

Chapitre 3

Quantification de la ressource existante et impact des prélèvements sur la ressource

Ce chapitre présente la reconstitution des ressources naturelles en eau dans les nappes et les rivières. Cette reconstitution est effectuée soit directement à partir de l'interprétation des différentes données hydrométriques et de prélèvements, soit plus généralement par le biais de modèles, qui permettent de combler les lacunes d'observations et d'avoir ainsi des séries chronologiques plus continues, desquelles on peut dégager des statistiques (débits caractéristiques d'étiage par exemple). Il est alors possible de mettre en évidence l'impact des prélèvements sur les ressources en eau du bassin.

3.1 Données utilisées

3.1.1 Données hydrométriques

Les données que nous avons utilisées dans cette étude sont les suivantes :

- Stations hydrométriques positionnées sur le bassin
- Campagnes de jaugeages ponctuels de la DREAL (ex DIREN)
- Jaugeages réalisés par l'Observatoire de l'Eau du conseil général de la Drôme
- Jaugeages réalisés par Idées Eaux sur la plaine d'Allex
- Jaugeages réalisés par SOGREAH dans le cadre de la présente étude
- Réseau d'Observation de Crise des Assecs (ROCA)

3.1.1.1 Stations hydrométriques

Le bassin de la Drôme a la chance d'être relativement bien pourvu en stations hydrométriques, par rapport à d'autres bassins de la région.

Les stations recensées dans la Banque Hydro sont présentées dans la table 3.1. Sept stations sont en fonctionnement sur le bassin dont les données sont accessibles. Une autre station appartenant à la CNR est située à Livron au niveau du pont de la Nationale 7, mais ses données ne sont a priori pas accessibles (source Idées Eaux). La station située au seuil CNR peu avant la confluence avec le Rhône est quand à elle douteuse en étiage (pas de mesures des assecs qui sont pourtant observés dans le secteur) ; ses données ont donc été utilisées avec circonspection.

3.1.1.2 Campagne de jaugeages ponctuelles

Les jaugeages ponctuels permettent d'obtenir de l'information hydrométrique en complément des stations hydrométriques, afin de spatialiser les valeurs de débits. Quand les jaugeages sont réalisés

Code station	Nom station	Disponibilité des débits
V4214010	La Drôme à Luc-en-Diois	1907 - 2011
V4225010	Le Bez à Châtillon-en-Diois	1963 - 2011
V4226010	L' Archiane à Treschenu-Creyers [Menée]	1970 - 2010
V4226020	L' Archiane à Treschenu-Creyers [Archiane]	2009 - 2011
V4264010	La Drôme à Saillans	1910 - 2011
V4264011	La Drôme à Saillans	2003 - 2005
V426402	La Drôme à Loriol-sur-Drôme [Loriol]	2003 - 2003
V4275010	La Gervanne à Beaufort-sur-Gervanne	1966 - 2011
V4275020	La Gervanne à Plan-de-Baix	1981 - 1989
V4275910	La résurgence des Fontaigneux à Beaufort-sur-Gervanne	1969 - 2011
V4287010	La Grenette à la Répara-Auriples	1997 - 2011

TABLE 3.1 – Liste des station hydrométriques sur le bassin recensées dans la banque hydro.

à peu de temps d'intervalle en différents points d'une rivière, on les qualifie de différentiels, et ils permettent alors de mieux appréhender les échanges nappes/rivières et/ou les prélèvements sur le tronçon ainsi délimité.

3.1.1.2.1 Jaugeages bancarisés par la DREAL

Il existe un certain nombre de jaugeages ponctuels en plusieurs points du bassin, qui sont bancarisés par la DREAL. Ils ont entre autre permis de déterminer des cartes de QMNA₅ spécifiques (voir carte en annexe page 508).

3.1.1.2.2 Jaugeages réalisés dans le cadre de l'Observatoire de l'Eau

L'Observatoire de l'Eau, service du Conseil Général de la Drôme, réalise un suivie des eaux souterraines et des eaux de surface. Sur le bassin de la Drôme, cinq points sont suivis :

- la Drôme à Charens,
- le ruisseau de Lausens à Aouste sur Sye
- la Sure à Saint Andéol
- le Maravel à Beaurières
- la Roanne à Aurel

3.1.1.2.3 Jaugeages différentiels sur la plaine d'Allex

Le cabinet Idées Eaux a effectué un certain nombre de jaugeages différentiels sur la plaine d'Allex dans le cadre de son étude sur la réalimentation de la nappe [IdéesEAUX, 2010a]. Ces jaugeages sont représentés sur la figure 3.11 page 119.

3.1.1.2.4 Jaugeages réalisés par Sogreah

SOGREAH a réalisé 2 campagnes de jaugeages sur l'ensemble du bassin de la Drôme. La technique utilisée était un jaugeage par dilution de traceur (NaCl).

La première campagne a eu lieu du 9 au 12 août 2010, en période d'irrigation. La seconde campagne



FIGURE 3.1 – Jaugeage conductimétrique d'un cours d'eau dans le département de la Drôme - Août 2009

Drôme, station hydrométrique de Saillans

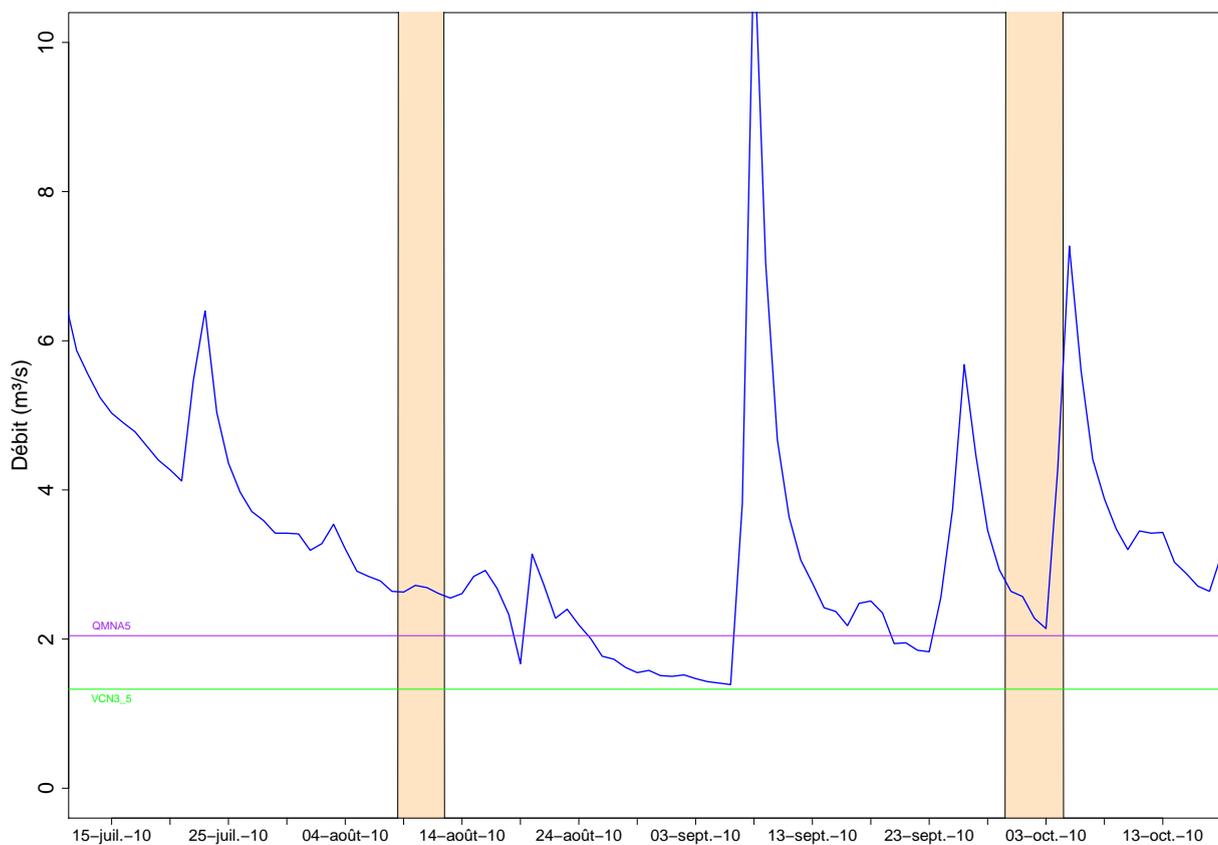


FIGURE 3.2 – Débits mesuré à la station hydrométrique de Saillans durant l'été 2010. Les dates des deux campagnes de jaugeages sont figurées par les plages bisques.

a eu lieu 30 sept 2010, le 1^{er} et le 4 Octobre 2010, hors période d'irrigation. Lors de ces deux campagnes, l'été était relativement marqué comme en atteste la figure 3.2, même si des débits plus bas

ont été enregistrés début septembre au cours de cette saison d'étiage.

Les résultats de ces deux campagnes sont présentés en annexe pages 509 et 510.

3.1.1.3 Réseau d'Observation de Crise des Assecs

3.1.1.3.1 Généralités

Le Réseau d'Observation des Crises d'Assecs (ROCA) a été mis en place en 2004 par le Conseil Supérieur de la Pêche devenu ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques) dans le cadre du plan d'action sécheresse élaboré par le ministère de l'écologie et du développement durable. Le ROCA a pour objectif de recueillir et de transmettre, dans chaque département, «en temps réel», aux préfets, des informations sur l'écoulement et l'état écologique des cours d'eau sensibles aux assecs et soumis à des prélèvements, durant les périodes de crises hydroclimatiques. Le ROCA est constitué d'une trentaine de stations par département, choisies par l'ONEMA en accord avec les MISE. Ce choix a été basé sur les données disponibles (pression de prélèvement) et l'expertise des brigades de l'ONEMA : connaissance du fonctionnement des cours d'eau, des zones de fort prélèvement et de l'historique des mises en assec (notamment au cours de la crise 2003).

Pendant la période de crise, des observations visuelles sont effectuées sur l'écoulement de l'eau de chaque station ainsi que sur son état écologique. 4 classes d'observation sont établies :

- classe 1 : l'écoulement est visible et acceptable : le débit biologique est assuré,
- classe 2 : l'écoulement est visible et faible : le débit biologique est non garanti
- classe 3 : l'écoulement est non visible : le débit biologique est fortement altéré
- classe 4 : la station est asséchée.

Elles sont complétées par une expertise relative au fonctionnement écologique des cours d'eau. Ces observations permettent d'alerter la MISE de l'impact que subissent les cours d'eau durant la crise.

A l'échelle nationale, l'agglomération des informations permet de disposer d'un indice départemental rendant compte de l'évolution de la crise. Cet indice départemental peut prendre trois modalités selon la gravité de la situation :

- La situation de vigilance correspond à l'état le moins grave. Le ROCA est déclenché dans le département, mais les cours d'eau présentent peu ou pas d'assec ;
- La situation délicate correspond à la situation intermédiaire ;
- La situation préoccupante est atteinte quand une grande partie des cours d'eau observés ne présente plus d'écoulement (pas de courant) ou sont à sec.

3.1.1.3.2 Le ROCA sur le bassin versant de la Drôme

Sur l'ensemble du bassin versant de la Drôme, 3 stations de suivis ont été mises en place en 2004 : La Drôme au seuil CNR (06260013), la Gervanne au camping des deux eaux (06260024), le Maravel (06260015). Puis une station a été rajoutée en 2007 sur la Sure (06260025).

Le suivi de 2005 a mis en évidence un assèchement du Maravel au début du mois d'août, de la Drôme à la fin du mois de juillet 2005.

Lors du suivi de 2006, seul l'écoulement du Maravel est faible (classe2) au début du mois de septembre.

En 2007, le ROCA met en évidence un écoulement visible faible de la Gervanne à la mi-juillet (observation du 17/07/07) et de la Sûre de la mi-juillet à la fin juillet (observations du 17 et 31 juillet en classe 2).

En 2008, l'ensemble des points suivis possède un écoulement visible et acceptable.

3.1.2 Données climatologiques

3.1.2.1 Données utilisées

Des données de précipitations, température et évapotranspiration ont été acquises, dans le cadre de cette étude, auprès de Météo-France, au pas de temps journalier sur la période du 1er septembre 2002 au 30 septembre 2010. Les stations suivantes ont été utilisées :

- BEAUFORT-SUR-GERVANNE (pluviométrie)
- CHABEUIL (pluviométrie)
- COMBOVIN (pluviométrie)
- ETOILE-SUR-RHONE (pluviométrie)
- LIVRON-SUR-DROME (pluviométrie)
- BELLEGARDE-EN-DIOIS (pluviométrie)
- DIE (pluviométrie)
- DIVAJE (pluviométrie)
- GLANDAGE (pluviométrie)
- LUC-EN-DIOIS (pluviométrie)
- SAILLANS (pluviométrie)
- VALDROME (pluviométrie)
- SAINT-ROMAN (pluviométrie)
- VALENCE CHABEUIL (pluviométrie, température, évapotranspiration potentielle)

Le choix de la période correspond aux possibilités de modélisation, en particulier dû à la moins bonne connaissance des prélèvements auparavant.

3.1.2.2 Traitement des données

Les données pluviométriques des stations retenues ont été interpolées spatialement afin de représenter au mieux la variabilité spatiale des précipitations et des cumuls annuels (effet du relief). Nous avons retenu un gradient altimétrique de précipitation de 0.00045 m^{-1} , déterminé à partir de la moyenne des précipitations annuelles des stations retenues.

On constate que si l'effet de l'altitude augmente généralement le cumul de pluie, le relief peut parfois avoir un effet d'ombrage, comme par exemple à la station de St Roman dans le Diois où le cumul annuel est bien plus faible que les autres stations d'altitudes comparables.

Pour chaque station, les précipitations journalières sont ramenées à une même altitude de référence, puis krigées avec un variogramme exponentiel de portée 30 km, à la résolution spatiale de 1 km. Les grilles de précipitation journalières ainsi obtenues sont ensuite corrigées par l'altitude réelle du point considéré en utilisant le gradient altitudinal. La carte 3.4 présente la distribution spatiale du cumul annuel moyen de pluie sur le bassin ainsi générée.

À partir des mesures de température journalière de la station de Valence Chabeuil, la température est extrapolée en altitude avec un gradient de $0.0065 \text{ }^{\circ}\text{C.m}^{-1}$. On considère que les précipitations qui tombent à une température journalière inférieure à $1,5^{\circ}\text{C}$ sont stockées sous forme de neige. Ce stock

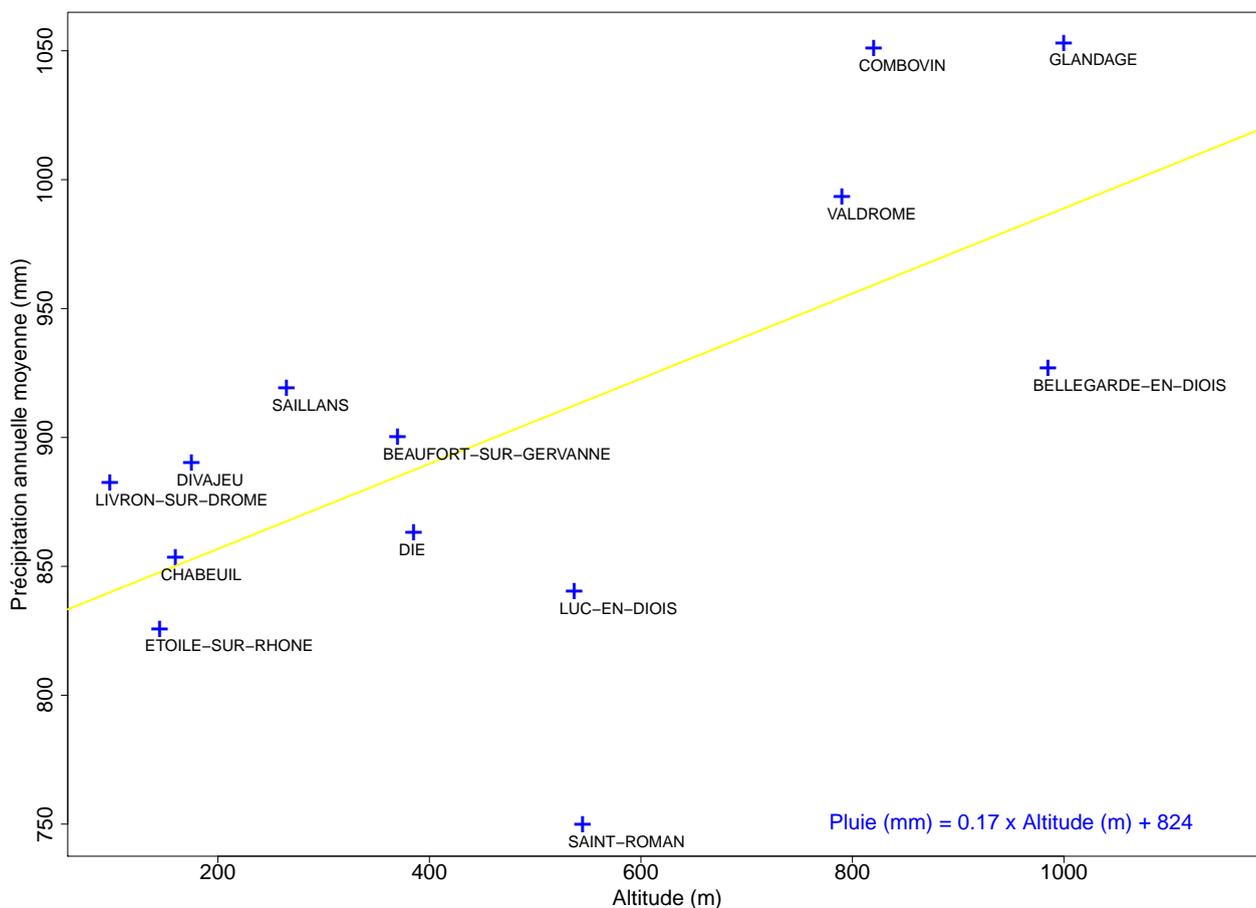


FIGURE 3.3 – Gradient altitudinal de pluie sur le bassin.

de neige est fondu en utilisant une méthode degrés-jours (coefficient utilisé : $1 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{jour}^{-1}$).

La pluviométrie annuelle est ainsi très variable, avec 750 mm en bordure de la vallée du Rhône jusqu'à plus de 1300 mm sur les crêtes du Vercors (voir la figure 3.4). Cette carte est avant tout informative sur la variabilité spatiale de la pluie et ne saurait remplacer une climatologie plus fine (constituée par exemple à partir de 30 ans de données) pour étudier l'apport d'eau météorique sur le bassin.

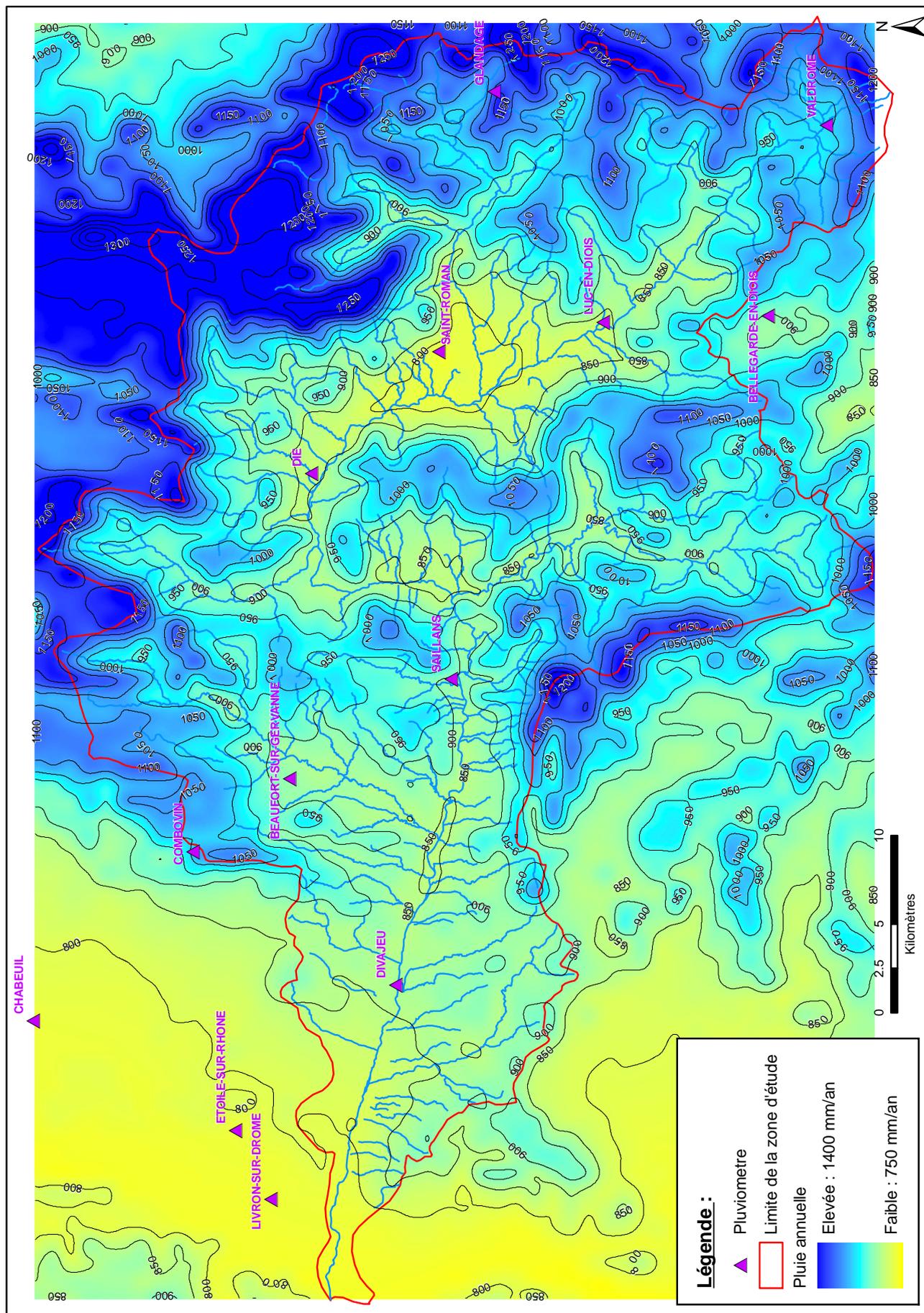


FIGURE 3.4 – Précipitations moyennes annuelles sur la période 2002-2010. Les courbes de niveaux du relief sont figurées.

3.2 Modèles utilisés

Afin de déterminer les ressources en eau, nous avons utilisé à la fois un modèle hydrologique pour reconstituer l'hydrologie à l'échelle du bassin, et un modèle hydrogéologique pour la zone à fort enjeux et où la nappe est fortement présente, sur la plaine d'Alex.

3.2.1 Modelisation hydrologique

Sur les principaux linéaires de cours d'eau, les débits ont été reconstitués par modélisation.

Les tronçons explicitement modélisés sont :

- la Drôme,
- le Bès,
- la Gervanne,
- la Grenette.

Ces tronçons ont été retenus car ce sont à la fois ceux plus fort enjeux au niveau des prélèvements et ceux qui sont les mieux documentés du point de vue hydrologique.

Nous avons retenu une approche avec un modèle conceptuel, semi distribué et en simulation continue. Le pas de temps retenu est la journée. Le pas de temps journalier nous semble en effet pertinent pour ce type d'étude :

- D'une part, ces petits cours d'eau sont sensibles aux phénomènes orageux ou au passage de brèves perturbations. Des crues intenses suivies d'un retour rapide à un faible débit pourraient donner l'illusion d'un fort débit si ce dernier est moyenné sur plusieurs jours.
- D'autre part, pour la préservation du milieu aquatique, la non-satisfaction d'un besoin en eau sur une journée peut suffire à mettre à mal l'écosystème.

La rivière est discrétisée le long de son linéaire en tronçons (nous avons retenu des tronçons uniformes d'1 km de long (la carte des sous-bassins ainsi constituée est présentée en annexe page 516). Pour chaque tronçon, le bassin versant associé est calculé à partir du modèle numérique de terrain. Pour chaque tronçon, la pluie moyenne sur le bassin versant associé est transformée en écoulements à partir d'une fonction de production. Les écoulements produits sont routés dans la rivière vers l'exutoire. Pour chacun des bassins de l'étude, le temps de concentration a été estimé inférieur à la journée. En travaillant au pas de temps journalier, on considère donc que les débits sont produits sur le même pas de temps que la pluie.

Nous avons choisi de travailler sur la période allant de septembre 2002 à 2010, essentiellement à cause de la moins bonne connaissance des prélèvements auparavant, tout en gardant l'année 2003 qui a été particulièrement sévère pour l'étiage, mais aussi pour ne pas dépasser le budget prévu quant à l'achat de données auprès de l'établissement public Météo-France.

3.2.1.1 Transformation pluie-debit

Pour la fonction de production, nous avons utilisé un modèle à 2 réservoirs : un réservoir de sol et un réservoir de nappe/routage

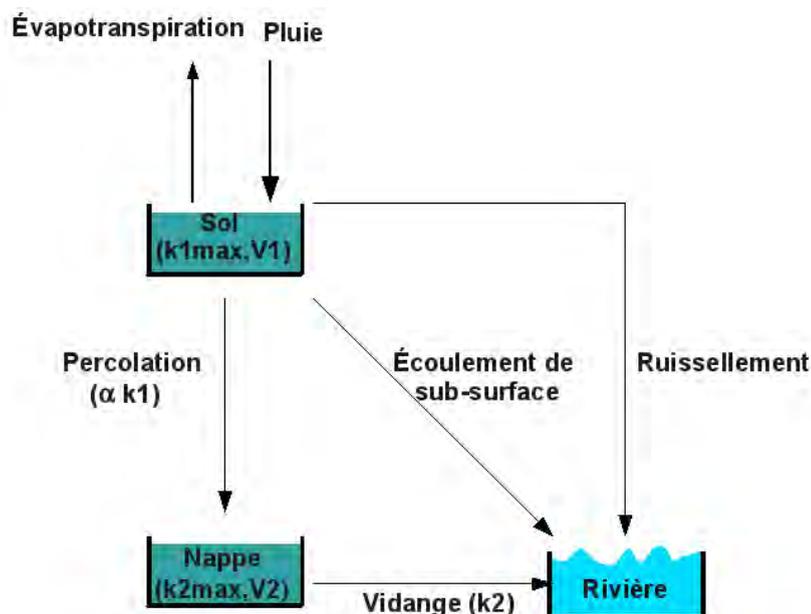


FIGURE 3.5 – Schéma de principe de la fonction de production

La pluie journalière P est d'abord interceptée par l'évapotranspiration potentielle E : pour déterminer une pluie nette P_n et une évapotranspiration nette E_n de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \text{Si } P > E, \text{ alors } P_n &= P - E \text{ et } E_n = 0 \\ \text{Si } P < E, \text{ alors } P_n &= 0 \text{ et } E_n = E - P \end{aligned}$$

Le ruissellement de surface est calculé en utilisant une formation type SCS Curve-Number. L'eau ruissellée est transférée dans la rivière, la partie de la pluie qui s'infiltré dans le sol est stocké dans un réservoir dit "réservoir de subsurface". Si ce réservoir de subsurface est plein, l'excédent est aussi ruisselé. Le réservoir de subsurface, de capacité $V1_{max}$ (réserve utile du sol) se vidange :

1. Par évapotranspiration E_m : L'évapotranspiration nette est modulée par le coefficient cultural Kc moyen du bassin (voir calcul en annexe 7.4).

$$E_m = Kc.E_n$$

L'eau E_s reprise dans le sol par évapotranspiration dépend de la teneur en eau du sol ω_1 ; plus le sol est sec et plus l'eau résiduelle est difficile à extraire :

$$\begin{aligned} \text{Si } \omega_1 > 0.6, \text{ alors } E_s &= E_m \\ \text{Si } 0.5 \leq \omega_1 \leq 0.6, \text{ alors } E_s &= (0.5 + 5(\omega_1 - 0.5))E_m \\ \text{Si } \omega_1 < 0.5, \text{ alors } E_s &= \omega_1.E_m \end{aligned}$$

2. Par percolation et drainage de subsurface : à chaque pas de temps, une partie $k1$ (mm) de l'eau de ce réservoir de subsurface est évacuée en fonction de la charge du sol :

$$k1 = \omega_1.k1_{max}$$

Une partie de cet écoulement percole dans un second réservoir dit "réservoir de nappe", une autre partie rejoint la rivière (écoulement de sub-surface).

L'eau de ruissellement est routée selon un hydrogramme unitaire de type GR4J.

Le réservoir de nappe se vidange vers la rivière proportionnellement à sa charge de manière exponentielle, sa dynamique est caractérisé par un temps de demie-vie Tc (sans alimentation, son stock d'eau

diminue de moitié tous les T_c jours).

Une partie de l'eau peut quitter le bassin (karst, nappes profondes), cette perte est supposée constamment proportionnelle au débit.

3.2.1.2 Prise en compte des prélèvements et des interactions nappe-rivière

Afin de calculer un débit naturel reconstitué, les prélèvements et restitutions liés à l'activité humaine sont rattachés au modèle sur chaque tronçon du bassin identifié, en fonction de leurs localisations.

Les prélèvements (annuels) sont désagrégés au pas de temps journalier (voir section 2.1.2). Ces prélèvements peuvent avoir lieu directement en rivière, en source, dans la nappe alluviale voire dans des nappes plus profondes (molasse miocène sur l'aval du bassin ou potentiellement karst ailleurs). Les prélèvements qui ont lieu en rivière, source ou dans la proche nappe alluviale grèvent directement le débit de la rivière. Pour les prélèvements plus profonds, l'impact du prélèvement est décalé dans le temps et amorti, pour prendre en compte la dynamique de la nappe

Pour chaque tronçon, on effectue donc un bilan entre les ressources en eau (qui viennent de l'amont, ou qui sont produites sur le tronçon en question) et les prélèvements, afin de déterminer la quantité d'eau qui s'écoule vers l'aval (voir figure 3.6).

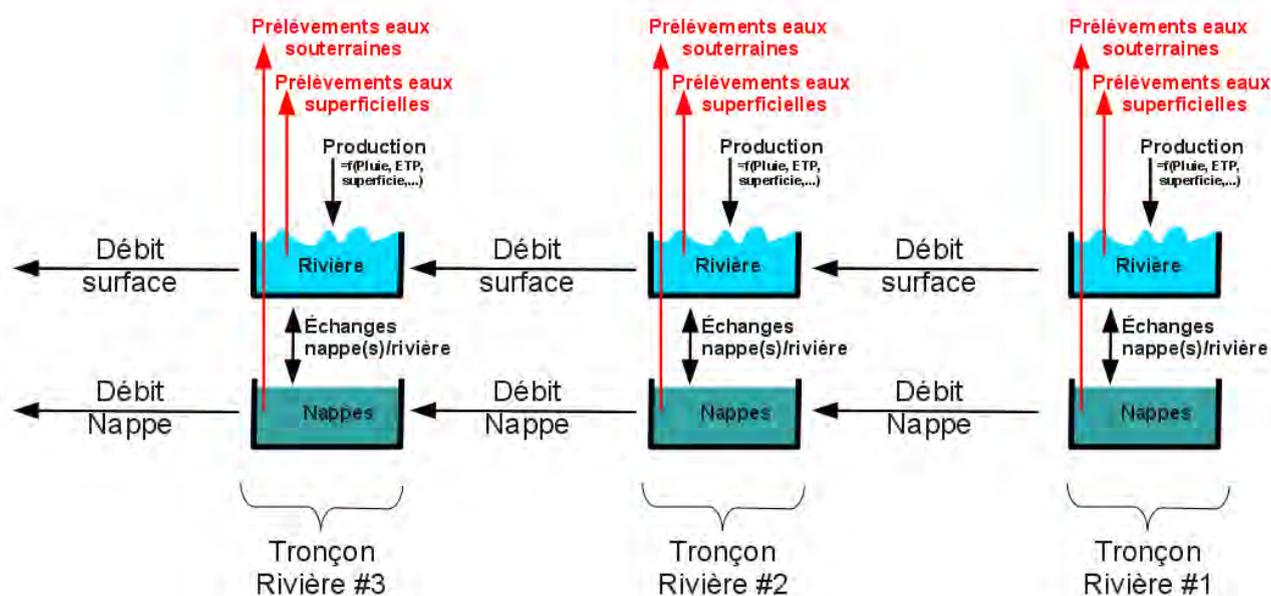


FIGURE 3.6 – Représentation des prélèvements et des interactions nappe/rivière

Si il y a plus de prélèvements dans le compartiment souterrain que ce qu'il y a d'eau stockée, la rivière s'infiltré alors pour combler le manque.

Par ailleurs, la rivière peut parfois se perdre dans ses alluvions ou des couches plus profondes, pour résurger plus en aval, voire même ne pas résurger. Pour chaque tronçon, nous avons donc défini un potentiel d'échange nappe rivière, qui peut être positif (résurgence) ou négatif (infiltration). Le débit de surface est le débit auquel ces sous écoulements sont routés de tronçons en tronçons vers l'aval.

3.2.1.3 Calage et validation du modèle

Les paramètres à caler pour le modèle sont le temps de concentration T_c , la hauteur du réservoir de sub-surface, le temps caractéristique de vidange du réservoir de sub-surface, le temps caractéristique de vidange du réservoir de nappe. Nous les avons pris égaux pour chaque sous bassin versant. Pour chaque tronçon, un potentiel d'échange avec la nappe doit également éventuellement être ajusté.

Le modèle est dans un premier temps calé pour chaque point de contrôle en regardant l'efficacité de Nash et le biais¹. L'optimisation a consisté à avoir le meilleur Nash possible, tout en gardant un biais proche de 0 (éventuellement en jouant sur les sous-écoulements et les pertes), et en essayant visuellement de coller au mieux aux débits d'étiage.

Dans la mesure du possible, nous avons choisi d'utiliser des paramétrisations les plus physiques possible. Les ajustements du modèle aux stations sont présentés en annexe pages 511 à 515

Dans un deuxième temps, l'ébauche de débit ainsi réalisée est ajustée sur les stations hydrométriques fiables, afin que les débits modélisés soient égaux aux débits simulés aux points de contrôle. Sur la Drôme, nous avons considéré comme fiable les stations de Luc en Diois et de Saillans, mais pas celle de Loriol, à la série trop courte et qui surestime manifestement les débits en étiage (c'est plus une station dédiée aux crues).

Nous n'avons pas découpé la série en deux parties pour avoir un jeu de calage et un jeu de validation (qui peuvent être interchangeables) car cette série chronologique est courte, et par ailleurs le processus d'assimilation fait que le résultat du modèle est de toute façon d'abord gouverné par les observations. Ainsi, quelque soit la qualité du calage, les débits s'écoulant à l'aval d'une station sont modélisés comme étant (généralement) égaux aux mesures. La qualité du calage intervient pour appréhender au second ordre la dynamique des débits entre les points de mesure.

3.2.2 Construction d'un modèle hydrogéologique sur la plaine d'Alex

3.2.2.1 Données géologiques et hydrogéologiques de la plaine d'Alex

3.2.2.1.1 Contexte géologique

L'aquifère alluvial de la plaine d'Alex est situé entre Crest, à l'amont, et la cluse que constituent les collines secondaires du mont Brian et du Haut Livron, à l'aval. Les alluvions sont généralement constituées, à leur base, de matériaux calcaires grossiers (galets, graviers et sables) sur 8 à 9 mètres

1. L'efficacité de Nash est un coefficient utilisé en modélisation qui permet d'indiquer le degré d'ajustement du modèle :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2}$$
 ; avec T le nombre d'observations, Q_{obs} la chronique des débits observés (et $\overline{Q_{obs}}$ sa moyenne) et Q_{sim} la chronique des débits simulés.

$$Biais = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)$$

d'épaisseur et surmontés de limons moins perméables de 1 m à 2 m d'épaisseur. La formation aquifère est parfois entrecoupée d'horizons argileux qui séparent la nappe en plusieurs niveaux.

Les alluvions, qui forment le terrain aquifère, reposent soit :

- sur des marnes dites bleues du Pliocène,
- sur des terrains molassiques du Miocène.

Les marnes pliocènes affleurent entre Alex et Eurre. Leurs dispositions correspondent à une remontée du niveau marin entre -4.2 et -3 Ma en formant des rias [De La Vaissiere, 2006]. Ces marnes constituent une barrière imperméable pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres d'épaisseur et empêchant les échanges hydrauliques avec les aquifères sous-jacents.

La molasse miocène affleure au nord-est et au sud-est de l'aquifère : il s'agit d'une formation composée de sables limoneux plus ou moins consolidés [De La Vaissiere, 2006]. La molasse miocène est elle-même considérée comme aquifère, et est utilisée à proximité de la plaine d'Alex pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable, via des sources ou des forages [De La Vaissiere, 2006]. Cependant, d'après les études en cours, les échanges entre la molasse et les alluvions devraient être faibles dans ce secteur [Cave, 2012].

3.2.2.1.2 Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère

Plusieurs essais de débits ont été récupérés, notamment via la banque de données du sous-sol (BSS). Ils permettent d'obtenir des ordres de grandeur de perméabilité en différents endroits (voir figure 3.7), afin de valider et de contraindre les hypothèses de calage du modèle.

- En 2008, le bureau d'études Idées Eaux a suivi l'évolution du niveau d'eau en plusieurs points de la nappe lors d'un pompage à $900 \text{ m}^3/\text{h}$ de 4 jours sur le site des Freydières (site de pompage du SIAM). Avec l'utilisation de la méthode de Thiem, on obtient une transmissivité de $4.10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ et une perméabilité de 3.10^{-2} m/s .
- En 1970, un pompage d'essai de 24 heures sur le forage n°08424X0007/F3 aux Ramières à $110 \text{ m}^3/\text{h}$ a été effectué, avec un suivi sur un piézomètre. L'utilisation de la méthode de Dupuit donne une perméabilité d'environ 2.10^{-3} m/s .
- En 1969, un pompage d'essai de 30 heures sur le forage n°08423X0006/F3 des Pues à $127 \text{ m}^3/\text{h}$ a été effectué, avec un suivi piézométrique sur 2 ouvrages. L'utilisation de la méthode de Thiem donne une perméabilité d'environ $2,5.10^{-3} \text{ m/s}$.
- En 1968, un pompage d'essai de 45 heures sur le forage n°08424X0005/F1 de Mazabrard à $25 \text{ m}^3/\text{h}$ a été effectué, avec un suivi sur 10 piézomètres. L'interprétation de cet essai est difficile (possible anisotropie et hétérogénéité du terrain), mais l'utilisation de la méthode de Thiem permet tout de même de dégager une valeur de perméabilité d'environ 2.10^{-3} m/s .
- En 1962, un pompage d'essai de 67 heures à $45 \text{ m}^3/\text{h}$ et de 9 heures à $67 \text{ m}^3/\text{h}$ sur un puits n°08423X0001/S à Alex a été effectué, sans suivi piézométrique autre que celui du forage de pompage. L'utilisation de la méthode de Jacob est cependant possible et permet d'obtenir une valeur de perméabilité à 7.10^{-4} m/s .

L'observation géophysique d'un "paléo-chenal", ou du moins une zone d'écoulements préférentiels entre la zone des Ramières et la zone d'émergence des Freydières (information du bureau d'études Idées-Eaux) a été incluse au modèle par une bande de plus forte perméabilité.

Pour l'aquifère modélisé (un aquifère libre) le coefficient d'emménagement correspond à la porosité efficace. D'après la littérature et la lithologie, cette porosité efficace est comprise entre 5% et 25%.

3.2.2.1.3 Piézométrie de la nappe

La piézométrie de référence retenue de la plaine d'Allex est celle de Géoplus en août 1996. Elle a été réalisée avec 77 points de mesure : les altitudes ont été déterminées soit à partir de nivellement existant, soit à partir de la carte IGN au 1/25 000ème.

Le fil d'eau de la Drôme lors la piézométrie de la nappe réalisée en 1996 a été évalué à partir de nos observations réalisées en 2010 et notre analyse du fonctionnement hydrogéologique de la zone. En effet, les conditions hydrologiques semblent être très proches entre 2010 et 1996 - étiages moyens (environ $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2010) dans les deux cas - et l'aménagement de la Drôme n'ayant peu varié entre ces deux dates, le profil en long issu des mesures de SOGREAH en 1986, (cohérent avec les levés LIDAR du 13 et 14 septembre 2010) a été utilisé pour reconstituer le fil de l'eau de la Drôme dans la partie amont. Il en résulte une nouvelle compréhension de la partie amont de l'aquifère, plus cohérente avec les mesures de débits de 2010 et la carte piézométrique réalisée en 1986 [SOGREAH, 1990a], qui montrent une alimentation de la nappe par la rivière Drôme sur une grande partie de son linéaire notamment en amont et au centre de la plaine.

La piézométrie d'août 1996 modifiée (cf. figure 3.8) sera utilisée comme référence pour le calage du modèle numérique en régime permanent.

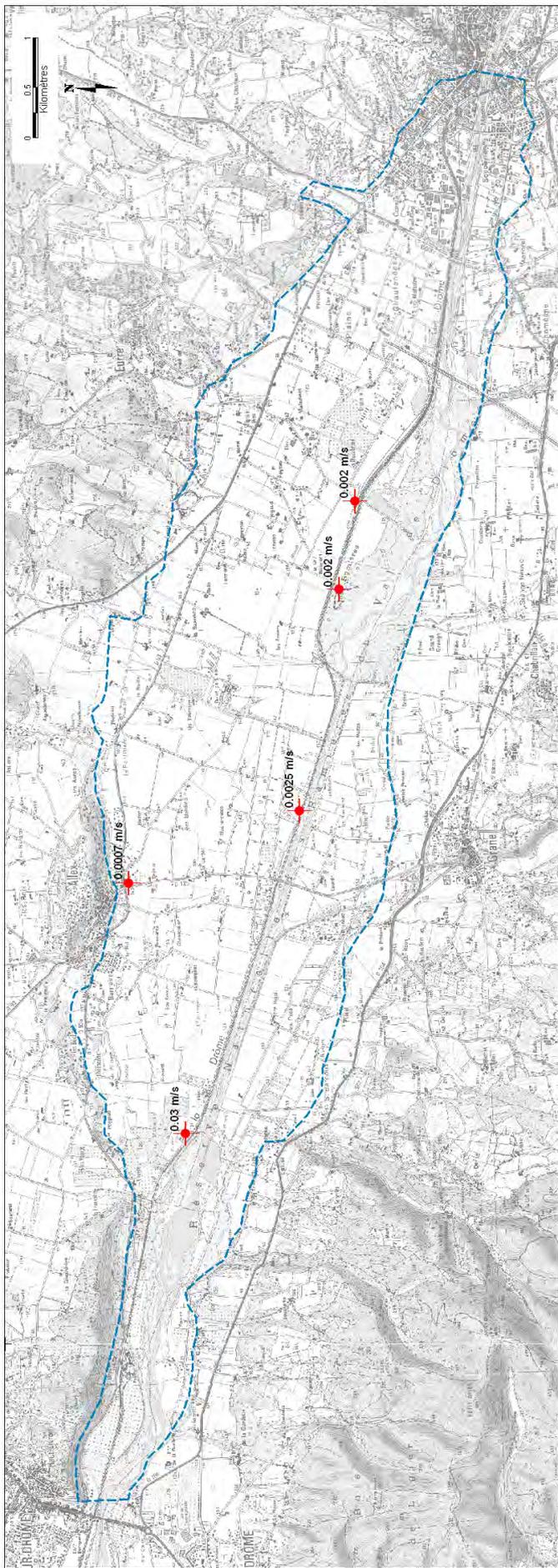


FIGURE 3.7 – Carte présentant les localisations des pompages d’essai utilisés pour obtenir des valeurs de perméabilité (le chiffre correspond à la valeur de perméabilité calculée).

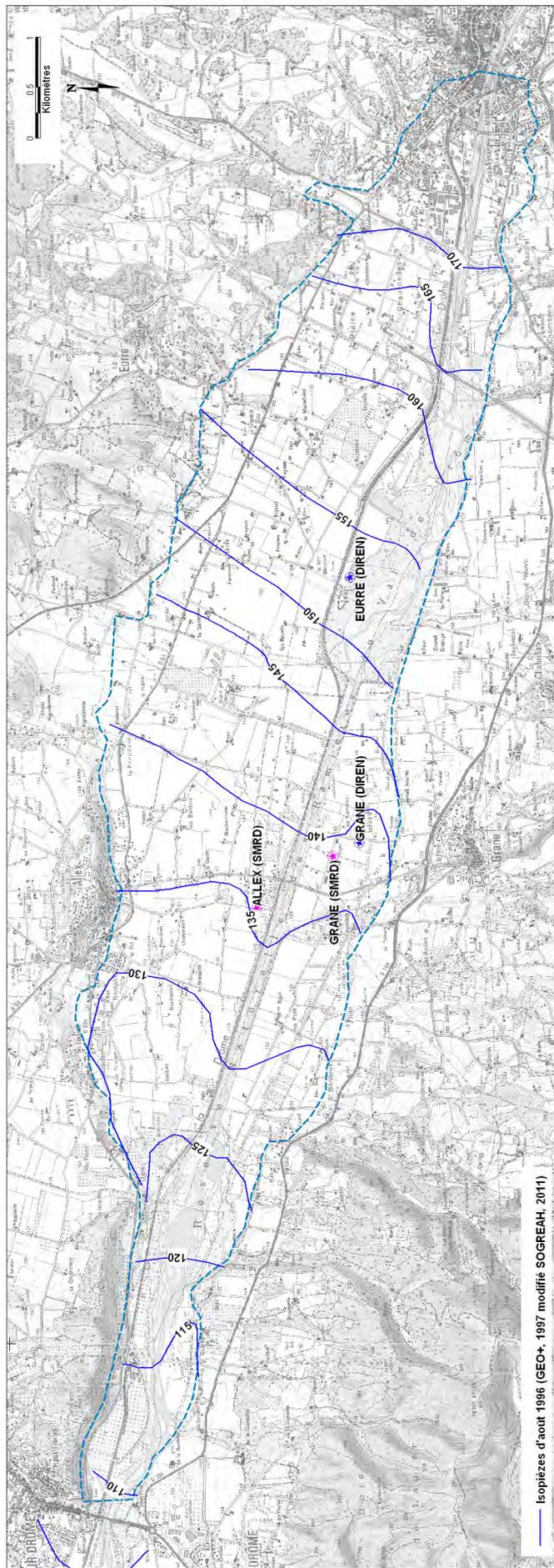


FIGURE 3.8 – Piézométrie de référence d’août 1996 et localisation des piézomètres de référence pour le calage du modèle en régime transitoire.

3.2.2.1.4 Chroniques piézométriques

L'analyse des chroniques piézométriques disponibles (cf. localisation en figure 3.8) permet la compréhension de certains phénomènes liés au fonctionnement de l'aquifère. Les principaux piézomètres de référence (Eurre n°08424X0006/F2 et Grâne n°08423X0067/PZ) suivent le niveau de la nappe depuis 1995, avec une mesure par jour en moyenne.

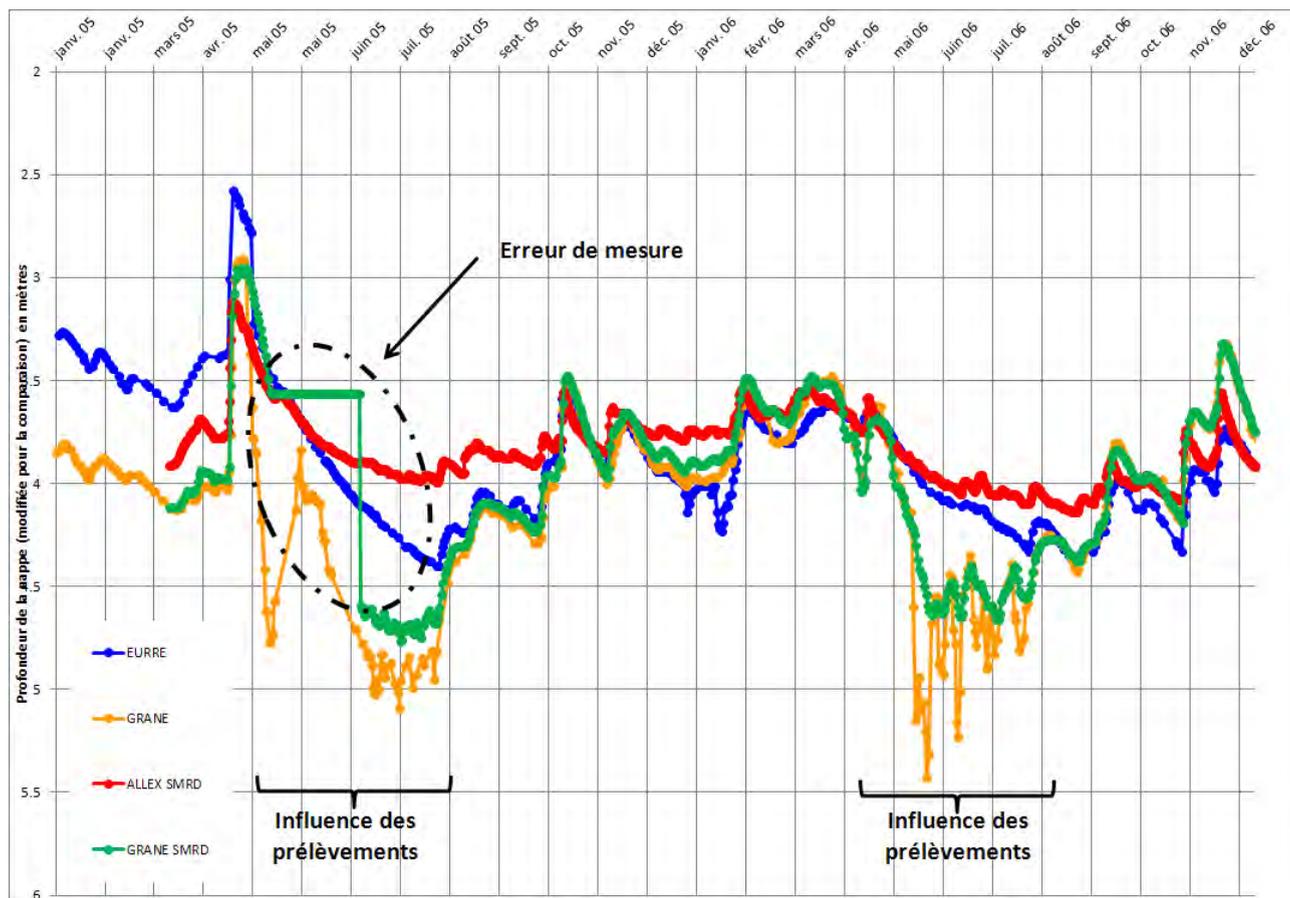


FIGURE 3.9 – Chroniques piézométriques comparées d'Eurre (DREAL, n°08424X0006) de Grâne (DREAL, n°08423X0067) de Grâne (SMRD) et d'Alex (SMRD).

L'analyse de la piézométrie depuis 1995 ne montre pas de tendance à la baisse : il n'y a donc pas de surexploitation chronique de la nappe. On rappellera que l'aquifère étudié possède une faible inertie et une dynamique rapide liées notamment à sa faible extension et à un volume d'eau relativement limité.

Hors période d'étiage, les comportements piézométriques sont similaires entre les piézomètres d'Eurre (DREAL n°08424X0006/F2) et de Grâne (DREAL n°08423X0067/PZ et SMRD). Le piézomètre d'Alex (SMRD) se distingue (cf. figure 3.9) par des réactions plus rapides aux épisodes hydrologiques, mais généralement de plus faibles amplitudes : cela peut s'expliquer par des distances différentes à la rivière, des perméabilités et/ou des coefficients d'emmagasinement différents, ou encore des colmatages variables de la rivière.

En comparant les piézomètres d'Eurre (DREAL n°08424X0006/F2) et d'Alex (SMRD) d'une part et de Grâne (DREAL n°08423X0067/PZ et SMRD) d'autre part, on observe une importante différence de comportement en période d'irrigation, la partie rive gauche de l'aquifère à l'aval de Grâne est le

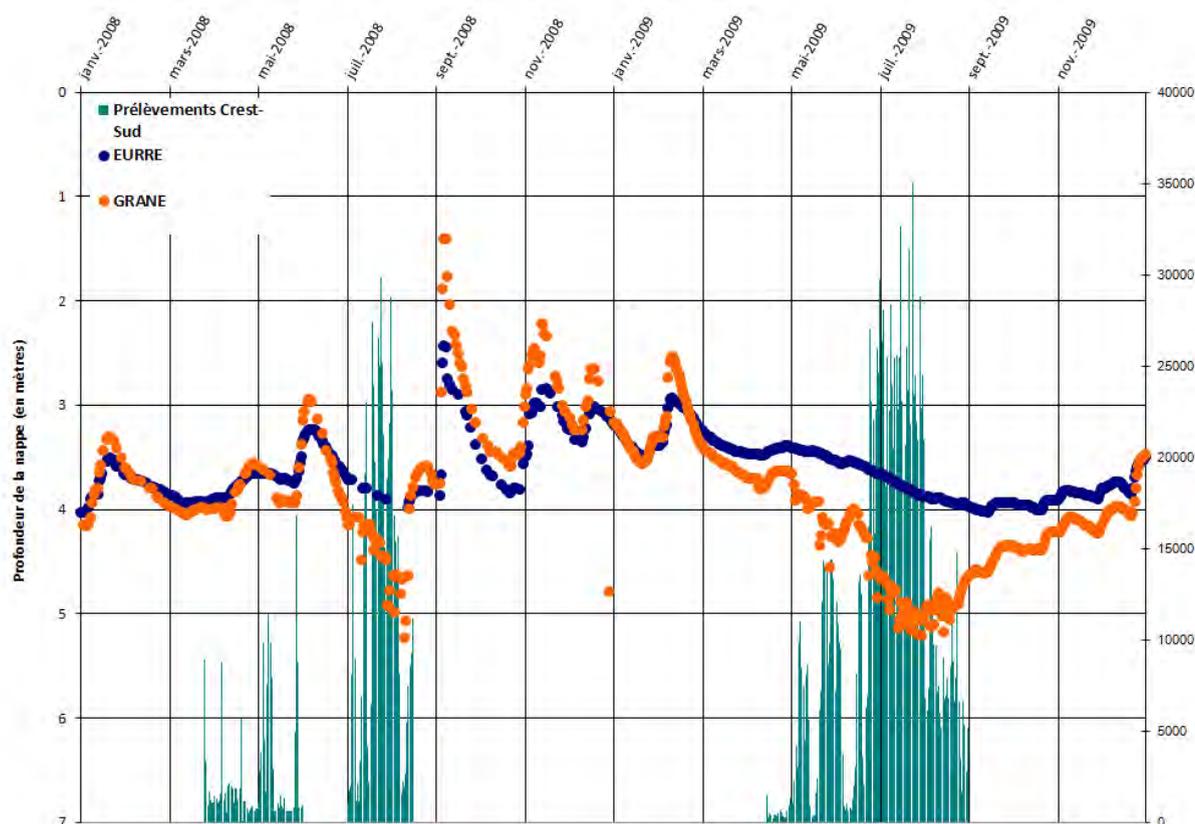


FIGURE 3.10 – Chroniques comparant les piézomètres soumis à l’influence des prélèvements (Grâne, DREAL n°08423X0067) et ceux qui ne sont pas soumis à une influence visible des prélèvements souterrains (Eurre, DREAL n°08424X0006).

plus fortement influencé par les prélèvements avec des différences de niveau de l’ordre d’un mètre. Cette observation et l’éloignement du piézomètre d’Eurre des prélèvements (> à 1 km), indique que ce piézomètre n’est peu ou pas influencé par les prélèvements souterrains, et qu’il donc assez représentatif du fonctionnement naturel de la nappe.

La superposition des chroniques d’Eurre et de Grâne avec les données de prélèvements journaliers du SICS dans la rivière Drôme (utilisés ici comme un indicateur des besoins pour l’irrigation pour représenter qualitativement les prélèvements souterrains journaliers pour l’irrigation dans la plaine), confirme la corrélation entre le niveau de prélèvement dans la nappe et la piézométrie dans l’ombilic de Grâne et le caractère décorrélé du piézomètre d’Eurre par rapport aux prélèvements (cf. figure 3.10). On remarquera également des cycles piézométriques quotidien (ou quasi-quotidien) en période d’irrigation sur le piézomètre de Grâne : ils sont probablement dus à des cycles de pompes proches de l’ouvrage de suivi qui interfèrent avec le piézomètre.

3.2.2.1.5 Relation nappe-rivière

La relation nappe-rivière a pu être caractérisée par l’interprétation de jaugeages synchrones en plusieurs endroit de la rivière. Les résultats obtenus lors de la campagne de jaugeages SOGREAH d’août 2010 et de septembre 2010 et la comparaison avec les campagnes de jaugeages d’Idées Eaux notamment (en 2010, 2008, 2006 et 2005) et de l’ONEMA (2009) sont présentés en figure 3.11. Il est à noter que tous les jaugeages récupérés concernent la période d’été.

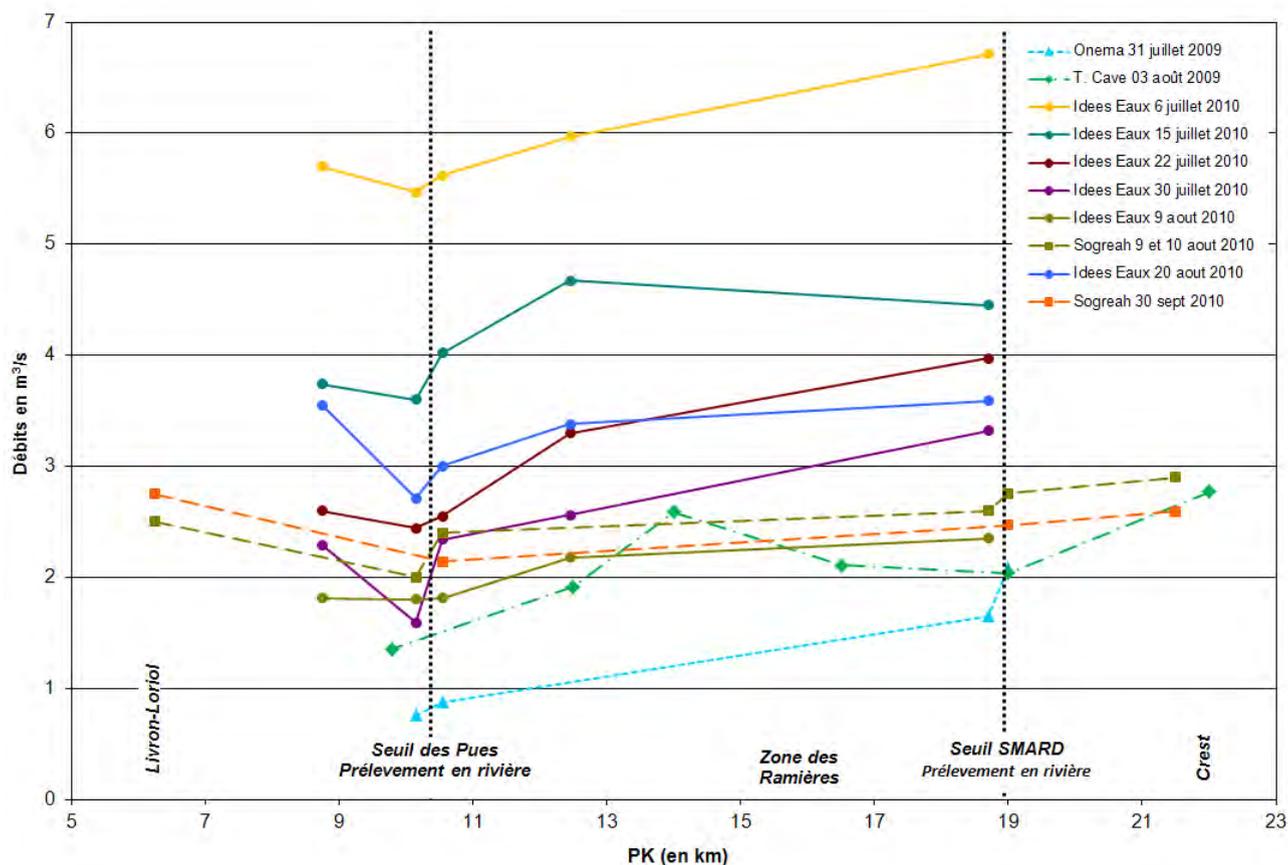


FIGURE 3.11 – Graphique représentant les différentes campagnes de jaugeages différentiels récupérés entre Crest et Livron.

L'analyse de ces résultats permet de montrer que la rivière réalimente la nappe sur plusieurs parties de la plaine. Entre le pont de Crest et le seuil SMARD, en août et septembre 2010 (SOGREAH) ainsi qu'en août 2009, la nappe est alimentée par la rivière (environ $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ dont 25 L/s provenant de la Saleine).

Entre le seuil SMARD et le seuil des PUES, le comportement de la Drôme vis-à-vis de la nappe est variable comme l'indiquent les mesures d'Idées Eaux en 2010 et celles de T. Cave en août 2009 : on observe une alimentation, puis un drainage de la nappe au niveau des Ramières, puis de nouveau une alimentation jusqu'au seuil des PUES ; de manière globale, entre ces deux seuils, le bilan des mesures de débits montre une alimentation de la nappe par la rivière. Le débit de la Drôme perdu sur cet intervalle en période d'étiage (juillet, août, septembre) varie de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ à $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une moyenne sur 10 valeurs à $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (les apports des affluents Riaille et Grenette est d'environ 75 L/s, d'après les mesures SOGREAH en 2010).

Entre le seuil SMARD et le seuil des PUES, le comportement de la Drôme vis-à-vis de la nappe est variable comme l'indiquent les mesures d'Idées Eaux en 2010 et celles de T. Cave en août 2009 : on observe une alimentation, puis un drainage de la nappe au niveau des Ramières, puis de nouveau une alimentation jusqu'au seuil des PUES ; de manière globale, entre ces deux seuils, le bilan des mesures de débits montre une alimentation de la nappe par la rivière. Le débit des pertes de la Drôme sur cet intervalle en période d'étiage (juillet, août, septembre) a été par exemple mesuré à $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ le 9 août 2010 (le débit à l'aval du seuil SMARD étant de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$) et à $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ le 22 juillet 2010 (le débit à l'aval du seuil SMARD étant de $3,97 \text{ m}^3/\text{s}$) avec une moyenne sur 10 valeurs à $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (les apports

des affluents Riaille et Grenette sur ce tronçon où est effectué le bilan est d'environ 75 L/s, d'après les mesures SOGREAH en 2010).

En aval en revanche, entre le seuil des Pues et le pont de Livron, la nappe est systématiquement drainée par la rivière ; la Drôme y gagne $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en aout 2010 (les sources des Freydières et de Barnaire apporte 55 L/s environ).

La figure 3.12 page 122 montre les différents comportements de la rivière vis-à-vis de la nappe.

La rivière Drôme a connu un certain nombre d'assec depuis 1989 (observations de J.M. Faton² et de P. Gélibert³) :

- à l'aval de Livron, du seuil CNR jusqu'au pont de l'autoroute voir jusqu'au pont SNCF en 1989, 1990, 1991, 2003, 2004, et 2009. (à l'aval de la modélisation)
- sur 500 mètres à l'aval du seuil des Pues en 2003, puis reprise d'un faible écoulement avec l'arrivée des restitutions du lac des Freydières (rive gauche), des sources (rive droite), et avec le drainage diffus de la nappe.

Les durées d'assec ne sont pas connues précisément. Au dire des observateurs, la durée d'assec au seuil des Pues est de l'ordre d'une dizaine de jours en 2003.

3.2.2.2 Modélisation hydrogéologique

3.2.2.2.1 Logiciel utilisé

Le logiciel Visual MODFLOW permet de modéliser les écoulements souterrains en trois dimensions, en régime permanent ou transitoire. Pour cela, il intègre par différences finies les équations d'hydraulique souterraine grâce aux algorithmes MODFLOW de l'United States Geological Survey (USGS). Ces algorithmes sont mondialement reconnus comme étant stable et robuste.

Visual MODFLOW permet de représenter des systèmes hydrogéologiques complexes à partir d'une interface graphique qui facilite l'intégration des données, avec notamment la possibilité d'importer des fonds de carte en plusieurs formats, d'interpoler les données par des méthodes géostatistiques classiques, etc. Pour l'exportation des résultats, Visual MODFLOW édite des cartes isopièzes de chaque aquifère modélisé, des cartes des vitesses d'écoulement des eaux souterraines, des bilans détaillés des flux à l'échelle du système hydrogéologique ou locale, et des chroniques de niveaux piézométriques.

3.2.2.2.2 Modèle conceptuel

La modélisation se base sur la discrétisation d'un problème hydrogéologique : une discrétisation spatiale et temporelle.

Discrétisation spatiale et temporelle

Spatialement, le modèle est discrétisé de façon homogène en 36 000 mailles carrées de 50 m x 50 m. L'altitude du sol a été interpolée à partir des courbes de niveau des cartes IGN au 1/25 000^{eme}.

2. réserve naturelle des Ramières du val de Drôme

3. ONEMA

La discrétisation temporelle a été choisie au pas de temps mensuel d'abord, puis au pas de temps journalier après 2002. Ce découpage du temps permet de mieux représenter les variations rapides (dues au crues par exemple) sur cette nappe très réactive : il permet également de comparer les résultats avec ceux de la modélisation hydrologique.

Nous avons choisi la piézométrie de référence comme étant la piézométrie d'août 1996 (Géo+, 1997 modifié SOGREAH) : c'est à partir de ces relevés qu'a été basé le calage du modèle en régime permanent.

Pour le régime transitoire, un suivi piézométrique existe depuis 1995 à Grâne et Eurre. La période de calage a donc été choisie entre janvier 1996 et décembre 2009. La piézométrie de janvier 1997 a été également utilisée pour vérifier spatialement le calage en régime transitoire.

Caractéristiques géométriques de l'aquifère

Le système aquifère modélisé ici est celui de la formation alluviale. Le substratum de cette formation est soit la formation pliocène argileuse, soit la formation molassique miocène. Il est considéré, que la formation pliocène argileuse est aquitard (non-aquifère), et que les échanges entre la formation miocène (molasse, peu perméable) et la formation alluviale sont négligeables (d'après une information orale de T. Cave en 2010). La formation alluviale est considérée comme suffisamment homogène verticalement, pour choisir un modèle mono-couche qui représente le fonctionnement de la nappe alluviale.

La géométrie du dépôt alluvial dans le modèle est obtenue à partir de données de l'étude [SOGREAH, 1990a], qui ont été adaptées avec les informations plus récentes, de sondages notamment (sources : BSS et Idées Eaux).

Les limites latérales

Les limites latérales de l'aquifère sont définies par (cf. localisation en figure 3.13) :

- au nord et au sud, une limite à flux imposés, de type recharge (recharge supérieure à la pluviométrie) qui représente les infiltrations depuis les versants vers la nappe,
- à l'est, une limite à flux nuls ; les calcaires étant affleurants dans le lit de la rivière au niveau de la cluse de Crest, les échanges avec la nappe en amont de cette cluse sont probablement faibles,
- à l'ouest, une limite à condition de potentiel imposé ; à l'inverse de Crest, la cluse de Livron-Loriol semble caractérisée par une épaisseur alluviale plus importante, les échanges entre la nappe amont et aval (en pratique, déversement de l'une dans l'autre, respectivement) sont alors possibles.

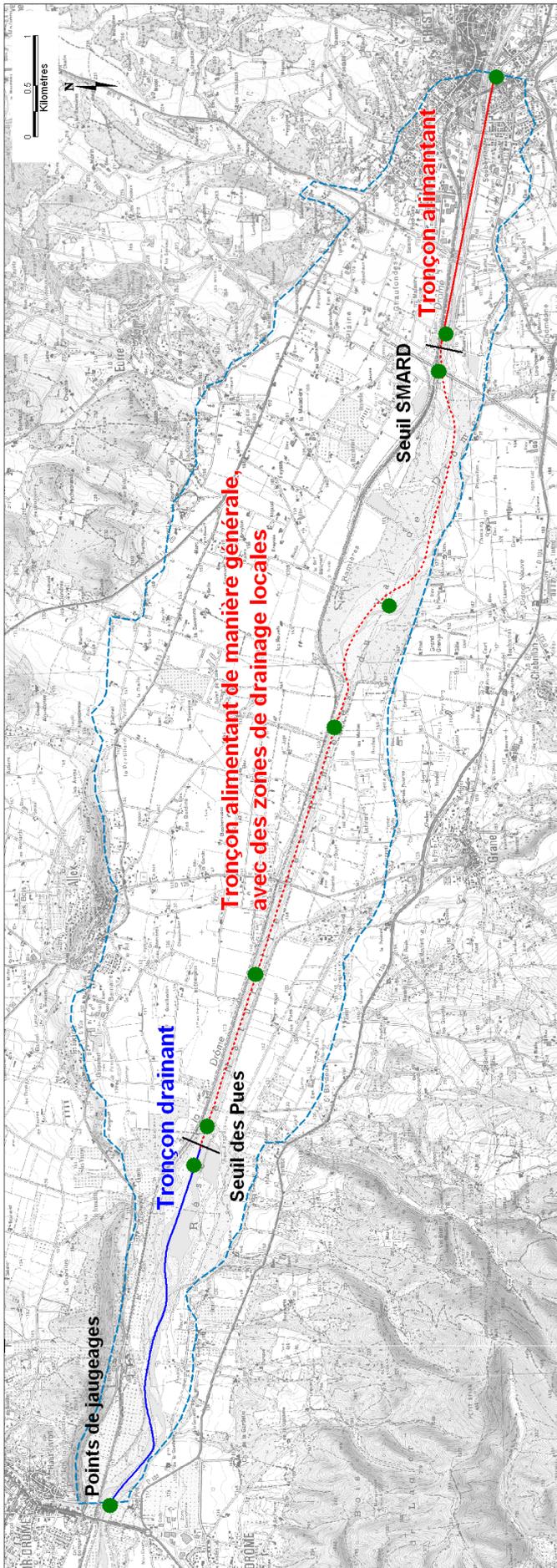


FIGURE 3.12 – Carte présentant les différents comportements de la Drôme vis-à-vis de la nappe.

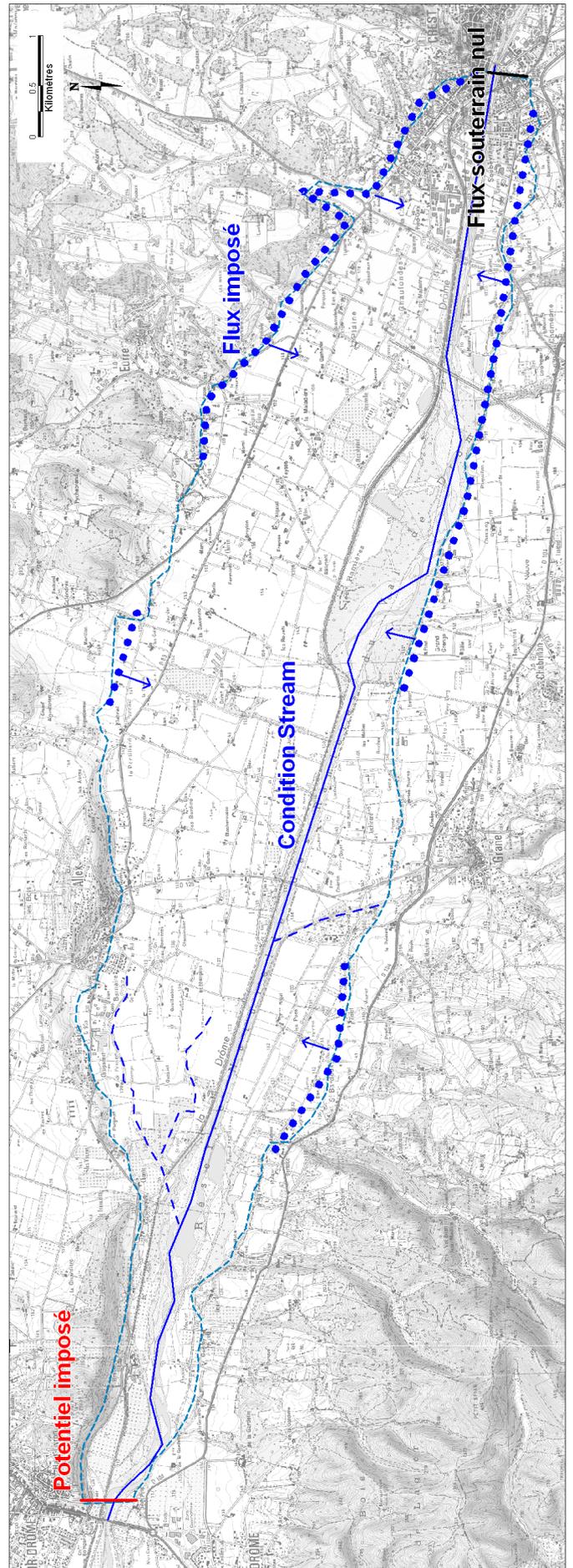


FIGURE 3.13 – Carte synthétisant les conditions aux limites latérales prises pour la modélisation.

Modélisation des échanges nappe-rivière

Pour la modélisation de ces interactions eaux souterraines/ eaux de surface, il a été choisi d'utiliser le module *stream* (STR) dans le code de calcul MODFLOW, afin de représenter les variations de débits dans la rivière liées à la recharge et au drainage de la nappe [Prudic et al., 2004].

Le fonctionnement de cette condition aux limites consiste, pour toutes les cellules concernées et pour chaque pas de temps, à résoudre de manière itérative le débit du cours d'eau en fonction des débits entrants depuis l'aquifère ou sortants vers l'aquifère. Dans notre cas, le débit intégré à l'amont du modèle (à Crest), est issu des résultats de la modélisation hydrologique (cf. figure 3.14). Le modèle permet ensuite d'obtenir l'évolution du débit de la Drôme jusqu'à Livron.

Le flux d'échange entre le cours d'eau et la nappe est fonction de la hauteur d'eau dans la rivière, du niveau d'eau dans l'aquifère et d'un coefficient de colmatage (paramètre de calage). Le module *stream* utilise la formule de Manning-Strickler afin d'obtenir une relation entre le débit et la hauteur d'eau dans la rivière :

$$Q = \frac{1}{n} \cdot S \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

où Q est le débit au point de calcul, en $m^3 \cdot s^{-1}$;

n est le coefficient de rugosité de Manning ;

S est la surface de la section mouillée en m^2 ;

R_H est le rayon hydraulique (i. e. rapport entre la surface et le périmètre de la section mouillée), en m ;

i est la pente du cours d'eau.

En considérant ici une section rectangulaire du cours d'eau, et en ajustant le calcul avec la courbe de tarage du seuil SMARD (données SMRD), on obtient une largeur de chenal de 8 m, qui correspond grossièrement à la largeur d'un bras de la Drôme à l'étiage et un coefficient n de 0.03 (qui correspond à un coefficient de Strickler de 33.3), qui correspond à un chenal naturel composé de galets et de graviers [G.J. Arcement and Schneider., 1989].

Les données de consommations mensuelles des syndicats d'irrigation en rivière (seuils SMARD et Pues) sont également intégrées à la condition *stream*. Les données ont été récupérées auprès du SY-GRED (les données étant incomplètes, elles ont été extrapolées par des valeurs moyennes), et intégrées au modèle afin de représenter au mieux l'influence des prélèvements d'eau superficielle et de la nappe alluviale sur les débits de la Drôme.

Les sources de Barnaire et des Freydières ont été intégrées au modèle également à l'aide d'une condition *stream*.

La Grenette a été prise en compte comme affluent de la Drôme : lors de la visite de terrain, ce cours d'eau nous est apparu fortement colmaté, donc comme n'ayant pas d'interactions significatives avec l'aquifère directement. Dans le modèle, la Grenette est représentée comme un apport en débit dans la Drôme et les échanges avec la nappe sont rendus nuls. Les autres affluents non intégrés au modèle ont été pris en compte à travers la Grenette : on considère qu'ils apportent un pourcentage du débit de la Drôme entrant à Crest dans le bilan du cours d'eau.

Le module *stream* permet d'intégrer les caractéristiques hydrauliques et hydrogéologiques des cours d'eau. Les niveaux d'eau et les débits sont alors des "données de sortie" et ne sont pas des paramètres imposés au modèle comme dans une condition plus classique de type *river*. Outre l'avantage de

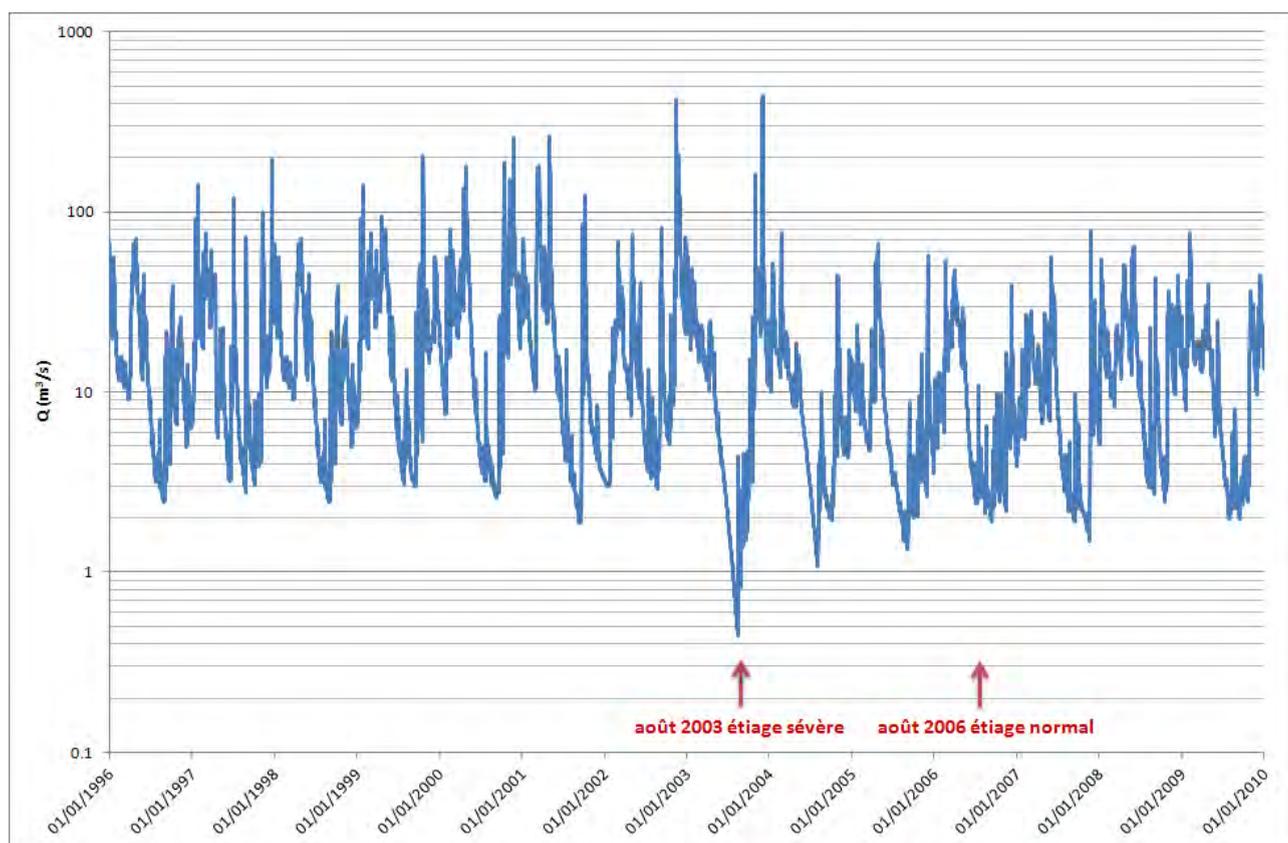


FIGURE 3.14 – Débits de la Drôme à Crest, d’après la modélisation hydrologique, entrés à l’amont du modèle hydrogéologique

modéliser les variations de débits de la rivière en prenant en compte les interactions avec l’aquifère, le module *stream* permet théoriquement de représenter les assècs du cours d’eau ; si le débit du cours d’eau dans la cellule amont du modèle est inférieur au débit drainé par la nappe, le cours d’eau ”s’assèche” numériquement en annulant la condition *stream* pour la cellule au pas de temps correspondant.

La représentation de la rivière Drôme dans le modèle hydrogéologique avec le module *stream* repose sur l’altitude du fond du lit : en effet, dans notre cas la hauteur d’eau dans la rivière n’est plus imposée mais elle est calculée à partir du débit. Les relevés LIDAR de 2010 ont été utilisés pour imposer le fond du lit dans le modèle : à partir du fil d’eau de la Drôme, une hauteur d’eau moyenne (30 cm) a été retranchée pour obtenir le fond du lit.

Recharge météorique

Le calcul de la recharge météorique découle de la construction d’un bilan hydrique au sens de Thornthwaite de la zone de Crest qui fait intervenir la pluviométrie, l’évapo-transpiration, et des paramètres de sol. Les valeurs de pluie et d’évapo-transpiration ont été obtenues auprès de MétéoFrance et complétées (pour l’évapo-transpiration) par des valeurs moyennes avant 2002. Les caractéristiques des sols de la plaine d’Alex sont basées :

- pour la réserve utile, sur les caractéristiques granulométrique et lithologique du sol de la plaine et de l’analyse des chroniques pluviométriques et piézométriques (la réserve facilement utilisable est également un paramètre de calage dans le modèle) ; il a été choisi une valeur de réserve facilement

utilisable de 40 mm,

- pour le bilan hydrique de la pluie, sur les coefficients culturaux calculés lors de la phase II de l'étude pour la désagrégation temporelle des prélèvements.

On obtient ainsi, en considérant que le ruissèlement est nul, une valeur moyenne d'infiltration de l'ordre de 375 mm/an sur la période 1997-2009 (cf. figure 3.15).

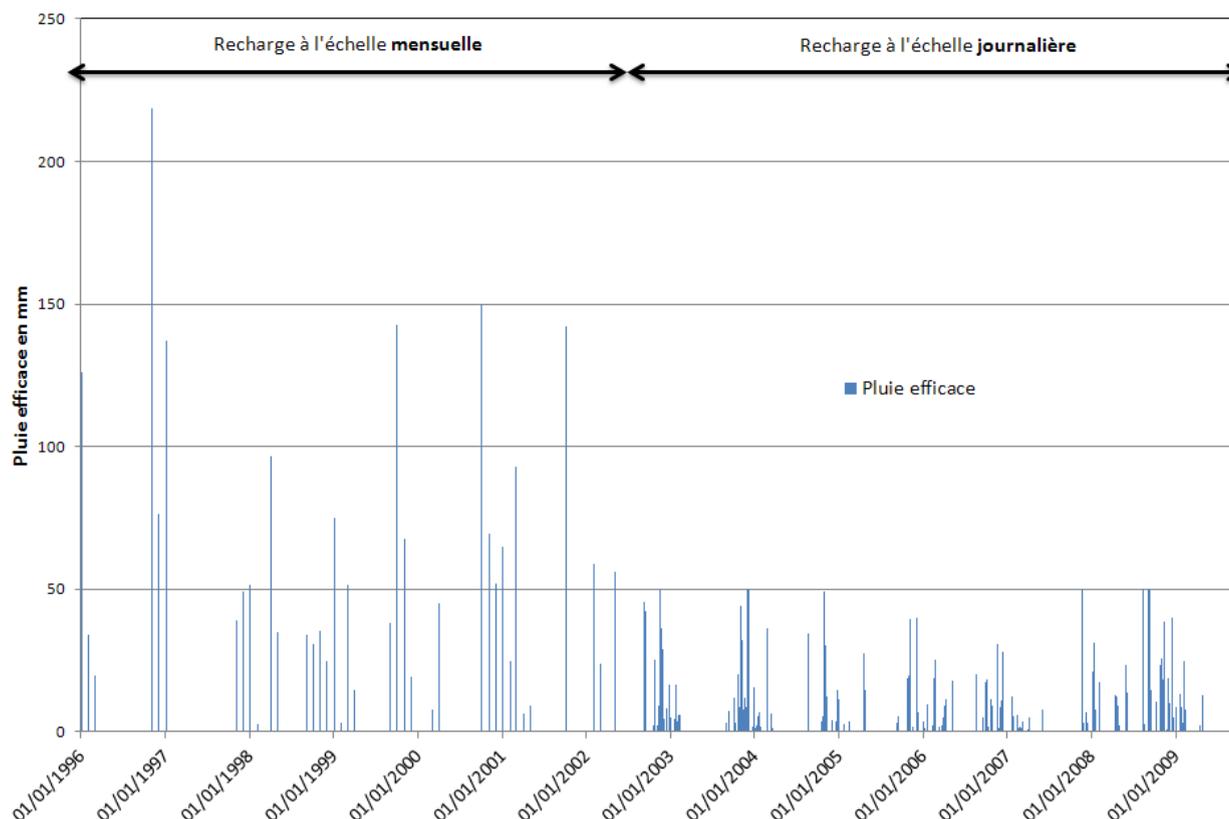


FIGURE 3.15 – Pluie efficace incorporée à la modélisation.

Prélèvements souterrains

Les prélèvements souterrains sont entrés au pas de temps mensuel jusqu'en 2002 puis au pas de temps journalier jusqu'en 2009.

Ces prélèvements correspondent en grande majorité à des captages d'eau destinée à l'irrigation (c'est-à-dire des prélèvements saisonniers). 4 prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable existent de part et d'autre de la Drôme, à Grâne et à Alex. Un prélèvement à usage industriel existe au nord du modèle.

D'une manière générale, le nombre de prélèvements souterrain a évolué entre 1996 et 2009. Afin de représenter exhaustivement les captages incorporés au modèle, c'est les prélèvements annuels de 2007 qui sont présentés sur la carte suivante.

L'évolution des prélèvements au cours de l'année a été pris en compte à partir des résultats de la phase II de l'étude.

La figure 3.16 présente l'évolution des volumes de prélèvements souterrains intégrés au modèle, la localisation de ces prélèvements est reportée sur la figure 3.17 page 127.

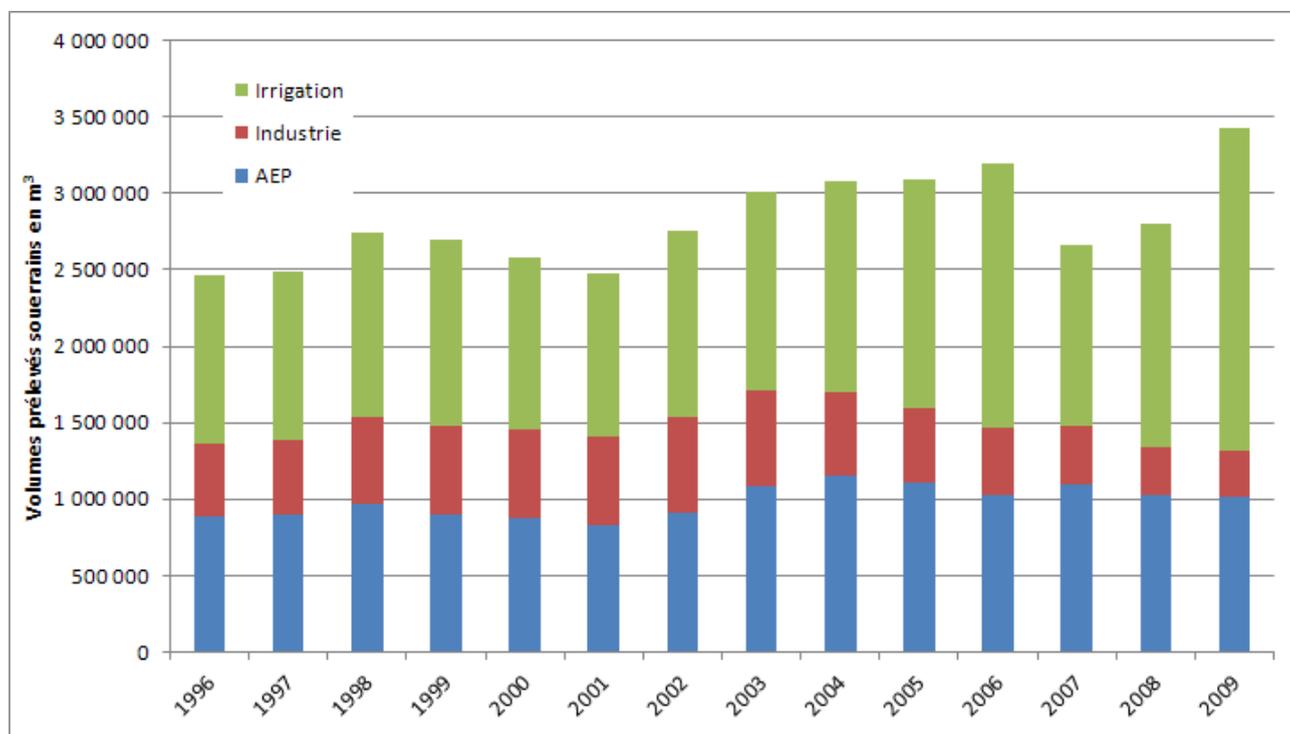


FIGURE 3.16 – Évolution des prélèvements souterrains annuels intégrés au modèle entre 1996 et 2009.

3.2.2.2.3 Calage du modèle numérique

Calage en régime permanent

Le calage du modèle vise à obtenir du modèle qu'il représente au mieux la réalité des écoulements souterrains : pour cela, les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère sont ajustées pour que de la piézométrie de la nappe soit la plus proche possible de celle observée. Le régime permanent, qui est une première étape permettant d'ajuster la perméabilité et la conductance des cours d'eau, a permis de représenter la piézométrie d'août 1996 (voir figure 3.18 page 127).

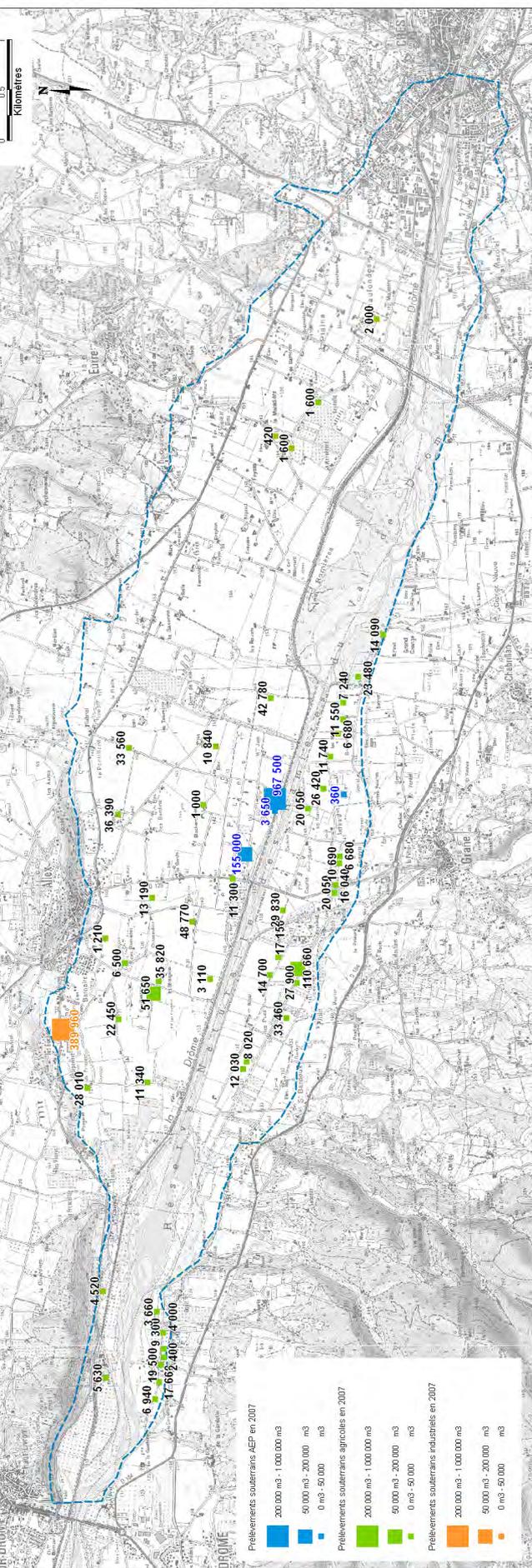


FIGURE 3.17 – Prélèvements souterrains annuels de 2007.

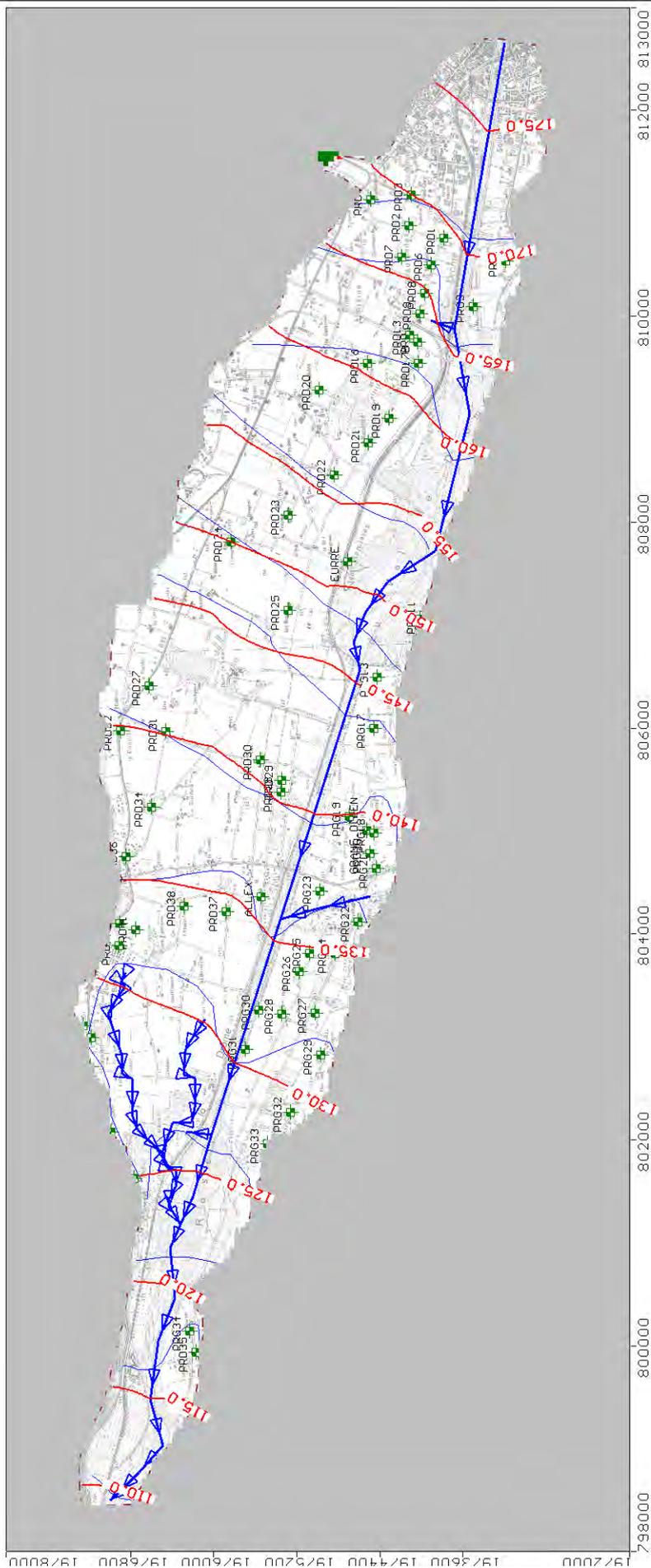


Figure 2.18 – Carte de répartition des prélèvements souterrains annuels en 2007

L'examen de la piézométrie simulée, montre que l'allure générale des isopièzes de référence (août 1996) est reproduite : les directions d'écoulement et les gradients modélisés sont similaires à ceux observés en 1996. L'écart entre les valeurs ponctuelles observées en 1996 et les valeurs simulées est inférieur à 1 mètre pour 70 % de ces points (voir figure 3.19).

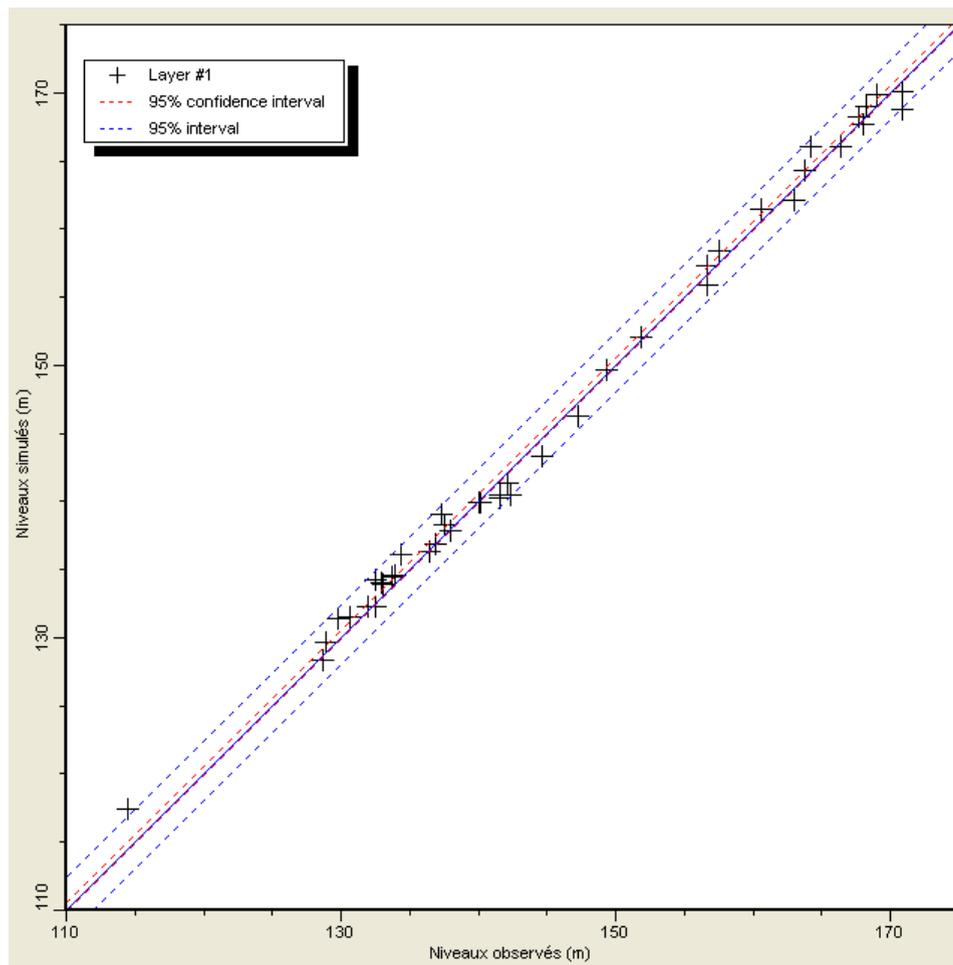


FIGURE 3.19 – Résultats statistiques du calage en régime permanent.

Les valeurs des plages de perméabilité obtenues après calage (permanent, puis transitoire) vont de $2.10^{-4} m/s$ à $1.10^{-2} m/s$, avec une majorité de la plaine dont la perméabilité est située entre $1.10^{-3} m/s$ à $6.10^{-3} m/s$ (voir carte de la figure 3.20). Les valeurs de perméabilité retenues sont comparables avec celles de la bibliographie et du modèle présenté par IdéesEAUX [2010a] (modèle partiel de la plaine d'Allex, établi en régime permanent).

L'évolution du débit dans la Drôme est conforme avec les mesures des débits de la Drôme et l'analyse qui en a été faite. La Drôme perd 88 L/s entre Crest et le seuil SMARD, puis 348 L/s entre le seuil SMARD et Pues (sans compter le prélèvement d'eau de surface au seuil SMARD et des Pues). L'aquifère est drainé entre le seuil des Pues et Livron, entraînant une augmentation de débit dans la Drôme de 327 L/s. Les sources de Barnaires et Freydières apportent 128 L/s (à la confluence avec la Drôme).

Le bilan hydrique du calage en permanent (cf. table 3.2) montre le rôle essentiel de Drôme dans l'aquifère, vis-à-vis des pompages et de la recharge météorique. Le bilan entrée/sortie peut être considéré comme équilibré (différence inférieure à 0,5%).

La figure 3.21 synthétise le bilan hydrique de la nappe et de la Drôme dans la plaine d'Allex.

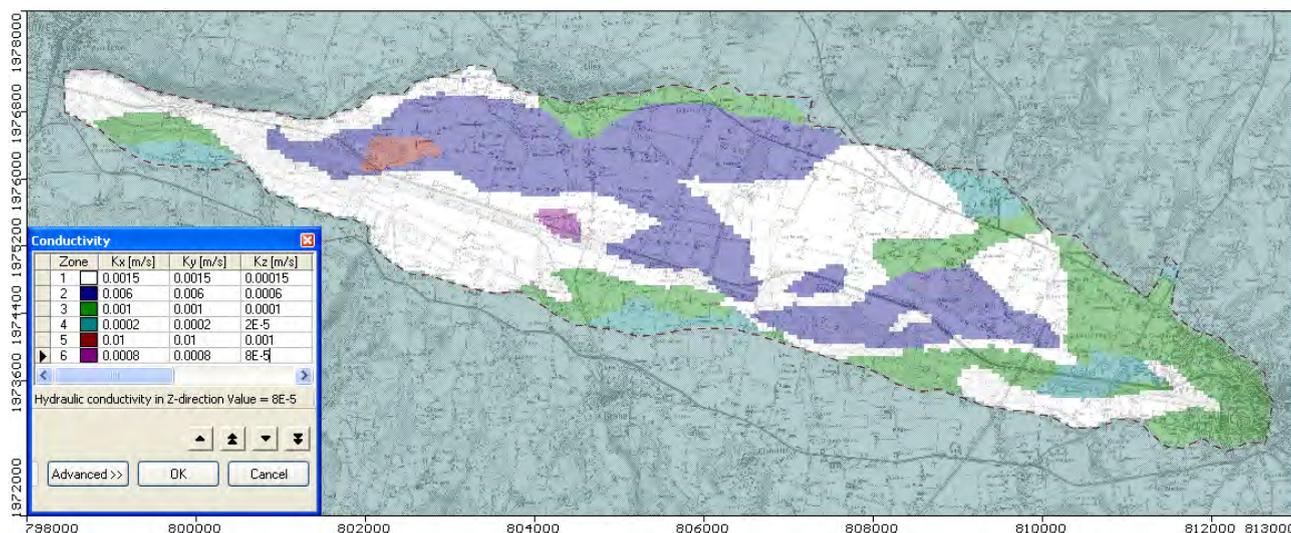


FIGURE 3.20 – Zones de perméabilités obtenues lors du calage. Les valeurs de perméabilités déduites des essais de pompage sont cohérentes avec la localisation et les ordres de grandeurs des plages de perméabilité issues du calage

	Entrée d'eau dans l'aquifère (en l/s)	Sortie d'eau de l'aquifère
Cours d'eau (Drôme, sources)	1 161	1 001
Recharge pluviométrique et apports des versants	93	
Prélèvements souterrains		202
Aquifère aval (via la condition <i>constant head</i>)		46
TOTAL =	1 254	1 248

TABLE 3.2 – Bilan hydraulique du calage en régime permanent (étiage 1996).

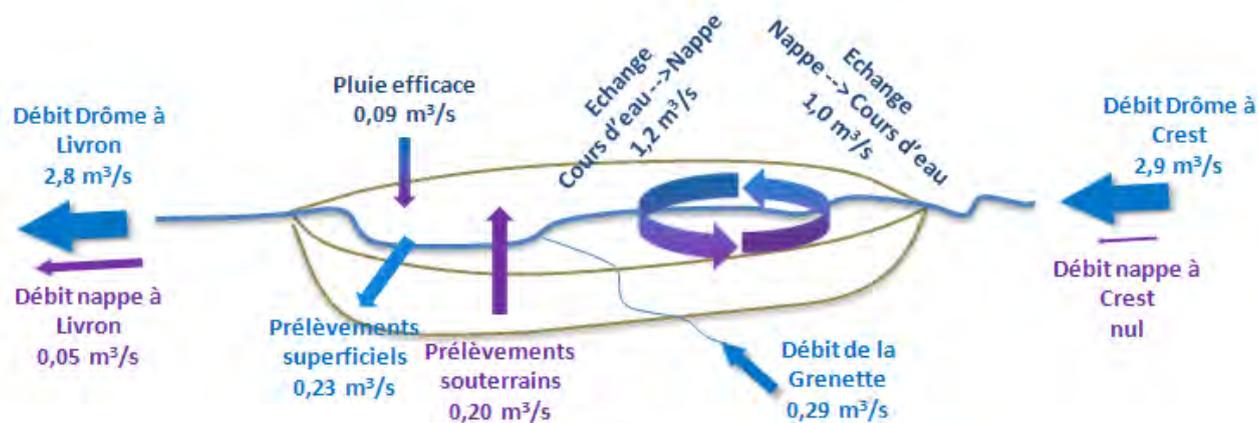


FIGURE 3.21 – Bilan hydraulique du calage en régime permanent.

Calage en régime transitoire

Pour le calage du modèle en régime transitoire, trois zones de coefficient d'emmagasinement (Specific yield, S_y) différentes ont été représentées : une zone de porosité de 15 % sur une grande partie de la plaine, une zone de porosité de 25% pour les zone de perméabilités plus fortes, et une zone de porosité de 10 % sur une partie de la rive gauche de la Drôme (cf. figure 3.22).

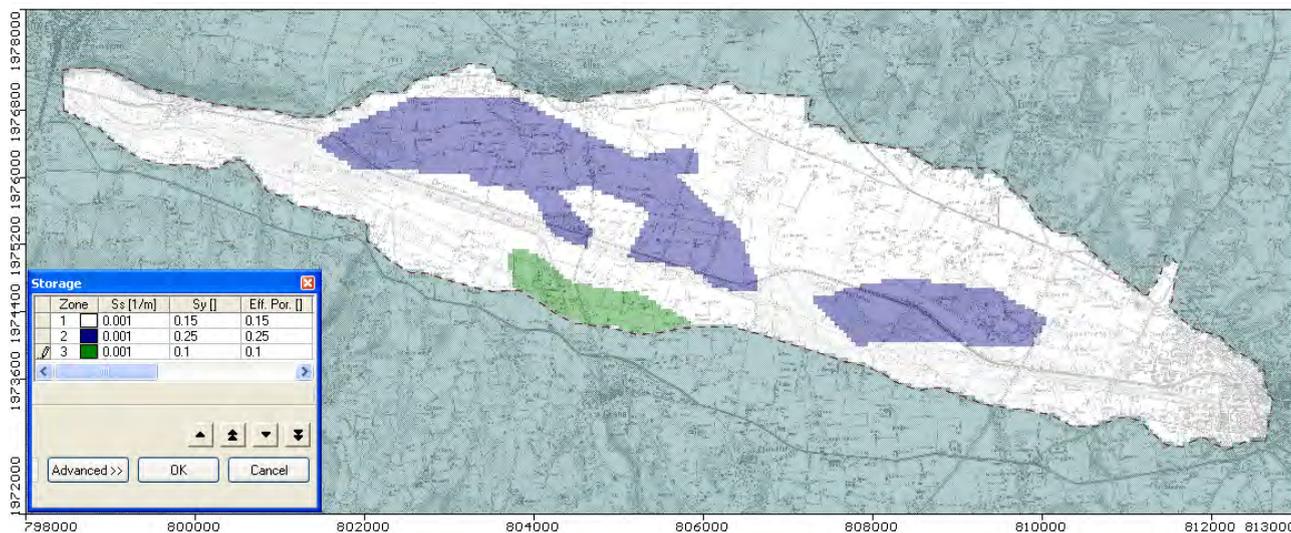


FIGURE 3.22 – Zones de coefficients d'emmagasinement obtenues à l'issue du calage.

Le calage en régime transitoire a été réalisé à partir des 2 chroniques piézométriques disponibles sur la période modélisée : les piézomètres d'Eurre et de Grâne (DIREN), une localisation est donnée en figure 3.8. La comparaison entre la chronique observée et celle simulée pour chaque point est présentée sur les figures 3.23, 3.25 et 3.26. De plus, les piézométries simulées d'août 1996 et janvier 1997 ont été comparées avec les piézométries observées à ces dates.

Pour le piézomètre de Grâne (figure 3.23), l'amplitude des fluctuations piézométriques observées ainsi que les temps de réaction rapide de la nappe sont correctement reproduits par le modèle numérique. La réactivité de la nappe est liée à la fois aux conditions hydrologiques de la Drôme et à la recharge pluviométrique intégrées dans le modèle.

Néanmoins, on remarque (figure 3.23) des différences relativement importante entre l'observé et le simulé en particulier pour les étiage 2003 et 2004. Cela s'explique par le fait que l'amplitude de certains étiages au droit de Grâne est accentuée par les cycles de pompages d'irrigation proches du lieu de mesure (cf. § 3.2.2.1.4) et que la modélisation ne peut pas les reproduire (pas de temps inférieur au pas de temps journalier, voir figure 3.24). Ces "artefacts" seraient alors représentatifs du niveau de la nappe localement uniquement, et le biais de la modélisation vis-à-vis de la réalité n'est plus significatif si l'on raisonne avec des niveaux de nappe moyens dans le temps. On constate cependant que le niveau de nappe retrouvé quotidiennement juste après l'arrêt des pompages est correctement modélisé.

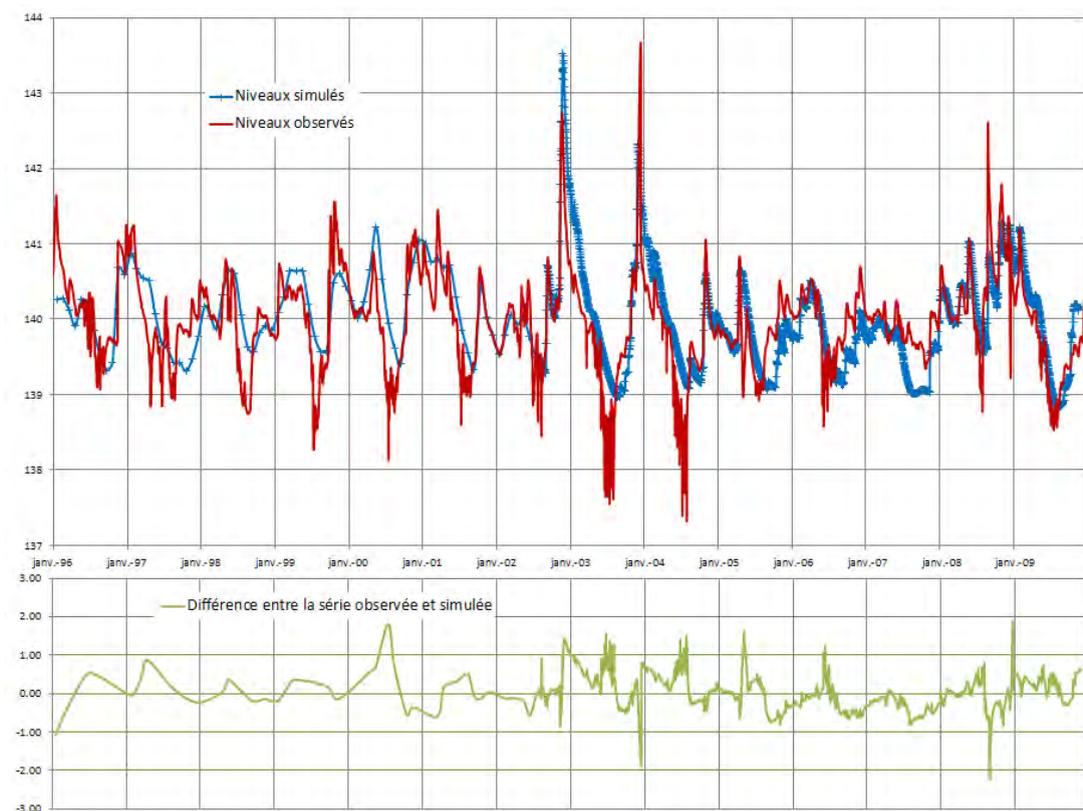


FIGURE 3.23 – Calage du modèle en régime transitoire au point d’observation de Grâne (DREAL n°08423X0067).

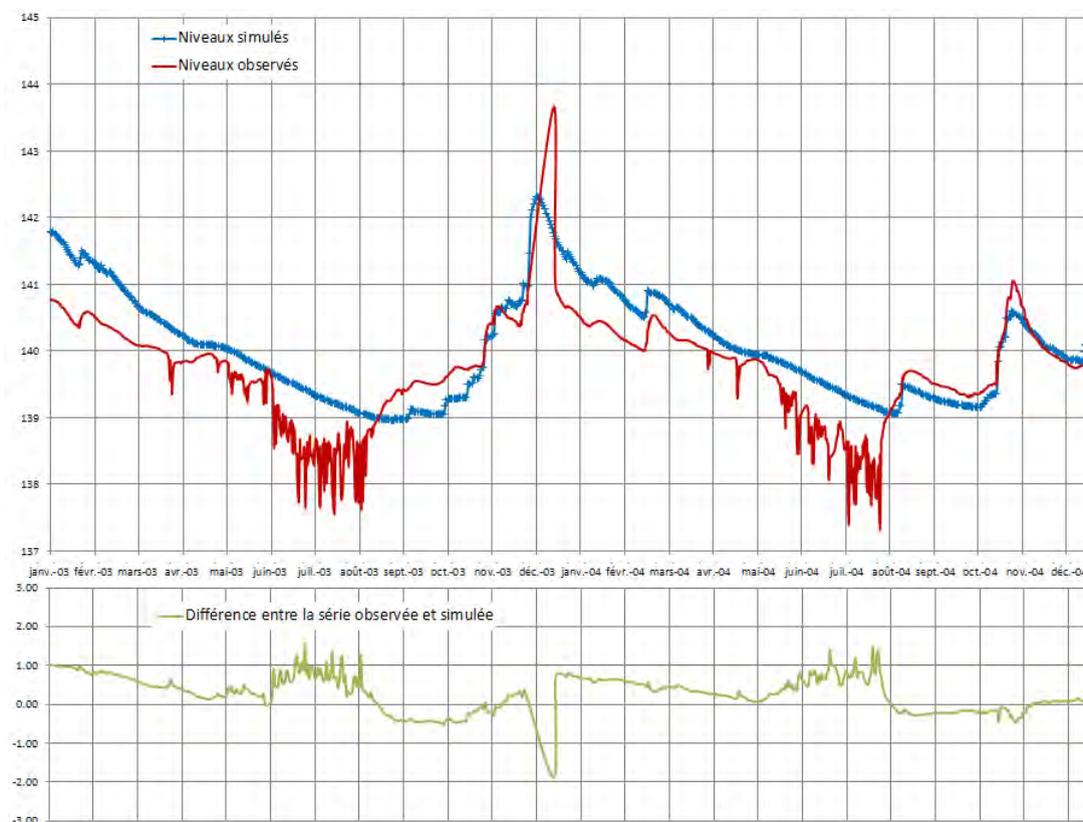


FIGURE 3.24 – Zoom sur les étiages 2003 et 2004 au point d’observation de Grâne

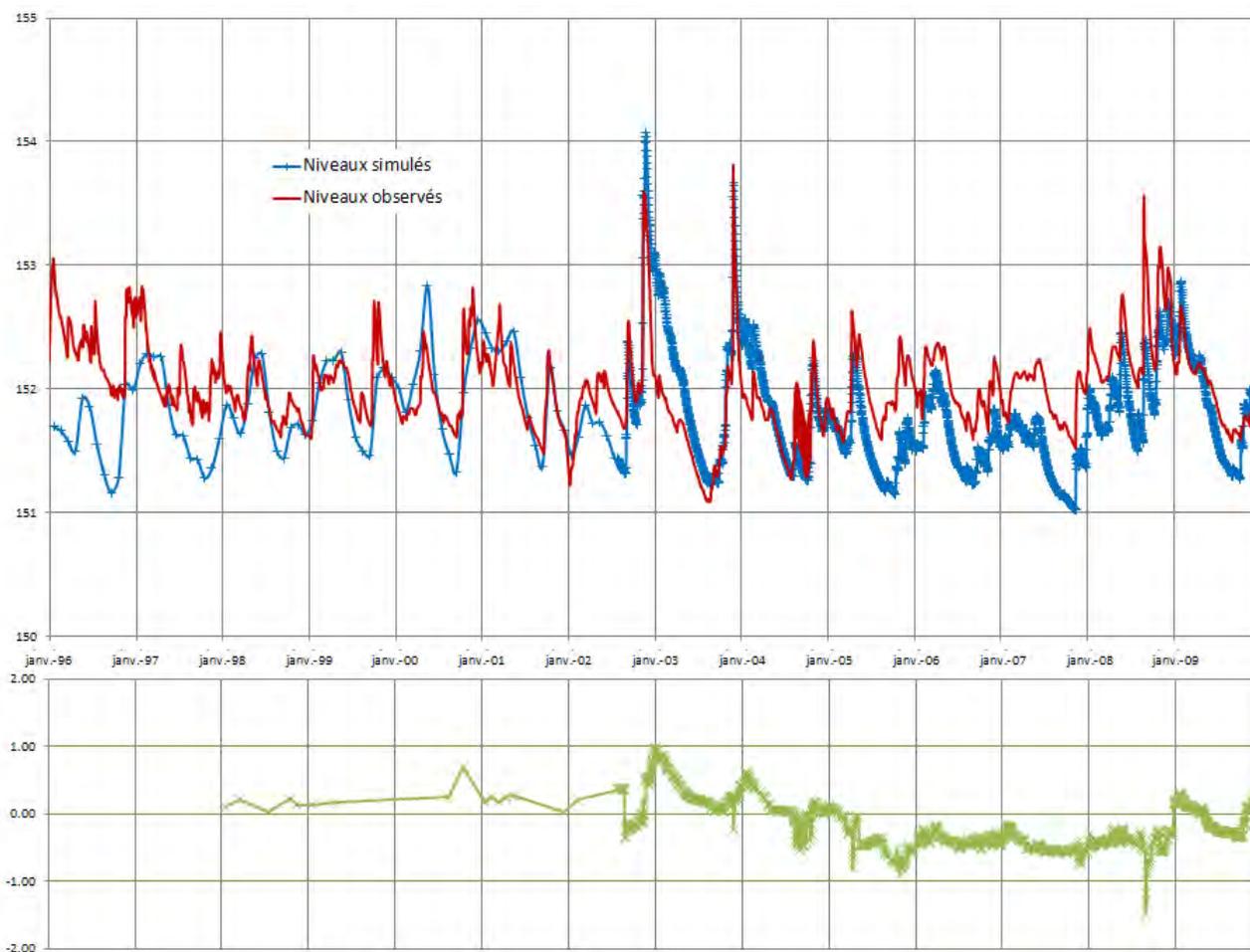


FIGURE 3.25 – Calage du modèle en régime transitoire au point d’observation d’Eurre (DREAL n°08424X0006).



FIGURE 3.26 – Calage du modèle en régime transitoire au point d’observation d’Alex (SMRD) ; ce piézomètre n’étant pas nivelé, sa chronique n’est donné qu’à titre indicatif, permettant d’observer la comportement relatif de la piézométrie.

Pour le piézomètre d'Eurre, La figure 3.25 montre un petit décalage entre la chronique simulée et observée entre 2005 et 2009. Ceci pourrait s'expliquer par un changement latéral de position de la Drôme par rapport au piézomètre, induisant un décalage du niveau de base au piézomètre : en effet, le piézomètre d'Eurre se trouve dans la zone des Ramières dans laquelle la divagation de la Drôme est importante. Ce décalage ne modifie pas le fonctionnement général de l'aquifère.

La figure 3.26 montre que les fluctuations piézométriques du piézomètre d'Alex sont correctement reproduites.

L'utilisation du module *stream* permet de visualiser l'évolution du débit de la Drôme lors de sa traversée de la plaine alluviale. A titre d'exemple, la figure 3.27 présente la situation de la Drôme simulée le 7 août 2006, comparée aux mesures d'août 2010, pour lesquels les conditions hydrogéologiques et hydrologiques sont relativement proches (débit d'entrée de la Drôme à Crest identique, et niveaux piézométriques proches). On remarque que l'évolution des débits est assez bien représentée, compte tenu de la précision d'une telle modélisation d'une part, de l'erreur relative intrinsèque aux mesures de jaugeages ($\approx 10\% - 20\%$) d'autre part, et des conditions de prélèvement certainement différentes.

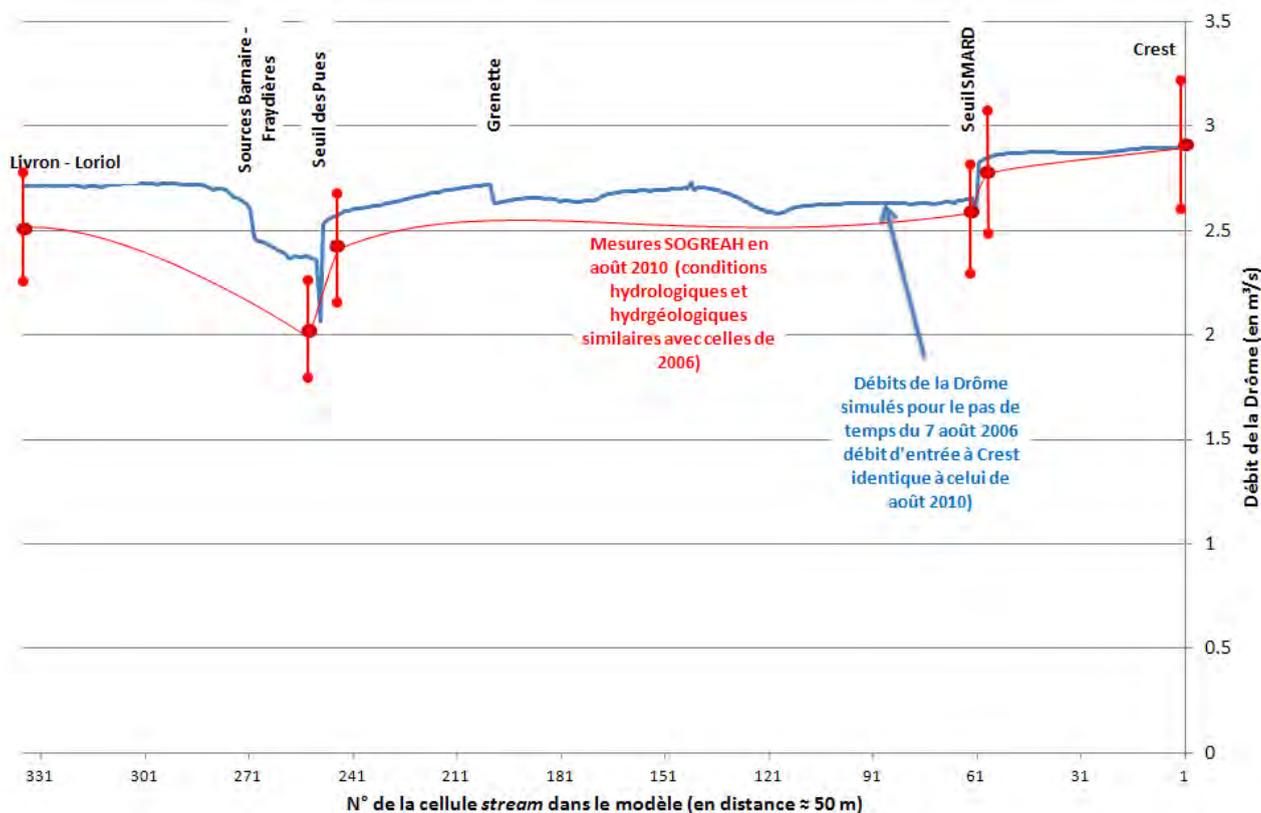


FIGURE 3.27 – Résultats du module *stream* sur les débits de la Drôme en août 2006 et comparaison avec les mesures de août 2010 (les deux périodes sont similaires d'un point de vue hydrologique et hydrogéologique).

La figure 3.28 montre le bilan hydrique de la situation du 7 août 2006.

Pour la représentation de l'assec de 2003, la date du 10 août a été retenue, car elle est au plus fort de l'étiage de cette année.

Stockage temporaire = + 0,27 m³/s

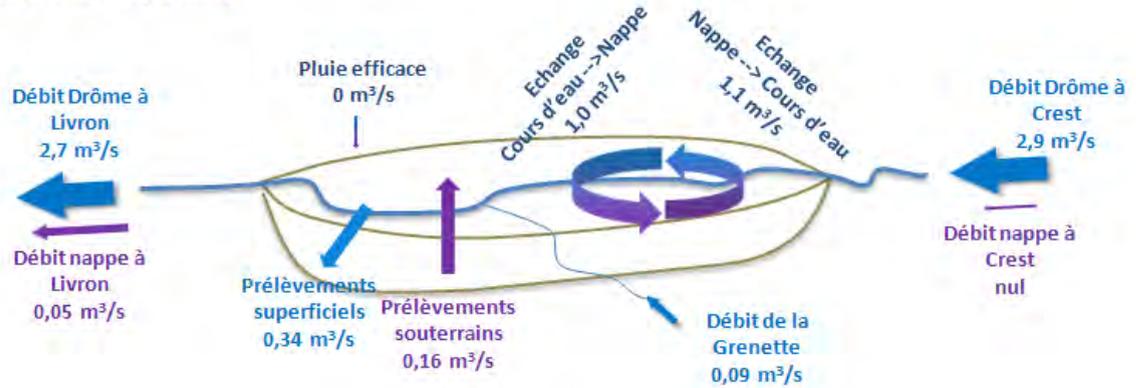


FIGURE 3.28 – Bilan hydraulique du calage en régime transitoire pour le 7 août 2006.

Le fonctionnement du module *stream* permet de reproduire dans les grandes lignes les assècs à l'aval du seuil des Pucs. Néanmoins, le fonctionnement de cette condition aux limites fait que le prélèvement en rivière est annulé quand le débit dans la rivière n'est plus assez important. L'extension temporelle des assècs est donc bien reproduite (environ 10 jours en 2003, ce qui semble cohérent avec les informations recueillies) ; par contre, l'extension spatiale est plus faible que celle observée (seule une cellule à l'aval du seuil est asséchée, soit environ 50 mètres de rivière, cf. figure 3.29, contre plusieurs centaines de mètres dans la réalité).

La figure 3.30 montre le bilan hydrique de la situation du 10 août 2003.

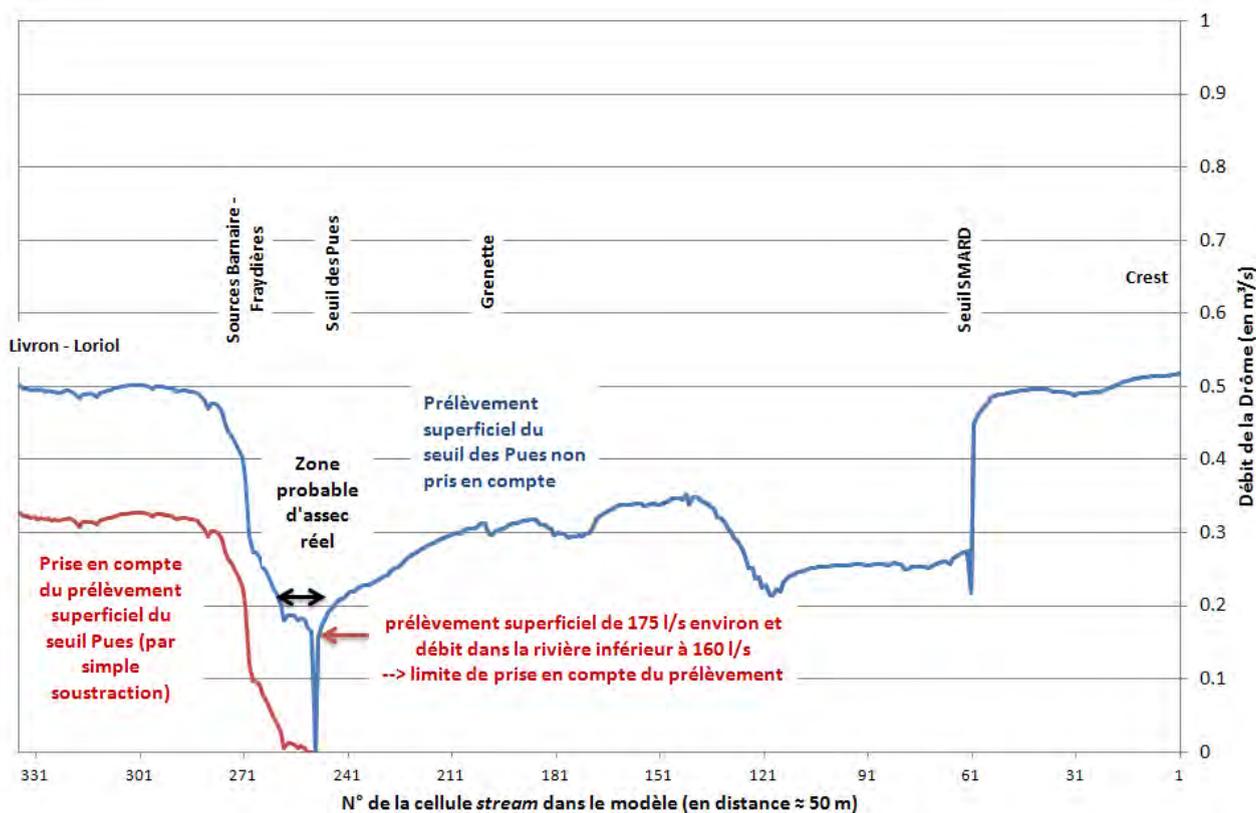


FIGURE 3.29 – Résultats du module *stream* sur les débits de la Drôme le 10 août 2003, lors de la période d’assec. A titre indicatif, il est représenté, en rouge, le débit de la Drôme modélisé auquel est retranché le prélèvement du seuil des Pues (175 L/s) ; il est à noter que ce dernier résultat est à prendre avec précaution, car il n’inclue pas toutes les interactions avec l’aquifère.

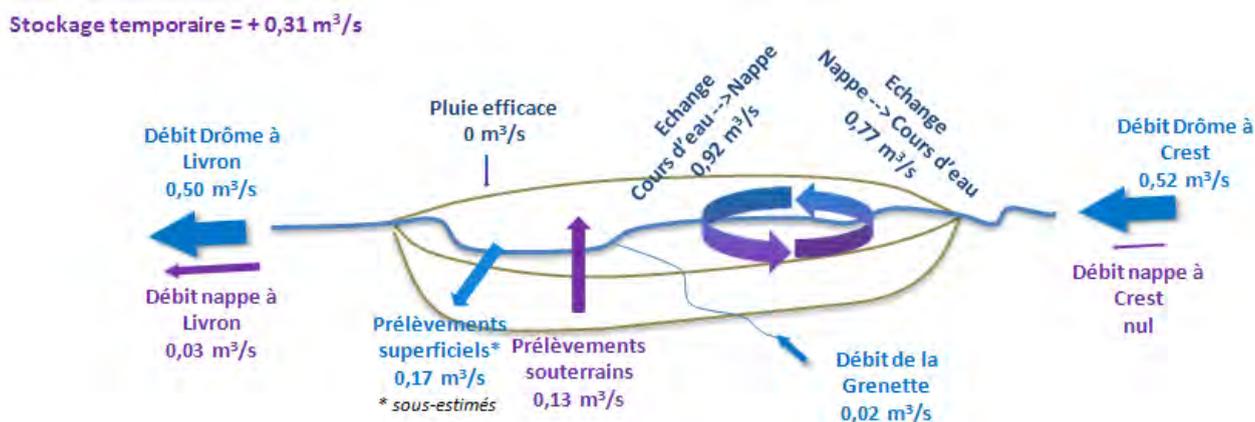


FIGURE 3.30 – Bilan hydraulique du calage en régime transitoire pour le 10 août 2003 (les prélèvements en rivière sont donc sous-estimés, comme indiqué dans le texte).

Comparaison avec le modèle IdéesEAUX 2010

IdéesEAUX [2010a], dans son étude sur le suivi de l'influence d'un prélèvement dans la rivière Drôme et sa nappe d'accompagnement pour le compte du Syndicat d'Irrigation d'Alex Montois, a réalisé un modèle de la nappe de la plaine d'Alex. Ce modèle ne couvre que partiellement l'extension de la nappe de la plaine d'Alex (voir figure 3.31).

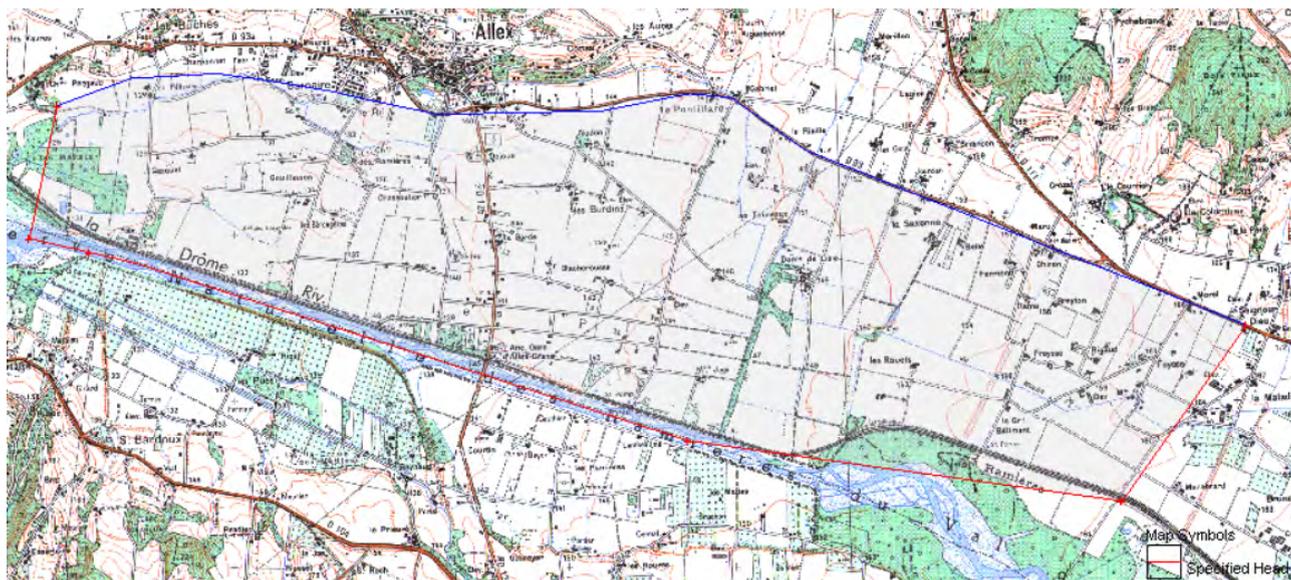


FIGURE 3.31 – Extension du modèle hydrogéologique d'IdéesEAUX sur la plaine d'Alex, tiré de IdéesEAUX [2010a]

Le but de ce modèle n'est pas tout à fait le même que celui mis en œuvre dans la présente étude, car il vise à modéliser la nappe sur les périodes de recharge et pas forcément à reproduire la variabilité intra-annuelle et inter-annuelle sur le long terme. Si les données de perméabilité et les données piézométriques utilisées sont globalement les mêmes pour les deux modèles, une des différences principales est le traitement des interactions entre la nappe et la rivière Drôme. Le modèle IdéesEAUX fonctionne à charge constante en bordure de Drôme, ce qui signifie que si le niveau de la nappe baisse, un appel d'eau se fera et pourra toujours être satisfait alors qu'en réalité, le potentiel d'infiltration de la rivière vers la nappe est plafonné par le débit de la rivière en période d'étiage⁴. En régime permanent, les résultats des deux modèles semblent équivalents. Les résultats du calage en régime transitoire (réalisés apparemment sur une courte période) ne sont pas présentés dans le rapport dont nous disposons. La réponse de la nappe aux scénarios de recharge pourront être comparés entre les deux modèles à l'issue de la phase 6, si les résultats finaux de l'étude d'IdéesEAUX seront connus à ce moment là.

4. c'est pour cela que la condition "stream" a été choisie dans notre modélisation

3.3 Reconstitution de l'hydrologie et de l'hydrogéologie non influencée

3.3.1 Reconstitution globale des débits superficiels

Une fois le modèle hydrologique calé, les débits d'étiage sur les tronçons modélisés (mais aussi du reste de l'année) peuvent être calculés, sur la période de modélisation, en prenant en compte les prélèvements/rejets ou au contraire en ne gardant que les écoulements naturels. Les figures 3.32 à 3.35 présentent les débits mensuels quinquennaux secs et médians le long de la Drôme pour les mois d'été, dans une situation avec prélèvement/restitutions et une situation naturelle.

On retrouve bien que l'impact des prélèvements sur les débits est bien plus élevé à l'aval de Crest que sur le reste du bassin. Au pas de temps mensuel, ce sont les mois de juillet et d'août qui sont les plus impactés, et les débits sur ces deux mois sont sensiblement équivalents. L'impact des prélèvements est plus limité en juin du fait des débits encore soutenus du printemps (contribution de la fonte nivale sur le haut bassin). L'impact au mois de septembre est quant à lui assez faible, les prélèvements agricoles étant déjà beaucoup plus limités à cette époque. Cependant, en année quinquennale sèche (soit en général des années où les pluies d'automne n'ont pas encore fait regrossir la rivière), les débits naturels restent très bas, et il ne faudrait pas que la pression de prélèvement soit plus importante.

L'impact relatif des prélèvements sur le débit par rapport à ce que serait le débit naturel ($Debit_{naturel\moyen} - Debit_{anthropise\moyen} / Debit_{naturel\moyen}$) a été pointé sur l'ensemble du bassin sur les figures 3.36 et 3.37 pour une situation quinquennale sèche et pour une situation médiane pour les mois de juillet. Les impacts négatifs sur le haut de la Gervanne correspondent au rejet de la STEP du hameau des Boutons à Omblèze, supérieurs aux prélèvements en amont.

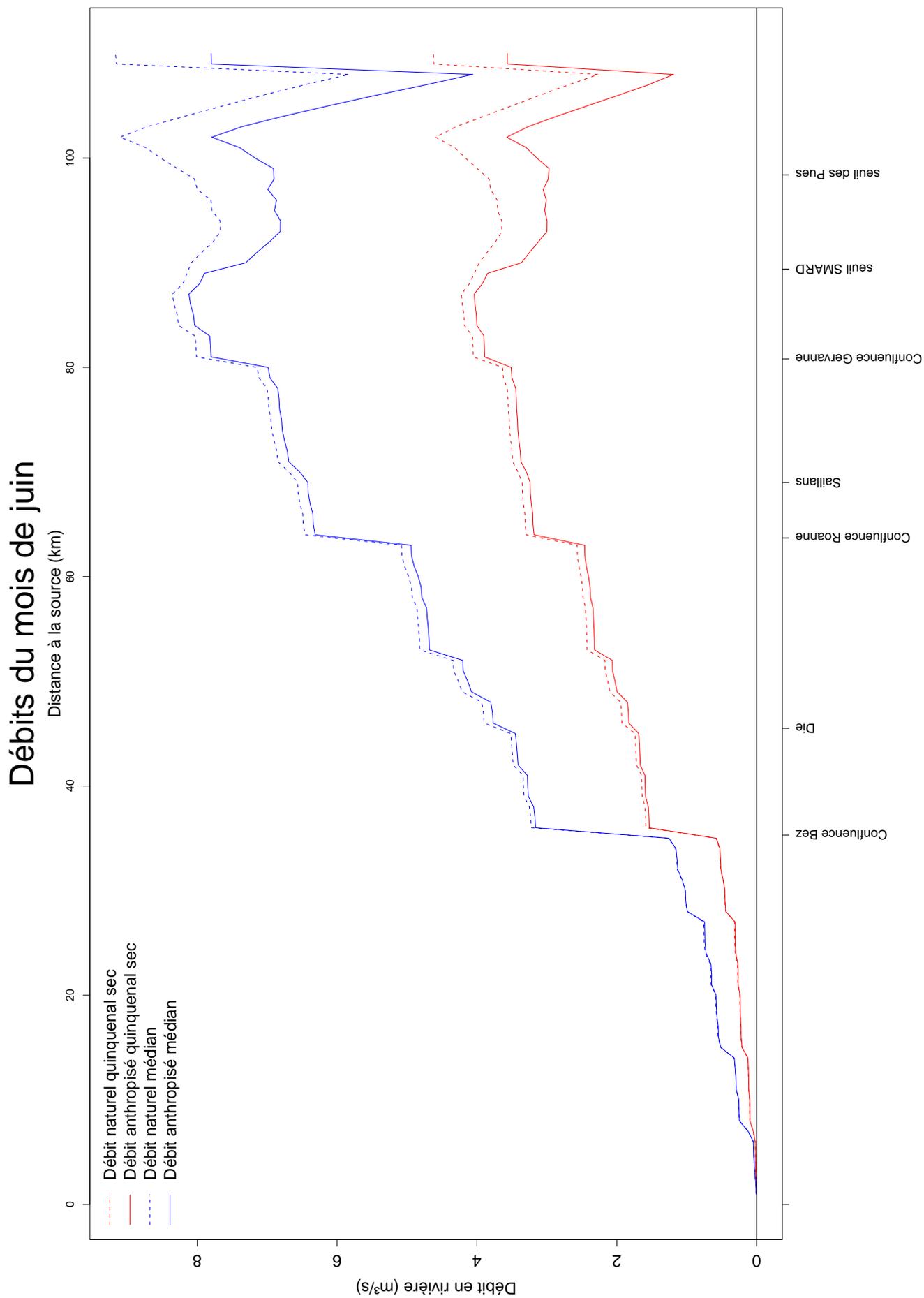


FIGURE 3.32 – Débits mensuels naturels et anthropisés du mois de juin sur la Drôme.

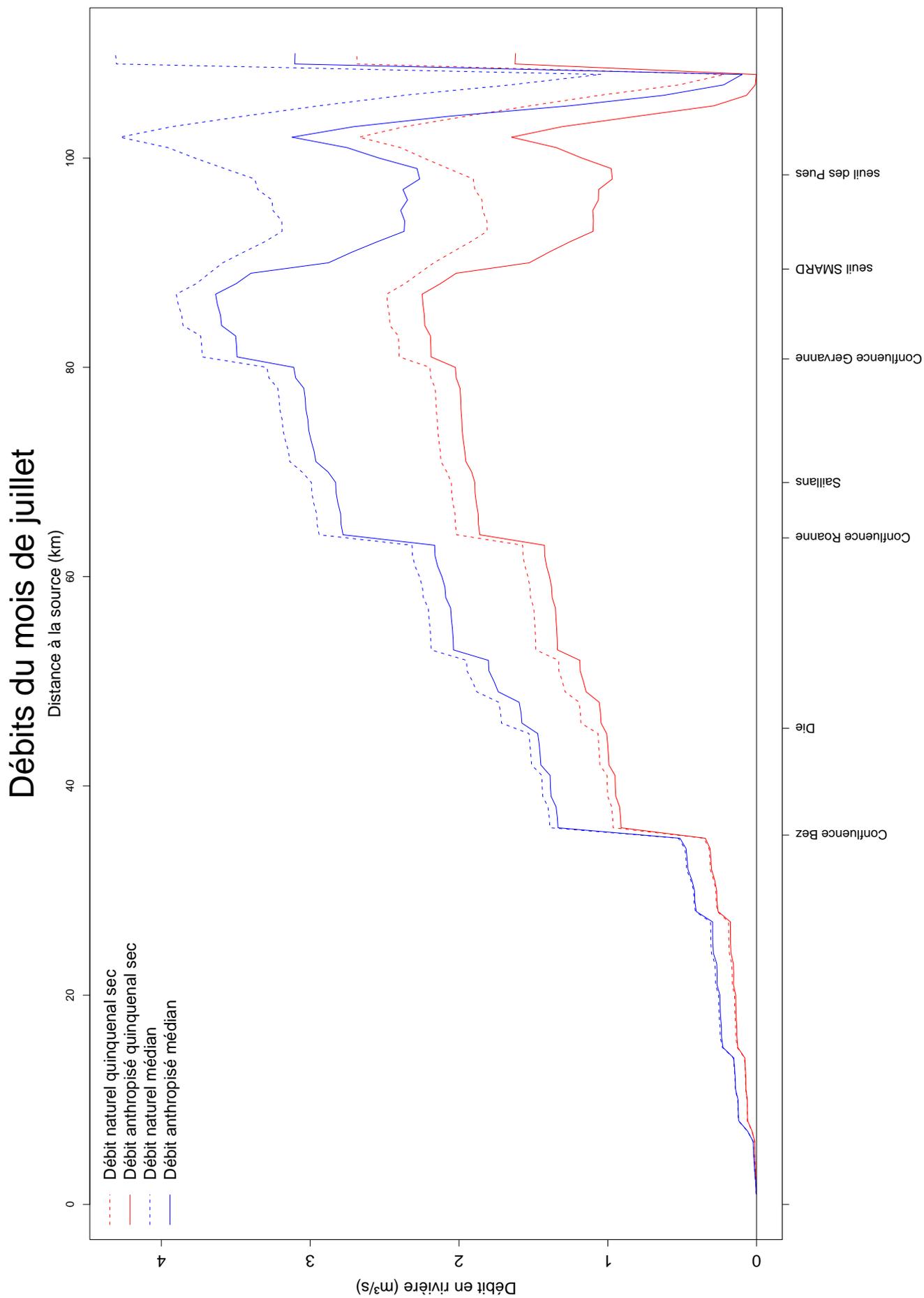


FIGURE 3.33 – Débits mensuels naturels et anthropisés du mois de juillet sur la Drôme.

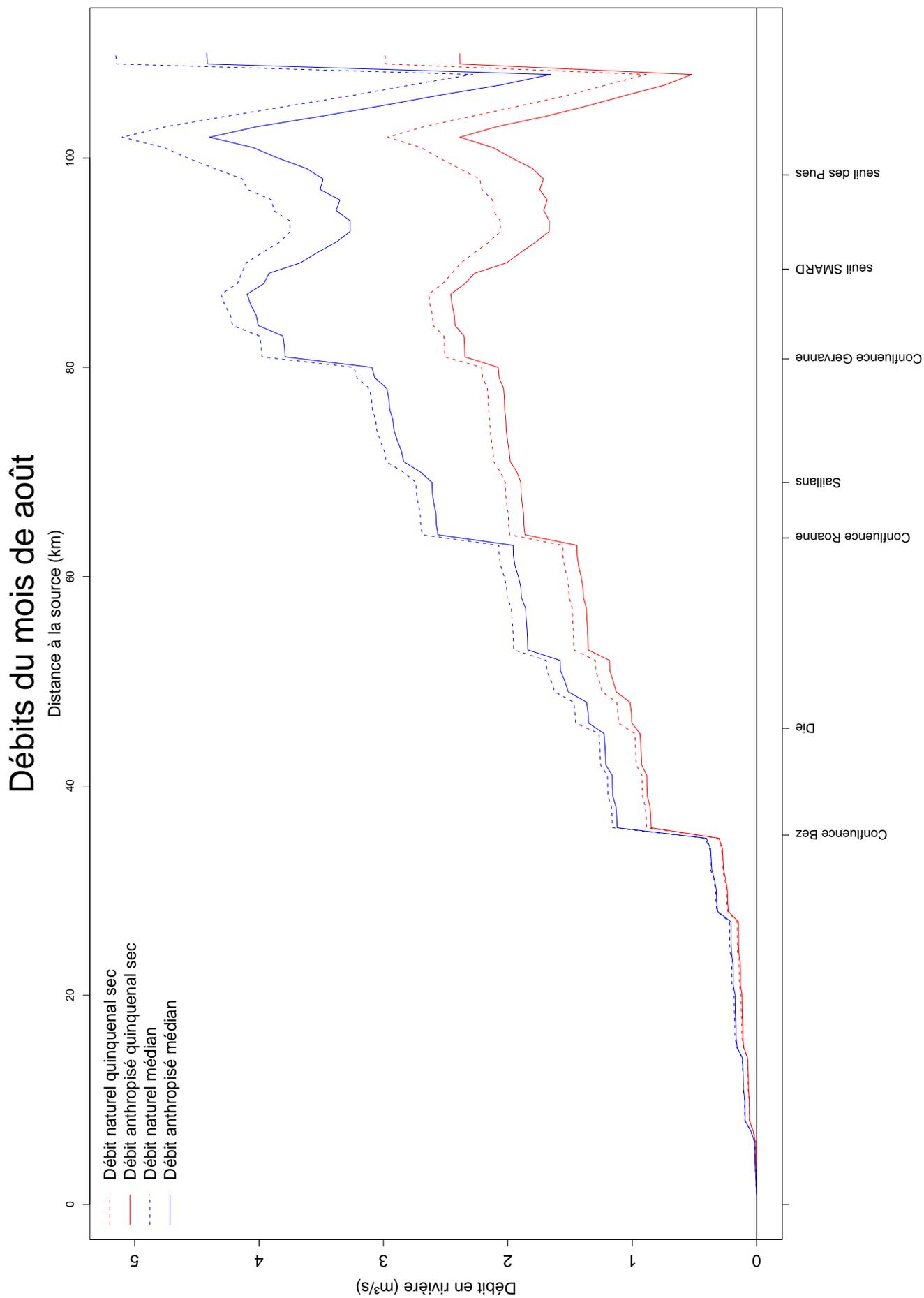


FIGURE 3.34 – Débits mensuels naturels et anthropisés du mois d’août sur la Drôme.

Débites du mois de septembre

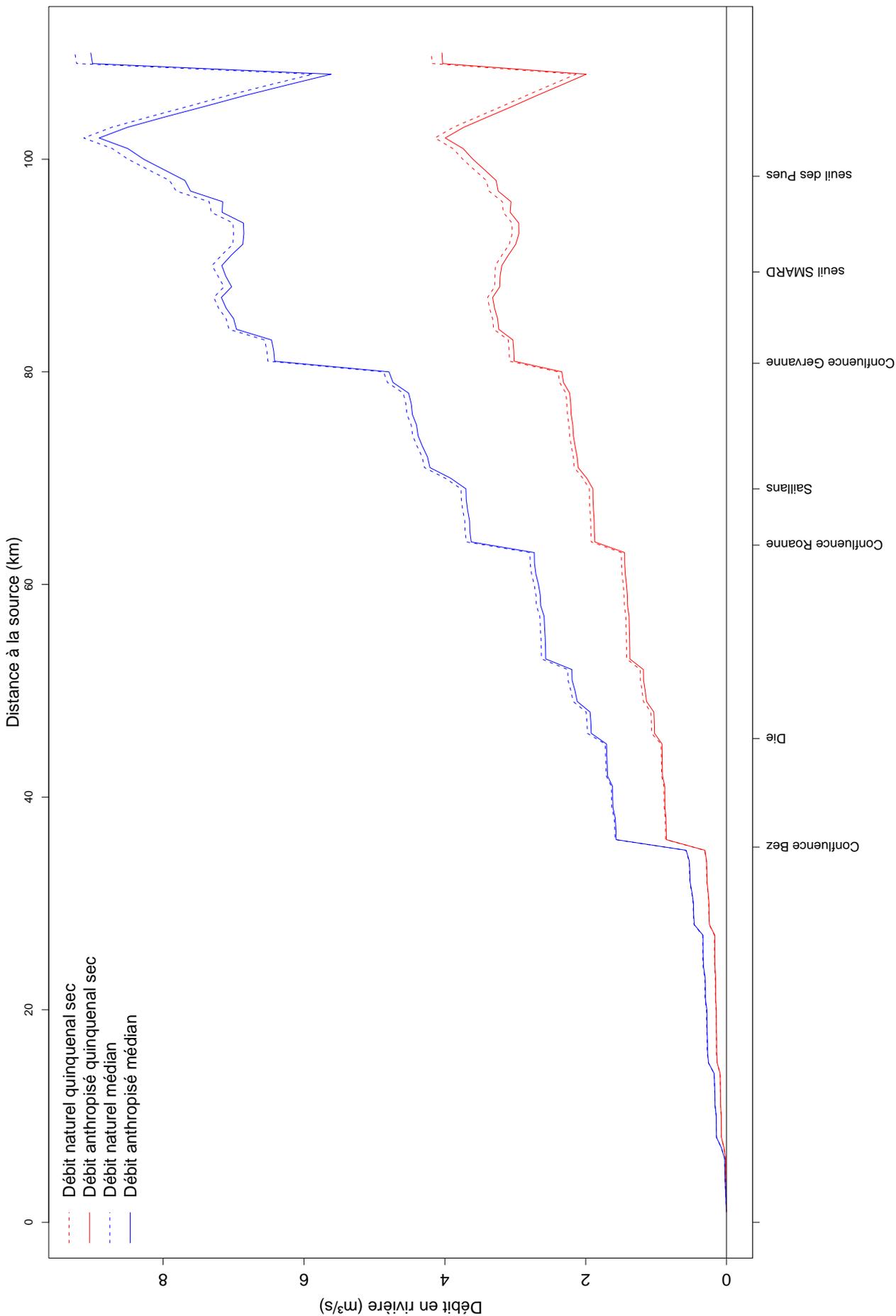
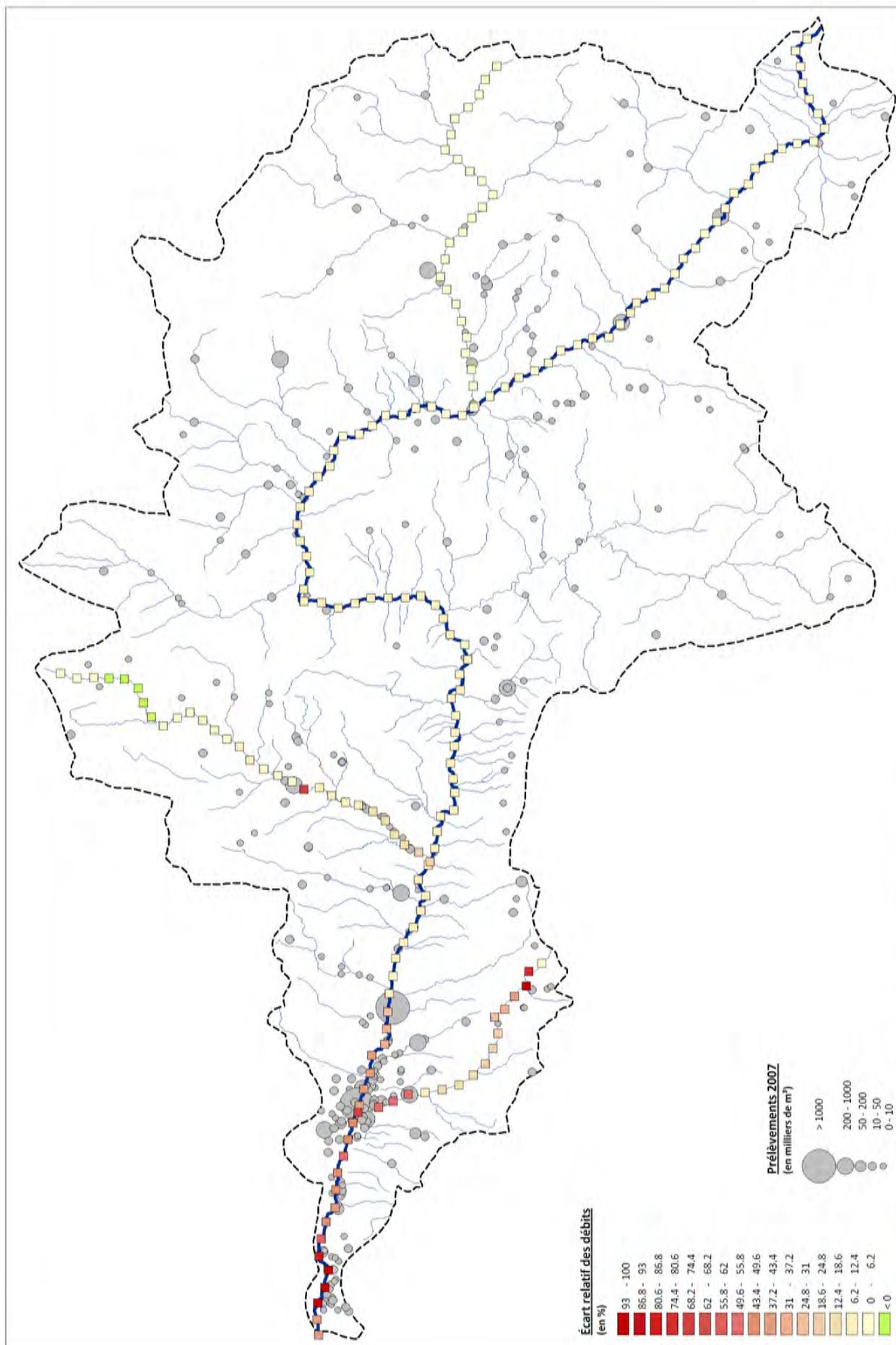
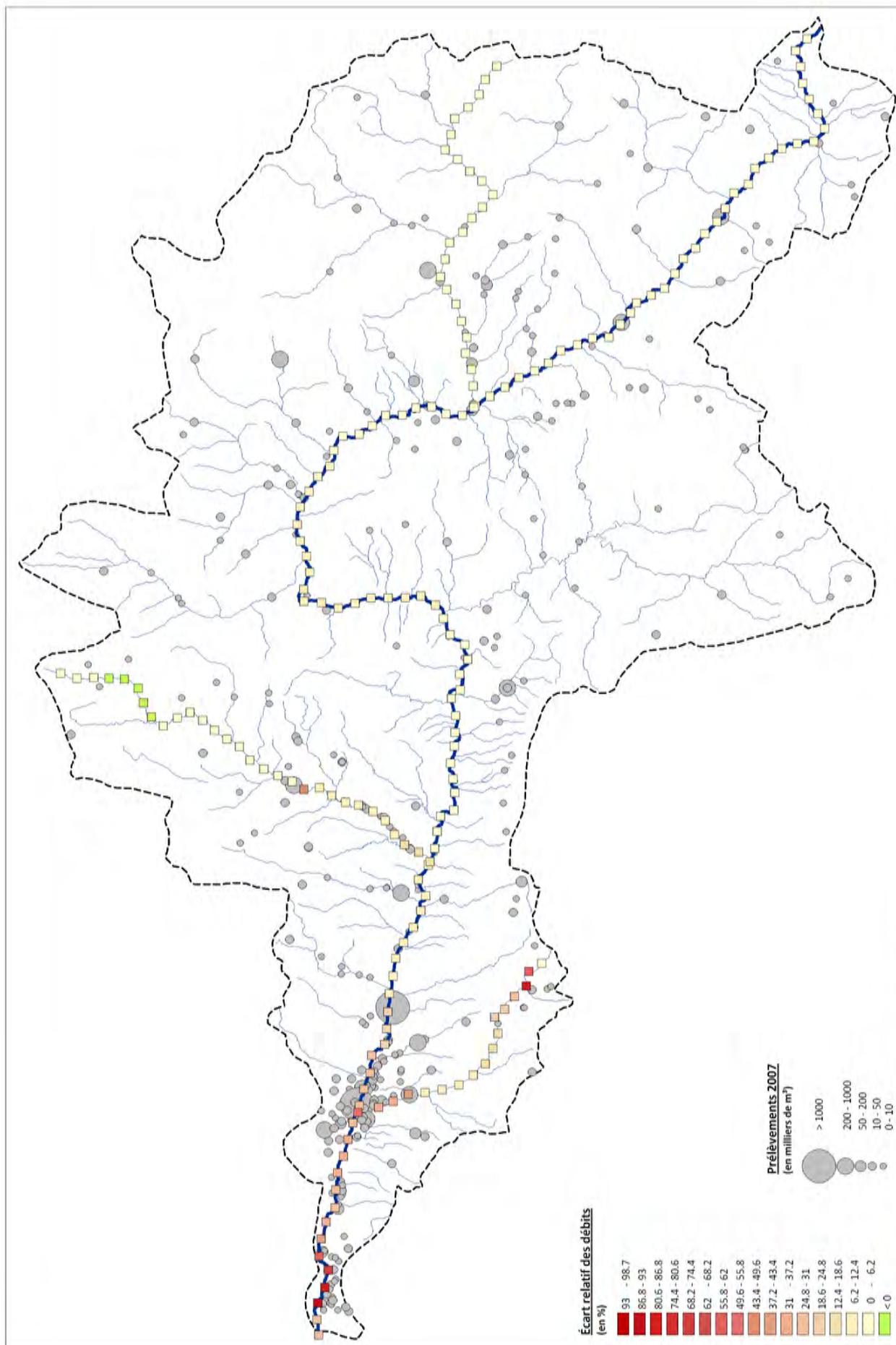


FIGURE 3.35 – Débits mensuels naturels et anthropisés du mois de septembre sur la Drôme.



Carte des écarts relatifs des débits de juillet quinquénaux secs

FIGURE 3.36 – Impact relatif des prélèvements sur les débits en situation quinquennale sèche sur le mois de juillet. Les prélèvements recensés sur le bassin sont rappelés



Carte des écarts relatifs des débits de juillet médian

FIGURE 3.37 – Impact relatif des prélèvements sur les débits en situation médiane sur le mois de juillet. Les prélèvements recensés sur le bassin sont rappelés

Nous avons calculé les débits statistiques d'étiage suivants :

- QMNA₅ : débit moyen mensuel, minimum sur l'année, de période de retour sur 5 ans. Cet indicateur, malgré son manque de pertinence, sert souvent de référence d'étiage
- VCN₃ : débit moyenné sur 3 jours, minimum sur l'année, de période de retours sur 5 ans.
- 1/10 : dixième du module. Cet indicateur est souvent utilisé pour quantifier les débits réservés.

Les calculs ont été faits de la façon suivante pour les QMNA et les VCN. Pour chaque grandeur, la chronique des minimum annuels a été extraite. Une loi log-normale a ensuite été ajusté sur cet échantillon, selon la méthode du maximum de vraisemblance. Les quantiles correspondant (par exemple 20% pour une période de retour 5 ans) ont alors été calculés sur cette distribution log-normale. Nous avons aussi calculé l'intervalle de confiance à 95% sur ces estimations de quantile, en générant les distributions enveloppes à 95% à partir de l'intervalle de confiance à 78% de la valeur des paramètres de la loi (dont on connaît la variance d'estimation).

Ces débits caractéristique d'étiage sont figurés en long sur le linéaire de la Drôme sur la figure 3.38.

Il faut noter que les minima annuels en régime anthropisé et naturels ne sont pas forcément atteints sur les même mois (étiage naturel sévère plutôt en septembre, étiage anthropisé plutôt en juillet ou en août). Les incertitudes statistiques sur les calculs de ces débits d'étiage (liées au faible échantillon de minimums annuels) sont présentés en annexe page 517 et 518.

les cartes des QMNA₅ spécifiques, déduits de la modélisation, sont présentés sur les figures 3.39 et 3.40 pour la situation naturelle et la situation anthropisée actuelle.

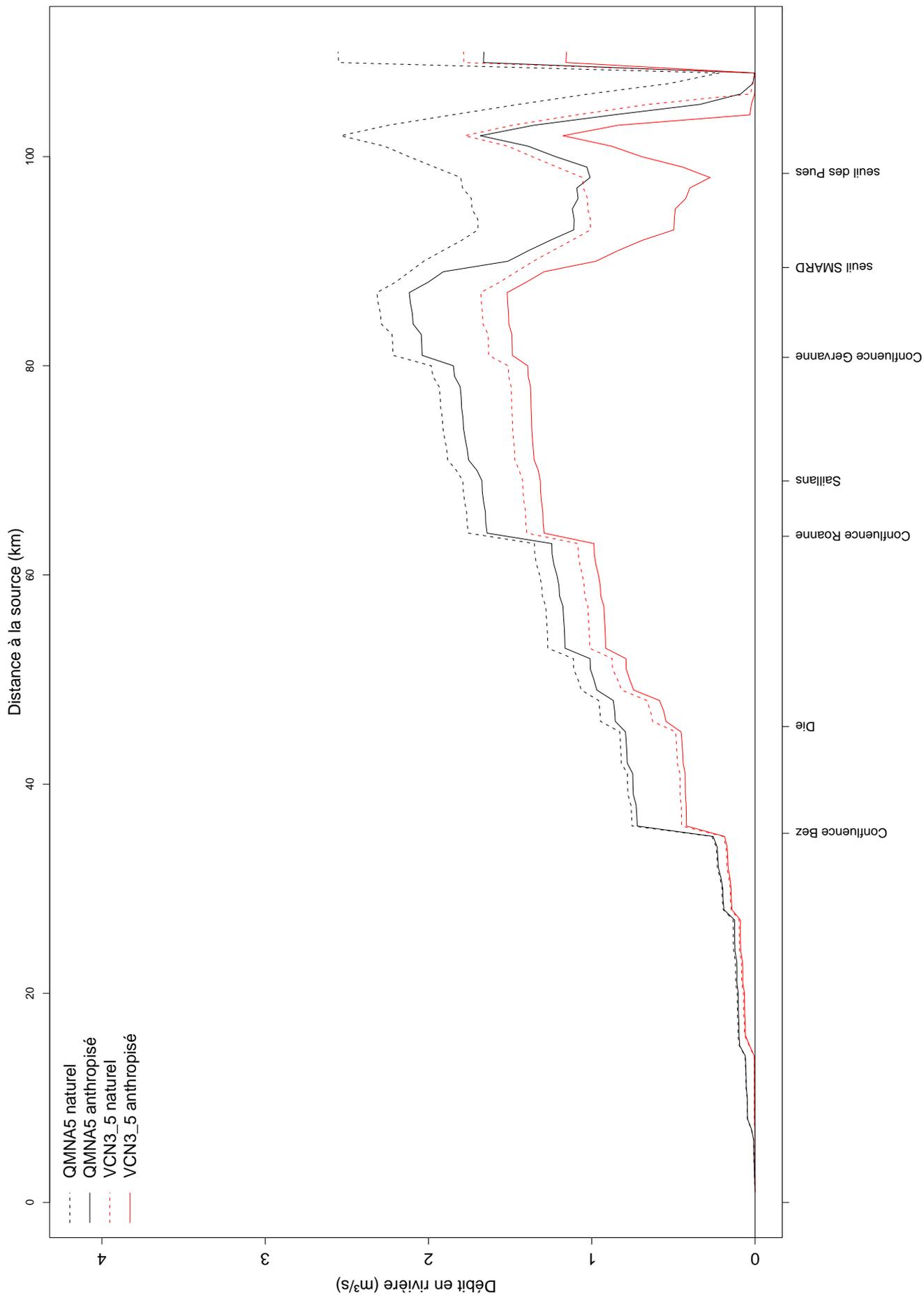


FIGURE 3.38 – Débits d'étéage naturels et anthropisés sur la Drôme.

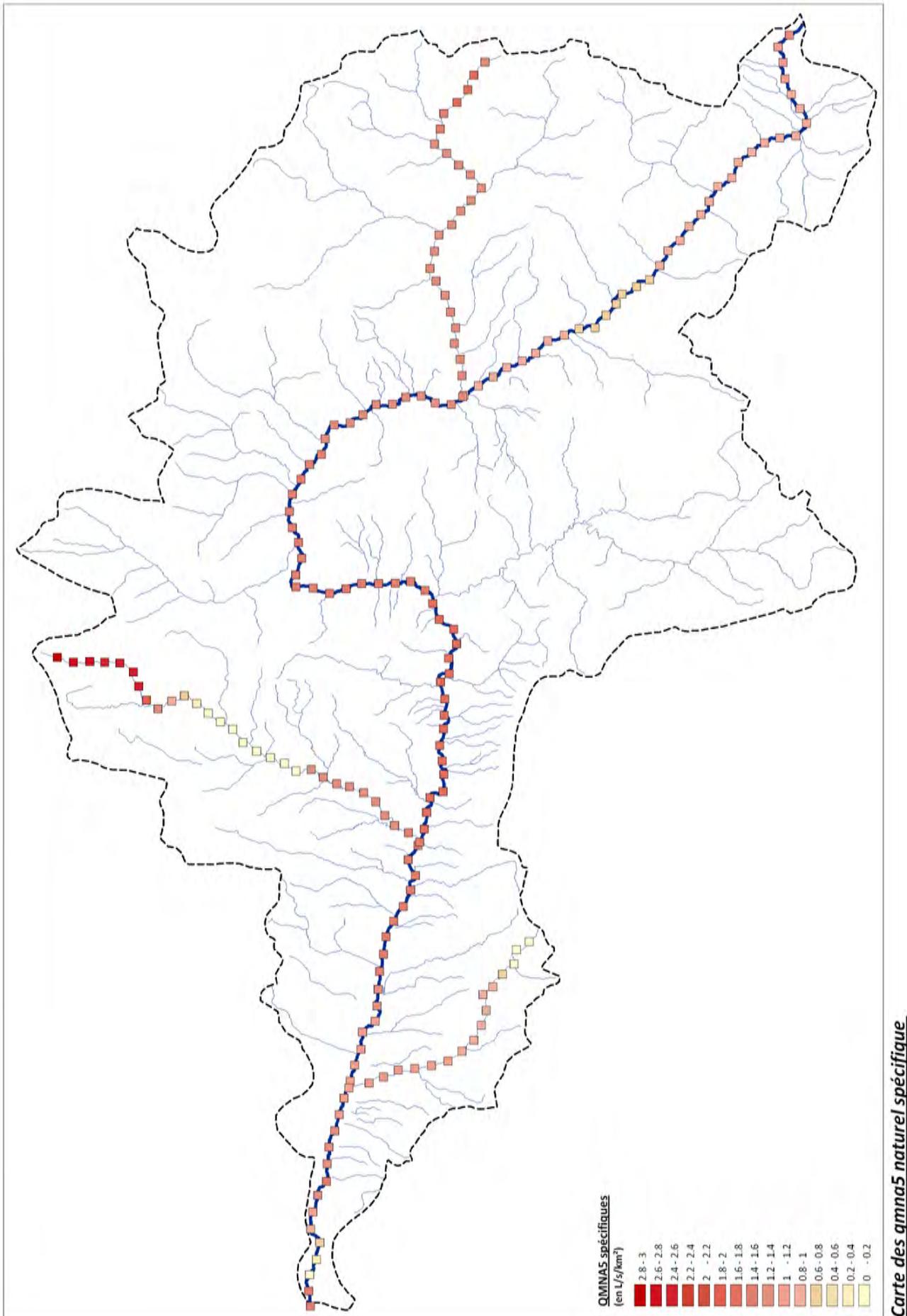


FIGURE 3.39 – Carte des QMNA₅ spécifiques naturels, issus de la modélisation.

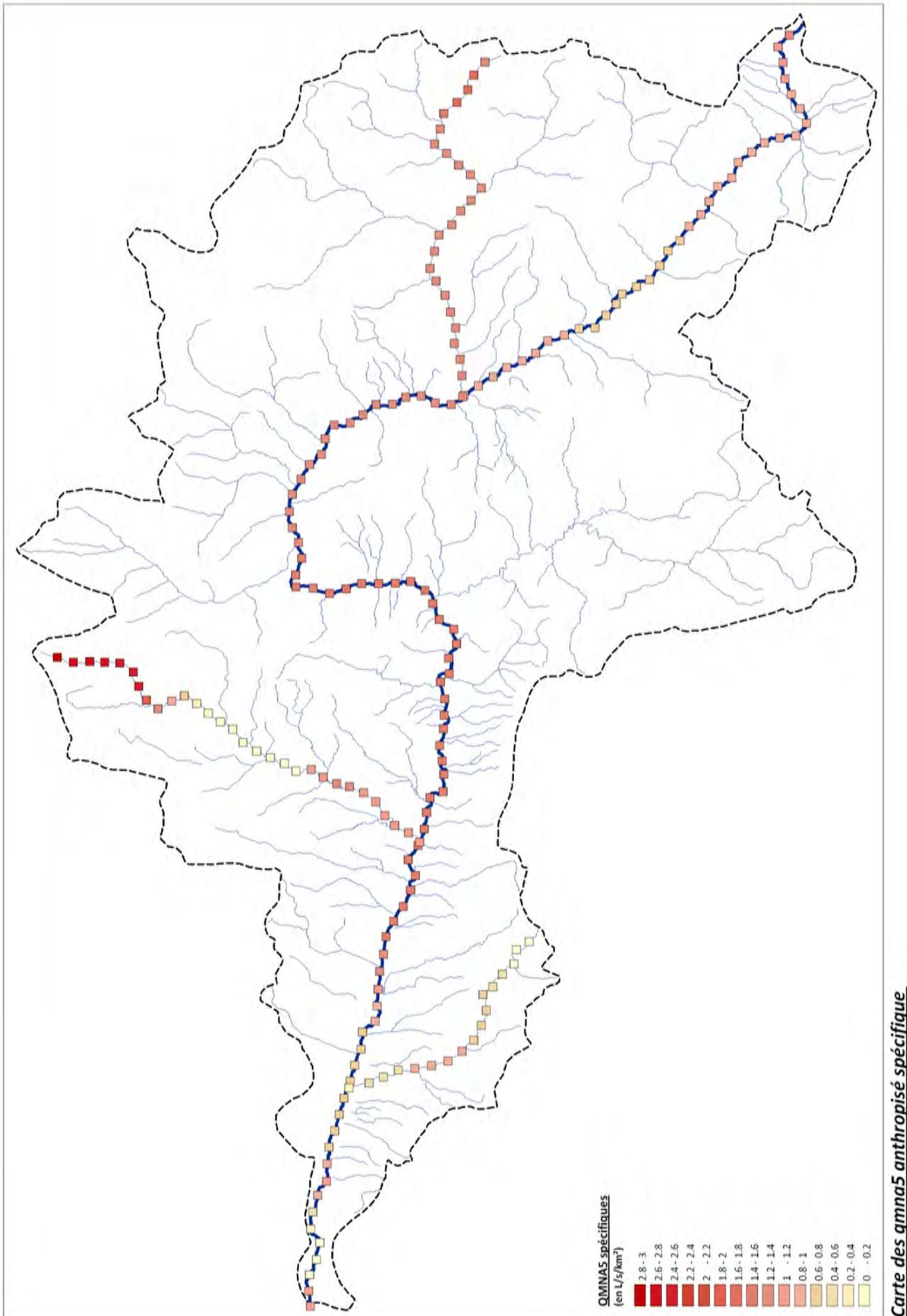


FIGURE 3.40 – Carte des QMNA₅ spécifiques anthropisés, issus de la modélisation.

3.3.1.1 Définition des périodes d'étiage

Afin de préciser dans le chapitre 4 les mois où les débits minimum biologiques devraient particulièrement être étudiés, nous reprecisons les période d'étiage sur le bassin de la Drôme. Notre définition de l'étiage est la période où le débit d'un cours d'eau est inférieure au quantile 30% de la chronique des débits mesurés sur une longue période. Ce n'est donc pas à proprement parlé une définition temporelle. Cet étiage sera généralement l'été sur le bassin de la Drôme, il pourra aussi être l'hiver dans les zones de tête de bassin où la présence d'un couvert nival influence fortement l'hydrologie. Les années les plus sèches, l'étiage pourra durer plus de 30% de la durée de l'année, tandis que pour les années humides, il sera plus court.

Afin de donner quelques généralités sur les périodes d'étiage et l'impact des prélèvements sur la position temporelle de ces périodes, nous avons représenté sur la figure 3.41 les débits quotidiens en année médiane et quinquennale sèche au niveau de la clue de Livron, point qui est à l'aval de l'essentiel des prélèvements du bassin (où donc les périodes d'étiage sont potentiellement les plus influencées) et où les débits sont peu impactés par les phénomènes d'échange nappe-rivière.

En année médiane⁵, l'étiage le plus marqué est vers la fin juillet ; l'étiage étant présent de mi-juin à fin octobre. Les prélèvements avancent un peu dans le temps le moment où on atteint le minimum.

En année quinquennale sèche, la durée de l'étiage est plutôt du 20 mai au 10 novembre. Le minimum, que ce soit de manière naturelle ou anthropisée se décale vers le 15 août. En régime naturelle, un deuxième minimum au début du mois de septembre a presque la même valeur que le minimum du mois d'août. Lorsque l'on va sur des étiages plus sévères (période de retour 10, 20 ans⁶), le minimum va plutôt être atteint en septembre-octobre, et est beaucoup moins accentué par les prélèvements.

5. La définition d'une année médiane peut être multiple : reconstitution d'une chronique de débit quotidien en faisant la médiane au jour le jour d'une chronique quotidienne (ce qui est présenté ici), lissage ou pas de cette chronique reconstituée, prise d'une année particulière dont l'écoulement annuel est proche de la médiane des écoulements, etc...)

6. La courte durée de la modélisation des débits non influencés rend plus difficile l'extrapolation de l'impact des prélèvements à ces périodes de retour)

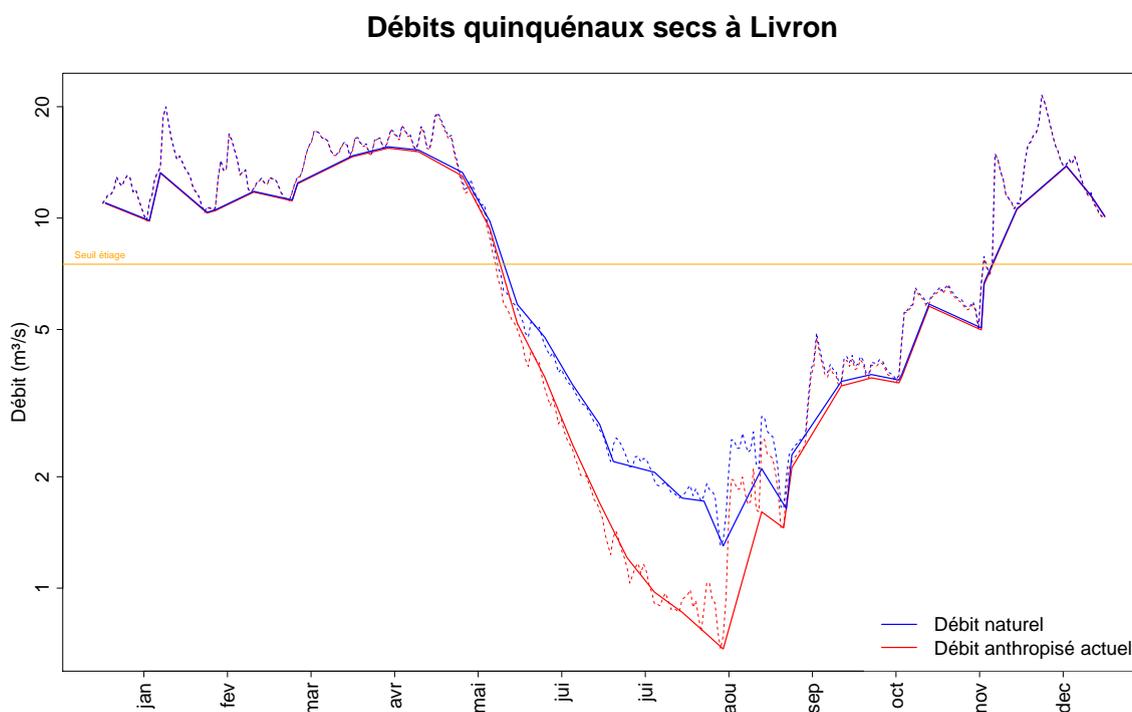
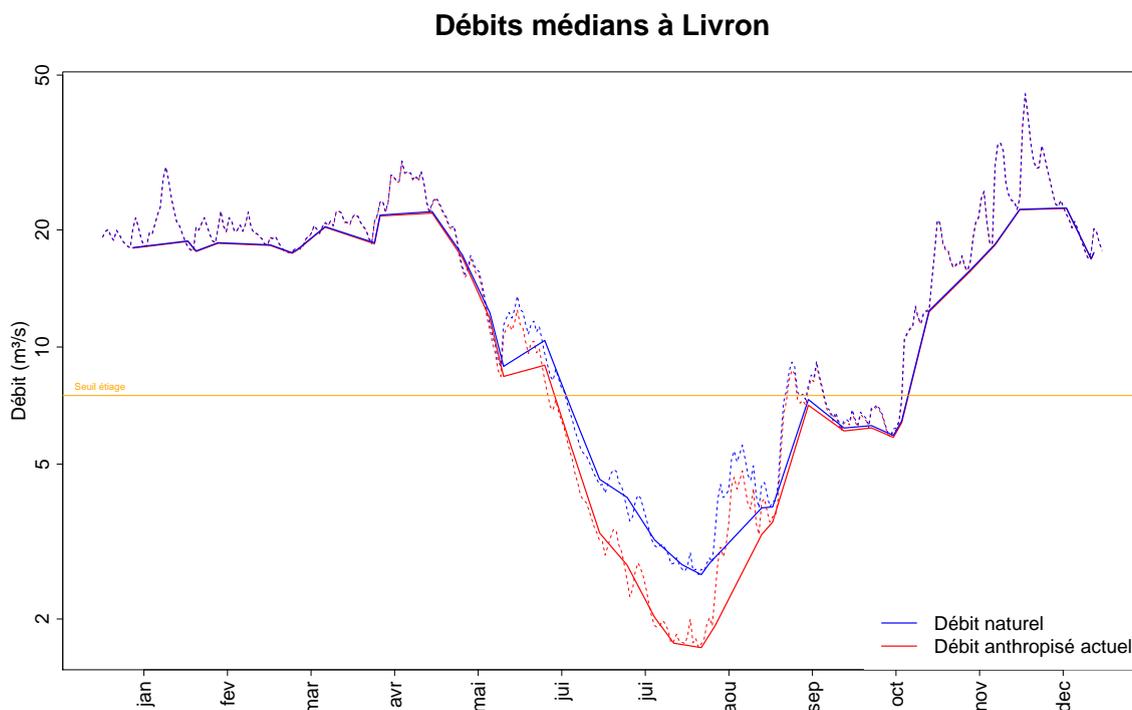


FIGURE 3.41 – Répartition et durée des étiages en année médiane et quinquennale sèche. Les traits pointillés sont les valeurs calculées au jour le jour à partir des chroniques naturelles et anthropisées reconstituées par le modèle, les traits pleins sont les mêmes débits lissés en privilégiant les minimums. Le trait orange représente le quantile 30%, seuil retenu pour délimiter l'étiage.

3.3.2 Zoom sur la plaine d'Alex

3.3.2.1 Scénario sans prélèvement : piézométrie non-influencée

3.3.2.1.1 Principe

Une fois le modèle calé, il devient un outil permettant de tester l'incidence sur la nappe de différents scénarios d'exploitation (prélèvements, ...) ou de différentes conditions hydro-climatiques. Un premier scénario a été réalisé à partir du modèle calé en régime transitoire. L'objectif de ce scénario est de simuler le comportement de la nappe sans l'influence de prélèvements anthropiques.

Nous avons donc effectué une simulation en régime transitoire, en conservant les paramètres issus du calage entre 1996 et 2009 (pluviométrie, paramètres hydrodynamiques, etc.). Tous les pompages ont été supprimés (prélèvements de surface et souterrains) afin de simuler une situation non influencée ou "pseudo-naturelle". Ensuite, ces résultats ont été comparés à la situation réelle (avec prélèvements).

3.3.2.1.2 Résultats

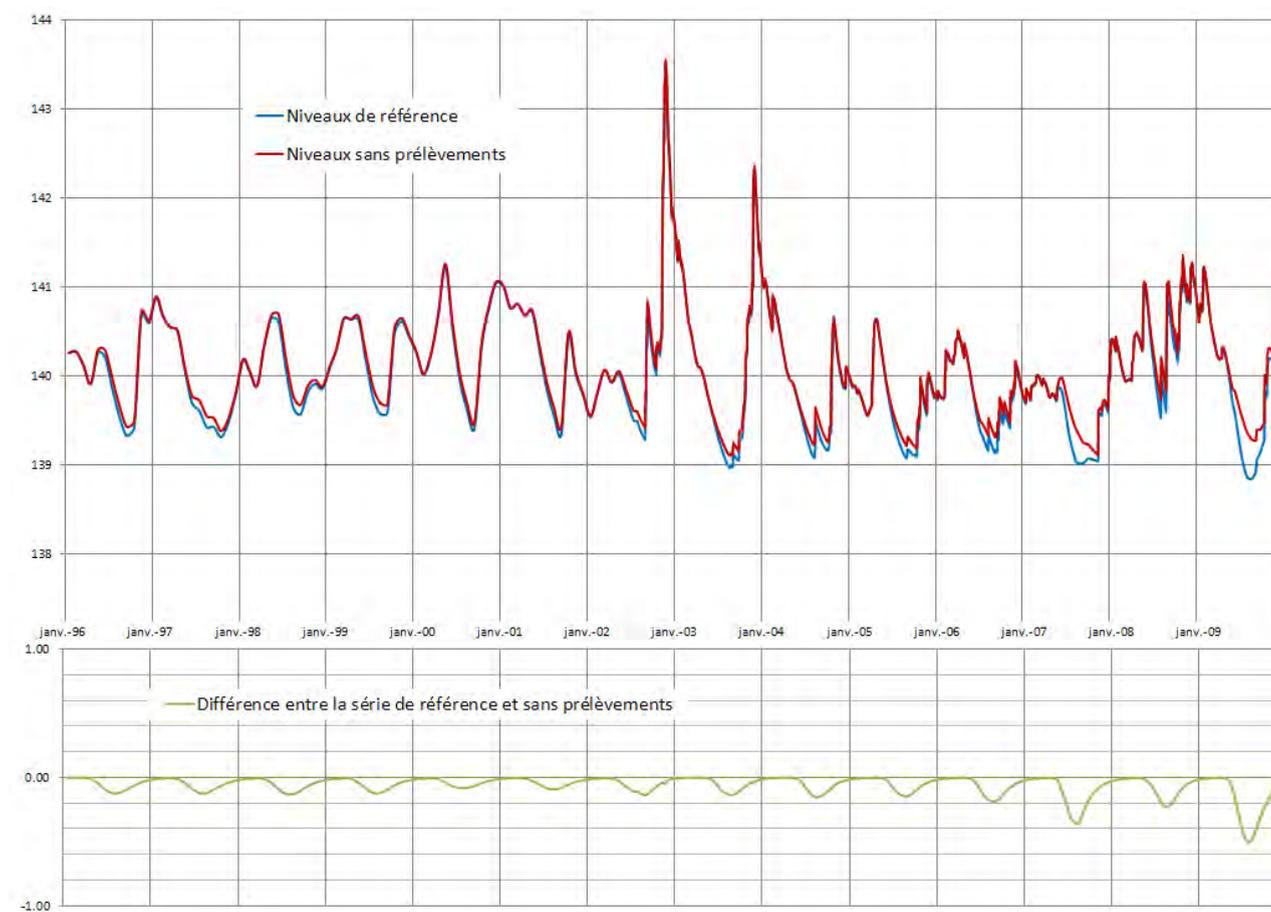


FIGURE 3.42 – Résultat comparé du résultat du scénario "sans prélèvements" et de la situation de référence au point d'observation de Grâne (DREAL n°08423X0067).

La piézométrie "non-influencée", c'est-à-dire dans des conditions de prélèvements souterrains et superficiels nuls, est peu différente de la piézométrie issue du calage (intégrant les prélèvements) : seule la chronique de Grâne présente une différence significative (voir figure 3.42) par rapport à la situation avec pompages.

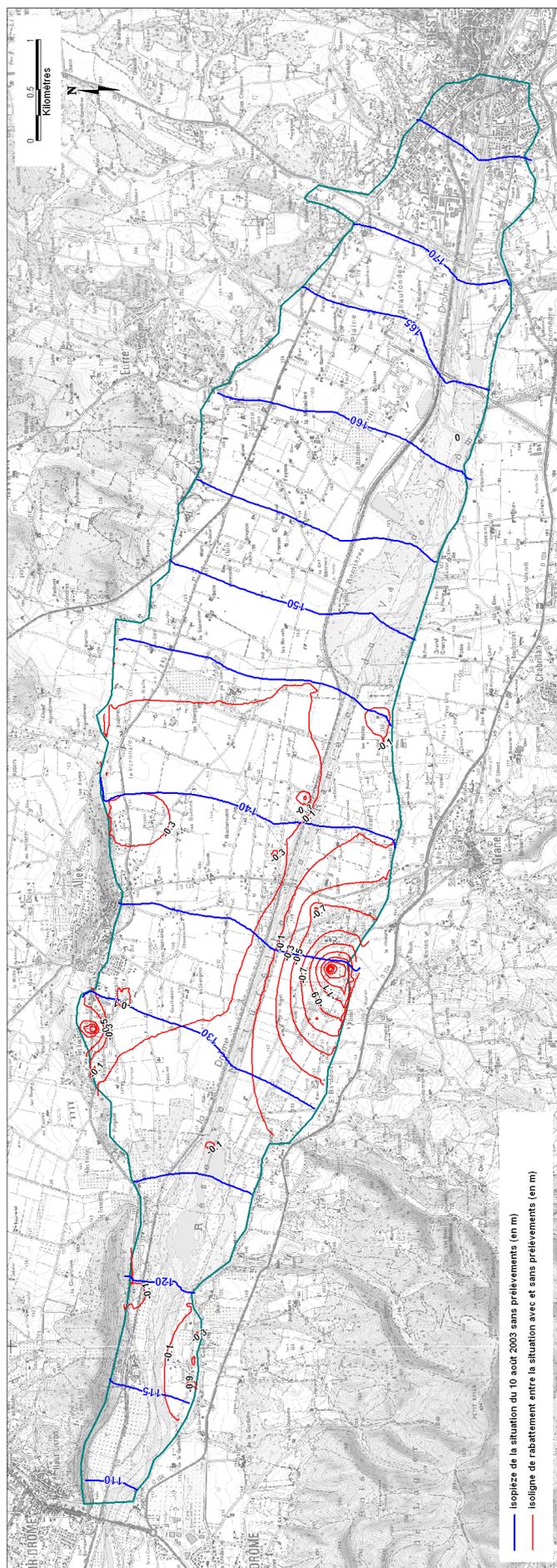


FIGURE 3.43 – Résultat comparé du résultat du scénario ” sans prélèvements” et de la situation de référence à la date du 10 août 2003 (situation de fort étiage).

La piézométrie est plus élevée de quelques décimètres au moments des étiages les plus sévères.

Une carte de l'incidence des pompages a été dressée pour le mois d'août 2003 période pendant laquelle l'étiage a été le plus sévère sur la période modélisée (cf. figure 3.43). Cette carte montre que la remontée de la nappe liée à l'arrêt des pompages, n'est en général que de quelques décimètres. Elle peut néanmoins atteindre environ 1 mètre en rive gauche de la Drôme (en dehors des ouvrages de pompages proprement dits).

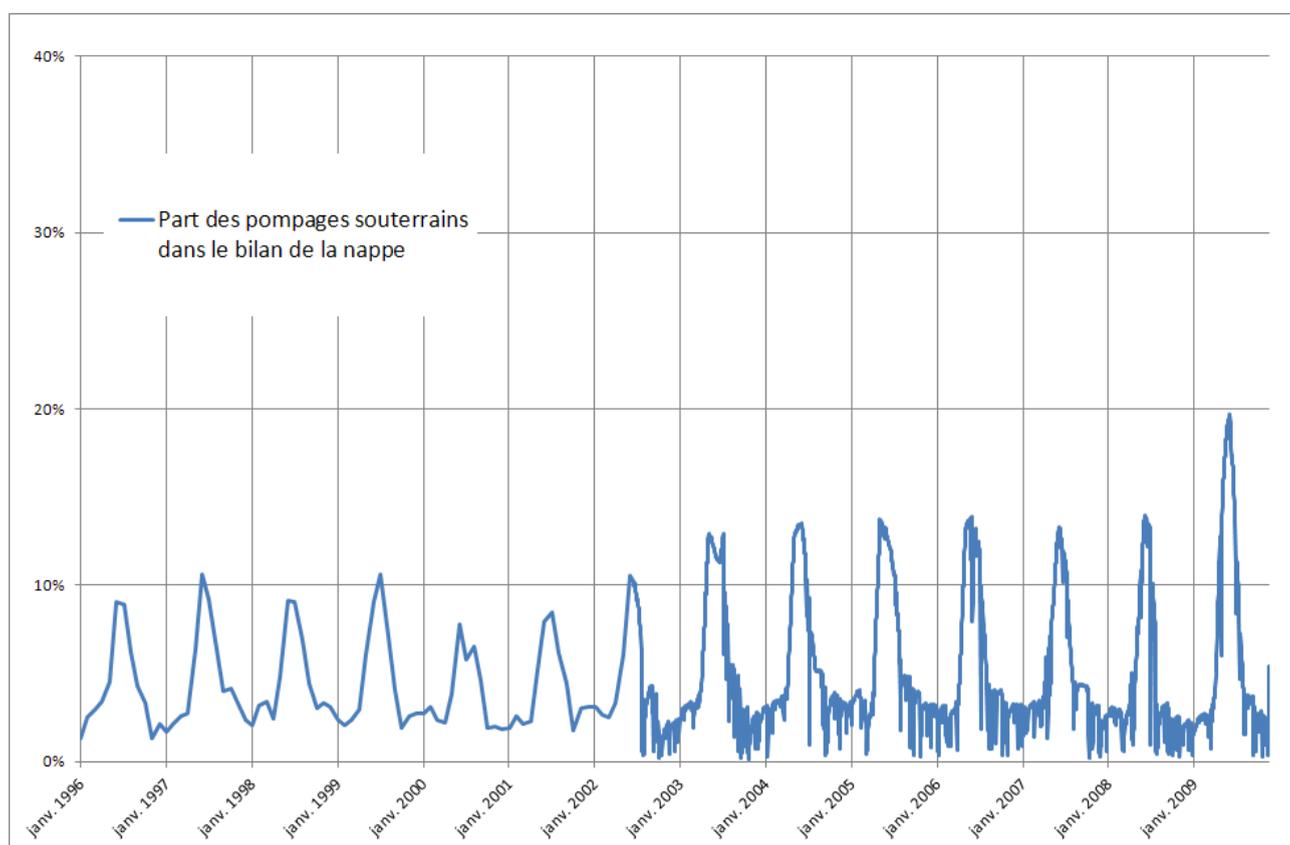


FIGURE 3.44 – Part des prélèvements souterrains dans le total des "sorties" de la nappe (rivières, potentiel imposé et stockage).

Le bilan volumique de la modélisation en régime transitoire indique qu'en moyenne, les pompages souterrains ne représentent que 4% des sorties de la nappe, avec des maxima entre 10 et 20 % (voir figure 3.44). On s'aperçoit ainsi qu'en général les prélèvements souterrains n'ont pas une influence considérable sur la piézométrie générale de la nappe alluviale de la plaine d'Alex.

L'évolution de la piézométrie liée à d'éventuelles modifications du fonctionnement de l'aquifère (modifications des prélèvements par exemple) n'aura donc pas d'incidence significative sur l'épaisseur mouillée de l'aquifère et n'impactera donc pas notablement la productivité des forages (notamment AEP).

La situation pour les eaux superficielles est différente puisqu'une partie de ces eaux est issue du "trop plein" de la nappe (source, drainage de l'aquifère par la rivière à l'aval), l'absence des prélèvements souterrains ne semble pas jouer un rôle déterminant dans l'augmentation du débit de la Drôme : le facteur majoritaire semble bien être les prélèvements superficiels des seuils. Le document en annexe présente les résultats obtenus en sortie de modèle (à Livron) entre les années 2002 et 2009. La figure suivante compare l'évolution du débit dans la Drôme entre Crest et Livron, au 7 août 2006 et au

10 août 2003, pour une situation de prélèvement et une situation sans prélèvements. On observe ainsi pour les deux étiages, que les différences de débit dans la Drôme entre les deux situations sont majoritairement liée à la présence ou non des prélèvements superficiels aux niveaux des 2 seuils (voir figures 3.45 et 3.46 page 154). Pour le 10 août 2003, on observe également que l'assec à l'aval du seuil des Pues ne se produit pas pour une situation sans prélèvements.

3.3.2.1.3 Conclusions

A l'issue de l'analyse des données existantes, du calage du modèle et de la simulation du scénario "situation non-influencée", il paraît pertinent de retenir deux situations "types" : d'une part un étiage sévère et d'autre part un étiage moyen ou normal. Il a été retenu la date du 10 août 2003 pour l'étiage sévère et la date du 7 août 2006 pour un étiage normal.

On remarque, pour un étiage moyen (du type situation du 7 août 2006) :

- peu de perte de débit dans la Drôme entre l'amont (Crest) et l'aval (Livron), de l'ordre de 10 % ;
- pas d'assec sur la zone modélisée ;
- des prélèvements faibles devant les autres termes du bilan hydraulique (< 10% du débit sortant de l'aquifère) ;
- des prélèvements qui ont une incidence faible sur la piézométrie et également sur le débit de la rivière Drôme.

Pour une situation d'étiage sévère (du type situation du 10 août 2003), on remarque :

- une perte de débit dans la Drôme entre l'amont (Crest) et l'aval (Livron), de l'ordre de 50 % ;
- un assec localisé sur la zone modélisée à l'aval du seuil des Pues ;
- des prélèvements significatifs face au débit naturel de la rivière ;
- des prélèvements qui ont une incidence faible sur la piézométrie mais une incidence forte sur le débit de la rivière Drôme.

De façon synthétique, on notera que le débit de la Drôme à l'aval de la plaine d'Allex est très dépendant du débit du même cours d'eau à Crest (fonction des conditions hydro-climatiques, et des prélèvements sur la partie amont du bassin) et dans une moindre mesure des prélèvements en eau dans la plaine d'Allex (principalement superficiels).

Dans le cadre des prochaines phases, il sera important de définir des scénarios de simulation permettant notamment de caractériser le bénéfice d'un éventuel transfert des pompages directs en rivière vers des pompages en nappe, sur le débit de la Drôme et donc sur la survenue d'assec.

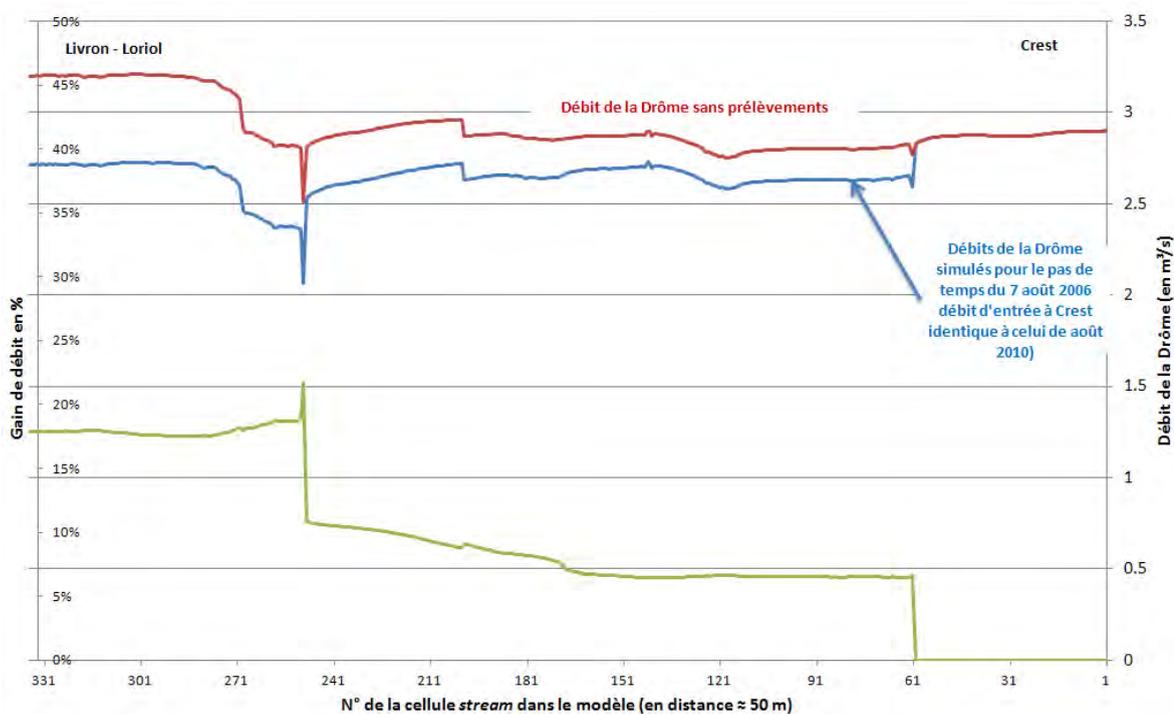


FIGURE 3.45 – Résultats comparés du module stream pour la situation du 7 août 2006 (étiage normal) avec et sans prélèvements.

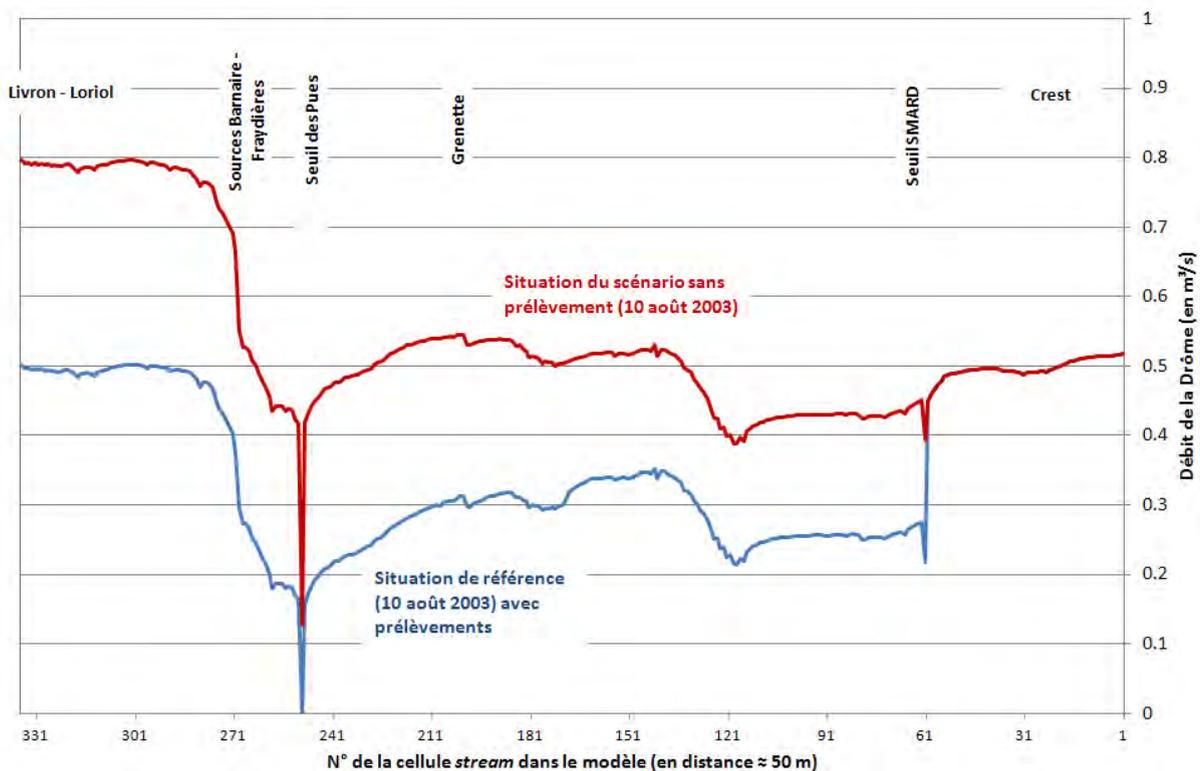


FIGURE 3.46 – Résultats comparés du module stream pour la situation du 10 août 2003 (étiage sévère) avec et sans prélèvements.

3.3.3 Zoom sur la plaine alluviale à l'aval de Livron

3.3.3.1 Rappel des caractéristiques hydrogéologiques à l'aval de Livron

L'aquifère alluvial à l'aval de la cluse de Livron-sur-Drôme est constitué de sables, graviers et galets sur une épaisseur variable (jusqu'à 18 m, source BSS), entrecoupés de passées argileuses d'importance variable. Cet aquifère au sein du cône de déjection de la Drôme formé d'alluvions calcaires et d'alluvions de roches cristallines. La confluence avec la Drôme a repoussé le Rhône sur sa rive droite et a permis l'apparition d'une vaste plaine alluviale. La sédimentation de la formation alluviale est complexe : elle est liée à la fois au apport du Rhône (sédiments polygéniques) et de la Drôme (alluvions calcaires). Les alluvions les plus récentes proviennent de la Drôme comme le montre très clairement l'analyse de la topographie.

La couche superficielle de l'aquifère est généralement plus limoneuse et donc moins perméable [Noël, 2005] ce qui rend l'aquifère captif par endroit.

Le substratum de cet aquifère est constitué soit des marnes et sables pliocènes imperméables ou peu perméables, soit de calcaires et marnes de l'Hauterivien qui peuvent être perméables.

En terme de fonctionnement, la piézométrie relevée par Geo+ en août 1996 et janvier 1997 (Figure 3.47) montre que les écoulements souterrains divergent à partir de l'élargissement de l'aquifère à Livron pour suivre les génératrices du cône de déjection. Ainsi, l'alimentation de la nappe se fait très majoritairement depuis la Drôme vers la nappe.

La piézométrie est suivie depuis 2000 à Loriol (n°08422X0190) et Livron (n°08422X0191). La piézométrie ne montre pas de tendance à la baisse depuis 2000, il n'y a donc pas de surexploitation chronique de l'aquifère. Ces chroniques mettent en évidence des étiages particulièrement marqués pendant les étés 2003 et 2004. On notera également que l'année hydrologique 2008-2009 a permis à la nappe d'atteindre des niveaux piézométriques les plus hauts depuis une dizaine d'année.

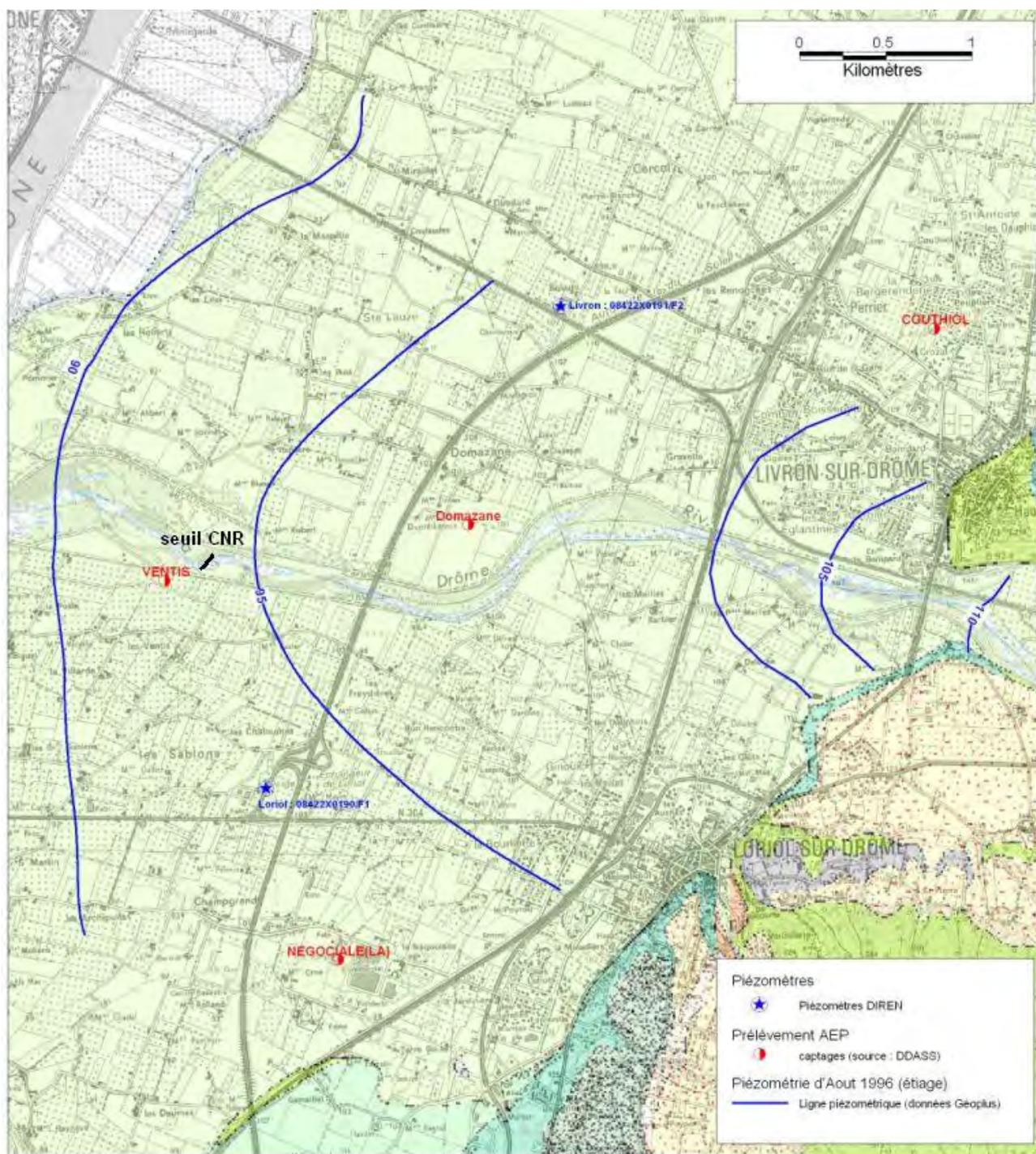


FIGURE 3.47 – Piézométrie de la plaine alluviale à l’aval de Livron-Loriol d’août 1996 (Géo+, 1997)

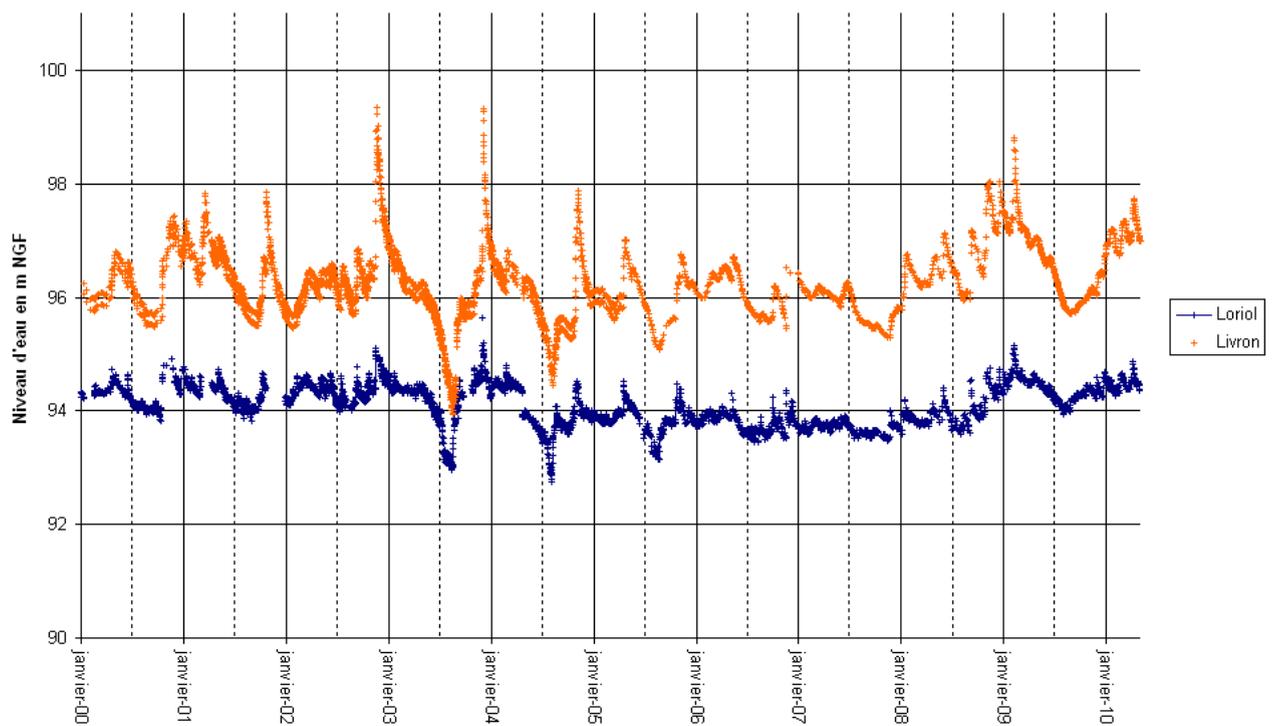


FIGURE 3.48 – Chroniques piézométriques à Livron et Lorient entre 2000 et 2010 (DREAL)

3.3.3.2 Relations nappe-rivière

Après examen de la piézométrie (Géo+, 1997), il apparaît qu'en période d'étiage, comme en période de crue, la Drôme semble recharger la nappe sur une grande partie de son linéaire, entre Livron et le Rhône.

Afin de définir l'extension latérale de la nappe d'accompagnement de la Drôme, l'étude du BRGM de 2005 [Noël, 2005], suppose que la rivière est connectée à la nappe pour appliquer la formule analytique de calcul de débit soutiré à la rivière (nappe semi-infinie à frontière de recharge). Cette étude conclue ainsi qu'une grande majorité de la plaine doit être considérée comme une nappe d'accompagnement de la Drôme (seule une bande d'une centaine de mètres au bord du Rhône est exclue de cette définition).

L'analyse des lignes d'eau (souterraines, source Géo+ 1997 et superficielles, source LIDAR 2010), montre que la Drôme semble être en position haute par rapport à la nappe dans sa partie amont, entre le pont de Livron-Loriol et le seuil CNR, pendant la période d'étiage (cf. figure 3.49). D'après les observateurs (J.M. Faton⁷ et de P. Gélibert⁸), les assècs "remontent" depuis le seuil CNR vers l'amont : la rivière étant en position haute, elle perd de son débit jusqu'à être à sec, d'abord tout à fait en aval, puis de plus en plus à l'amont. En aval du seuil CNR, du à l'influence du Rhône, la nappe est plus proche de la rivière, voire à légèrement plus haute, ce qui permet de retrouver un écoulement.

Les relevés de Géo+ en 1996 ne sont pas systématiquement nivelés, ils sont donc à considérer avec précaution. L'imprécision des mesures ne permet notamment pas de confirmer l'hypothèse, prise lors de l'interprétation de la piézométrie par Géo+, d'une déconnexion de la Drôme vis-à-vis de la nappe. D'après les suivis de Loriol et de Livron, les variations piézométriques dans la plaine du Rhône sont plurimétriques. La carte piézométrique de janvier 1997 (Géoplus, 1997) montre qu'en période de hautes eaux, la nappe pourrait être reconnectée à la Drôme, du Rhône jusqu'à Livron.

La piézométrie réalisée en 1955 et 1956 réalisée par la CNR et présentée par Burgéap en 1969, est antérieure à l'aménagement du Rhône : elle n'est donc plus représentative de la nappe à l'heure actuelle (remontée du niveau de base, ...).

L'examen des différentes données sur la zone (Géoplus 1997, CGG 1965, Burgéap 1964 et 1969), **ne permettait pas de caractériser précisément les échanges nappe-rivière** dans ce secteur. Deux hypothèses sont envisageables (voir figure 3.50) :

- si la nappe est connectée à la rivière, la part du débit de la Drôme qui s'infiltré vers la nappe est directement liée aux variations piézométriques à proximité du cours d'eau.
- si, comme l'a interprété Géo+, il y a une déconnexion hydraulique entre la nappe et la rivière Drôme en période d'étiage, sur une partie au moins de la plaine, alors, une baisse du niveau piézométrique n'a plus d'incidence sur la perte de débit dans la rivière.

Afin de lever les incertitudes, une campagne de suivi piézométrique a été réalisée durant l'étiage 2011, avec notamment la réalisation de plusieurs sections piézométriques nivelées (plusieurs piézomètres sur un même transect) pour caractériser sans ambiguïté les relations Drôme-nappe dans la plaine du Rhône, notamment en période d'étiage. De nouveaux piézomètres ont été forés en juillet 2011 (voir [Artelia, 2012b]). Malheureusement (du point de vue de l'étude !), l'étiage qui s'annoncé comme bien

7. réserve naturelle des Ramières du val de Drôme

8. ONEMA

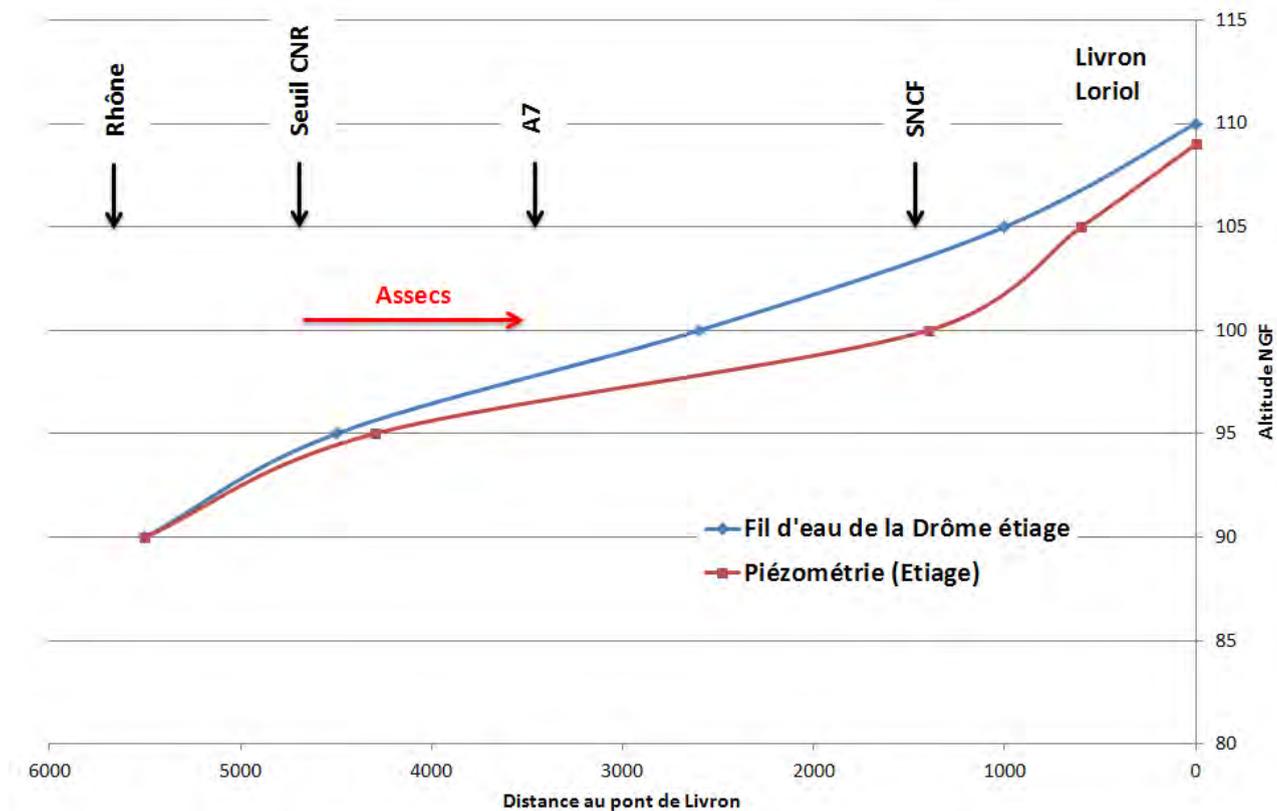


FIGURE 3.49 – Coupe présentant la ligne d'eau de la Drôme et la piézométrie des alluvions en période d'étiage (source relevés LIDAR 2010, et piézométrie de août 1996 (Géo+, 1997). La piézométrie est issue de la carte piézométrique interprétée de Géo+ à partir de données ponctuelles et non nivelées, situées à une distance significative du cours d'eau).

marqué au printemps et début d'été a été peu sévère suite au mois d'août pluvieux, même si l'automne qui a suivi a été assez sec. Sur cette campagne 2011, la nappe ne s'est pas déconnectée de la rivière de façon manifeste. Les piézomètres étant maintenant en place, le suivi piézométrique devrait être (facilement) renouvelé sur un étiage plus sévère afin de confirmer ce résultat.

Pour le moment, il semble donc prudent de considérer qu'**en période d'étiage, les prélèvements dans la nappe alluviale peuvent avoir un impact sur les débits de la rivière.**

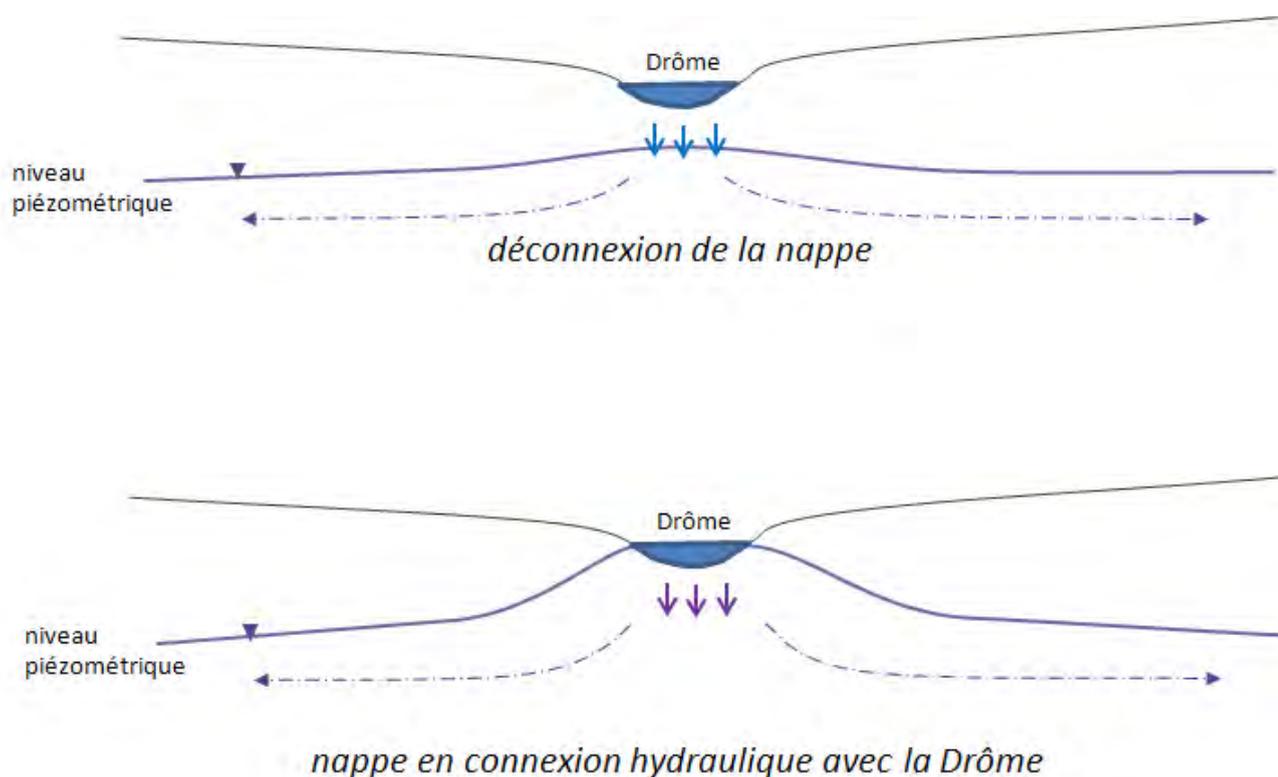


FIGURE 3.50 – Coupes schématiques des deux hypothèses envisageables pour les relations nappe-rivière à l’aval de Livron-sur-Drôme : discontinuité ou continuité hydraulique entre les eaux de surface et souterraines).

3.3.4 Significativité des débits et niveaux présentés

3.3.4.1 Erreur de mesures et de modélisation

Le modèle est une représentation simplifiée de la réalité, tous les phénomènes naturels ne peuvent bien entendus pas être pris en compte. La modélisation des phénomène d’étéage est complexe, avec des phénomènes très fin au niveau des échanges nappes (essentiellement d’accompagnement)/rivières qui sont mal connus, et qui nécessiteraient de lourdes investigations de terrain. Les données d’entrées du modèle peuvent elles aussi être entachées d’erreur (données météorologiques, données quotidiennes de prélèvement, mesures ponctuelles de débit).

Les sorties du modèles sont donc entachées d’une certaine erreur, difficilement quantifiable. L’erreur relative est généralement d’autant plus forte que l’on se retrouve dans des zones de faible débit, voire d’assec. Cependant, le fait d’avoir des stations hydrométriques fiables qui permettent de recalculer les débits modélisés assure une certaine cohérence à ces sorties.

3.3.4.2 Échantillonnage des étiages et tendance climatique

Le peu d’années où l’on dispose des données de prélèvements et la faible longueur de la période simulée biaisent les résultats. À partir des données de suivi en continu à notre disposition, nous avons étudié comment variait les débits caractéristique d’étéage selon la période sur laquelle on les calculait. Le calcul de référence est celui sur la période de modélisation, à savoir 2002-2009. Pour avoir un indicateur robuste, il est en général recommandé d’avoir une période de mesure d’au moins 30 années. Cependant, plus la période de calcul est longue est plus on peut passer à coté d’un éventuel changement dans le régime des cours d’eau (impact du changement climatique). Nous avons recalculé les débits d’étéage sur les différentes stations du secteur disponibles : la Drôme à Saillans (1966-2010 ,

mesures fiables, les données de 1910-1911 semblent douteuses), la Drôme à Luc en Diois (1907-2010, mesures douteuses en étiage) et le Bès à Châtillon en Diois (1963-2010). Ces débits sont présentés sur les figures 3.51 à 3.53.

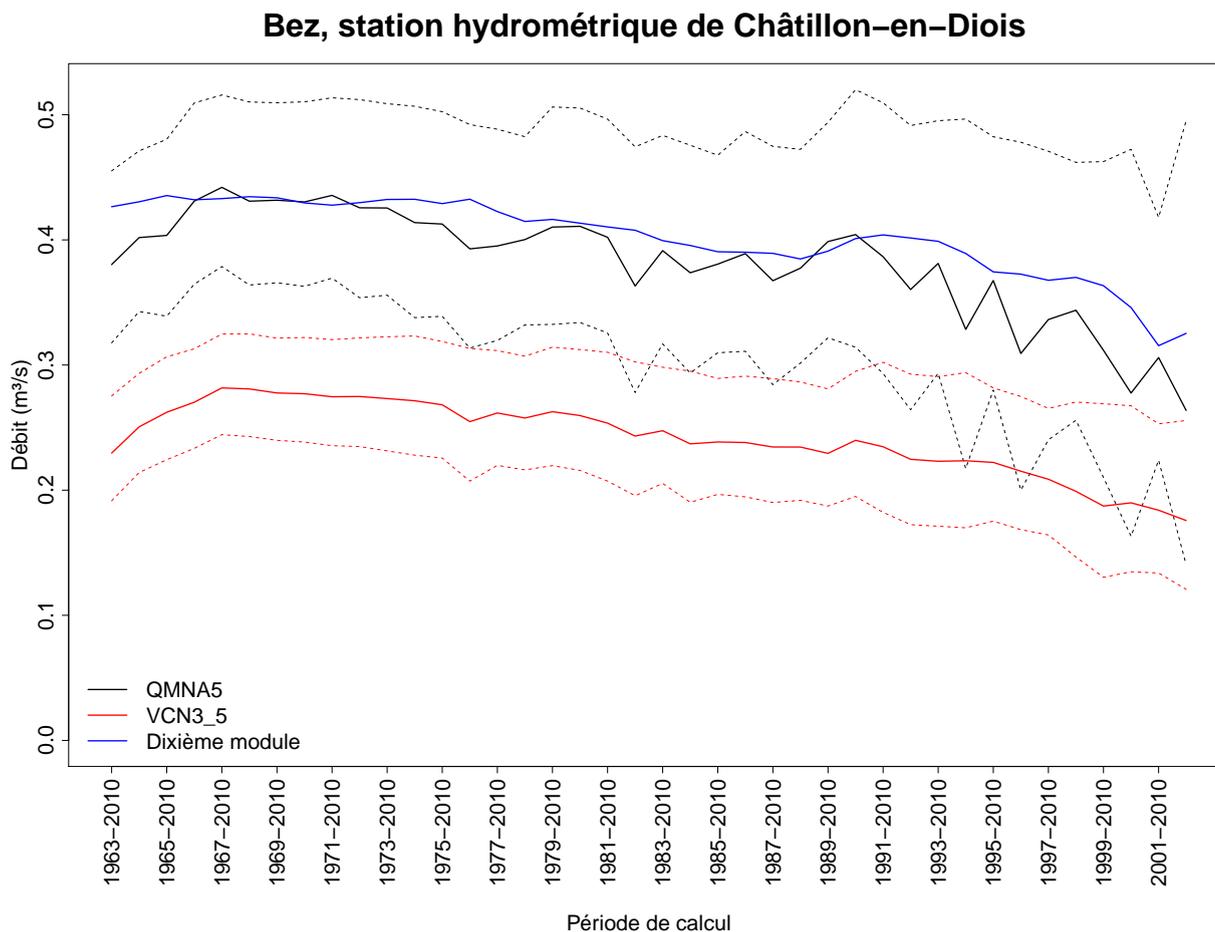


FIGURE 3.51 – Débits statistiques d'étiage du Bès calculés sur différentes périodes. Pour le QMNA₅ et le VCN3.5, les pointillés représentent l'intervalle de confiance à 95%

On constate ainsi que le calcul de ces débits d'étiage mesurés sur les quelques dernières années sont plus faibles que ceux calculés sur une longue période (50 ans). Cette baisse des débits ne concerne pas seulement l'étiage mais aussi le module des cours d'eau (qui lui est moins sensible aux erreurs de mesures des stations). Cette tendance ne peut pas être imputable à la seule augmentation des prélèvements. On peut quand même constater que les dernières années sont donc bien plus sèches quant aux débits d'étiage que la climatologie. Est-ce que cette baisse des débits n'est qu'un épiphénomène, ou est-ce au contraire les prémices des étés plus secs prévus sur le sud de la France par les modèles de climat pour les décennies à venir ?

Pour fixer les Débits Objectifs d'Etiage et les Débits de Crise Renforcée, il nous semble ainsi plus prudent de nous baser sur les débits observés sur les dernières années. En effet, retenir des valeurs de débits d'étiage plus élevées, mais qui du coup serait régulièrement dépassées à la baisse si cette tendance à des été secs se maintient ne pourraient que complexifier la gestion des crises.

Drôme, station hydrométrique de Luc-en-Diois

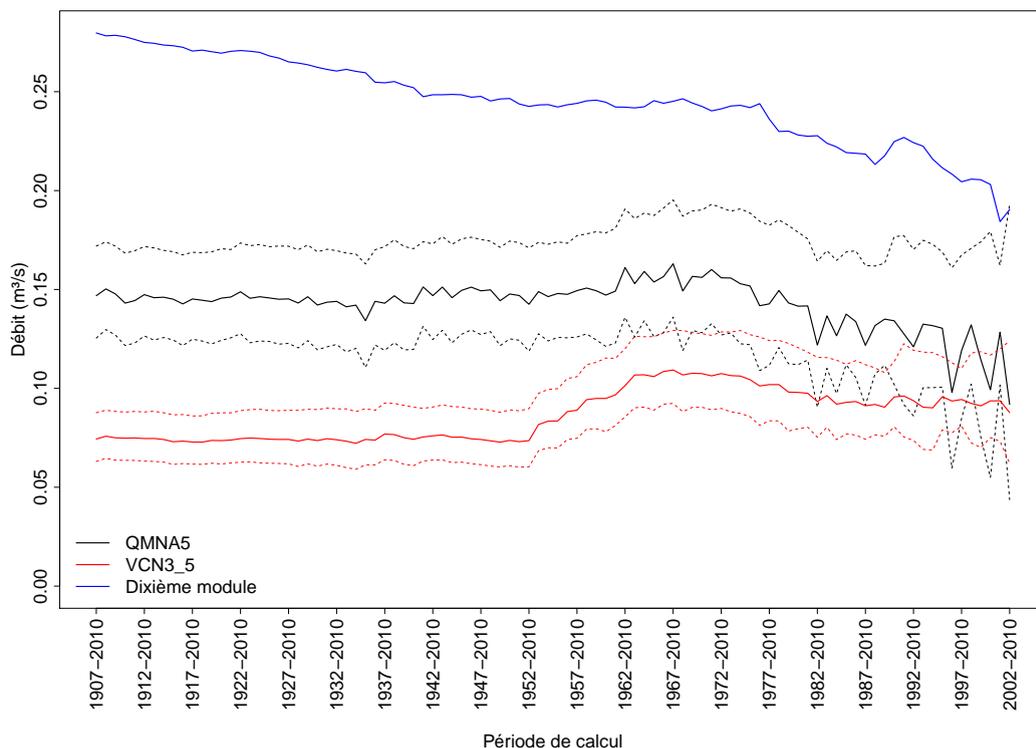


FIGURE 3.52 – Débits statistiques d’étéage de la Drôme à Luc en Diois calculés sur différentes périodes. Pour le QMNA₅ et le VCN3_5, les pointillés représentent l’intervalle de confiance à 95%

Drôme, station hydrométrique de Saillans

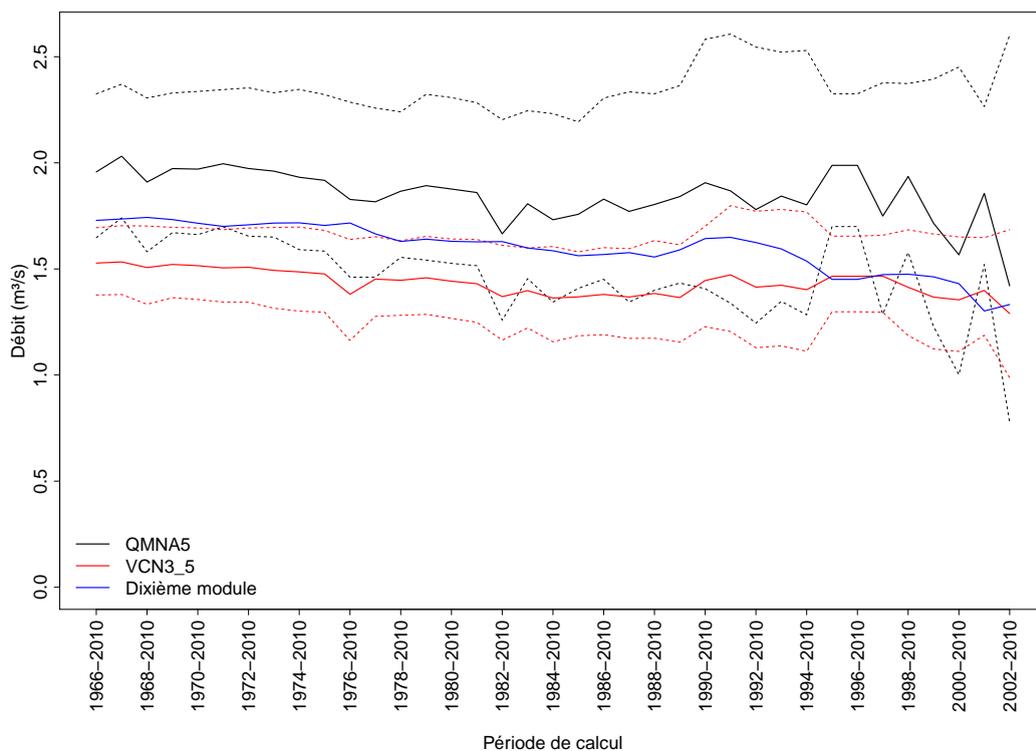


FIGURE 3.53 – Débits statistiques d’étéage de la Drôme à Saillans calculés sur différentes périodes. Pour le QMNA₅ et le VCN3_5, les pointillés représentent l’intervalle de confiance à 95%

3.3.4.3 Évolution possible des débits de la Drôme dans le futur

Hors intervention anthropique directe (barrage, prélèvements), les débits de la Drôme dans les prochaines décennies évolueront sûrement, que ce soit par un changement de l'utilisation des sols (3.3.4.4) qui peut être d'origine anthropique ou dû au changement climatique, ou un changement dans les conditions d'alimentation du bassin.

L'augmentation de la température sur la région a une très forte probabilité d'occurrence ; il en résultera :

1. une perturbation de la composante nivale du débit sur les têtes de bassin (moins de neige stockée et fonte plus précoce).
2. vraisemblablement une augmentation de l'évaporation et de l'évapotranspiration, cette augmentation pouvant aussi être modulée selon l'évolution du vent et de l'humidité de l'air, qui sont des variables climatiques plus délicates à prévoir. Par ailleurs, la réponse de la végétation au changement climatique (changement de peuplement...) peut moduler à la hausse comme à la baisse cette augmentation. Cette augmentation de l'évapotranspiration aura un impact général sur la baisse des débits.

L'évolution des précipitations sur le secteur est quant-à elle plus sujette à controverse. Tous les modèles de climat ne sont pas concordants, cette zone de la France étant souvent, pour schématiser, la charnière entre un sud de l'Europe moins arrosé, et un nord de l'Europe moins impacté, voire plus humide. Nous présentons en annexe page 519, à l'échelle de la France, les tendances saisonnières pour 3 modèles globaux de climat régionalisés à méso-échelle sur la France (modèle Aladin de Météo-France, modèle LMDz de l'IPSL, modèle Echam5 du Max Planck Institut — ces résultats sont disponibles sur le site <http://drias-climat.fr/>), afin de montrer la variabilité des sorties entre les modèles, même si la tendance est plutôt à une diminution des précipitations, surtout en été. Le futur du bassin (comme ailleurs) ne peut donc s'envisager qu'en termes de probabilités, de scénarios plus ou moins probables que d'autres. Si nous zoomons plus sur le bassin de la Drôme (figures 3.54 à 3.56), nous voyons que les prévisions de précipitations sur les mois d'étiage sont assez variables, avec quand même plutôt une majorité de modèles qui prédisent une baisse des précipitations.

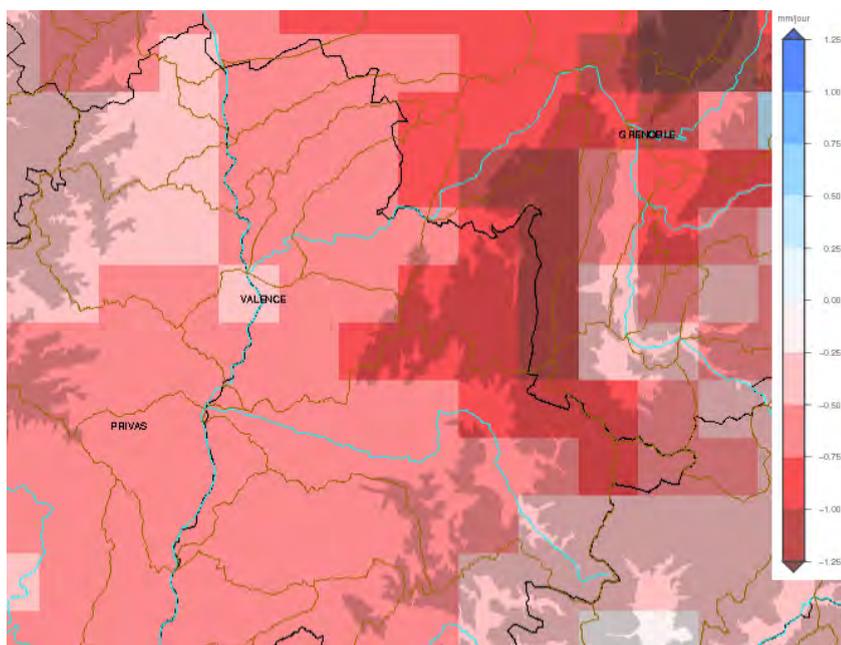


FIGURE 3.54 – Modèle Aladin, scénario d'émission A1B, méthode de désagrégation issue du projet SCAMPEI. Figure générée par le site <http://drias-climat.fr/>

Notons enfin que la tendance sur le cumul de précipitations ne permet pas à elle seule de prédire les débits si la répartition et l'intensité des précipitations (plus délicat à prévoir même si la recherche a

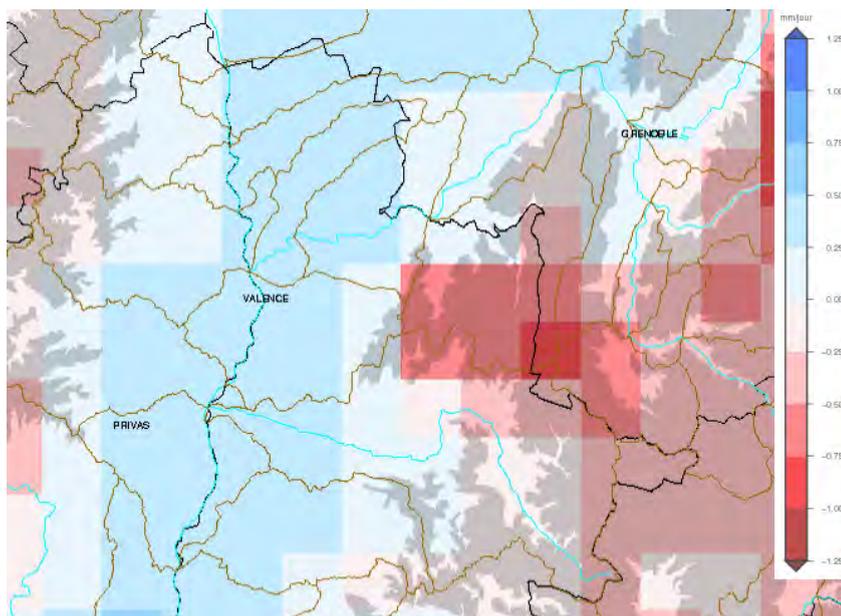


FIGURE 3.55 – Modèle LMDz, scénario d’émission A1B, méthode de désagrégation issue du projet SCAMPEI. Figure générée par le site <http://drias-climat.fr/>

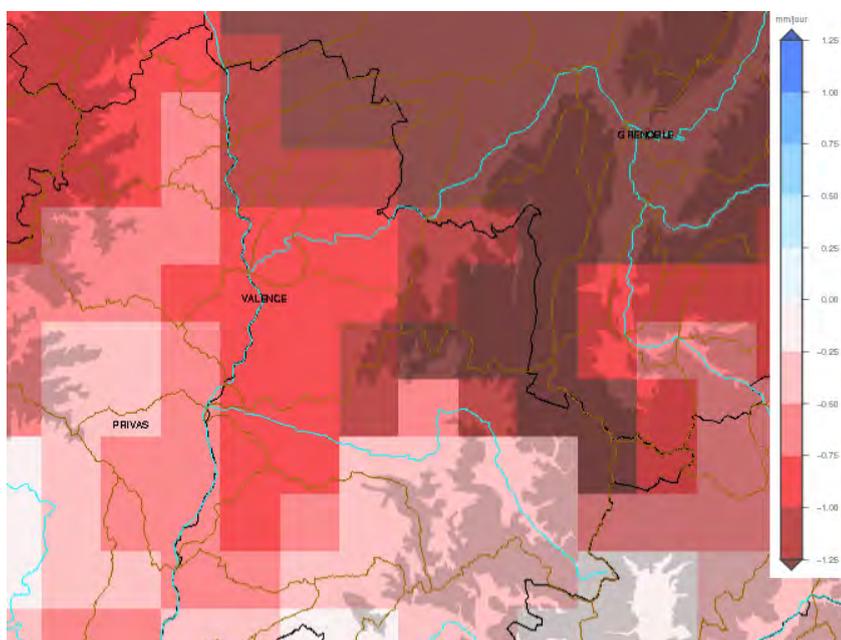


FIGURE 3.56 – Modèle ECHAM5, scénario d’émission A1B, méthode de désagrégation issue du projet SCAMPEI. Figure générée par le site <http://drias-climat.fr/>

bien avancé sur ce domaine ces dernières années) évoluent sensiblement dans le même temps.

Ce type d’évolution des variables météorologiques peut ensuite être réintégré dans des modèles hydrologiques, plus ou moins complexes.

Dans le cadre du projet ”Créateurs de Drôme”, le CEMAGREF pronostique à 30 ans une baisse sensible des débits moyens d’été.

Dans ses travaux de thèse, Boe [2007], propose une évolution des débits de la Drôme, reconstitués par la chaîne Safran-Isba-Modcou et alimentés par les 14 modèles de climat disponibles pour le 4^{ème} rapport du GIEC et désagrégés sur la France.

Pour le scénario d’émission A1B (intermédiaire), si les débits hivernaux (voire donc l’ensemble de la lame d’eau écoulee sur l’année) sont en moyenne plus importants, les débits d’été sont en moyenne diminués de 20 à 40%.

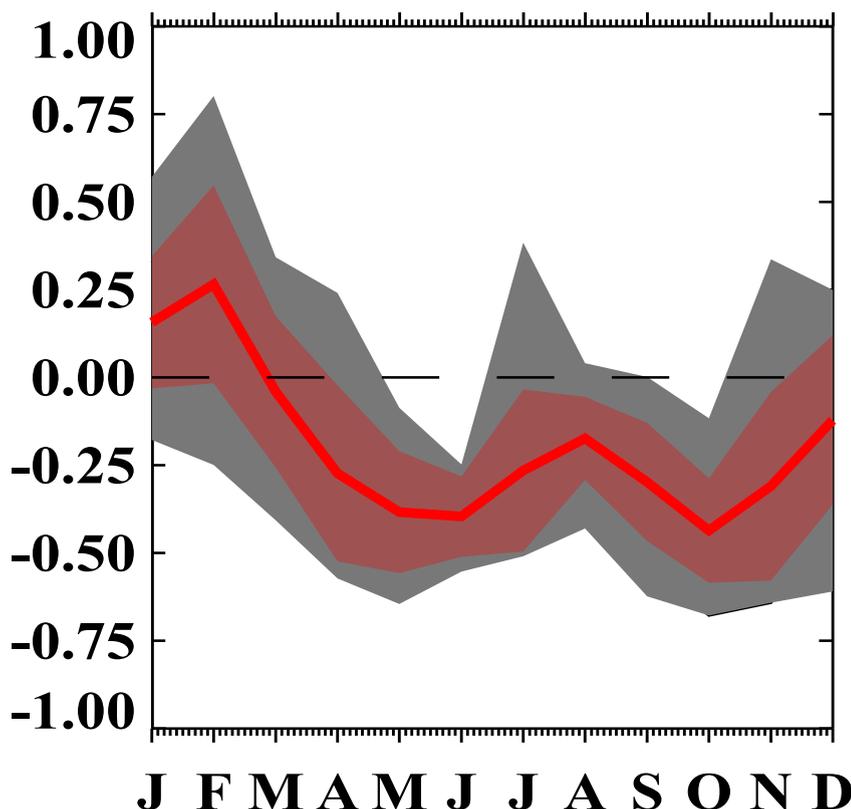


FIGURE 3.57 – Changements relatifs mensuels des débits de la Drôme à Saillans entre les périodes 2046/2065 et 1970/1999, calculés à partir des sorties des 14 modèles du GIEC (4^{ème} rapport) et du scénario d'émission A1B. Le trait rouge est la moyenne d'ensemble, la zone rouge claire est limitée par la moyenne d'ensemble plus ou moins un écart type, la zone gris foncée est délimitée par les valeurs minimum et maximum des 14 modèles. D'après Boe [2007]

Il est donc **probable que dans le futur, les débits d'étiage de la Drôme seront plus faibles que ce qu'ils ont été sur les dernières décennies**. Les précipitations futures, plus importantes en hiver, peuvent laisser penser que le niveau des nappes (qui se rechargent en partie grâce à ces précipitations hivernales), voire des karst captifs comme ceux de la Gervanne, seront moins impactés.

Dans les prochaines années (échéances 2016 et 2021 du SDAGE par exemple), la variabilité interannuelle des débits est par contre a priori plus forte que la tendance climatique, surtout que les dernières années passées étant déjà plutôt sèches par rapport à la période de référence sur les 30 dernières années.

Notons que le changement climatique aura aussi des impacts indirects sur les prélèvements : évolution des variétés plantées pour s'adapter au climat, plantation plus précoce éventuellement possible (donc le pic de demande en eau pourrait aussi être avancé dans l'année), etc...

3.3.4.4 Impact du reboisement du bassin

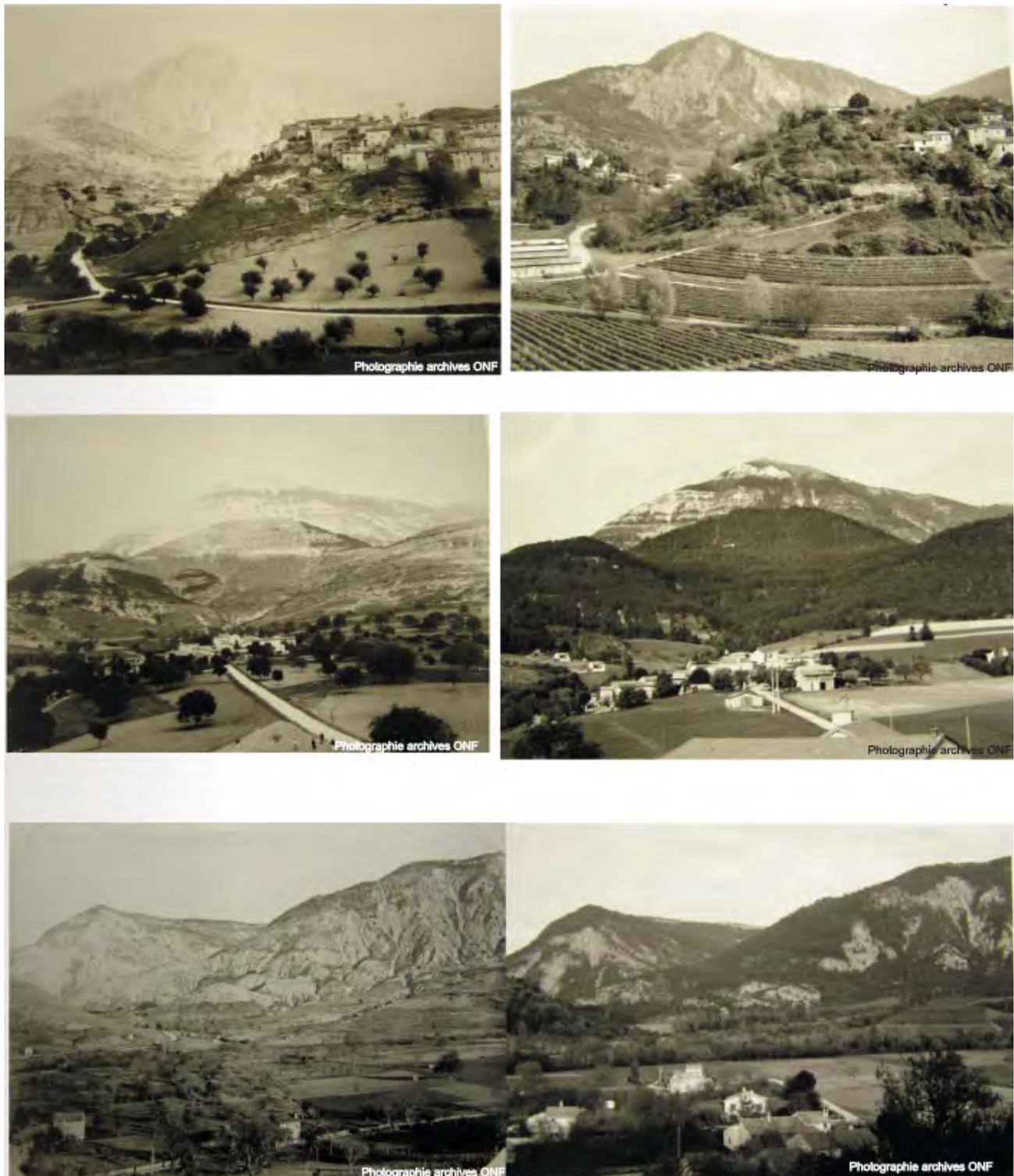


FIGURE 3.58 – Exemples de paysage en cours de reboisement sur le bassin de la Drôme, d’après les archives ONF (document tiré de Moury et al. [2008])

Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, le paysage du bassin de la Drôme a énormément changé, avec le passage de parcelles cultivées ou de prairies, voire surtout de terrains dégradés (surpâturage, surexploitation forestière) à un paysage beaucoup plus forestier. Cette reforestation a pu être naturelle, par l’abandon de parcelles du fait de la déprise agricole, ou bien artificielle avec les travaux importants

du RTM dans le Diois et le Haut-Diois, où d'importantes plantations de pins noir d'Autriche ont été faites pour fixer les sols qui étaient de plus en plus dégradés et donnaient lieu à des glissements de terrain et à des laves torrentielles.

La forêt qui couvrait ainsi 25% du bassin vers 1800, 30% en 1850, occupe maintenant plus de 80% de la superficie du territoire.

Quel est l'impact de ce reboisement du bassin sur l'hydrologie et plus particulièrement les débits d'étiage ?

Cette problématique de l'usage des sols et de la déforestation est une question fréquemment abordée en hydrologie, mais généralement regardée sous l'angle "crues" et beaucoup moins pour les problématiques d'étiage.

Si il est généralement admis qu'à pluviométrie équivalente, les forêts transpirent plus que les prairies en volume annuel à l'échelle d'une même zone [Turner, 1991] [Zhang et al., 1999] (voir figure 3.59), les conditions pédologiques ne sont pas forcément comparables sous ces deux couverts. Les forêts sont implantées sur des sols profonds (qu'elles ont pu contribuer à développer), offrant un potentiel de stockage souterrain de l'eau plus important. La réserve d'eau à évaporer est donc potentiellement plus grande que dans un sous-sol de prairie, ce qui fait la différence sur le bilan entre les deux types de couvert durant les périodes sèches ou l'évapotranspiration est plus importante que le volume de précipitation. Best et al. [2003] montrent à partir d'expérience sur des bassins similaires que la déforestation a tendance à augmenter les débits d'étiage. Mais qu'en est-il quand on passe sur le même territoire, à l'échelle de quelques années d'un paysage de prairies à un paysage de forêt, comme cela a été le cas sur la Drôme ?

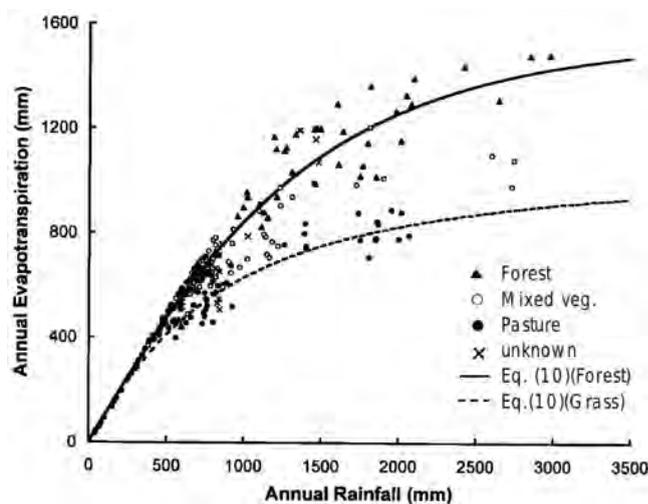


FIGURE 3.59 – Evapotranspiration annuelle en fonction de la précipitation annuelle pour des couverts forestiers et des couverts de prairies (d'après Zhang et al. [1999])

Le passage de zone de landes et prairies à des zones boisées joue sur deux aspects :

1. D'une part, les coefficients de ruissellement sont moins importants pour des sols forestiers, donc l'eau aura plus tendance à s'infiltrer et à être restitué vers les cours d'eau plus lentement, ce qui favorise plutôt le soutien d'étiage, les débits de hautes eaux étant par contre réduits avec la diminution des coefficients de ruissellement.
2. D'autre part, le coefficient cultural d'une parcelle de forêt est plus faible que celui d'une prairie (voir annexe page 492 et suivantes), donc à épaisseur de sol (et réserve utile) égale, si tant est que ce sol ne soit pas trop profond, une prairie aura tendance à évapotranspirer plus d'eau qu'une forêt⁹ et donc à laisser moins d'eau disponible pour la réalimentation des sols et des nappes. Il est cependant possible que la repousse de la forêt modifie la profondeur de sol, mais ce phénomène doit prendre un certain temps.

Si on considère par contre comme état initial un sol nu (ce qui semblait en partie être le cas sur

9. La transpiration d'un végétal dépend entre autres de la façon dont l'espèce va jouer les flux turbulents d'échange avec l'atmosphère (hauteur et rugosité du végétal), de la capacité de régulation stomatique de l'espèce, et de sa surface foliaire par unité de sol.

le bassin de la Drôme), alors la quantité d'eau évapotranspirée par la forêt est bien supérieure à ce qui pouvait être repris par évaporation dans la sol avant la plantation de la forêt.

Là où les sols sont peu profonds (ce qui est une hypothèse sensée sur le bassin de la Drôme) et où une prairie était présente, l'impact du reboisement du bassin est donc a priori positif quant à l'augmentation des débits d'étiage, même si les écoulements moyens ont pu baisser. Si les sols sont plus profonds, il est plus difficile de conclure et il est possible que la reforestation diminue au contraire les débits d'étiage. Dans le cas où les sols étaient à nu, la reforestation a réduit les débits d'étiage.

L'exemple des débits d'étiage à la station de Luc-en-Diois (figure 1.35) montre qu'il n'y a pas de tendance flagrante à l'échelle du XIX^{ème} siècle quant à une augmentation ou une diminution des débits, mais il faudrait être en capacité de réaliser une analyse plus fine de la qualité de ces données hydrométriques, et surtout de pouvoir quantifier l'impact de la tendance climatique sur la zone (qui doit plutôt jouer vers une baisse des débits), ce qui dépasse le cadre de cette étude.

L'impact du reboisement du bassin de la Drôme a donc de diminuer l'écoulement moyen à l'échelle annuelle des rivières. L'impact est plus nuancé sur les débits d'étiage, avec une diminution des débits sur les bassins qui étaient très dégradés, et un impact sans doute faible voire positif sur les bassins avec des zones de pâtures de bonne qualité. Au delà des conséquences sur la stabilité des versants, d'un point de vue hydrologique, ce reboisement a par contre été sans doute très positif quant à la limitation des débits de crues.

3.3.5 Proposition de points stratégiques de référence

Les points stratégiques de référence sont des points sur lesquels les débits (ou les niveaux de nappes) sont suivis, de manière continue (station hydrométrique) ou occasionnelle, afin d'apprécier l'état de la ressource et des prélèvements. Des niveaux seuils sont proposés à ces points afin d'anticiper la crise puis d'éventuellement prendre des arrêtés en cas de dépassement de ces seuils à la baisse.

Sur le bassin de la Drôme, deux points de suivi des eaux superficielles ont d'ores et déjà été proposés dans le SDAGE :

1. un "point de Confluence" au niveau de la station de Loriol (point n°45 du SDAGE). L'intérêt de ce point est d'être à l'exutoire du bassin et donc de contrôler théoriquement l'intégralité des débits produits sur le bassin. Néanmoins, les données de cette station ne sont disponibles que pour 2003, et la qualité des mesures en étiage est médiocre. Une reprise de la station pour le suivi des débits d'étiage serait alors nécessaire.

Une possibilité serait de transférer ce point au niveau de la "nouvelle" station CNR de Livron ; l'intérêt est que les écoulements souterrains sont a priori beaucoup plus limités à cet endroit. Une convention serait à mettre en place avec la CNR (en vérifiant que les mesures d'étiage soient correctes), ou à défaut une autre station serait à installer dans le voisinage.

Une autre possibilité serait de réaliser les mesures au niveau du seuil des Pues, où de la donnée a déjà été capitalisée, et c'est un point qui sert de repère actuellement pour la gestion des étiages de la Drôme (seuil de 2.4m³/s). Néanmoins, l'endroit est quand même peu favorable pour réaliser des mesures de qualité, malgré que le seuil des Pues ait subi des travaux durant l'été 2011 pour créer une nouvelle passe à poisson (l'ancienne était sujette aux engravements), ce qui devrait permettre de mieux mesurer les débits d'étiage, canalisés vers ce seuil.

De notre point de vue, la mesure au niveau de la cluse de Livron-Loriol serait préférable.

2. Un point de référence au niveau de la station de Saillans (point n°44 du SDAGE). Ceci est une excellente chose au vu du placement de la station en amont des zones de forts prélèvements, de

la qualité potentielle des données de cette station et de sa profondeur d'archive.

Les débits caractéristiques d'étiage naturels et anthropisés correspondant à ces points sont présentés dans la table 3.3.

Seuil des Pues

	QMNA5	QMNA2	VCN ₁₀₋₅	VCN ₁₀₋₂	VCN ₃₋₅	VCN ₃₋₂
Débit naturel (m ³ /s)	1.96 [1.13,3.4]	3.8 [2.69,5.36]	1.33 [0.83,2.14]	2.35 [1.75,3.17]	1.21 [0.76,1.94]	2.14 [1.59,2.87]
Débit anthropisé (m ³ /s)	1.03 [0.47,2.24]	2.63 [1.61,4.28]	0.55 [0.24,1.23]	1.45 [0.87,2.41]	0.44 [0.19,1.06]	1.27 [0.73,2.19]

Station hydrométrique de Saillans

	QMNA5	QMNA2	VCN ₁₀₋₅	VCN ₁₀₋₂	VCN ₃₋₅	VCN ₃₋₂
Débit naturel (m ³ /s)	1.79 [1.23,2.6]	2.81 [2.22,3.56]	1.49 [1.13,1.96]	2.07 [1.74,2.46]	1.42 [1.08,1.87]	1.98 [1.67,2.35]
Débit anthropisé (m ³ /s)	1.67 [1.13,2.48]	2.69 [2.1,3.45]	1.37 [1.02,1.85]	1.96 [1.63,2.36]	1.32 [0.98,1.76]	1.87 [1.56,2.25]

Pont de Livron (RN7)

	QMNA5	QMNA2	VCN ₁₀₋₅	VCN ₁₀₋₂	VCN ₃₋₅	VCN ₃₋₂
Débit naturel (m ³ /s)	2.54 [1.56,4.12]	4.55 [3.36,6.16]	1.9 [1.28,2.81]	3.05 [2.38,3.89]	1.78 [1.21,2.61]	2.82 [2.22,3.59]
Débit anthropisé (m ³ /s)	1.68 [0.91,3.12]	3.53 [2.4,5.2]	1.24 [0.74,2.09]	2.32 [1.68,3.21]	1.18 [0.71,1.95]	2.16 [1.57,2.97]

TABLE 3.3 – Débits caractéristiques d'étiage aux points de référence Pont de Livron (RN7) et intervalle de confiance à 95% sur les ajustements statistiques)

Le bassin ayant la chance d'être déjà bien instrumenté, les autres stations hydrométriques peuvent avoir vocation à servir de point de référence.

Deux piézomètre de référence ont été définis dans le SDAGE :

1. le piézomètre de Eurre (piézomètre n°35 du SDAGE),
2. le piézomètre de Grâne (piézomètre n°36 du SDAGE).

Ces piézomètres sont sur la zone à enjeux et semblent donc suffisant pour suivre les niveaux de nappe, en plus du piézomètre SMRD. Le suivi du cône de déjection de la Drôme en aval de Livron-Loriol pourra être précisé en fonction des résultats futurs quant à la relation nappe-rivière.

