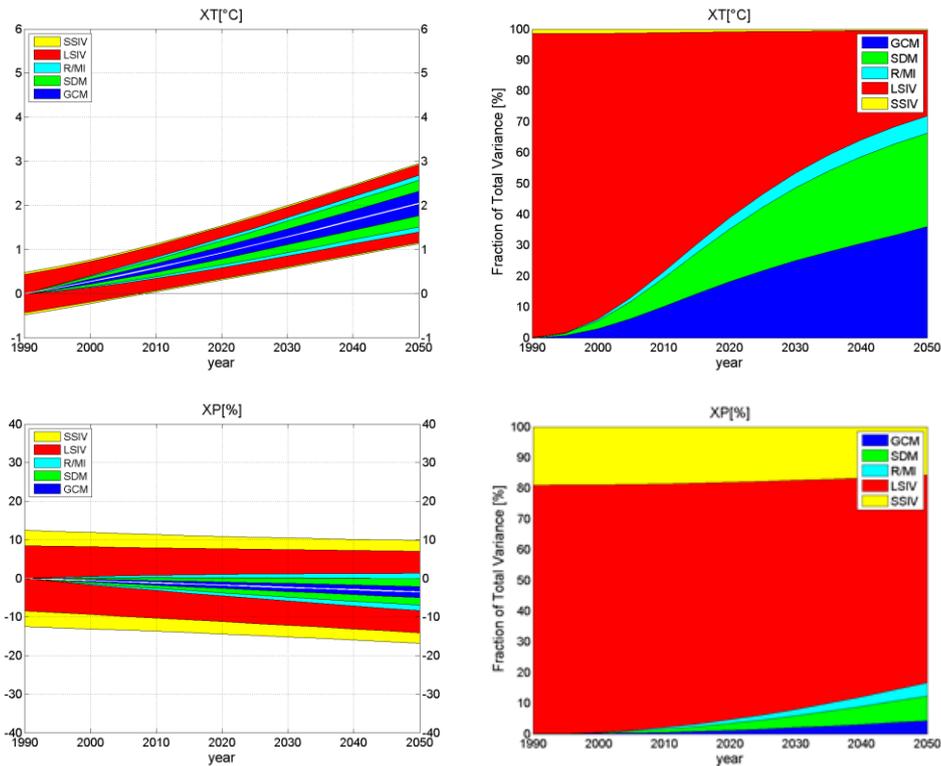


Figure 123 : Gauche : Changements de température (haut - en [°C]), précipitations (bas - en [%]), pertes par évapotranspiration (ligne 3 - en [%]) et évapotranspiration (ligne 4 - en [%]) annuelles moyennes sur 20 ans en fonction de l'échéance de projection (période de référence 1980-1999) pour la Durance à Serre-Ponçon. Droite : Proportion de l'incertitude totale expliquée par chaque source d'incertitude : GCM (bleu foncé) ; MDES (vert) ; MH (gris), interaction GCM/MDES/MH (R/MI, cyan), variabilité interne grande échelle (LSIV, rouge) et petite échelle (SSIV, jaune) associées à chaque chaîne GCM/MDES (adapté de Hingray et Saïd (2014))

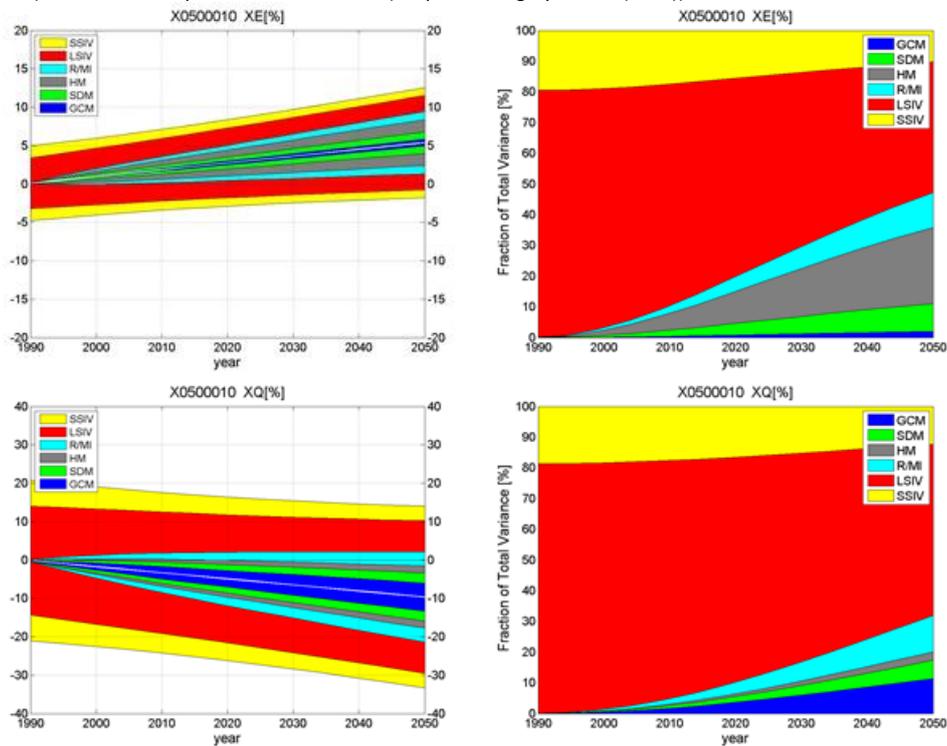


Figure 124 : Même chose pour les changements d'évapotranspiration (ligne 3 - en [%]) et de débit (ligne 4 - en [%]) annuels moyens sur 20 ans pour la Durance à Serre-Ponçon

Partitionner et quantifier les différentes sources d'incertitude est donc une tâche potentiellement ardue, du fait en particulier de la contribution majeure de la variabilité interne des chaînes de simulation. La

méthodologie QEANOVA permet une partition relativement robuste des différentes composantes de l'incertitude en valorisant l'ensemble des projections disponibles. Elle n'est cependant pas exempte de limitations (Hingray et Saïd, 2014). La principale d'entre elles est liée à l'estimation pour chaque chaîne de simulation de sa réponse climatique. Lorsque le rapport signal/bruit est faible, l'extraction de cette réponse est potentiellement peu robuste. Pour certaines variables, la réponse climatique est tellement faible devant la variabilité interne qu'il peut même être impossible d'estimer de façon robuste les paramètres d'une simple tendance linéaire.

Une autre limitation réside dans le fait que les modèles ne sont pas forcément de même qualité. Dans le cadre QEANOVA actuel, les projections des différentes chaînes sont supposées équiprobables ce qui n'est évidemment pas le cas. L'introduction dans l'estimation des incertitudes, et en particulier dans l'estimation du signal moyen, d'une pondération de chaque modèle fait partie des développements nécessaires de la méthode.

Pour finir, il est important de rappeler que le signal de changement moyen et les incertitudes estimées sont toujours conditionnés à l'ensemble de projections considérées. Même s'il est possible de représenter un intervalle d'incertitude autour d'une réponse climatique moyenne, cet intervalle ne décrit que la dispersion entre les projections considérées. De même, la réponse moyenne n'est que la moyenne des projections considérées. Ils ne correspondent pas à l'ensemble des possibles, ni aux réalisations les plus probables du climat futur.

Ces travaux feront l'objet d'une publication en préparation (Hingray *et al.*, 2015)

4. Incertitudes liées à la structure et aux paramètres des modèles hydrologiques

Cette section est consacrée à l'analyse des incertitudes des projections hydrologiques. Nous avons exclu le modèle ORCHIDEE de cette analyse car, sans calage, il montre d'importantes faiblesses pour représenter le fonctionnement hydrologique actuel du bassin versant. Etant donné que la dispersion rajoutée par la prise en compte de ce modèle semble liée à un dysfonctionnement, il ne semble pas judicieux de rajouter de l'incertitude, du coup épistémique, dans cette analyse. Cette section est fortement inspirée d'un chapitre de la thèse de Magand (2014). Elle concerne les résultats obtenus sur la période FUT (2036-2065).

Quelle part d'incertitude associée aux modèles hydrologiques ?

Dans les sections « Evolution du climat » (page 100) et « Evolution de l'hydrologie » (page 108) les changements des différentes variables climatiques et hydrologiques simulés par les différents modèles ont été examinés. Nous cherchons maintenant à quantifier la proportion de variance des réponses expliquée par les modèles hydrologiques par rapport à la variance totale des projections. Cette part de variance nous sert à quantifier la part d'incertitude attribuée à ces modèles. A cette fin, nous avons calculé le rapport de variance R_{var} sur les changements de débit, d'évapotranspiration et de stock de neige selon la formule de Von Storch et Zwiers (2001) :

$$R_{var} = \frac{SSA - \frac{p-1}{p(n-1)} SSE}{SST}$$

avec p le nombre de modèles hydrologiques et n le nombre de projections considérées pour chaque modèle.

Le rapport de variance, R_{var} varie entre 0 et 1. SST est la variance totale des réponses :

$$SST = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2$$

où y_{ij} est le changement de la variable pour une projection climatique et un modèle hydrologique donnés, et \bar{y} est la moyenne des changements.

SSA est défini par :

$$SSA = n \sum_{i=1}^p (\bar{y}_i - \bar{y})^2$$

avec \bar{y}_i la moyenne des changements d'un modèle hydrologique donné.

SSE est la somme des erreurs au carré calculée suivant :

$$SSE = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n (v_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

L'analyse a été réalisée sur cinq stations de contrôle en considérant les cinq modèles hydrologiques CLSM, J2000, MORDOR, CEQUEAU et GR5J (Tableau 55). Les variables sont données au pas de temps annuel.

		La Durance à Serre-Ponçon	Le Buëch à Serres	La Durance à l'Escale	Le Verdon à Sainte-Croix	La Durance à Cadarache
Q	MH	6.3	4.7	8.8	5.2	8.3
	MDES	4.2	2.6	2.9	0.1	1.9
	GCM	27.8	27.3	27.3	22.7	23.6
maxSWE	MH	2.7	27.1	5.1	15.4	9.3
	MDES	8.2	13.0	10.0	13.8	11.5
	GCM	10.0	9.8	8.9	0.8	7.0
ET ₀	MH	41.7	38.6	32.6	13.8	26.0
	MDES	7.5	5.5	7.4	7.8	5.4
	GCM	23.5	19.5	20.2	17.0	19.8

Tableau 55 : Fractions de variance expliquées par les différents maillons de la chaîne de modélisation GCM/MDES/MH pour les cinq stations de contrôle et pour les changements de débit Q, de maximum annuel de stock de neige maxSWE et d'évapotranspiration ET₀

La part de la variance des réponses expliquée par les modèles hydrologiques sur les débits annuels n'est pas très importante, en moyenne de 7%, et est homogène sur les cinq stations avec des écarts compris entre 5 et 9%. En revanche, elle est plus importante sur l'évapotranspiration annuelle, 30% en moyenne, et il y a plus de contrastes entre les stations. Sur le bassin du Verdon à Sainte-Croix, les modèles hydrologiques participent beaucoup moins à la variance de l'évapotranspiration que sur les autres stations (14% contre 42% à Serre-Ponçon). En ce qui concerne le maximum annuel de stock de neige, l'incertitude associée aux modèles hydrologiques est faible à Serre-Ponçon, de 3%. En revanche, elle est beaucoup plus importante sur les stations du Buëch et de Sainte-Croix (27% pour le Buëch à Serres et 15% pour le Verdon à Sainte-Croix) mais c'est principalement dû au modèle CLSM qui simule toujours beaucoup moins de neige par rapport aux autres modèles.

Sans ce modèle, la part de variance expliquée par les modèles hydrologiques n'est plus que de 10% pour le Buëch à Serres et de 3% pour le bassin du Verdon à Sainte-Croix. Ces résultats viennent confirmer les observations faites sur la Figure 65 (page 110) et la Figure 66 (page 111).

Afin de comparer l'incertitude associée aux modèles hydrologiques aux autres sources d'incertitude épistémique, nous avons calculé ce même rapport pour les GCMs et les MDES. La part de la variance des réponses expliquée par les MDES est faible, en moyenne 2.3% sur les débits et 7% sur l'évapotranspiration, et elle est homogène sur les cinq stations de contrôle. Cette faible part de variance expliquée par les méthodes de régionalisation s'explique sans doute par le fait qu'elles appartiennent toutes à la même famille. L'utilisation d'un RCM associée à une méthode de correction de biais aurait peut-être révélé une part de variance expliquée par la régionalisation plus importante (Quintana-Seguí *et al.*, 2010). En ce qui concerne les GCMs, ils expliquent en moyenne 26% de la variance des changements de débits annuels et 20% de la variance des changements d'évapotranspiration. Cette variance inclut l'incertitude associée à la dispersion entre les réponses climatiques des différents GCMs et l'incertitude associée à leur variabilité interne, la seconde étant vraisemblablement et de loin - selon les analyses discutées plus haut, la plus importante des deux.

Sur les cinq stations considérées, nous constatons que les GCMs via l'effet de leur variabilité interne sur les précipitations contrôlent beaucoup la variance du débit, plus que les modèles hydrologiques. Ces derniers ont plus d'influence sur l'évapotranspiration car ils jouent un rôle important sur la magnitude du stress hydrique via la capacité de leurs réserves souterraines. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Hagemann *et al.* (2013) obtenus à l'échelle du globe.

Incertitudes structure versus paramètres

Nous avons rappelé plus haut qu'une part de l'incertitude provenant des modèles hydrologiques peut-être portée par leur structure mais aussi par leurs paramètres. Afin de comparer les réponses à une même

projection climatique fournies par (i) un modèle, CLSM, utilisant plusieurs jeux de paramètres calés sur cinq périodes différentes (Magand *et al.*, 2014a) et (ii) différents modèles hydrologiques du projet calés sur une même période. Les modèles CEQUEAU, GR5J, J2000 et CLSM ont fourni des simulations forcées par le même scénario atmosphérique sur le bassin de la Durance à la Clapière. Nous pouvons ainsi comparer les réponses de ces différents modèles avec celles des différents jeux de paramètres.

Modèle hydrologique	Jeu de paramètres	Période de calage	$\sigma(\Delta Q)$	$\sigma(\Delta ET_0)$	$\sigma(\Delta maxSWE)$
GR5J	θ_{GR}	1994-2009	1.52	0.04	16.75
J2000	θ_{J2000}	1994-2009			
CEQUEAU	$\theta_{CEQUEAU}$	1994-2009			
CLSM	θ_{REF}	1994-2009			
CLSM	θ_{P1}	1965-1974	0.34	0.02	0.45
CLSM	θ_{P2}	1974-1983			
CLSM	θ_{P3}	1983-1992			
CLSM	θ_{P4}	1992-2001			
CLSM	θ_{P5}	2001-2010			

Tableau 56 : Liste des simulations considérées et écart-type calculés sur les différents jeux de simulations

D'après le Tableau 56, la dispersion mesurée par l'écart-type des changements sur les variables est 4.5 fois plus importante sur les réponses des modèles que celle entre les réponses des simulations d'un même modèle dont les paramètres sont issus de différents calages, deux fois plus importante pour les changements d'évapotranspiration et 20 fois plus importante pour les changements de maximum de neige. Ce sont finalement les processus niveaux qui sont à l'origine d'une plus grande dispersion entre les structures des modèles. Ces résultats très préliminaires rejoignent ceux de Poulin *et al.* (2011) qui démontrent dans un bassin fortement influencé par la neige que l'incertitude liée à la structure des modèles est plus importante que celle liée aux paramètres.

XIV. Difficultés rencontrées et limites

Interactions avec des tiers

Ce projet a cherché à solliciter les acteurs dans un objectif de co-construction des scénarios pour le futur des demandes en eau et de partager les résultats du projet pour ensuite une meilleure appropriation des principales conclusions. Les interactions entre chercheurs et acteurs n'ont peut-être pas été aussi loin que nous l'aurions souhaité et la mise en place des ateliers prospectifs n'a pas été simple.

Les interactions avec les acteurs, et principalement la Région, ont interféré avec l'organisation du Forum Mondial de l'eau (mars 2012 à Marseille), les échéances électorales (et le droit de réserve des élus impliqués) ; ceci nous a conduit à adapter au fil du projet notre mode d'interaction et reporter plusieurs fois les échéances prévues.

En outre des actions locales sur les questions de gestion de l'eau en cours avec, pour certaines, mise en place d'exercices prospectifs sur tout ou partie du territoire avaient leur propre logique. Les liens envisagés avec ces actions ont été finalement relativement ténus.

Malgré le soutien d'acteurs clefs, nous avons perçu la difficulté à mobiliser les acteurs fortement sollicités par ailleurs. Le panel d'utilisateurs représentatifs sensibilisés aux exercices prospectifs et ayant la connaissance du système Durance-Verdon et des pratiques en place est en effet réduit.

Liste des difficultés méthodologiques

- la difficulté lors de la collecte et l'interprétation des données relatives aux usages. Les données brutes descriptives des usages sont d'une part non adaptées à la modélisation hydrologique (représentativité temporelle non journalière, intégrée dans des classifications non stabilisées, non géo-référencées, historique court) et non centralisées. Il reste donc à progresser sur la mise à disposition de ce type de données. Une partie de l'équipe projet s'est déjà heurtée à cette difficulté dans un projet précédent sur la Garonne (Imagine2030 ; Sauquet *et al.*, 2011). Malgré l'expérience acquise sur ce bassin voisin, plus de deux ans d'effort soutenu de collecte de données et de mise en cohérence de ces données, principalement au travers notamment de modèles numériques, ont été nécessaires. En absence d'information quantifiée, il sera délicat de construire des outils intégrés qui représentent les actions actuelles de prélèvements nets sur les cours d'eau et qui, alimentés par des projections climatiques, permettront d'anticiper objectivement le futur. Ceci a impacté la mise à disposition des données indispensables à la reconstitution des débits naturels ;
- la difficulté à reconstituer des débits naturels aux points les plus en aval, compte tenu de la complexité de la gestion des eaux de la Durance ; cette opération a pris du retard et a impacté la suite du projet (phase d'évaluation des modèles hydrologiques) ;
- la non-disponibilité de données de neige en grande quantité (excepté MODIS pour CLSM) et la difficulté de progresser dans la représentation des processus de constitution et de fonte du manteau à l'échelle des bassins versants. Les travaux réalisés par Magand *et al.* (2014b) sont une première contribution à l'amélioration des processus dans une modélisation hydrologique mais son implémentation et les améliorations attendues requièrent des mesures du manteau neigeux ;
- la difficulté à identifier la part de la dispersion entre les projections climatiques, les méthodes de descente d'échelle, les modèles hydrologiques qui sont dus à des erreurs des modèles de celle induite par la variabilité interne du climat ;
- la difficulté à identifier une/plusieurs « bonnes » chaînes de simulation GCM/MDES/MH (sur la base des reconstitutions mais, aussi, de sa capacité à produire des réponses réalistes dans des conditions climatiques inédites), heureusement atténuée par la proximité des changements simulés. Cette approche est cependant loin d'être parfaite du fait en particulier que le climat de la période d'évaluation est généralement très proche de celui de la période de calibration, beaucoup plus proche en tous les cas que des climats attendus pour les décennies futures. Améliorer la robustesse des projections futures passe par la mise en place de nouvelles méthodologies permettant de mieux évaluer la robustesse des modélisations actuelles, notamment en exploitant les réanalyses atmosphériques globales du XXe siècle ;
- l'absence d'appréciation de la qualité des débits, qu'ils soient mesurés ou naturalisés. Si les méthodes de quantification des incertitudes de mesures de débit progressent actuellement (Le Coz *et al.*, 2013 ; Kuentz *et al.*, 2014), des questions fondamentales se posent sur la quantification des incertitudes sur les méthodes de naturalisation des débits. Un exemple est donné sur l'incertitude liée aux prélèvements

agricoles : les seules données d'assolement disponibles sur toutes les cultures sont fournies par le RGA. Les limites du RGA obligent à un retraitement des données d'assolement et de recours à l'irrigation qui introduit une incertitude non mesurable sur les surfaces par culture et les surfaces irriguées. Sur le territoire SCP, cette incertitude a pu être limitée par le calage du modèle de consommation d'eau agricole sur les volumes réellement consommés sur la période 1980-2009. Par ailleurs, la question de la prise en compte de ces incertitudes dans la chaîne de modélisation hydrologique reste complètement ouverte ;

- la difficulté d'identifier et de quantifier les différentes sources d'incertitudes, de même que quantifier leur contribution à l'incertitude globale sur les projections lorsque la réponse climatique des différentes chaînes de modélisation est limitée au regard de la variabilité interne du climat. Les longues projections climatiques de l'ensemble de projections utilisées pour le projet ont permis de proposer les bases d'un cadre statistique pour faire cette estimation. Il n'est cependant pas dépourvu de limitations et différents développements méthodologiques seront nécessaires pour en préciser le domaine d'applicabilité, pour le consolider et/ou l'adapter ;
- l'impossibilité de prendre en compte cette diversité dans la conduite des irrigations à l'échelle du territoire. De ce fait, des hypothèses très simplificatrices de conduite homogène ont été choisies. Ainsi, le taux de recours à l'irrigation entre 1979 et 2010, notamment, ont été considérés comme fixes et les scénarios prospectifs se traduisent à l'inverse par des évolutions des taux de recours, mais de manière homogène sur le territoire d'étude.

Limites

Le projet n'a pas pu examiner toutes les composantes de la gestion de l'eau. Ainsi, l'analyse de la qualité des milieux (température de l'eau, dilution, cinétique chimique) indispensable pour nourrir les réflexions de biologistes n'a pas été abordée. Des travaux de recherche se poursuivent notamment sur les cours d'eau intermittents dans le cadre du projet IRBAS ("Intermittent River Biodiversity and Synthesis", www.irbas.fr).

L'irrigation gravitaire comporte un certain nombre d'externalités positives comme le rechargement des nappes phréatiques, non examinées ici.

La modélisation des règles de gestion des retenues ne représentent que les principales règles d'allocation de la ressource aux différents usages et ne peuvent reproduire avec toute la finesse souhaitable la gestion réelle et complexe résultant de l'application des conventions rattachées aux concessions (EDF, SCP, CED). Elle a permis de représenter de manière fiable les actions anthropiques sur la ressource.

Les projections climatiques se sont basées uniquement sur le scénario SRES A1B. Rappelons cependant qu'en milieu de siècle, les scénarios d'émission SRES sont comparables en termes d'évolution climatique. De nouvelles projections issues du projet CMIP5 (« Coupled Model Intercomparison Project » du 5^e exercice de l'IPCC) émergent (cf. Terray et Boé (2013) pour un premier diagnostic en France métropolitaine). Il ne faut pas pour autant considérer obsolètes les simulations réalisées ici dans le cadre du précédent exercice de l'IPCC. Il est possible d'identifier des correspondances entre certains scénarios SRES et les profils représentatifs d'évolution de concentration (« Representative Concentration Pathway », RCP), nouveaux scénarios types désormais adoptés par la communauté scientifique. Ainsi, selon Ouzeau *et al.* (2014), RCP6.0 est proche du scénario SRES A1B, tandis que RCP4.5 est proche du SRES B1. L'exploitation de ces nouvelles projections a déjà été engagée par les hydrologues et les premiers résultats obtenus avec le modèle GR4J (Nicolas, 2014) ne remettent pas en cause les simulations hydrologiques du projet.

La projection de besoins, et l'adéquation avec les ressources disponibles, est réalisée à l'horizon à 2050 sans tenir compte des évolutions qui conduiront à la situation fixée pour 2050. Les stades intermédiaires des scénarios ne sont pas analysés. Ceci peut avoir un impact important. Par exemple, le scénario *Crise* considère une baisse significative des prélèvements en eau agricole du fait de l'abandon progressif de certains canaux traditionnels. Dans un tel cas, il faut envisager une période transitoire où la consommation de ces canaux pourrait augmenter de manière significative, du fait d'un manque d'entretien et d'une mauvaise gestion, avant de baisser.

Enfin, nous n'avons analysé le système et les usages sous l'angle « gestion de l'eau ». Certains aspects relatifs au climat (ex. la fréquence de jours échaudants pour l'agriculture) pourraient être plus contraignants que l'accès à l'eau de la Durance et nécessiter des adaptations sectorielles.

XV. Conclusion générale

Le projet R²D² 2050 a contribué à améliorer la connaissance du fonctionnement du bassin versant de la Durance et des territoires connectés via les transferts d'eau, par le recueil de données d'origines physique, biologique et socio-économique. Cette base de connaissance a permis la mise en place et le développement d'outils dédiés à la modélisation de la gestion de l'eau et des interactions entre ressources en eau locales et volumes stockés en amont dans les grandes réserves.

Les outils développés sont forcément des représentations simplifiées adaptées à l'échelle d'analyse des résultats pour un territoire parmi les plus complexes à modéliser en termes d'hydrologie naturelle, d'interactions multiples avec les secteurs économiques et de gestion de l'eau. Ils ont montré leur bonne performance en temps présent comparativement aux historiques de débits ou de prélèvements collectés et/ou reconstitués et leur pertinence pour une utilisation dans un contexte de changement.

Impacts sur le milieu physique

Les changements à l'horizon 2050 (*i.e.* sur la période 2036-2065) ont été analysés par comparaison aux valeurs du temps présent (*i.e.* la période 1980-2009). Les valeurs des quantiles q_{10} et q_{90} permettent d'apprécier la dispersion autour du changement moyen annoncé (*moy*).

Les 330 projections climatiques élaborées pour le projet suggèrent les changements moyens suivants à l'échelle annuelle sur les principales variables régissant le cycle hydrologique :

	TA (°C)	ΔTA (°C)		PA (mm)	ΔPA (mm)		
	q_{10}	<i>moy</i>	q_{90}		q_{10}	<i>moy</i>	q_{90}
La Durance à Serre-Ponçon	4.4	1.2	1.7	1254	-118.8	-9.8	90.5
Le Buëch à Serres	7.5	1.2	1.7	1246	-135.2	-32.5	63.3
La Durance à L'Escaze	6.5	1.2	1.7	1153	-120.5	-20.9	68.2
Le Verdon à Castillon	6.5	1.1	1.6	1247	-134.2	-24.2	74.6
Le Verdon à Sainte-Croix	8.5	1.1	1.6	1111	-136.3	-41.7	54.3
La Durance à Cadarache	7.9	1.2	1.7	1071	-113.7	-27.7	53.3

(Les valeurs 1980-2009 de référence sont indiquées en italique ; moy désigne l'anomalie moyenne ; q_{10} et q_{90} désignent les premiers et derniers déciles des anomalies)

Les changements sur les températures seront vraisemblablement plus importants en été (autour de +2.2°C) qu'en hiver (autour de +1.4°C). L'évolution des précipitations est incertaine. Aucune tendance lourde ne se dégage des projections, qu'il s'agisse des apports mensuels ou des pluies fortes. Les projections ne font pas apparaître de modification de la fréquence des jours « secs » (< 1 mm). Enfin, les projections suggèrent une augmentation de l'évapotranspiration de référence sur l'ensemble du bassin de l'ordre de 50 à 60 mm/an.

Ces évolutions climatiques induisent des changements sur le régime hydrologique des cours d'eau, notamment une baisse notable du débit annuel (QA), quantifiant la ressource annuelle, à l'horizon 2050, cette diminution étant partagée par la grande majorité des simulations issues des modèles hydrologiques. Le bassin de la Durance en amont de Serre-Ponçon semble moins impacté (en relatif) que les autres bassins.

La dynamique des cours d'eau à composante nivale est modifiée conséquence d'une constitution plus tardive du manteau neigeux, d'une réduction significative de son contenu en eau et de sa fonte plus précoce. Les modifications portant sur la constitution des stocks de neige en tête de bassin se propagent vers l'aval. Les changements les plus importants concernent le printemps (QAMJ : débit moyen de mai à juin)

Les changements des débits en été (QJAS : débit moyen de juillet à septembre) sont uniformes (en relatif) à l'échelle du bassin. Ils conduisent à une diminution de l'ordre de -20% à Cadarache, soit l'équivalent de plus de 600 Mm³/an. L'analyse de l'évolution du débit Q95 (débit dépassé 95% du temps, statistique proche du QMNA5) suggère une plus grande sévérité des étiages. Sur les secteurs non sécurisés, dans le cas du maintien des seuils actuels des arrêtés sécheresse, il est à craindre une fréquence accrue des mesures de restriction sur les prélèvements.

L'évolution des débits hivernaux est incertaine du fait notamment de la forte variabilité dans les projections sur les pluies. Les modèles hydrologiques ne sont pas concordants sur le devenir des crues.

	QA	ΔQA (m ³ /s)			ΔQA (%)			ΔQA (Mm ³)		
	(m ³ /s)	q10	moy	q90	q10	moy	q90	q10	moy	q90
La Durance à Serre-Ponçon	76	-19.0	-7.2	3.8	-25%	-10%	5%	-601	-228	121
Le Buëch à Serres	13.4	-4.0	-1.7	0.6	-30%	-12%	4%	-125	-52	18
La Durance à L'Escale	112.6	-33.8	-13.8	4.6	-30%	-12%	4%	-1067	-434	146
Le Verdon à Castillon	11.9	-3.4	-1.3	0.6	-29%	-11%	5%	-108	-41	20
Le Verdon à Sainte-Croix	22.6	-7.6	-3.3	0.9	-34%	-15%	4%	-239	-104	30
La Durance à Cadarache	157.4	-50.6	-21.6	5.4	-32%	-14%	3%	-1598	-683	172

	QAMJ	$\Delta QAMJ$ moyenne			QJAS	$\Delta QJAS$ moyenne		
	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(%)	(Mm ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(%)	(Mm ³)
La Durance à Serre-Ponçon	144.9	-15.5	-11%	-122.5	70.1	-14.8	-21%	-116.8
Le Buëch à Serres	18.8	-3.4	-18%	-27.1	3.6	-0.8	-22%	-6.3
La Durance à L'Escale	191.5	-24.5	-13%	-193.0	76.4	-18.4	-24%	-145.2
Le Verdon à Castillon	21.7	-3.5	-16%	-27.6	5.2	-1.1	-22%	-8.9
Le Verdon à Sainte-Croix	33.6	-5.5	-16%	-43.7	10.0	-2.1	-21%	-16.3
La Durance à Cadarache	255.6	-35.0	-14%	-275.9	94.7	-23.1	-24%	-182.2

(les valeurs 1980-2009 de référence sont indiquées en italique ; moy désigne l'anomalie moyenne ; q10 et q90 désignent les premiers et derniers déciles des anomalies)

Effets conjugués des évolutions climatiques et socio-économiques

Des scénarios socio-économiques pour le futur du territoire ont été construits, avec les acteurs. Les caractéristiques des scénarios territoriaux construits (*i.e.* les évolutions des principaux facteurs conditionnant les demandes en eau sur l'ensemble du système Durance-Verdon) sont reportées dans le tableau suivant :

Usage	Déterminant	Tendancier	Spécialisation	Investissement	Crise	Ecologie
AEP	Population permanente	+	+	++	--	+
	Population touristique	+	+	++	--	+
	Demande unitaire AEP	-	=	++	-	--
	Utilisation ressources locales	-	-	--	+	++
	Rendement réseaux	+	+	+	--	++
Agriculture	Surfaces irriguées	-	++	-	--	+
	Surface irrigation non gravitaire	+	++	+	=	++
	Surfaces arrosage	+	=	+	++	=
	Rendements canaux	+	++	+	=	++

(« + »: signifie une hausse de ce caractère et « - » une baisse, les doubles signes identifient les scénarios les plus contrastés)

Ces scénarios ont été réinterprétés dans les modèles et combinés avec les évolutions climatiques, pour fournir une vision quantifiée des besoins en eau du territoire en 2050. Un scénario « business-as-usual » (*Niv2010*) a été considéré en supposant la situation figée à 2010. Il ressort des simulations des demandes en eau très contrastées.

Les scénarios territoriaux conduisent à une baisse globale des besoins en eau agricole. Cette baisse s'explique, dans le cas des scénarios *Spécialisation* et *Ecologie* par une amélioration des rendements des réseaux traditionnels par modernisation et passage de surfaces à une irrigation par aspersion ou au goutte-à-goutte. Les investissements nécessaires pour cette reconversion ne sont pas chiffrés, ni leur justification économique étudiée. Dans le scénario *Crise*, à l'inverse, la baisse est due à un abandon des réseaux. La modernisation des réseaux aurait pu être considérée *a posteriori* comme une mesure d'adaptation nécessaire pour permettre le développement de l'irrigation. Ce n'est pas cette option qui a été choisie, considérant qu'il s'agissait d'une dynamique enclenchée, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui sur tous les territoires considérés. Les scénarios

agricoles n'introduisent aucune rupture profonde dans la structure de l'agriculture de la zone d'étude. La structure des assolements actuels est globalement maintenue.

A territoire inchangé (*Niv2010*), la sollicitation de la réserve de Serre-Ponçon devrait augmenter du fait de la baisse de la ressource locale. La tranche d'eau réservée serait plus fréquemment insuffisante. Les cinq devenir envisagés du territoire incluant la poursuite de programmes d'économies d'eau proposent une vision opposée avec une baisse de la sollicitation (-100 Mm³). La vision sur le système Verdon est différente : à usage maintenu au niveau 2010, les sollicitations aval des ouvrages sont légèrement sensibles au climat affichant une faible augmentation. Seuls trois scénarios du territoire (*Spécialisation, Investissement, Tendancier*) conduisent à une augmentation de la sollicitation des réservoirs du Verdon pouvant dépasser la tranche de Sainte-Croix.

La production d'énergie est directement impactée par la baisse de la ressource naturelle. La baisse probable des apports de fonte conduit à contraindre davantage la remontée de cote avant l'été avec un objectif inchangé de remplissage lié aux cotes touristiques. La réserve énergétique saisonnière est dans ces conditions fortement réduite, quels que soient les devenir des territoires, notamment sur le Verdon.

Si l'usage touristique de Serre-Ponçon semble pouvoir être sensiblement préservé sous réserve d'une évolution du territoire fondée sur une économie d'eau substantielle, celui de Sainte-Croix et Castillon semble plus délicat à garantir dans la configuration actuelle.

A l'examen des résultats de modélisation, il est possible d'affirmer que le système de gestion de la Durance est plus vulnérable au changement climatique que celui du Verdon. Néanmoins, les scénarios socio-économiques imaginés dans le cadre de l'exercice de prospective impactent davantage l'équilibre futur du système Verdon que celui de la Durance (pour lequel le potentiel d'économies d'eau est tel qu'il permet de compenser l'augmentation de la demande et de maîtriser l'évolution des prélèvements).

Avec des résultats sensiblement différents selon les scénarios socio-économiques étudiés, nous pouvons néanmoins retenir les conclusions suivantes :

- en année moyenne, la demande en eau à l'horizon 2050 peut être satisfaite pour l'ensemble des usages préleveurs (eau potable et industrielle, irrigation, etc.), avec les retenues existantes et dans le respect des tranches d'eau réservées (réserve agricole de 200 Mm³ sur Serre-Ponçon et réserve constituée de 225 Mm³ sur Sainte-Croix et Castillon) ;
- le changement climatique aura un impact négatif sur la production annuelle d'électricité, et sur la capacité à satisfaire la demande énergétique de pointe pendant les mois les plus froids. Sur la Durance, le déficit d'apports par la fonte de neige au moment de la remontée entraîne une baisse du volume turbiné moyen de 50 Mm³ (-20%) sur les 10 jours les plus froids. Sur le Verdon, la baisse du volume turbiné sur les 10 jours les plus froids serait de l'ordre de 10 Mm³ (-20%) sur Castillon et 20 Mm³ (-25%) sur Sainte-Croix ;
- sur la Durance, la réalisation d'économies d'eau par la modernisation des périmètres d'irrigation conduit à une amélioration de la capacité à tenir l'objectif de cote touristique. Sur le Verdon, où le potentiel d'économies d'eau est plus faible, les objectifs de maintien des cotes touristiques pourront être plus difficiles à garantir à l'horizon 2050, pour les scénarios les plus défavorables.

Implications pour la gestion de l'eau et son adaptation

Les simulations en temps futur ont volontairement été menées en conservant les règles de gestion du temps présent, sans limiter la sollicitation des réserves en eau à leur valeur contractuelle et sans modifier les objectifs de remplissage, afin de faire émerger le nouveau champ de contraintes auquel chaque usage pourrait être exposé en absence de mesures d'adaptation.

Des éléments issus de l'analyse de la sensibilité des scénarios prospectifs de R²D² 2050 à l'équilibre futur semblent inciter :

- sur la Durance, à ne pas s'en tenir au statu quo actuel (niveau 2010), mais à faire le choix d'une politique active d'une réduction des prélèvements d'au moins 20% par rapport au niveau 1980-2008. Rester au niveau de demande actuelle reviendrait en 2050, dans les termes de gestion actuels, à ne pas pouvoir fournir la demande estivale (1 année sur 3), au risque de mettre en cause l'équilibre entre intérêt énergétique et satisfaction des demandes en eau consacrées par la loi du 5 janvier 1955. Dans ce contexte, les décideurs seraient obligés de faire un arbitrage entre l'intérêt énergétique et la satisfaction des demandes en eau. Pour préserver l'équilibre et l'esprit actuel du système Durance, une politique de

réduction de la demande paraît centrale et la mise en place d'un processus de réallocation de la ressource progressif comme une piste envisageable. Le passage à l'aspersion et au goutte-à-goutte d'une partie des cultures irriguées, associé à une amélioration des rendements des canaux (notamment des canaux gravitaires traditionnels) et des réseaux de distribution paraissent être les leviers majeurs de cette politique ;

- sur le Verdon, à ne pas faire le choix d'aller franchement en direction d'un devenir territorial tel que le scénario *Investissement* avec une augmentation très élevée de la population (+50%), une forte hausse de la consommation unitaire, des rendements de réseaux en baisse, et dont l'augmentation de la demande en eau reposerait presque intégralement sur de nouveaux transferts de la ressource Verdon. Il ne s'agit pas ici de dire que cet avenir n'est pas souhaitable, mais que la conjonction de ces choix ne doit pas amener à une augmentation de la demande annuelle en direction du Verdon de plus de +100% par rapport à la moyenne 1980-2009. Au-delà, le principe de gestion actuel devrait être remis en cause et le territoire soumis à un déséquilibre.

Sur la base des hypothèses retenues dans le projet R²D² 2050, l'effet du changement global sur la Durance semble pouvoir être contenu sur les secteurs sécurisés par le système Durance-Verdon sous réserve que l'avenir du territoire se développe à l'intérieur du faisceau des scénarios choisis ici. Des sensibilités différentes sur la sollicitation des réserves de la Durance et du Verdon ont pu s'exprimer. Elles nécessiteront de repenser l'équilibre entre les usages et de faire évoluer les règles de gestion de la ressource en eau.

L'essentiel du travail s'est concentré sur les territoires sécurisés. Sur les territoires dépendants de la seule ressource locale, la situation pourrait être critique avec des sécheresses plus fréquentes et des arrêtés de limitation des usages qui pourraient fort bien réduire la capacité à prélever, même pour une augmentation modérée de l'ordre de 1.5°C. Ces territoires seront forcément vulnérables sans ressource de substitution et la situation différenciée sur le bassin ne pourra générer que des tensions.

Dans tous les cas, il sera nécessaire de mettre en œuvre des politiques d'économie d'eau, renforcée par des mesures d'adaptation pour assurer un partage équitable de la ressource en 2050 et pour anticiper un climat peut-être plus extrême en fin du XXI^e siècle. Le projet R²D² 2050 apporte quelques éléments scientifiques objectifs issus des modélisations pour guider ces politiques. Il reste à poursuivre la diffusion des résultats et des hypothèses considérées pour une bonne appropriation par les acteurs du territoire, comme cela a été initié dans le cadre d'un atelier (ACTeon *et al.*, 2014). Une note de synthèse est en préparation pour faciliter le transfert vers les gestionnaires (Arama et Sauquet, 2014).

L'analyse des modélisations des usages et de la gestion de l'eau à l'échelle du territoire laisse à penser que la source d'incertitude principale n'est pas le devenir du climat mais les évolutions socio-économiques affectant la région PACA.

Perspectives

Les perspectives sont forcément nombreuses. Les limites identifiées dans la section précédente sont autant de pistes de recherche sur les outils et les données utiles pour étude d'impact du changement globales. D'autres perspectives méritent d'être évoquées :

- du point de vue méthodologique, les modèles, globalement satisfaisants sont tous améliorables... sous réserve de l'existence d'observations adaptées. Les résultats du projet R²D² 2050 ont par exemple permis de mettre en évidence les améliorations possibles des modèles de régionalisation, vis-à-vis de la variable température en particulier ;
- si évaluer chacun des modèles est déjà un challenge en soi, évaluer la performance de l'ensemble de la chaîne de modélisation, incluant GCM/MDES/MH/MG est un problème à part entière qui nécessite la mise en place de stratégies d'évaluations spécifiques à développer. Aux difficultés mentionnées ci-dessus s'en ajoute une autre non négligeable, introduite de nouveau par la variabilité interne produite par les modèles de climat. La climatologie d'un GCM pour une période donnée est influencée par cette variabilité interne d'échelle décennale ou pluri-décennale. La présence de biais, sur une période de 30 ans donnée par exemple, entre GCM et observations n'est donc pas nécessairement représentative d'un défaut du modèle mais résulte de variabilités basses fréquences très marquées dont il faut tenir dans le diagnostic des runs d'un GCM (Lafaysse, 2011) ;
- seules trois projections hydro-climatiques ont présenté des qualités suffisantes pour être exploitées par le modèle de gestion des réserves, du fait de biais identifiés dans les simulations de débit en temps présent.

La représentation fine de l'anthroposystème a en effet fait émerger un nouveau niveau d'exigence, plus élevé sur la performance des modèles hydrologiques, voire de l'ensemble des chaînes GCM/MDES/MH ;

- tout le potentiel des outils développés aurait mérité d'être exploité plus en avant. D'autres scénarios auraient pu être simulés. La question d'un nouveau mode de gestion n'a pu être abordée en profondeur, faute de temps principalement. L'adaptation sur le territoire est présente implicitement au travers de la poursuite de mesures d'économie d'eau introduites dans les scénarios. Des stratégies peut-être plus ambitieuses restent à construire. La discussion a été engagée lors d'un atelier de restitution avec les acteurs le 27 mars 2014 au siège de la SCP (ACTeon *et al.*, 2014), sans qu'elle ne débouche sur des propositions fermes. Quel que soit le mode d'élaboration des stratégies, leurs effets seront à mesurer et il semblerait naturel, vu l'effort déployé, d'exploiter les modèles mis en place dans le projet en intégrant ces suggestions de modifications du fonctionnement du système ;
- une démarche de modélisation basée sur J2000 sur la partie française du bassin du Rhône est actuellement en cours à Irstea (Lyon-Villeurbanne, coordination : E. Sauquet & F. Branger). Cette action est cofinancée par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, la Compagnie Nationale du Rhône et les fonds européens FEDER et sa durée est de plus de trois ans (janvier 2013 – avril 2016). La philosophie adoptée est identique à celle de R²D² 2050. L'expérience acquise sera valorisée sur un territoire sept fois plus grand (environ 85 000 km² drainée entre le Lac Léman et le delta du Rhône), et encore plus complexe.

XVI. Bibliographie

- ACTeon, IRSTEA, EDF & SCP (2014) Compte rendu de l'atelier de restitution des résultats intermédiaires. Projet R²D² 2050, avril 2014, 57 pp.
- Acthys-Diffusion (2011-2012) Enquête documentaire sur les données hydrologiques et hydrométriques anciennes du bassin de la Durance. Rapport technique, 2 volumes.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998) Crop Evaporation - Guidelines for computing crop water requirements, Irrigation and drainage paper 56, FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- Andréassian, V., Bergström, S., Chahinian, N., Duan, Q., Gusev, Y. M., Littlewood, I., Mathevet, T., Michel, C., Montanari, A., Moretti, G., Moussa, R., Nasonova, O. N., O'Connor, K. M., Paquet, E., Perrin, C., Rousseau, A., Schaake, J., Wagener, T. & Xie, Z. (2006) Catalogue of the models used in MOPEX 2004/2005, IAHS Publication 307, 41-93.
- Arama, Y. & Sauquet E. (2014). Gestion de l'eau en 2050, synthèse opérationnelle pour le bassin versant du Buëch, et les domaines Verdon et Durance. Rapport, ACTeon-Irstea, novembre 2014, 30 pp.
- Beasley, D.B. & Huggins, L.F. (1991) ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation), User's manual, 2nd edition, 2nd printing (1991), Agricultural Engineering Department publication n°5, 55 pp.
- Beven, K. J. & Binley, A. M. (1992) The Future of Distributed Models -- Model Calibration and Uncertainty Prediction. *Hydrological Processes*, 6, 279-298. doi: 10.1002/hyp.3360060305
- Boé, J., Terray, L., Habets, F. & Martin, E. (2006) A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *Journal of Geophysical Research*, 111, D23106. doi: 10.1029/2005JD006889
- Bonada, N., Dolédec, S. & Statzner, B. (2007) Taxonomic and biological trait differences of stream macroinvertebrate communities between Mediterranean and temperate regions: implications for future climatic scénarios. *Global Change Biology*, 13(8), 1658–1671.
- Boulet, G., Chehbouni, A., Braud, I. & Vauclin, M. (1999) Mosaic versus dual source approaches for modeling the surface balance of a semi-arid land. *Hydrology and Earth System Sciences* 3, 247-258.
- Braud, I. (2000) SiSPAT User's Manual Version 3.0. Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Grenoble (France), 106 pp.
- Braud, I. (2002) SiSPAT User's Manual Update. Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Grenoble (France), 13 pp.
- Braud, I., Dantas-Antonino, A.C., Vauclin, M., Thony, J.L. & Ruelle, P. (1995) A Simple Soil Plant Atmosphere Transfer model (SiSPAT), Development and field verification. *Journal of Hydrology*, 166, 213-250.
- Braud, I., Samie, R., Cherel, J., Tilmant, F., Vidal, J.-P., Blanc-Coutagne, E., Le Goff, I., Carrer, D., Calvet, J.-C. & Moulin, S. (2014a) Quantifying climate change impact on irrigation requirements in south-east France: intercomparison of four models on nine typical crops. *Agricultural Water Management*, *soumis*.
- Braud, I., Tilmant, F., Samie, R. & Le Goff, I. (2013) Assessment of the SiSPAT SVAT model for irrigation estimation in south-east France. In : International Conference on Monitoring and Modeling Soil-Plant-Atmosphere Processes, 19-20 juin 2013, Naples, Italie, *Procedia Environmental Sciences*, 19, 747-756. doi: 10.1016/j.proenv.2013.06.083
- Braud, I., Tilmant, F., Vidal, J.-P., Samie, R. & Chérel, J. (2014b) Modélisation des besoins en eau des cultures et intercomparaison des modèles. Contribution au W.P. 2.3 du projet R²D² 2050, Rapport interne du projet R²D² 2050, 109 pp.
- Braun, M., Caya, D., Frigon, A. & Slivitzky, M. (2012) Internal variability of the Canadian RCM's hydrological variables at the basin scale in Quebec and Labrador. *Journal of Hydrometeorology*, 13, 443-462.
- Brisson, N. & Levraut, F. (2010) Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010), ADEME éditions, 336 pp.
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B. & Baudoin, N. (2008) Conceptual basis, formalization and parametrization of the STICS crop growth model, Quae éditions, Paris, 297 pp.
- Calvet, J.C., Gibelin, A.L., Roujean, J.L., Martin, E., Le Moigne, P., Douville, H. & Noilhan, J. (2008) Past and future scénarios of the effect of carbon dioxide on plant growth and transpiration for three vegetation types of southwestern France. *Atmos. Chem. Phys.* 8, 397-406.
- Campion, T. (2002) Etude de l'impact de la production de neige de culture sur la ressource en eau en hiver, en montagne. Mastère Spécialisé « Eau Potable et Assainissement », ENGEES, Strasbourg, 67 pp.

- CEMAGREF (1997) Régulation et gestion des canaux à surface libre. Inventaire des canaux d'irrigation à surface libre dans le Sud de la France. Enquête et étude des pratiques de régulation et des performances des canaux à but agricole" - Ministère de l'Agriculture.
- Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.-Y., Sauquet, E., Vidal, J.-P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T., Maugis, P. & de Lacaze, X. (2013) Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche*, 4, 5-15, doi : 10.1051/lhb/2013027.
- Chopart, J.L., Mezino, M., Le Mezo, L. & Fusillier, J.L. (2007) FIVE-CORE: a simple model for farm irrigation volume estimates according to constraints and requirements. Application to sugarcane in Réunion (France). *Proceedings of the International Sugar Cane Technology*, 26(2): 490-493.
- Christerson, B. v., Vidal, J.-P. & Wade, S. D. (2012) Using UKCP09 probabilistic climate information for UK water resource planning. *Journal of Hydrology*, 424-425, 48-67. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.12.020
- Collins, M.(2007) Ensembles and probabilities: a new era in the prediction of climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society Series A*, 365, 1957-1970. doi: 10.1098/rsta.2007.2068
- Corti, R., Datry, T., Drummond, L. & Larned, S. T. (2011) Natural variation in immersion and emersion affects breakdown and invertebrate colonization of leaf litter in a temporary river. *Aquatic Sciences*, 73(4), 537-550.
- Cros, K. (2012) La gouvernance de l'eau de la Durance : Quel avenir pour répondre aux enjeux de demain ? Rapport de Master2, Mastère spécialisé « Gestion de l'Eau », AgroparisTech, 75 pp.
- Daron, J. D. & Stainforth, D. A. (2013) On predicting climate under climate change. *Environmental Research Letters*, 2013, 8, 034021. doi: 10.1088/1748-9326/8/3/034021
- Datry, T. (2012) Benthic and hyporheic invertebrate assemblages along a flow intermittence gradient: effects of duration of dry events. *Freshw. Biol.* 57, 563–574.
- Datry, T., Arscott, D. B. & Sabater; S. (2011) Recent perspectives on temporary river ecology. *Aquatic Sciences*, 73, 453–457, doi 10.1007/s00027-011-0236-1.
- DDT Hautes-Alpes (2011) Le prix de l'eau dans les Hautes-Alpes, Enquête 2010, 4 pages. [http://www.hautes-alpes.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport sur le prix de l eau 2010 v2 cle138e4f.pdf](http://www.hautes-alpes.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_sur_le_prix_de_l_eau_2010_v2_cle138e4f.pdf)
- Deser, C., Knutti, R., Solomon, S. & Phillips, A. S. (2012a) Communication of the role of natural variability in future North American climate. *Nature Climate Change*, 2, 775-779. doi: 10.1038/nclimate1562
- Deser, C., Phillips, A. S., Alexander, M. A. & Smoliak, B. V. (2014) Projecting North American Climate over the next 50 years: Uncertainty due to internal variability. *Journal of Climate*, 27, 2271-2296. doi : 10.1175/JCLI-D-13-00451.1
- Deser, C., Phillips, A., Bourdette, V. & Teng, H. (2012b) Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability. *Climate Dynamics*, 38, 527-546. doi: 10.1007/s00382-010-0977-x
- DRE PACA (2007) Diagnostic foncier en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Direction Régionale de l'Équipement PACA, 37 pp.
- DREAL PACA & Agence de l'Eau RMC (2008) Diagnostic gestion quantitative de la ressource en eau de la région PACA. Rapport d'étude, octobre 2008, 143 pp.
- Ducharne A., Koster R. D., Suarez M. J., Stieglitz M. & Kumar P. (2000) A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model 2. Parameter estimation and model demonstration. *Journal of Geophysical Research*, 105, 24823-24838.
- Ducharne, A., Habets, F., Déqué, M., Evaux, L., Hachour, A., Lepaillier, A., Lepelletier, T., Martin, E., Oudin, L., Pagé, C., Ribstein, P., Sauquet, E., Thiéry, D., Terray, L., Viennot, P., Boé, J., Bourqui, M., Crespi, O., Gascoïn, S. & Rieu, J. (2009) Projet REXHySS -- Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme. Programme GICC – Rapport de fin de contrat.
- Etchevers, P. (2000) Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale. Impact de la modélisation de la neige sur l'hydrologie du Rhône. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III.
- Faroux, S., Kaptué Tchuenté, A.T., Roujean, J.-L., Masson, V., Martin, E. & Le Moigne P. (2013) ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models. *Geosci. Model Dev.*, 6, 563–582, 2013, doi:10.5194/gmd-6-563-2013.
- Federer, C.A. (1979) A soil-plant-atmosphere model for transpiration and availability of soil water. *Water Resources Research*, 15, 555-562.
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S. & Tebaldi, C. (2007) Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling. *International Journal of Climatology*, 27, 1547-1578. doi: 10.1002/joc.1556

- François, B., 2013. Gestion optimale d'un réservoir hydraulique multi-usages et changement climatique. Modèles, projections et incertitudes. Application à la réserve de Serre-Ponçon. Thèse, Université de Grenoble, Grenoble.
- François, B., Hingray, B., Hendrickx, F. & Creutin, J.-D. (2015) Influence of the management strategy model on estimating water system performance under climate change. *Advances in Water Resources*, en révision.
- Fronzek, S., Carter, T. R., Räisänen, J., Ruokolainen, L. & Luoto M. (2010) Applying probabilistic projections of climate change with impact models: a case study for sub-arctic peat bogs in Fennoscandia. *Climatic Change*, 99, 515–534.
- García-Valiñas, M.A., Nauges, C. & Reynaud, A. (2009) How much water do residential users really need? An estimation of minimum water requirements for French households. *Proceedings of the 17th Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists*, 24 - 27 June 2009, Amsterdam, 18 pp.
- Garçon, R. (1996) Prévision opérationnelle des apports de la Durance à Serre-Ponçon à l'aide du modèle MORDOR. Bilan de l'année 1994-1995. *La Houille Blanche*, 5, 71-76. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1996056>
- Gottardi, F. (2009) Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble.
- Gottardi, F., Obléd, C., Gailhard, J. & Paquet E. (2012) Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns: Application over French mountains. *Journal of Hydrology*, 432–433, 154-167, 10.1016/j.jhydrol.2012.02.014
- Goussebaille, J., Miquel, J. & Roche, P.-A. (1986) Gestion des barrages réservoirs en avenir incertain. Utilisation de méthodes en avenir certain sur scénarios. Rapport V11 19èmes Journées de l'Hydraulique : 9-11. Société Hydrotechnique de France, Paris.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K. & Martinez, G. F. (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2): 80-91, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003, 2009
- Hagemann, S., Chen, C., Clark, D.B., Folwell, S., Gosling, S.N., Haddeland, I., Hanasaki, N., Heinke, J., Ludwig, F., Voss, F.F. & Wiltshire A. J. (2013). Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models. *Earth System Dynamics*, 4(1), 129-144, doi:10.5194/esd-4-129-2013
- Hawkins, E. & Sutton, R. (2009) The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90, 1095–1107. doi: 10.1175/2009BAMS2607.1
- Hawkins, E. & Sutton, R. (2011) The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics*, 37, 407-418. doi: 10.1007/s00382-010-0810-6
- Heino, J., Virkkala, R. & Toivonen, H. (2009) Climate change and freshwater biodiversity: detected patterns, future trends and adaptations in northern regions. *Biological Reviews*, 84(1), 39–54.
- Hendrickx, F. & Sauquet, E. (2013) Impact of warming climate on water management for the Ariège River basin (France). *Hydrological Sciences Journal* 58(4), 1–17.
- Hendrickx, F. (2014). Intégration Ressource / Usage / Gestion - Module de gestion MORGLite. Note de travail du projet R²D² 2050, EDF-LNHE, 41 pp.
- Hingray, B. & Saïd, M. (2014) Partitioning internal variability and model uncertainty components in a multimodel multireplicate ensemble of climate projections. *Journal of Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00629.1
- Hingray, B., *et al.* (2015) Partitioning internal variability and model uncertainty in a multimodel ensemble of climate projections: influence of model replicate number. *Geophys. Res. Letters*, *in prep.*
- Hingray, B., Hendrickx, F., Bourqui, M., Creutin, J.-D., François, B., Gailhard, J., Lafaysse, M., Le Moine, N., Mathevet, T., Mezghani, A. & Monteil, C. (2013) RIWER2030. Climat Régionaux et Incertitudes, Ressource en Eau et Gestion associée de 1860 à 2100. Rapport ANR.
- Huebener, H., Cubasch, U., Langematz, U., Spanghel, T., Niehörster, F., Fast, I. & Kunze, M. (2007) Ensemble climate simulations using a fully coupled ocean–troposphere–stratosphere general circulation model. *Philosophical Transactions of The Royal Society A-mathematical Physical and Engineering Sciences*, 365, 2089-2101. doi: 10.1098/rsta.2007.2078
- Jiang, T., Chen, Y. D., Xu, C.-Y., Chen, X., Chen, X. & Singh, V. P. (2007) Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang basin, South China. *Journal of Hydrology*, 336(3), 316–333.

- Johns, T. C., Royer, J.-F., Höschel, I., Huebener, H., Roeckner, E., Manzini, E., May, W., Dufresne, J.-L., Otterå, O. H., van Vuuren, D. P., Salas y Melia, D., Giorgetta, M. A., Denvil, S., Yang, S., Fogli, P. G., Körper, J., Tjiputra, J. F., Stehfest, E. & Hewitt, C. D. (2011) Climate change under aggressive mitigation: the ENSEMBLES multi-model experiment. *Climate Dynamics*, 37, 1975-2003. doi: 10.1007/s00382-011-1005-5
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., W., C., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R. & Joseph, D. (1996) The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Klemeš, V. (1986) Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31, 13-24.
- Krause, P., Bäse F., Bende-Michl, U., Fink, M., Flügel, W. & Pfenning, B. (2006). Multiscale investigations in a mesoscale catchment - hydrological modelling in the Gera catchment. *Advances in Geosciences* 9, 53-61.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., Polcher, J. & Prentice, I. C. (2005) A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochemical Cycles* 19:GB1015, doi:10.1029/2003GB002199
- Kuentz, A. (2013) Un siècle de variabilité hydro-climatique sur le bassin de la Durance. Recherches historiques et reconstitutions. Thèse de doctorat, AgroParisTech, spécialité Hydrologie, Paris.
- Kuentz, A., Mathevet, T., Cœur, D., Perret, C., Gailhard, J., Guérin, L., Gash, Y. & Andréassian, V. (2014) Hydrométrie et hydrologie historiques du bassin de la Durance. *La Houille Blanche*, 2014, 57-63. doi: 10.1051/lhb/2014039
- Lafaysse, M. (2011) Changement climatique et régime hydrologique d'un bassin alpin. Génération de scénarios sur la Haute-Durance, méthodologie d'évaluation et incertitudes associées. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Lafaysse, M., Hingray, B., Etchevers, P., Martin, E. & Obled, C. (2011) Influence of spatial discretization, underground water storage and glacier melt on a physically-based hydrological model of the Upper Durance River basin. *Journal of Hydrology*, 403 (1-2), 116-129.
- Lafaysse, M., Hingray, B., Gailhard, J., Mezghani, A., Terray, L. (2014a) Internal variability and model uncertainty components in a multireplicate multimodel ensemble of hydrometeorological projections. *Water Resources Research*. DOI:10.1002/2013WR014897
- Lambert, F. H., Harris, G. R., Collins, M., Murphy, J. M., Sexton, D. M. H. & Booth, B. B. B. (2013) Interactions between perturbations to different Earth system components simulated by a fully-coupled climate model. *Climate Dynamics*, 41, 3055-3072. doi: 10.1007/s00382-012-1618-3
- Larned, S.T., Schmidt, J., Datry, T., Konrad, C. P., Dumas, J. K. & Diettrich, J. C (2011) Longitudinal river ecohydrology: flow variation down the lengths of alluvial rivers. *Ecohydrology*, doi: 10.1002/eco.126.
- Lawton, J. H. & Brown, V. K. (1993) Redundancy in Ecosystems (pp. 255–270). Springer Berlin Heidelberg.
- Le Coz, J., Chaléon, C., Bonnifait, L., Le Boursicaud, R., Renard, B., Branger, F.; Diribarne, J. & Valente, M. (2013) Analyse bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes : la méthode BaRatin. *La Houille Blanche*, 2013, 31-41. doi : 10.1051/lhb/2013048
- Le Moine, N. (2008) Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performance et du réalisme des modèles pluie-débit ?. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Leblois, E. (2002) Evaluation des possibles impacts du changement climatique par modélisation distribuée (projets Gewex-Rhône et GICC-Rhône). *La Houille Blanche*, 8, 78-83, doi : 10.1051/lhb/2002112
- Lorenz, E. N. (1969) Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26, 636-646. doi: 10.1175/1520-0469(1969)26<636%3AAPARB>2.0.CO%3B2
- Magand, C. (2014). Influence de la représentation des processus nivaux sur l'hydrologie de la Durance et sa réponse au changement climatique. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Magand, C., Ducharne, A., Le Moine N. & Brigode, P. (2014a) Sensitivity to the calibration period and transferability of the Catchment Land Surface Model parameters under changing climate: a case study in the Durance watershed, France. *Hydrological Sciences Journal*, submitted.
- Magand, C., Ducharne, A., Le Moine, N. & Gascoïn, S. (2014b). Introducing hysteresis in snow depletion curves to improve the water budget of a land surface model in Alpine catchments. *Journal of Hydrometeorology*, 15, 631-649, doi:10.1175/JHM-D-13-091.1
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H. W., Sauter, T., Themessl, M., Venema, V. K. C., Chun, K. P., Goodess, C. M., Jones, R. G., Onof, C., Vrac, M. & Thiele-Eich, I. (2010) Precipitation downscaling under climate change. Recent developments to

- bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48, RG3003. doi: 10.1029/2009RG000314
- Marti, O., Braconnot, P., Dufresne, J.-L., Bellier, J., Benshila, R., Bony, S., Brockmann, P., Cadule, P., Caubel, A., Codron, F., de Noblet, N., Denvil, S., Fairhead, L., Fichet, T., Foujols, M.-A., Friedlingstein, P., Goosse, H., Grandpeix, J.-Y., Guilyardi, E., Hourdin, F., Idelkadi, A., Kageyama, M., Krinner, G., Lévy, C., Madec, G., Mignot, J., Musat, I., Swingedouw, D. & Talandier, C. (2010) Key features of the IPSL ocean atmosphere model and its sensitivity to atmospheric resolution. *Climate Dynamics*, 34, 1-26. doi: 10.1007/s00382-009-0640-6
- Masson, D. & Knutti, R. (2011) Climate model genealogy *Geophysical Research Letters*, 38, L08703. doi: 10.1029/2011GL046864
- McKay, M. D., Beckman, R. J. & Conover, W. J. (1979) A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 1979, 21, 239-245. doi: 10.2307/1268522
- MEDCIE Grand Sud-Est (2011) Etude sur l'adaptation aux effets du changement climatique dans le Grand Sud-est, Etude réalisée par Sogreah et Iclei. Rapport de synthèse phase 3, 292 pp.
- Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J. F. B., Stouffer, R. J. & Taylor, K. E. (2007) The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1383-1394. doi: 10.1175/BAMS-88-9-1383
- Mezghani, A. & Hingray, B. (2009) A combined downscaling-disaggregation weather generator for stochastic generation of multisite hourly weather variables over complex terrain: Development and multi-scale validation for the Upper Rhone River basin. *Journal of Hydrology*, 377, 245-260. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.033
- Milly, P.C.D. (1982) Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: a matrix head-based formulation and a numerical model. *Water Resources Research* 18, 498.
- Mitchell, T. D. & Hulme, M. (1999) Predicting regional climate change: living with uncertainty. *Progress in Physical Geography*, 23, 57-78. doi: 10.1177/030913339902300103
- Moatar, F., Bustillo, V., Ducharne, A., Thiéry, D., Sauquet, E., Vidal, J.-P. & Bernard, A. (2010) ICC-HYDROQUAL -- Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDROlogie, Régime thermique, QUALité des eaux -- Action 1 : Evolution hydroclimatique de la Loire et de ses affluents sous changement climatique. Rapport final.
- Montginoul, M. (2011) Connaitre et gérer la demande en eau. Mémoire de HDR, Université Montpellier 1, Montpellier.
- Montginoul, M. (2013) La consommation d'eau en France : historique, tendances contemporaines, déterminants. *Sciences Eaux & Territoires*, 10, 68-72.
- Morin, G. (2002) CEQUEAU Hydrological Model. Chap 13 in: *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications* (ed. by V. P. Singh & D. K.Frevert). Water Res. Publ., Chelsea, Michigan, 950 pp.
- Murphy, C., Fealy, R., Charlton, R. & Sweeney, J. (2006) The reliability of an 'off-the-shelf' conceptual rainfall runoff model for use in climate impact assessment: uncertainty quantification using Latin hypercube sampling. *Area*, 38, 65-78. doi: 10.1111/j.1475-4762.2006.00656.x
- Murphy, J. M., Booth, B. B. B., Collins, M., Harris, G. R., Sexton, D. M. H. & Webb, M. J. (2007) A methodology for probabilistic predictions of regional climate change from perturbed physics ensembles. *Philosophical Transactions of the Royal Society Series A*, 365, 1993-2028. doi: 10.1098/rsta.2007.2077
- Nakićenović, N. & Swart, R. (2000) *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Nash, J. & Sutcliffe, J. (1970) River flow forecasting through conceptual models Part I§ - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282-290.
- Nicolas, M. (2014). Impact du changement climatique sur les débits du XXIe siècle en France : Une estimation avec les nouvelles projections du GIEC (CMIP5) et le modèle hydrologique de l'Irstea (GR). Master 1 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie, Spécialité Environnements Continentaux et Hydrosociétés, Université Pierre et Marie Curie, 40 pages.
- Obled, C., Bontron, G. & Garçon, R. (2002) Quantitative precipitation forecasts: a statistical adaptation of model outputs through an analogues sorting approach. *Atmospheric Research*, 63, 303-324. doi: 10.1016/S0169-8095(02)00038-8
- Olioso, A., Huard, F. & Guillioni, L. (2010) Prise en compte du CO2 dans le calcul de l'évapotranspiration de référence, Actes du Colloque « Présentation des méthodes et des résultats du projet Climator », 17-18

- June 2010, Paris, France, 66-67,
http://w3.avignon.inra.fr/projet_climator/images/actes_du_colloque_climator.pdf
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K. & Belitz, K. (1994) Verification, validation, and confirmation of numerical models in the Earth Sciences. *Science*, 263, 641-646. doi: 10.1126/science.263.5147.641
- Ormerod, S. J. (2009) Climate change, river conservation and the adaptation challenge. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 19(6), 609-613.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. & Loumagne, C. (2005) Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1-4): 290-306, doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.026
- Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S. & Vautard, R. (2014) Le climat de la France au XXI^e siècle. Volume 4 Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, août 2014, 64 pp.
- Pennell, C. & Reichler, T. (2011) On the effective number of climate models. *Journal of Climate*, 24, 2358-2367. doi: 10.1175/2010JCLI3814.1
- Perrin, C., *et al.* (2015) Are similar hydrological simulations produced by models with similar internal behavior? Comparative evaluation on the Durance River basin under contrasted conditions. X, in prep.
- Perrin, C., Michel, C. & Andréassian, V. (2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.*, 279(1-4): 275-289.
- Poulin, A., Brissette, F., Leconte, R., Arsenault, R. & Malo, J.-S. (2011) Uncertainty of hydrological modelling in climate change impact studies in a Canadian, snow-dominated river basin. *Journal of hydrology*, 409(3):626-636.
- Prudhomme, C. & Williamson, J. (2013) Derivation of RCM-driven potential evapotranspiration for hydrological climate change impact analysis in Great Britain: a comparison of methods and associated uncertainty in future projections. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 1365-1377. doi: 10.5194/hess-17-1365-2013
- Quintana Seguí, P., Ribes, A., Martin, E., Habets, F. & Boé, J. (2010) Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of Hydrology*, 383(1), 111-124.
- Quintana-Segui, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Franchisteguy, L., Morel, S. & Noilhan, J. (2008) The SAFRAN atmospheric analysis : Description and validation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1), 92-107, doi: 10.1175/2007JAMC1636.1
- Rahel, F. J. & Olden, J. D. (2008) Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species. *Conservation Biology*, 22(3), 521-533.
- Rawls, W.J. & Brakensiek, D.L. (1985) Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: Jones, E.B.A.W., T.J. eds. (Ed.), *Watershed Management in the eighties*. ASCE, Denver, April 30-May 1, 1985, 293-299.
- Risques & Développement (2011-2013) Études d'estimation des volumes prélevables globaux – Sous bassin versant du Buëch. Rapport d'étude, phase I, II, III, V et VI (<http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/gestion-quantitative/EEVPG/buech>).
- Roeckner, E., Giorgetta, M. A., Crueger, T., Esch, M. & Pongratz, J. (2006) Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *Journal of Climate*, 19, 3771-3791. doi: 10.1175/JCLI3824.1
- Salas-Méla, D., Chauvin, F., Déqué, M., Douville, H., Guérémy, J.-F., Marquet, P., Planton, S., Royer, J.-F. & Tyteca, S. (2005) Description and validation for the CNRM-CM3 global coupled model. CNRM-GAME Working Note 103
- Sauquet, E., Dupeyrat, A., Hendrickx, F., Perrin, C., Samie, R. & Vidal, J.P. (2010). Imagine2030 – Climat et aménagement de la Garonne : quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030 ? Programme RDT, volet 2, Rapport de fin de contrat, Cemagref, 149 pages, <http://cemadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00028876>
- Seguin, J. & Mardhel, V. (2012). Référentiel hydrogéologique français BD LISA (version beta). Présentation du référentiel, principe de construction de mise en œuvre. Rapport final. Rapport technique, BRGM.
- Shaw, S. B. & Riha, S. J. (2011) Assessing temperature-based PET equations under a changing climate in temperate, deciduous forests *Hydrological Processes*, 25, 1466-1478. doi: 10.1002/hyp.7913
- Shiogama, H., Watanabe, M., Yoshimori, M., Yokohata, T., Ogura, T., Annan, J. D., Hargreaves, J. C., Abe, M., Kamae, Y., O'ishi, R., Nobui, R., Emori, S., Nozawa, T., Abe-Ouchi, A. & Kimoto, M. (2012) Perturbed physics ensemble using the MIROC5 coupled atmosphere-ocean GCM without flux corrections:

- Experimental design and results: Parametric uncertainty of climate sensitivity. *Climate Dynamics*, 39, 3041-3056. doi: 10.1007/s00382-012-1441-x
- Simon, T., Wang, D., Hense, A., Simmer, C. & Ohlwein, C. (2013) Generation and transfer of internal variability in a regional climate model *Tellus A*, 65, 22485. doi: 10.3402/tellusa.v65i0.22485
- Smith, L. A. (2002) What might we learn from climate forecasts? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99, Supplement 1, 2487-2492. doi: 10.1073/pnas.012580599
- Snover, A. K., Hamlet, A. F. & Lettenmaier, D. P. (2003) Climate-change scénarios for water planning studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(11), 1513–1518.
- Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale (2014) Simulations des chroniques de consommations en eau d'irrigation sur les périmètres desservis par la SCP, Analyse des besoins en eau d'irrigation actuels et futurs. Rapport de recherche, février 2014, 90 pp.
- SOGREAH, Maison Régionale de l'Eau & OIEAU (2010) Assises régionales de l'eau - Schéma d'orientations pour une utilisation raisonnée et solidaire de la ressource en eau. Note de synthèse du diagnostic, novembre 2010, 18 pp.
- Stainforth, D. A., Allen, M. R., Tredger, E. R. & Smith, L. A. (2007) Confidence, uncertainty and decision-support relevance in climate predictions. *Philosophical Transactions of the Royal Society Series A*, 365, 2145-2161. doi: 10.1098/rsta.2007.2074
- Taylor, I. H., Burke, E., McColl, L., Falloon, P. D., Harris, G. R. & McNeall, D. (2013) The impact of climate mitigation on projections of future drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 2339-2358. doi: 10.5194/hess-17-2339-2013
- Tebaldi, C. & Knutti, R. (2007) The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society Series A*, 365, 2053-2075. doi: 10.1098/rsta.2007.2076
- Terray, L. & Boé, J. (2013) Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties. *Comptes Rendus Geoscience*, 345, 3, 136-149.
- Tilmant, F. & Braud, I. (2012) Analyse de la base de données sol Référentiel Régional Pédologique PACA. Les différentes étapes réalisées. Note de travail du projet R²D² 2050, Irstea, mars 2012, 6 pp.
- Tilmant, F. (2011) Modélisation des besoins en eau des plantes dans la vallée de la Durance. Stage de M2R Hydrologie, Hydrochimie, Sol, Environnement (H2SE), Université Paul Sabatier, Toulouse, 65 pp.
- Tilmant, F. (2012) Extraction des données de la réanalyse SAFRAN de Météo-France, mise en place d'un décalage des séries de données, création de fichiers climatiques et calcul d'une évapotranspiration de référence au pas de temps horaire spatialisée pour la modélisation hydrologique. Note de travail du projet R²D² 2050, Irstea, 60 pp.
- Tilmant, F., Hingray, B. & Vidal, J.-P. (2013) Scénarios d'ET₀ sur la base des scénarios météorologiques RIWER2030. Evaluation et projections pour différentes combinaisons MDES /GCM. Note de travail du projet R²D² 2050, Irstea – LTHE, 18 pp + Annexes.
- van der Linden P., Mitchell J.F.B., 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre. <http://ensembles-eu.metoffice.com/>
- Vidal J-P., Martin, E., Franchisteguy, L., Baillon, M. & Soubeyroux, J.M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627-1644, doi: 10.1002/joc.2003
- Vidal, J.-P. & Hingray, B. (2013) Sub-sampling ensembles of downscaled climate projections. 12th International Meeting on Statistical Climatology - Program & abstract, 2013, 126-127.
- Vidal, J.-P., *et al.* (2015) Selecting downscaled climate projections for impact and adaptation studies. *Climatic Change*, *in prep.*
- Vidal, J.-P., Tilmant, F. & Hingray, B. (2013) Uncertainties in changes in potential evaporation: the formulation issue. *Geophysical Research Abstracts*, 16, EGU2013-11231
- Von Storch, H. & Zwiers, F.W. (2001) *Statistical analysis in climate research*. Cambridge University Press.
- Wetterhall, F., Bárdossy, A., Chen, D., Halldin, S. & Xu, C.-Y. (2006) Daily precipitation-downscaling techniques in three Chinese regions. *Water Resources Research*, 42, W11423. doi: 10.1029/2005WR004573
- Whetton, P., Hennessy, K., Clarke, J., McInnes, K. & Kent, D. (2012) Use of Representative Climate Futures in impact and adaptation assessment. *Climatic Change*, 115, 433-442. doi: 10.1007/s10584-012-0471-z
- Wilby, R.L. & Dessai, S. (2010) Robust adaptation to climate change. *Weather*, 65, 180-185. doi: 10.1002/wea.543