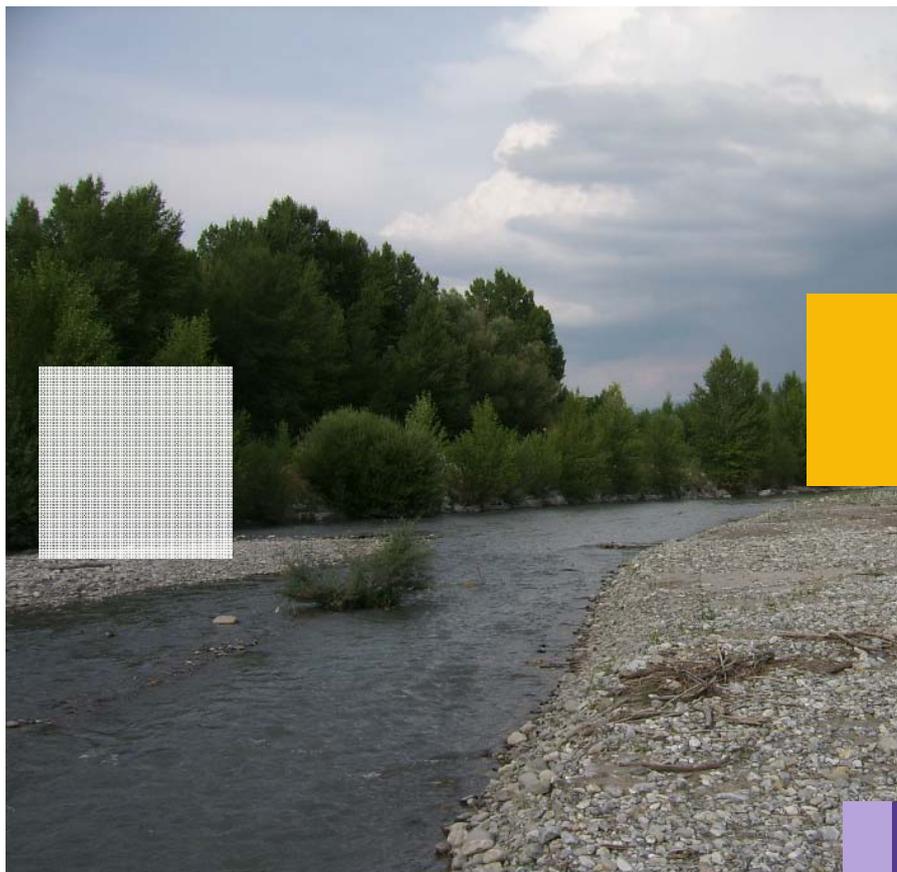


# ÉTUDES D'ESTIMATION DES VOLUMES PRÉLEVABLES GLOBAUX



## Sous bassin versant de la BLEONE

Rapport définitif phase 3 • octobre 2011



**MAÎTRE D'OUVRAGE**

**AGENCE DE L'EAU RHÔNE  
MEDITERRANEE CORSE**

**OBJET DE L'ETUDE**

**ETUDE DE DETERMINATION DES  
VOLUMES PRELEVABLES DU BASSIN  
VERSANT DE LA BLEONE**

**N° AFFAIRE**

**M09068**

**INTITULE DU RAPPORT**

***Quantification de la ressource disponible  
(phase 3)***

5	25/10/2011	Julien BERTHELOT		Compléments suite au courrier du 11 avril 2011
4	10/12/2010	Fabien CHRISTIN	Julien BERTHELOT	Compléments et finalisation de la phase 3
3	30/09/2010	Fabien CHRISTIN	Julien BERTHELOT	Compléments divers
2	10/09/2010	Fabien CHRISTIN	Philippe DEBAR	Compléments au dossier
1	21/07/2010	Fabien CHRISTIN	Julien BERTHELOT	
<i>N° de Version</i>	<i>Date</i>	<i>Établi par</i>	<i>Vérifié par</i>	<i>Description des Modifications / Évolutions</i>



Octobre 2011

Établi par CEREG Ingénierie / FCH

## TABLE DES MATIÈRES

<b>A. PRESENTATION DE L'ETUDE.....</b>	<b>10</b>
A.I ELEMENT DE CONTEXTE .....	11
A.II CONTENU DU RAPPORT .....	13
A.III METHODOLOGIE GENERALE DE LA PHASE 3.....	13
<b>B. DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT .....</b>	<b>14</b>
B.I DONNEES GENERALES .....	15
B.I.1 Topographie .....	15
B.I.2 Géologie .....	16
B.I.3 Hydrogéologie .....	17
B.I.4 La couverture végétale .....	17
B.II SECTORISATION DU BASSIN VERSANT .....	18
<b>C. ANALYSE DES DONNEES .....</b>	<b>20</b>
C.I DONNEES METEOROLOGIQUE .....	21
C.I.1 Données acquises .....	21
C.I.2 Analyse de la pluviométrie .....	22
C.I.3 Analyse de la température .....	27
C.I.4 Analyse de la neige.....	27
C.I.5 Analyse de l'EvapoTranspiration Potentielle (ETP).....	28
C.II DONNEES DEBITMETRIQUES .....	29
C.II.1 Analyse des débits aux stations hydrométriques .....	29
C.II.1.1 Station du Bès à la Clue de Pérouré .....	29
C.II.1.2 Station de la retenue de l'Escale à Malijai .....	31
C.II.2 Campagnes de mesures complémentaires (DDT – CEREG Ingénierie).....	33
C.III HYDROGEOLOGIE.....	36
C.III.1 Nappe alluviale de la Bléone .....	36
C.III.2 Autres nappes alluviales.....	38
C.III.2.1 Nappe du Bès .....	38
C.III.2.2 Nappe des Duyes.....	38
C.III.2.3 Autres affluents de la Bléone .....	39
C.III.3 Evolutions de la piézométrie de la nappe alluviale de la Bléone.....	39
C.III.3.1 Variations des niveaux de la nappe et influences des précipitations .....	40
C.III.3.2 Echanges nappes/rivières .....	41
<b>D. MODELISATION DES DEBITS .....</b>	<b>44</b>
D.I METHODOLOGIE GENERALE .....	45
D.II MODELE HYDROLOGIQUE.....	46
D.II.1 Chaîne de calcul pour déterminer les débits ruisselés.....	46
D.II.2 Présentation du logiciel ATHYS.....	47

D.II.3	<i>Présentation des modèles Neige et ETP</i> .....	48
D.II.4	<i>Période de simulation</i> .....	49
D.II.5	<i>Traitement des données</i> .....	49
D.II.6	<i>Calage</i> .....	53
D.III	MODELE DE NAPPE ALLUVIALE .....	59
D.III.1	<i>Présentation du modèle</i> .....	59
D.III.2	<i>Calage et résultats</i> .....	61
D.III.3	<i>Vision global de l'hydrologie du bassin versant de la Bléone</i> .....	64
<b>E.</b>	<b>ANALYSE DES RESULTATS</b> .....	<b>67</b>
E.I	RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA MODELISATION .....	68
E.II	METHODOLOGIE POUR L'ANALYSE DES RESULTATS .....	68
E.II.1	<i>Définition des scénarios de prélèvements</i> .....	69
E.II.1.1	<i>Scénario de prélèvement minimum</i> .....	69
E.II.1.2	<i>Scénario de prélèvement maximum</i> .....	69
E.III	COMPARAISON AVEC LES DONNEES MESUREES .....	70
E.III.1	<i>Comparaison des données hydrométriques</i> .....	70
E.III.2	<i>Comparaison avec les données instantanées</i> .....	71
E.IV	COMPARAISON STATISTIQUES .....	72
<b>F.</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>77</b>
F.I	QUALITE DU MODELE .....	78
F.II	LIMITES ET INCERTITUDES SUR LES RESULTATS .....	78
F.III	INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES.....	79
F.III.1	<i>Hydrogéologie de la nappe alluviale de la Bléone</i> .....	79
F.III.2	<i>Campagne de mesure des débits instantanés des prélèvements</i> .....	80
F.III.1	<i>Fonctionnement des canaux gravitaires collectifs</i> .....	80
F.IV	PROPOSITION DE POINTS NODEAUX .....	80

## LISTE DES PLANCHES

➤	Planche n°1 : Localisation géographique.....	11
➤	Planche n°2 : Réseau hydrographique .....	15
➤	Planche n°7 : Carte des altitudes.....	15
➤	Planche n°6 : Contexte lithologique .....	16
➤	Planche n°3 : Occupation des sols .....	17
➤	Planche n°8 : Points de jaugeage .....	33
➤	Planche n°11 : Bd Alti : vue illustrative du bassin versant.....	49

## LISTE DES ILLUSTRATIONS

Illustration n°1 : Courbe hypsométrique .....	15
Illustration n°2 : Schéma structural simplifié du bassin versant de la Bléone (Sogreah, 2005).....	16
Illustration n°3 : Localisation des stations météorologiques.....	21
Illustration n°4 : Précipitations moyennes annuelles sur la période 1968-2008 .....	23
Illustration n°5 : Variation des cumuls annuels de pluies en fonction de l'altitude des stations .....	23
Illustration n°6 : Variation des cumuls annuels de pluies .....	24
Illustration n°7 : Précipitations annuelles sur les stations de Beaujeu et Saint-André-les-Alpes .....	24
Illustration n°8 : Nombre de jours de pluie et par an et intensité sur la période 1997-2007.....	25
Illustration n°9 : Cumuls des précipitations pendant la période d'irrigation (1968-2008) .....	25
Illustration n°10 : Cumuls des précipitations pendant la période d'irrigation (1998-2008) .....	26
Illustration n°11 : Température moyenne mensuelle à Saint-Auban et Digne.....	27
Illustration n°12 : Variations de l'ETP sur l'année (moyenne 1968-2008) .....	29
Illustration n°13 : Débits moyens mensuels du Bès à Pérouré sur la période 1964 à 2008 .....	30
Illustration n°14 : Débits moyens mensuels reconstitués de la Bléone à Malijai sur la période 1969 à 2008.....	31
Illustration n°15 : Débits journaliers reconstitués de la Bléone à Malijai sur l'année 2006 .....	32

Illustration n°16 : Jaugeages complémentaires réalisés durant la période d'étiage .....	35
Illustration n°17 : Jaugeages complémentaires réalisés durant la période hivernale .....	35
Illustration n°18 : Suivi piézométrique réalisé entre 2001 et 2005 au niveau de Malemoisson (Piézomètre P1).....	40
Illustration n°19 : Suivi piézométrique réalisé entre 2005 et 2010 au niveau de Malijai (Piézomètre 2PMI).....	41
Illustration n°20 : Cartes piézométriques illustrant les sens des échanges nappes-rivières : à gauche, à Plan de Gaubert, la nappe alimente la rivière ; à droite, en amont de Malijai, la rivière alimente la nappe).....	43
Illustration n°21 : Synoptique des différents modules utilisés pour la simulation des débits .....	45
Illustration n°22 : Détails de la chaîne de calcul du modèle hydrologique ATHYS.....	47
Illustration n°23 : Fonctionnement du modèle ATHYS (source : IRD).....	48
Illustration n°24 : Exemple de carte des altitudes (à gauche) et du réseau hydrographique (à droite) ....	50
Illustration n°25 : Exemple de carte des altitudes (à gauche) et du réseau hydrographique (à droite) ....	51
Illustration n°26: Débits observés et simulés du Bès à Pérouré entre mai et décembre 2006.....	54
Illustration n°27: Débits moyens mensuels observés et simulés du Bès à Pérouré sur la période 1968-2008.....	55
Illustration n°28: Modules annuels des débits observés et simulés du Bès à Pérouré entre 1968 et 2008	56
Illustration n°29: Débits observés et simulés de la Bléone à Malijai entre mai et décembre 2006.....	57
Illustration n°30: Synoptique du modèle hydrogéologique des échanges nappes-rivières .....	59
Illustration n°31: Débits journaliers observés et simulés de la Bléone à Malijai.....	62
Illustration n°32: Evolution amont-aval des débits moyens mensuels simulés de juillet à septembre sur le bassin versant de la Bléone .....	63
Illustration n°33: Débits moyens mensuels simulés et reconstitués de la Bléone au niveau de Malijai ..	70
Illustration n°34: Débits reconstitués et simulés de la Bléone au niveau de Malijai (2006).....	71
Illustration n°35 : Comparaison du jaugeage DDT du 27/10/2008 avec les débits simulés avec les prélèvements minimums et maximums .....	72
Illustration n°36 : Comparaison des modules observés et simulés du Bès à Pérouré .....	73
Illustration n°37 : Comparaison des débits du mois d'août observés et simulés du Bès à Pérouré .....	74
Illustration n°38 : Comparaison des modules observés et simulés de la Bléone à Malijai .....	75
Illustration n°39 : Comparaison des débits moyens observés et simulés du mois d'août pour la Bléone à Malijai – Prélèvements minimums à gauche et maximums à droite.....	75

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°1 : Répartition par classes des altitudes .....	15
Tableau n°2 : Occupation des sols .....	18
Tableau n°3 : Découpage en sous bassin versant .....	19
Tableau n°4 : Synthèse des données météorologiques .....	22
Tableau n°5 : Moyenne du nombre de jours où le sol est recouvert de neige (moyennes de 2005 à 2008) .....	28
Tableau n°6 : Valeurs caractéristiques de la station hydrométrique du Bès (période 1964 à 2008).....	29
Tableau n°7 : Valeurs caractéristiques des débits reconstitués de la Bléone au niveau de Malijai (période 1969 à 2008) .....	31
Tableau n°8 : Synthèse des jaugeages complémentaires CEREG et DDT sur la Bléone et ses affluents	34
Tableau n°9 : Caractéristiques de l'aquifère de la Bléone de Marcoux à Malijai.....	37
Tableau n°10 : Description de l'aquifère des Duyes au droit de la commune de Thoard.....	39
Tableau n°11 : Caractéristiques de la nappe alluviale de la Bléone sur plusieurs secteurs.....	42
Tableau n°12 : Répartition des superficies des classes de production au niveau du bassin versant de la Bléone .....	51
Tableau n°13 : Données pluviométriques reconstituées.....	52
Tableau n°14 : Influence comparée des stations pluviométriques sur le bassin versant de la Bléone .....	52
Tableau n°15 : Valeurs des paramètres de modélisation après calage .....	53
Tableau n°16 : Caractéristiques du débit du Bès à la Clue de Pérouré entre 1968 et 2008 .....	54
Tableau n°17 : Caractéristiques du débit de la Bléone à Malijai entre 1968 et 2008.....	57
Tableau n°18 : Secteurs homogènes de nappe alluviale sur le bassin de la Bléone.....	61
Tableau n°19 : Paramètres des tronçons de rivières et de nappes alluviales du module hydrogéologique .....	62
Tableau n°20 : Caractéristiques des débits reconstitués et simulés de la Bléone entre 1968 et 2008.....	63
Tableau n°21 : Débits naturels caractéristiques modélisés sur le bassin versant de la Bléone .....	64
Tableau n°22 : Volumes écoulés en année moyenne sur les sous bassins versants BV10, BV14 et BV15 de la Bléone.....	65
Tableau n°23 : Volumes écoulés en année sèche sur les sous bassins versants BV10, BV14 et BV15 de la Bléone .....	66
Tableau n°24 : Débits caractéristiques sur les sous bassins versants BV10, BV14 et BV15 de la Bléone .....	73

## ANNEXE

**Erreur ! Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.**

## PRÉAMBULE

Le Bureau d'étude CEREG Ingénierie a été missionné pour réaliser *l'étude de détermination des volumes prélevables* sur le bassin versant de la Bléone. Cette étude d'une durée de 18 mois doit traiter des aspects suivants :

- Recenser et évaluer les usages de l'eau sur le bassin versant ;
- Analyser les ressources en eau disponibles ;
- Evaluer et identifier les zones naturelles présentant une vie aquatique remarquable ;
- Identifier les problèmes occasionnés par les prélèvements ;
- Proposer les volumes pouvant être prélevé sur le bassin versant sans mettre en péril la vie aquatique, les besoins en eaux potable, etc... ;
- proposer des outils de gestion et des pistes d'amélioration de situations problématiques.

L'étude est décomposée en 6 phases :

- **Phase 1 : Une caractérisation du bassin versant** par une reconnaissance de terrain et une analyse des données disponibles ;
- **Phase 2 : Un bilan des prélèvements actuel et des besoins.** Cette phase est réalisée par une analyse des données disponibles et des enquêtes auprès des usagers de l'eau ;
- **Phase 3 : La quantification de la ressource disponible** à l'aide d'une modélisation hydrologique ;
- **Phase 4 : La détermination des débits biologiques** à l'aide de la méthode ESTIMHAB ;
- **Phase 5 : La détermination des volumes prélevables** par croisement de la ressource disponible et des besoins ;
- **Phase 6 : Répartitions des volumes entre les usagés** et détermination du périmètre de l'organisme unique.

**Ce rapport traite la phase 3 de cette étude.**

## A. PRESENTATION DE L'ETUDE

---

---

## **A.I ELEMENT DE CONTEXTE**

### **□ Localisation géographique**

➤ *Planche n°1 : Localisation géographique*

Le bassin versant de la Bléone est situé au centre du département des Alpes de Haute de Provence et abrite notamment la préfecture du département, Digne les Bains.

Vingt cinq communes sont situées en totalité ou partiellement sur ce bassin versant.

La Bléone draine un bassin versant de 905 km<sup>2</sup> et présente une longueur de 60 km avant de confluer avec la Durance au droit de la commune de Château-Arnoux. Ses deux principaux affluents sont situés en rive droite : Le Bès et les Duyes.

### **□ Contexte réglementaire**

La Circulaire 17-2009 du 30 juin 2008 fixe les objectifs généraux pour la réduction des déficits quantitatifs observés ces dernières années sur de nombreux bassins versants. Deux objectifs principaux sont à retenir:

- Une révision des autorisations de prélèvement afin de parvenir au maintien dans le cours d'eau de débits minimaux et dans la nappe, de niveaux piézométriques compatibles avec l'ensemble des usages ;
- La constitution d'un Organisme de Gestion Unique (OGU) regroupant l'ensemble des préleveurs agricoles sur un sous bassin versant. Cet OGU aura notamment pour charge de répartir les droits de prélèvement.

Pour atteindre ces objectifs, 3 grandes étapes sont proposées:

- Etape 1 : La détermination de volumes prélevables à l'échelle du bassin versant. Ces volumes prélevables sont estimés sur la base de la ressource disponible et du maintien dans le cours d'eau d'un débit permettant de maintenir la vie piscicole actuelle. Le même principe est appliqué aux ressources en eaux souterraines ;
- Etape 2 : La concertation avec les irrigants en vue de répartir les volumes prélevables ;
- Etape 3 : La mise en place de l'OGU et la révision des autorisations de prélèvement.

**L'étude actuelle ne concerne que l'étape 1.**

❑ *Vers une aggravation des étiages : le contexte du changement climatique*

Le calcul des volumes prélevables repose sur l'estimation de la ressource disponible. La ressource provient de la pluviométrie et de la façon dont le cours d'eau collecte les ruissellements de surface. Aujourd'hui, les experts du changement climatique annoncent (source étude du CEMAGREF sur l'impact du réchauffement climatique sur le périmètre du SDAGE RM&C) :

- Une diminution des précipitations estivales ;
- Une diminution des précipitations neigeuses ;
- Une augmentation des températures estivales.

Les conséquences de ces phénomènes seraient une réduction notable des débits estivaux. Il convient donc d'analyser l'impact du réchauffement climatique dans le cadre de cette étude.

De plus, les étiages pourraient être aggravés par une augmentation des prélèvements pour compenser les manques d'eau. Il est donc nécessaire d'estimer l'impact sur les besoins en eaux (population et agriculture) du réchauffement climatique.

❑ *Contexte hydrologique et climatique*

Le bassin versant de la Bléone peut être découpé en deux sous ensembles :

- La haute Bléone (amont de Digne) où le climat est plutôt montagnard avec des précipitations neigeuses et des cumuls pluviométriques annuels de l'ordre de 1000 mm. Dans cette zone, l'homme est peu présent. Le cours d'eau est donc non aménagé et les prélèvements sont très faibles ;
- La partie basse (aval de Digne) où le climat est plutôt méditerranéen avec des cumuls pluviométrique de l'ordre de 700 mm. La zone est fortement anthropisée avec de nombreuses digues et ouvrages de franchissement. Les prélèvements sont aussi importants.

Au niveau hydrogéologique, on notera que le bassin versant de la Bléone est situé sur trois masses d'eau : alluvions de la Durance, domaine plissé de la Durance et conglomérats du plateau de Valensole.

## A.II CONTENU DU RAPPORT

L'objectif de l'étude est la détermination des volumes maximums prélevables sur le bassin versant de la Bléone. Comme indiqué dans le préambule ce rapport correspond à la phase 3 de l'étude : La quantification de la ressource disponible à l'aide d'une modélisation hydrologique.

## A.III METHODOLOGIE GENERALE DE LA PHASE 3

La phase 3 de quantification de la ressource disponible par modélisation hydrologique et hydrogéologique, est une phase essentielle dans la suite de l'étude. En effet, les volumes prélevables sont définis en fonction des débits reconstitués aux points nodaux du bassin versant. Il convient donc de reconstituer au mieux les débits de la Bléone et de ses affluents.

La première étape de cette phase a consisté en une analyse des données météorologiques, débitométriques, hydrogéologiques existantes sur le bassin. Cette étape primordiale permet de comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin et d'utiliser les outils de calcul les plus pertinents pour caractériser l'état naturel.

Dans une seconde étape, des outils de calcul (modèles et feuille de calculs) ont été mis en œuvre sur le bassin versant de la Bléone. Ils ont été adaptés au contexte local du bassin versant : pluviométries, occupation des sols, caractéristiques de la nappe alluviale, spécificité des adoux...

A chaque étape de calcul, une validation sur les données mesurées a été recherchée afin de garantir que les modèles soient les plus proches possible de la réalité.

Enfin la dernière étape a consisté à extraire les résultats des modèles pour la suite de l'étude. Les qualités et les défauts des modèles ont été analysés pour en apprécier les conséquences sur la détermination des volumes prélevables et aussi proposer des pistes d'amélioration ou de confirmation des hypothèses.

L'intérêt de cette méthode repose sur le fait qu'elle produit une chronique de **40 ans de données à un pas de temps journalier** en de multiples points du bassin versant. Cette finesse de calcul permet de :

- caractériser le bassin versant, non pas par des valeurs moyennes, peu représentatives de la variabilité climatologique, mais plutôt par ses excès ou ses manques d'eau et la fréquence de ceux-ci ;
- reconstituer les variations instantanées des débits, sur un bassin versant où les étiages sévères peuvent ne durer que quelques jours avant qu'un orage ne vienne augmenter les débits. Dans ce cas, une moyenne décadaire ou mensuelle peut passer à côté de crises ;
- localiser les points noirs sur le bassin versant.

## B. DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT

---

---

## B.I DONNEES GENERALES

### B.I.1 Topographie

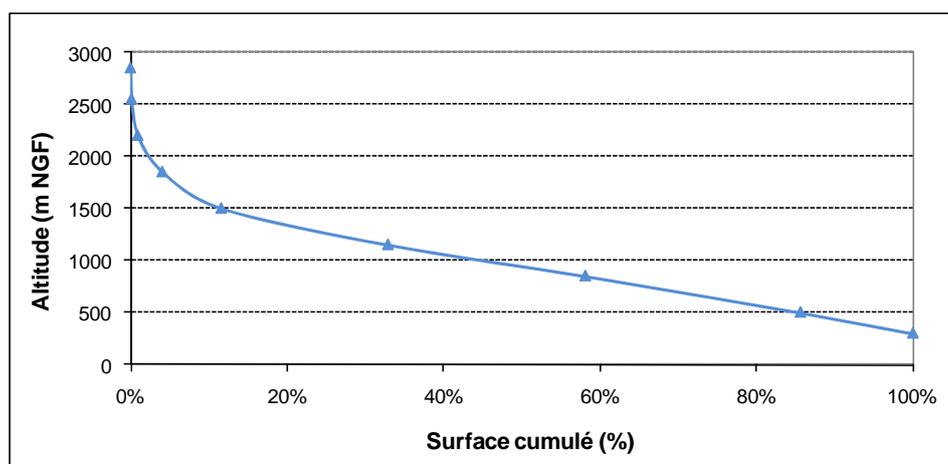
- *Planche n°2 : Réseau hydrographique*
- *Planche n°7 : Carte des altitudes*

La Bléone draine, au droit de la confluence avec la Durance, un bassin versant de 905 km<sup>2</sup>. Le cours d'eau principal a une longueur de 62 km. Les deux affluents principaux sont en rive droite : le Bès qui draine 197 km<sup>2</sup> et les Duyes qui drainent 124 km<sup>2</sup>.

L'altitude varie de 2 819 m NGF, sur le pic des Trois Evêchers à 405 m NGF à sa confluence. Le tableau 1 et le graphique de l'illustration 1 ci-dessous indiquent la répartition de l'altitude entre ces deux extremums.

Altitudes (m)	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)	Pourcentage cumulé (%)
< 700	130.12	14.4%	14.4%
700 – 1000	248.78	27.5%	41.9%
1000 – 1300	228.34	25.2%	67.1%
1300 – 1700	192.83	21.3%	88.4%
1700 – 2000	68.12	7.5%	95.9%
2000 - 2400	28.51	3.2%	99.1%
2400 - 2700	7.18	0.8%	99.9%
< 3000	1.10	0.1%	100.0%

*Tableau n°1 : Répartition par classes des altitudes*



*Illustration n°1 : Courbe hypsométrique*

## B.I.2 Géologie

Sources : Schéma de restauration et de gestion de la Bléone et de ses affluents (Sogreah, 2008)

➤ *Planche n°6 : Contexte lithologique*

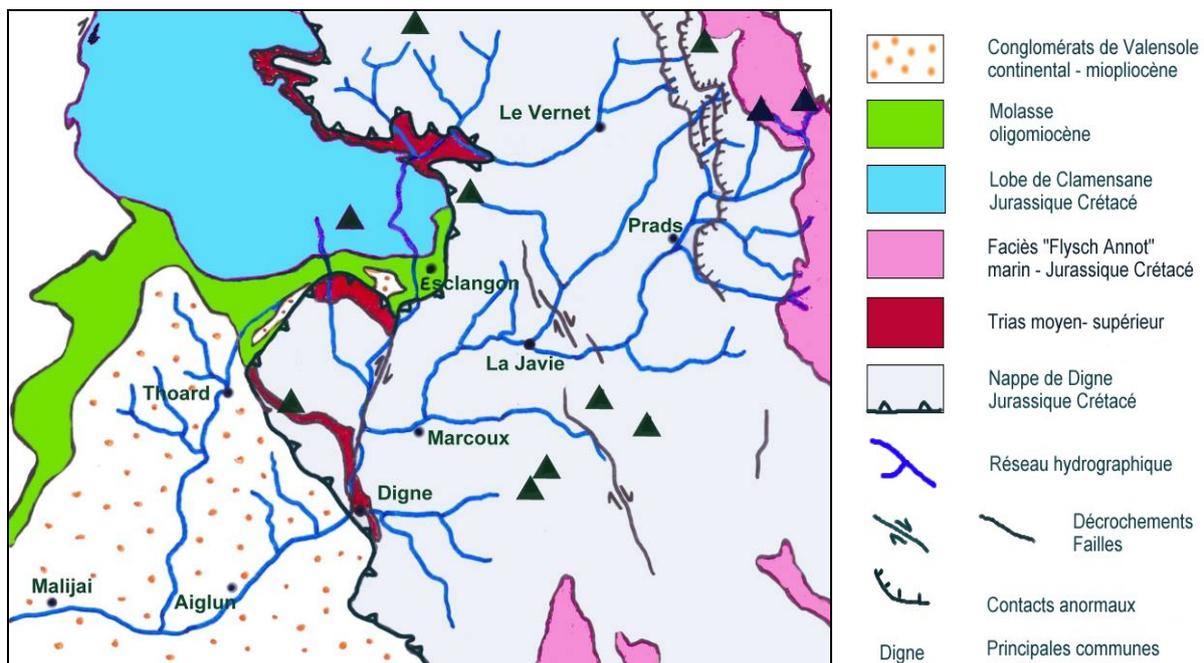
Le bassin versant de la Bléone est situé au carrefour entre trois séries géologiques : la série provençale, la série dauphinoise et la série vocontienne (Préalpes). Ces trois séries se sont déformées et chevauchées lors de la formation des chaînes subalpines du Trias au Crétacé supérieur.

Sur le bassin versant de la Bléone, on note les grands ensembles géologiques suivants :

- Les **calcaires de la nappe de Digne** sont un domaine plissé représenté par des crêtes calcaires et marneuses. Ils occupent le bassin versant de l'Est de Digne à la Javie et forment un massif de crêtes continues.

Les crêtes calcaires forment un magasin aquifère non négligeable qui permet la présence de nombreuses sources le long du front de chevauchement de Digne/Barles. Ces sources alimentent aujourd'hui les captages des communes de Champtercier, Thoard et Mellan.

- Le **Lobe de Clamensanne** présent sur la commune de Barles. Le faciès est similaire à celui des calcaires de la nappe de Digne.



*Illustration n°2 : Schéma structural simplifié du bassin versant de la Bléone (Sogreah, 2005)*

- Les **conglomérats de Valensole** qui occupent le secteur sud-Ouest du bassin versant. Il se compose sur la couche supérieure de grès et de marnes peu perméables donnant naissance à des sources de faibles débits (inférieurs à 5 l/s).

- Les **molasses oligomiocènes** qui se composent de plusieurs ensembles (molasse rouge et molasse grise). Ces terrains, peu étendus, sont à dominante marneuse et par conséquent n'offrent qu'un faible potentiel aquifère.

### **B.I.3 Hydrogéologie**

Sources : *Schéma de restauration et de gestion de la Bléone et de ses affluents (Sogreah, 2008)*

Les formations géologiques du bassin versant de la Bléone ne représentent pas des magasins aquifères importants. Ils donnent naissance à des résurgences au niveau des coteaux qui alimentent les réseaux de drainage superficiels ou des communes pour leur alimentation AEP.

De même, de petits aquifères peuvent exister au niveau des éboulis de pentes et permettent l'alimentation de nombreuses sources qui sont souvent captées pour alimenter certaines communes (Archail, Draix, Le Vernet).

**Les réservoirs les plus importants concernant les eaux souterraines sont représentés par les aquifères alluviaux.**

Concernant les affluents de la Bléone, mise à part les aquifères alluviaux du Bès et des Duyes qui se développe vers l'aval, les nappes alluviales restent très limitées, aussi bien au niveau de leurs capacités, que de leurs exploitations actuelles ou de leurs potentialités.

**La ressource souterraine principale reste donc la nappe alluviale de la Bléone.** L'aquifère commence à se développer dans la zone située en amont de la Javie. Elle assure notamment l'alimentation en eau de nombreuses communes par l'intermédiaire de forages dans les alluvions (Marcoux, Digne-les-Bains, Aiglun, Le Chaffaut, Mallemoisson ou encore Malijai).

Les caractéristiques principales du fonctionnement de la nappe alluviale de la Bléone sont détaillées dans le paragraphe C.III.

### **B.I.4 La couverture végétale**

➤ *Planche n°3 : Occupation des sols*

L'analyse de l'occupation des sols est basée sur l'exploitation des données CORINE Land Cover. Cette base de données établie à partir d'images satellites, dispose de 3 niveaux d'information. L'analyse présentée dans ce rapport est basée sur le 2<sup>ème</sup> niveau composé de 15 classes. Il n'est présenté ici que les classes présentes sur le bassin versant.

L'analyse des données Corine Land Cover montre l'importance des forêts sur le bassin versant avec 41% de la surface totale. En deuxième position, le groupe « milieu à végétation arbustive et/ou herbacée » est décomposable en deux sous classes :

- 8% pour les pelouses ou pâturages naturel signe d'une agriculture extensive ;
- 24 % pour la végétation arbustive.

Année d'établissement de la carte	2006
Zones urbanisées	1%
Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication	<1%
Espaces vert artificialisés	<1%
Terres arables	4%
Prairies	2 %
Zones agricoles hétérogènes	6 %
Forêt	41%
Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	32%
Espace ouvert sans ou avec peu de végétation	14%
Total	100%

*Tableau n°2 : Occupation des sols*

La surface utilisée pour l'agriculture (hors culture forestière) couvre 20 % de bassin versant.

Les zones sans végétation (14% de la surface totale) sont particulièrement importantes. Ces zones sont situées sur les hauts plateaux du bassin versant et sur les coteaux très pentus.

Les surfaces imperméabilisées restent marginales : 1% du bassin versant. Seul 8 bourgs sont identifiés Malijai, Mallemoisson, Aiglun, Digne les Bains, Thoard, Robine sur Galabre, Marcoux et le Brusquet. Cela signifie que les autres communes ont un centre urbain d'une taille inférieure à 25 ha (taille minimale des surfaces sur Corine Land Cover).

## **B.II SECTORISATION DU BASSIN VERSANT**

Le découpage en sous bassins versants de la Bléone est basé sur la nécessité d'établir des points nodaux (cf. tableau ci-dessous) :

- en aval des prélèvements ou groupe de prélèvements importants ; par exemple, l'exutoire du BV11 qui est situé en aval de la prise du canal de la plaine de Gaubert. Ceci permet d'analyser l'impact direct des prélèvements sur le débit de la Bléone ;
- en amont des affluents importants afin ici aussi de caractériser les étiages avant que l'affluent ne viennent soutenir les débits. En effet, en situation d'étiage sévère, le Bès, marque la fin des assecs sur la Bléone en aval de Marcoux ;

**Le découpage tient également compte de l'existence ou non de nappe alluviale afin de retrouver la même sectorisation entre les modèles hydrologique et hydrogéologique.**

Sur les affluents principaux, quelques sous bassins versants ont été découpsés notamment :

- Deux sous bassins versants sur le Bès et les Duyes afin de prendre en compte les effets des nappes alluviales sur le dernier tiers du cours d'eau ;
- Un sous bassin versant sur le Galabre, les Eaux Chaudes et le torrent de Mouirouès pour analyser l'impact des prélèvements sur ces petits cours d'eau.

Les autres affluents n'ont pas fait l'objet d'un découpage en sous bassin versant du fait de l'absence de prélèvements significatifs ou de leurs petites tailles restreintes.

Bassin versant	Nom	Surface (km)	Exutoire
BV1	Bléone amont	153	Amont confluence Arigéol
BV2	Arigéol	70	Amont confluence Bléone
BV3	Bléone Brusquet	258	Amont confluence Bouinenc
BV4	Bléone amont Bès	318	Amont confluence Bès
BV5	Bès amont	165	Clue de Pérouré
BV6	Bès aval	229	Confluence Bléone
BV7	Galabre	35	Amont confluence Bès
BV8	Mouirouès	29	Amont confluence eaux chaudes
BV9	Eaux Chaudes	58	Amont confluence Bléone
BV10	Bléone amont Digne	571	Amont confluence Merdaric
BV11	Bléone amont Gaubert	642	Amont du bourg de Gaubert
BV12	Bléone amont Duyes	735	Amont confluence Duyes
BV13	Duyes amont	95	Point Estimhab 22
BV14	Duyes aval	121	Amont confluence Bléone
BV15	Bléone amont Barrage	892	Barrage de Malijai
BV16	Bléone	905	Amont confluence Durance

*Tableau n°3 : Découpage en sous bassin versant*

## C. ANALYSE DES DONNEES

---

---

## C.I DONNEES METEOROLOGIQUE

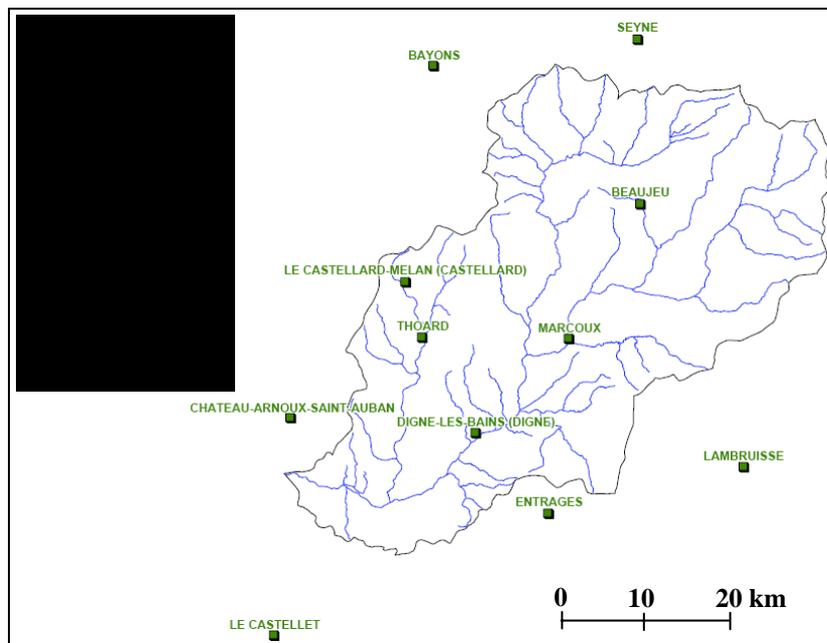
### C.I.1 Données acquises

La ressource en eau sur le bassin versant de la Bléone a été étudiée à partir d'un ensemble de données météorologiques. Ces données permettent d'apprécier la variabilité spatiale et temporelle des phénomènes météorologiques sur la zone d'étude. Les données suivantes ont été acquises :

- La pluviométrie, donnée de base de la modélisation hydrologique ;
- L'EvapoTranspiration Potentielle (ETP), permettant d'évaluer les pertes par évaporation et les besoins des plantes pour l'irrigation ;
- La température, utile pour le calcul de la formation et de la fonte des neiges ;
- La hauteur de neige, nécessaire pour caler le modèle de production de neige basé sur la température.

Ces données ont généralement été acquises au pas de temps journalier. **Le choix des stations est issu d'une analyse de la représentativité des 36 stations météorologiques du département.** Le croisement de leur localisation, de leurs dates d'exploitation et de leur altitude a abouti à la sélection de 12 stations. Elles sont situées sur les communes de :

- Le Castellet, représentative de la vallée de la Durance ;
- Bayons, Thoard, Entrages, Marcoux et Digne, représentatives des zones de moyennes altitudes sur le bassin versant ;
- Beaujeu, Castellard-Melan, Lambruisse et Seyne, représentative des zones de hautes altitudes ;
- Château-Arnoux et Saint-André-les-Alpes pour les informations de pluie mensuelle.



*Illustration n°3 : Localisation des stations météorologiques*

Données	Pas de temps	Poste	Périodes
<i>Pluviométrie</i>	Journalier	Bayons	Depuis 1997
		Beaujeu	Depuis 1968
		Castellard-Melan	1968 à 1990
		Digne	1968 à 2003
		Marcoux	Depuis 2003
		Seyne	Depuis 1973
		Thoard	Depuis 2008
		Le Castellet	Depuis 1968
		Entrages	1968 à 1997
		Lambruisse	Depuis 1968
	Décadaire	Saint-Auban	1970 à 2000
	Mensuel	Beaujeu	1934 à 1968
Saint-André		1934 à 1968	
<i>Température</i>	Journalier	Digne	Depuis 2003
		Saint-Auban	Depuis 1968
	Décadaire	Saint-Auban	Depuis 1970
<i>ETP</i>	Journalier	Digne	Depuis 2004
	Journalier	Saint-Auban	Depuis 1968
	Décadaire	Saint-Auban	Depuis 1970
<i>Neige</i>	Journalier	Bayons	Depuis 2004
	Journalier	Beaujeu	Depuis 1993
	Journalier	Seyne	Depuis 2004
	Journalier	Thoard	Depuis 2008
	Journalier	Lambruisse	Depuis 1992

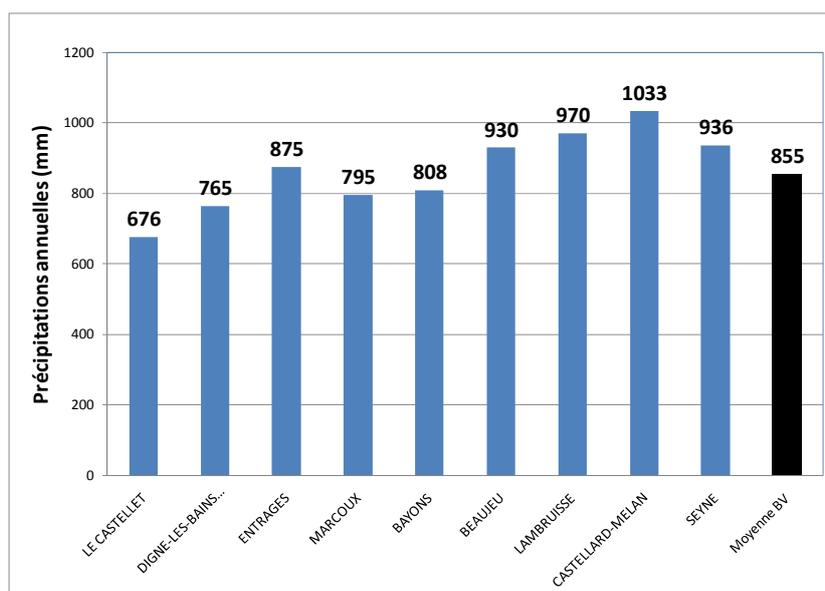
*Tableau n°4 : Synthèse des données météorologiques*

## **C.I.2 Analyse de la pluviométrie**

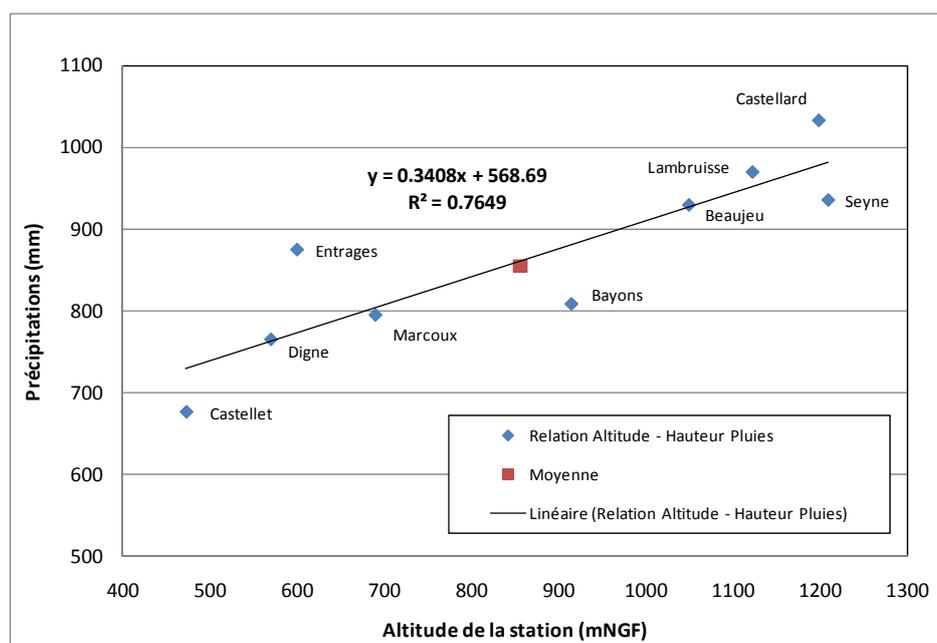
En moyenne sur la période 1968-2008, les pluviométries annuelles varient entre un minimum de 676 mm/an pour la station du Castellet dans la vallée de la Durance à un maximum de 1 033 mm/an pour la station de Castellard à près de 1 200 m d'altitude.

La pluviométrie annuelle sur le bassin versant de la Bléone est, en moyenne arithmétique sur l'ensemble des stations, de 855 mm (cf. illustration 4).

En regardant l'évolution de la pluviométrie avec l'altitude (cf. illustration 5), il n'est pas possible d'expliquer les hauteurs de précipitations par une relation linéaire par rapport aux altitudes des stations. On notera notamment les cas particuliers d'Entrages, du Castellet et de Bayons qui présente des pluviométries trop faibles ou trop fortes compte tenu de leurs altitudes.



*Illustration n°4 : Précipitations moyennes annuelles sur la période 1968-2008*



*Illustration n°5 : Variation des cumuls annuels de pluies en fonction de l'altitude des stations*

En plus des différences entre stations, les disparités d'une année à l'autre sont également très fortes. L'année 2007 aura été la moins pluvieuse avec 551 mm en moyenne mais seulement 404 mm pour la station du Castellet.

Toutefois pendant la période 1994-1996, la pluviométrie aura été, en moyenne, plus de 2 fois supérieure à celle de 2007 (environ 1150 mm/an).

Malgré une année 2008 plus humide, le **déficit hydrique constaté ces dernières années est clairement visible sur la période 2004-2007.**

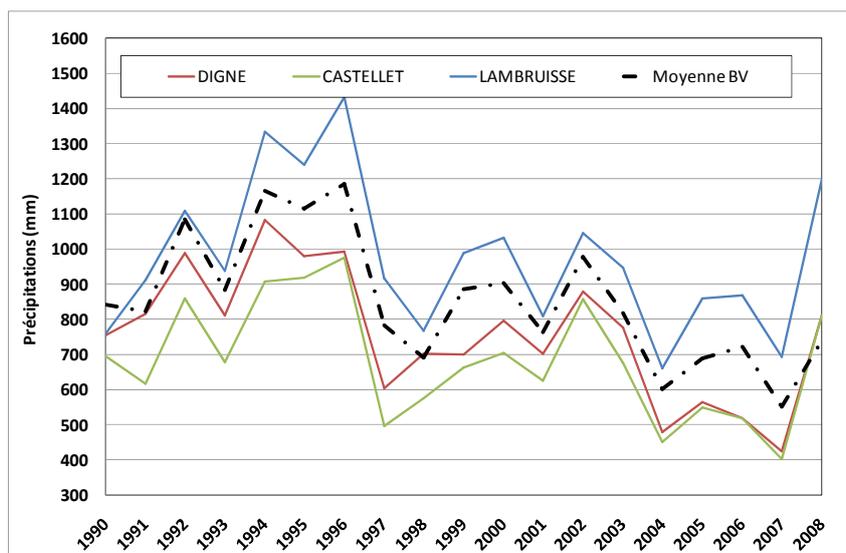


Illustration n°6 : Variation des cumuls annuels de pluies

Afin de compléter cette analyse, l'illustration suivante présente les précipitations annuelles sur les stations de Beaujeu et Saint-André-les-Alpes de 1934 à 1967. Les moyennes calculées sur les années disponibles pour les stations de Beaujeu et Saint-André sont respectivement de 928 et 862 mm/an. La moyenne de Beaujeu est strictement identique à celle calculée sur la période de 1968 à 2008 (930 mm/an).

Concernant d'éventuelles situations de déficits hydriques, on peut remarquer plusieurs années consécutives où les précipitations sont inférieures à la moyenne de la station :

- A Beaujeu de 1956 à 1959 ;
- A Saint-André-les-Alpes de 1964 à 1968 ;

Les situations de déficit hydrique, avec des précipitations inférieures à la moyenne, ne sont donc pas nouvelles sur le bassin versant de la Bléone.

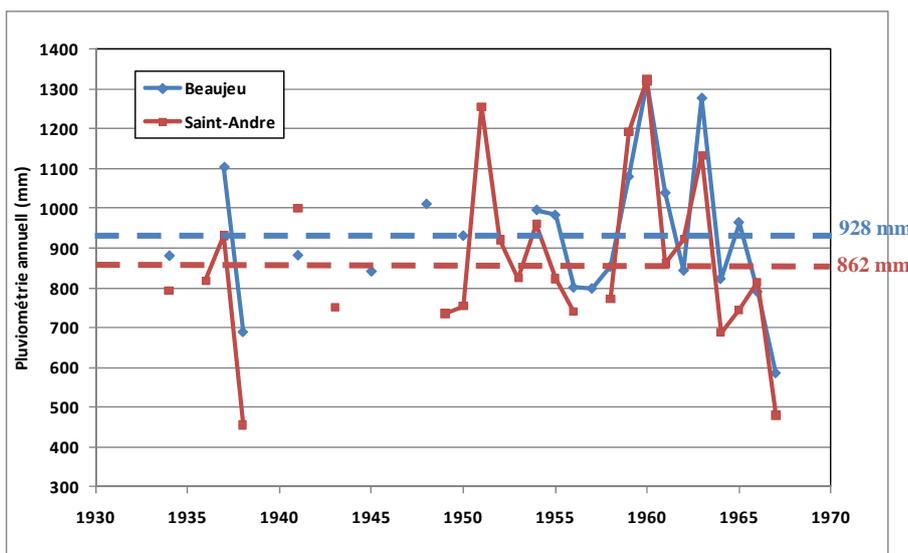


Illustration n°7 : Précipitations annuelles sur les stations de Beaujeu et Saint-André-les-Alpes

Concernant le nombre de jours de pluie, on observe de fortes variations d'une station à l'autre. A Castellet, on compte 90 jours de pluie contre plus de 120 à Bayons. Plus que par l'altitude, le régime pluviométrique semble influencer par le positionnement de la station avec un nombre de jours de pluie plus faible dans la vallée de la Durance (Castellet) par rapport aux stations de moyenne altitude sur le bassin de la Bléone.

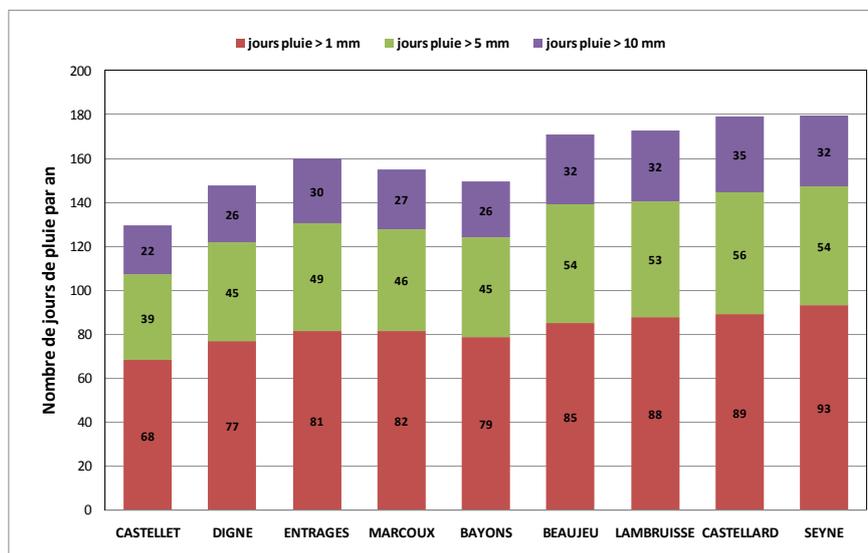


Illustration n°8 : Nombre de jours de pluie et par an et intensité sur la période 1997-2007

Concernant les intensités des pluies, elles sont relativement homogènes sur les stations en variant au maximum de 4 mm/jour (7 mm/jour minimum pour Bayons et 11 mm/jour maximum pour Le Castellard).

Enfin les deux illustrations suivantes comparent les cumuls de précipitations annuels à ceux pendant la période d'irrigation (juin à septembre) sur la totalité de la chronique 1968-2008 dans un premier temps et sur 1998-2008 dans un deuxième temps.

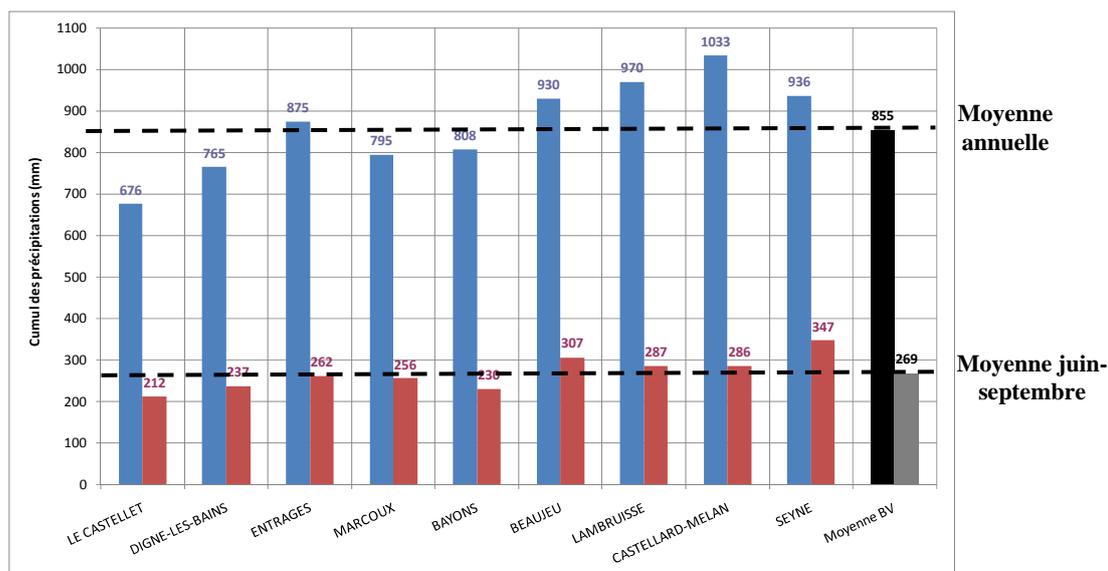
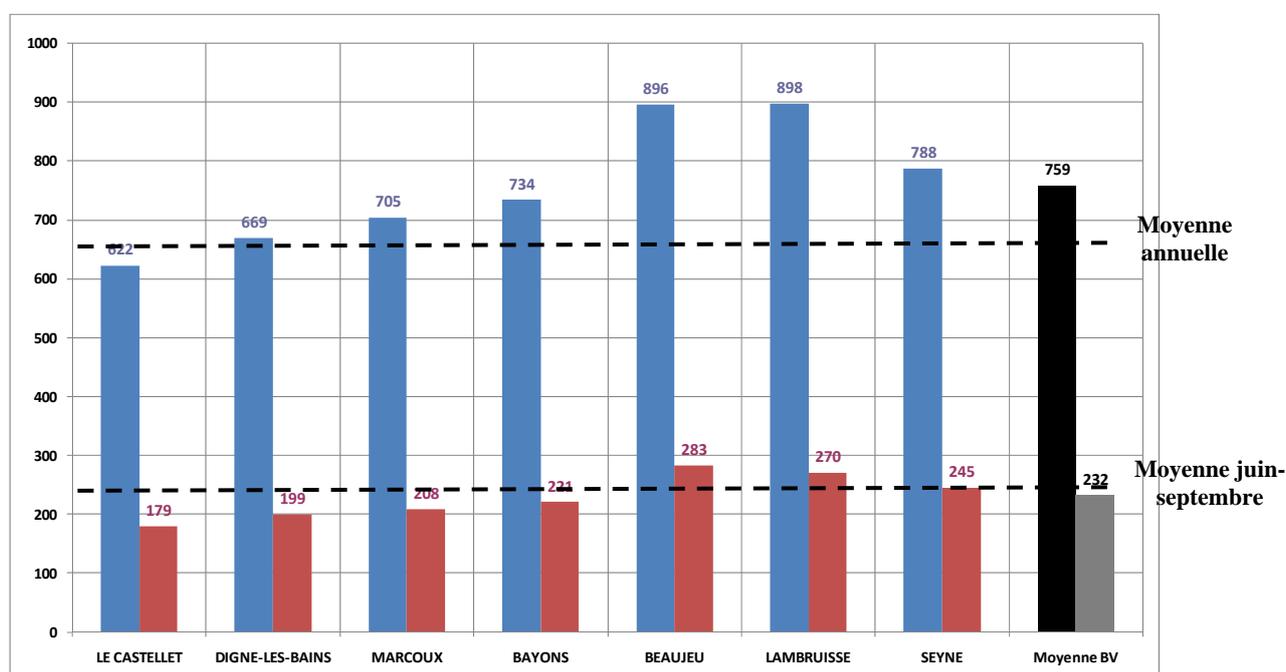


Illustration n°9 : Cumuls des précipitations pendant la période d'irrigation (1968-2008)

On constate encore de fortes variabilités temporelles. L'ordre de grandeur des variations des cumuls durant l'été sont similaires aux variations des cumuls annuels.

En comparant les précipitations annuelles et pendant la période d'étiage (juin-septembre) sur les périodes 1968-2008 et 1998-2008, on peut noter un déficit pluviométrique. En effet, les précipitations annuelles diminuent en moyenne de plus de 10% sur les dix dernières années par rapport à la moyenne sur les quarante dernières (759 mm/an contre 855). Dans le même temps, on observe une baisse des précipitations pendant la période estivale de l'ordre de 14% (232 mm/saison contre 269).

Étant donné que les baisses touchent autant les précipitations sur l'année que sur la saison d'étiage, la proportion des précipitations pendant la période d'irrigation, sur la période 1968-2008 ou sur les dix dernières années, reste stable autour de 30%.



*Illustration n°10 : Cumuls des précipitations pendant la période d'irrigation (1998-2008)*

En conclusion :

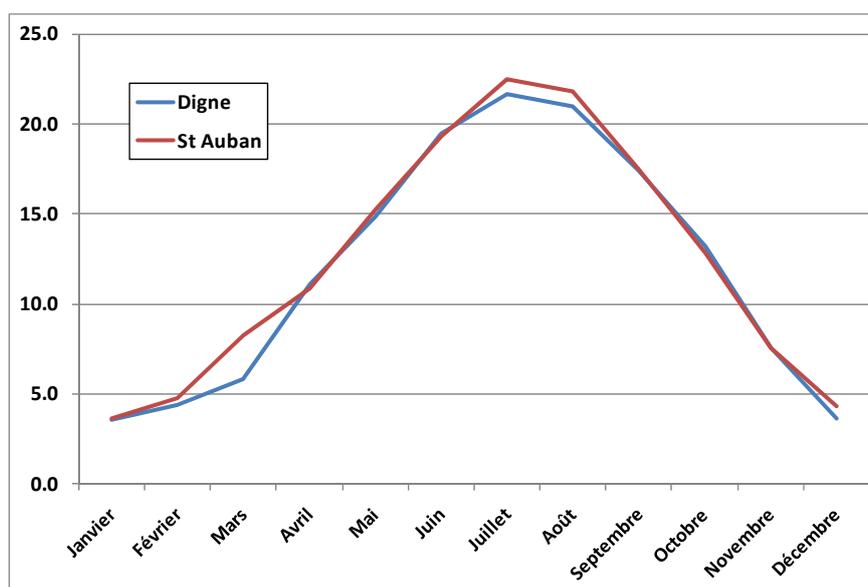
- La pluviométrie moyenne est de l'ordre de 850 mm par an sur le bassin versant toutes stations confondues avec de fortes variations annuelles ;
- Les cumuls annuels de pluie les plus forts sont observés sur les reliefs en amont du bassin versant ;
- Même si la situation a déjà été rencontrée par le passé, le déficit pluviométrique est net sur les cinq dernières années (2003-2007).

### C.I.3 Analyse de la température

Les données disponibles sont issues des stations de Saint-Auban et Digne-les-Bains situées à des altitudes faibles (respectivement 461 m et 585 m) par rapport à la moyenne sur le bassin versant. Les températures observables sur la zone d'étude sont donc à priori plus faibles.

Pour la station de Saint-Auban, la moyenne annuelle était de 12.2°C sur la période 1973-1977 et de 12.4°C sur la période 1982-2008. La température moyenne annuelle semble avoir légèrement augmenté mais la durée de la chronique n'est pas suffisante pour tirer des conclusions formelles. De plus, selon les mois considérés, la tendance est inversée.

Pour la station de Digne-les-Bains sur la période 2003 à 2008, la température moyenne annuelle est très proche de celle à Saint-Auban avec 12.1°C.



*Illustration n°11 : Température moyenne mensuelle à Saint-Auban et Digne*

En comparant les deux chroniques, on constate que les températures sont très proches, surtout au printemps et à l'automne, sur les deux stations malgré la différence d'altitude. Sur les périodes disponibles, janvier est le mois le plus froid avec 3.7°C et juillet le mois le plus chaud avec 22.5°C.

Les écarts de température entre les deux stations ne sont identifiables qu'en été et en hiver (2°C au maximum) avec des températures plus froides à Digne-les-Bains mais plus fraîche en été à cause de l'altitude plus importante.

### C.I.4 Analyse de la neige

Les données disponibles sont issues des stations de Bayons (915 m), Seyne (1125 m) et Lambruisse (1123 m). Les moyennes du nombre de jours où le sol est recouvert de neige ont été calculées à partir des données des hivers 2005 à 2008, seules séries chronologiques continues disponibles auprès de Météo France. Les résultats figurent dans le tableau ci-dessus.

Station	Bayons	Seyne	Lambruisse
Janvier	4.3	16.5	4.5
Février	0.5	4.5	2.5
Mars	1.8	2.3	1.5
Avril	0.3	0.8	0
Mai	0	0.3	0
Juin	0	0	0
Juillet	0	0	0
Août	0	0	0
Septembre	0	0	0
Octobre	0	0	0
Novembre	0.8	1.0	4.5
Décembre	0.8	3.3	3.0
<b>TOTAL</b>	<b>8.3</b>	<b>28.5</b>	<b>16.0</b>

*Tableau n°5 : Moyenne du nombre de jours où le sol est recouvert de neige (moyennes de 2005 à 2008)*

Pendant l'hiver, la neige reste présente sur le sol en moyenne 28 jours par an à Seyne, 16 jours à Lambruisse et 8 jours à Bayons.

Les valeurs sont caractéristiques d'un régime de moyenne montagne pour les stations de Seyne et Lambruisse avec des précipitations neigeuses fréquentes mais pas de couvert neigeux permanent pendant l'année. Concernant Bayons, le régime de moyenne montagne est moins affirmé avec des chutes de neige qui sont moins fréquentes et une faible persistance du couvert neigeux au sol.

**Les informations sur la couverture neigeuse restent partielles** sur le bassin versant de la Bléone avec aucune station météorologique au dessus de 1 300 m, alors même que près de 12% des superficies se situent au-delà de cette altitude.

### **C.I.5 Analyse de l'EvapoTranspiration Potentielle (ETP)**

L'évapotranspiration correspond à la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation du sol et la transpiration des plantes. L'évapotranspiration potentielle est une valeur théorique qui correspond la somme de l'évaporation par la surface du sol et la transpiration des plantes lorsque le sol permet de fournir toute l'eau demandée.

Comme pour la température, les données disponibles sont issues des stations de Saint-Auban (période 1968-2000) et Digne-les-Bains (période 2004-2008). De la même façon que pour les températures, à cause des altitudes plus faibles des stations de références (461 m pour Saint-Auban et 585 m pour Digne), les évapotranspirations potentielles de la zone d'étude peuvent être légèrement différentes de celles observées.

Sur la station de Digne, qui fait partie intégrante du bassin de la Bléone, l'ETP est maximale au mois de juillet (180 mm) pour un minimum de 30 mm au mois de janvier.

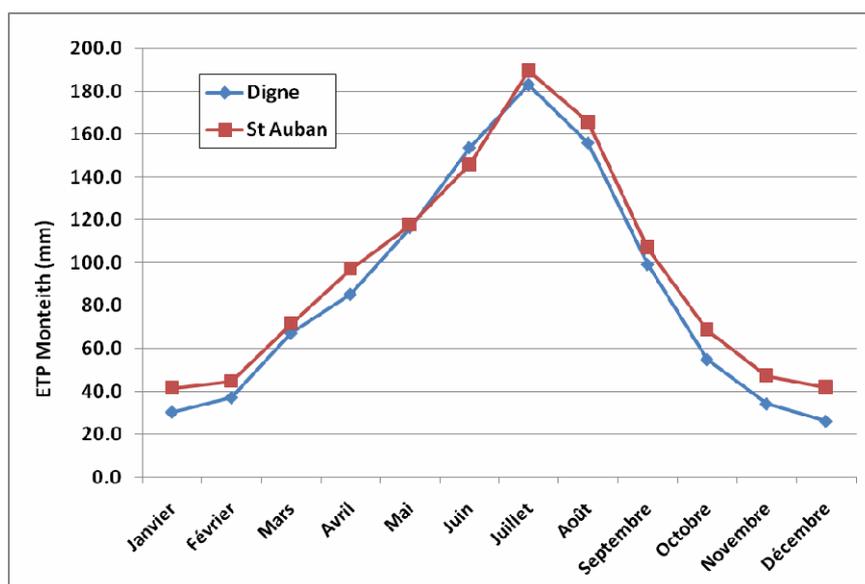


Illustration n°12 : Variations de l'ETP sur l'année (moyenne 1968-2008)

Sur l'année, l'ETP représente 1 040 mm pour 765 mm de précipitations cumulées moyennes à Digne-les-Bains. **Durant la saison d'irrigation** (juin à septembre), l'ETP cumulée est de **590 mm soit 5 900 m<sup>3</sup> par ha.**

## C.II DONNEES DEBITMETRIQUES

### C.II.1 Analyse des débits aux stations hydrométriques

#### C.II.1.1 Station du Bès à la Clue de Pérouré

Il n'existe pas de stations hydrométriques dans la banque hydro dont les données sont disponibles sur la Bléone elle-même (905 km<sup>2</sup>). Les seules données disponibles sont issues de la station hydrométrique du Bès, l'affluent principal de la Bléone, au niveau de la clue de Pérouré (165 km<sup>2</sup>). Le Bès, qui draine 18% de la surface de la Bléone au niveau de la clue de Pérouré, est un cours d'eau peu influencé par les prélèvements.

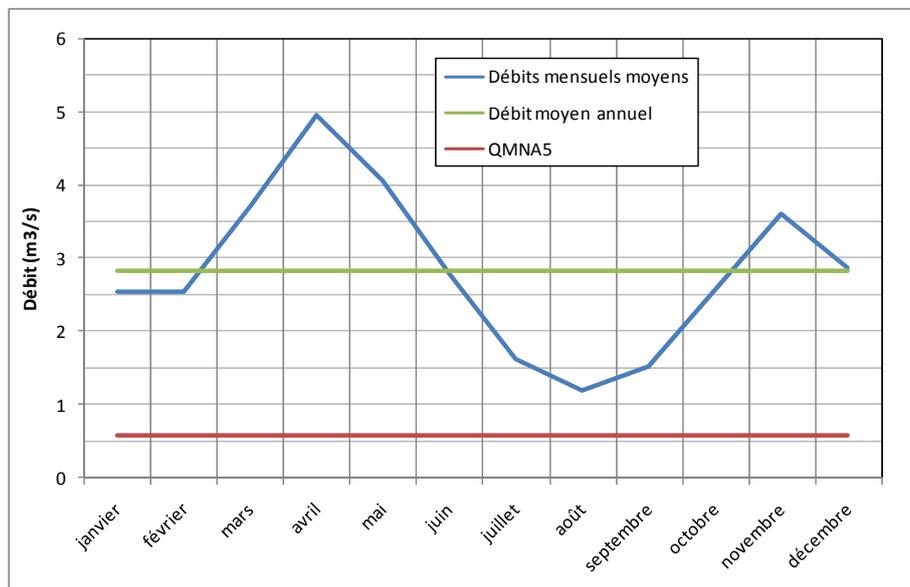
Les données hydrologiques journalières du Bès ont été obtenues auprès de la Banque Hydro pour la période de 1964 à 2008. Les valeurs caractéristiques de débit sont présentées dans le tableau suivant.

	Bès à Pérouré
Module (l/s)	2 830
QMNA5 (l/s)	580
Débit maximal (m <sup>3</sup> /s)	280

Tableau n°6 : Valeurs caractéristiques de la station hydrométrique du Bès (période 1964 à 2008)

Le graphique suivant montre les débits moyens mensuels du Bès à Pérouré sur la période de 1964 à 2008. Les variations de débit sont caractéristiques d'un régime nival à influence pluvial avec :

- Les débits les plus importants de l'année en mars, avril et mai, alimentés par la fonte des neiges et les précipitations importantes ;
- Une période d'étiage en été (juillet à septembre). Le minimum est atteint au mois d'août avec un débit moyen de 1 190 l/s et un débit mensuel minimal de période de retour 5 ans (QMNA5) de 580 l/s ;
- Un second étiage, moins sévère que celui de la période estivale, en décembre et janvier. Il est peu marqué pour ce bassin versant avec des débits proches du débit moyen annuel (2.83 m<sup>3</sup>/s) ce qui démontre une influence pluviale ;
- Les variations annuelles du débit du Bès à la Clue de Pérouré sont importantes avec des écarts de facteur trois entre les débits mensuels minimums et maximums.



*Illustration n°13 : Débits moyens mensuels du Bès à Pérouré sur la période 1964 à 2008*

A partir des données des stations pluviométriques de Beaujeu, Seyne et Marcoux qui sont proches du bassin versant du Bès, les précipitations moyennes représentent une lame d'eau globale sur la période de 867 mm/an pour une lame d'eau écoulé de 541 mm/an (cumul des débits de 1964-2008).

Le coefficient d'écoulement du bassin versant au droit de la station du Bès à Pérouré est donc de 62% (lame d'eau écoulé/lame d'eau précipitée).

Les conditions hydrologiques du Bès, compte tenu de l'absence d'aquifères ou de nappes alluviales significatives, sont représentatives des conditions de la haute vallée de la Bléone. Au niveau de la basse vallée de la Bléone, une nappe alluviale importante se développe.

Concernant la **qualité des données** issues de la station hydrométrique du Bès à Pérouré, la Banque Hydro signale près de 15 % de valeurs jugées incertaines par le gestionnaire de la station. Les écarts sont importants entre les années avec seulement 4 valeurs douteuses en 1989 pour près de 300 valeurs

en 1979. La station du Bès a, en effet, été l'objet de nombreuses mesures manuelles de débits afin de modifier la courbe de tarage de la station permettant de relier les hauteurs d'eau mesurées aux débits (11 depuis 1984). Le changement de courbe de tarage peut entraîner des modifications de 10 % à 20 % sur les débits mesurés.

### C.II.1.2 Station de la retenue de l'Escale à Malijai

Au niveau de Malijai, EDF exploite la retenue de l'Escale sur la Bléone alimentant le canal d'Oraison pour la production hydroélectrique. Dans le cadre de cette exploitation EDF mesure les débits dérivés sur le canal alimentant l'usine hydroélectrique.

Le débit minimum de la Bléone à maintenir à l'aval du barrage est de 200 l/s alors que la prise du canal a une capacité de 40 m<sup>3</sup>/s maximums. Au-delà de ce débit, les eaux de la Bléone surverse sur le barrage et rejoignent la Durance à l'aval. Selon EDF, la capacité maximale du canal d'Oraison est rarement atteinte et le débit en entrée est régulièrement limité en dessous de 25 m<sup>3</sup>/s.

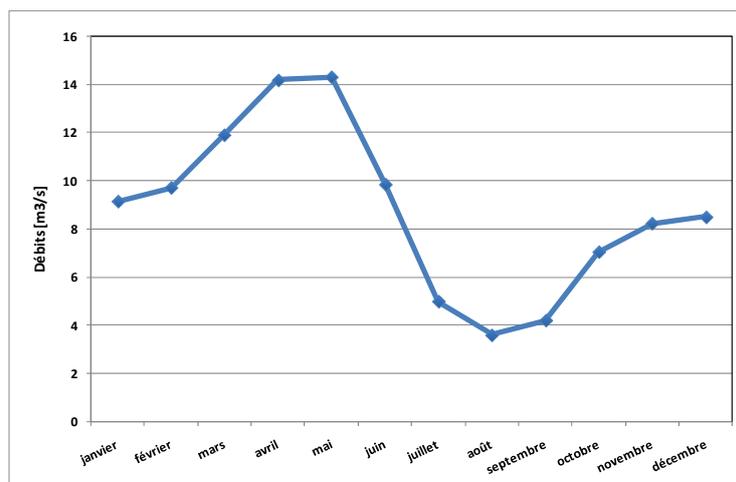
**Dès lors, à cause des surverses et de l'action des vannes de la retenue possibles, les débits journaliers reconstitués de la Bléone ne correspondent pas forcément aux débits observables sur le cours d'eau. Ils sont à utiliser avec la plus grande prudence.**

A partir de ces informations et des débits observés à l'entrée du canal, les débits de la Bléone ont été reconstitués, ce débit étant égal au débit dérivé plus le débit réservé, de 1969 à 2008 au niveau de Malijai soit approximativement 892 km<sup>2</sup> (BV15). Les valeurs caractéristiques de débit sont présentées dans le tableau suivant.

Bléone à Malijai	
Module (l/s)	8 795
QMNA5 (l/s)	1 758
Débit maximal (m <sup>3</sup> /s)	375 000

*Tableau n°7 : Valeurs caractéristiques des débits reconstitués de la Bléone au niveau de Malijai (période 1969 à 2008)*

Le graphique suivant montre les débits moyens mensuels reconstitués de la Bléone sur la période de 1969 à 2008.

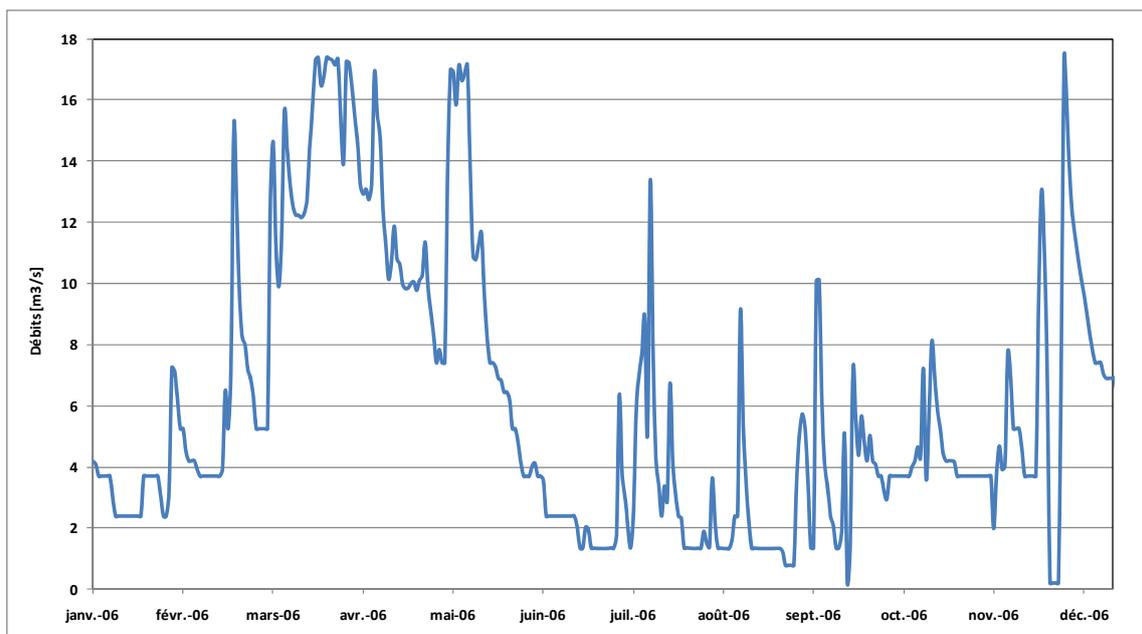


*Illustration n°14 : Débits moyens mensuels reconstitués de la Bléone à Malijai sur la période 1969 à 2008*

De la même manière que pour le Bès, les variations de débit sont caractéristiques d'un régime nival à influence pluvial avec :

- Les débits les plus importants de l'année en mars, avril et mai, alimentés par la fonte des neiges et les précipitations importantes ;
- Une période d'étiage en été (juillet à septembre). Le minimum est atteint au mois d'août avec un débit moyen de 3.60 m<sup>3</sup>/s et un débit mensuel minimal de période de retour 5 ans (QMNA5) de 1.75 m<sup>3</sup>/s ;
- Les variations annuelles du débit de la Bléone sont également très importantes avec des écarts de facteur quatre entre les débits mensuels minimums et maximums ;
- Sur la Bléone, les précipitations hivernales sont sous forme pluvieuses. Il n'y a donc pas d'étiage secondaire en hiver lié à du stockage des précipitations sous forme neigeuse. Les débits moyens des mois de Novembre à Février marquent seulement un palier entre deux fortes croissances des débits à l'automne et au printemps.

Le graphique suivant montre les débits journaliers reconstitués de la Bléone sur l'année 2006.



*Illustration n°15 : Débits journaliers reconstitués de la Bléone à Malijai sur l'année 2006*

Malgré l'ajout du débit réservé aux débits observés à l'entrée du Canal d'Oraison, les enregistrements montrent des stagnations des débits pendant plusieurs jours qui sont des phénomènes anthropiques liés à l'exploitation du canal EDF (ouverture et fermeture des vannes).

EDF nous a assuré ne pas prendre la totalité des débits possibles sur la Bléone tout au long de l'année et modulerait les débits prélevés en fonction des besoins pour limiter les transports de matières en suspension.

En résumé :

- **En crue, les débits reconstitués sont compris généralement entre 0 et 40 m<sup>3</sup>/s. En effet, soit les débits surversent sur la retenue de l'Escale, soit EDF ferme les vannes pour limiter les entrées de matières en suspension dans le canal ;**
- **En étiage, les débits reconstitués peuvent être considérés comme proche des valeurs réelles ;**
- **Lorsque l'on observe des débits identiques pendant plusieurs jours, on peut supposer que les débits reconstitués sont sous estimés car EDF régule le débit entrant dans le canal d'Oraison en fermant partiellement les vannes.**

### **C.II.2 Campagnes de mesures complémentaires (DDT – CEREG Ingénierie)**

➤ *Planche n°8 : Points de jaugeage*

#### **❑ Méthodologie**

Les mesures de débit présentées dans ce paragraphe correspondent à des jaugeages ponctuels réalisés à l'aide d'un micro moulinet ou d'un courantomètre. Ils ont été réalisés sur la Bléone et ses affluents dans le cadre des :

- Deux campagnes de mesures CEREG Ingénierie prévus dans le cadre de la présente étude afin de mieux identifier le fonctionnement hydraulique de la Bléone et de ses affluents en période d'irrigation et d'apprécier l'utilisation des réseaux d'irrigation en période de prélèvement ;
- Mesures DDT prévus dans le cadre du Plan d'Action Sécheresse.

Les campagnes de mesures complémentaires CEREG Ingénierie consistent, sur la Bléone, à **deux campagnes de mesures comportant 19 jaugeages au total** dont 15 sur la Bléone et 4 sur les affluents (Arigéol, Bès, Duyes).

Les points de mesures complémentaires CEREG Ingénierie ont été positionnés en concertation avec l'Agence de l'eau et la DDT. Ils sont localisés en amont des zones de prélèvements importants ou aux endroits où la connaissance du fonctionnement hydrologique du bassin doit être complétée.

#### **❑ Résultats**

Les valeurs des jaugeages, sur la Bléone et ses affluents, lors des différentes campagnes sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Les campagnes 1, 2 et 4 ont été réalisées en étiage pendant la période d'irrigation et de fonctionnement des canaux. La campagne 3 a été réalisée durant un étiage tardif à l'automne alors que la campagne 5 a été réalisée en période hivernale.

Le graphique suivant présente les résultats pour les campagnes de jaugeages réalisées en étiage. D'après ces mesures, nous pouvons dire que :

- La principale contribution au débit de la Bléone correspond aux apports du Bès en amont de Digne et de la Dalle aux ammonites ;

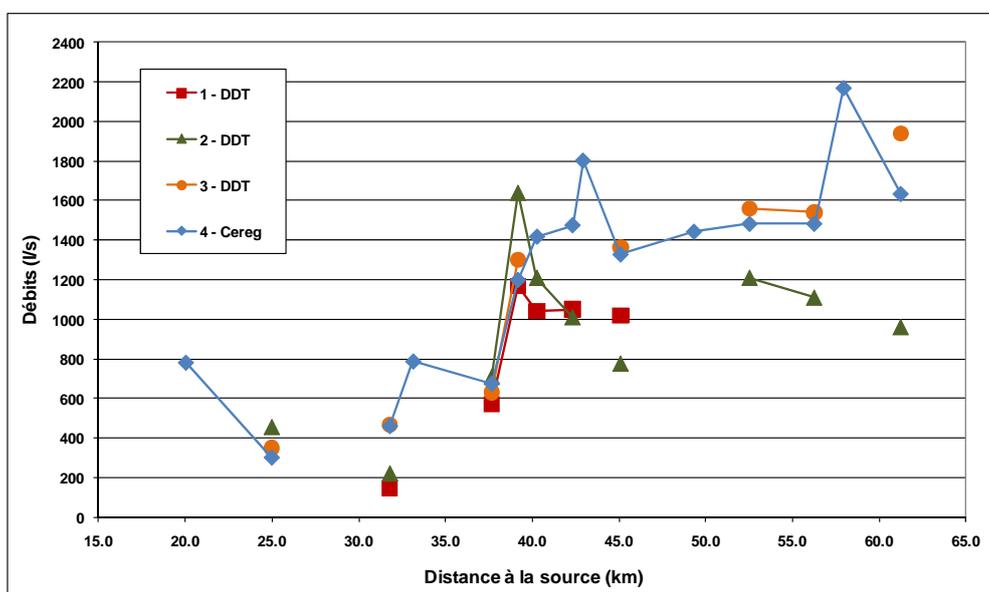
Mesure	Cours d'eau	Distance source (km)	Débits mesurés (l/s)				
			N°1 - DDT 19/07/2007	N°2 - DDT 25/07/2007	N°3 - DDT 27/10/2008	N°4 - CEREG 07/09/2009	N°5 - CEREG 27/12/2009
1 - Champourcin	Bléone	20.0				780	1 641
2 - Pont de la Javie		25.0		455	348	300	1 920
3 - Aval Merderic		29.5					
4 - Mousteiret		31.8	146	220	465	459	1 965
4bis - Mousteiret		33.1				786	2 089
5 - Pont du Bès		37.7	570	709	630	674	2 000
6 - Dalle ammonites		39.2	1 170	1 640	1 300	1 199	
7 - Château Isnards		40.3	1 040	1 210		1 418	3 251
8 - Grand Pont		42.3	1 050	1 010		1 476	
8bis - Grand Pont		42.9				1 803	3 451
9 - Pont CFP		45.1	1 020	776	1 365	1 328	3 500
10 - Enfant Perdu		49.3				1 443	3 430
11 - Pont de Chaffaud		52.5		1 210	1 560	1 483	3 528
12 - Cornerie		56.3		1110	1 540	1 483	3 567
12bis - Cornerie	58.0				2 170	3 820	
13 - Carrière alluviale	61.3		960	1 940	1 634	3 820	
14 - Arigéol	Arigeol			5	150	87	
15 - Pont RD500	Bouinenc						
16 - Clue Pérouré	Bès		708			798	
17 - Bès			565	553	483	525	
18 - Eaux Chaudes	Eaux Chaudes		67	49	64		
19 - Pont Marre	Duyes						
20 - Duyes					24	0	

*Tableau n°8 : Synthèse des jaugeages complémentaires CEREG et DDT sur la Bléone et ses affluents*

- Les débits de la Bléone n'augmentent pas linéairement de l'amont vers l'aval. Même si les variations de débits peuvent être expliquées, en partie, par les prises d'eau des canaux d'irrigation, les **échanges nappes-rivières correspondent au principal facteur influençant l'hydrologie de la Bléone**. En fonction des clues (cf. paragraphe C.III), une partie non négligeable du débit s'écoule en sub-surface dans les cailloutis ;
- Par endroit, les apports des affluents sont très faibles par rapport à la surface drainée comme entre les km 45 et 55. Ces zones peuvent être identifiées comme des zones d'alimentation de la

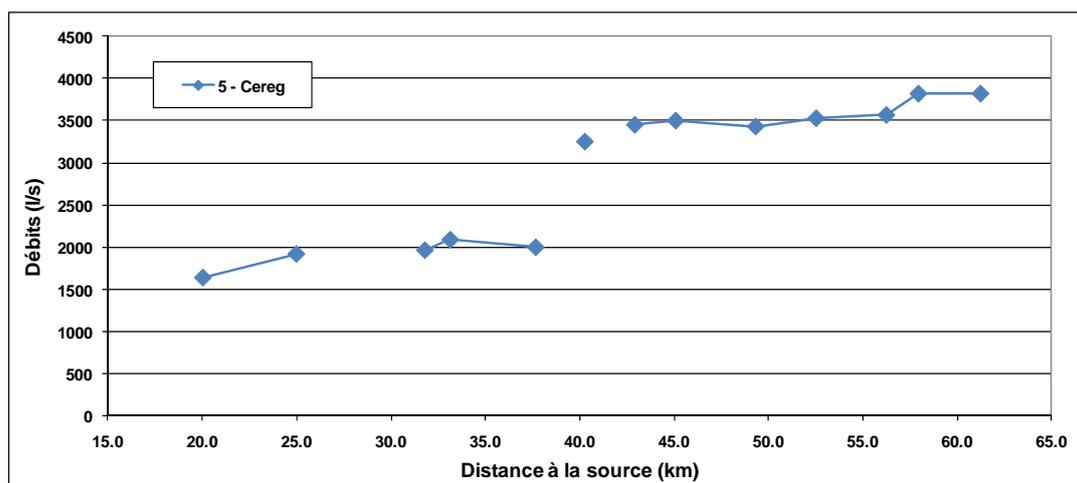
nappe alluviale de la Bléone (Points 8 à 11). De la même manière, en amont de la Javie (Point 2), les débits baissent alors que la surface drainée augmente ;

- Au niveau des jaugeages 2 et 3 de la DDT, les débits décroissent fortement en aval de Digne (point 6) du fait de l'importance des prélèvements sur ce secteur (point 7 à 9) ;



*Illustration n°16 : Jaugeages complémentaires réalisés durant la période d'étiage*

Le graphique suivant présente les résultats pour la campagne de jaugeage réalisée en période hivernale. Avec une seule augmentation marquée des débits de la Bléone au niveau de la confluence avec le Bès alors que la surface drainée augmente fortement, **les mesures en période hivernale confirment la nature des échanges surface-souterrain avec principalement, la Bléone qui alimente la nappe alluviale.**



*Illustration n°17 : Jaugeages complémentaires réalisés durant la période hivernale*

En conclusion :

- Le fonctionnement hydrologique particulier de la Bléone est confirmé : **le débit en surface n'augmente pas linéairement entre l'amont et l'aval.**
- Les **échanges nappes-rivières sont importants** avec en général, une nappe alluviale qui draine les eaux de la Bléone. Plusieurs zones importantes de perte peuvent être identifiées sur les chroniques de débits (amont de la Javie, Mousteiret, aval de Digne et Malijai) mais ces zones devront être confirmées par l'étude hydrogéologique du paragraphe C.III.
- **Les prélèvements en période d'irrigation peuvent réduire sensiblement les débits en surface** notamment à l'aval de Digne.

## C.III HYDROGEOLOGIE

Source : Schéma de restauration et de gestion de la Bléone et de ses affluents (Sogreah, 2008)

Au niveau du bassin versant de la Bléone, la nature géologique des roches n'a pas permis le développement de réservoir aquifère important. Les nappes alluviales constituent la principale ressource souterraine utilisable pour satisfaire les besoins en eau (Alimentation en eau potable, irrigation, ...).

Cependant, on constate que la nature du substratum conditionne l'alimentation du réservoir alluvial, ses dimensions et l'importance des apports latéraux.

Les nappes alluviales de la Bléone et de certains de ses affluents présentent toutefois une particularité géomorphologique. Par endroits, la présence d'un verrou rocheux au niveau du lit de la Bléone laisse supposer une déconnection du réservoir aquifère en amont avec la suite de l'aquifère en aval. Dès lors ce là implique que la totalité du débit souterrain retourne à la rivière dans la traversée du verrou. Ces verrous sont parfois appelés « Clues » comme notamment celles de la Combe sur la Bléone ou de Pérouré sur le Bès.

Après une description des principales nappes alluviales du bassin versant de la Bléone et une analyse des niveaux piézométriques disponibles, la nature des relations entre les nappes alluviales et les cours d'eau superficiels sera détaillée notamment à partir de mesures de débit.

### C.III.1 Nappe alluviale de la Bléone

Une analyse géomorphologique succincte de la vallée laisse à penser que l'aquifère commence à se développer au droit de Prads-Haute-Bléone. En effet, les sondages, réalisés dans l'axe de la vallée, indiquent une certaine continuité de l'épaisseur du réservoir, variant de 12,50 m au niveau de Prads à 17,50 m en amont de Marcoux, en passant par 16,00 m au droit du pont de La Javie.

Toutefois, la largeur de la plaine alluviale reste modérée jusqu'en amont de la Javie. Ainsi, ce n'est que dans les environs de la Javie qu'on peut réellement parler de la présence d'une nappe alluviale pour la Bléone avec une section d'écoulement significative.

Dans le cadre des différents captages AEP des communes de Marcoux et de Digne-les-Bains, la zone des "Granges" et des "Roubauds" a fait l'objet d'études hydrogéologiques spécifiques, concernant notamment la détermination des paramètres hydrogéologiques de l'aquifère (BRGM, 1970 et 1984 ; Karpoff, 1979). Les caractéristiques suivantes ont été mises en évidence (cf. tableau suivant) :

- Les alluvions sont présentes sur environ vingt mètres d'épaisseur, pouvant aller jusqu'à 31 m. La pente générale de la nappe est d'environ 1%.
- La perméabilité (K) des alluvions est bonne (de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $5.10^{-3}$  m/s), pour un transmissivité (T) comprise entre  $10^{-1}$  et  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s, et un coefficient d'emménagement (S) de 0.01.

Avec des perméabilités de l'ordre de  $5.10^{-3}$  à  $5.10^{-4}$  m/s, le temps de transfert des eaux de la nappe en une journée peut varier entre 50 et 500 m par jour.

<i>Paramètres</i>	<i>unités</i>	<i>Marcoux (captages AEP)</i>	<i>Le Chaffaut (captage AEP)</i>	<i>Malijai (captage AEP)</i>
Epaisseur des alluvions	m	31.00	8,50	23,30
gradient hydraulique	-	3‰	5‰	1‰
Transmissivité	m <sup>2</sup> /s	$10^{-1}$ à $10^{-2}$	$5.10^{-2}$	-
Perméabilité	m/s	$5.10^{-3}$ à $10^{-3}$	$6.10^{-3}$	$2.10^{-3}$ à $7.10^{-4}$
Coefficient d'emménagement	-	0,01	-	-
Porosité efficace	%	-	10	5
<b>Temps de transfert d'une pollution (isochrone 10 jours)</b>	m	40	-	30

*Tableau n°9 : Caractéristiques de l'aquifère de la Bléone de Marcoux à Malijai*

A l'aval de Marcoux, on observe une légère remontée du substratum conglomératique (poudingue de Valensole), puis un rétrécissement à l'aval du Lac de Gaubert par le biais d'un ancien verrou glaciaire, qui se traduit par une remontée du substratum. A ce niveau, l'épaisseur des alluvions n'est que de 8,50 m au droit du captage AEP de la commune du Chaffaut.

Des essais de pompage réalisés par le BRGM en 1997 sur ce captage, mettent en évidence un gradient hydraulique de nappe de 5‰, pour une transmissivité de  $5.10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s (soit une perméabilité estimée à  $6.10^{-3}$  m/s) et une porosité efficace de 10% (cf. tableau ci-dessus).

A partir de la "Roche Frison", la plaine alluviale s'élargit rapidement, s'accompagnant d'un abaissement rapide du mur des alluvions (interface alluvions/substratum), avec des épaisseurs de l'ordre de la trentaine de mètres au niveau d'Aiglun (Gidon, 1963).

Une étude menée au niveau de la décharge de la Cornerie (Gester, 2000), indique que la nappe est alimentée en partie par des apports de versants et en partie par la Bléone. La pente de la nappe est sensiblement identique à la pente de la rivière.

A partir du pont de la RD17 sur la Bléone, le substratum formé par les poudingues de Valensole s'élève doucement et régulièrement (En 1987, le BRGM observe 21,50 m d'alluvions en aval immédiat du quartiers des Grillons, à Mallemoisson, avec une perméabilité de  $10^{-3}$  m/s), pour se stabiliser autour

d'une vingtaine de mètres de profondeur au niveau de la décharge de la Cornerie (Gester, 2000) et ce jusqu'à Malijai (profondeur de 23,30 mètres au droit du captage AEP communal, Cathabard, 1978).

Au niveau de Malijai, les alluvions reposent sur les poudingues de Valensole. La perméabilité générale au niveau de Malijai est de  $5,10^{-3}$  m/s, avec des variations verticales importantes comprises entre  $10^{-2}$  m/s à proximité de la surface topographique et jusqu'à  $10^{-6}$  m/s dans la zone de substratum altéré (correspondant à la zone de transition entre les alluvions et le substratum sain).

Dans la traversée du village de Malijai, l'aquifère se réduit singulièrement : les poudingues affleurent sur les deux rives de la Bléone, et l'épaisseur des alluvions se réduit à moins de 10 m.

**En conclusion :**

- La nappe alluviale de la Bléone circule dans un réservoir de plusieurs millions de mètres cubes, en connexion directe avec les cours d'eau ;
- L'aquifère de la vallée Bléone se présente comme étant un milieu poreux peu sensible à la sécheresse (BRL, 2000) ;
- Le schéma de la nappe alluviale de la Bléone est simple avec une coupe-type transversale monocouche relativement uniforme (BRL, 2000), et présentant des cloisonnements géologiques du type *verrous*, qui scindent l'aquifère d'amont en aval en plusieurs unités interconnectées (BCEOM, 1991) ;
- Son alimentation résulte pour partie de la rivière et pour partie des versants (BCEOM, 1991).

## **C.III.2 Autres nappes alluviales**

### **C.III.2.1 Nappe du Bès**

Il existe peu d'informations sur le réservoir alluvial de la vallée du Bès. On remarquera toutefois que sa structure est discontinue, avec une déconnexion de l'aquifère au niveau de la zone des clues entre Verdaches et le village d'Esclangon.

En amont des clues, l'aquifère est peu développé. Il est formé d'une couche d'alluvions dont la puissance avoisine localement la douzaine de mètres ( $e = 11,50$  m au niveau du pont de la RD900a sur la commune de Verdaches, Fondasol, 1997).

Au niveau de la zone des clues, le substratum calcaire affleure et forme ainsi une succession de clues étroites et profondes. Cette zone s'étend de la clue de Verdaches à la clue du Pérouré (en amont du village d'Esclangon).

En aval de la zone de clue, l'aquifère se développe graduellement vers l'aval, pour atteindre une épaisseur d'une vingtaine de mètres en amont de la confluence avec la Bléone (Ducreux, 1999).

### **C.III.2.2 Nappe des Duyes**

Les seules informations disponibles sur le réservoir de la nappe d'accompagnement des Duyes sont issues d'études géotechniques réalisées au droit d'ouvrage de franchissement de la rivière.

On retiendra que l'épaisseur de l'aquifère semble très variable sur sa partie amont (commune de Thoard).

<i>Localisation</i>	<i>Epaisseur moyenne de l'aquifère</i>	<i>Nature substratum</i>
Pont du Chevalet	4 mètres	conglomérats
Pont des Duyes (RD17)	non observé	argiles (sur 4,80m) puis marnes
<b>Pont du ravin de Peipin (RD3)</b>	12 mètres	poudingues

*Tableau n°10 : Description de l'aquifère des Duyes au droit de la commune de Thoard*

On retrouve une épaisseur de l'ordre de la dizaine de mètres en rive droite du pont de la RD17 (commune de Mallemoisson), reposant sur un substratum marneux.

### **C.III.2.3 Autres affluents de la Bléone**

Les rares informations existantes sur les principaux affluents de la Bléone (Arigéol, Eaux Chaudes et Bouinenc) sont assez pauvres, et ne permettent pas de donner un aperçu général du réservoir alluvial correspondant.

Cependant, les différents aquifères restent très limités, aussi bien au niveau de leur capacité, que de leur exploitation actuelle ou de leur potentialité. Le manque d'informations les concernant ne représente donc pas un inconvénient majeur pour le déroulement de l'étude.

### **C.III.3 Evolutions de la piézométrie de la nappe alluviale de la Bléone**

Afin de caractériser l'évolution de la piézométrie de la nappe alluviale de la Bléone, les données disponibles sont :

- Deux piézomètres enregistreurs disponibles au niveau de l'ADES (portail d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines) :
  - Piézomètre 2PMI situé au niveau des extractions Perasso à Malijai dont la chronique est disponible de 1988 à 2010 ;
  - Piézomètre P1 à Mallemoisson disponible également sur la période 1988 à 2010.
- Un suivi piézométrique, au pas de temps mensuel pendant une année sur 78 ouvrages du bassin versant de la Bléone, réalisé dans le cadre du schéma de restauration et de gestion de la Bléone et de ses affluents (Sogreah, 2008).

L'analyse des différentes chroniques piézométriques disponibles doit permettre :

- D'identifier l'influence des précipitations sur la recharge de la nappe ;
- D'avoir une approche précise des variations de nappe sur un cycle piézométrique ;
- D'apporter des éléments pour la compréhension des relations nappe/rivière notamment en analysant les piézométries du bassin versant pour les hautes et basses eaux ;

### C.III.3.1 Variations des niveaux de la nappe et influences des précipitations

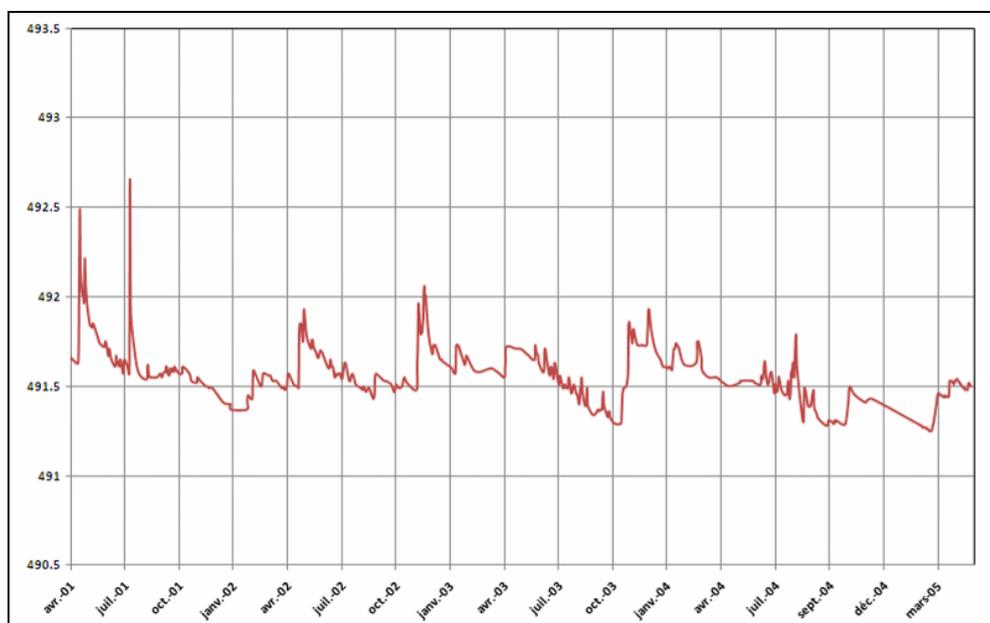
Les niveaux piézométriques des alluvions de la Bléone au niveau de Malijai et de Malemoisson sont présentés dans les illustrations suivantes. Les variations extrêmes des piézomètres sont :

- Pour 2PMI à Malijai, une différence de 2 m entre les niveaux maximums et minimums et un abaissement de l'ordre de 25 cm pendant la période d'été ;
- Pour P1 à Malemoisson, une différence de 1.6 m entre les niveaux maximums et minimums et un abaissement de l'ordre de 50 cm pendant la période d'été ;

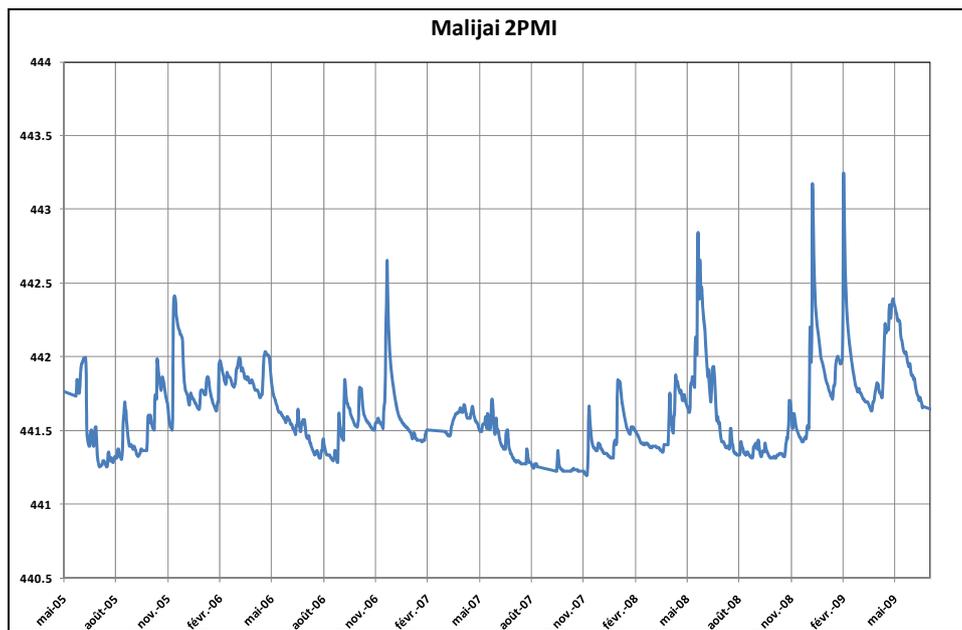
A partir de l'analyse des chroniques piézométriques disponibles au niveau des alluvions de la Bléone, il est d'ores et déjà, il est possible de tirer certaines informations :

- Malgré des abaissements qui peuvent durer plus d'une année, notamment de 1988 à 1990, l'abaissement de la nappe alluviale de la Bléone n'est pas une tendance à long terme.
- En situation normale, la nappe alluviale de la Bléone présente une alternance de deux régimes hautes eaux – basses eaux. L'aquifère présente deux périodes de hautes eaux correspondant au printemps, marqué par la fonte des neiges, et à l'automne avec des précipitations importantes, et deux périodes de basses eaux, la première en hiver avec la formation d'un manteau neigeux limitant les infiltrations vers la nappe, et la deuxième en été, avec un déficit pluviométrique et de fortes températures entraînant une réduction des infiltrations au profit d'une évaporation importante.

Ce comportement est valable pour les deux piézomètres implantés dans les alluvions de la Bléone. Les variations des niveaux de la nappe alluviales observent la même tendance générale que l'évolution des débits de la Bléone avec des basses eaux en hiver et en été et des hautes eaux au printemps et à l'automne.



*Illustration n°18 : Suivi piézométrique réalisé entre 2001 et 2005 au niveau de Malemoisson (Piézomètre P1)*



*Illustration n°19 : Suivi piézométrique réalisé entre 2005 et 2010 au niveau de Malijai (Piézomètre 2PMI)*

- Les temps de réaction de la nappe alluviale aux augmentations de débits de la Bléone ou aux évènements pluvieux sont très rapides de l'ordre de la journée.
- Aucune fluctuation générale de la nappe ne peut être aisément mise en évidence. Il n'y a pas de tendance à l'abaissement ou à l'exhaussement de la piézométrie des alluvions de la Bléone que l'on se trouve à Malijai (2PMI) ou à Mallemoisson (P1).

Même si des situations défavorables de deux ou trois années peuvent exister, avec les niveaux de prélèvements observés ces dernières années, les ressources en eaux souterraines des alluvions de la Bléone se reconstituent donc d'une année sur l'autre.

**A l'inverse des observations du schéma de restauration et de gestion de la Bléone et de ses affluents (Sogreah, 2005), sur les piézomètres étudiés, aucune augmentation globale de la piézométrie, pouvant résulter d'une pratique de l'irrigation gravitaire intense, n'a été mise en évidence sur les chroniques.**

**Des phénomènes de hautes eaux estivales liées à l'irrigation gravitaire sont possibles localement au niveau des canaux ou des parcelles irriguées.**

### C.III.3.2 Echanges nappes/rivières

A partir des observations du schéma de restauration et de gestion de la Bléone et de ses affluents (Sogreah, 2005), une interprétation des relations nappe/rivière a été réalisée.

A partir des informations disponibles sur les perméabilités, les dimensions de l'aquifère et le gradient de la nappe, il est possible de cerner les débits écoulés par la nappe alluviale de la Bléone.

Les dimensions de l'aquifère sont issues des coupes-type et des autres informations présentées dans le rapport de la Sogreah. Les épaisseurs sont parfois seulement hypothétiques.

Le gradient est issu des cartes piézométriques sur la Bléone, et présumé comparable à celui de la vallée sur les affluents.

Enfin, on dispose d'informations précises sur les perméabilités au droit des captages :

- ✓ de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $5.10^{-3}$  m/s à Marcoux, valeurs centrales que nous avons admises en général en l'absence d'autres informations ;
- ✓ des valeurs plus fortes au Chaffaut et à Aiglun ( $7.10^{-3}$  m/s) ;
- ✓ des valeurs plus faibles à Malijai.

De ces éléments, on peut calculer une fourchette de débit par la formule de Darcy :

$$Q = K \cdot L \cdot e \cdot i$$

- Avec Q Débit de la nappe (l/s)  
 K Perméabilité (m/s)  
 L Largeur de la nappe alluviale  
 e Epaisseur de la nappe  
 i Gradient hydraulique de la nappe

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Localisation	Perméabilité min / max (m/s)	Epaisseur (m)	Largeur (m)	Gradient (%)	Débit nappe min / max (l/s)
La Javie	$1.10^{-3} / 5.10^{-3}$	14	200	2.0	<b>60 / 280</b>
Marcoux	$1.10^{-3} / 5.10^{-3}$	20	600	1.4	<b>250 / 1 050</b>
Digne	$1.10^{-3} / 5.10^{-3}$	15	700	1.0	<b>100 / 500</b>
Aiglun	$2.10^{-3} / 7.10^{-3}$	30	1 150	0.9	<b>650 / 2 250</b>
Malemoisson	$1.10^{-3} / 5.10^{-3}$	17	1 400	0.8	<b>200 / 990</b>
Malijai	$7.10^{-4} / 2.10^{-3}$	6	130	0.6	<b>3 / 9</b>

*Tableau n°11 : Caractéristiques de la nappe alluviale de la Bléone sur plusieurs secteurs*

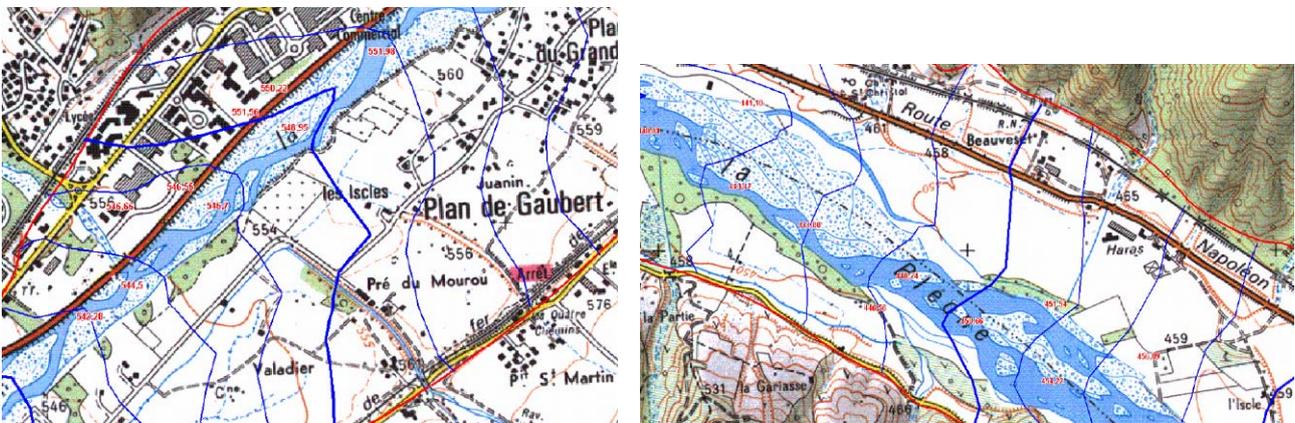
A partir du tableau précédent, plusieurs informations peuvent être apportées concernant les échanges entre la Bléone et sa nappe alluviale :

- Les débits estimés pour la nappe sont très variables : quasiment nuls dans les verrous (Malijai, par exemple), ils sont très importants notamment dans la plaine de Marcoux et dans celle d'Aiglun ;
- Au niveau de Marcoux, la capacité de la nappe atteint l'ordre de grandeur des débits d'étiage de la Bléone : il semble donc que les assècs signalés certaines années puissent s'expliquer par le simple fonctionnement naturel du système, même si les pompages AEP doivent amplifier le phénomène ;

- Au niveau d'Aiglun, la capacité de la nappe doit conduire à une forte réduction du débit de surface, même si aucune donnée n'était disponible à ce niveau.
- Sur les Duyes, où les assecs sont réguliers, la puissance de la nappe explique la disparition des débits de surface.

Même si l'approche précédente ne permet pas de définir précisément les échanges nappes-rivières, il est possible de conclure sur l'influence de la nappe sur les débits de surface.

En effet, compte tenu de la nature de la nappe alluviale (éléments et galets grossiers) qui favorise les infiltrations, dans les secteurs où la nappe est puissante, les échanges ont tendances à se faire de la rivière vers la nappe. A l'inverse, au niveau des verrous comme à Malijai où la nappe est peu développée, les échanges se font de la nappe vers la rivière (cf. illustration suivante).



*Illustration n°20 : Cartes piézométriques illustrant les sens des échanges nappes-rivières : à gauche, à Plan de Gaubert, la nappe alimente la rivière ; à droite, en amont de Malijai, la rivière alimente la nappe)*

Compte tenu des remarques précédentes, **il apparaît très important de gérer conjointement les ressources en eaux de surface et souterraines.**

## D. MODELISATION DES DEBITS

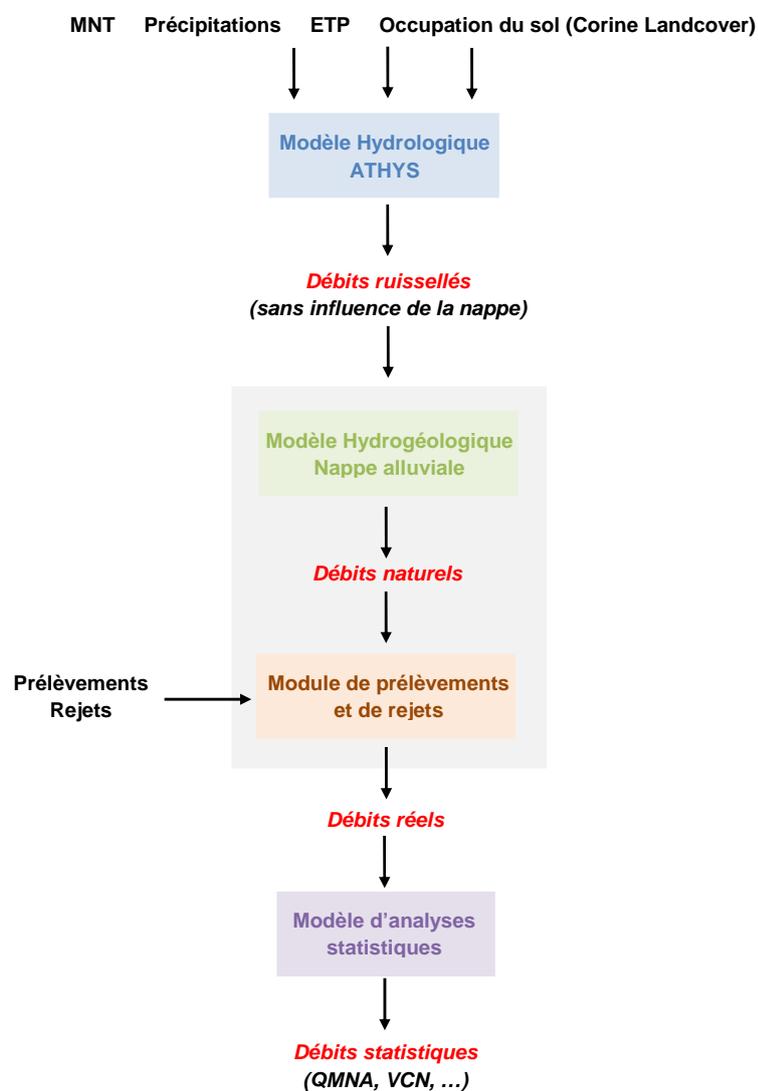
---

---

## D.I METHODOLOGIE GENERALE

La modélisation des débits, qu'ils soient de surface ou souterrains et influencés ou non par les prélèvements, se base sur plusieurs modules (cf. illustration suivante) :

- Un modèle hydrologique ATHYS ;
- Un modèle de prise en compte des échanges entre la nappe et les eaux superficielles ;
- Un module de prélèvements ;
- Un module d'analyse statistique des résultats.



*Illustration n°21 : Synoptique des différents modules utilisés pour la simulation des débits*

A partir de données d'entrées (MNT, couverture végétale, nature géologique des sols et précipitations), le modèle hydrologique ATHYS permet de définir les **débits ruisselés** au pas de temps journalier en divers points du bassin versant. Ces débits ne prennent pas en compte l'influence de la nappe et les éventuels échanges entre les eaux superficielles et souterraines.

La durée de la chronique sera la plus longue possible (25 à 30 ans) pour que les quantiles dégagés de cette chronique aient un sens du point de vue statistique.

Afin de prendre en compte l'influence des prélèvements dans la nappe alluviale sur les débits de surface, un modèle sur EXCEL (composé de macro-commandes VISUAL-BASIC) a été développé. L'application de ce modèle suppose de connaître les informations de base de la nappe alluviale : perméabilité, coupes lithologiques et idéalement, une carte des isopièzes pour identifier les secteurs hydrogéologiques.

Ce modèle permet de caractériser, en divers points de référence du bassin versant, les débits de surface et les débits transitant dans la nappe alluviale. Les débits reconstitués sont des **débits naturels** (sans influence des prélèvements).

A partir des débits naturels, le module de prélèvements, intégré à la même feuille EXCEL que le modèle de la nappe alluviale, permet de simuler les **débits réels**. En effet, à partir de données d'entrées réelles ou issues de scénarios sur les prélèvements et les rejets dans les eaux souterraines et superficielles, il est possible de déterminer l'impact sur le régime hydrologique du bassin versant et le fonctionnement de la nappe alluviale.

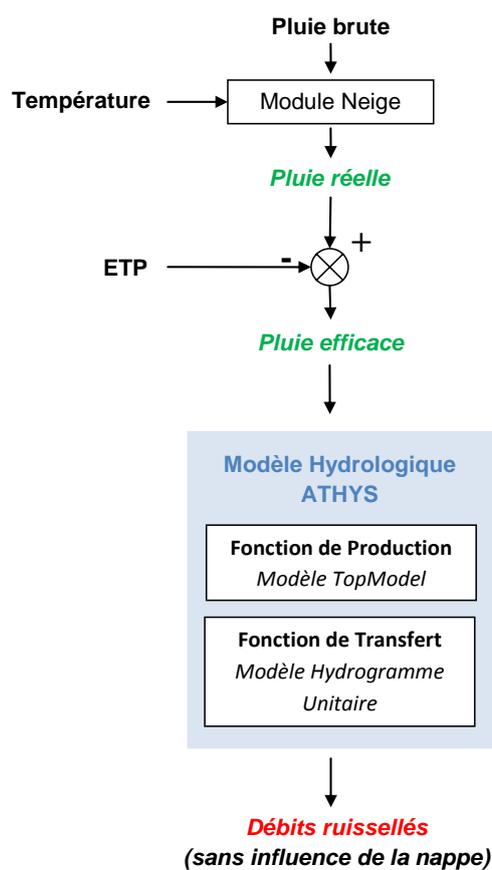
A partir des débits réels, obtenus aux différents points stratégiques du bassin versant, les quantiles caractéristiques pourront être définis : QMNA, QMNA2, QMNA5, 1/10 du module, 1/20 du module ...

## D.II MODELE HYDROLOGIQUE

### D.II.1 Chaîne de calcul pour déterminer les débits ruisselés

Le schéma ci-après précise la chaîne de calcul du modèle hydrologique ATHYS. Les données de pluie entrées dans le modèle tiennent compte des pertes par évapotranspiration et du module neige. Le module neige n'est appliqué qu'aux stations d'altitudes (Beaujeu, Castellard-Mélan, Seyne et Lambruisse) car ce sont les seules à avoir des précipitations neigeuses importantes.

A partir des pluies efficaces, la fonction de production TopModel définie la lame ruisselée, qui représente la proportion des précipitations qui va ruisseler, puis la fonction de transfert (hydrogramme unitaire) calcule les débits à l'exutoire des bassins versants identifiés comme des nœuds de calcul.



*Illustration n°22 : Détails de la chaîne de calcul du modèle hydrologique ATHYS*

## **D.II.2 Présentation du logiciel ATHYS**

### **□ Généralités**

ATHYS (ATelier HYdrologique Spatialisé) est un logiciel de transformation pluie-débit développé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) à Montpellier.

L'intérêt principal de ce logiciel en libre accès réside dans la possibilité de spatialiser la transformation pluie-débit. En effet, le modèle utilise pour entrant un modèle numérique de terrain (MNT) qui permet de calculer des apports au ruissellement maille par maille (généralement les mailles couvrent 10 000 m<sup>2</sup>). Ce principe est combiné à une spatialisation des données de pluies, qui permet sur de grands bassins versants de tenir compte de la variation spatiale des intensités de pluies.

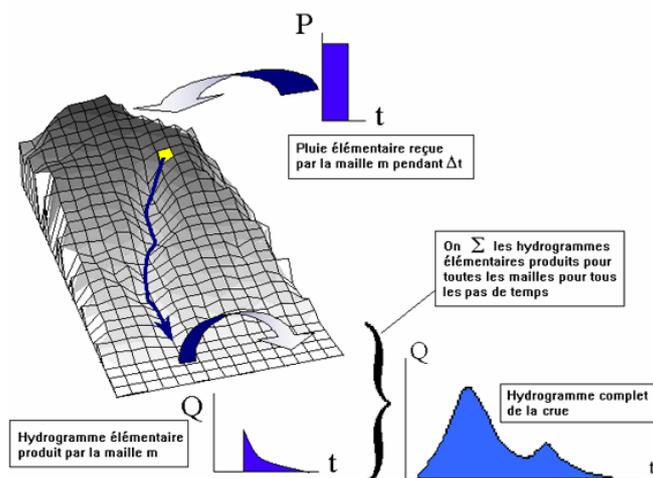
Le modèle est conçu pour travailler soit en mode continu à l'aide d'une chronique de pluies soit en mode événementiel à partir d'une pluie unique de projet ou réelle.

### **□ Modèles de calcul**

Le débit généré pour un événement pluvieux (transformation pluie-débit) est calculé en trois étapes :

- Pour chaque maille, le modèle de production permet d'estimer la quantité de pluie qui va contribuer au ruissellement.

- Le modèle de transfert calcule l'hydrogramme produit par chaque maille à l'exutoire du bassin versant. Ce calcul est réalisé à partir du résultat obtenu en appliquant la fonction de production.
- Les apports de chaque maille sont sommés pour obtenir le débit à l'exutoire.



*Illustration n°23 : Fonctionnement du modèle ATHYS (source : IRD)*

Le logiciel met à disposition plusieurs modèles de production et de transfert. Les choix suivants ont été opérés :

- Pour la production, le modèle TopModel. C'est un modèle conceptuel à deux réservoirs particulièrement adapté pour les débits d'étiage ;
- Pour le transfert, le modèle de l'hydrogramme unitaire, couramment utilisé en hydrologie ;

### **D.II.3 Présentation des modèles Neige et ETP**

#### **□ Présentation du Module Neige**

Pour les stations pluviométriques de Beaujeu, Castellard-Mélan, Seyne et Lambruisse, une partie des précipitations mesurées tombe sous forme de neige. Cette neige constitue alors un stock d'eau qui est libéré à la fonte des neiges. Les données de pluies mesurées étant uniquement des hauteurs de pluie, il a été rajouté une étape de calcul prenant en compte cette formation et fonte de neige. Ce module n'a été appliqué que sur les stations en altitude car c'est uniquement pour ces stations que le stock de neige est assez important pour avoir un impact sur l'hydrologie.

Le mode de calcul de la neige est basé sur un modèle simplifié couramment utilisé :

- Si  $T < 1^{\circ} \text{C}$ , la pluie tombe sous forme de neige. La pluie réelle en sortie du modèle est donc nulle. ;

- Si  $T > 1^{\circ}\text{C}$  , le stock de neige font selon l'équation suivante  $M=K1*(T+K2)$ . La pluie réelle en sortie du modèle est alors augmentée de la hauteur d'eau fondu chaque jour

Avec

- T la température en  $^{\circ}\text{C}$  ;
- M la hauteur d'eau fondu par jour (mm) ;
- K1 et K2 deux paramètres calés sur les observations de hauteur de neige.

Ce module, permet de calculer chaque jour une hauteur de pluie stocke sous forme de neige. Ce module est neutre vis-à-vis de volumes d'eau annuelle précipitée. En effet aucune quantité d'eau n'est supprimée ou ajoutée.

#### □ *Présentation du Module ETP*

Pour tenir compte de l'évapotranspiration, il est soustrait chaque jour la hauteur d'eau de l'ETP à la hauteur d'eau réelle en sortie du module Neige. On parle alors de pluie efficace.

### **D.II.4 Période de simulation**

Le logiciel est utilisé pour simuler les débits de 1969 à 2008 avec un calage par calcul du débit au droit des stations hydrométriques du Bès et du Barrage EDF de l'Escale à Malijai. La sortie du modèle est un débit journalier entre 1969 et 2008 inclus.

Les hydrogrammes calculés par le modèle sont au pas de temps journalier. Ce pas de temps est particulièrement intéressant pour les problématiques de préservation du milieu aquatique : une non-satisfaction des besoins durant une seule journée suffit pour affecter la vie biologique. Une simulation au pas de temps décadaire ne donne que des valeurs moyennes, qui peuvent occulter une partie des stress subis par le milieu.

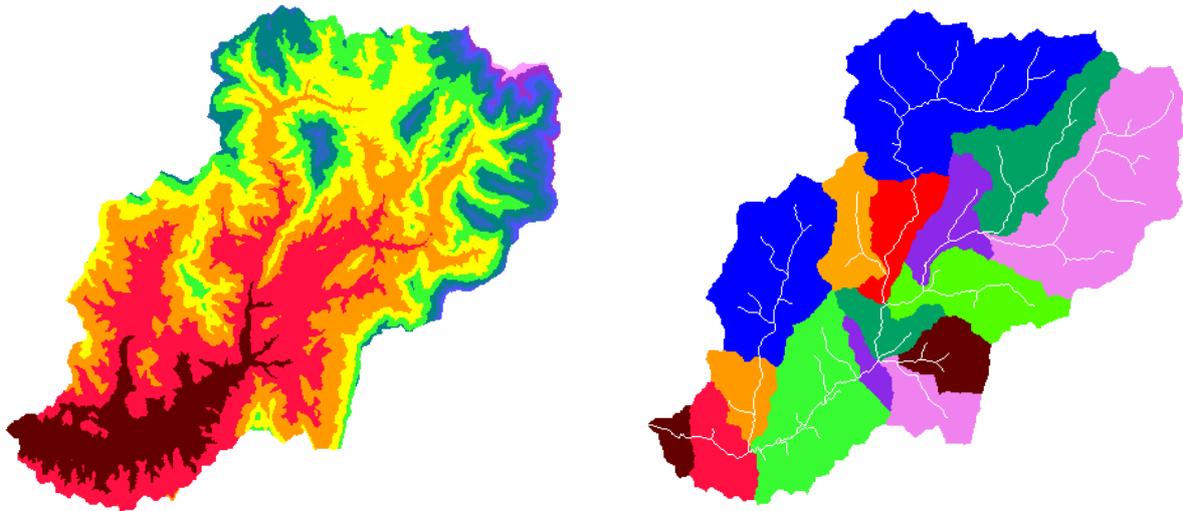
### **D.II.5 Traitement des données**

#### □ *Traitement des données géographiques*

➤ *Planche n°11 : Bd Alti : vue illustrative du bassin versant*

Par l'intermédiaire de l'Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée, le Modèle Numérique de Terrain a été obtenu (source : Bd Alti de l'Institut Géographique National (IGN)).

Le MNT est un ensemble de points altimétriques (trois coordonnées, x, y et z) situé tous les 100 m. L'assemblage des ces points permet de reconstituer la topographie du site (illustration ci-dessous à gauche). Le logiciel traite alors ces données pour obtenir le réseau hydrographique et les bassins versants (illustration ci-dessous à droite).



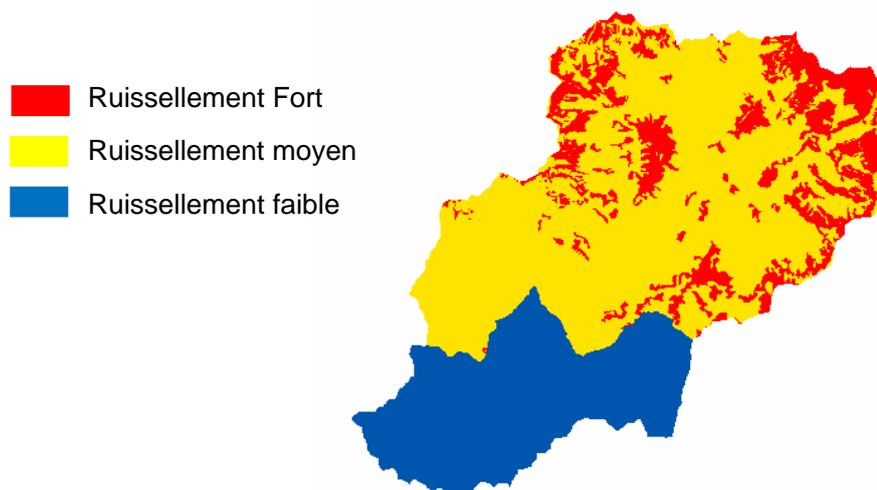
*Illustration n°24 : Exemple de carte des altitudes (à gauche) et du réseau hydrographique (à droite)*

#### □ *Classe de production*

Les ruissellements produits à partir des précipitations sont variables en fonction de nombreux paramètres : durée et/ou l'intensité des précipitations, nature géologique des sols, pentes des terrains, occupations des sols, etc.

Au niveau du bassin versant de la Bléone, trois classes de production différentes ont été identifiées à partir de l'occupation du sol (CORINE landcover) et de la topographie (pentes) (cf. illustration 21) :

- Zone de faible ruissellement qui correspond aux plaines avec de faibles pentes principalement situées au Sud de Digne au niveau des bassins versants 12, 15 et 16 ;
- Zone de fort ruissellement correspondant aux zones de sols nus et de pelouse et/ou de fortes pentes principalement sur les reliefs entourant le bassin versant de la Bléone au niveau des bassins versant 1, 2 et 5 ;
- Zone intermédiaire avec des ruissellements moyens qui rassemble toute les classes d'occupation du sol de CORINE Landcover non citées précédemment.



*Illustration n°25 : Exemple de carte des altitudes (à gauche) et du réseau hydrographique (à droite)*

A partir de la classification précédente concernant l'occupation des sols et les pentes, le tableau suivant présente la répartition des superficies du bassin versant de la Bléone en fonction des classes de production.

Classe de Production	Surface (km <sup>2</sup> )	Importance
1 – fort ruissellement	152.4	17 %
2 – ruissellement moyen	514.1	57 %
3 – faible ruissellement	238.5	26 %
<b>Total</b>	<b>905.0</b>	<b>100 %</b>

*Tableau n°12 : Répartition des superficies des classes de production au niveau du bassin versant de la Bléone*

Sur une superficie totale de 905 km<sup>2</sup>, les zones de fort ruissellement concerne 17% de la superficie du bassin versant (en rouge sur l'illustration 24). Ces zones correspondent aux reliefs avec des sols nus et/ou à fortes pentes principalement concernées par des pâturages. Pour comparaison, plus de 30% des surfaces du bassin versant se situent au-dessus de 1 300 m d'altitude, zones où la végétation se fait généralement rare et les pentes plus fortes.

#### □ *Traitement des données météorologiques*

Pour le calcul hydrologique nous avons utilisé les données météorologiques de 8 postes pluviométriques : Beaujeu, Castellard-Mélan, Digne, Marcoux, Seyne, Castellet, Entrages et Lambruisse.

Les durées d'observation sur ces postes ne sont pas identiques. En conséquence, les données manquantes ont été reconstituées. Les principes d'élaboration sont les suivants :

- Pour la pluviométrie, des corrélations linaires ont été déterminées entre la station de Marcoux et les autres stations utilisées par le modèle. La corrélation est estimée, lorsque les données sont disponibles, sur la période 1968 à 2008. Sur les périodes manquantes, les hauteurs précipitées sont ensuite recalculées à partir de la station de Marcoux.

Station	Durée d'observation	Période reconstituée
Beaujeu	1968 – 2008	
Castellard-Mélan	1968 – 1990	1991 – 2008
Digne	1968 – 2008	
Marcoux	1968 – 2008	
Seyne	1975 – 1978 1983 – 2007	1968 – 1974 1978 – 1982 2008
Castellet	1968 – 1996	1997 - 2008
Entrages	1968 – 2008	
Lambruisse	1968 – 2008	

*Tableau n°13 : Données pluviométriques reconstituées*

- Pour la température, un gradient (décroissant) de température de 0.6 °C par dénivelé de 100 m a été appliqué à partir de la station de Saint-Auban pour obtenir les températures sur les autres stations.
- Pour l'ETP, à partir de la station de Saint-Auban, une corrélation (fonction exponentielle) entre la température et l'ETP a été estimée. Cette corrélation a ensuite été appliquée sur les températures reconstituées des autres stations utilisées dans le modèle pour obtenir leurs valeurs de l'ETP.
- La neige est estimée à partir des précipitations et des températures dans un modèle simplifié à un réservoir. Si la température est négative, les précipitations sont intégralement neigeuses. La fonte des neiges est amorcée pour une température positive à partir d'une relation linéaire. Le modèle de neige n'est appliqué qu'aux stations situées en altitude (Beaujeu, Castellard-Mélan, Seyne et Lambruisse).

#### □ *Calcul de la lame d'eau précipitée*

Les informations climatologiques sont connues ponctuellement au droit de chaque station. Ces informations doivent être spatialisées de façon à être étendues à l'ensemble de la surface du bassin versant. La méthode des polygones de Thiessen a été utilisée pour définir la zone d'influence de chaque station.

Station	Surface (km <sup>2</sup> )	Importance
Beaujeu	288	32 %
Castellard-Mélan	118	13 %
Digne	167	18 %
Marcoux	171	19 %
Seyne	91	10 %
Castellet	32	4 %
Entrages	29	3 %
Lambruisse	9	1 %

*Tableau n°14 : Influence comparée des stations pluviométriques sur le bassin versant de la Bléone*

## D.II.6 Calage

Sachant que l'on dispose de mesures de débit sur le Bès à la station de la Clue de Pérouré et de mesures de débits reconstitués sur la Bléone à Malijai à partir des mesures sur le canal EDF de Oraison, la modèle ATHYS a été utilisé sur la période 1968 à 2008 pour réaliser :

- Un calage sur les débits mesurés du Bès à Pérouré (160 km<sup>2</sup> environ) ;
- Une validation sur les débits reconstitués de la Bléone à Malijai (proximité de l'exutoire).

### □ *Calage des paramètres sur les débits du Bès à Pérouré*

Le calage a été réalisé manuellement et par optimisation numérique car le modèle ATHYS possède un module de calage automatique. Le critère de calage est l'écart quadratique moyen (EQM) sur les débits inférieurs à 10 m<sup>3</sup>/s.

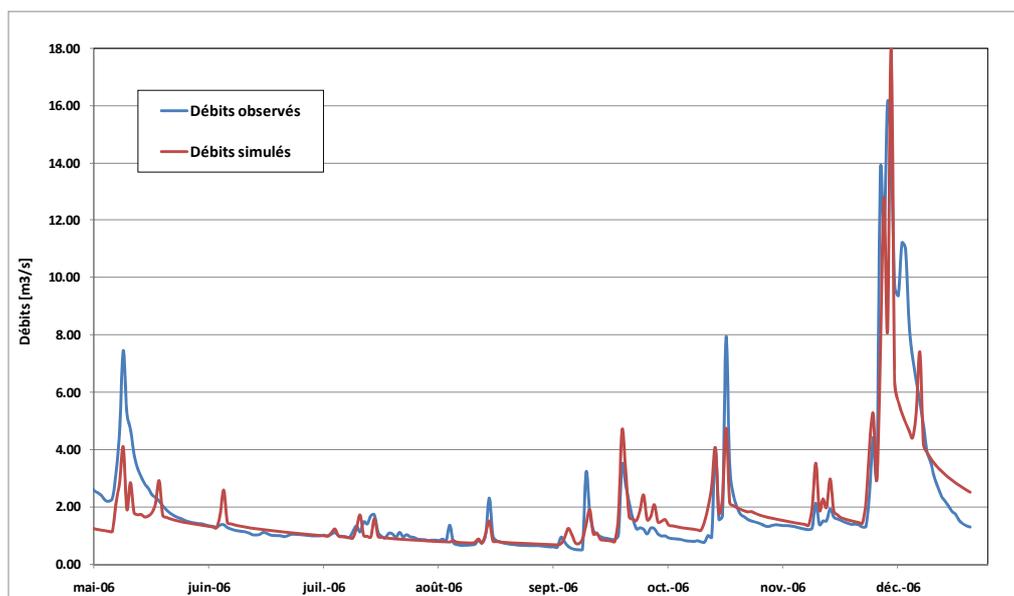
Compte tenu que trois classes de production ont été créées, il a fallu définir des valeurs différentes des paramètres du modèle ATHYS liés à la fonction de production pour chacune des classes. Concernant les paramètres de la fonction de transfert, ils sont identiques sur la totalité du bassin versant de la Bléone.

Les paramètres retenus sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

	Paramètres	Classe de production 1	Classe de production 2	Classe de production 3
Fonction de production	<i>STO [mm]</i>	4.5	5	5
	<i>INF [mm.h<sup>-1</sup>]</i>	2.1	3.3	3
	<i>F [m<sup>-1</sup>]</i>	20.2	20.2	25
	<i>Ds [j<sup>-1</sup>]</i>	0.55	0.55	0.55
Fonction de Transfert	<i>VO [m.s<sup>-1</sup>]</i>	1.25		
	<i>Alfa [ad]</i>	0.5		
	<i>K0 [ad]</i>	0.2		
	<i>K1 [mn]</i>	0.5		

*Tableau n°15 : Valeurs des paramètres de modélisation après calage*

Le graphique ci-dessous montre l'hydrogramme simulé et mesuré.



*Illustration n°26: Débits observés et simulés du Bès à Pérouré entre mai et décembre 2006*

Pour rappel, le modèle hydrologique ATHYS ne tient pas compte dans la présente simulation :

- des divers prélèvements de sorte qu'il ne fournit que les débits naturels non influencés. Cependant, les prélèvements sont relativement faibles sur le Bès à l'amont de Pérouré avec des débits inférieurs 100 l/s ;
- des zones d'infiltration et de résurgence dans les lits des cours d'eau. Dans la mesure où une partie des écoulements peut se faire dans l'épaisseur de cailloutis en sub-surface, les débits réellement observés sont inférieurs aux débits simulés. En effet, le débit simulé est une estimation de **l'ensemble de l'écoulement** sans tenir compte des infiltrations/résurgences éventuelles.

Le tableau ci-dessous indique les valeurs simulées et observées ainsi que la différence.

	Mesuré	Simulé
<i>Module (l/s)</i>	2 800	2 400
<i>Débit minimal (l/s)</i>	260	440
<i>Débit maximal (m<sup>3</sup>/s)</i>	218	44
<i>Débit mensuel minimal de période de retour 5 ans (QMNA5) (l/s)</i>	630	810
<i>Débit minimum annuel sur 10 jours consécutifs (VCN10) (l/s)</i>	470	610

*Tableau n°16 : Caractéristiques du débit du Bès à la Clue de Pérouré entre 1968 et 2008*

Le modèle ainsi calé présente les avantages/inconvénients suivants :

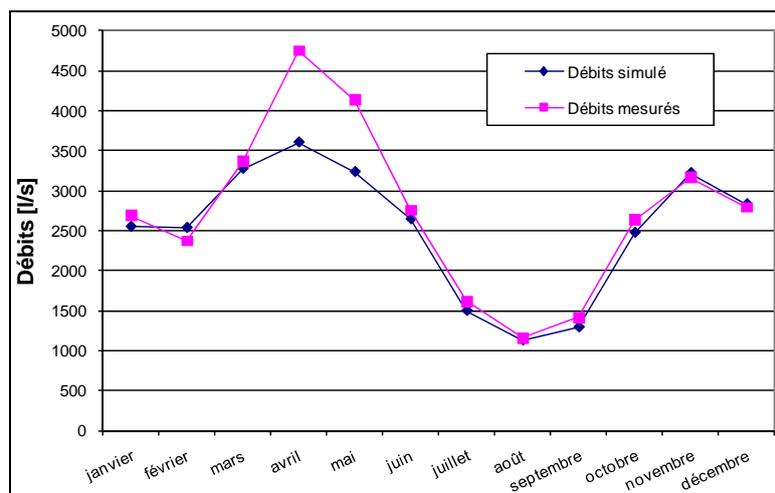
- Les débits de pointe sont sous estimés ;
- Le module annuel simulé est plus faible que le volume observé car le modèle ne permet pas de reproduire la fonte des neiges à cause de la connaissance incomplète de la couverture neigeuse ;

- Les débits après un événement pluvieux, en période de ressuyage des sols, sont surestimés ;
- Les périodes d'été sont correctement simulés.

En comparant les débits moyens mensuels (cf. illustration ci-dessous), les valeurs observés et simulés sont très proches 9 mois sur 12 notamment une différence de moins de 50 l/s au mois d'août (moins de 5 % d'erreur).

Les mois de Mars, Avril et Mai, fortement déficitaires, correspondent à la fonte des neiges qui est mal représentée soit à cause de l'outil de simulation de la neige soit, plus certainement, à cause du manque d'informations concernant la couverture neigeuse. Malgré l'utilisation de la station météorologique de la Foux d'Allos située à 1 400 m d'altitude, il semblerait qu'il manque des informations climatologiques sur :

- Les hautes altitudes (supérieures à 1 700 m) qui représentent tout de même plus de 10% du bassin versant de la Bléone ;
- Les différences de température entre l'ubac et l'adret responsable d'une fonte des neiges plus ou moins rapide.

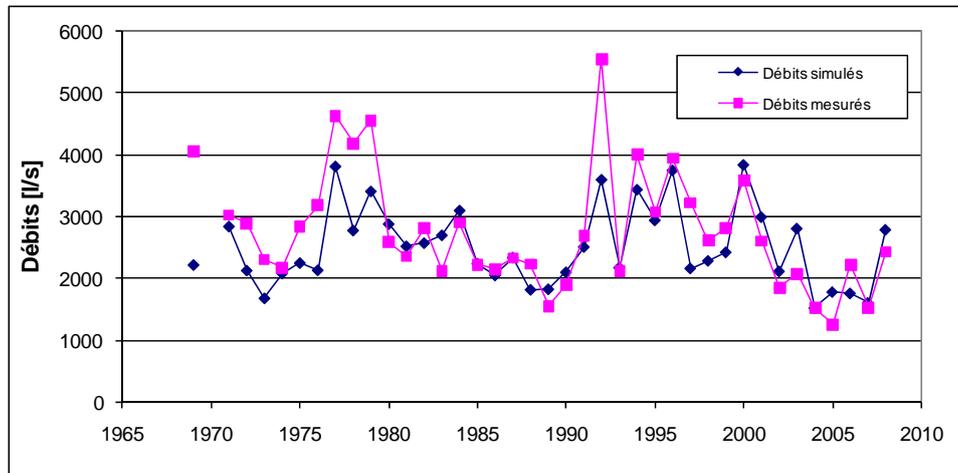


*Illustration n°27: Débits moyens mensuels observés et simulés du Bès à Pérouré sur la période 1968-2008*

En comparant les modules annuels (cf. illustration ci-dessous), les différences entre les valeurs observés et simulés sont parfois très proches comme dans les années 1980 et parfois très éloignés comme dans les années 1970. Ce phénomène **n'est pas explicable** par une évolution naturelle du bassin versant (changement de pratiques culturelles ou de prélèvements) ou par une dérive du modèle car les paramètres sont identiques sur toute la période de simulation.

Compte tenu des observations ci-dessus et des nombreuses valeurs de débits non validés sur les données observées (15 % des valeurs en moyenne ; jusqu'à 80 % certaines années) dues à des fréquents détarages de la station du Bès à Pérouré, le calage du modèle est donc jugé satisfaisant pour les débits

d'étiage et la période d'irrigation (juin à septembre) ce qui correspond à l'utilisation ultérieure du modèle.



*Illustration n°28: Modules annuels des débits observés et simulés du Bès à Pérouré entre 1968 et 2008*

En conclusion :

- **En regardant les modules, les débits mensuels et les débits d'étiages (QMNA5 et VCN10) des valeurs observés et simulés, le calage du modèle est satisfaisant ;**
- **La station hydrométriques du Bès à Pérouré est sujette à de fréquents détarages ce qui pourrait expliquer les écarts sur les années non satisfaisantes ;**
- **Le modèle ATHYS ne peut prendre en compte correctement de l'influence de la neige sur les débits du fait du manque de données sur la couverture nivale au-dessus de 1 300 m.**

☐ *Validation des débits ruisselés sur les débits estimés de la Bléone à Malijai*

A partir des paramètres des fonctions de production et de transfert calés sur le bassin versant du Bès au niveau de la Clue de Pérouré, les débits ruisselés obtenus ont été validés par rapport aux débits reconstitués de la Bléone à Malijai. Le graphique ci-dessous montre l'hydrogramme simulé et mesuré.

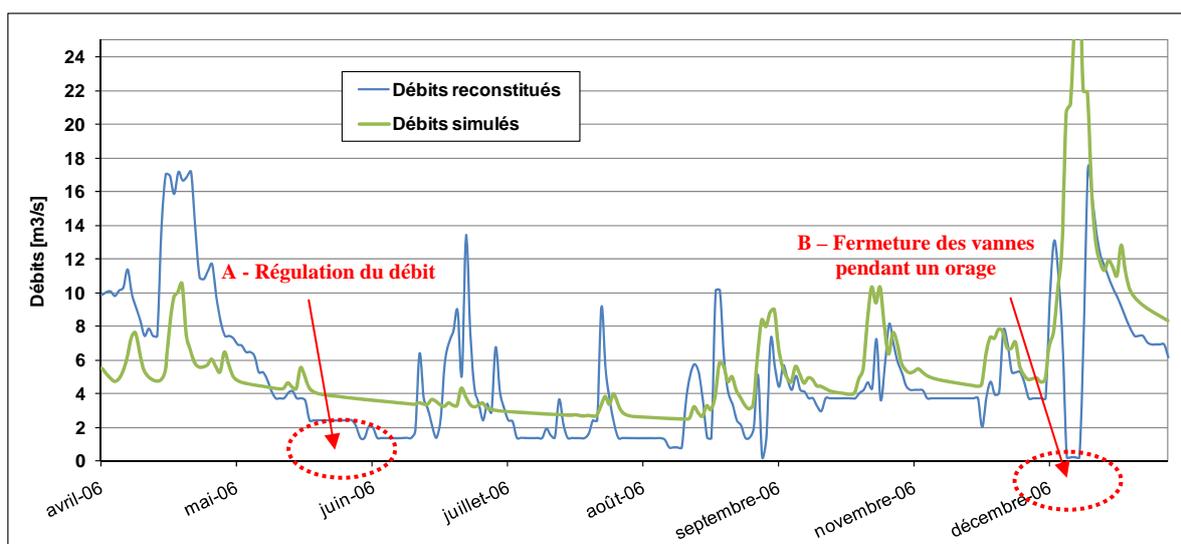


Illustration n°29: Débits observés et simulés de la Bléone à Malijai entre mai et décembre 2006

De la même manière que pour la modélisation du Bès, le modèle hydrologique ATHYS ne tient pas compte dans la présente simulation :

- des divers prélèvements de sorte qu'il ne fournit que les débits naturels non influencés ; Toutefois, sur le bassin versant de la Bléone au niveau de Malijai, les **consommations d'eau par les prélèvements peuvent représenter des débits supérieurs 2 m<sup>3</sup>/s**. Il est donc normal que les **débits d'étiage entre les valeurs reconstituées et simulées ne correspondent pas** ;
- de l'influence de la nappe alluviale ainsi le débit simulé est une estimation de **l'ensemble de l'écoulement** sans tenir compte des infiltrations/résurgences éventuelles.

Le tableau ci-dessous indique les valeurs simulées et observées.

	Reconstitué	Simulé
Module (l/s)	8 800	9 950
Débit minimal (l/s)	200	2 200
Débit maximal (m <sup>3</sup> /s)	-	143
Débit mensuel minimal de période de retour 5 ans (QMNA5) (l/s)	1 760	3 850
Débit minimum annuel sur 10 jours consécutifs (VCN10) (l/s)	660	2 900

Tableau n°17 : Caractéristiques du débit de la Bléone à Malijai entre 1968 et 2008

De la même manière que pour le Bès, les débits de pointe sont toujours sous estimés et le module annuel simulé est plus faible que le volume observé car le modèle ne permet pas de reproduire la fonte des neiges à cause de la connaissance incomplète de la couverture neigeuse.

De plus, même si sur la chronique modélisée les débits ne semblent pas dépasser les 25 m<sup>3</sup>/s correspondant au débit avant surverse sur le barrage de l'Escale, l'influence anthropique sur les débits reconstitués est nette avec des paliers durant les mois d'été et en Novembre. En effet, dès lors que les vannes du barrage EDF sont actionnées pour réguler le débit entrant dans le canal d'Oraison (A –

régulation du débit ; B – fermeture des vannes pendant un orage), les écarts entre les débits modélisés et reconstitués de la Bléone au niveau de Malijai sont donc potentiellement plus réduits que ceux visibles sur l'illustration précédente.

Les périodes d'étiage sont correctement simulés avec des différences entre les débits caractéristiques (QMNA5 et VCN10) reconstituées et modélisées comparables aux valeurs connues des prélèvements sur le bassin versant de la Bléone.

**En conclusion sur la modélisation hydrologique, les débits ruisselés modélisés par ATHYS sur le bassin versant de la Bléone sont satisfaisants pour les débits d'étiage et la période correspondant à l'irrigation (juin à septembre).**

Dans la suite de la modélisation en vue de la définition des volumes prélevables, les débits ruisselés issus des simulations seront utilisés comme des données d'entrée du modèle de nappe alluviale.

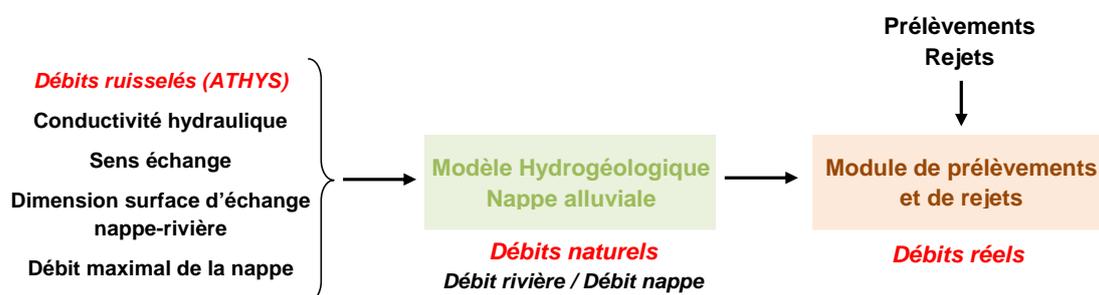
*Note : Les incertitudes que présente le modèle sont inhérentes à toute reconstitution de phénomènes naturels par un outil mathématique. Ces incertitudes proviennent de la mesure, des données d'entrée et de l'outil mathématiques lui-même. Ces incertitudes proches de 10 % (cf : partie E) peuvent être intégrés à l'estimation des volumes prélevables.*

## D.III MODELE DE NAPPE ALLUVIALE

### D.III.1 Présentation du modèle

#### □ Généralités

Le modèle de nappe doit permettre, en divers points de référence du bassin versant de la Bléone, de partager les débits ruisselés issus d'ATHYS en deux parties : les débits de surface de la Bléone et les débits transitant dans sa nappe alluviale (cf. illustration ci-dessous).



*Illustration n°30: Synoptique du modèle hydrogéologique des échanges nappes-rivières*

Le modèle de nappe a été réalisé sur EXCEL (composé de macro-commandes VISUAL-BASIC). En plus du traitement des échanges nappe-rivière, le modèle permet de prendre en compte l'influence des prélèvements sur les débits de la nappe alluviale, sur les débits de surface et sur leurs échanges.

Les données d'entrée du modèle hydrogéologique sont les débits de ruissellement obtenus par le modèle hydrologique ATHYS en plusieurs points de références. Ensuite de l'amont vers l'aval à partir de la zone d'influence de la nappe alluviale du cours d'eau principal (ou des affluents), celui-ci est découpé en tronçons hydrogéologiquement cohérent : secteur d'infiltration, secteur de résurgence de la nappe, secteur de nappe indépendante.

Le calcul des débits de surface et de nappe est alors réalisé en cascade, des tronçons amont aux tronçons aval, en fonction du type de tronçon :

- Sur les tronçons d'infiltration, le débit infiltré calculé sur la base de la loi de Darcy est retranché au débit de surface. La nappe alluviale voit elle son débit augmenté du débit perdu en surface. Si la nappe est saturée, le débit reste en surface.
- Sur les tronçons de résurgence (caractérisés par des secteurs où le débit capable de nappe alluviale est limitée par des verrous rocheux, une hauteur d'alluvion réduite ou une faible perméabilité), le débit estimé de la nappe à l'aval du tronçon est comparé à la capacité maximale de la nappe, le débit ne pouvant transiter par la nappe est redistribué en surface ;
- Sur les tronçons où la nappe est indépendante de la rivière, il n'y a aucun échange entre les deux ressources en eaux.

Le résultat de ces calculs en cascade est une représentation du débit circulant en surface ou dans la nappe alluviale à l'exutoire de chaque tronçon.

Lorsque des prélèvements (ou des rejets) sont pris en compte, ils sont sectorisés pour déterminer le tronçon et la ressource (surface ou nappe) auxquels ils s'appliquent. Le prélèvement (ou le rejet) est ensuite appliqué au calcul des débits tronçon par tronçon. Ils interviennent donc sans la détermination des débits échangés entre la nappe et la rivière.

Dès lors, il est possible de voir que, sur des secteurs d'infiltration, les prélèvements en nappe vont tendre à limiter les débits de surface, alors que dans des secteurs de non échange nappe rivière, ils n'auront pas d'impact sur le débit de surface.

L'application du modèle hydrogéologique suppose de connaître les informations de base de la nappe alluviale : perméabilité, coupes lithologiques pour évaluer la dimension de la nappe et idéalement une carte des isopièzes pour identifier les secteurs homogène du point de vue hydrogéologique.

#### □ *Découpage en secteurs hydrogéologiques homogènes de la Bléone*

A partir des éléments concernant les relations nappe/rievière (cf. paragraphe C.III.3.2), la nappe alluviale de la Bléone a été découpée en tronçons hydrogéologiques homogènes. Le découpage se base principalement sur le sens des échanges entre la rivière et la nappe.

**Sachant que les caractéristiques de la nappe alluviale ont été prises en compte lors du découpage des sous-bassins versants de la Bléone, les tronçons homogènes sont communs avec les sous bassins versants.**

Toutes les données hydrogéologiques du modèle (cf. tableau ci-dessous) sont issues des coupes-type et du schéma de restauration et de gestion de la Bléone et de ses affluents (Sogreah) notamment :

- La géométrie de la nappe alluviale avec son extension latérale et son épaisseur. L'importance de la nappe alluviale est très variable d'amont en aval sur la Bléone avec une réduction de sa puissance au niveau des nombreux verrous (clues ou zones de substratum affleurant) puis une augmentation entre ces obstacles ;
- Les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe alluviale par tronçons : perméabilité, gradient de la nappe, débit maximum possible ;
- Les sens des échanges entre la nappe alluviale et les cours d'eau avec la valeur « 1 » pour les échanges nappe-rivière et « -1 » pour les échanges rivière-nappe.

Compte tenu des informations sur les extensions des nappes alluviales et les propriétés hydrodynamiques des terrains en contact avec les cours d'eau, plusieurs sous bassins versants présentent des nappes alluviales de faibles extensions voire même inexistantes :

- BV2 (Arigéol) ;
- BV5 (Bès amont) ;
- BV7 (Galabre) ;
- BV8 (Mouiroues) ;
- BV9 (Eaux Chaudes) ; et,
- BV13 (Duyes amont).

Compte du faible impact des ressources souterraines sur le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du bassin versant de la Bléone, **ces bassins versants ne comporteront pas de modèle de nappe dans la modélisation.**

Les largeurs des cours d'eau ont été mesurées lors des investigations de terrain et des campagnes de jaugeages. En ce qui concerne les longueurs de chacun des secteurs hydrogéologiques, ils ont été mesurés à partir de la carte IGN.

Bassin versant	Nappe alluviale	Sens d'échange 1 : Nappe – Rivière - 1 : Rivière – Nappe	Perméabilité min / max (m/s)	Gradient (%)	Largeur du cour d'eau (m)	Longueur secteur (m)
BV1	Bléone	-1	$1.10^{-3} / 5.10^{-3}$	2.0	10.0	5 200
BV3	Bléone	-1	$1.10^{-3} / 5.10^{-3}$	1.4	11.5	8 250
BV4	Bléone	-1	$1.10^{-3} / 5.10^{-3}$	1.4	10.0	3 600
BV6	Bès	-1	$1.10^{-3} / 5.10^{-3}$	2.0	6.0	9 250
BV10	Bléone	-1	$1.10^{-3} / 5.10^{-3}$	1.0	18.0	4 600
BV11	Bléone	-1	$2.10^{-3} / 7.10^{-3}$	0.9	19.0	2 600
BV12	Bléone	-1	$2.10^{-3} / 7.10^{-3}$	0.9	15.5	10 500
BV14	Duyes	-1	$1.10^{-3} / 5.10^{-3}$	1.8	4.0	9 200
BV15	Bléone	1	$1.10^{-3} / 1.10^{-2}$	0.8	31.0	5 200
BV16	Bléone	-1	$1.10^{-3} / 5.10^{-3}$	1.0	18.0	1 800

*Tableau n°18 : Secteurs homogènes de nappe alluviale sur le bassin de la Bléone*

Concernant le BV4 qui rassemble une partie de la Bléone et le ruisseau du Bouinenc, seule la section correspondante à la Bléone possède une nappe alluviale qui est modélisée.

### **D.III.2 Calage et résultats**

A partir des données d'entrée que sont le sens d'échange, les dimensions du secteur et les débits ruisselés issus du modèle ATHYS, le modèle de la nappe alluviale a été calé à partir de deux paramètres difficilement estimables a priori :

- La perméabilité des berges utilisée dans la formule de Darcy pour calculer les débits échangés entre la nappe alluviale et les cours d'eau ;
- Les débits maximum de la nappe, évalués dans le cadre du schéma de restauration et de gestion de la Bléone et de ses affluents, qui sont calculés à partir de données difficilement mesurables comme l'extension ou la perméabilité de la nappe alluviale. Au niveau du BV15, des pertes souterraines sont avérées selon EDF. En accord avec leurs services en charge des ouvrages et de la modélisation hydrologique sur la Bléone, le débit maximal de la nappe au niveau de Malijai a été pris égal à 200 l/s.

La modélisation a été réalisée sur les sous bassins versants de la Bléone pour l'ensemble de la chronique disponible (1969 – 2008). Toutefois, compte tenu du manque d'information sur le fonctionnement du barrage de Malijai et de l'absence de prélèvements sur ce bassin versant, la modélisation du BV16 n'est pas utile dans le cadre de la présente étude.

Les paramètres retenus pour le modèle de la nappe alluviale sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Bassin versant	Nappe alluviale	Sens d'échange	Perméabilité (m/s)	Débit maximum de la nappe (l/s)
BV1	Bléone	-1	$2.6 \cdot 10^{-3}$	280
BV2	Aucune			
BV3	Bléone	-1	$3.0 \cdot 10^{-3}$	650
BV4	Bléone	-1	$2.5 \cdot 10^{-3}$	650
BV5	Aucune			
BV6	Bès	-1	$2.5 \cdot 10^{-3}$	280
BV7	Aucune			
BV8	Aucune			
BV9	Aucune			
BV10	Bléone	-1	$4.2 \cdot 10^{-3}$	1000
BV11	Bléone	-1	$2.0 \cdot 10^{-3}$	1050
BV12	Bléone	-1	$1.0 \cdot 10^{-3}$	1050
BV13	Aucune			
BV14	Duyes	-1	$8.0 \cdot 10^{-3}$	400
BV15	Bléone	1	$1.0 \cdot 10^{-3}$	200
BV16	Bléone	Pas de modélisation		

Tableau n°19 : Paramètres des tronçons de rivières et de nappes alluviales du module hydrogéologique

Le calage ne peut pas être réalisé sur le Bès au niveau de la Clue de Pérouré car le bassin versant BV5 ne comporte pas de nappe alluviale significative en amont de la Clue.

Le graphique ci-dessous montre les hydrogrammes simulés et mesurés sur la Bléone à Malijai.

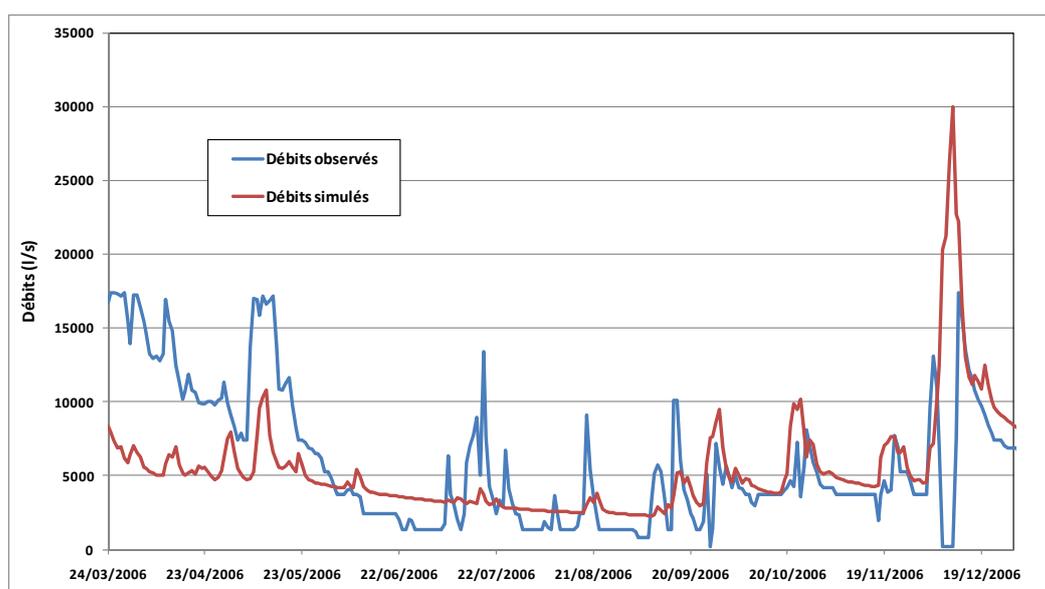


Illustration n°31: Débits journaliers observés et simulés de la Bléone à Malijai

Le tableau ci-dessous indique les valeurs simulées et observées.

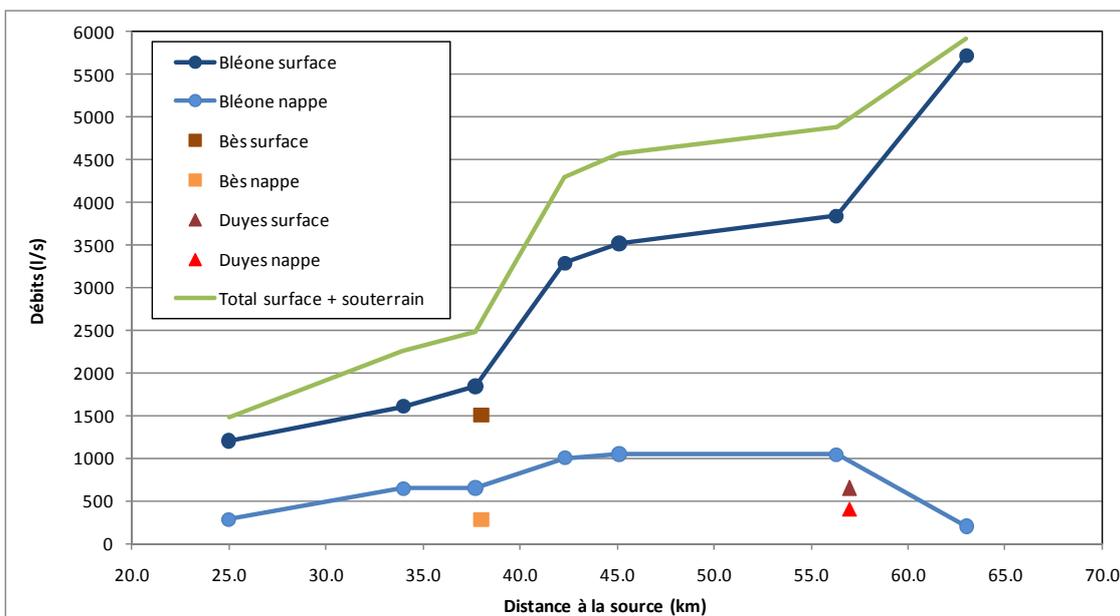
	<b>Reconstitué</b>	<b>Simulé</b>
<i>Module (l/s)</i>	8 800	9 750
<i>Débit minimal (l/s)</i>	200	2 100
<i>Débit maximal (m<sup>3</sup>/s)</i>	-	143
<i>Débit mensuel minimal de période de retour 5 ans (QMNA5)</i>	1 760	3 650
<i>Débit minimum annuel sur 10 jours consécutifs (VCN10)</i>	660	2 700

*Tableau n°20 : Caractéristiques des débits reconstitués et simulés de la Bléone entre 1968 et 2008*

Compte tenu que le couplage entre le modèle ATHYS et le modèle de nappe permet de prendre en compte l'ensemble des écoulements superficiels et souterrains (écoulements dans les cailloutis) mais sans tenir compte des divers prélèvements (débits naturels), le modèle ainsi calé présente les avantages et inconvénients suivants :

- Compte tenu de la prise en compte de la nappe alluviale au niveau de Malijai (200 l/s au maximum), l'écart entre le module simulé et reconstitué est plus faible en utilisant le modèle de nappe alluviale que la modélisation hydrologique ATHYS seule ;
- De la même manière, les écarts entre les QMNA5 et VCN10 simulés et reconstitués sont plus faibles. Sachant que ces débits sont atteints durant les périodes de prélèvements, La différence de 2 000 l/s correspond à la consommation nette des prélèvements (plantes, nappe et les transferts inter-bassin) ;

Afin de mieux visualiser la répartition des débits entre la surface et le souterrain, les débits moyens mensuels simulés des cours d'eau et des nappes alluviales sur la période d'étiage sont présentés dans le graphique suivant.



*Illustration n°32: Evolution amont-aval des débits moyens mensuels simulés de juillet à septembre sur le bassin versant de la Bléone*

En période d'étiage, les débits superficiels et souterrains de la Bléone augmentent régulièrement sur les 35 premiers kilomètres. Du fait de la faible puissance de la nappe alluviale du Bès (280 l/s soit 15% des écoulements), après leur confluence, la proportion dans la Bléone entre eau souterraine et eau de surface diminue malgré un débit de près de 1 000 l/s dans la nappe. Malgré l'augmentation du bassin versant, les débits de surface augmentent faiblement alors que les débits de la nappe restent constants autour de 1 000 l/s.

Concernant les Duyes, l'écoulement moyen sur la période d'étiage dans la nappe alluviale est de 400 l/s contre 650 l/s en surface ce qui représente près de 40% des écoulements totaux. Au niveau du BV15 compte tenu du verrou où est implanté le barrage de Malijai, le débit de la nappe est limité à 200 l/s. Les échanges se font donc dans le sens nappe-rivière avec une augmentation de la proportion des écoulements superficiels qui représente plus de 95% à Malijai.

### **D.III.3 Vision global de l'hydrologie du bassin versant de la Bléone**

A partir des résultats de la modélisation hydrologique et hydrogéologique couplée, une vision globale du fonctionnement de l'hydrosystème du bassin versant de la Bléone est disponible. Les résultats concernant les débits caractéristiques de chacun des bassins versants sont résumés dans le tableau suivant.

Bassin versant	Module (l/s)	Débit minimum journalier		Débit maximum journalier		QMNA5 (l/s)	VCN10 (l/s)	Débit moyen nappe (l/s)
		l/s	Mois	l/s	Mois			
<b>BV1</b>	1 800	800	Février	4 000	Mai	650	290	280
<b>BV2</b>	1 050	500	Août	1 400	Mai	390	280	
<b>BV3</b>	2 700	1 300	Août	5 000	Mai	810	350	640
<b>BV4</b>	3 100	1 550	Août	5 100	Mai	960	490	650
<b>BV5</b>	2 500	1 100	Août	3 600	Avril	840	630	
<b>BV6</b>	3 100	1 300	Août	4 300	Avril	880	580	280
<b>BV7</b>	600	280	Août	900	Avril	180	140	
<b>BV8</b>	230	140	Août	320	Novembre	100	80	
<b>BV9</b>	490	280	Août	650	Novembre	210	160	
<b>BV10</b>	6 150	2 800	Août	9 100	Mai	1 750	1 040	1000
<b>BV11</b>	6 500	3 000	Août	9 500	Mai	1 900	1 160	1050
<b>BV12</b>	7 000	3 350	Août	10 200	Mai	2 130	1 350	1040
<b>BV13</b>	1 750	750	Août	2 750	Avril	480	350	
<b>BV14</b>	1 500	450	Août	2 450	Avril	170	20	400
<b>BV15</b>	9 750	5 100	Août	13 700	Mai	3 650	2 710	200

*Tableau n°21 : Débits naturels caractéristiques modélisés sur le bassin versant de la Bléone*

Avec des débits de la nappe alluviale qui varient peu en l'absence de prélèvements, le fonctionnement hydrologique des sous bassins versants de la Bléone est relativement homogène avec :

- Des débits minimums journaliers et des débits caractéristiques d'étiage (QMNA5 et VCN10) systématiquement durant le mois d'août sur les sous bassins versants sauf pour le BV1 à l'amont de la Bléone avec un débit minimum en février ;
- Des étiages relativement marqués avec des rapports entre le QMNA5 et le module compris en 2.5 et 3.5 pour l'ensemble des bassins versants sauf sur le BV14 des Duyes dont le rapport est de plus de 9 traduisant des étiages très sévères ;
- Des débits maximums au printemps (avril ou mai) sauf pour les petits bassins versants BV8 et BV9 dont les débits maximums ont été enregistrés en novembre ;

De façon générale, la modélisation confirme bien que le régime des sous bassins versants de la Bléone est de type pluvio-nival avec des hautes eaux au printemps. L'influence méditerranéenne se fait toutefois sentir, surtout sur les sous bassins versants au Sud-Ouest de la Bléone (BV8, BV9, BV14) puisque les étiages sont importants en période estivale.

Localement, certains sous bassins versants affirment des caractères particuliers comme l'influence nivale du BV1 qui est un bassin versant d'altitude avec de fortes chutes de neige.

Afin de mieux caractériser la ressource sur le bassin versant de la Bléone, les volumes écoulés durant les mois d'étiage pour plusieurs sous bassins versants ont été calculés (cf. tableau suivant).

Bassin versant	Volume annuel moyen (Mm <sup>3</sup> )	Volume Juillet moyen		Volume Août moyen		Volume Septembre moyen	
		Mm <sup>3</sup>	%	Mm <sup>3</sup>	%	Mm <sup>3</sup>	%
<b>BV10 – Digne</b>	194	10.4	5.3	7.5	3.9	8.2	4.2
<b>BV14 – Duyes</b>	47	1.7	3.6	1.2	2.6	1.7	3.6
<b>BV15 - Malijai</b>	308	17.4	5.6	13.6	4.4	14.2	4.6

*Tableau n°22 : Volumes écoulés en année moyenne sur les sous bassins versants BV10, BV14 et BV15 de la Bléone*

Comme cela a déjà été présenté, en comparant les volumes annuels écoulés avec ceux des mois d'été, le mois d'août semble le mois de l'année où les écoulements sont les plus faibles avec des valeurs proches de 4% du volume total sur la Bléone mais seulement 2.7% sur les Duyes. Même si la nappe alluviale est relativement puissante sur ce secteur (400 l/s) cette dernière valeur sur les Duyes traduit encore l'importance des étiages concernant les débits superficiels sur ce bassin versant.

Concernant l'évaluation de la ressource en eau, en dehors de tout prélèvement, les écoulements durant la période estivale sont de :

- 26.1 Mm<sup>3</sup> sur le BV10 en aval de Digne soit plus de 13% des écoulements annuels ;
- 45.2 Mm<sup>3</sup> sur le BV15 au niveau de Malijai soit plus de 14% des écoulements annuels ;
- 5.4 Mm<sup>3</sup> sur le BV14 correspondant à l'aval des Duyes soit moins 10% des écoulements annuels ;

Sachant que le volume prélevable est définie par rapport aux débits biologiques et aux débits minimums mensuels de période de retour 5 ans, les volumes correspondant à cette année sèche sont présentés ci-dessous.

Bassin versant	Volume annuel années sèches Mm <sup>3</sup>	Volume Juillet années sèches		Volume Août années sèches		Volume Septembre années sèches	
		Mm <sup>3</sup>	%	Mm <sup>3</sup>	%	Mm <sup>3</sup>	%
<b>BV10 – Digne</b>	120	5.4	4.5	4.2	3.5	3.8	3.2
<b>BV14 – Duyes</b>	25	0.6	2.4	0.4	1.6	0.2	0.8
<b>BV15 - Malijai</b>	190	10.6	5.6	9.0	4.7	8.4	4.4

*Tableau n°23 : Volumes écoulés en année sèche sur les sous bassins versants BV10, BV14 et BV15 de la Bléone*

Pour une année sèche, la réduction du volume annuel est de l'ordre de 40% par rapport au volume moyen annuel.

Sur le cours d'eau de la Bléone, les réductions des volumes sont du même ordre de grandeur pour les mois de juillet et août avec des baisses de près de 7 Mm<sup>3</sup> en juillet et 5 Mm<sup>3</sup> en août à l'exutoire du bassin versant BV15.

En année sèche, le volume minimal de la Bléone se situe au mois de septembre avec une réduction de près de 50% des volumes écoulés par rapport à l'année moyenne. Les années sèches peuvent donc être caractérisées par des étiages prolongés en septembre en l'absence de pluies orageuses ou automnales.

Sur le bassin versant des Duyes, l'étiage est encore plus marqué avec des réductions des volumes écoulés par rapport à l'année moyenne de 70% en août et de 90% en septembre.

En conclusion :

- **Les ressources en eau sur le bassin versant de la Bléone pour la période estivale couvrent près de 13% des écoulements annuels ce qui représente à l'exutoire près de 30 Mm<sup>3</sup>.**  
**Ce volume ne correspond cependant pas au volume prélevable à l'échelle du bassin versant puisque les débits minimums biologiques restent à définir.**
- A titre de comparaison, l'estimation brute des prélèvements, issue d'une précédente phase de l'étude, est de 27 Mm<sup>3</sup> en moyenne. Sachant qu'une partie des prélèvements retournent au milieu naturel, la consommation nette reste inférieure à cette valeur.
- **Localement, les ressources en eau sont moins importantes comme sur les Duyes où les écoulements, durant la période estivale, représentent moins de 10% des écoulements annuels moyens et même moins de 5% des écoulements moyens en année sèche.**

## E. ANALYSE DES RESULTATS

---

---

## E.I RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA MODELISATION

Dans le cadre de l'étude, la modélisation sert à analyser la dynamique de fonctionnement des hydrosystèmes, qu'ils soient influencés ou non, avec :

- La reconstitution de l'hydrologie avec les débits des cours d'eau ;
- La reconstitution du fonctionnement des nappes alluviales (Bès, Duyes et Bléone) par tronçon homogène ;

La modélisation mise en place dans cette étude avec l'utilisation d'un module hydrologique ATHYS et d'un module hydrogéologique permet la prise en compte de façon couplée des écoulements souterrains et superficiels.

Le **pas de temps de la modélisation est journalier** afin de mieux appréhender le comportement hydrologique du bassin versant notamment les évolutions rapides des débits suite à des orages estivaux. L'utilisation du pas de temps journalier permet également de comparer les débits modélisés avec les jaugeages ponctuels réalisés par la DDT sur les cours d'eau.

En outre, **l'objectif de la présente étude est de définir le volume prélevable**. Ce dernier doit être entendu comme le volume total prélevable statistiquement 8 années sur 10 dans le milieu durant une période donnée. Il représente donc, pour une période donnée, la différence entre les débits naturels sans prélèvements et le débit minimum biologique.

Compte tenu de l'objectif de l'étude, **les résultats des modèles hydrologiques et hydrogéologiques seront traités statistiquement** afin de reconstituer des chroniques de débits naturels dont les caractéristiques statistiques (QMNA5, VCN, Module) sont semblables aux valeurs observées sans l'influence des prélèvements.

A partir des statistiques sur les débits naturels des cours d'eau et des débits biologiques, dont la valeur est constante pour un lieu donné, il sera possible de définir les volumes prélevables en chacun des points nécessaires.

## E.II METHODOLOGIE POUR L'ANALYSE DES RESULTATS

Dans toutes les analyses précédentes (partie C et D du présent rapport), les débits modélisés sont des débits naturels sans prise en compte des prélèvements.

Afin d'analyser les résultats de la modélisation couplée surface - souterrain avec ATHYS et le module de la nappe alluviale, il convient de les comparer avec les mesures des stations hydrométriques et les jaugeages ponctuels. Pour cela, il convient de faire intervenir des scénarios de prélèvements afin d'obtenir des débits réels.

Dans cette phase du travail, seulement deux scénarios extrêmes, minimaliste et maximaliste, seront utilisés.

## **E.II.1 Définition des scénarios de prélèvements**

Afin d'encadrer au plus près les volumes s'écoulant au niveau de la Bléone, des scénarios basés sur des estimations maximales et minimales des prélèvements ont été simulés.

### **E.II.1.1 Scénario de prélèvement minimum**

Dans le cadre de ce scénario, les prélèvements en eau potable sont ajustés sur les déclarations ou les estimations pour chacune des communes du bassin versant. Afin de tenir compte des fuites sur le réseau AEP, 30% des prélèvements rejoignent la nappe alluviale. Ce pourcentage correspond aux pertes généralement constatées sur des réseaux AEP ruraux.

Les rejets des stations d'épuration sont ceux calculés dans les phases 1 et 2 et se font dans les eaux superficielles.

Les prélèvements des irrigants individuels sont estimés à partir des volumes réellement consommés ramenés sur une période de 24 h. L'irrigant individuel devant irriguer à l'ETP, les retours d'eau en nappe et en rivière sont considérés comme nuls.

**Les prélèvements des structures collectives d'irrigation gravitaires** sont ceux calculés dans les phases 1 et 2 pour chacun des mois d'arrosage. En prenant l'hypothèse que la totalité de l'eau non consommés par les cultures retourne à la nappe par des infiltrations dans les canaux et sur les parcelles ou à la rivière par des retours d'eau en fin de canal, **des taux de retours de 50% en eau de surface et 35% en eau souterraine ont été définis.**

### **E.II.1.2 Scénario de prélèvement maximum**

Les prélèvements en eau potable sont identiques au scénario précédent. Les fuites sur le réseau AEP sont à l'inverse considérées comme nulles. Il n'y a donc pas de retours au milieu sauf les rejets des stations d'épuration qui se font dans les eaux superficielles.

Les prélèvements des irrigants individuels sont estimés à partir des volumes réellement consommés mais, dans ce scénario, ramenés sur une période de pompage de seulement 14 h. Les retours d'eau en nappe et en rivière sont toujours considérés comme nuls.

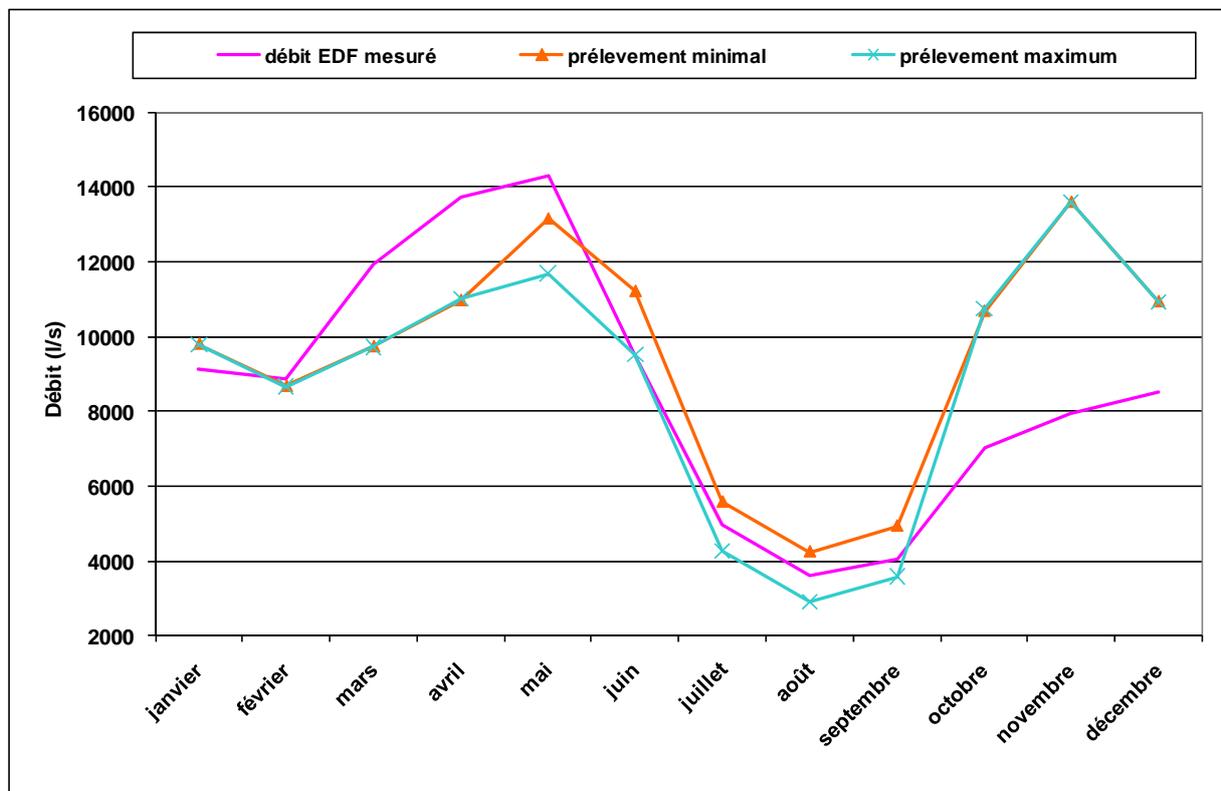
Les prélèvements des structures collectives d'irrigation gravitaires considérés sont les débits maximums autorisés sur chacun des canaux sur la totalité de la période d'irrigation. **Seuls les rejets d'eau en fin de canal sont considérés avec un taux de retour de 50% en eau de surface.**

## E.III COMPARAISON AVEC LES DONNEES MESUREES

### E.III.1 Comparaison des données hydrométriques

Afin d'avoir une vision représentative des écoulements moyens, les débits moyens mensuels simulés en sortie du module de nappe selon les deux scénarios de prélèvements sont comparés aux débits moyens mensuels reconstitués à partir des mesures EDF sur le canal d'Oraison.

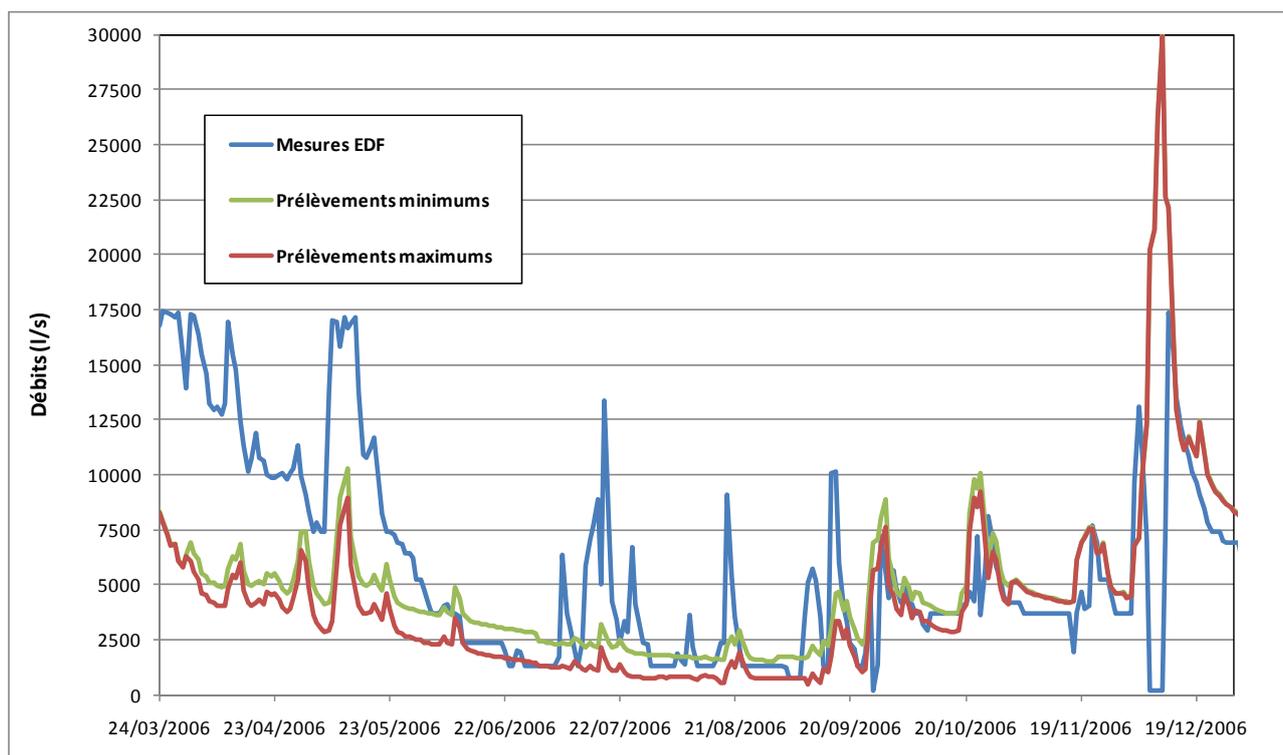
Les débits moyens mensuels reconstitués et simulés de la Bléone au niveau de Malijai (BV15) sur les 40 années de la chronique sont présentés dans l'illustration suivante.



*Illustration n°33: Débits moyens mensuels simulés et reconstitués de la Bléone au niveau de Malijai*

Afin de vérifier que le modèle reproduit bien le fonctionnement hydrologique de l'hydrosystème, les débits journaliers ont été comparés. Les débits simulés en sortie du module de nappe selon les deux scénarios de prélèvements sont comparés aux débits reconstitués à partir des mesures EDF sur le canal d'Oraison.

Les débits reconstitués et simulés de la Bléone au niveau de Malijai (BV15) sont présentés dans l'illustration suivante.



*Illustration n°34: Débits reconstitués et simulés de la Bléone au niveau de Malijai (2006)*

**Durant la période d'étiage de juin à septembre, les débits simulés à partir des prélèvements minimums et maximums encadrent les débits reconstitués d'EDF.**

**A partir de scénarios extrêmes, ces tests prouvent que la modélisation couplée ATHYS – Module de nappe permet donc de reconstituer les débits observés sur la Bléone.**

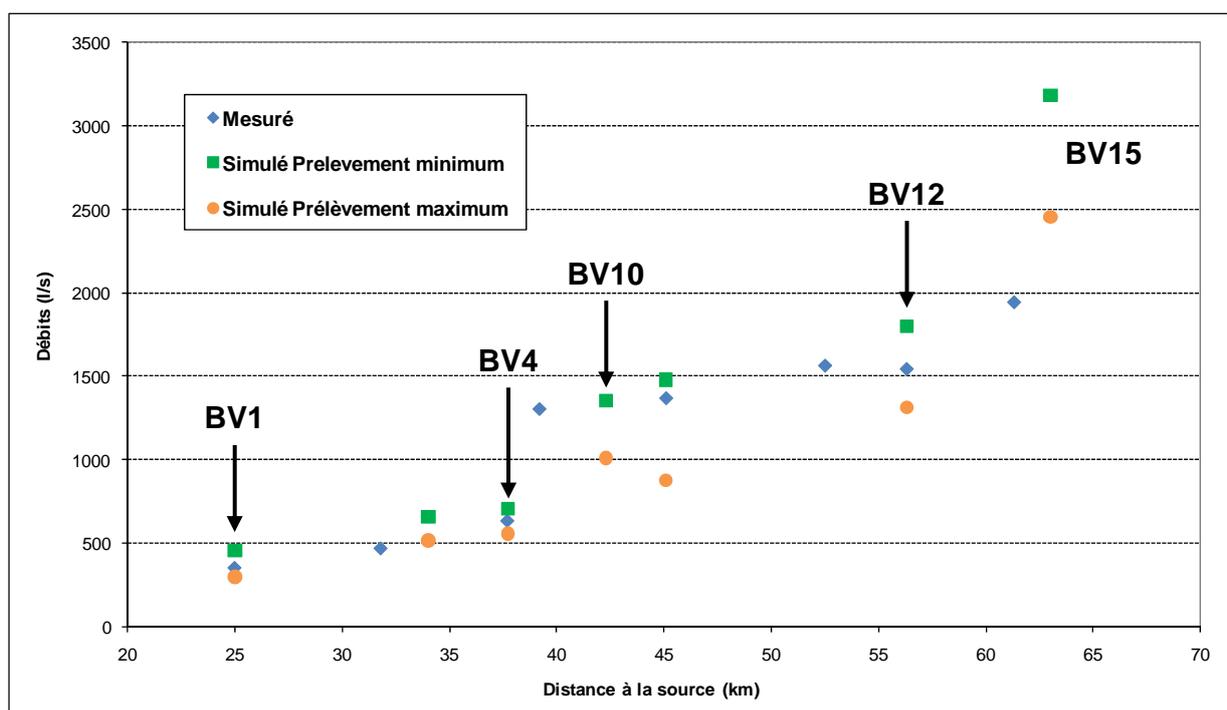
Les remarques concernant le modèle ATHYS, ayant permis d'obtenir les débits naturels, restent valables avec notamment des ressuyages suite à des épisodes pluvieux trop importants

*Remarque : La comparaison des débits simulés et mesurés pour le Bès à Pérouré n'a pas été réalisée. En effet, compte tenu de l'absence de nappe alluviale et des très faibles prélèvements sur le BV6 en amont de cette station (moins de 50 l/s), la comparaison serait très proche de celle réalisée lors du calage du modèle ATHYS (cf. paragraphe D.II.4).*

### **E.III.2 Comparaison avec les données instantanées**

Afin d'avoir une vision d'ensemble des débits sur le bassin versant de la Bléone, la DDT a réalisé une campagne de jaugeage le 27/10/2008 en plusieurs points du cours d'eau de la Bléone. Même si le jaugeage a eu lieu en octobre, il correspond à une période d'étiage.

L'illustration suivante représente les évolutions des débits mesurés par la DDT et des débits simulés à partir des scénarios de prélèvements minimums et maximums en plusieurs points du bassin versant de la Bléone.



*Illustration n°35 : Comparaison du jaugeage DDT du 27/10/2008 avec les débits simulés avec les prélèvements minimums et maximums*

En octobre, seulement une partie des prélèvements sont encore réalisés avec notamment l'AEP et les derniers prélèvements individuels ou collectifs pour l'irrigation (seulement dans le scénario de prélèvements maximum).

D'une manière générale, les débits simulés à partir des deux scénarios de prélèvements encadrent les valeurs mesurées par les jaugeages de la DDT.

**Avec un scénario réaliste de prélèvement, la modélisation ATHYS – Module de nappe permet de bien reproduire les débits superficiels de la Bléone sur l'ensemble du linéaire du cours d'eau.**

## E.IV COMPARAISON STATISTIQUES

Etant donné que les volumes prélevables seront définis par rapport aux débits biologiques et aux volumes écoulés en saison sèche soit pour une fréquence de retour de 5 ans, la modélisation ne doit pas seulement être performante pour reproduire les évolutions journalières ou mensuelles mais aussi être capable de reproduire les données statistiques caractéristiques.

Pour la définition des volumes prélevables, la donnée la plus importante correspond au débit mensuel minimum de période de retour 5 ans (QMNA5).

Le tableau suivant rassemble les débits statistiques (Module, QMNA5, VCN10) en plusieurs points du bassin versant de la Bléone pour les débits observés et les débits simulés à partir des deux scénarios de prélèvements.

	Bassin versant	Module (l/s)	Débit moyen d'août (l/s)	QMNA5 (l/s)	VCN10 (l/s)	Débit moyen nappe (l/s)
Scénario minimum	BV10 – Digne	5 950	2 350	1 300	800	1 000
	BV14 – Duyes	1 600	490	140	40	360
	BV15 - Malijai	9 400	4 250	2 800	2 300	200
Scénario maximum	BV10 – Digne	5 750	1 960	930	470	1 000
	BV14 – Duyes	1 500	390	50	0	350
	BV15 - Malijai	8 800	2 900	1 450	1 450	1 050
Observé	BV15 - Malijai	8 800	3 500	1 760	<i>Incalculable</i>	~ 200

Tableau n°24 : Débits caractéristiques sur les sous bassins versants BV10, BV14 et BV15 de la Bléone

Compte tenu que les débits du canal EDF d'Oraison sont utilisés pour reconstituer les débits observés à Malijai et que le canal est régulièrement mis en chômage sur de courtes périodes en été pour limiter les apports de matières en suspension à l'Etang de Berre, le calcul du VCN10 à Malijai est impossible.

De la même façon que lors des comparaisons avec les débits instantanées, les débits statistiques modélisés à partir des deux scénarios encadrent les valeurs issues des deux scénarios de prélèvements. Cette remarque est encore une illustration que **la modélisation mise en place sur le bassin versant de la Bléone a la capacité de reproduire les débits observés selon les scénarios de prélèvement définis.**

Afin de réaliser une validation croisée des résultats statistiques de la modélisation, deux types de comparaisons ont été effectuées :

- La comparaison des modules simulés et observés au niveau de la station hydrométrique du Bès à Pérouré où l'influence des prélèvements est négligeable ;
- La comparaison des modules simulés et observés au niveau de Malijai (BV15) dont les débits sont influencés par l'ensemble des prélèvements du bassin versant ;

Le graphique suivant présente la comparaison pour le Bès à Pérouré.

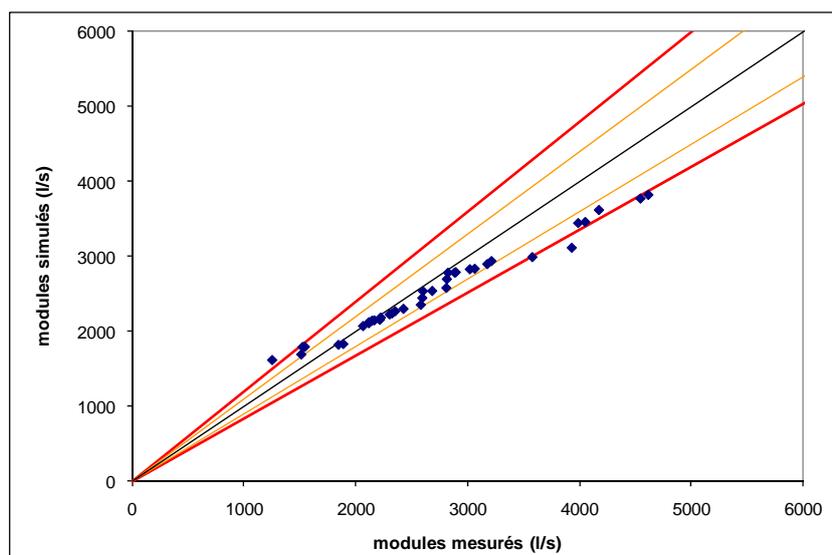


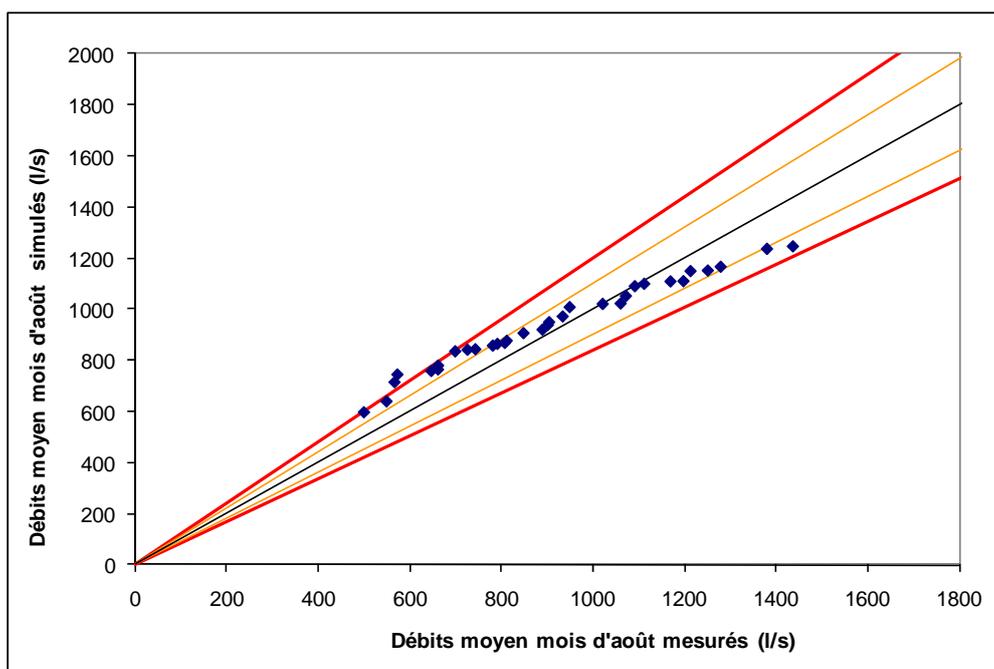
Illustration n°36 : Comparaison des modules observés et simulés du Bès à Pérouré

Le graphique s'organise autour de 3 axes :

- L'axe de couleur noire représente une erreur nulle entre les valeurs simulées et mesurées ;
- L'axe de couleur orange, qui se situe de part et d'autre de l'axe noir, représente une erreur de 10% entre les valeurs simulées et mesurées ;
- L'axe de couleur rouge, qui se situe de part et d'autre au-delà de l'axe orange, représente une erreur de 20% entre les valeurs simulées et mesurées.

La corrélation entre modules mesurés et simulés est très bonne avec une erreur inférieure à 10% jusqu'à un débit de 3 200 l/s. Au-delà, l'erreur augmente graduellement pour être supérieure à 20% pour les débits supérieurs à 4 500 l/s.

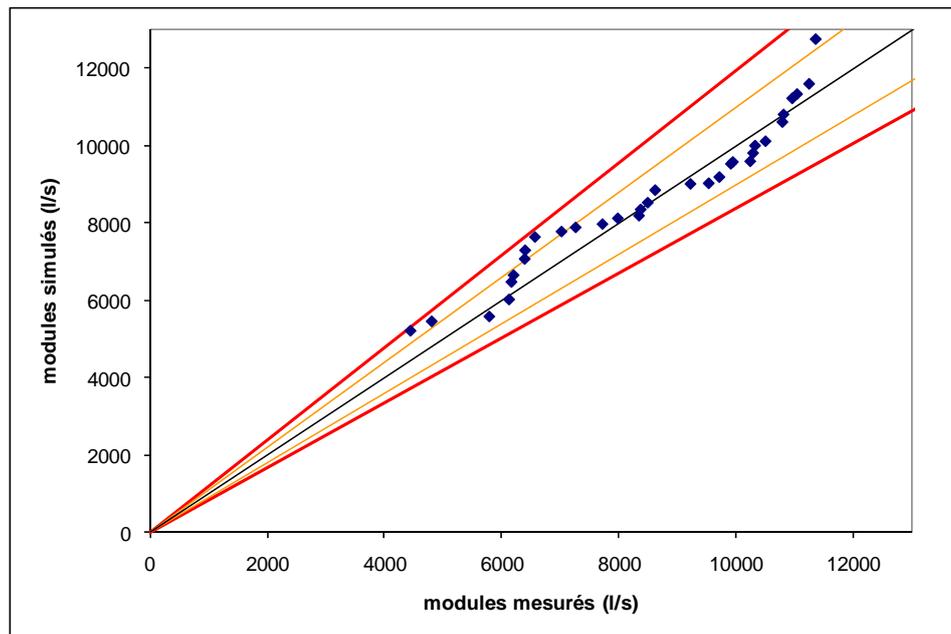
La même corrélation entre les débits mesurés et simulés pour les débits mensuels du mois d'août a été réalisée (cf. illustration suivante). La corrélation est satisfaisante à partir de 600 l/s avec des écarts entre simulés et observés proches de 10%. Compte tenu que le QMNA5 du Bès à Pérouré est de 630 l/s, **la modélisation des débits est satisfaisante pour représenter le comportement hydrologique du Bès.**



*Illustration n°37 : Comparaison des débits du mois d'août observés et simulés du Bès à Pérouré*

Le graphique suivant présente la comparaison entre simulés et observés pour la Bléone à Malijai.

La corrélation entre modules mesurés et simulés sur la Bléone à Malijai est bonne avec une erreur inférieure à 10% sur la quasi-totalité de la gamme de débit.

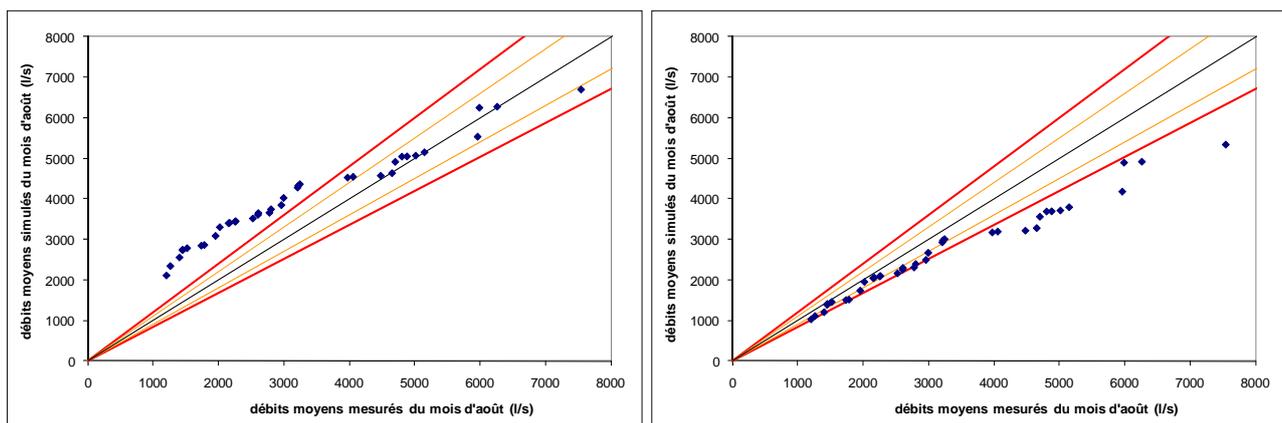


*Illustration n°38 : Comparaison des modules observés et simulés de la Bléone à Malijai*

Compte tenu de la forte influence des prélèvements sur les débits du mois d'août, deux corrélations ont été réalisées entre les débits mesurés et simulés à partir des deux scénarios de prélèvements définis précédemment : les prélèvements minimums et les prélèvements maximums (cf. illustration ci-dessous).

Pour la corrélation avec les prélèvements au minimum, les débits mensuels du mois d'août simulés sont surestimés par rapport aux observés surtout pour des valeurs faibles des débits de la Bléone au moment où les prélèvements sont généralement les plus importants.

A l'inverse, avec les prélèvements au maximum, les débits mensuels du mois d'août simulés sont légèrement sous estimés par rapport aux observés surtout pour les forts débits.



*Illustration n°39 : Comparaison des débits moyens observés et simulés du mois d'août pour la Bléone à Malijai – Prélèvements minimums à gauche et maximums à droite*

A partir de ce constat, on peut conclure que, malgré les résultats satisfaisants de la modélisation, **les débits réels simulés sont très dépendants des données sur les prélèvements.**

En conclusion :

- **La modélisation basée sur ATHYS et le module de nappe alluviale reproduit correctement les débits et les volumes tant au niveau statistique (QMNA5, VCN ou Module) que l'on qu'on le compare aux débits instantanés mesurés lors de jaugeages ;**
- **En fonction des scénarios de prélèvements, le modèle encadre correctement la réalité des débits observés ce qui confirme encore une fois la robustesse du modèle et de son calage ;**
- **Les résultats de la modélisation restent cependant très dépendants d'une de ses données d'entrée : les prélèvements. L'utilisation de plusieurs scénarios lors de la définition des volumes prélevables devraient permettre de solutionner ce problème ;**

## F. CONCLUSION

---

---

## F.I QUALITE DU MODELE

La modélisation couplée entre le modèle hydrologique ATHYS et le module hydrogéologique de la nappe alluviale permet d'obtenir des résultats satisfaisants en simulant correctement le comportement hydrologique réel du bassin versant de la Bléone sous l'influence des prélèvements.

La modélisation a été validée pour différents pas de temps et dans différentes situations :

- Aux pas de temps journaliers à partir des débits aux stations hydrométriques et des jaugeages de la DDT pendant les campagnes d'irrigation ce qui a permis de couvrir des périodes avec différents niveaux de prélèvements ;
- Aux pas de temps mensuels qui permet d'avoir une vision d'ensemble du comportement hydrologique, avec et sans prélèvements, des sous bassins versants de la Bléone ;
- Au niveau statistique avec notamment des résultats satisfaisants pour reproduire le QMNA5 qui servira, dans une prochaine phase, de référence pour définir les volumes prélevables.

## F.II LIMITES ET INCERTITUDES SUR LES RESULTATS

Les simulations réalisées se basent sur deux étapes : la reconstitution des débits naturels avec le modèle ATHYS et le module de la nappe alluviale puis l'obtention des débits réels à partir de différents scénarios de prélèvements.

Concernant la reconstitution des débits naturels, la modélisation se heurte à plusieurs contraintes :

- Au niveau hydrogéologique, les informations disponibles sur la nappe alluviale de la Bléone correspondent à des données ponctuelles (piézométrie, paramètres hydrogéologiques) ou à des estimations globales comme les débits maximums par section. Ces informations ponctuelles ont dû être généralisées à l'échelle des sous bassins versants dans le cadre de la modélisation de la nappe alluviale ;
- Sur un bassin versant montagneux, les stations météorologiques, mêmes celles des stations de ski, sont rarement implantées au dessus de 1 500 m. Le manque d'information sur les températures et les hauteurs de neige en altitude, qui représente plus de 15% du bassin versant de la Bléone, n'a pas permis de reproduire de façon satisfaisante la fonte des neiges ;

Concernant l'obtention des débits réels à partir des différents scénarios de prélèvements, les estimations sont réalisées à partir de moyenne ou de débits de pointe en accord avec la Chambre d'Agriculture.

En effet, malgré la pose de compteurs depuis 3 ou 4 années, les relevés des compteurs sont annuels et les consommations très variables d'une année sur l'autre ce qui empêche la réalisation d'une moyenne représentative des prélèvements. **La limite principale concerne donc la connaissance des prélèvements notamment en termes de débit instantané ou de débit moyen sur 24 h.**

En conclusion, les résultats de la modélisation tant au niveau des débits naturels que des débits réels avec l'influence des prélèvements sont perfectibles.

A partir des mesures des débits sur le Bès ou des débits reconstitués à partir des mesures sur le canal EDF d'Oraison, les incertitudes sur les résultats de la modélisation des débits à l'échelle du bassin versant de la Bléone ont été évalués :

- Plus ou moins 5% sur les moyennes annuelles et les données statistiques (QMNA<sub>5</sub>; VCN<sub>10</sub> de période de retour 5 ans) ;
- Plus ou moins 10 % sur les débits mensuels (débit moyen du mois d'août...);
- Plus ou moins 20 % sur les débits moyens sur moins de 10 jours (VCN<sub>10</sub>, VCN<sub>3</sub>) ;
- Plus ou moins 25 % sur les débits journaliers d'étiages ;
- Très fortes sur les débits de crue du fait que cette valeur ne constituait pas notre objectif de calage du modèle.

Il faut noter que ces incertitudes sont aussi évolutives en fonction de la localisation géographique :

- Autour de la cluse de Pérouré au niveau du Bès, les erreurs sont plus faibles que celles indiquées précédemment.
- Sur le reste de la Bléone et des principaux affluents, les incertitudes sont celles indiquées.
- Sur les petits affluents et ravins, aucun élément ne permet de connaître notre incertitude.

## F.III INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES

### F.III.1 Hydrogéologie de la nappe alluviale de la Bléone

Afin de préciser le fonctionnement hydrogéologique du secteur, il serait nécessaire de **compléter les connaissances** sur la nappe alluviale de la Bléone notamment par des mesures de perméabilité et de conductivité ainsi qu'un suivi piézométrique régulier. Ces points de mesures piézométrique sont au minimum de 2 : un premier au niveau de mousteiret pour suivre les niveaux de la nappe alluviale alimentant en eau Digne les Bains, le second point peut être situé au niveau du pont du Chaffaut pour avoir les niveaux de nappe avant le secteur de résurgence.

Dans un deuxième temps, ces données supplémentaires pourraient permettre de réaliser une **modélisation hydrogéologique complète** de la nappe alluviale. Le modèle à mettre en place serait un modèle maillé de type ModFlow (USGS, USA) ou Marthe (BRGM, France). Les avantages de cette modélisation seraient :

- De caler les paramètres hydrodynamiques en tout point de la nappe alluviale (conductivité hydraulique à saturation, vitesse d'écoulement) ;
- D'estimer les échanges entre la nappe et la rivière en tout point du linéaire du cours d'eau ainsi que la recharge de la nappe par les canaux d'irrigation gravitaire ;

### **F.III.2 Campagne de mesure des débits instantanés des prélèvements**

Compte tenu des incertitudes sur les prélèvements, il conviendrait de réaliser des investigations complémentaires sur plusieurs structures d'irrigation.

Au niveau de plusieurs prélèvements individuels, sur différents mois et en fonction des cultures, un suivi des débits instantanés sur la totalité d'une rotation d'irrigation (même si l'ouvrage de pompage est déplacé comme par exemple pompe attelée sur un tracteur) afin d'avoir une estimation des heures d'irrigation par jour, des débits instantanés maximums et des volumes sur une rotation ;

Les mesures pour les canaux d'irrigation collectifs sont détaillées dans le paragraphe suivant.

### **F.III.1 Fonctionnement des canaux gravitaires collectifs**

Le fonctionnement des réseaux gravitaires est actuellement peu connu. En effet, les ASA en partenariat avec la FDSIC se sont équipées d'échelles liminigraphiques permettant de connaître leurs prélèvements avec plus de précision. Mais la répartition des volumes prélevés (infiltration, retour dans le cours d'eau, utilisation par les cultures) est peu connue.

Il a été estimé qu'entre 40% et 80% de l'eau retournait au cours d'eau sur le canal du Bourg sur le bassin versant de la Bléone. Cette fourchette très large est incompatible avec la précision souhaitée dans la présente étude.

## **F.IV PROPOSITION DE POINTS NODEAUX**

L'orientation n°7 du SDAGE prévoit l'implantation de plusieurs points nodaux de suivi des débits d'étiage sur l'ensemble du territoire. **Pour la Bléone, deux points sont prévus :**

- **Un premier en amont de Digne les Bains au niveau de la dalle au Ammonites ;**
- **Un second sur la Bléone aval.** Deux sites sont intéressants, le pont de chemin de fer situé en aval de la prise de Gaubert qui permet de vérifier le maintien des débits en aval immédiat de toutes les prises situées dans le secteur de Dignes. Néanmoins, vu que le débit est suivi en amont de Digne, il est facile, en connaissant les débits prélevés par les ASA (par les échelles liminigraphique) , d'évaluer les débits au pont de chemin de fer par soustraction. Un deuxième emplacement au niveau du **pont du Chaffaut** est plus intéressant car, il est situé en aval des retours des canaux. Il contrôle donc non seulement les débits prélevés mais aussi les retours d'eau (qui varient en fonction des surfaces irriguées en amont).

**D'autres stations semblent intéressantes à suivre (par ordre de priorité) :**

- **L'aval des Duyes** (au pont de la RN 85) pour suivre les situations d'assec sur cet affluent fortement influencé par les prélèvements ;

- **La Bléone au niveau du barrage de trente pas.** Ce point marque le début du secteur de prélèvement important ;
- **Le Bès au niveau de la Clue du Pérouré.** C'est actuellement la seule station hydrométrique du bassin versant. Cet affluent contribue fortement au débit de la Bléone, mais il est très peu concerné par des prélèvements agricoles.



**ATTEINDRE  
L'ÉQUILIBRE QUANTITATIF  
EN AMÉLIORANT  
LE PARTAGE  
DE LA RESSOURCE EN EAU  
ET EN ANTICIPANT  
L'AVENIR**

## **ÉTUDES D'ESTIMATION DES VOLUMES PRÉLEVABLES GLOBAUX**

Les études volumes prélevables visent à améliorer la connaissance des ressources en eau locale dans les territoires en déficit de ressource.

Elles doivent aboutir à la détermination d'un volume prélevable global sur chaque territoire. Ce dernier servira par la suite à un ajustement des autorisations de prélèvement dans les rivières ou nappes concernées, en conformité avec les ressources disponibles et sans perturber le fonctionnement des milieux naturels.

Ces études sont également la première étape pour la définition de plans de gestion de la ressource et des étiages, intégrant des règles de partage de l'eau et des actions de réduction des prélèvements.

Les études volumes prélevables constituent une déclinaison opérationnelle du SDAGE et répondent aux objectifs de l'Orientation fondamentale 7 « Atteindre l'équilibre quantitatif en améliorant le partage de la ressource en eau et en anticipant l'avenir ».

Elles sont menées par des bureaux d'études sur 70 territoires en déficit du bassin Rhône-Méditerranée.

### **Maître d'ouvrage :**

• Agence de l'eau  
Rhône-Méditerranée & Corse

### **Financeurs :**

• Agence de l'eau  
Rhône-Méditerranée & Corse

### **Bureau d'études :**

CEREG Ingénierie