



# Impact du changement climatique sur la ressource en eau du bassin versant de l'Orb

**BRGM/RP-61319-FR**  
Janvier 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2012 PSP09LRO12

**Y. Caballero et C. Girard**

**Vérificateur** : Jean-Christophe Maréchal

Date: 17/01/2013

**Approbateur** : Marc Audibert

Date : 18/01/2013

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

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

**Mots clés** : Bilan eau surface, Ressource eau, Modèle hydrologique, Changement Climatique  
Orb, Hérault.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Caballero Y. ; Girard C.** (2012), Impact du changement climatique sur la ressource en eau du bassin versant de l'Orb. Rapport BRGM/RP-61319-FR. 40 p., 16 ill.

## Synthèse

Depuis 2006, les bassins versants de l'Hérault et de l'Orb font l'objet d'une série d'études économiques visant à aider les gestionnaires à anticiper l'évolution future de la demande en eau et à optimiser le coût des programmes d'actions à mettre en œuvre dans le domaine de la gestion quantitative. Ces études ont été réalisées par le BRGM, avec l'appui technique et financier du Conseil général de l'Hérault, de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse et du Conseil Régional.

Le présent rapport a permis de poursuivre ce travail avec les mêmes partenaires financiers, en intégrant notamment une analyse sommaire de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau disponible sur le bassin versant de l'Orb.

Des bilans hydriques simplifiés réalisés à l'aide des observations disponibles (données fournies gracieusement par Météo France pour la base SAFRAN et par BRLi pour les débits journaliers reconstitués) ont mis en évidence une disparité importante en termes de productivité entre la partie amont et la partie aval du bassin versant.

Le calage et la validation d'un modèle hydrologique simple (GR2M) a permis de simuler les débits au pas de temps mensuel sur 11 sous-bassins définis préalablement à l'étude. La qualité variable des simulations obtenues suivant les sous-bassins tient à la fois à la qualité très relative des observations de débits disponibles et au fait que le modèle GR2M est un modèle conceptuel simple. Malgré sa capacité limitée à capturer des processus hydrologiques complexes, par ailleurs très mal connus à ce jour (relations entre les nappes superficielles, profondes et les rivières notamment) il permet cependant de disposer d'un outil d'exploration des situations hydrologiques futures.

L'impact du changement climatique a ainsi été étudié en soumettant les modèles hydrologiques appliqués sur les sous-bassins, à un ensemble de scénarios climatiques fournis gracieusement par le CERFACS. Les résultats de l'analyse montrent que le climat futur projeté par ces scénarios pourrait provoquer une diminution des débits moyens mensuels globalement comprise entre -20 et -40% suivant les sous-bassins et la saison, celle-ci étant moins marquée pendant la période estivale (de l'ordre de -10%) et plus marquée sur la période automnale. Ces résultats ne doivent pas masquer le fait que l'incertitude associée aux modèles de climat peut limiter la représentativité de ces résultats suivant la saison considérée et que de fortes disparités peuvent apparaître d'un sous-bassin à l'autre, à la fois du fait de leurs différences de comportement hydrologique et hydrogéologique, mais aussi à cause de la variabilité temporelle et spatiale des conditions météorologiques (événements cévenols en automne par exemple).



## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Etat des lieux de la ressource en eau sur le bassin versant de l'Orb</b> .....	<b>9</b>
2.1. DONNEES ET METHODES.....	9
2.2. BILAN HYDRIQUE SIMPLIFIE A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT DE L'ORB....	10
2.2.1. Données de précipitation et évapotranspiration .....	10
2.2.2. Données sur les débits naturels reconstitués .....	11
2.2.3. Synthèse sur le bilan hydrique .....	15
<b>3. Simulation des débits naturels</b> .....	<b>23</b>
3.1. LE MODELE HYDROLOGIQUE GR2M .....	23
3.2. APPLICATION DU MODELE AU BASSIN VERSANT DE L'ORB.....	24
<b>4. Impact du changement climatique sur la ressource en eau</b> .....	<b>31</b>
4.1. LES SCENARIOS CLIMATIQUES UTILISES.....	31
4.2. RESULTATS.....	31
<b>5. Conclusion</b> .....	<b>37</b>
<b>6. Bibliographie</b> .....	<b>39</b>

### Liste des illustrations

Figure 1 : Le bassin versant de l'Orb et ses principaux affluents.....	9
Figure 2 : Visualisation de l'emprise de la grille SAFRAN.....	11
Figure 3 : Points nodaux Ginger (2010) et sous-bassins retenus dans le cadre de l'étude. ....	13
Figure 4 : Liste des points nodaux retenus dans l'étude Ginger (2010). ....	14
Figure 5 : Bilan hydrique annuel simplifié sur le bassin versant de l'Orb et par sous-bassins. Haut – Cumuls annuels de pluie, d'ETP et des débits naturels par sous-bassin (sur la superficie du sous-bassin uniquement), puis pour la totalité du bassin versant de l'Orb. Bas – Résumé et qualification de la méthode de reconstitution des débits (vert : fiable ; jaune : à considérer avec prudence car les ordres de grandeur sont plausibles mais le calcul intègre de l'expertise ; rouge : douteux car les ordres de grandeur sont surprenants et le calcul intègre de l'expertise basée sur des données limitées) et coefficient d'écoulement annuel par sous-bassin (rapport entre la pluie tombée sur la superficie du sous-bassin et le débit qu'il produit) . ....	15
Figure 6 : Bilan hydrique simplifié pour les 11 sous-bassins retenus d'amont en aval du bassin versant de l'Orb (les noms reprennent la codification du tableau présenté sur la Figure 4). ....	19
Figure 7 : Principales formations géologiques présentes sur le bassin versant de l'Orb. ....	21

Figure 8 : Schéma conceptuel de fonctionnement du modèle GR2M (Mouelhi et al, 2006) .....	23
Figure 9 : résultat du calage et de la validation des modèles de simulation du débit journalier à l'exutoire des 11 sous-bassins, qualifiées par les valeurs des coefficients Nash (Q) et RMSE. ....	24
Figure 10 : visualisation de la différence de forme de la courbe des cumuls de débits naturels journaliers reconstitués entre les sous-bassins O4 et M4, par rapport à celle de O1. ....	25
Figure 11 : Simulation de débits moyens mensuels avec GR2M sur les 11 sous-bassins retenus.....	29
Figure 12 : Valeurs attribuées aux paramètres X1 et X2 du modèle GR2M lors de la calibration.....	29
Figure 13 : Haut - débits moyens mensuels calculés sur la période 1971-2000 ; Bas – débits mensuels pour chaque année de la période 1971-2000, simulés sur le sous-bassin O1 avec les observations de SAFRAN et pour chacun des scénarios climatiques retenus. ....	33
Figure 14 : Impact des scénarios climatiques futurs sur les débits moyens mensuels simulés avec le modèle GR2M sur le sous-bassin O1. Haut – valeur absolue (en mm) des moyennes intermodèles des débits simulés avec les scénarios pour le présent et le futur. Les barres d'erreur représentent les valeurs minimales et maximales. Bas – différence relative entre les débits simulés pour le futur et le présent par modèle et en moyenne intermodèles. ....	34
Figure 15 : Impact relatif des scénarios climatiques futurs par rapport au présent en termes de débits moyens mensuels simulés par sous-bassin. Haut – valeurs, Bas – graphique. ....	36



# 1. Introduction

Depuis 2006, les bassins versants de l'Hérault et de l'Orb font l'objet d'une série d'études économiques visant à aider les gestionnaires à anticiper l'évolution future de la demande en eau et à optimiser le coût des programmes d'actions à mettre en œuvre dans le domaine de la gestion quantitative. Ces études ont été réalisées par le BRGM, avec l'appui technique et financier du Conseil général de l'Hérault, de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, du Conseil Régional Languedoc-Roussillon.

Le projet « Ouest Hérault 2 », vise à poursuivre ce travail, en intégrant notamment une analyse de l'impact du changement climatique sur les besoins en eau d'irrigation (Hoang et al., 2012) et la ressource en eau disponible (objet du présent rapport). Cette analyse, complétée par une évaluation de l'augmentation des besoins en eau potable sous l'effet de l'évolution socio-économique du territoire étudié (Vernier de Byans et Rinaudo, 2012), permettra d'évaluer le niveau de déficit hydrique à l'horizon 2050. Les mesures de gestion devant être mises en place pour résorber ce déficit, c'est-à-dire satisfaire les demandes des acteurs économiques tout en respectant les contraintes environnementales de débit d'étiage en particulier doivent être identifiées. Une analyse économique sera alors réalisée pour optimiser le programme de mise en œuvre de ces mesures, de manière à en minimiser le coût (rapports à venir).

Les résultats du projet Ouest Hérault 2 devraient bénéficier aux études en cours des SAGE Orb et Hérault. Des contacts étroits ont d'ailleurs été établis avec les structures porteuses de ces SAGE ainsi qu'avec les bureaux d'études qui réalisent actuellement les études « volumes prélevables ».

Le programme initial de ce projet prévoyait de caractériser grossièrement l'impact du changement climatique sur la ressource à l'horizon 2020 sur le bassin versant de l'Orb. Il était ainsi proposé de s'inspirer des résultats de travaux réalisés dans le cadre du projet VULCAIN (Caballero et al., (2008), Dagneaux (2010)) pour poser des hypothèses de travail. Dans le but de proposer une évaluation plus robuste et plus fine de cette question, un travail de modélisation hydrologique simplifiée a finalement été réalisé sur le bassin versant de l'Orb. Ce travail a été réalisé pour pouvoir utiliser des scénarios climatiques proposant des projections du climat futur sur la zone d'étude, plutôt que des hypothèses qualitatives à partir d'un autre secteur géographique. Ce rapport présente ainsi la mise en œuvre d'un modèle hydrologique simple (le modèle GR2M), dans un contexte où les connaissances sur les processus hydrologiques sont limitées, pour l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau du bassin versant de l'Orb.

Une présentation de la zone d'étude et des sous-bassins délimités en son sein est tout d'abord proposée, en insistant sur l'analyse du comportement hydrologique des sous-bassins étudiés au sein du bassin versant de l'Orb, sur la base de bilans hydriques simplifiés. L'approche adoptée pour reproduire le comportement observé en appliquant un modèle hydrologique simple de type réservoir (GR2M - Mouelhi (2003) et Mouelhi et al. (2006)) est ensuite décrite. Après une brève description de l'architecture du modèle, les étapes de calage des paramètres et de validation des résultats des modèles appliqués sur chacun des sous-bassins sont présentées. Les scénarios climatiques (issus de 9 modèles de climat différents) utilisés pour forcer les modèles hydrologiques sont ensuite rappelés (ils sont présentés en détail dans Hoang et al. (2012)) et le résultat en termes de projection de débits moyens mensuels pour le futur sont décrits pour chacun des sous-bassins. Ces résultats sont exploités de manière à illustrer les incertitudes associées à l'utilisation de scénarios climatiques et à conclure sur les impacts du changement climatique sur la ressource en eau du bassin versant de l'Orb.



## 2. Etat des lieux de la ressource en eau sur le bassin versant de l'Orb

### 2.1. DONNEES ET METHODES

Le bassin versant de l'Orb, d'une superficie de 1 580 km<sup>2</sup>, se situe à l'ouest du département de l'Hérault. Au cours de son cheminement depuis les plateaux calcaires du Causse du Larzac où il prend naissance, l'Orb reçoit les affluents suivants, du nord au sud : la Mare, le Jaur et le Vernazobre, le Taurou et le Lirou (Figure 1).



Figure 1 : Le bassin versant de l'Orb et ses principaux affluents.

Le régime hydrologique de l'Orb et de ses principaux affluents ne fait pas l'objet d'une étude spécifique dans le présent rapport, dans la mesure où celui-ci a été étudié en détail dans les travaux de Ginger (Ginger, 2010) et de BRL Ingénierie (BRLi, 2011).

Ces travaux indiquent ainsi que deux aménagements hydrauliques influencent de manière importante le fonctionnement hydrologique de l'Orb : le barrage des Monts d'Orb (gestionnaire BRL) et l'usine hydroélectrique de Montahut (gestionnaire EDF) qui turbine les eaux du Lac de Laouzas (Figure 1).

Le barrage des Monts d'Orb, mis en eau en 1964 et permettant le stockage de 30,6 Mm<sup>3</sup>, assure principalement le soutien d'étiage dans le fleuve jusqu'au niveau des stations de pompage de Réals et de Cessenon-sur-Orb, où les eaux déstockées sont pompées pour satisfaire les besoins en eau potable et d'irrigation des secteurs équipés par BRL. Depuis 1975, le barrage comprend aussi une microcentrale équipée pour un débit maximum de 3,2 m<sup>3</sup>/s.

La présence du barrage sur le bassin versant de l'Orb permet de soutenir de manière importante les écoulements sur la partie amont du bassin (par exemple si le barrage n'était pas présent, les débits en amont de la confluence avec la Mare seraient de l'ordre de 2 m<sup>3</sup>/s en année moyenne et de 1 m<sup>3</sup>/s en année sèche alors qu'avec le barrage les débits sont respectivement de l'ordre de 3,8 m<sup>3</sup>/s et 2 m<sup>3</sup>/s (BRLi, 2011)).

L'usine hydroélectrique de Montahut turbine les eaux de rivières la Vèbre et l'Agout situées sur le versant atlantique, avant de les restituer dans le Jaur quelques kilomètres en amont de la confluence avec l'Orb. L'influence de cette restitution est importante sur les écoulements de l'Orb puisqu'elle représente un débit moyen annuel de l'ordre de 5 m<sup>3</sup>/s sur la période 1987-2003. Cependant, les apports de Montahut ne sont pas continus et génèrent de fortes variations de débit dans les cours d'eau. Ils sont en particulier très variables en étiage, voire nuls pendant les 15 premiers jours d'août (Ginger, 2010). Une deuxième usine hydroélectrique gérée par EDF, Langlade, turbine les eaux du ruisseau du Bureau, en amont de la restitution de Montahut. Cependant, le fonctionnement de cette usine en période estivale est d'ampleur réduite et n'influence que faiblement le fonctionnement du Jaur (Ginger, 2010).

Même si le fonctionnement du barrage des Monts d'Orb et celui des usines hydroélectriques ne sont pas coordonnés, leur présence permet de maintenir un débit d'étiage dans l'Orb en aval de Réals, compris entre 2 et 3 m<sup>3</sup>/s.

## **2.2. BILAN HYDRIQUE SIMPLIFIE A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT DE L'ORB**

En préalable au travail de calage d'un modèle hydrologique pour la simulation du comportement naturel du cours d'eau, une analyse synthétique du bilan hydrique peut être réalisée sur les données disponibles pour caractériser le comportement hydrologique du bassin versant de l'Orb. Une telle analyse nécessite de connaître la répartition des précipitations, de l'évapotranspiration et des débits naturels le long du cours d'eau.

### **2.2.1. Données de précipitation et évapotranspiration**

Les données de précipitation et d'évapotranspiration utilisées dans ce travail sont issues de la base de données SAFRAN, dont l'utilisation nous a été autorisée par Météo France. SAFRAN utilise des observations mesurées au niveau des stations météorologiques de Météo France, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques (notamment la ré-analyse ERA-40 (Uppala et al, 2005) de l'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (<http://www.ecmwf.int>)) pour produire des chroniques de paramètres météorologiques au pas de temps horaire à partir de 1958 (Vidal et al, 2010).

Ces paramètres (température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident et évapotranspiration), sont interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km – Figure 2) qui couvre tout le territoire national. Ainsi, sur le bassin versant de l'Orb, des chroniques journalières de précipitation et d'évapotranspiration ont pu être obtenues sur la période 1970-2000.

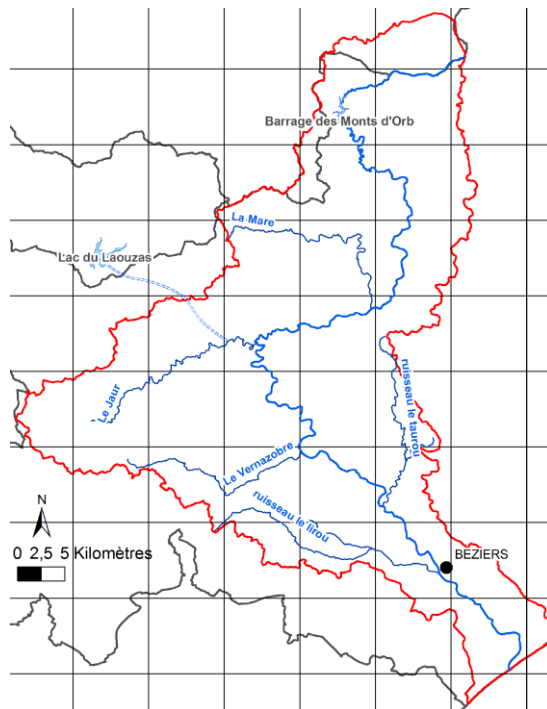


Figure 2 : Visualisation de l'emprise de la grille SAFRAN.

## 2.2.2. Données sur les débits naturels reconstitués

Pour caractériser le comportement hydrologique naturel de l'Orb, il est nécessaire de corriger les débits observés au niveau des stations hydrométriques disponibles le long du cours d'eau :

- des effets de l'opération des barrages des Mont d'Orb (volumes soustraits/apportés au cours d'eau en période de remplissage/vidange) et du turbinage de l'usine de Montahut (volumes apportés au cours d'eau en période de turbinage),
- de l'influence des prélèvements sur le cours d'eau ou sur les nappes qui lui sont associées, pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation.

Cette correction permet d'obtenir en différents points du bassin versant des chroniques de débits dits « naturels », que l'on peut ensuite utiliser comme information de référence pour discuter du fonctionnement du bassin versant.

L'étude menée par Ginger (2010) dans le cadre du second Contrat de rivière Orb et visant à définir des débits d'étiage de référence, pour la mise en œuvre d'une gestion de la ressource à l'échelle du bassin de l'Orb, a proposé un découpage du bassin versant en sous-bassins (Figure 3), contrôlés par des points nodaux (Figure 4) qui font aujourd'hui référence. Dans le cadre de ce rapport, le terme « sous-bassin » correspond à la superficie du bassin comprise entre deux points nodaux (Figure 3).

Pour mener à bien son travail, Ginger a réalisé une caractérisation des débits par une approche statistique (calcul de débits caractéristiques par ajustement d'une loi log-normale), centrée sur les mois de juillet et août. De ce fait, il n'a pas été possible de réutiliser les résultats de Ginger en termes de débits naturels, dans la mesure où l'on cherche à caractériser le comportement naturel du cours d'eau sur l'ensemble de l'année.

L'étude menée par BRLi (2011) et visant à caractériser le potentiel représenté par les Barrages du Mont d'Orb contient un travail de caractérisation des écoulements naturels au niveau d'une partie des points nodaux définis par Ginger (2010) sur le bassin versant. Le détail de la méthode de reconstitution des chroniques de débits naturels est présenté dans l'Annexe 1 du rapport de BRLi (2011). Ce travail ayant permis une reconstitution des débits naturels sur l'ensemble de l'année, nous avons sollicité BRLi (Sébastien Chazot), qui a accepté de nous communiquer gracieusement ses résultats pour les besoins de la présente étude.

Sur la base des chroniques de débits naturels obtenus, les sous-bassins contrôlés par les points nodaux, situés en amont de la prise d'eau de Réals et retenus dans l'étude de BRLi ont été identifiés. Par ailleurs, et de manière à séparer les apports des ruisseaux Taurou, Lirou et à prendre en compte la présence des nappes alluviales en aval de Réals, les sous-bassins contrôlés par les points nodaux de Ginger O8 et O10 ont été définis et un nouveau point O12 situé à l'exutoire a été positionné (Figure 3). La méthode de reconstitution des débits naturels au niveau de ces derniers est présentée plus loin.

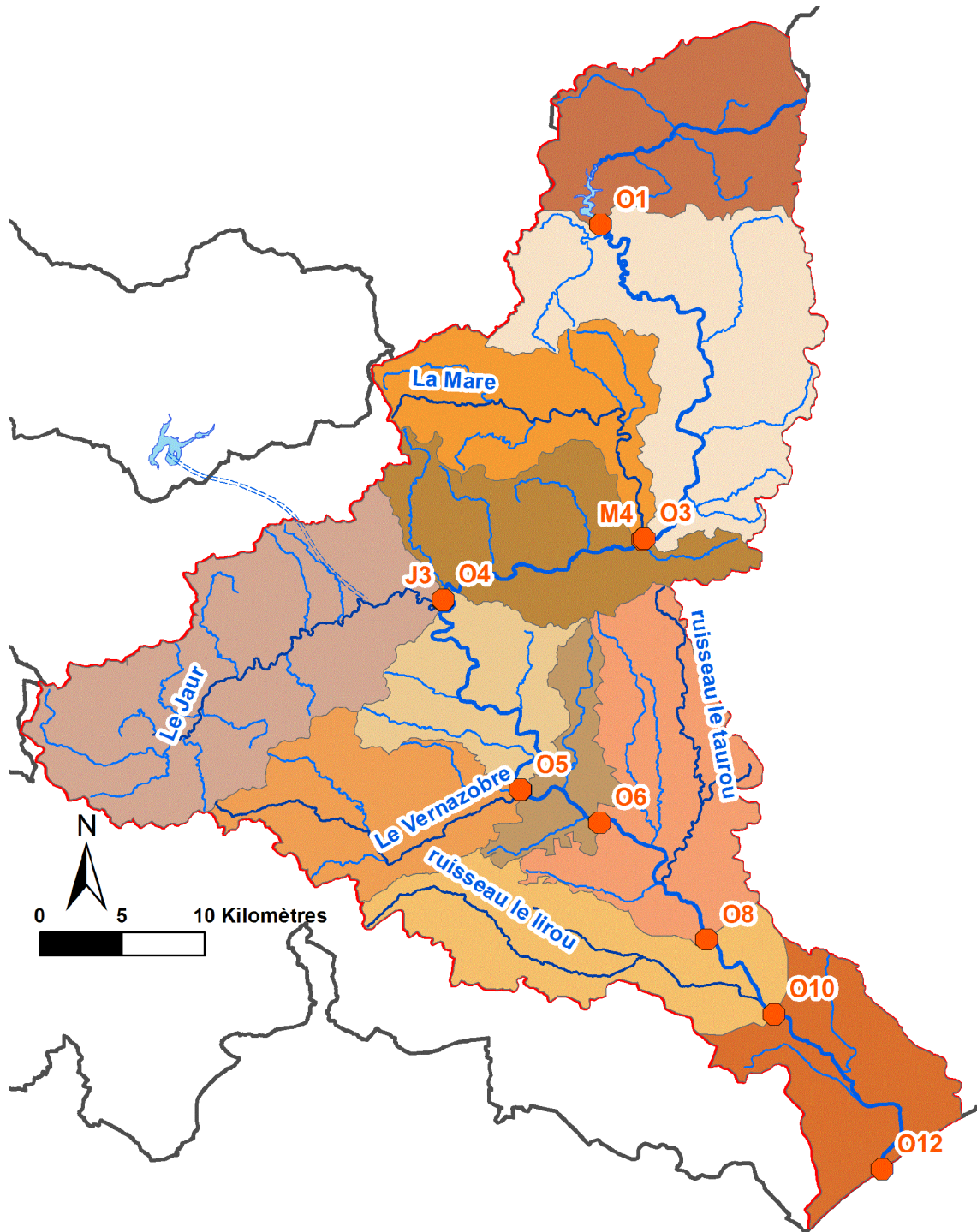


Figure 3 : Points nodaux Ginger (2010) et sous-bassins retenus dans le cadre de l'étude.

<b>Code sous-bassin</b>	<b>Points nodaux délimitant le sous-bassin</b>	<b>Nom sous-bassin</b>
O1	O1	L'Orb à l'amont du barrage des Monts d'Orb
O2	O2	L'Orb du barrage des Monts d'Orb à la confluence avec le Gravezon
M1	M1	La Mare à l'amont de la confluence avec le Bouissou
M2	M2	La Mare de la confluence avec le Bouissou au Pont des trois dents
M3	M3	La Mare du Pont des trois dents au Pradal
M4	M4	La Mare du Pradal à la confluence avec l'Orb
O3	O3	L'Orb de la confluence avec le Gravezon à la confluence avec la Mare
J1	J1	Le Jaur à l'amont de St-Pons
J2	J2	Le Jaur de St-Pons à Montahut
J3	J3	Le Jaur de Montahut à la confluence avec l'Orb
O4	O4	L'Orb de la confluence avec la Mare à la confluence avec le Jaur
V1	V1	Le Vernazobre à l'amont de la confluence avec l'Illoivre
V2	V2	Le Vernazobre de la confluence avec l'Illoivre au Pont de Pierrerue
V3	V3	Le Vernazobre du Pont de Pierrerue à la confluence avec l'Orb
O5	O5	L'Orb de la confluence avec le Jaur à la confluence avec le Vernazobre
O6	O6	L'Orb de confluence avec le Vernazobre à l'amont de la prise d'eau de Réals
O7	O7	L'Orb de la prise d'eau de Réals au Pont Gaston Doumergue
O8	O8	L'Orb du Pont Gaston Doumergue au Pont de Tabarka
L1	L1	Le Lirou à l'amont de Cébazan
L2	L2	Le Lirou de Cébazan à Puisserguier
L3	L3	Le Lirou de Puisserguier à l'amont de la confluence avec l'Orb
O9	O9	L'Orb du Pont de Tabarka au seuil Bagnols
O10	O10	L'Orb du seuil Bagnols au Pont Rouge
O11	O11	L'Orb du Pont Rouge au Moulin Saint-Pierre

Figure 4 : Liste des points nodaux retenus dans l'étude Ginger (2010).



### 2.2.3. Synthèse sur le bilan hydrique

Les chroniques de précipitation, évapotranspiration et de débit naturel reconstitué aux échelles annuelles et saisonnières sont présentées sur les Figure 5 et Figure 6.

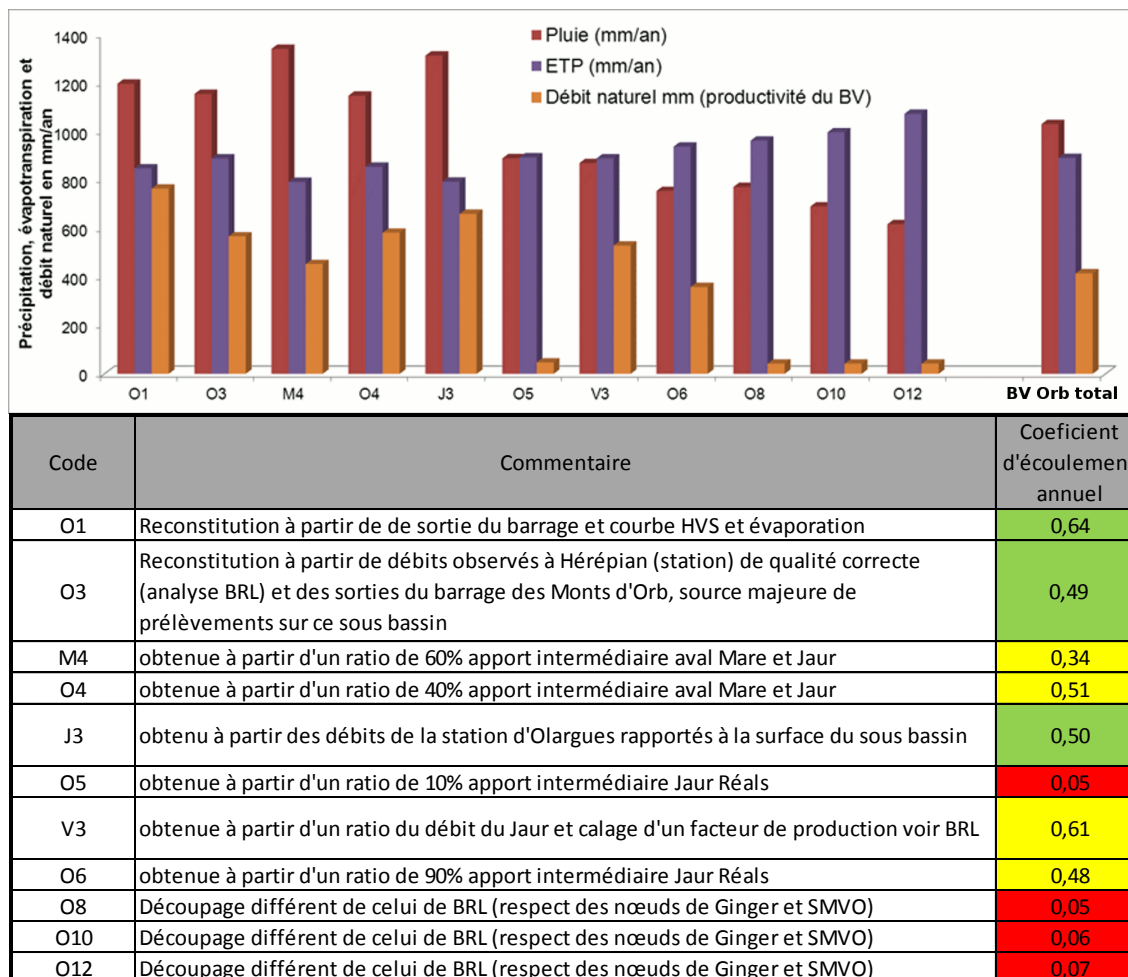
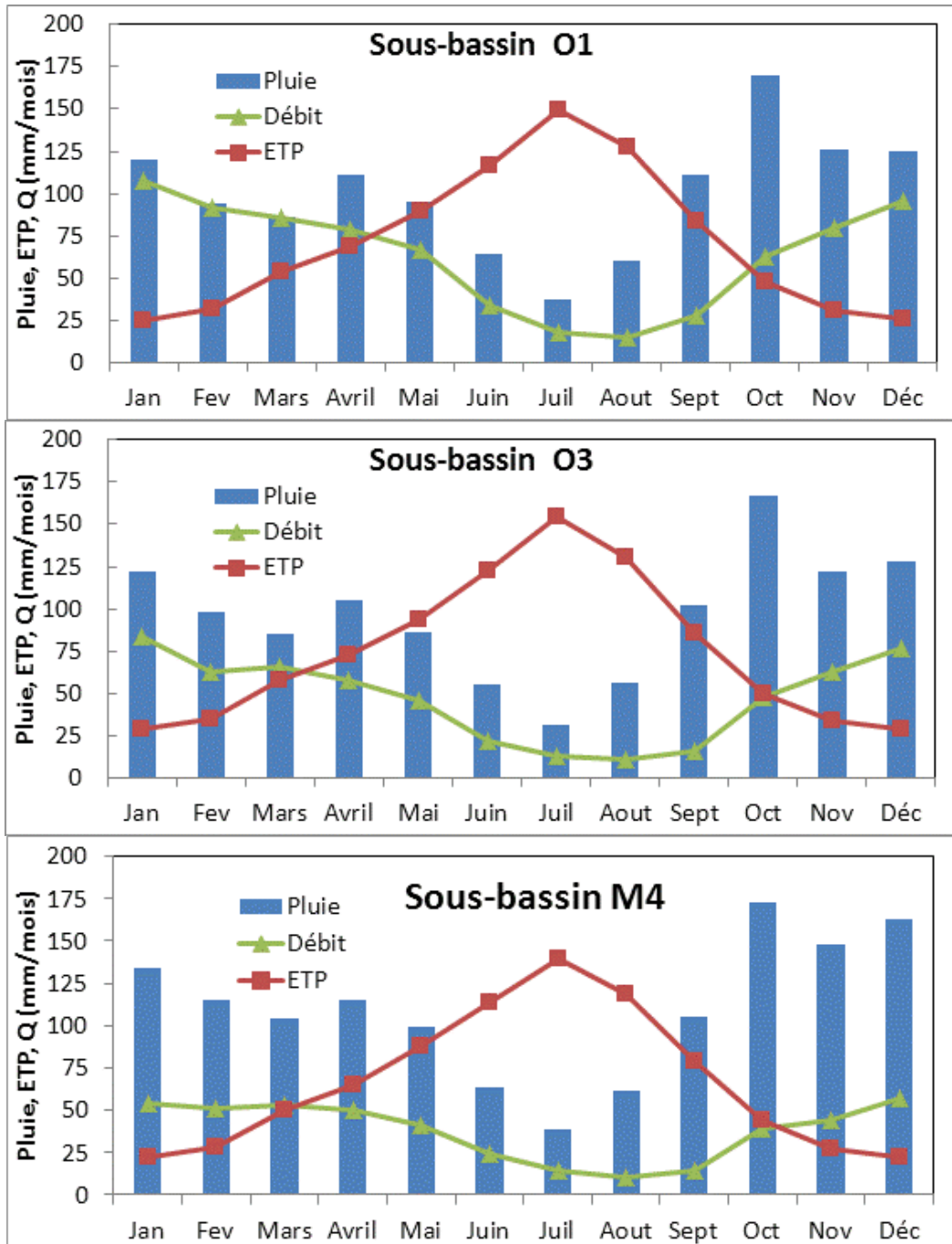
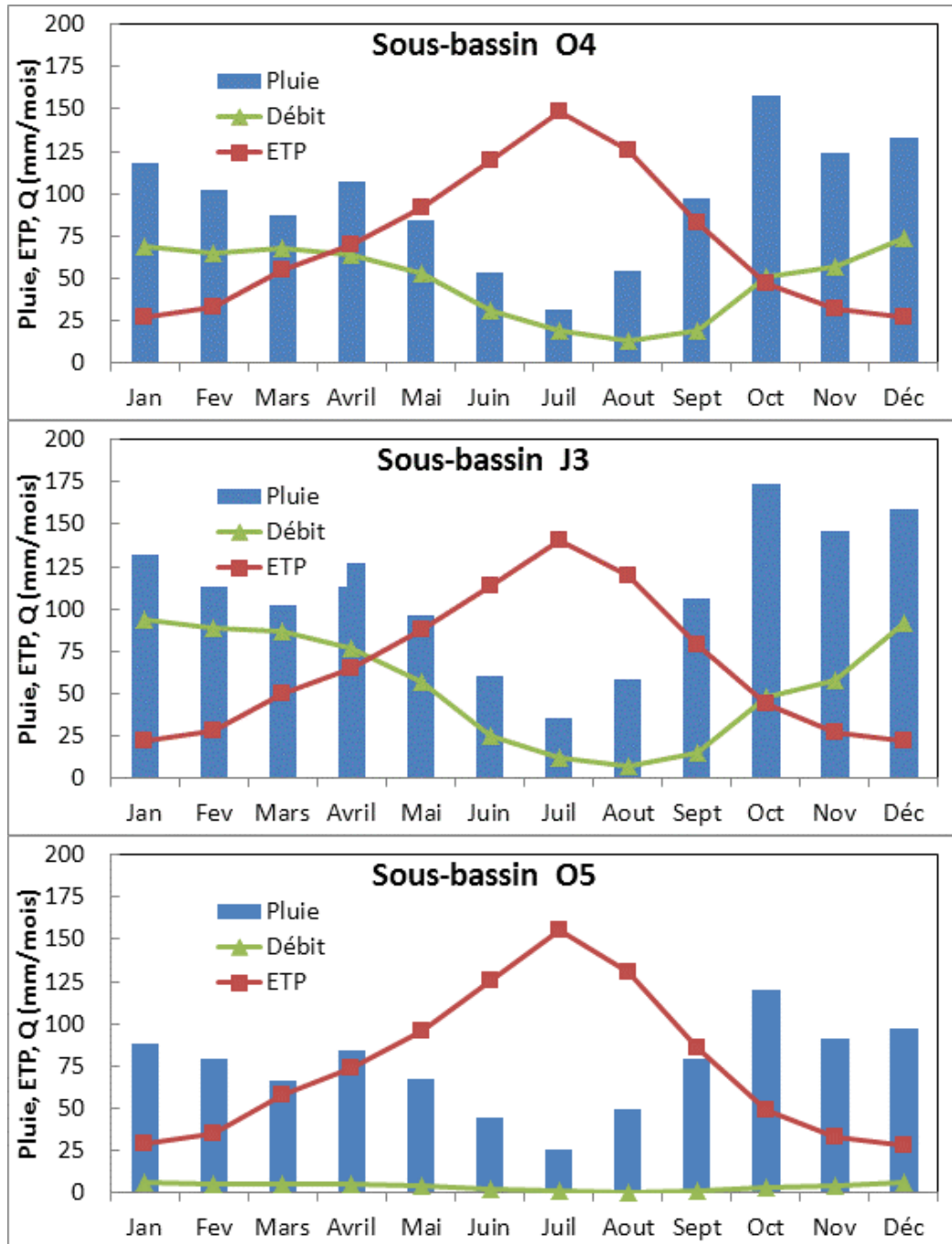
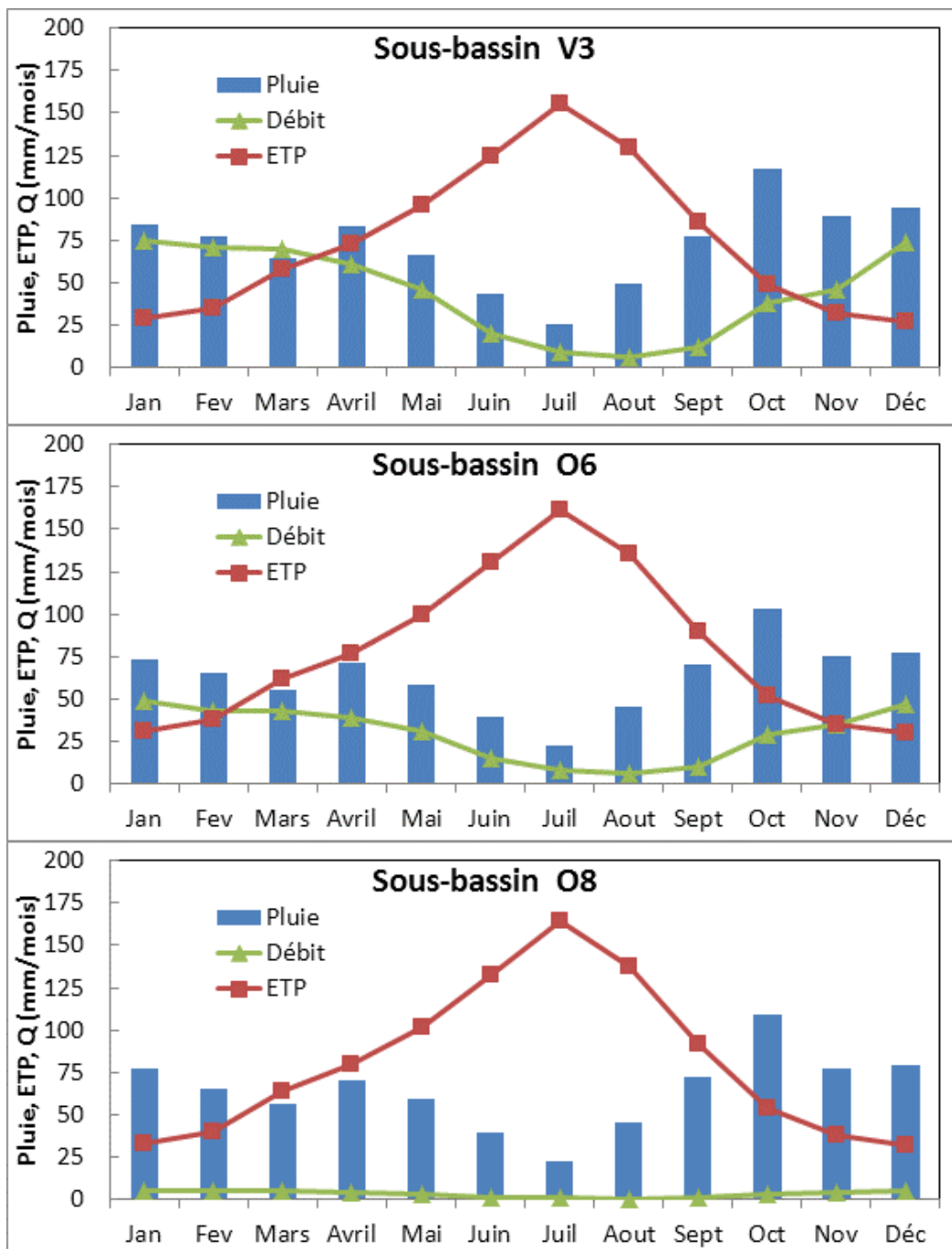


Figure 5 : Bilan hydrique annuel simplifié sur le bassin versant de l'Orb et par sous-bassins. Haut – Cumuls annuels de pluie, d'ETP et des débits naturels par sous-bassin (sur la superficie du sous-bassin uniquement), puis pour la totalité du bassin versant de l'Orb. Bas – Résumé et qualification de la méthode de reconstitution des débits (vert : fiable ; jaune : à considérer avec prudence car les ordres de grandeur sont plausibles mais le calcul intègre de l'expertise ; rouge : douteux car les ordres de grandeur sont surprenants et le calcul intègre de l'expertise basée sur des données limitées) et coefficient d'écoulement annuel par sous-bassin (rapport entre la pluie tombée sur la superficie du sous-bassin et le débit qu'il produit) .







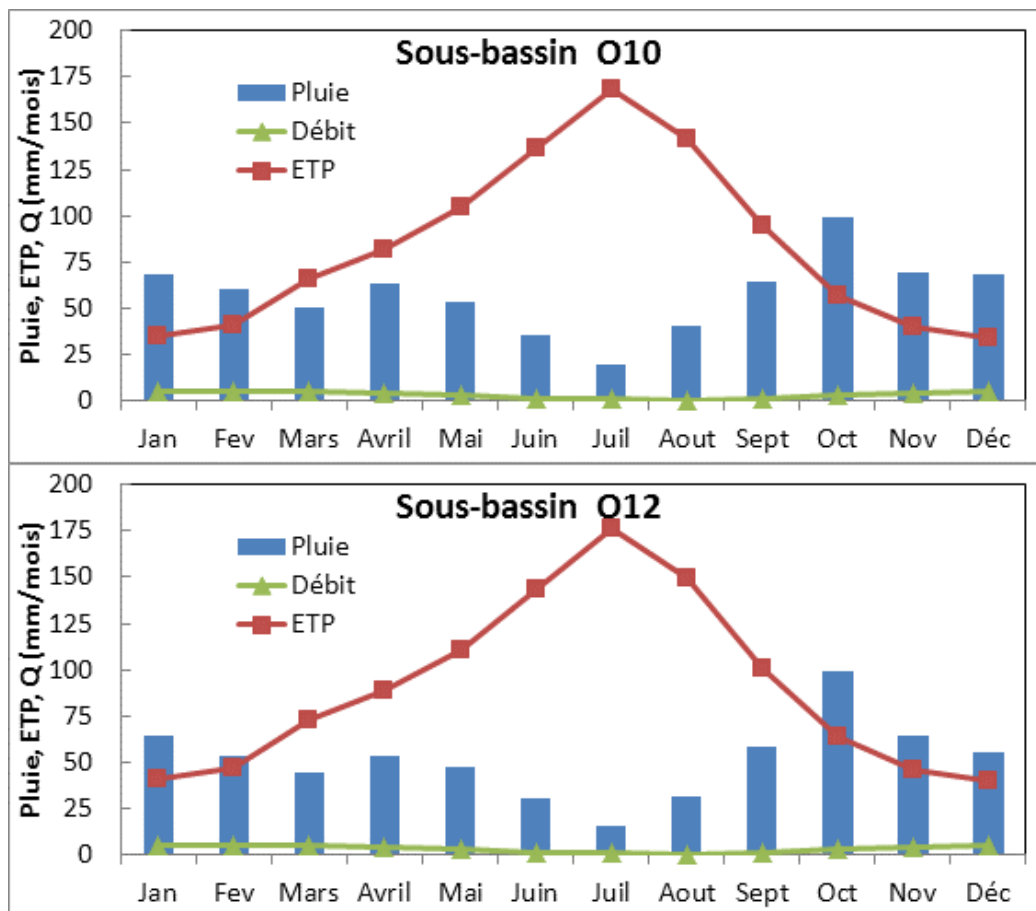


Figure 6 : Bilan hydrique simplifié pour les 11 sous-bassins retenus d'amont en aval du bassin versant de l'Orb (les noms reprennent la codification du tableau présenté sur la Figure 4).

L'analyse du bilan hydrique simplifié sur la totalité du bassin versant de l'Orb montre que les écoulements annuels représentent de l'ordre de 40% de la lame d'eau annuelle précipitée sur le bassin (cette valeur correspond au rapport entre le débit total à l'exutoire de O12 et la pluie moyenne annuelle sur le bassin, à ne pas confondre avec le coefficient d'écoulement calculé pour le sous-bassin O12 uniquement sur la base des débits produits au sein du sous-bassin, qui est de 7%). Une disparité importante entre la partie amont et la partie aval du bassin versant est cependant visible, à la fois en termes de précipitations (différence de l'ordre de 400 mm entre les précipitations annuelles dans la partie amont et celles dans la partie aval), mais aussi en termes de productivité (lame d'eau annuelle ruisselée) des sous-bassins versants. Le sous-bassin contenant le barrage des Monts d'Orb (O1) et celui du Vernazobre (V3) présentent les coefficients d'écoulement les plus importants.

Globalement, les sous-bassins situés en aval de Réals (O8, O10 et O12) paraissent avoir une productivité très faible en comparaison des sous-bassins situés en amont. C'est aussi le cas du bassin situé entre les confluences du Jaur et du Vernazobre (O5). Les reconstitutions utilisées présentent beaucoup d'incertitudes étant données les méthodes employées du fait du manque d'observations. La majeure partie des reconstitutions sont basées sur de l'expertise pour la répartition des écoulements entre un sous-bassin et un autre. Les interprétations qui peuvent en être déduites doivent être considérées avec prudence.

Une analyse sommaire du comportement des débits naturels à l'échelle saisonnière montre que le bassin versant de l'Orb est globalement productif en période d'étiage, surtout sur la partie amont (Figure 6). Cette productivité est liée en grande partie à une pluviométrie importante sur la partie montagneuse (de l'ordre de 1 000 mm sur presque 2/3 du bassin - Figure 5). Celle-ci fournit ainsi une ressource que la présence des formations karstiques (couvrant 30% du bassin versant) et, dans une moindre mesure, des formations alluviales sur lesquelles coule l'Orb dans la basse-vallée (Figure 7), permettent de restituer aux cours d'eau en période d'étiage.

Sur certains sous-bassins, des interrogations apparaissent concernant la validité de la reconstitution des débits naturels récupérés auprès de BRLi. Pour le sous-bassin O5 (de la confluence de l'Orb avec le Jaur à la confluence avec le Vernazobre), les débits naturels obtenus semblent très sous-évalués au regard de la pluviométrie observée. Ceci peut être dû à la méthode de reconstitution adoptée pour ce sous-bassin (BRLi lui attribue à dire d'expert 10% des débits reconstitués au niveau de Réals, c'est-à-dire juste en aval du point O6). Si l'estimation est exacte, cela impliquerait que les pluies de la base de données SAFRAN sont surestimées, ce qui semble peu probable dans la mesure où les reliefs sont relativement modérés au sein de ce sous-bassin. Il est par contre beaucoup plus probable, qu'au vu de la présence de calcaires sur ce sous-bassin (Figure 7 - calcaires et dolomies du Dévonien et du Cambrien de Faugères, entité hydrogéologique n°558B1B (Lamotte et Marchal (2011)), localement fortement karstifiés), une partie de l'eau précipitée s'infiltre et circule en profondeur, au détriment des cours d'eau. Ceci pourrait être vérifié en faisant des mesures de débit du cours d'eau en divers points le long de son linéaire, pour mettre en évidence d'éventuelles pertes par infiltration.

Pour les sous-bassins O8, O10 et O12, la reconstitution de BRLi a dû être interprétée car elle ne détaille pas ce qui se passe entre Réals et la Mer. BRLi considère que le débit à l'embouchure de l'Orb représente 98% du débit naturel à Réals (équivalent au point O6). La reconstitution réalisée par Ginger sur les mois de juillet et août arrive à un résultat similaire puisque les débits caractéristiques qu'ils proposent aux points O6 à O11 sont pratiquement égaux. Ce postulat implique que la production de ces sous-bassins en termes de débits naturels est forcément très faible, ce que l'on retrouve sur les bilans hydriques simplifiés de la Figure 6.

Les sous-bassins O8 à O12 contiennent la nappe alluviale d'accompagnement de l'Orb (Figure 7). Une hypothèse pour expliquer la faiblesse des débits qu'ils produisent pourrait donc être qu'une partie des écoulements transitent dans cette nappe en inféreflux et ne soient donc pas observés dans le cours d'eau. Cependant, la taille relativement réduite de cette nappe alluviale surtout dans sa partie amont (moins de 1 km de large entre O8 et O10), ainsi que ses caractéristiques hydrauliques connues (Joseph (1965), CALIGEE (2007)) ne permet pas d'imaginer qu'elle puisse être le siège d'écoulements souterrains suffisamment importants pour expliquer les faibles écoulements observés dans le fleuve.

La complexité des interactions entre cours d'eau, aménagements hydrauliques et nappes alluviale et profonde (Astien) dans ces secteurs nous empêchent d'aller plus loin dans la compréhension des phénomènes avec les données disponibles.

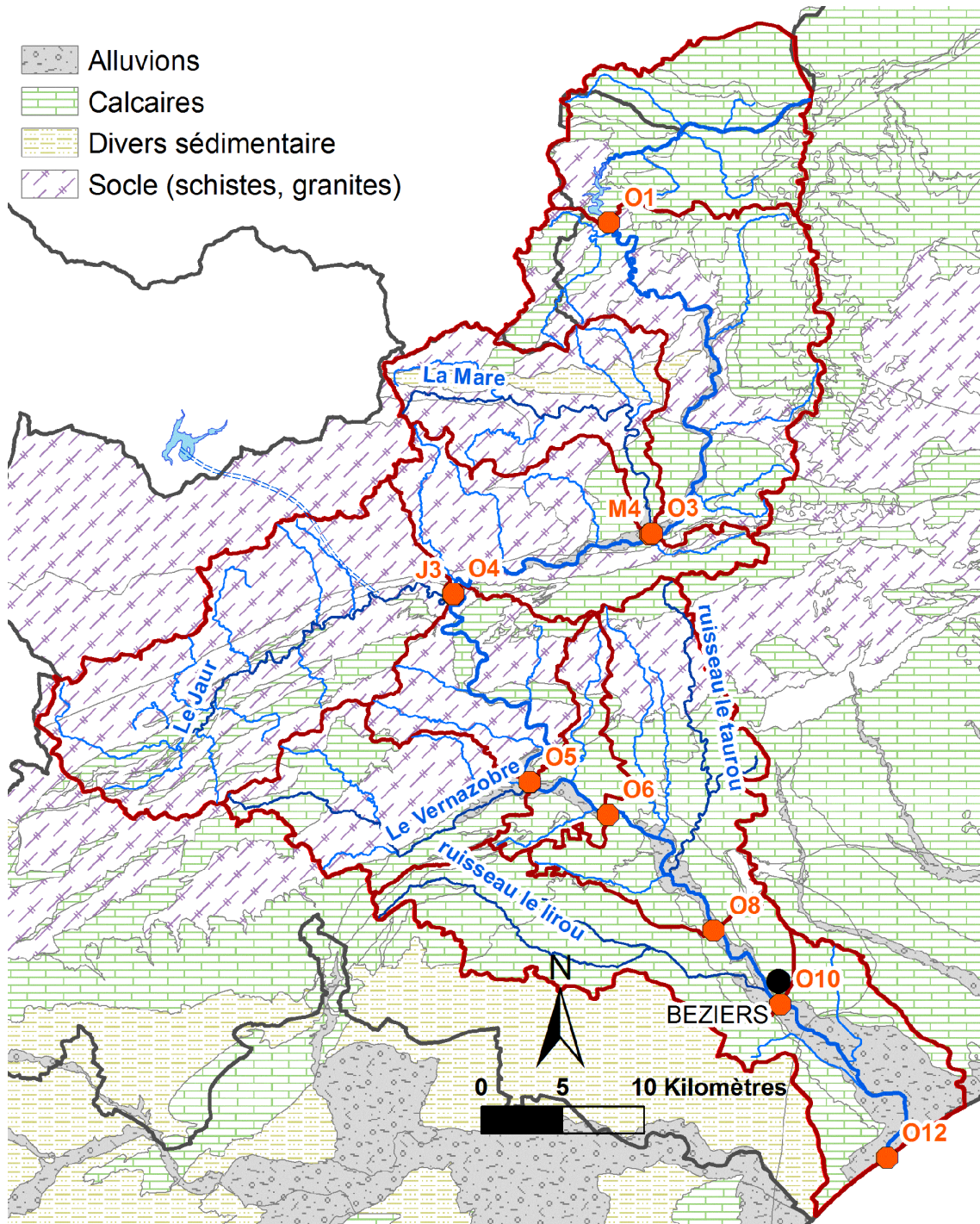


Figure 7 : Principales formations géologiques présentes sur le bassin versant de l'Orb.





### 3. Simulation des débits naturels

#### 3.1. LE MODELE HYDROLOGIQUE GR2M

De manière à pouvoir reproduire les débits naturels en conditions de climat présent et se projeter dans des conditions de climat futur, un outil de modélisation pluie-débit simple a été recherché. Le modèle GR2M (Mouelhi et al, 2006) développé à l'IRSTEA est un modèle conceptuel de type « réservoir » qui fonctionne au pas de temps mensuel, ce qui est adapté à notre cas d'étude.

Ce modèle, très simple d'utilisation, utilise un premier réservoir (dont le comportement est contrôlé par le paramètre  $X_1$ ) pour simuler la fonction de production d'écoulements sur le bassin versant modélisé, à partir de la pluie et de l'évapotranspiration et un deuxième réservoir (alimenté par le premier et par une partie de la pluie et dont le comportement est contrôlé par le paramètre  $X_2$ ) pour simuler le transfert des écoulements jusqu'à l'exutoire du bassin versant (en considérant la possibilité d'interagir avec l'extérieur du bassin versant ou avec les eaux souterraines).

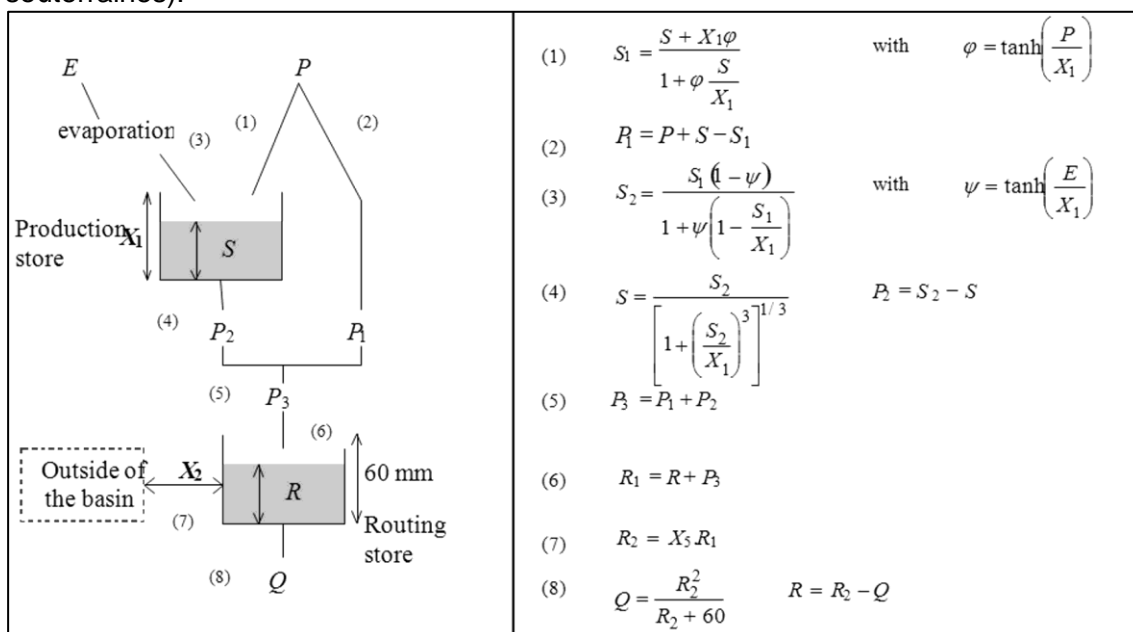


Figure 8 : Schéma conceptuel de fonctionnement du modèle GR2M (Mouelhi et al, 2006) .

Ce modèle présente l'avantage d'être rapidement applicable car peu exigeant en données d'entrée. En contrepartie, il ne décrit pas les processus physiques et peut ne pas être très représentatif du fonctionnement réel du bassin versant étudié (en particulier, la valeur attribuée au paramètre d'interaction  $X_2$  n'est pas facilement interprétable). Cependant, il permet une première approche de simulation du comportement d'un bassin versant qui est très intéressante, lorsque les connaissances du modélisateur sur les processus en jeu dans son bassin versant sont imparfaites.

### 3.2. APPLICATION DU MODELE AU BASSIN VERSANT DE L'ORB

Le modèle GR2M a ainsi été appliqué sur les différents sous-bassins retenus dans le cadre de cette étude. Ce travail n'a pas fait l'objet d'une investigation détaillée sur chaque sous-bassin du fait de la simplicité du modèle utilisé et des incertitudes manipulées en termes de compréhension des processus au sein des bassins. La réflexion menée ici doit être interprétée comme une analyse 1) de la qualité des données observées en termes de météorologie et de débits et 2) de la complexité des processus hydrologiques en jeu.

Pour chacun des sous-bassins, les modèles ont été calibrés sur une période puis validés sur une période différente (Figure 9). La qualité de la simulation est caractérisée à l'aide :

- du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe ( $Nash(Q)$  - (Nash and Sutcliffe, 1970)) qui permet de qualifier la manière dont les débits simulés suivent les débits observés. Une efficacité égale à 1 correspond à une simulation qui reproduit exactement les fluctuations saisonnières observées ;
- le coefficient  $RMSE$  correspond à la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne, qui est la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre les simulations et les observations. Ce coefficient permet de visualiser l'écart moyen entre les débits simulés et observés, exprimé en  $m^3/s$ .

Sous-bassin	O1	O3	M4	O4	J3	O5	V3	O6	O8	O10	O12
Période d'initialisation	1968-1969										
Calibration	1970-2001		1969-1987			1970-2001					
Nash(Q)	0,9	0,9	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
RMSE	23,8	19,8	20,2	24,0	28,2	28,2	26,1	19,4	2,8	3,1	3,4
Validation	2002-2007		1987-1994			2002-2007					
Nash(Q)	0,9	0,8	0,5	0,5	0,8	0,7	0,8	0,4	0,7	0,6	0,4
RMSE	16,5	29,3	42,1	50,5	29,8	1,8	25,5	20,8	1,7	2,0	2,4

Figure 9 : résultat du calage et de la validation des modèles de simulation du débit journalier à l'exutoire des 11 sous-bassins, qualifiées par les valeurs des coefficients Nash (Q) et RMSE.

Pour les sous-bassins O1, O3, J3, O5, V3 et O6, la qualité des simulations en période de calage et validation peut être considérée comme acceptable au vu de la valeur des coefficients  $Nash(Q)$  et  $RMSE$  obtenus. Elle est par contre dégradée en période de validation pour les sous-bassins M4 et O4 et généralement de moindre qualité pour les sous-bassins aval (O6 à O12) que pour la partie amont.

Sur les sous-bassins O4 et M4, le calage et la validation n'ont pas été menés sur les mêmes périodes que pour les autres sous-bassins car la qualité de leur reconstitution est visiblement différente de celle des autres sous-bassins. En effet, à partir de 1996, le rapport des débits naturels des sous-bassins O4 et M4 à ceux du sous-bassin O1 diminue (pente des débits cumulés plus faible pour O4 et M4 que pour O1) (Figure 10).

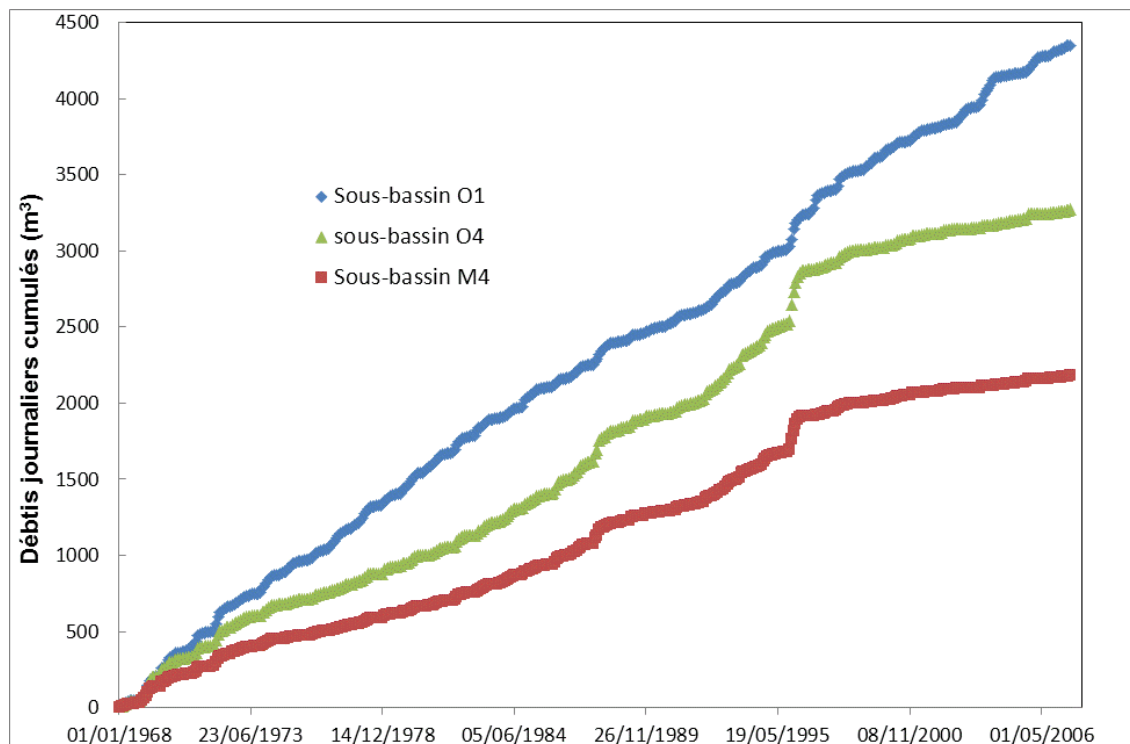
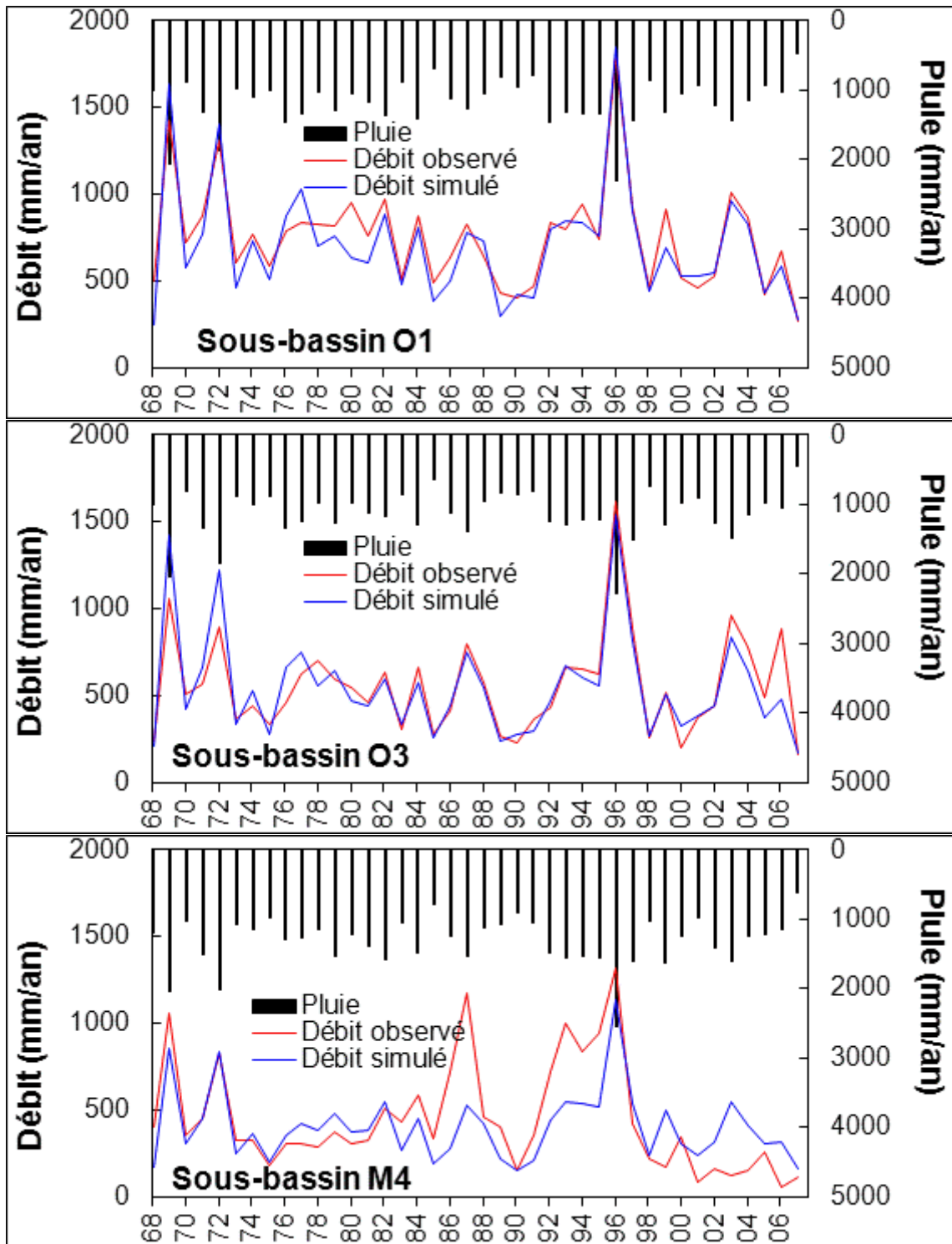
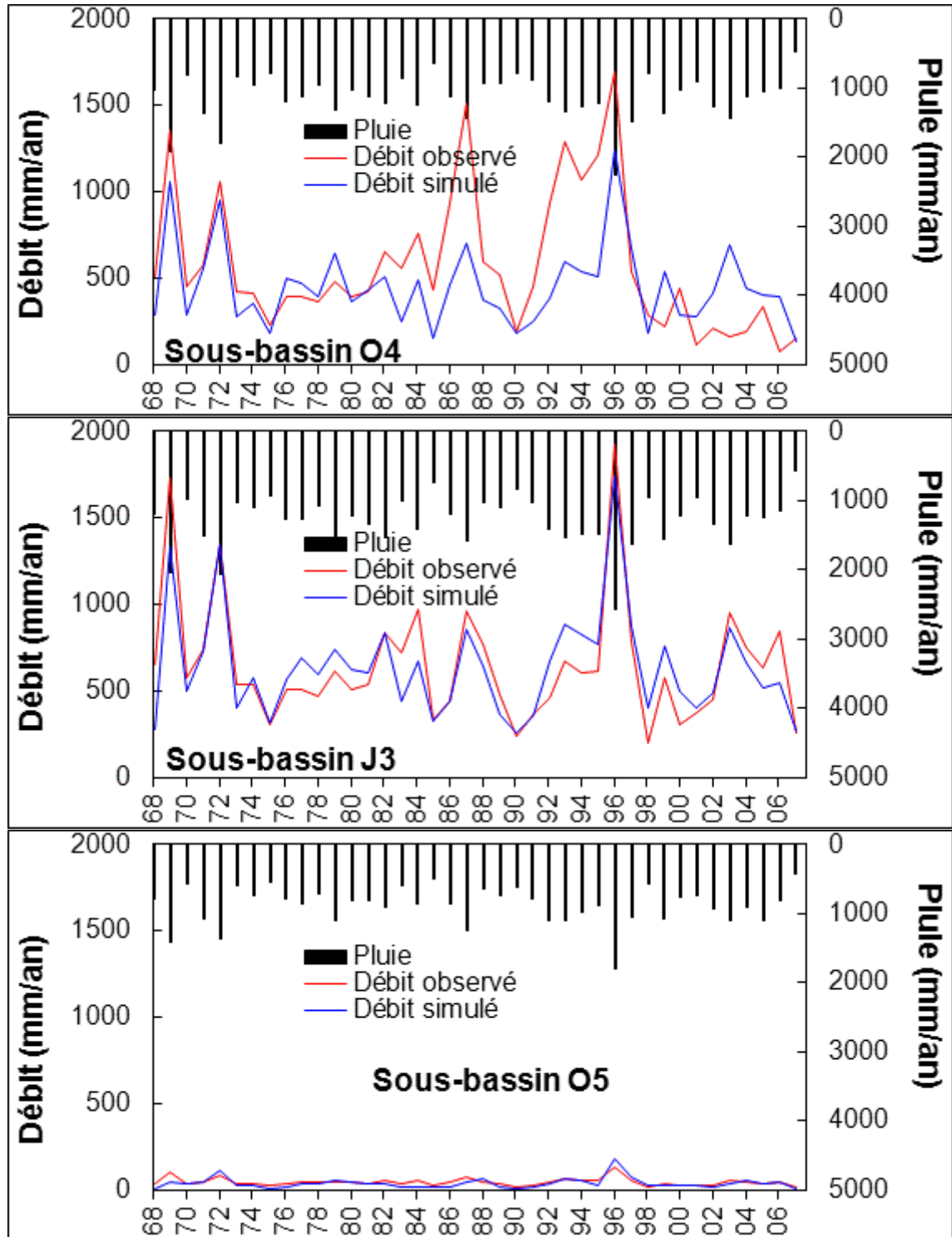


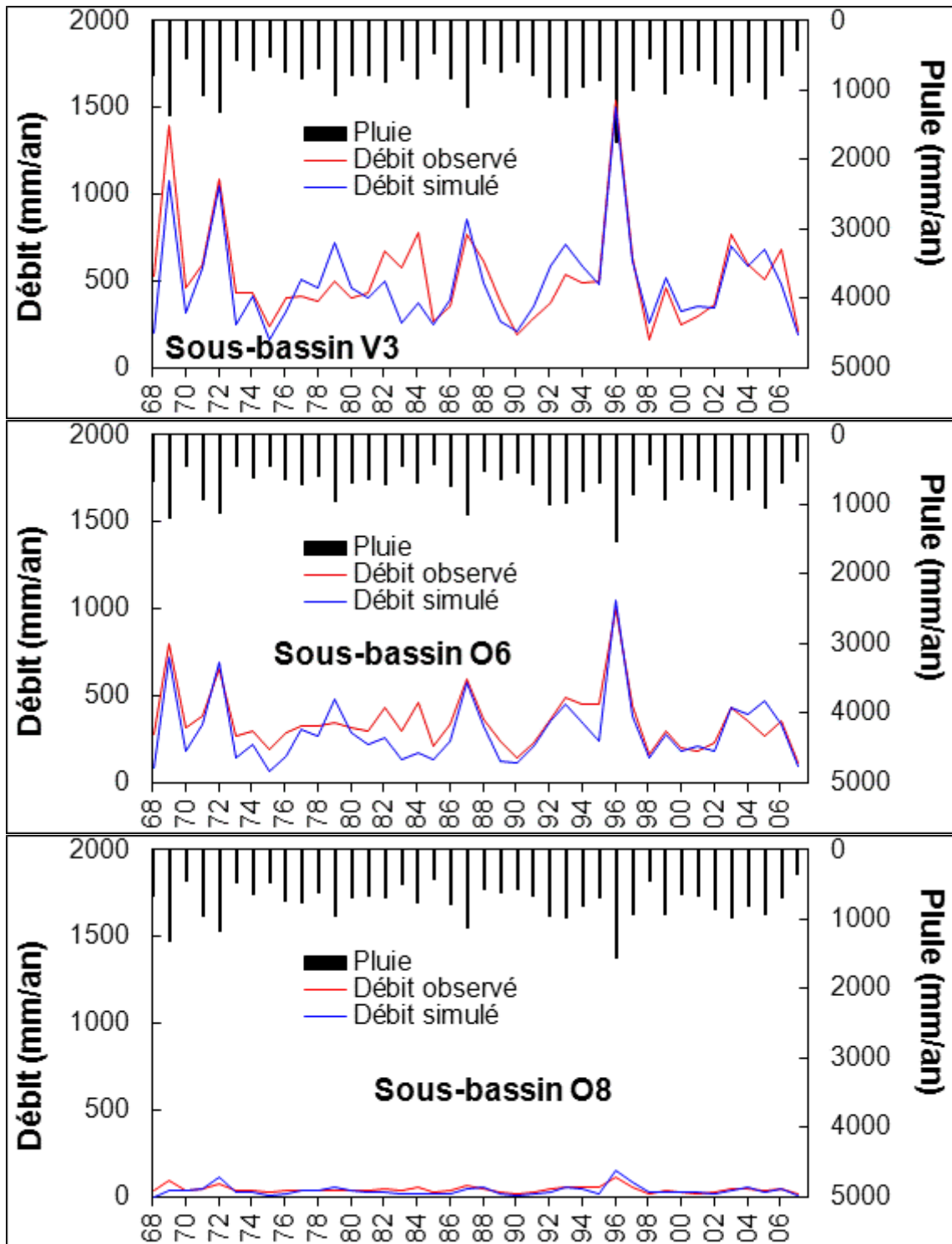
Figure 10 : visualisation de la différence de forme de la courbe des cumuls de débits naturels journaliers reconstitués entre les sous-bassins O4 et M4, par rapport à celle de O1.

Cette différence étant probablement liée à la méthode de reconstitution des débits, la période de calibration-validation a été réduite pour O4 et M4 de manière à ce que la similitude du rapport de leurs débits avec ceux d'O1 (pente des débits cumulés) soit conservée. La calibration pour O4 et M4 a été réalisée entre le début de la chronique et 1987 et la validation sur le restant de la période précédant 1996. Il convient de noter que 1987 correspond à l'année de mise en opération de la centrale de Montahut (Ginger, 2010), ce qui se traduit par une brusque augmentation des débits, sans pour autant modifier la pente de la courbe des débits cumulés de manière trop marquée.

La difficulté du modèle à reproduire les débits naturels reconstitués des sous-bassins aval (O6 à O12) s'explique probablement par la qualité défailante des reconstitutions réalisées sur ces sous-bassins, dont il a été vu que la productivité est probablement sous-estimée à cause de l'infiltration d'eau de surface vers les aquifères (Figure 5). Pour le sous-bassin O5, le modèle arrive à simuler correctement les débits naturels reconstitués tant en calage qu'en validation et ce, malgré la probable existence de circulations souterraines. Si l'adéquation du modèle GR2M à des sous-bassins présentant un relief et un contexte hydrogéologique contrasté (présence de socle cristallin et de formations calcaires ou d'alluvions dans lesquels des circulations souterraines peuvent avoir lieu) peut être discutée, il convient aussi de rester prudent concernant la qualité ou la représentativité (évolution de l'occupation du sol) des observations disponibles sur les débits naturels. Les modélisations réalisées ont tout de même permis de simuler les écoulements sur chacun des 11 sous-bassins considérés (Figure 11).







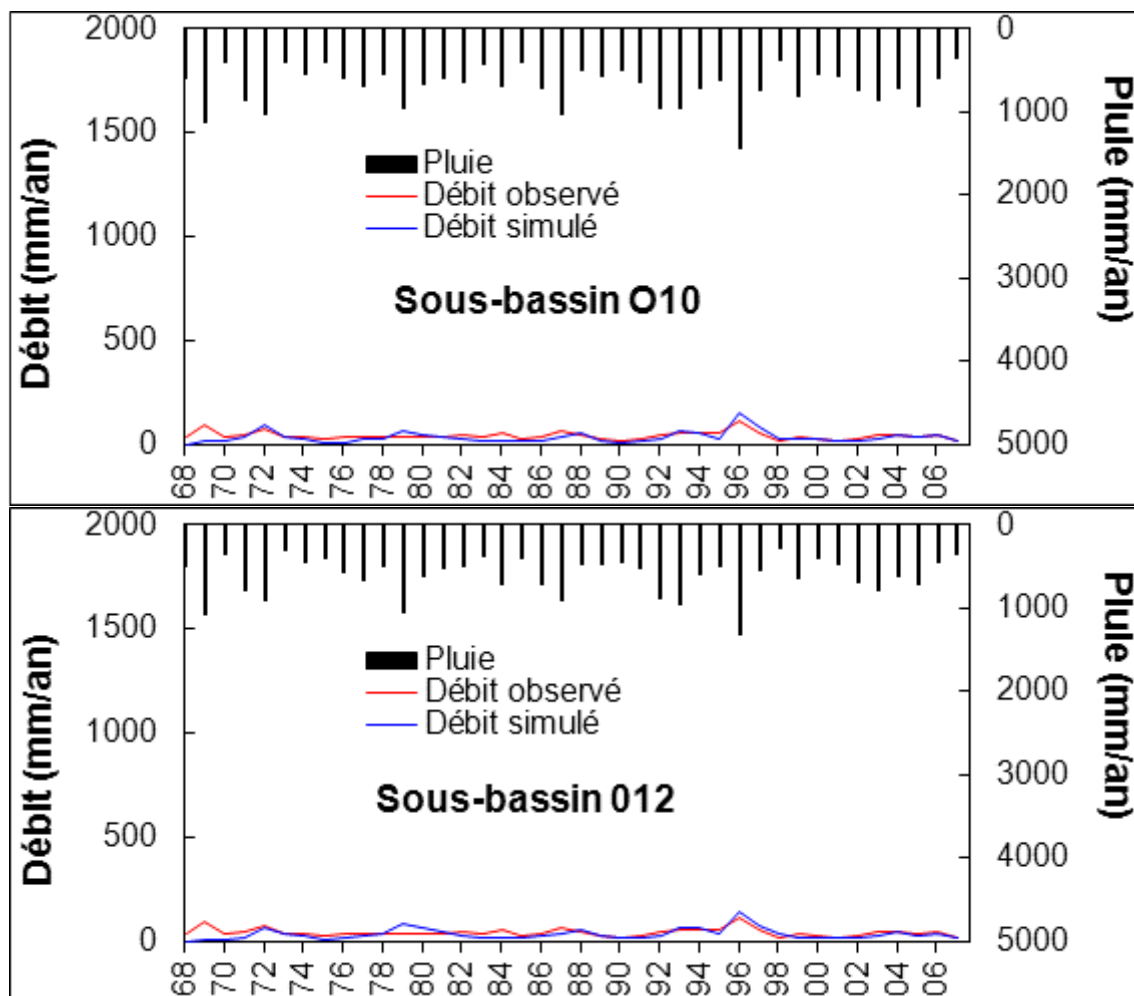


Figure 11 : Simulation de débits moyens mensuels avec GR2M sur les 11 sous-bassins retenus.

Si l'on compare les valeurs obtenues lors de la calibration pour les coefficients X1 et X2 du modèle GR2M pour les 11 sous-bassins, on constate une différence importante entre l'ensemble des sous-bassins aval (O5, O8, O10 et O12) et ceux de l'amont. Les valeurs de X1 pour les sous-bassins aval sont très élevées, seule façon pour le modèle d'absorber les précipitations en produisant un écoulement réduit. A l'inverse, les valeurs de X2 (coefficient d'échange, permettant au modèle de simuler un échange avec les eaux souterraines ou un autre type de ressource en eau située hors du bassin) sont très faibles en comparaison de celles des sous-bassins amont.

Paramètres	O1	O2	M4	O4	J3	O5	V3	O6	O8	O10	O12
x1: capacité du réservoir de production (mm)	536,2	489,9	536,1	462,0	540,5	2514,1	332,3	378,5	2767,7	3381,2	7361,3
x2: coefficient d'échange (mm)	1,10	0,96	0,69	0,96	0,92	0,35	1,23	1,13	0,43	0,51	0,59

Figure 12 : Valeurs attribuées aux paramètres X1 et X2 du modèle GR2M lors de la calibration.

Les faibles valeurs de X2 dans le modèle pour les sous-bassins aval ne traduisent donc pas l'hypothèse que la faible productivité de ces sous-bassins pourrait être liée à des échanges avec l'eau souterraine. De plus, on constate que les paramètres de calage du modèle pour le sous-bassin O6 (censé fonctionner de manière similaire aux autres sous-bassins aval),

présentent des valeurs similaires à celles obtenues pour le sous-bassin V3 et O1. Ces résultats illustrent le caractère conceptuel du modèle GR2M, pour lequel il est difficile de relier les valeurs de ses paramètres à des processus particuliers au sein des sous-bassins.

Même si l'on touche là aux limites de l'utilisation de ce type de modèle, il convient de noter que les problèmes rencontrés ne seraient probablement pas facilement résolus en utilisant d'autres types de modèles. Ainsi, même s'il faut rester prudent quant à la qualité des reconstitutions de débits naturels disponibles, il est probable qu'il soit nécessaire d'acquérir de nouvelles connaissances et données sur le comportement des sous-bassins de l'Orb, notamment en termes de relations entre eaux de surface et eaux souterraines, si l'on veut pouvoir décrire correctement le comportement hydrologique de ces sous-bassins.



## 4. Impact du changement climatique sur la ressource en eau

### 4.1. LES SCENARIOS CLIMATIQUES UTILISES

Les scénarios climatiques utilisés pour étudier l'impact potentiel du climat futur sur la ressource en eau du bassin versant de l'Orb ont été produits par le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique, [www.cerfacs.fr](http://www.cerfacs.fr)), dans le cadre de l'exercice SCRATCH 2010 ([www.cerfacs.fr/~page/work/scratch](http://www.cerfacs.fr/~page/work/scratch)). Cet exercice a consisté à désagréger des sorties de modèle de climat suivant une méthode statistique multi-variée, qui repose sur le concept de « type de temps » (Boé et al, 2006). Le résultat de ce travail permet de disposer sur notre zone d'étude, de simulations de précipitation et d'ETP au pas de temps journalier et à la résolution spatiale de la grille SAFRAN.

Parmi les scénarios issus des modèles de climat de la communauté internationale, nous avons retenu les suivants :

- CCCMA CGCM3 1 t63 (Canada) ;
- CNRM CM3 (Météo-France) ;
- CNRM Arpege V3 (Météo-France) ;
- GFDL CM2 0 (NOAA, USA) ;
- GISS MODELER (NASA, USA);
- IPSL CM4 (IPSL, France) ;
- MPI ECHAM5 (Allemagne) ;
- MRI CGCM2 3 2A (Japon);
- NCAR CCSM3 0 (NCAR, USA).

Ces scénarios correspondent à des simulations des modèles de climat conduites avec le scénario d'émissions de gaz à effet de serre A1B, considéré comme un scénario médian parmi les scénarios futurs possibles. Ils nous permettent donc de forcer le modèle GR2M appliqué aux différents sous-bassins avec des chroniques de précipitation et d'ETP pour les périodes allant du 01/01/1971 au 31/12/2000 pour la période présente et du 01/01/2046 au 31/12/2065 pour la période future. Des éléments de description du climat futur projeté au travers de l'ensemble de ces scénarios sur la zone d'étude peuvent être consultés dans le rapport de Hoang et al. (2012).

### 4.2. RESULTATS

Pour analyser l'impact de scénarios climatiques sur la ressource en eau simulée par un modèle hydrologique, il ne faut en aucun cas comparer les débits simulés avec les scénarios futurs à ceux simulés à partir du climat présent, sous peine d'intégrer à l'analyse des résultats, les erreurs associées aux scénarios. En effet, les incertitudes qui sont associées aux scénarios climatiques (en lien avec le type de scénario d'émission de gaz à effet de serre choisi, la qualité des simulations des modèles de climat utilisés et celle des méthodes de changement d'échelle adoptées, ici celle du CERFACS, pour passer de la résolution spatiale des modèles de climat à celle des modèles d'impact) sont très nombreuses et importantes. L'impact du climat futur sur la

ressource en eau du bassin versant de l'Orb doit donc être étudié en comparant les débits simulés pour un scénario donné à la période présente, à ceux simulés pour ce même scénario à la période future. C'est la raison pour laquelle il est toujours nécessaire de disposer de scénarios climatiques pour une période représentative du climat présent (ici 1971 - 2000) et la période future considérée (ici 2045-2065), de manière à comparer l'impact relatif des scénarios entre le futur et le présent. L'analyse des résultats doit enfin être pondérée par une illustration appropriée des incertitudes associées à l'existence de plusieurs scénarios.

La Figure 13 illustre bien ces notions puisque l'on y compare les débits simulés par le modèle GR2M sur le sous-bassin O1 (choisi pour la qualité de son ajustement) avec le forçage SAFRAN, à ceux simulés avec les scénarios climatiques pour la période présente (c'est à dire correspondant au climat tel que simulé par les modèles de climat utilisés pour la période présente) et que l'on constate que les écarts ne sont pas négligeables. Globalement, on peut constater que les débits simulés avec les scénarios pour la période présente sont inférieurs à ceux simulés avec SAFRAN, sauf pour les mois de novembre et décembre. A l'échelle mensuelle, on constate ainsi que avec les scénarios climatiques introduisent une incertitude relativement importante sur les débits simulés. A titre d'illustration, on peut estimer que la dispersion des débits (calculée avec l'écart-type des débits pour chaque mois) autour de la valeur moyenne de tous les scénarios en moyenne mensuelle est de l'ordre de 10 à 20% suivant la saison (Figure 13 - haut).

Par ailleurs on constate que si l'on choisissait d'utiliser un seul scénario qui représente la moyenne de tous les autres, cela équivaldrait à utiliser un scénario quasiment constant à l'échelle annuelle (Figure 13 - bas). Il est donc bien nécessaire de réaliser deux simulations par scénario climatique disponible, une pour le présent et l'autre pour le futur, quitte à ensuite agréger les résultats pour faciliter leur analyse, ce qui a été fait dans le cadre de ce travail.

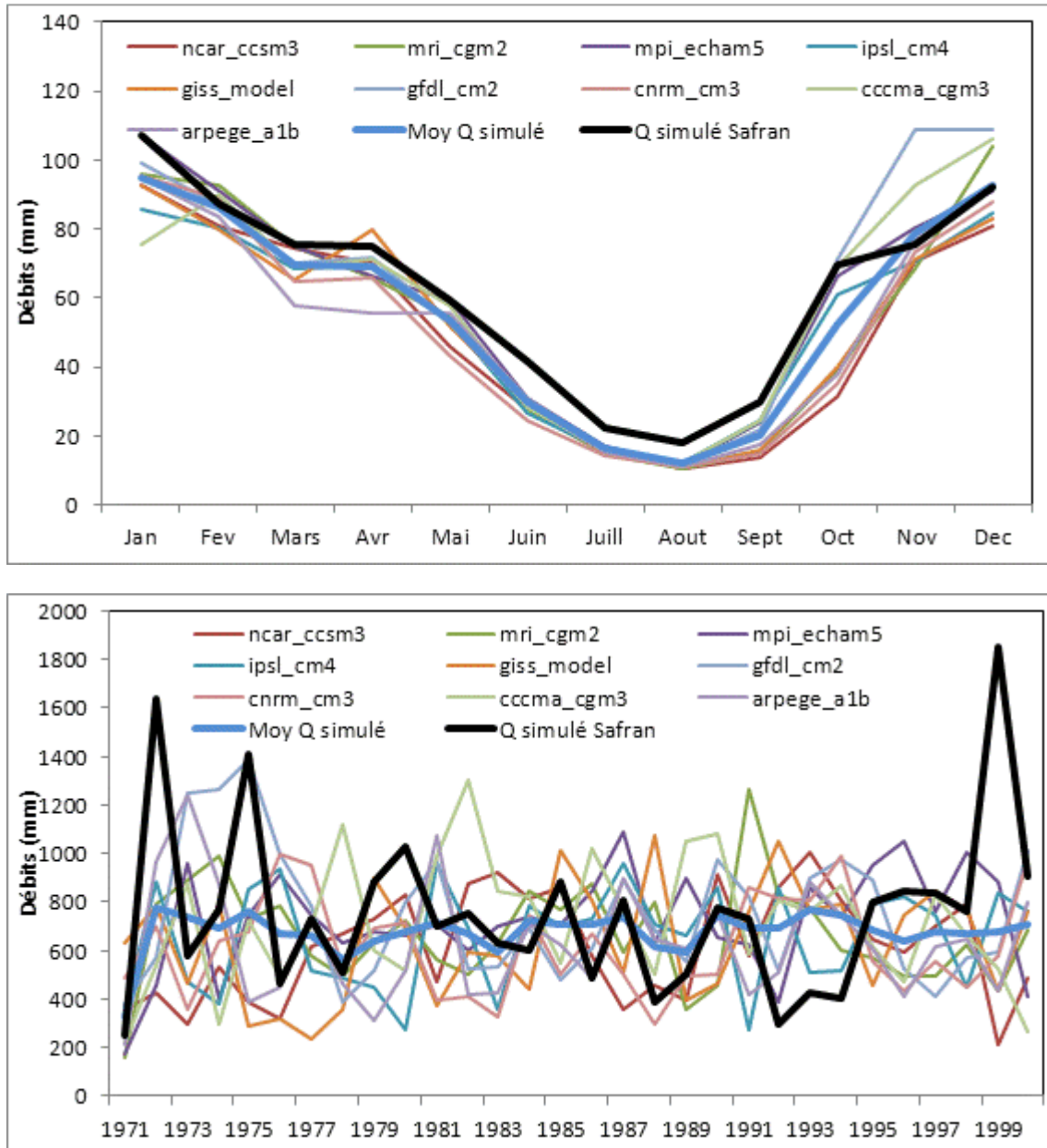


Figure 13 : Haut - débits moyens mensuels calculés sur la période 1971-2000 ; Bas – débits mensuels pour chaque année de la période 1971-2000, simulés sur le sous-bassin O1 avec les observations de SAFRAN et pour chacun des scénarios climatiques retenus.

La Figure 14 présente l'impact relatif des scénarios climatiques sur les débits simulés sur le sous-bassin O1. Les barres (Figure 14 – haut) constituent des courbes enveloppes limitées par les valeurs minimales et maximales obtenues pour chaque mois, quel que soit le scénario. Elles illustrent les fortes incertitudes qui sont associées aux modélisations du climat et montrent qu'elles se renforcent pour la période future (taille des barres qui augmente). Elles illustrent aussi la représentativité de la différence entre les deux courbes moyennes pour chaque mois, qui est plus grande au printemps et en automne qu'en hiver et en été (débits moyens pour la période présente comprise dans la courbe enveloppe du futur).

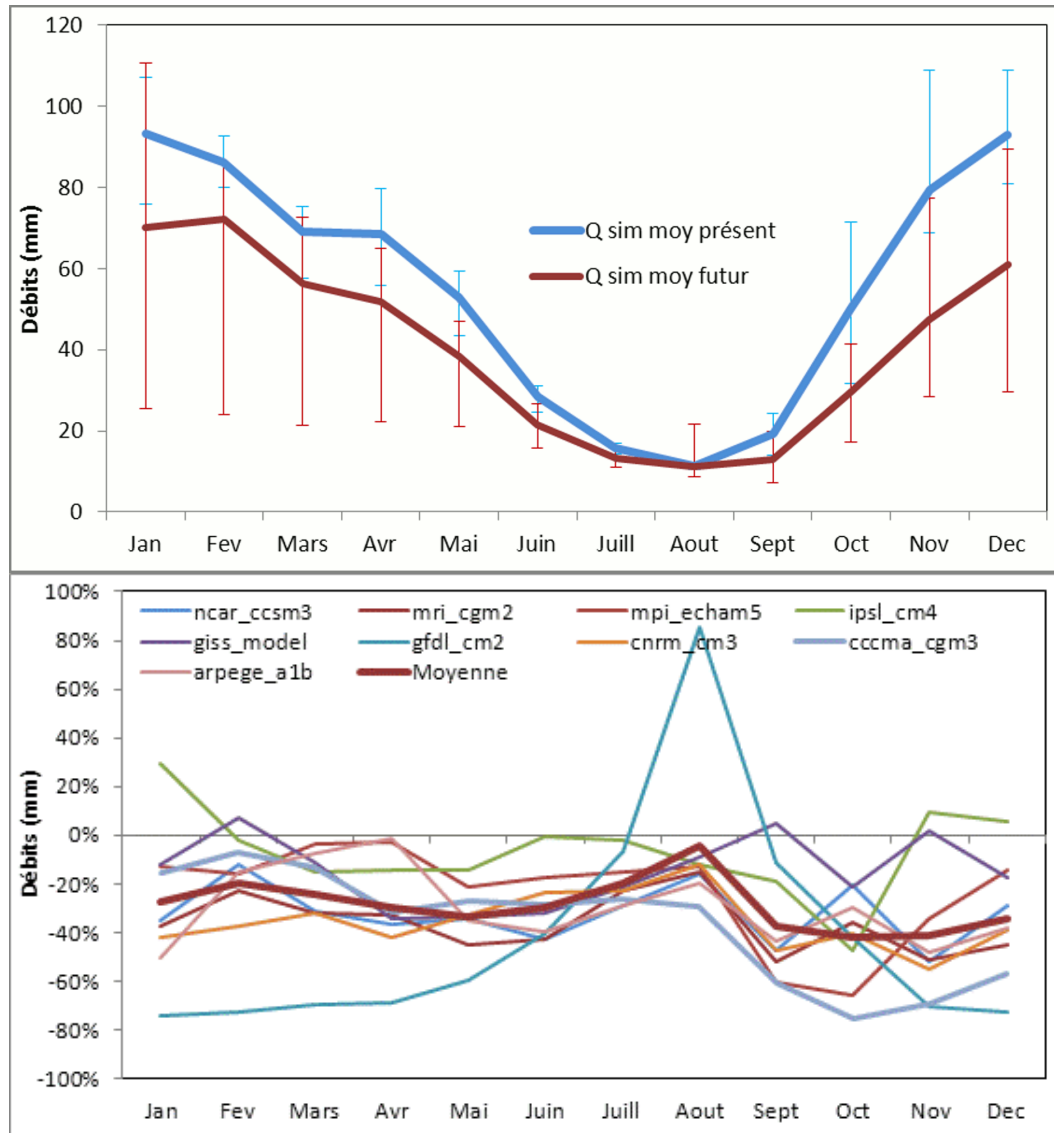


Figure 14 : Impact des scénarios climatiques futurs sur les débits moyens mensuels simulés avec le modèle GR2M sur le sous-bassin O1. Haut – valeur absolue (en mm) des moyennes intermodèles des débits simulés avec les scénarios pour le présent et le futur. Les barres d'erreur représentent les valeurs minimales et maximales. Bas – différence relative entre les débits simulés pour le futur et le présent par modèle et en moyenne intermodèles.

En valeur moyenne inter-modèles, les scénarios considérés provoqueraient une diminution des débits sur toute l'année, globalement de l'ordre de -20% à -40% (Figure 14 – bas). Comme nous l'avons vu précédemment, cette diminution est plus incertaine en hiver et en été (où elle est comprise entre -10% et -20%) qu'au printemps et en automne (où elle est comprise entre -

30% et -40%). On remarque que le scénario CCCMA présente un comportement totalement différent des autres, sans pour autant que cela ne lui confère une importance particulière, tous les scénarios étant équiprobables.

La Figure 15 présente l'impact moyen relatif du changement climatique à l'échelle des 11 sous-bassins définis sur le bassin versant de l'Orb. Une diminution des débits variable suivant les saisons est globalement projetée sur tous les sous-bassins.

Les sous-bassins O5, O8, O10 et O12 semblent subir un impact plus marqué (de l'ordre du double) en valeur relative par rapport aux autres sous-bassins. Ce résultat pouvant être lié au caractère particulier de ces sous-bassins (qualité de la reconstitution des débits naturels, rôle des eaux souterraines ?), nous devons les considérer avec beaucoup de précautions.

En tout état de cause, les résultats présentés nous permettent de conclure que l'impact du changement climatique pourrait se traduire par une diminution des débits moyens mensuels globalement comprise entre -20 et -40%, moins marquée pendant la période estivale (de l'ordre de -10%, ce qui, appliqué à des faibles débits, est relativement peu) et plus marquée sur la période automnale (de l'ordre de -40% en novembre). Ces résultats moyens ne doivent pas masquer les disparités qui peuvent apparaître sur certains bassins, comme O4 ou O6 pour lesquels des augmentations de débits sont projetées en automne (août à octobre). Ces différences pourraient être reliées à la difficulté pour les modèles de climat de simuler la forte variabilité spatiale et temporelle des précipitations au cours de cette saison (épisodes cévenols notamment).

Pour les sous-bassins aval (O5, O8, O10 et O12) en relation avec la nappe alluviale et dont la faible productivité en termes d'écoulements de surface a été relevée plus haut, on constate un impact globalement constant sur toute l'année, moins contrasté sur un plan saisonnier que pour les sous-bassins amont. Les réserves affichées plus haut, à la fois sur la qualité des reconstitutions de débits et des simulations, mais aussi sur les lacunes de connaissance concernant les processus (relations des nappes superficielles et profondes avec la rivière) nous amènent cependant à considérer que les ordres de grandeur des impacts relatifs sur les débits (compris entre -40 et -70%) sont probablement exagérés.

Mois \ Ss-bassin	O1	O3	M4	O4	J3	O5	V3	O6	O8	O10	O12
Jan	-28%	-25%	-20%	-18%	-16%	-33%	-20%	-22%	-51%	-54%	-64%
Fev	-20%	-19%	-18%	-16%	-15%	-35%	-21%	-25%	-53%	-57%	-66%
Mars	-24%	-25%	-23%	-19%	-18%	-38%	-22%	-27%	-54%	-57%	-65%
Avr	-29%	-30%	-28%	-22%	-23%	-39%	-25%	-28%	-54%	-57%	-65%
Mai	-34%	-34%	-35%	-23%	-24%	-45%	-26%	-29%	-58%	-60%	-65%
Juin	-30%	-31%	-35%	-16%	-20%	-45%	-18%	-20%	-58%	-58%	-64%
Juill	-19%	-21%	-25%	-5%	-13%	-43%	-14%	-15%	-53%	-54%	-61%
Aout	-5%	-2%	-3%	15%	-3%	-38%	-2%	0%	-45%	-48%	-58%
Sept	-37%	-32%	-39%	2%	-17%	-37%	-1%	4%	-48%	-48%	-57%
Oct	-42%	-41%	-46%	-21%	-30%	-30%	-10%	7%	-53%	-54%	-62%
Nov	-41%	-42%	-50%	-41%	-45%	-44%	-40%	-35%	-59%	-60%	-66%
Dec	-34%	-31%	-41%	-34%	-39%	-41%	-32%	-31%	-54%	-56%	-64%

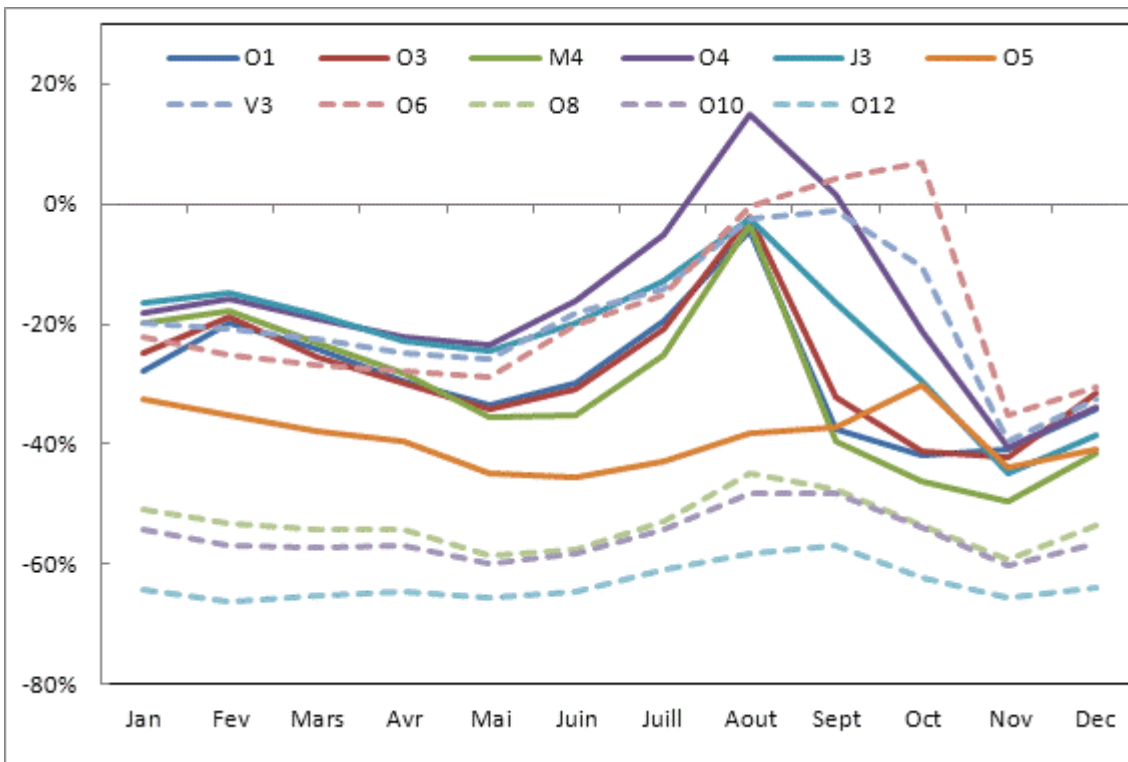


Figure 15 : Impact relatif des scénarios climatiques futurs par rapport au présent en termes de débits moyens mensuels simulés par sous-bassin. Haut – valeurs, Bas – graphique.

## 5. Conclusion

Ce rapport présente une évaluation de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau du bassin versant de l'Orb. Cet impact est évalué à l'aide de scénarios climatiques appliqués sur des modèles hydrologiques mis en œuvre sur 11 sous-bassins versants, délimités au sein du bassin à partir des points nodaux définis dans le cadre d'études antérieures.

Des bilans hydriques simplifiés réalisés à l'aide des observations disponibles (dont la qualité est variable) ont mis en évidence que les écoulements annuels représentent de l'ordre de 40% de la lame d'eau annuelle précipitée sur l'ensemble du bassin. Une disparité importante entre la partie amont et la partie aval du bassin versant semble exister puisque la productivité propre à chaque sous-bassin (écoulements produits sur sa superficie uniquement) apparaît très faible pour les sous-bassins situés en aval de Réals (O8, O10 et O12), en comparaison de celles estimées pour les sous-bassins situés en amont. A l'échelle saisonnière, le bassin versant de l'Orb semble globalement productif en période d'étiage, surtout sur la partie amont, probablement grâce à l'apport des eaux souterraines présentes dans les formations karstiques, qui stockent une bonne partie des 1 000 mm de précipitations annuelles reçues par le bassin.

Le calage et la validation du modèle GR2M a permis de simuler les débits au pas de temps mensuel sur chacun des sous-bassins définis. La qualité variable des simulations obtenues suivant les sous-bassins tient à la fois à la qualité très relative des observations de débits disponibles et au fait que le modèle GR2M est un modèle conceptuel parfois trop simple pour capturer des processus hydrologiques complexes, par ailleurs très mal connus à ce jour (relations entre les nappes superficielles, profondes et les rivières notamment).

L'impact du changement climatique tel que simulé par ces modèles soumis à des scénarios climatiques pourrait se traduire par une diminution des débits moyens mensuels globalement comprise entre -20 et -40% suivant les sous-bassins, moins marquée pendant la période estivale (de l'ordre de -10%) et plus marquée sur la période automnale. Ces résultats en valeur moyenne ne doivent pas masquer le fait que l'incertitude associée aux modèles de climat s'accroît pour les simulations de la période future par rapport à celles de la période présente et que, par ailleurs, elle est plus importante en hiver et en été qu'au printemps et en automne. Enfin, de fortes disparités peuvent apparaître sur certains sous-bassins, notamment du fait de la variabilité spatiale et temporelle des événements cévenols en automne, mais aussi à cause des différences de comportement entre les sous-bassins amont et aval.





## 6. Bibliographie

**Boé, J., L. Terray, F. Habets and E. Martin** (2006), A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling, *Journal of Geophysical Research*, 111(D23) doi:10.1029/2005JD006889.

**BRLi** (2011), Perspectives d'évolution de la gestion des volumes stockés dans le barrage des monts d'Orb. BRL Ingénierie. Novembre 2011.

**Caballero, Y., Chaouche, K., Neppel, N., Salas y Melia, D., Martin, E., Terrasson, I., Chazot, S., Citeau, J.-M., Maton, L., Rinaudo, J.-D., Fleury, P., Ladouche, B., Dorfliger, N., Pinault, J.-L.**, (2008). Vulnerability of Mediterranean hydrosystems to climate changes and human activities: assessing potential impacts of likely future precipitation and temperature modifications for the 2020-2040 and 2040-60 periods over a Mediterranean basin. World Congress of the European Water Resources Association, Montpellier, France. <http://agire.brgm.fr/VULCAIN.htm>.

**Dagneaux D.** (2010) Etude d'impacts des changements climatiques et socioéconomiques sur la ressource en eau, à l'échelle d'un bassin versant des Pyrénées Orientales : Le Tech. Mémoire d'Ingénieur IDEA AgroParisTech, Yvan Caballero (Dir.), <http://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00748510>.

**CALIGEE** (2007), Etude dans le cadre de la régularisation des champs captants de Béziers utilisé pour l'alimentation en eau potable. Phase 1 : Modèle hydrodynamique. Rapport Calligée T07-34011.

**Ginger** (2010), Etude de définition des débits d'étiage de référence pour la mise en œuvre d'une gestion quantitative de la ressource en eau dans le bassin de l'Orb. Rapport provisoire Ginger Environnement – phase 1 et 2. Avril 2010.

**Hoang, T., Maton, L. Caballero, Y. et Rinaudo J-D.** (2012) Impact du changement climatique sur le besoin en eau d'irrigation dans l'Ouest de l'Hérault. Rapport BRGM RP-61311-FR. 36 pages + 2 annexes.

**Joseph, C.** (1965), Hydrologie et hydrogéologie du bassin de l'Orb. Etude de la nappe alluviale à l'amont de Béziers (Hérault). Thèse de Doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle. Université de Montpellier.

**Lamotte C., Marchal J.P.** (2011), Synthèse hydrogéologique du Languedoc Roussillon. Bassin Rhône Méditerranée. Rapport final - BRGM/RP-60305-FR, 95 p., 5 ill., 5 ann.

**Mouelhi, S.**, (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp.

**Mouelhi, S., C. Michel, C. Perrin, and V. Andréassian** (2006), Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model, *J. Hydrol.*, 318, 200-214, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.1006.1014.

**Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe** (1970), River flow forecasting through conceptual models, *Journal of Hydrology*, 10(3), pp. 282-290.

**Uppala, S. M., P. W. Kållberg, A. J. Simmons, U. Andrae, V. D. C. Bechtold, M. Fiorino, J. K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G. A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R. P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M. A. Balmaseda, A. C. M. Beljaars, L. V. D. Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Hólm, B. J. Hoskins, L. Isaksen, P. A. E. M. Janssen, R. Jenne, A. P. McNally, J. -. Mahfouf, J. -. Morcrette, N. A. Rayner, R. W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K. E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo and J. Woollen** (2005), The ERA-40 re-analysis, *Q.J.R.Meteorol.Soc.*, 131(612), 2961-3012, doi:10.1256/qj.04.176

**Vernier de Byans, M et Rinaudo JD** (2012), Scénarios d'évolution de la demande en eau potable à l'horizon 2030 dans l'Ouest Hérault. Rapport BRGM/RP-61317-FR., 51 p + ann.

**Vidal J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Baillon B., Soubeyroux J.-M.** (2010) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int. J. Climatol.*, (30), 1627–1644.



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

**Service géologique régional Languedoc Roussillon**  
1039, rue de Pinville  
34 000 – Montpellier - France  
Tél. : 04 61 15 79 80