

ÉTUDES D'ESTIMATION DES VOLUMES PRÉLEVABLES GLOBAUX



Sous bassin versant du Calavon - Coulon

Phases 4 j Mai 2012



PARC NATUREL REGIONAL DU LUBERON



ETUDE DE DETERMINATION DES VOLUMES PRELEVABLES SUR LE BASSIN VERSANT DU CALAVON

Evaluation des pressions et impacts des prélèvements (phase 4)



MAÎTRE D'OUVRAGE

**PARC NATUREL REGIONAL DU
LUBERON**

OBJET DE L'ETUDE

**ETUDE DE DETERMINATION DES
VOLUMES PRELEVABLES SUR LE
BASSIN VERSANT DU CALAVON**

N° AFFAIRE

M10191

INTITULE DU RAPPORT

***Evaluation des pressions et impacts des
prélèvements (phase 4)***

V4	14/11/2012	Fabien CHRISTIN	Philippe DEBAR	Version finale
V3	20/10/2012	Fabien CHRISTIN	Philippe DEBAR	Prise en compte des différentes remarques
V2	18/07/2012	Fabien CHRISTIN	Philippe DEBAR	Résultats
V1	04/05/2012	Fabien CHRISTIN		Méthodologie
<i>N° de Version</i>	<i>Date</i>	<i>Établi par</i>	<i>Vérifié par</i>	<i>Description des Modifications / Évolutions</i>



Novembre 2012

Établi par CEREG Ingénierie / FCH

TABLE DES MATIÈRES

A. PRESENTATION DE L'ETUDE.....	9
A.I ELEMENTS DE CONTEXTE.....	10
A.II CONTENU DU RAPPORT	13
A.III METHODOLOGIE GENERALE DE LA PHASE 4.....	13
B. MODELISATION DES DEBITS NATURELS	15
B.I METHODOLOGIE GENERALE	16
B.II MODELISATION HYDROLOGIQUE EN SITUATION NATURELLE	17
<i>B.II.1 Chaîne de calcul pour déterminer les débits ruisselés</i>	<i>17</i>
<i>B.II.2 Présentation du logiciel ATHYS.....</i>	<i>18</i>
<i>B.II.3 Présentation du module ETP.....</i>	<i>19</i>
<i>B.II.4 Période de simulation.....</i>	<i>19</i>
<i>B.II.5 Traitement des données</i>	<i>20</i>
<i>B.II.6 Calage intermédiaire.....</i>	<i>23</i>
B.III MODELE DE LA NAPPE D'ACCOMPAGNEMENT	27
<i>B.III.1 Présentation du modèle</i>	<i>27</i>
<i>B.III.2 Calage du modèle de la nappe d'accompagnement</i>	<i>30</i>
<i>B.III.3 Résultats de la reconstitution des débits naturels</i>	<i>30</i>
C. MODELISATIONS DES DEBITS INFLUENCES	36
C.I MODELE DE PRELEVEMENTS ET RESTITUTIONS	37
C.II RESULTATS DE LA RECONSTITUTION DES DEBITS INFLUENCES	39
C.III COMPARAISON AVEC LES DONNEES MESUREES.....	42
<i>C.III.1 Comparaison des données hydrométriques.....</i>	<i>42</i>
<i>C.III.2 Comparaison avec les données statistiques</i>	<i>45</i>
<i>C.III.3 Comparaison avec les données de jaugeage et les assecs observés.....</i>	<i>50</i>
D. CONCLUSION	52
D.I QUALITE DU MODELE.....	53
D.II LIMITES ET INCERTITUDES SUR LES RESULTATS.....	53
D.III INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES.....	53

LISTE DES PLANCHES

- Planche n°2 : Reliefs du bassin versant du Calavon 20
- Planche n°10 : Localisation des stations météorologiques 21

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°1 : Données pluviométriques reconstituées.....	22
Tableau n°2 : Influence comparée des stations pluviométriques sur le bassin versant du Calavon.....	22
Tableau n°3 : Valeurs des paramètres de modélisation après calage	23
Tableau n°4 : Caractéristiques des débits simulés non influencés du Calavon à Coste-Raste entre 1978 et 2010 par rapport aux débits observés.....	24
Tableau n°5 : Caractéristiques des débits simulés non influencés du Calavon à Oppède entre 1996 et 2010 par rapport aux débits observés.....	26
Tableau n°6 : Secteurs homogènes par sous bassin de nappe d'accompagnement sur le bassin du Calavon	29
Tableau n°7 : Débits caractéristiques non influencés du Calavon en sortie du module de nappe d'accompagnement	31
Tableau n°8 : Débits moyens mensuels non influencés (en l/s) sur le Calavon en sortie du module nappe	32
Tableau n°9 : Volumes naturels écoulés moyens du Calavon en sortie du module nappe	33
Tableau n°10 : Volumes naturels écoulés du Calavon en année sèche en sortie du module nappe	34
Tableau n°11 : Débits des flux par sous bassin sur le Calavon.....	38
Tableau n°12 : Débits caractéristiques influencés du Calavon	39
Tableau n°13 : Débits moyens mensuels influencés du Calavon.....	41
Tableau n°14 : Débits caractéristiques influencés à la station de Coste-Raste sur la période 1978 ó 2010	45
Tableau n°15 : Débits caractéristiques influencés à la station d'Oppède sur la période 1996 - 2010.....	47

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Illustration n°1 : Synoptique des différents modules utilisés pour la simulation des débits	16
Illustration n°2 : Détails de la chaîne de calcul du modèle hydrologique ATHYS.....	18
Illustration n°3 : Fonctionnement du modèle ATHYS (source : IRD).....	19
Illustration n°4 : Exemple de carte des altitudes	20
Illustration n°5 : Localisation des stations pluviométriques	21
Illustration n°6: Débits observés influencés et simulés non influencés du Calavon à Coste-Raste pour l'année 2009 (année moyenne en termes d'hydrologie et de précipitations).....	24
Illustration n°7: Débits moyens mensuels simulés du Calavon à Coste-Raste sur la période 1968-2008 sans l'influence des prélèvements/restitutions et de la nappe d'accompagnement.....	25
Illustration n°8: Débits moyens mensuels simulés du Calavon à Oppède sur la période 1996-2010 sans l'influence des prélèvements/restitutions et de la nappe d'accompagnement.....	26
Illustration n°9: Synoptique du modèle hydrogéologique des échanges nappes-rivières	27
Illustration n°10: Débits moyens mensuels non influencés sur le Calavon (1978 à 2010).....	31
Illustration n°11: Comparaison des volumes naturels écoulés en année moyenne et en année sèche sur le BV4 (Les Bégudes).....	34
Illustration n°12: Débits moyens mensuels influencés et naturels en août sur le Calavon	40
Illustration n°13: Débits moyens mensuels observés et simulés à Coste-Raste sur la période 1978 - 2010	42
Illustration n°14: Débits moyens mensuels observés et simulés à Coste-Raste sur la période 1978 à 2010 (zoom sur la période d'étiage)	43
Illustration n°15 : Débits moyens mensuels observés et simulés à la station d'Oppède sur la période 1998 - 2010	44
Illustration n°16: Débits moyens mensuels observés et simulés à la station d'Oppède sur la période 1998 à 2010 pour les mois de juillet à octobre	45
Illustration n°17 : Comparaison modules influencés observés et modules simulés à la station de Coste-Raste.....	46
Illustration n°18 : Comparaison modules influencés observés et modules simulés à la station d'Oppède	47
Illustration n°19 : Comparaison des débits moyens influencés simulés et observés du mois d'août à la station d'Oppède entre 1996 et 2010	48
Illustration n°20 : Comparaison des VCN10 influencés simulés et observés à la station d'Oppède entre 1996 et 2010.....	49

Illustration n°21 : Comparaison des débits reconstitués et des jaugeages pour le mois de août 51

PRÉAMBULE

Le Bureau d'étude CEREG Ingénierie a été missionné pour réaliser *l'étude de détermination des volumes prélevables* sur le bassin versant du Calavon. 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 prélevés sur le bassin versant sans mettre en péril la vie aquatique, les besoins en eau potable
- proposer des outils de gestion et des pistes d'amélioration des situations problématiques.

L'étude est décomposée en 6 phases :

- **Phase 1 : Un diagnostic de la situation actuelle et un recueil de données complémentaires** par une reconnaissance de terrain et analyse des données disponibles ;
- **Phase 2 : Une caractérisation et une quantification des ressources en eau** à partir des données climatologiques et hydrométriques ;
- **Phase 3 : Un bilan des flux (prélèvements, transferts d'eau et rejets)**. Cette phase est réalisée par analyse des données disponibles et enquêtes auprès des usagers de l'eau ;
- **Phase 4 : L'évaluation des pressions et des impacts des prélèvements** à l'aide d'une modélisation hydrologique ;
- **Phase 5 : La détermination des débits minimums biologiques** à l'aide de la méthode ESTIMHAB ;
- **Phase 6 : La détermination des volumes prélevables et des débits objectifs d'étiage** par croisement de la ressource disponible et des besoins ;

Le présent rapport traite de la phase 3 de cette étude.

A. PRESENTATION DE L'ETUDE

A.I ELEMENTS DE CONTEXTE

❑ *Le bassin versant du Calavon - Coulon*

Le bassin versant du Calavon est situé sur dans la région Provence Alpes Cote d'Azur au niveau de deux départements : le Vaucluse, les Alpes de Haute Provence.

Cinquante et une communes sont situées en totalité ou partiellement sur ce bassin versant.

Le Calavon, ou Coulon sur sa partie aval, est un cours d'eau méditerranéen marqué par des crues violentes et des étiages sévères. Il draine un bassin versant topographique de près de 995 km². Près de 40% du bassin versant (Nord) est karstique favorisant l'infiltration des eaux vers un exutoire à l'extérieur du bassin versant. En plus des phénomènes naturels climatiques et géologiques (karst), les prélèvements aggravent les étiages naturels du Calavon et de ses affluents.

Le réseau hydrographique du Calavon représente une longueur de 84 km entre sa source « officielle » sur la commune de Banon (04) et la confluence avec la Durance au droit de la commune de Cavaillon (84). Ses principaux affluents sont d'amont en aval :

- Le Grand Valat et l'Enchrême en rive gauche ;
- La Dôa, La Riaille d'Apt, l'Urbane, l'Imergue et la Sénancole en rive droite.

❑ *Contexte hydrologique et climatique du bassin versant du Calavon*

Le Calavon présente, sur la majeure partie de son linéaire, des étiages très sévères avec des débits spécifiques voisins de 0.05 l/s/km² (Stations hydrométriques Coste-Raste et Oppède - SPC Grand Delta). Ces valeurs s'expliquent par la conjonction de trois phénomènes :

- La rigueur du climat méditerranéen avec des périodes estivales chaudes et sèches ;
- Des pertes naturelles importantes vers le sous sol karstique. Le fonctionnement hydrologique du bassin du Calavon est largement influencé par la géologie et en particulier par le système karstique de Fontaine-de-Vaucluse qui capte, par infiltration, les précipitations tombant sur la partie Nord du Bassin. En effet, le bassin versant « effectif » du Calavon ne représente qu'environ 600 km² alors que le bassin versant topographique s'étend sur environ 995 km².
- Des prélèvements qui accélèrent le processus de tarissement et ralentissent le retour en régime normal.

Compte tenu de la rigueur des étiages naturels sur le Calavon, les consommateurs d'eau ont eu recours, dès le 12^{ème} siècle pour l'irrigation gravitaire sur le secteur cavaillonais, à des transferts d'eau provenant de la Durance (près de 4 m³/s en étiage) pour divers usages :

- Sur le bas Calavon, l'irrigation à partir des canaux gravitaires à l'aval de Robion dont les rejets réalimentent le cours d'eau jusqu'à la Durance. Ce secteur est donc le seul à ne pas souffrir des étiages sauf lorsque la mise en chômage des canaux se conjugue avec un hiver sec.

- Sur le moyen Calavon, l'irrigation à partir des réseaux sous pression de la SCP. En raison de l'inefficacité des techniques d'irrigation, l'influence directe sur les ressources du Calavon est limitée.
- Sur une grande partie du bassin versant, les transferts d'eau de la Durance servent à l'alimentation en eau potable grâce aux syndicats Durance-Albion et Durance-Ventoux.
- Malgré les apports d'eau extérieurs, la situation sur le Haut Calavon est tendue (besoins agricoles avec des prélèvements en nappe et en rivière aggravant les étiages naturels).

□ *Contexte réglementaire*

Dans son programme de mesures (PDM) 2010 à 2015 pour l'ensemble du linéaire du Calavon, le SDAGE Rhône Méditerranée a défini le « **déséquilibre quantitatif** » comme problème à traiter avec notamment les mesures suivantes à mettre en œuvre :

- Déterminer et suivre l'équilibre quantitatif des cours d'eau ;
- Etablir et adapter des protocoles et des règles de partage de l'eau ;
- Améliorer les équipements de prélèvements et de distribution ainsi que leurs utilisations ;
- Reconnecter les annexes aquatiques et milieux humides au lit majeur et restaurer leur espace fonctionnel.

« **Promouvoir le retour à un débit d'étiage naturel non influencé par les prélèvements dans le but de restituer au cours d'eau sa valeur patrimoniale tout en préservant les usages actuels** » est, à l'échelle locale également, le premier objectif du SAGE du Calavon (approuvé en 2001 et actuellement en cours de révision).

Ces 10 dernières années ont montré que la ressource en eau et sa mobilisation atteignent une limite. Les outils de gestion de crise que sont les arrêtés sécheresse, réservés théoriquement aux épisodes climatiques exceptionnels, sont devenus des outils de gestion courante des ressources en déficits chroniques.

Au vu des restrictions d'usages répétées, le bassin du Calavon a ainsi été classé en secteurs déficitaires en eau avec un objectif prioritaire de retour à l'équilibre entre l'offre et la demande en eau.

Pour cela, un plan national de gestion de la rareté de la ressource ainsi que la loi sur l'eau de décembre 2006 (LEMA) recommandent différentes actions, dans laquelle s'inscrivent des études de connaissance des volumes maximums prélevables.

La Circulaire 17-2009 du 30 juin 2008 fixe les objectifs généraux pour la réduction des déficits quantitatifs observés ces dernières années et la gestion collective de l'irrigation :

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

Pour atteindre ces objectifs, 3 grandes étapes sont proposées:

- Etape 1 : La détermination des volumes maximums prélevables à l'échelle du bassin versant tous usages confondus. 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 usagers en vue de répartir les volumes prélevables ;
- Etape 3 : La mise en place «éventuelle 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.

Ces phénomènes pourraient se traduire par 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.

A.II CONTENU DU RAPPORT

L'objectif de l'étude est la détermination des volumes maximums prélevables sur le bassin versant du Calavon. Comme indiqué dans le préambule ce rapport correspond à la phase 4 de l'étude : La quantification de la ressource disponible à l'aide d'une modélisation hydrologique, l'évaluation des pressions et les impacts des prélèvements.

A.III METHODOLOGIE GENERALE DE LA PHASE 4

La phase 4 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 naturels reconstitués aux points nodaux du bassin versant. Il convient donc de reconstituer au mieux les débits du Calavon et de ses affluents.

Les débits naturels reconstitués sont les seuls à être utilisés pour déterminer les volumes prélevables. Dans la phase 4, les prélèvements et les restitutions sont pris en compte mais uniquement dans le but de valider le modèle par rapport aux données disponibles qui sont, par nature, influencés par ces facteurs.

Cette phase se base sur l'analyse des données météorologiques, débitmétriques et hydrogéologiques existantes sur le bassin réalisée dans le cadre de la phase 1 & 2. Cette étape primordiale a permis de comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin et de choisir les outils de calcul les plus pertinents pour caractériser l'état naturel.

A partir de cette première analyse, des outils de calcul (modèles et feuille de calculs) ont été mis en œuvre sur le bassin versant du Calavon. Ils ont été adaptés au contexte local du bassin versant : pluviométries, occupation des sols, caractéristiques de la nappe alluviale, pertes karstiques

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 **32 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.

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 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 les objectifs de débit issus des débits biologiques (phase 5).

La prise en compte des prélèvements et restitutions permet une validation du modèle et de ses paramètres pour reproduire les débits naturels.

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, en phase 6, les volumes prélevables en chacun des points nécessaires.

B. MODELISATION DES DEBITS NATURELS

B.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.

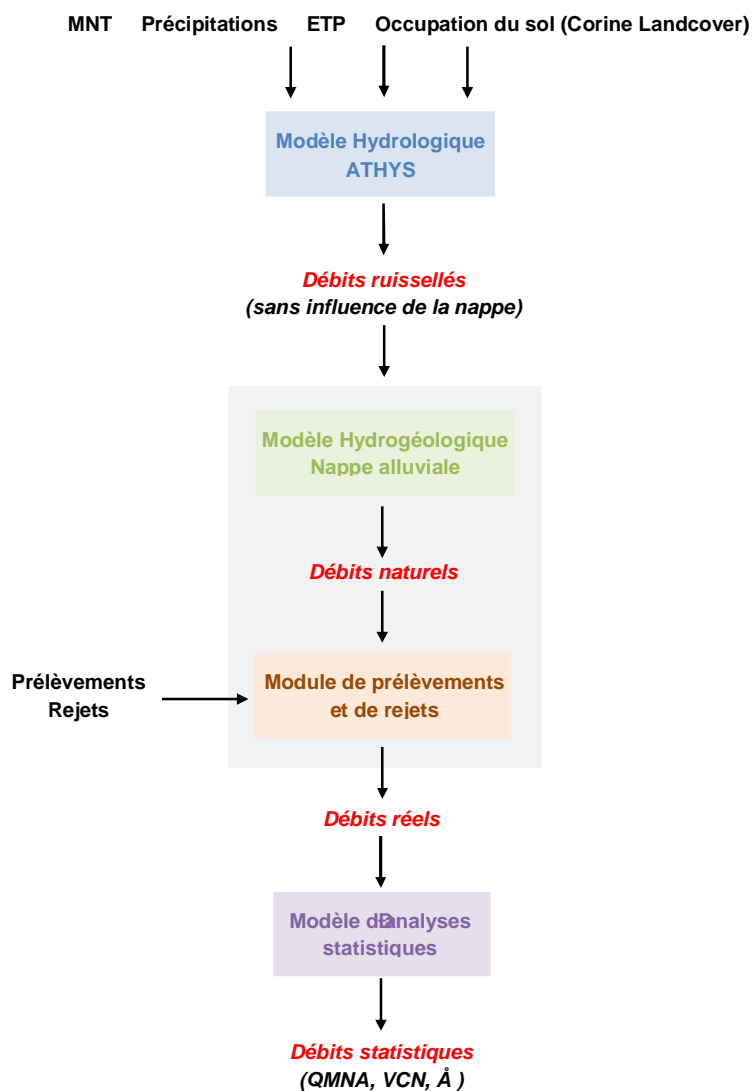


Illustration n°1 : Synoptique des différents modules utilisés pour la simulation des débits

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 ...

B.II MODELISATION HYDROLOGIQUE EN SITUATION NATURELLE

B.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

A partir des pluies efficaces, la fonction de production TopModel définit 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.

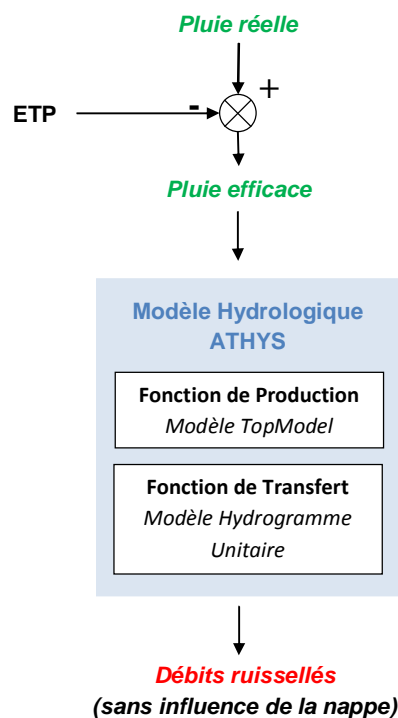


Illustration n°2 : Détails de la chaîne de calcul du modèle hydrologique ATHYS

B.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 m²). 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.

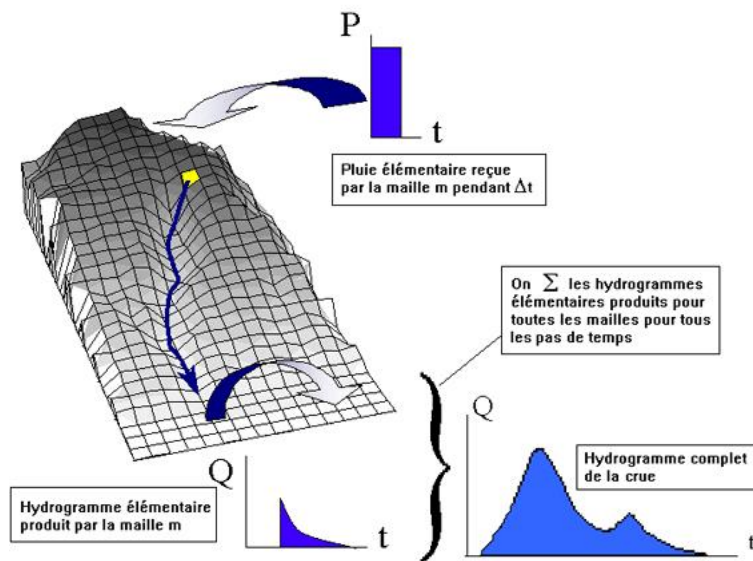


Illustration n°3 : Fonctionnement du modèle ATHYS (source : IRD)

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 ;

B.II.3 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 de précipitation réelle. On parle alors de pluie efficace.

B.II.4 Période de simulation

Le logiciel est utilisé pour simuler les débits de 1978 à 2010 avec un calage par calcul du débit au droit des stations hydrométriques de Coste-Raste et Oppède ainsi qu'aux différents points de jaugeages réalisés par le PNRL et CEREG Ingénierie.

La sortie du modèle est un débit journalier entre 1978 et 2010 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.

B.II.5 Traitement des données

□ *Traitement des données géographiques*

➤ *Planche n°2 : Reliefs du bassin versant du Calavon*

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 250 m. L'assemblage des ces points permet de reconstituer la topographie du site (illustration ci-dessous). Le logiciel traite alors ces données pour obtenir le réseau hydrographique et les bassins versants.

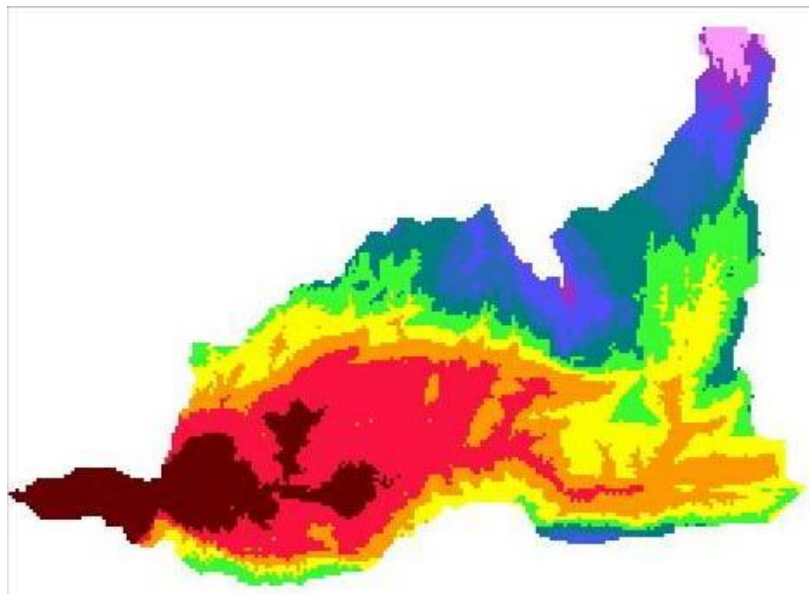


Illustration n°4 : Exemple de carte des altitudes

□ *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 du Calavon, deux classes de production différentes ont été identifiées à partir de l'occupation du sol (CORINE landcover) et de la topographie (pentes) (cf. illustration suivante) :

- Zone de faible ruissellement qui correspond aux plaines avec de faibles pentes principalement situées au Sud d'Apt ;
- Zone de fort ruissellement correspondant aux zones de sols nus et de pelouse et/ou de fortes pentes principalement sur les reliefs au Nord et au Sud du bassin versant du Calavon.

❑ *Traitement des données météorologiques*

➤ *Planche n°10 : Localisation des stations météorologiques*

Pour le calcul hydrologique nous avons utilisé les données météorologiques de 11 postes pluviométriques :

- Banon et Saint-Christol représentatives des zones d'altitudes du Nord du bassin versant (800 m) et du plateau d'Albion ;
- Reillanne et Viens représentatives de l'Est du bassin versant et de la zone du Haut -Calavon ;
- Castellet et Bonnieux représentatives du versant Nord du Luberon ;
- Cabrières d'Avignon, Apt, Murs et Saint-Saturnin-les-Apt représentatives de la vallée du moyen Calavon;
- Cavaillon représentative des conditions de la vallée de la Durance.

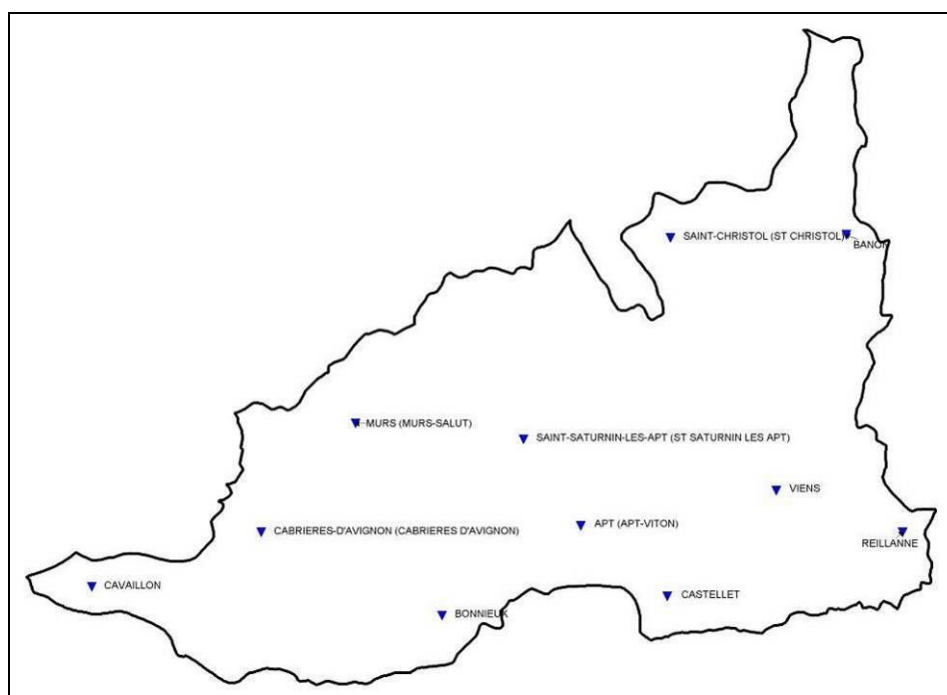


Illustration n°5 : Localisation des stations pluviométriques

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 linéaires 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.
- 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.

Poste	Altitude (m NGF)	Types	Périodes	Périodes reconstituées
Apt	240	Précipitations	1976 - 2010	
Banon	780	Précipitations	1976 - 2010	
Bonnieux	250	Précipitations	1981 - 2010	1978 - 1980
Cabrières-d'Avignon	140	Précipitations	1985 - 2010	1978 - 1985
Castellet	440	Précipitations	1997 - 2010	1978 - 1996
Cavaillon	80	Précipitations	1976 - 2010	
Murs	500	Précipitations	1997 - 2010	
Reillanne	500	Précipitations	1995 - 2006	1978 - 1994
Saint-Christol	840	Précipitations	1997 - 2010	1978 - 1994
Saint-Saturnin-les-Apt	390	Précipitations	1997 - 2010	1978 - 1994
Viens	620	Précipitations	1976 - 2010	

Tableau n°1 : Données pluviométriques reconstituées

□ 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 ²)	Importance
Apt	74.6	7.4 %
Banon	131.3	13.2 %
Reillanne	49.8	5.0 %
Bonnieux	90.5	9.1 %
Cabrières d'Avignon	105.5	10.6 %
Castellet	53.7	5.4 %
Cavaillon	30.8	3.1 %
Murs	102.5	10.3 %
Saint-Christol	77.6	7.8 %
Saint-Saturnin-lès-Apt	140.3	14.1 %
Viens	140.3	14.1 %

Tableau n°2 : Influence comparée des stations pluviométriques sur le bassin versant du Calavon

B.II.6 Calage intermédiaire

Dans cette phase de modélisation hydrologique en situation naturelle sous ATHYS, les débits obtenus ne tiennent pas compte de l'influence des prélèvements/restitutions et de l'influence de la nappe d'accompagnement. Dans cette étape, il est donc impossible de comparer directement les débits observés et ceux qui sont modélisés.

Le calage réalisé ici est donc une étape intermédiaire. Il permet donc d'obtenir une tendance qui devra être validée ultérieurement lorsque le modèle prendra en compte les prélèvements et l'influence de la nappe d'accompagnement.

Sachant que l'on dispose de mesures de débit sur le Calavon aux stations de Coste-Raste et d'Oppède, le modèle ATHYS a été utilisé sur la période 1978 à 2010 pour réaliser :

- Un calage sur les débits mesurés du Calavon à Coste-Raste (374 km² dont 183 km² effectif environ) sur la période 1978 - 1988 ;
- Un calage sur les débits mesurés du Calavon à Oppède (860 km² dont 450 km² effectif environ) sur la période 1998 - 2010 ;
- Une validation sur les deux stations sur l'ensemble des périodes disponibles pour chacune des stations (1978 ó 2010 pour Coste ó Raste ; 1996 ó 2010 pour Oppède).

□ *Calage des paramètres sur la station de Coste-Raste (BV5)*

Le calage à 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 m³/s.

Compte tenu que deux 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 du Calavon.

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

Paramètres		Classe de production 1	Classe de production 2
Fonction de production	<i>STO [mm]</i>	45	5
	<i>INF [mm.h⁻¹]</i>	10	3.3
	<i>F [m⁻¹]</i>	40	20.2
	<i>Ds [j⁻¹]</i>	0.1	0.55
Fonction de Transfert	<i>V0 [m.s⁻¹]</i>	1.25	
	<i>Alfa [ad]</i>	0.5	
	<i>K0 [ad]</i>	0.1	
	<i>K1 [mn]</i>	0.9	

Tableau n°3 : Valeurs des paramètres de modélisation après calage

Le graphique ci-dessous montre l'hydrogramme simulé (rouge) et mesuré (bleu).

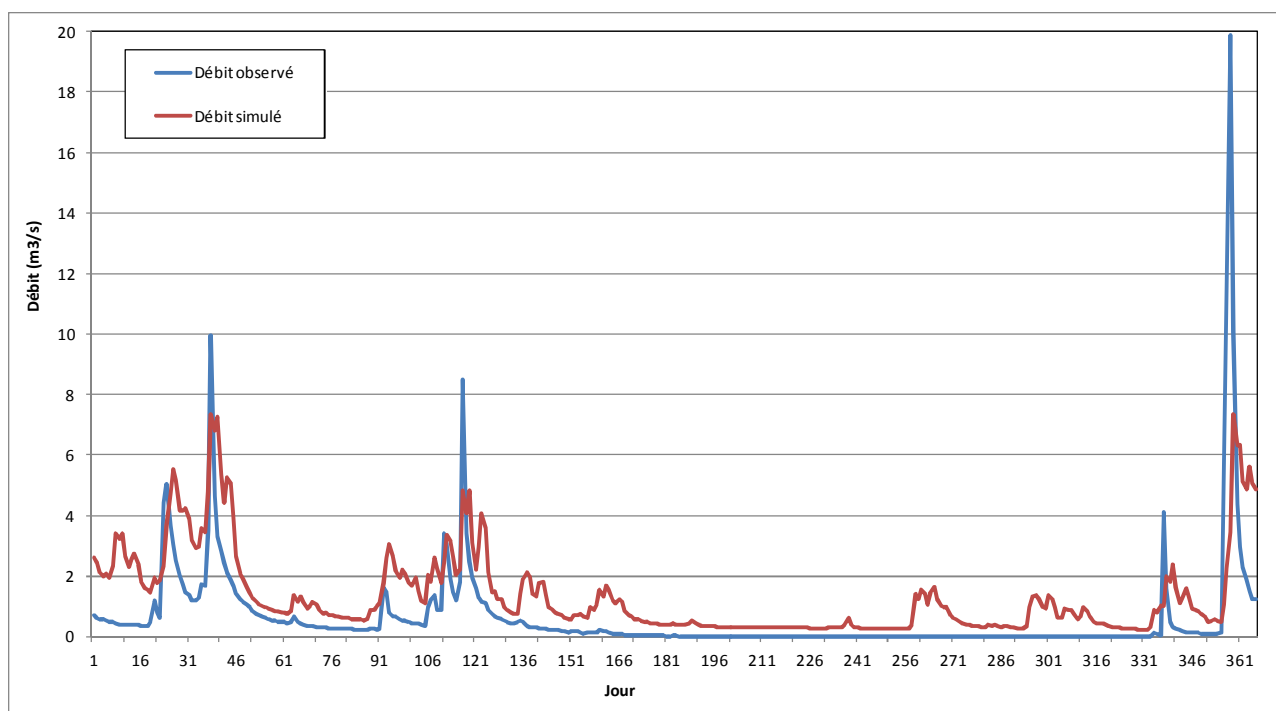


Illustration n°6: Débits observés influencés et simulés non influencés du Calavon à Coste-Raste pour l'année 2009 (année moyenne en termes d'hydrologie et de précipitations)

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 ;
- 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 ;
- De la présence éventuelle de la nappe d'accompagnement.

Le tableau ci-dessous indique les valeurs simulées par ATHYS sans l'influence des prélèvements/restitutions et de la nappe d'accompagnement.

	Simulé (sans prélèvements ni influence de la nappe d'accompagnement)	Observé (influencé)
<i>Module (l/s)</i>	889	756
<i>Débit mensuel août (l/s)</i>	171	0
<i>Débit mensuel minimal de période de retour 5 ans (QMNA5) (l/s)</i>	85	1

Tableau n°4 : Caractéristiques des débits simulés non influencés du Calavon à Coste-Raste entre 1978 et 2010 par rapport aux débits observés

En comparant les débits moyens mensuels (cf. illustration ci-dessous), les valeurs observées (influencés) et simulées non influencés possèdent la même dynamique saisonnière.

Les écarts, de l'ordre de 100 à 150 l/s, peuvent s'expliquer par la non prise en compte des prélèvements et des interactions entre le Calavon et les eaux souterraines ou la nappe d'accompagnement.

Afin de valider la modélisation hydrologique mise en place, il conviendra de définir si la prise en compte des pertes karstiques ou des interactions avec la nappe d'accompagnement (cf. paragraphe B.III) et les prélèvements / restitutions (cf. paragraphe C) peuvent être de cet ordre de grandeur.

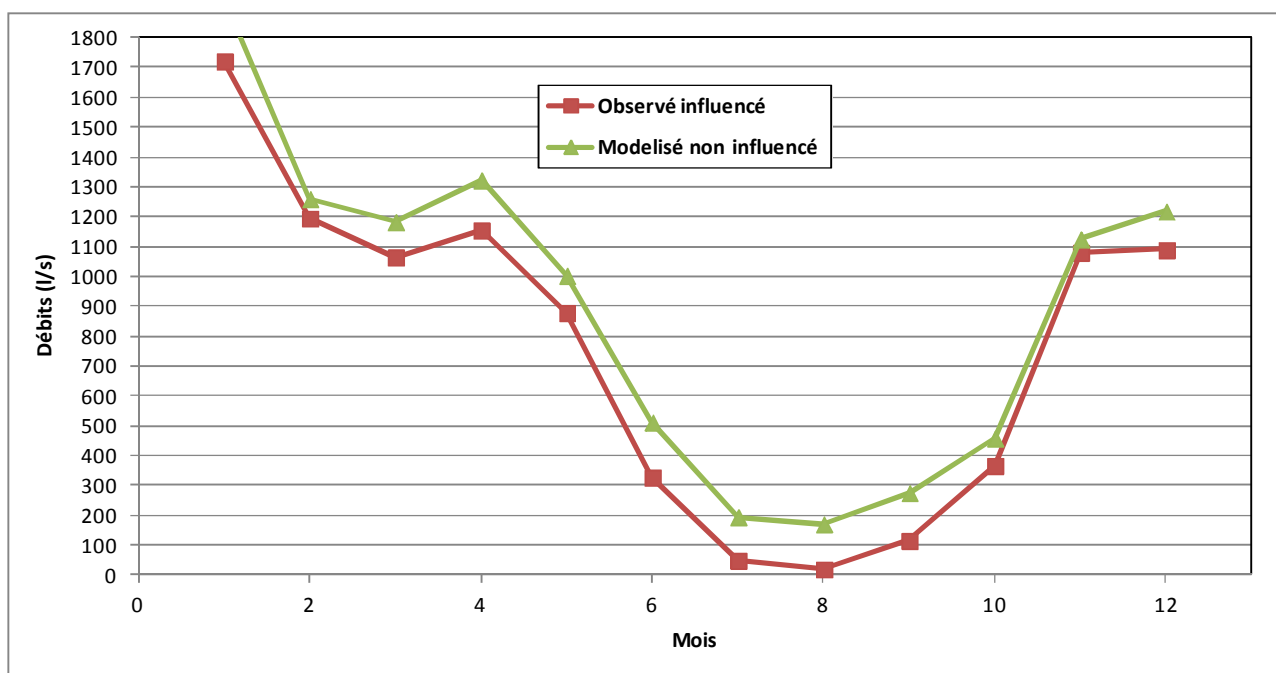


Illustration n°7: Débits moyens mensuels simulés du Calavon à Coste-Raste sur la période 1968-2008 sans l'influence des prélèvements/restitutions et de la nappe d'accompagnement

□ Calage des paramètres sur la station d'Oppède (BV11)

Le calage sur la station d'Oppède n'a pas engendré de modifications majeures du calage du modèle hydrologique et les valeurs des paramètres sont restées identiques pour les deux classes de production choisies préalablement.

Le tableau ci-dessous indique les valeurs simulées par ATHYS sans l'influence des prélèvements/restitutions et de la nappe d'accompagnement.

	Simulé (sans prélèvements ni influence de la nappe d'accompagnement)	Observé (influencé)
<i>Module (l/s)</i>	1 400	1 123
<i>Débit mensuel août (l/s)</i>	347	48
<i>Débit mensuel minimal de période de retour 5 ans (QMNA5) (l/s)</i>	173	2

Tableau n°5 : Caractéristiques des débits simulés non influencés du Calavon à Oppède entre 1996 et 2010 par rapport aux débits observés

En comparant les débits moyens mensuels (cf. illustration ci-dessous), les valeurs observées (influencés) et simulées non influencés possèdent la même dynamique saisonnière.

Les écarts, de l'ordre de 250 à 300 l/s, peuvent s'expliquer par la non prise en compte des prélèvements et des interactions entre le Calavon et les eaux souterraines ou la nappe d'accompagnement.

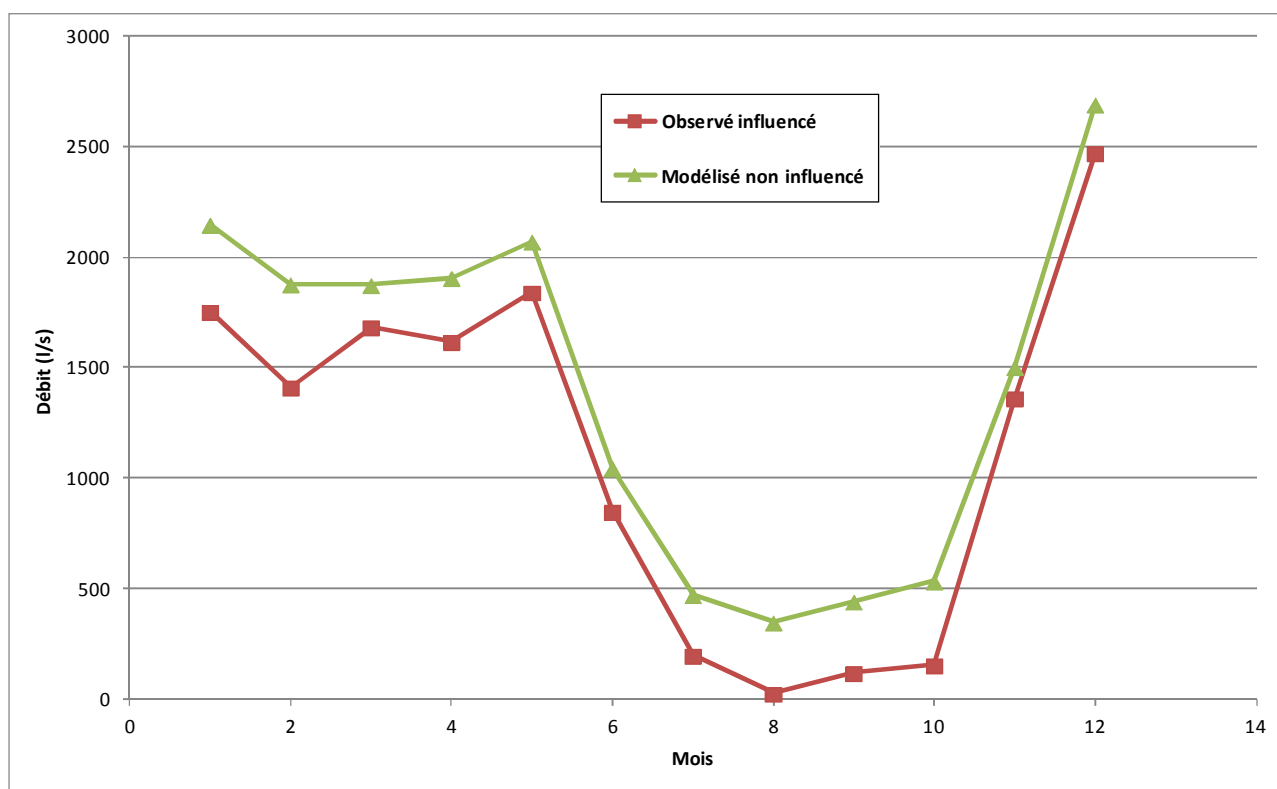


Illustration n°8: Débits moyens mensuels simulés du Calavon à Oppède sur la période 1996-2010 sans l'influence des prélèvements/restitutions et de la nappe d'accompagnement

Comme pour la station de Coste-Raste (BV5), il conviendra de définir si la prise en compte des pertes karstiques ou des interactions avec la nappe d'accompagnement (cf. paragraphe B.III) et les prélèvements / restitutions (cf. paragraphe C) peuvent être de cet ordre de grandeur.

B.III MODELE DE LA NAPPE D'ACCOMPAGNEMENT

B.III.1 Présentation du modèle

□ Généralités

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

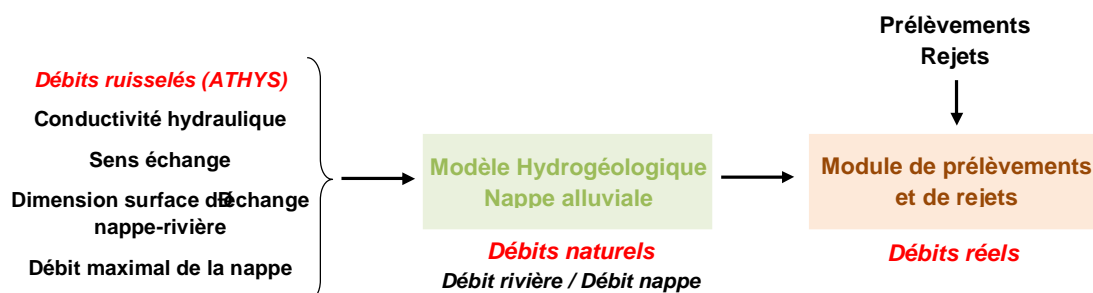


Illustration n°9: Synoptique du modèle hydrogéologique des échanges nappes-rivières

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 cohérents : 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'extérior 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 homogènes du point de vue hydrogéologique.

□ *Découpage en secteurs hydrogéologiques homogènes du Calavon*

A partir des éléments concernant les relations nappe/rievière (cf. phases 1 & 2), la nappe d'accompagnement du Calavon 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 d'accompagnement ont été prises en compte lors du découpage des sous-bassins versants du Calavon, les tronçons homogènes sont communs avec les sous bassins versants.

Toutes les données hydrogéologiques du modèle (cf. tableau ci-dessous) sont issues des données bibliographiques et des résultats des phases 1 & 2 notamment :

- La géométrie de la nappe d'accompagnement avec son extension latérale et son épaisseur. L'importance de la nappe d'accompagnement est variable d'amont en aval sur le Calavon avec une augmentation de sa puissance à l'aval de Robion ;
- Les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe d'accompagnement par tronçons : perméabilité, gradient de la nappe, débit maximum possible ;
- Les sens des échanges entre la nappe d'accompagnement et les cours d'eau avec la valeur « 1 » pour les échanges nappe-rivière et « -1 » pour les échanges rivière-nappe.

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.

En plus des interactions entre la nappe d'accompagnement et le cours d'eau, les débits de surface peuvent être impactés par des **résurgences ou des pertes ponctuelles issues d'aquifères plus profonds**. Ces interactions ont notamment été mises en évidence au niveau des Bégudes avec des résurgences au niveau de la nappe d'accompagnement et des pertes profondes entre le Rocher des Abeilles et l'amont d'Apt.

Compte tenu du caractère ponctuel de ces phénomènes, la modélisation hydrologique ne peut pas les prendre en compte correctement. Il convient donc de les localiser et de les quantifier afin de les intégrer

PARC NATUREL REGIONAL DU LUBERON - ETUDE DE DETERMINATION DES VOLUMES PRELEVABLES SUR LE BASSIN VERSANT DU CALAVON

Bassin versant	Nappe alluviale	Perméabilité Min / max (m/s)	Épaisseur (m)	Largeur (m)	Sens d'échange (1 ó nappe/rivière ; -1 ó rivière/nappe)	Débit maximum de la nappe (l/s)	Apports ponctuels ou pertes par bassin (l/s)	Remarques
BV1	Ø	-	-	-	-	-	Pertes ó 70 l/s	Pas de nappe
BV2	Calavon	$1.10^{-2} / 1.10^{-4}$	< 5	< 20	-1	10	-	Nappe d'accompagnement de faible extension
BV3	Calavon	$1.10^{-2} / 1.10^{-4}$	< 5	< 20	-1	10	-	Nappe d'accompagnement de faible extension
BV4	Calavon	$1.10^{-2} / 1.10^{-4}$	< 5	< 20	-1	10	Apports + 50 l/s	Apports ponctuels connus (Bégudes)
BV5	Calavon	$1.10^{-2} / 1.10^{-4}$	< 5	< 20	-1	10	Pertes ó 100 l/s	Pertes karstiques du secteur du Rocher des Abeilles
BV6	Calavon	$1.10^{-2} / 1.10^{-4}$	< 5	< 20	-1	10	Pertes ó 150 l/s	Pertes karstiques entre le Rocher des Abeilles et l'amont d'Apt
BV7	Calavon	$1.10^{-2} / 1.10^{-4}$	< 5	< 20	-1	20	Pertes ó 30 l/s	Elargissement de la nappe d'accompagnement à l'aval d'Apt
BV8	Calavon	$1.10^{-2} / 1.10^{-4}$	< 5	< 20	-1	20	Pertes ó 50 l/s	Pertes karstiques du secteur de Roquefure
BV9	Calavon	$1.10^{-3} / 1.10^{-5}$	< 5	< 20	-1	20	Apports + 50 l/s	Modélisé par le module de nappe alluviale Compléter par des apports ponctuels connus (Bégudes)
BV10	Calavon	$1.10^{-3} / 1.10^{-5}$	< 10	-	-	10	-	Nappe d'accompagnement de faible extension
BV11	Calavon	$1.10^{-3} / 1.10^{-5}$	< 10	-	-1	60	-	Elargissement de la nappe d'accompagnement avec augmentation de sa capacité
BV12	Coulon	$1.10^{-2} / 5.10^{-3}$	> 20	> km	+1	Indéterminé	Apports + 100 l/s	Aval de Robion ; Nappe de la basse vallée de la Durance

Tableau n°6 : Secteurs homogènes par sous bassin de nappe d'accompagnement sur le bassin du Calavon

B.III.2 Calage du modèle de la nappe d'accompagnement

Le calage du module de nappe a été réalisé sans prise en compte des prélèvements et des restitutions. Il a consisté à caler les débits de surface et souterrains en fonction des caractéristiques d'écoulement de la nappe d'accompagnement.

En effet, un débit maximum d'écoulement de la nappe estimé trop important, peut entraîner un assèchement total des débits de surface, dans des secteurs où ce phénomène est inconnu. A contrario un débit maximum de la nappe trop faible va maximiser les débits de surface.

Cette étape a donc consisté à ajuster les paramètres d'écoulement de la nappe, afin de caler les débits de surface par rapport aux campagnes de jaugeage disponibles. Seules les campagnes de jaugeage ayant été intégralement effectuées sur la même journée ont été retenues.

B.III.3 Résultats de la reconstitution des débits naturels

Les résultats présentés par la suite correspondent aux débits non influencés par les prélèvements ou naturels modélisés sur la période 1978 - 2010. Ces débits tiennent compte de l'influence des nappes souterraines et notamment de l'importance de la nappe d'accompagnement des cours d'eau.

Ces débits ne pourront cependant être comparés aux données observées que lorsque les prélèvements et les restitutions auront été pris en compte sur le bassin versant (cf. paragraphe C).

Cette comparaison des résultats de reconstitution des débits par rapport aux observations sera réalisée par la suite dans la partie C.II.

□ Analyse des débits caractéristiques

Le tableau suivant rassemble les débits caractéristiques pour chaque sous bassin versant en sortie du module nappe sans prise en compte des prélèvements (non influencé).

Même si les modules sont importants, l'hydrologie naturelle du Calavon est marquée par des étiages très sévères observables au niveau des QMNA5, VCN10 et VCN3.

En effet, l'ensemble des stations possède, en moyenne, un débit spécifique inférieur à 0.1 l/s/km² pour le QMNA5 (rapport entre la valeur du QMNA5 et la surface du bassin versant) ce qui est comparable au bassin versant du Largue voisin mais reste très inférieurs à d'autres cours d'eau méditerranéen dont le débit spécifique pour le QMNA5 est compris entre 1 et 3 l/s/km² (Lez, Eygues).

Ces étiages sévères, aboutissant même à des assecs en situation naturelle comme sur les bassins BV6 et BV7, trouvent leurs origines dans la présence du massif karstique au Nord alimentant Fontaine de Vaucluse en détournant les eaux de ruissellement du Calavon.

Au niveau de l'affluent de Enchrême, la participation aux débits d'étiage est importante avec 8 l/s en QMNA5 à la confluence avec le Calavon (38 l/s) soit 20% du débit alors que la superficie du sous bassin ne représente que 10% de celle du Calavon à ce niveau.

La participation de l'Imergue aux débits d'étiage du Calavon est conforme avec la surface du bassin collecté.

PARC NATUREL REGIONAL DU LUBERON - ETUDE DE DETERMINATION DES VOLUMES PRELEVABLES SUR LE BASSIN VERSANT DU CALAVON

BV	Cours d'eau	Surface BV (km ²)	PK (km)	Module (l/s)	Médian (l/s)	QMNA5 (l/s)	VCN10 (l/s)	VCN3 (l/s)
1	Calavon	229	5.0	671	141	28	17	11
2		308	9.2	703	175	38	23	15
3	Enchrême	39	-	76	27	8	5	3
4	Calavon	356	15	824	254	71	43	29
5		375	18.6	769	169	26	15	10
6		475	23.5	749	100	0	0	0
7		578	32.5	716	101	0	0	0
8		676	37.5	692	145	15	9	6
9		729	44.5	825	235	52	31	21
10	Imergue	112	-	27	17	7	4	3
11	Calavon	965	57.0	1068	236	4	2	1
12		997	70.0	1215	356	59	36	24

Tableau n°7 : Débits caractéristiques non influencés du Calavon en sortie du module de nappe d'accompagnement

Le graphique suivant présente les débits moyens mensuels non influencés sur le Calavon pour les mois de mai à août.

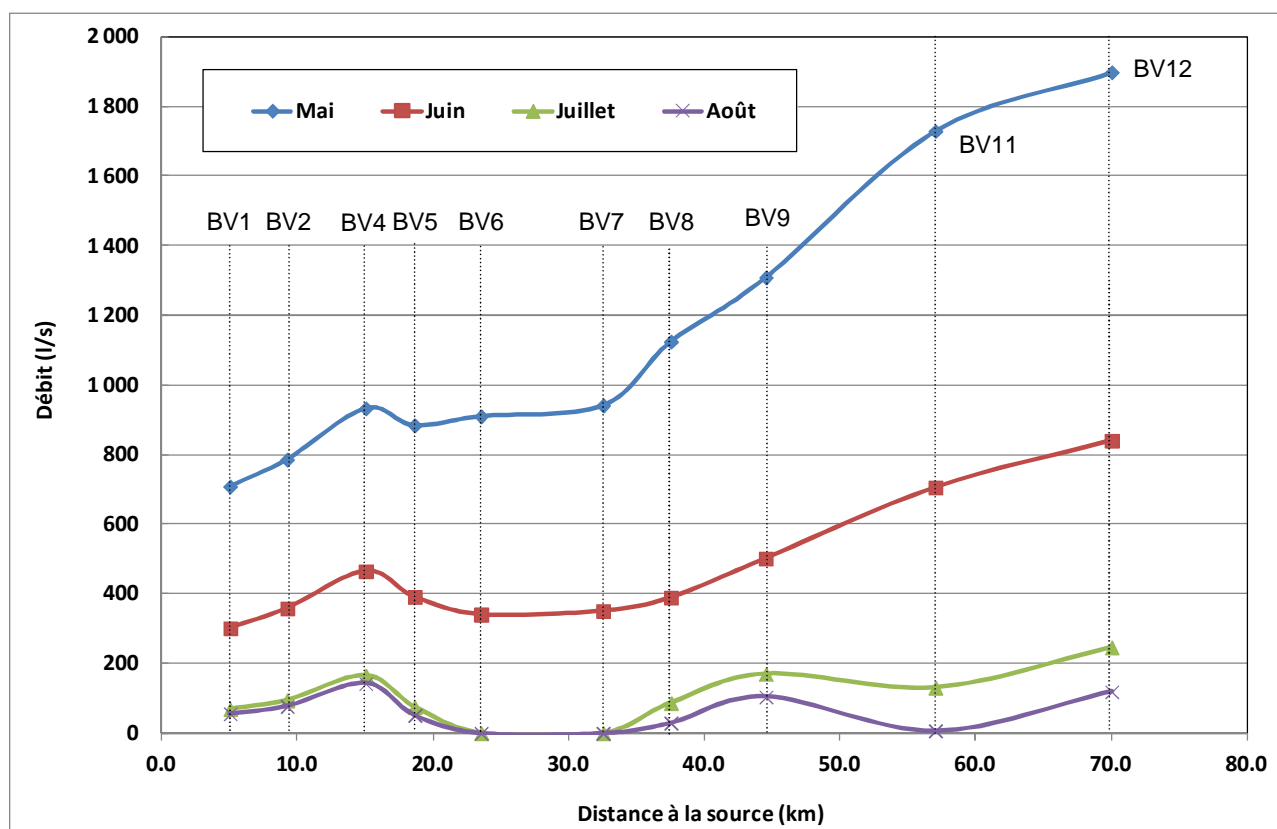


Illustration n°10: Débits moyens mensuels non influencés sur le Calavon (1978 à 2010)

BV	Cours d'eau	Surface BV (km ²)	PK (km)	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1	Calavon	229	5.0	1 577	911	940	1 003	709	302	69	56	136	301	1 022	1 025
2		308	9.2	1 581	982	965	1 100	786	359	95	77	170	324	977	1 026
3	Encrême	39	-	142	94	97	126	87	46	17	17	30	48	113	98
4	Calavon	356	15	1 816	1 177	1 103	1 236	933	466	166	143	242	416	1 048	1 137
5		375	18.6	1 814	1 141	1 063	1 203	884	392	75	51	156	339	1 005	1 099
6		475	23.5	1 881	1 211	1 066	1 269	910	341	0	0	59	274	944	1 036
7		578	32.5	1 732	1 171	1 026	1 277	942	351	0	0	53	276	882	887
8		676	37.5	1 546	1 128	989	973	1 125	389	86	29	74	213	943	804
9		729	44.5	1 728	1 305	1 134	1 123	1 310	502	170	104	164	316	1 089	953
10	Imergue	112	-	31	30	38	38	35	20	16	17	15	20	33	35
11	Calavon	965	57.0	1 806	1 537	1 533	1 565	1 730	706	131	7	102	193	1 162	2 350
12		997	70.0	1 977	1 699	1 695	1 728	1 899	841	246	119	216	310	1 312	2 539

Tableau n°8 : Débits moyens mensuels non influencés (en l/s) sur le Calavon en sortie du module nappe

D'une manière générale, les débits moyens mensuels augmentent avec la distance à la source jusqu'au BV4 au niveau des Bégudes. Ces apports sont liés aux formations tertiaires et aux résurgences profondes comme sur les Bégudes.

Puis jusqu'au BV6, plusieurs pertes liées aux affleurements karstiques (Rocher des Abeilles) entraînent une forte baisse des débits voire même la création d'assecs au cours des mois de juillet et août.

Au BV7, les affleurements karstiques ne sont plus présents mais la faiblesse des apports, notamment des affluents comme la Doâ ou la Riaille d'Apt, ne permet pas de relever les débits.

A partir du BV7, on constate, au moins en début d'étiage, une augmentation croissante des débits jusqu'à l'exutoire. Ces apports sont liés aux formations tertiaires, aux nappes perchées et à la contribution de la nappe d'accompagnement du Calavon.

Au cours de l'étiage, on observe une baisse générale des débits et une diminution de la pente des courbes traduisant des contributions moins importantes notamment des nappes perchées ou de la nappe d'accompagnement du Calavon.

Au niveau du BV11, la baisse observée des débits de surface est liée à une augmentation de la capacité de la nappe d'accompagnement du Calavon à partir de ces secteurs ce qui facilite donc la circulation de l'eau dans les graviers plutôt qu'en surface.

□ *Analyse des volumes naturels écoulés*

Les tableaux suivant présentent une synthèse des volumes naturels (non influencés) écoulés en plusieurs sous bassins versants pour le Calavon et pour l'Enchrême (BV3) en sortie du module nappe calé.

Le volume naturel écoulé est observé en moyenne annuelle et en moyenne mensuelle pour les mois de juin à septembre. **Le volume naturel écoulé le plus faible est constaté au mois d'août.**

	Volume écoulé annuel moyen (Mm ³)	Juin		Juillet		Août	
		Volume écoulé moyen (Mm ³)	%	Volume écoulé moyen (Mm ³)	%	Volume écoulé moyen (Mm ³)	%
Enchrême (BV3)	2.4	0.1	5.0	< 0.05	1.9	< 0.05	1.9
Calavon (BV4)	26.0	1.2	4.6	0.5	1.7	0.4	1.5
Calavon (BV7)	22.6	0.9	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Calavon (BV11)	33.7	1.8	5.4	0.4	1.0	< 0.02	0.1
Calavon (BV12)	38.3	2.2	5.7	0.7	1.7	0.3	0.8

Tableau n°9 : Volumes naturels écoulés moyens du Calavon en sortie du module nappe

Les volumes écoulés en année sèche correspondent aux volumes minimums mensuels de période de retour quinquennale.

Au cours des mois de la période estivale, les volumes minimums mensuels écoulés de période de retour quinquennale sont environ deux fois moins importants que les volumes moyens écoulés.

	Volume écoulé annuel en année sèche (Mm ³)	Juin	Juillet	Août
		Volume écoulé en années sèches (Mm ³)	Volume écoulé en années sèches (Mm ³)	Volume écoulé en années sèches (Mm ³)
Encrême (BV3)	1.20	0.50	0.02	0.02
Calavon (BV4)	12.80	0.56	0.23	0.20
Calavon (BV7)	11.00	0.42	0.00	0.00
Calavon (BV11)	16.50	0.85	0.20	0.01
Calavon (BV12)	19.00	1.00	0.33	0.16

Tableau n°10 : Volumes naturels écoulés du Calavon en année sèche en sortie du module nappe

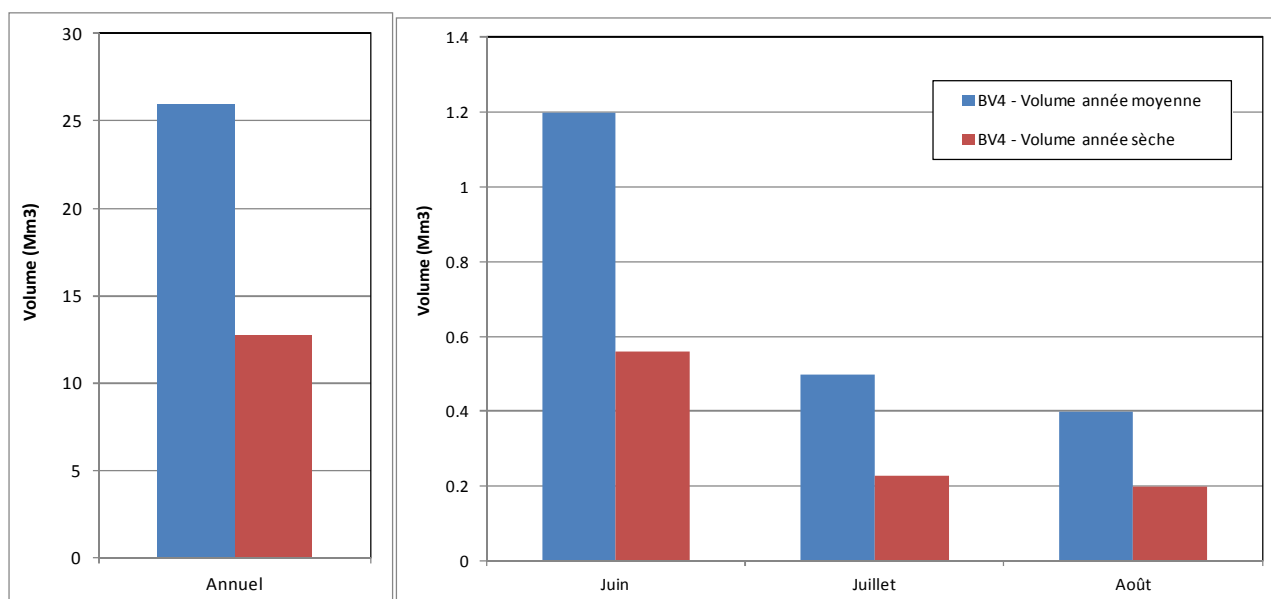


Illustration n°11: Comparaison des volumes naturels écoulés en année moyenne et en année sèche sur le BV4 (Les Bégudes)

Au niveau du BV4, les bilans des flux du mois de juillet (restitutions moins prélèvements), qui est celui où il y a le plus de prélèvements, est de - 200 000 m³ environ. L'impact des usages est donc deux fois inférieur au volume écoulé naturel en année normale. Toutefois, en année sèche, les usages sont du même ordre de grandeur que les volumes écoulés en année sèche (230 000 m³).

Sur la période d'étiage, les usages peuvent représenter localement une part très importante des écoulements naturels.

En conclusion :

- **L'hydrologie naturelle du Calavon est marquée par des étiages très sévères observables au niveau des QMNA5, VCN10 et VCN3. L'ensemble du linéaire du Calavon possède un débit spécifique inférieur à 0.1 l/s/km² pour le QMNA5 ce qui est très inférieur aux autres cours d'eau méditerranéen ;**
- **En plus des ruissellements soustraits par le karst, on observe une baisse générale des débits au cours de l'étiage car les nappes perchées ou la nappe d'accompagnement du Calavon ne possèdent pas les réserves suffisantes pour soutenir les étiages ;**
- **Au cours des mois de la période estivale, les volumes minimums mensuels écoulés de période de retour quinquennale sont environ deux fois moins importants que les volumes moyens écoulés (respectivement 2.1 et 1.0 Mm³ pour le BV4 aux Bégudes et 3.2 et 1.5 Mm³ pour le BV12 à l'exutoire du bassin ;**
- **En plusieurs points du bassin versant du Calavon, les flux (restitutions moins prélèvements) sont du même ordre de grandeur que les volumes naturels écoulés en année sèche.**

C. MODELISATIONS DES DEBITS INFLUENCES

C.I MODELE DE PRELEVEMENTS ET RESTITUTIONS

Afin de prendre en compte l'impact des usages sur le fonctionnement hydrologique du bassin, un module prélèvements et restitutions a été créé afin d'affecter un bilan de flux (restitutions ó prélèvements) à chaque sous bassin correspondant. Lors de cette étape, plusieurs questions se posent notamment la localisation des prélèvements et des restitutions, ainsi que leur impact sur le débit des cours d'eau.

La prise en compte des prélèvements et des restitutions permet d'obtenir des débits réels à partir des débits naturels. Cette étape permet de valider la modélisation (comparaison avec les données mesurées) avant de définir les volumes prélevables en phase 6.

□ *Localisation des prélèvements / restitutions et prise en compte dans le modèle*

Suite à la caractérisation de l'ensemble des prélèvements et restitutions sur le bassin versant, ceux-ci ont été répartis sur chaque sous bassin en fonction du lieu de prélèvement ou de restitution.

La prise en compte et la localisation des prélèvements et restitutions s'est faite selon la méthodologie suivante :

- Les points de prélèvements avaient été géolocalisés, ou affectés par sous bassins versants pour les prélèvements domestiques par exemple, lors de la phase 3 de l'étude
- Les restitutions agricoles des structures individuelles ont été affectées au droit du point de prélèvement ;
- Les restitutions des stations d'épuration ont été localisées selon les informations du SATESE ;
- Les restitutions des structures individuelles d'épuration ont été localisées selon la répartition des habitations non connectées au réseau collectif ;
- Les restitutions des stations d'épuration ou des structures agricoles localisés dans la partie karstique du bassin n'ont pas été prises en compte dans le modèle ;
- Les restitutions des stations d'épuration à proximité des cours d'eau ont été considérées comme des contributions aux débits de surface alors que les restitutions des stations d'épuration plus éloignées ont été considérées comme des contributions aux écoulements de la nappe d'accompagnement.

□ *Conversion des volumes en débits*

La phase 3 de l'étude a permis d'établir un bilan des flux en volume à l'échelle mensuelle. Au cours de la phase de reconstitution du fonctionnement hydrologique du bassin, il est alors nécessaire de convertir ces volumes en débit journalier.

Pour ce faire, les hypothèses suivantes ont été retenues :

PARC NATUREL REGIONAL DU LUBERON - ETUDE DE DETERMINATION DES VOLUMES
PRELEVABLES SUR LE BASSIN VERSANT DU CALAVON

- Les prélèvements AEP en source sont considérés en continu sur 24 heures (débit en continu non régulé) ;
- Les prélèvements AEP en forage sont considérés à 12 heures sur la partie hivernale et 24 heures sur la partie estivale (consultation de la commune de Reillanne nous ayant signifié que le temps de pompage est plus long en période estivale ; *en attente de confirmation pour la CCPA mais il semblerait qu'on soit sur le même ordre de grandeur notamment aux Bégudes*) ;
- Les prélèvements agricoles individuels sont considérés sur 24 heures (échange avec un agriculteur dont le temps d'arrosage est proche de 20 heures ; le temps de pompage est dépendant du taux d'équipement de l'exploitation et de la surface à arroser) ;
- Le prélèvement agricole collectif (canaux) est considéré en continu ;
- Toutes les restitutions sont considérées en continu sur 24 heures.

Le tableau suivant présente le bilan des flux en débit par sous bassin des débits à l'échelle annuelle et en période d'étiage (juin à septembre).

Bassin	Cours d'eau	Flux annuel (l/s)	Flux annuel cumulé (l/s)	Fux étiage (juin à septembre) (l/s)	Fux étiage cumulé (juin à septembre) (l/s)
1	Calavon	5	5	7	7
2		6	11	-1	6
3	Enchrême	0	0	-4	-4
4	Calavon	-30	-19	-67	-65
5		-29	-48	-67	-132
6		-33	-81	-75	-207
7		14	-68	-12	-218
8		38	-29	23	-196
9		52	22	44	-152
10	Imergue	46	46	64	64
11	Calavon	128	196	151	63
12		2116	2312	2681	2744

Tableau n°11 : Débits des flux par sous bassin sur le Calavon

C.II RESULTATS DE LA RECONSTITUTION DES DEBITS INFLUENCES

Le tableau suivant présente les **débits influencés**, avec prise en compte des prélèvements et des restitutions, pour chaque sous bassin versant du Calavon.

BV	Cours d'eau	Surface BV (km ²)	PK (km)	Module (l/s)	Médian (l/s)	QMNA5 influencé (l/s)	VCN10 (l/s)	VCN3 (l/s)
1	Calavon	229	5.0	682	155	36	21	14
2		308	9.2	710	174	37	22	15
3	Encrême	39	-	76	24	4	3	2
4	Calavon	356	15	794	187	30	18	12
5		375	18.6	744	116	0	0	0
6		475	23.5	733	76	0	0	0
7		578	32.5	735	105	0	0	0
8		676	37.5	696	147	16	9	6
9		729	44.5	830	239	54	33	22
10	Imergue	112	-	32	23	10	6	4
11	Calavon	965	57.0	1081	252	12	7	5
12		997	70.0	1427	624	189	114	76

Tableau n°12 : Débits caractéristiques influencés du Calavon

La comparaison des débits caractéristiques naturels et influencés montre que l'hydrologie au travers de l'évolution des débits n'est pas trop modifiée. L'influence des prélèvements et des restitutions se fait cependant sentir au niveau des débits caractéristiques :

- Sur le BV4, le QMNA5 naturel passe de 71 l/s à 18 l/s pour le QMNA5 influencé principalement à cause des prélèvements AEP au niveau des Bégudes et aux prélèvements agricoles en amont ;
- Sur le BV5 avec la naissance de ruisseaux au niveau des QMNA5 influencés. Sur ce secteur, la défaillance vient d'un transfert des déficits et non pas de prélèvements directs au niveau du sous bassin versant ;
- Sur le BV12, les restitutions des canaux d'irrigation par les décharges et les rejets de colatures entraînent une augmentation importante des débits.

L'illustration ci-dessous présente la comparaison des débits moyens naturels et influencés pour les mois de juin et août sur le linéaire du Calavon.

Cette comparaison confirme les éléments observés à partir des débits caractéristiques influencés du Calavon ci-dessus avec la présence de deux zones impactées par les prélèvements et les restitutions :

- Les sous bassins versants BV4, BV5 et BV6 dont l'hydrologie naturelle est impactée par des prélèvements avec une baisse des débits qui peut représenter jusqu'à un niveau de prélèvement cumulé de près de 200 l/s en étiage ;
- Le sous bassin BV12 où on a une augmentation des débits par rapport à la situation naturelle de près de 300 l/s pour les eaux superficielles.

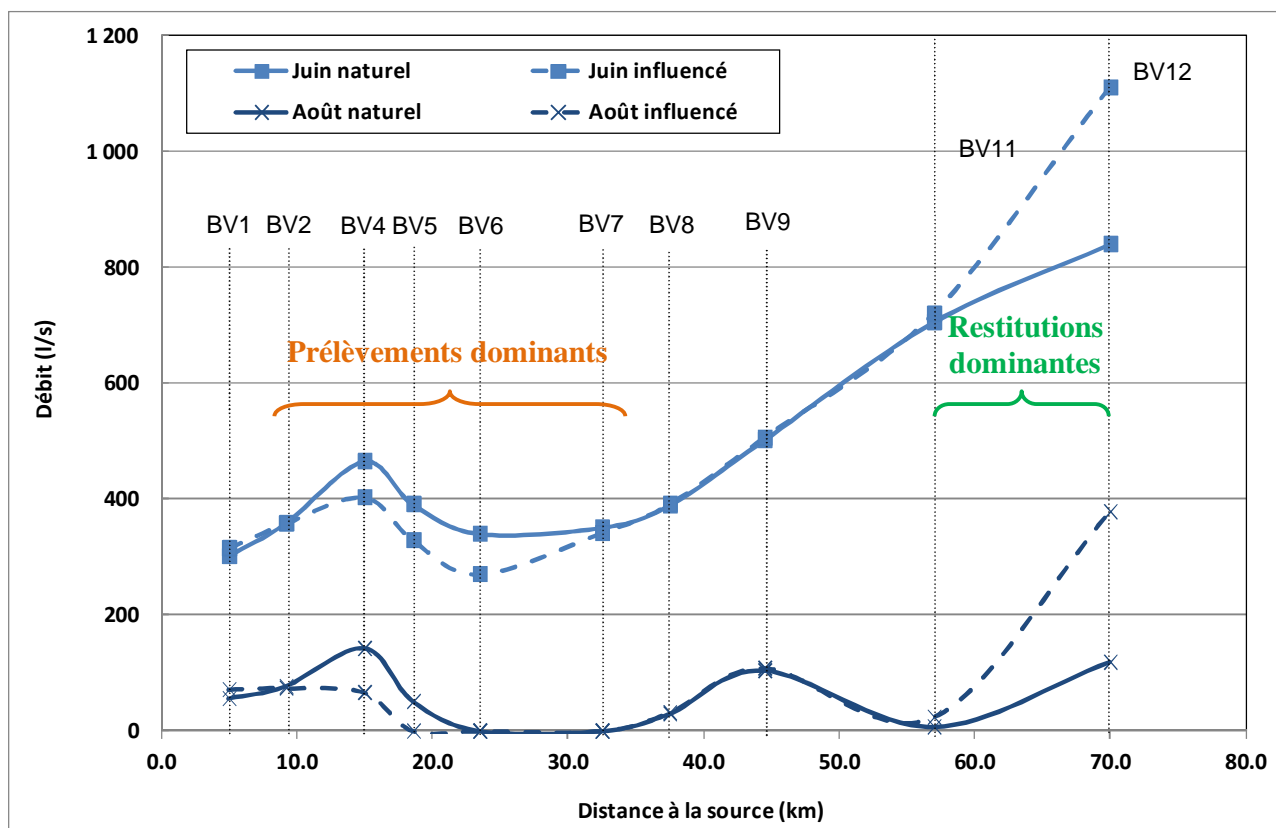


Illustration n°12: Débits moyens mensuels influencés et naturels en août sur le Calavon

PARC NATUREL REGIONAL DU LUBERON - ETUDE DE DETERMINATION DES VOLUMES PRELEVABLES SUR LE BASSIN VERSANT DU CALAVON

BV	Cours d'eau	Surface BV (km ²)	PK (km)	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1	Calavon	229	5.0	1 585	921	950	1 014	719	316	85	72	148	310	1 030	1 033
2		308	9.2	1 592	995	977	1 108	789	358	83	74	180	336	987	1 036
3	Encrême	39	-	145	98	100	127	84	42	9	12	31	51	116	100
4	Calavon	356	15	1 813	1 173	1 099	1 211	890	404	59	66	220	412	1 045	1 134
5		375	18.6	1 811	1 137	1 060	1 178	841	330	0	0	134	336	1 002	1 096
6		475	23.5	1 877	1 207	1 062	1 242	865	271	0	0	31	269	941	1 032
7		578	32.5	1 762	1 210	1 058	1 297	941	342	0	0	78	308	911	916
8		676	37.5	1 550	1 134	995	977	1 127	392	86	32	79	219	947	809
9		729	44.5	1 733	1 312	1 140	1 129	1 313	507	172	109	171	322	1 094	958
10	Imergue	112	-	34	34	42	43	40	27	23	24	20	24	36	38
11	Calavon	965	57.0	1 817	1 551	1 545	1 578	1 741	720	145	24	117	205	1 172	2 360
12		997	70.0	1 990	1 811	1 925	1 981	2 194	1 111	504	378	501	559	1 571	2 595

Tableau n°13 : Débits moyens mensuels influencés du Calavon

C.III COMPARAISON AVEC LES DONNEES MESUREES

Afin de valider la reconstitution des débits influencés sur le bassin du Calavon, une analyse à partir des données observées est menée par la suite. Celles-ci sont de trois natures :

- Les données hydrométriques aux stations de Coste-Raste et d'Oppède sur le Calavon ;
- Les données de jaugeages de la DDT et du PNRL, ainsi que celles de la présente étude ;
- Les données du ROCA.

C.III.1 Comparaison des données hydrométriques

□ Station de Coste-Raste (BV5)

Le graphique suivant présente une comparaison des débits moyens mensuels sur l'ensemble de la période observée et simulée (1978 à 2010) au niveau de la station de Coste-Raste (BV5).

On constate que les écarts entre les valeurs observées et reconstituées restent inférieurs à 10% pour l'ensemble des mois sauf pour le mois de juillet et août où les moyennes mensuelles simulées sont nulles alors que la station indique respectivement un écoulement moyen mensuel de 50 l/s et 20 l/s.

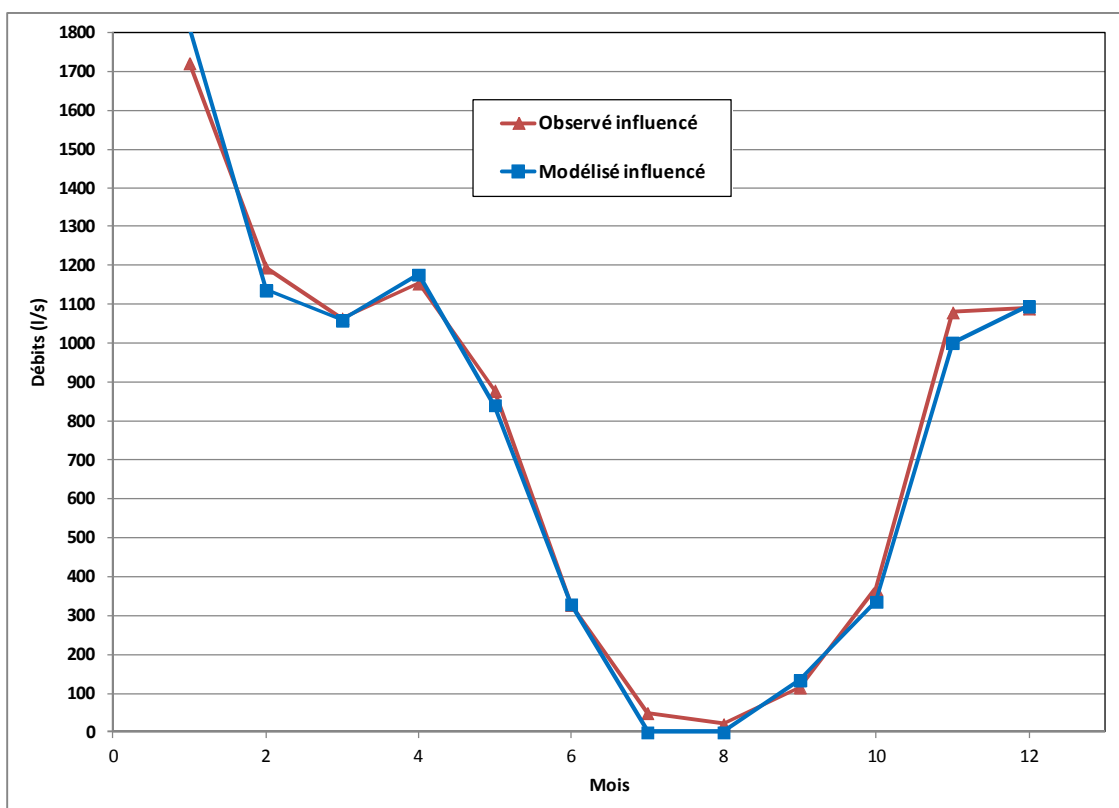


Illustration n°13: Débits moyens mensuels observés et simulés à Coste-Raste sur la période 1978 - 2010

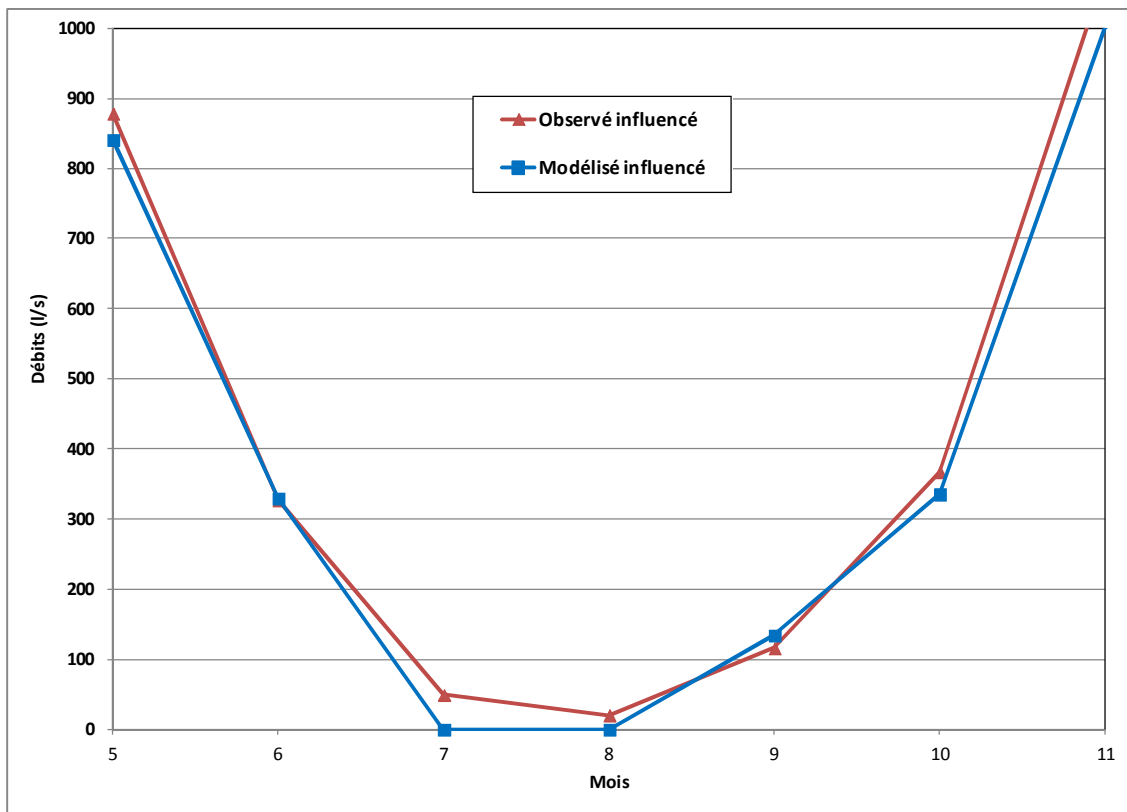


Illustration n°14: Débits moyens mensuels observés et simulés à Coste-Raste sur la période 1978 à 2010 (zoom sur la période d'étiage)

Même si lors d'un jaugeage réalisé dans le cadre de l'étude, il a été constaté que la station hydrométrique indiquée la même valeur que celle du jaugeage (19 l/s en juillet 2011), les données de la station hydrométrique sont parfois remises en cause notamment en étiage par les personnes effectuant un suivi régulier des étiages du Calavon (PNRL). Suite aux observations des 5-6 dernières années, les assècs sont récurrents sur ce secteur et il semble donc peu probable qu'un écoulement moyen de 50 l/s à la station de Coste-Raste soit possible.

Ainsi, les résultats de la modélisation indiquant un débit mensuel nul au niveau de Coste-Raste durant le mois de juillet nous semble plus satisfaisant aux vues des observations de terrain que les données de la station hydrométriques.

□ Station d'Oppède

Le graphique suivant présente une comparaison des débits moyens mensuels sur l'ensemble de la période observée et simulée (1996 à 2010) au niveau de la station d'Oppède (BV11).

On constate que les écarts entre les valeurs observées et reconstituées restent inférieurs à 10% pour l'ensemble des mois. Les données de la station hydrométrique présentent des variations nettes entre les mois de décembre à mai. Ces variations au niveau de la saison pluvieuse ne sont pas représentées par le modèle. En plus de l'explication d'une mauvaise représentation du phénomène par le modèle, on peut avancer l'hypothèse que la longueur de la chronique de la station ne permet pas de disposer de suffisamment d'année pour avoir des moyennes mensuelles fiables. Cette hypothèse se fonde sur la

différence entre les débits moyens du mois de décembre (2 500 l/s) et celui du mois de janvier (1 800 l/s) qui pourrait simplement être expliqué par l'impact de l'inondation de décembre 2008 sur cette moyenne mensuelle.

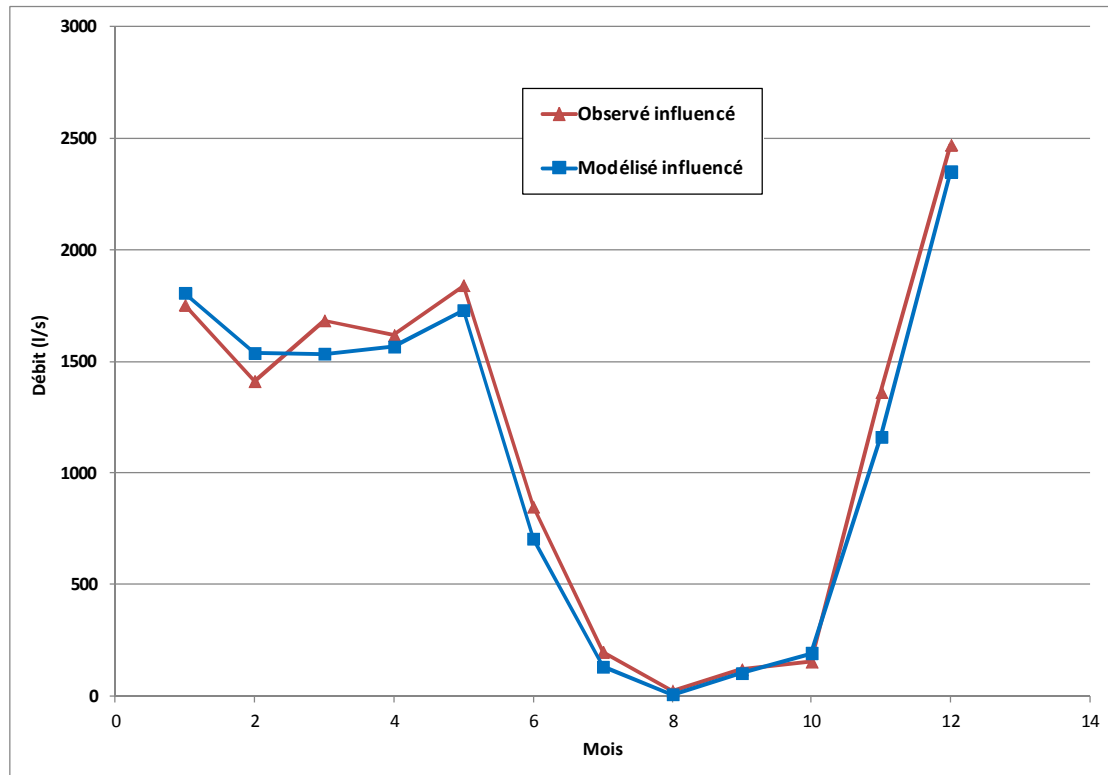


Illustration n°15 : Débits moyens mensuels observés et simulés à la station d'Oppède sur la période 1998 - 2010

De la même manière que sur la station de Coste-Raste, les débits d'étiage sont bien représentés (sauf pour le mois de juillet où l'écart peut atteindre 75 l/s en moyenne. Comme déjà évoqué précédemment, cet écart peut provenir d'une mauvaise représentativité de la station hydrométrique pour ce mois car les débits observés par le PNRL lors de ses suivis bimensuels sont bien moins importants (en moyenne, aux alentours des 100 l/s).

En conclusion de la comparaison avec les données observées aux stations de mesure de Coste-Raste (BV4) et d'Oppède (BV11), le calage initial (paragraphe B) semble satisfaisante à l'échelle mensuelle y compris à l'étiage pour reproduire les débits naturels et les débits influencés pour les prélèvements et les restitutions.

Les erreurs résiduelles restent difficiles à différencier entre celles issues de la mesure des stations hydrométriques et de celles provenant de la modélisation.

Toutefois, l'analyse statistique du paragraphe suivant nous permettra de définir les incertitudes de la modélisation et donc de définir la marge d'erreur qui sera ultérieurement applicable aux volumes prélevables.

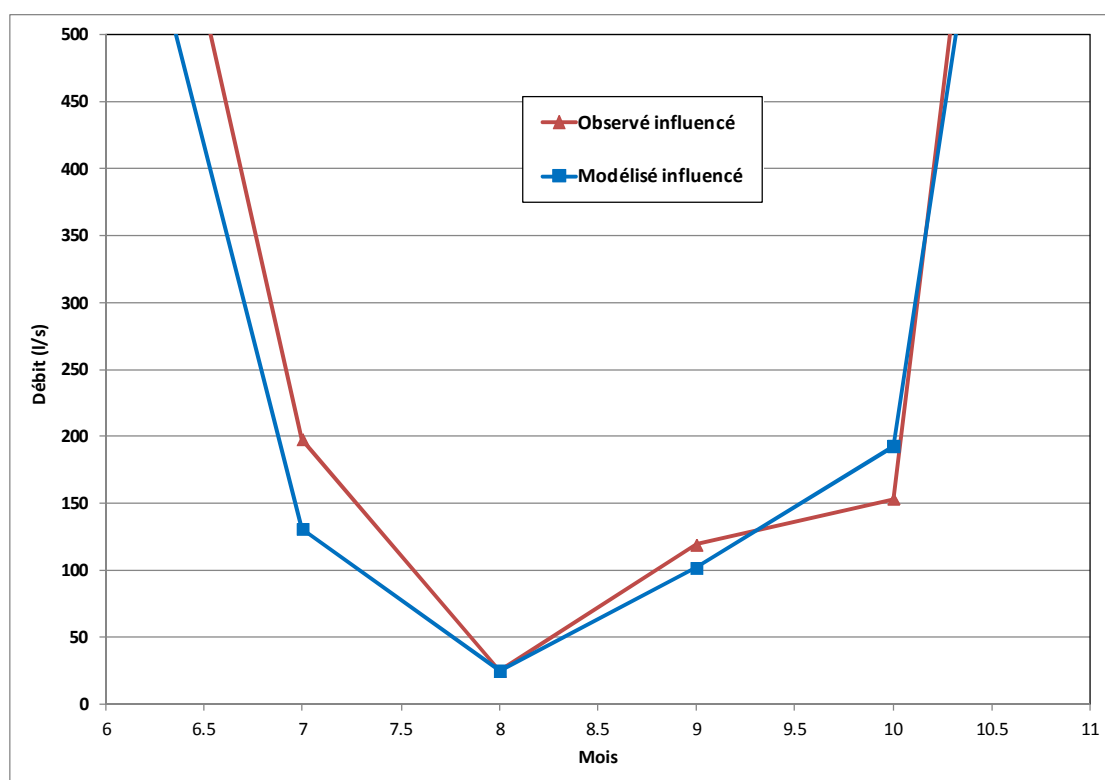


Illustration n°16: Débits moyens mensuels observés et simulés à la station d'Oppède sur la période 1998 à 2010 pour les mois de juillet à octobre

C.III.2 Comparaison avec les données statistiques

Afin de compléter la comparaison entre les débits observés et les débits modélisés, une analyse statistique des résultats obtenus au droit des stations hydrométriques est présentée.

□ Station de Coste-Raste (BV5)

Le tableau suivant rassemble les débits caractéristiques statistiques observés et simulés (influencés) de Coste-Raste entre 1978 et 2010.

On constate que la reconstitution reproduit correctement les valeurs issues de l'observation, ce qui signifie que **le modèle mis en place a la capacité de reproduire les débits observés.**

	Module (l/s)	Débit moyen mensuel d'août (l/s)	QMNA5 (l/s)	VCN10 (l/s)	VCN3 (l/s)
Simulé	744	0	0	0	0
Observé	793	20	1	1	1

Tableau n°14 : Débits caractéristiques influencés à la station de Coste-Raste sur la période 1978 à 2010

Le graphique suivant compare les modules influencés simulés et observés à la station hydrométrique de Coste-Raste sur le Calavon. Ce graphique, et les suivants, s'organisent selon trois axes :

- L'axe de couleur noire représentant une erreur nulle entre les deux séries comparées ;

- Les axes de couleur orange représentant de part et d'autre de l'axe précédent une erreur de 10% ;
- Les axes de couleur rouge représentant de part et d'autre de l'axe précédent une erreur de 20%.

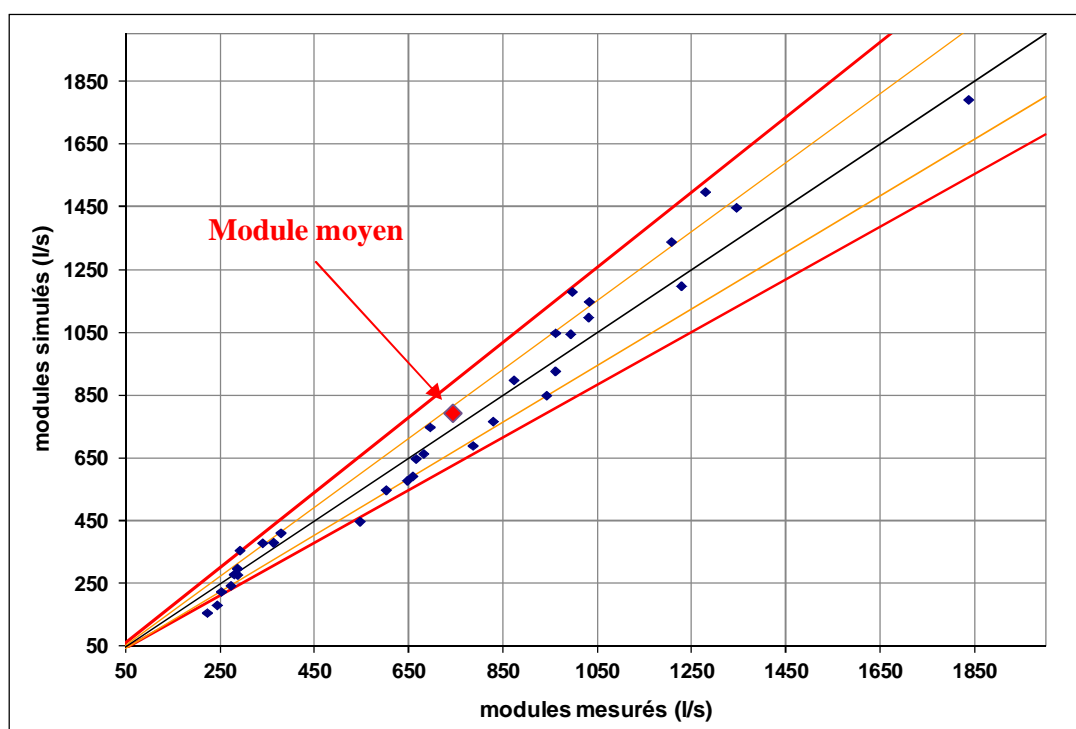


Illustration n°17 : Comparaison modules influencés observés et modules simulés à la station de Coste-Raste

La répartition statistique des erreurs entre les débits moyens annuels simulés et observés semble aléatoire sans dénoter une tendance à surestimer ou sous estimer les débits mis à part pour de très faibles modules.

L'erreur n'est jamais supérieure à 20% et se situe généralement sous les 10%. En moyenne, le modèle tend à surestimer les modules influencés d'environ 5% à 10%.

Comme indiqué précédemment, compte tenu des différences entre les débits influencés simulés et observés du mois d'août et des incertitudes qui entourent les débits mesurés de la station de Coste-Raste à l'étiage, l'analyse statistique ne peut être pertinente.

De même, compte tenu des faibles valeurs des VCN10 et VCN3, l'analyse statistique des comparaison des valeurs simulés et observés des débits influencés ne démontrait rien de plus.

□ Station d'Oppède

Le tableau suivant rassemble les débits caractéristiques statistiques observés et simulés (influencés) à la station d'Oppède entre 1996 et 2010.

On constate que la reconstitution reproduit correctement les valeurs issues de l'observation, ce qui signifie que **le modèle mis en place a la capacité de reproduire les débits observés.**

	Module (l/s)	Débit moyen mensuel d'août (l/s)	QMNA5 (l/s)	VCN10 (l/s)	VCN3 (l/s)
Simulé	1 068	24	12	7	5
Observé	1 150	25	14	8	6

Tableau n°15 : Débits caractéristiques influencés à la station d'Oppède sur la période 1996 - 2010

Comme pour Coste-Raste, le graphique suivant présente la comparaison des modules influencés simulés et observés à la station hydrométrique d'Oppède sur le Calavon de 1996 à 2010.

La répartition statistique des erreurs entre les débits moyens annuels simulés et observés semble aléatoire sans dénoter une tendance à surestimer ou sous estimer les débits mis à part pour de très faibles modules.

L'erreur n'est que très rarement supérieure à 20% (une valeur sur la série chronologique) et se situe généralement sous les 10%. En moyenne, le modèle tend à sous estimer les modules influencés d'environ 5% à 10%.

Les résultats de la modélisation semblent aussi performants pour les faibles débits que pour les débits importants.

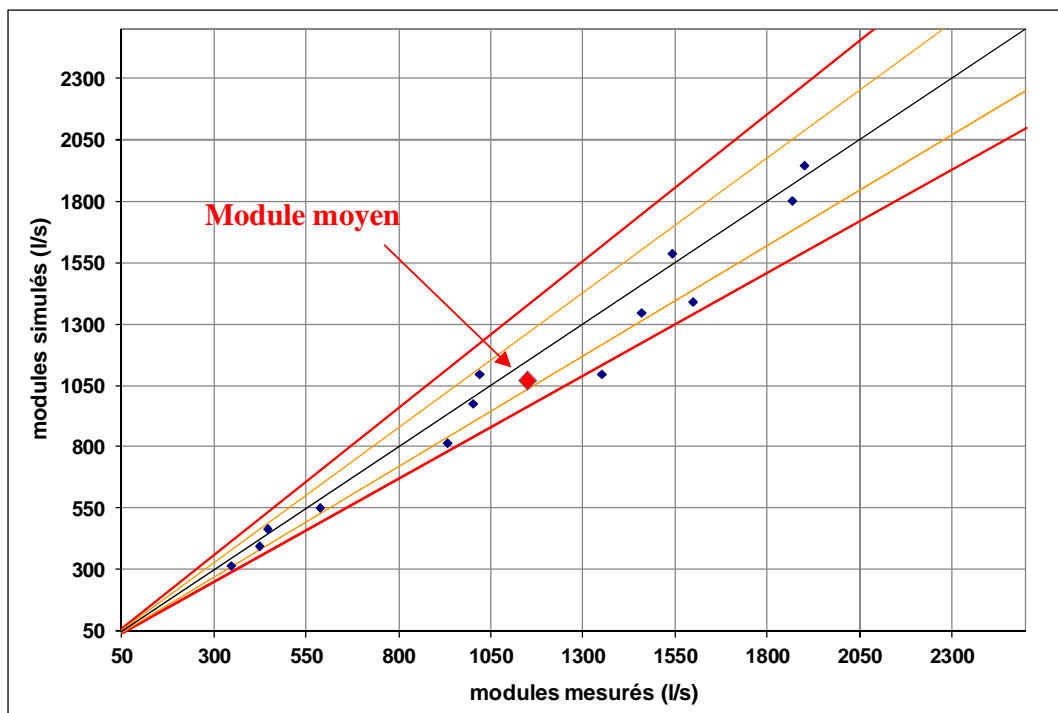


Illustration n°18 : Comparaison modules influencés observés et modules simulés à la station d'Oppède

Le graphique suivant présente la comparaison des débits moyens mensuels des mois d'août simulés et observés toujours entre 1996 et 2010 à la station d'Oppède.

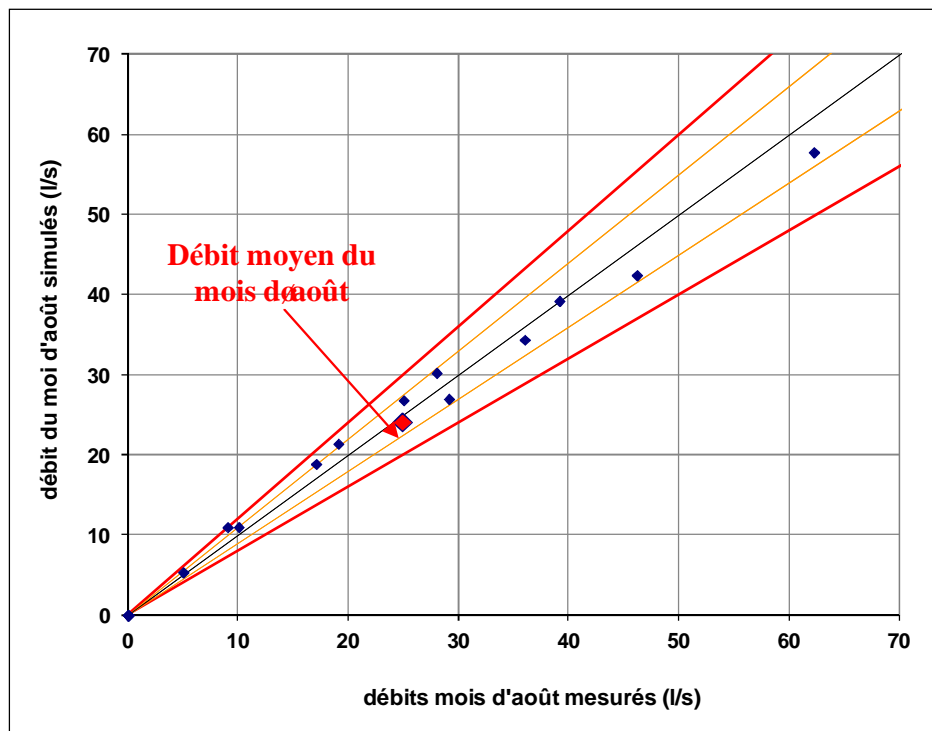


Illustration n°19 : Comparaison des débits moyens influencés simulés et observés du mois d'août à la station d'Oppède entre 1996 et 2010

La reconstitution permet de bien reproduire les débits mensuels pour le mois d'été le plus important sur l'ensemble de la gamme des débits même en période d'assecs.

Comme précédemment, la répartition statistique des erreurs entre les débits moyens du mois d'août simulés et observés semble aléatoire sans dénoter de tendance. L'erreur n'est jamais supérieure à 20% se situe généralement sous les 10%. En moyenne, le modèle tend à sous estimer les débits mensuels influencés du mois d'août d'environ 5%.

Les graphiques suivants présentent la comparaison des VCN10 simulés et observés toujours entre 1996 et 2010 à la station d'Oppède.

La reconstitution permet, de manière générale, de reproduire de manière satisfaisante les débits VCN10. La répartition statistique des erreurs entre les débits VCN10 simulés et observés semble aléatoire sans dénoter de tendance.

Toutefois plusieurs valeurs mesurées possèdent les mêmes valeurs (0 ou 10 l/s pour la moitié de l'échantillon) alors que les valeurs simulées varient ce qui peut générer des erreurs supérieures à 20% entre les valeurs mesurées et simulées.

Cette dernière remarque attire l'attention sur la sensibilité de la station hydrométrique d'Oppède pour la mesure des très faibles débits d'été. En effet, ces valeurs ont majoritairement été obtenues dans les premières années de fonctionnement de la station. Compte tenu que pour obtenir une courbe de tarage satisfaisante, il faut plusieurs jaugeages des débits, il se peut que la précision de la station n'ait pas été optimale sur les premières années entraînant ce nombre important de valeurs 0 et 10 l/s.

On peut néanmoins approcher une incertitude du modèle sur les faibles débits. En moyenne, le modèle tend à sous estimer les VCN10 d'environ 20% ce qui au niveau de l'Oppède correspond à moins de 2 l/s ce qui est très satisfaisant.

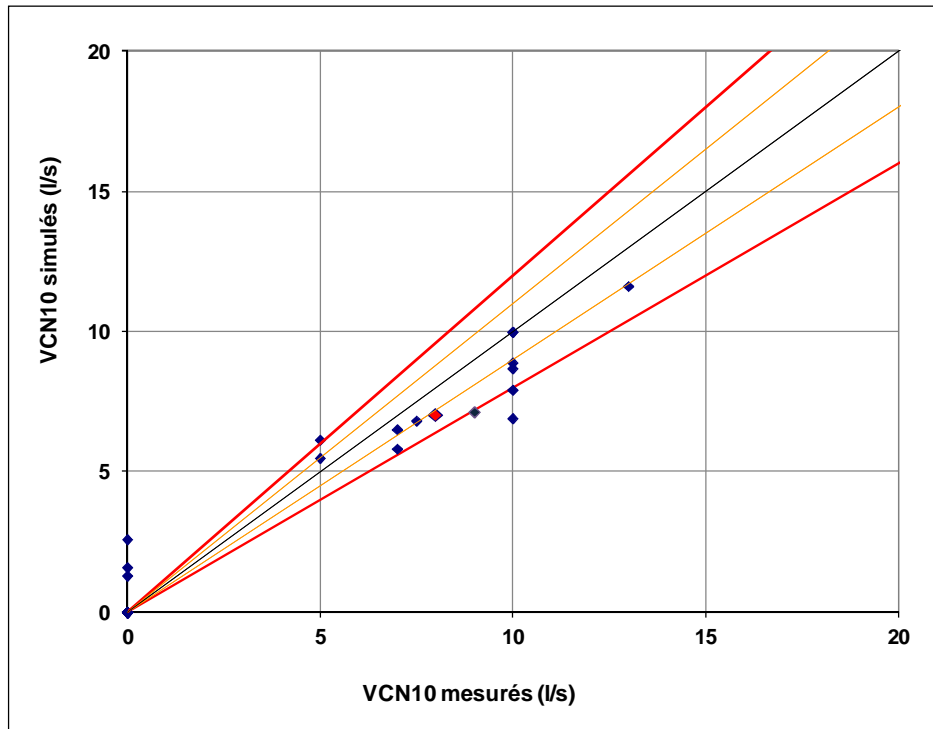


Illustration n°20 : Comparaison des VCN10 influencés simulés et observés à la station d'Oppède entre 1996 et 2010

La comparaison des VCN3 n'a pas été effectuée puisque sur les 16 valeurs de VCN3 disponibles (1996 à 2010) plus de la moitié des valeurs mesurées et modélisées sont égales à 0. Même si cela conforte la fiabilité de notre modélisation, cela n'apporte pas d'information supplémentaire sur la répartition statistique des erreurs.

En conclusion de cette comparaison des données observées et simulées aux stations hydrométriques de Coste-Raste et d'Oppède les éléments suivants sont à retenir :

- En moyenne annuelle, le modèle reproduit très fidèlement les débits observés aux deux stations hydrométriques ;
- Statistiquement, le modèle reproduit correctement les débits observés pour des débits proches du QMNA5 ce qui reste l'objectif principal compte tenu des prochaines phases qui doivent permettre de définir les volumes prélevables par rapport à cet objectif ;
- Pour la station de Coste-Raste, les débits mesurés à la station hydrométriques semblent plus importants que ceux modélisés. Il conviendra de valider le fonctionnement du modèle à partir des observations et des jaugeages.

C.III.3 Comparaison avec les données de jaugeage et les assecs observés

En préambule, il convient de préciser que **la prévision d'un débit journalier n'est pas l'objectif de la modélisation mise en place**. L'objectif reste bien de reproduire statistiquement les débits, notamment les QMNA5 naturels et influencés, afin de définir le volume prélevable pouvant être satisfait 8 années sur 10.

Malgré le fait que les résultats en sortie du modèle soient à l'échelle journalière, leur exploitation reste difficile à cette échelle de temps principalement car les prélèvements et les restitutions journalières sont déduites de moyennes mensuelles (phase 3) ce qui ne permet pas de reproduire une journée ponctuelle où la pression des usages seraient particulièrement fortes par exemple.

Ainsi, au plus le pas de temps augmente (3 jours, 10 jours, un mois), au plus le modèle sera performant et limitera les incertitudes.

La comparaison journalière des débits ne permet donc pas directement de valider ou de caler le modèle mais il indique une tendance d'évolution des débits.

Une comparaison avec les données de jaugeage est présentée par la suite. Les données du PNRL ont notamment été utilisées.

Le graphique suivant présente les débits moyens mensuels d'août reconstitués et les jaugeages ayant été réalisés au cours de ce mois.

La comparaison effectuée ici met en lumière les tendances d'évolution du débit du Calavon au fil du profil en long. Ces constatations recourent les éléments mis en évidence par la modélisation :

- Des écoulements moyens à faibles (25 à 50 l/s) sur la partie amont du Calavon (BV1 à BV4) du fait de la présence d'apports souterrains principalement ;
- Forte décroissance des débits à partir du BV5 à cause de pertes karstiques profondes (50 à 100 l/s). Ce phénomène se traduit par des assecs à partir du BV5. Ces derniers se poursuivent jusqu'au BV7 ;
- Reprise des écoulements de surface à partir du BV8 avec des débits variables.

En outre, on constate que l'évolution linéaire des débits reconstitués est généralement en accord avec ce qui a été constaté au cours des différentes campagnes de jaugeage :

- Maintien d'un écoulement sur les premiers bassins versants. La remontée des débits au niveau des Bégudes (BV4) n'est pas représentée alors que les mesures montrent une augmentation de 25 l/s en moyenne sur les jaugeages. Cet écart peut s'expliquer par des différences de prélèvements ou une sous estimation des apports souterrains connus à ce niveau ;
- A partir du BV5, le modèle est en accord avec les observations avec une forte décroissance des débits et des assecs sur un linéaire de près de 20 km ;
- A partir du BV8 et BV9, le modèle reproduit bien la remontée des débits de surface ;
- Au niveau du BV11, le modèle simule une baisse des débits liés à une augmentation de la capacité de la nappe d'accompagnement ainsi qu'à des pertes. Cette évolution n'a pas pu être observée au niveau des campagnes de jaugeage du PNRL mais ces faibles débits ont été mis en évidence au niveau de la station hydrométrique d'Oppède.

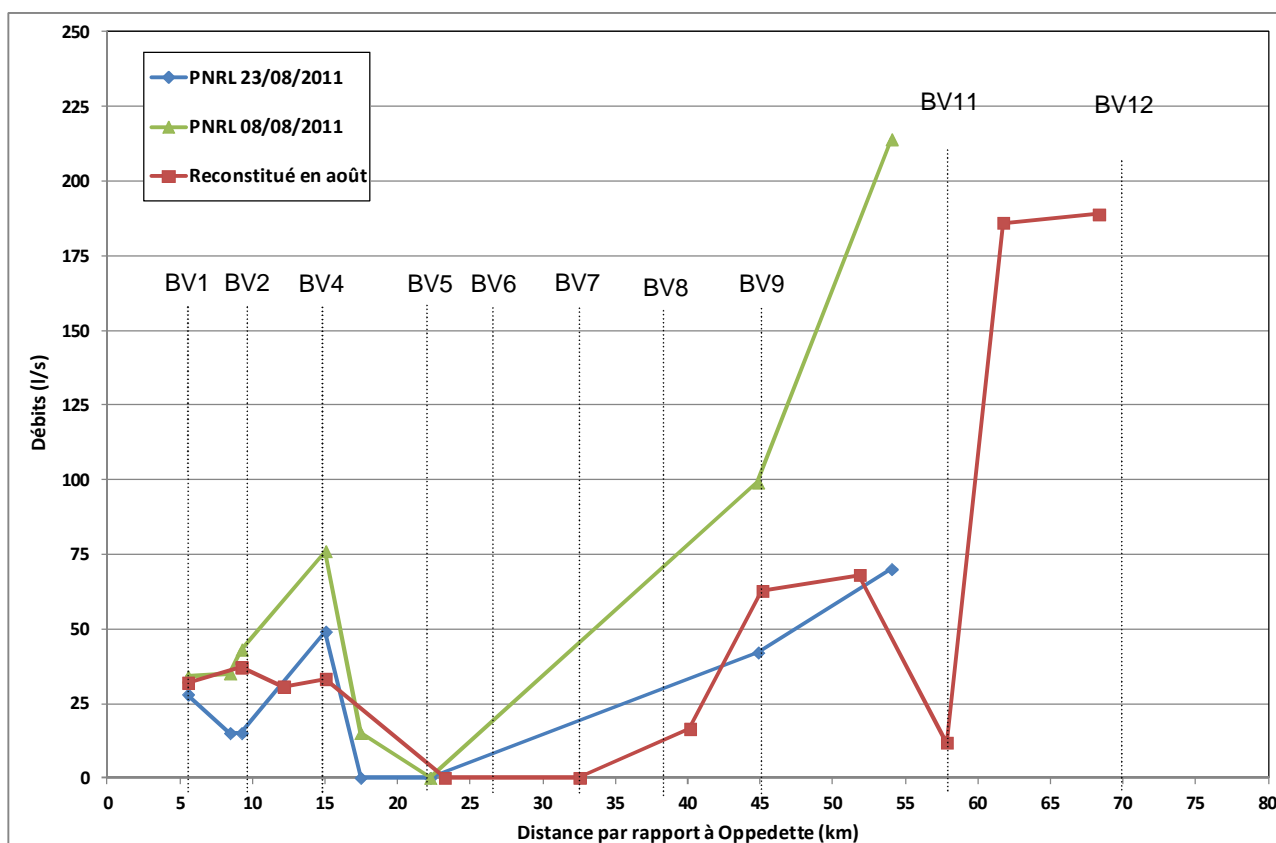


Illustration n°21 : Comparaison des débits reconstitués et des jaugeages pour le mois d'août

L'exploitation de l'outil de modélisation peut présenter des erreurs importantes pour une utilisation au pas de temps journalier même si il reproduit bien les assecs notamment sur la partie centrale du bassin versant car ils ont une dynamique de plusieurs jours plus compatible avec le modèle et son domaine de validité.

D. CONCLUSION

D.I QUALITE DU MODELE

La qualité du modèle global (Athys, module nappe et module prélèvements / restitutions) mis en place est satisfaisante au regard des résultats statistiques et pour les objectifs visés :

- Utilisable pour définir les débits moyens mensuels naturels servant de base aux volumes prélevables ;
- Utilisable pour tester des scénarios et évaluer l'influence de certains facteurs et usages (taux de retour, restitution, importation), et donc de proposer un partage du volume prélevable et des solutions pour éventuellement mobiliser de nouvelles ressources.

Toutefois, il est à préciser que des incertitudes sont présentes sur l'estimation des débits de la nappe d'accompagnement du Calavon.

D.II LIMITES ET INCERTITUDES SUR LES RESULTATS

La principale limite sur les résultats provient du fait que deux stations hydrométriques seulement ont été utilisées pour le calage des débits. Même si celles-ci représentent la majorité des superficies du bassin versant, les mesures de ces stations peuvent, comme le modèle, être entachées d'erreurs.

La comparaison avec les jaugeages peuvent permettre de recroiser les informations de valider les modélisations par rapport à un autre type de mesure.

Il y a donc une incertitude sur les résultats, due à ce manque de connaissances. **En fonction des résultats du modèle et de notre expertise, il a été évalué les incertitudes suivantes (par ordre croissant) :**

- + ou - 5% sur les moyennes annuelles
- + ou - 10 % sur les débits mensuels (débit moyen, QMNA) ;
- + ou - 20 % sur les débits moyens sur plus de 3 jours ;
- + ou - 25 % sur les débits journaliers d'étiages ;
- Très fortes sur les débits de crue.

D.III INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES

Des investigations complémentaires pourraient être menées sur le fonctionnement de la nappe d'accompagnement du Calavon. En effet, leurs fonctionnements restent complexes à appréhender surtout au niveau du BV12 avec des limites difficiles à définir entre la nappe d'accompagnement du Coulon et celle de la Durance.



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

ÉTUDES D'ÉVALUATION 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 :

~ Parc Naturel Régional du Luberon

Financeurs :

~ Agence de l'eau Rhône-Méditerranée & Corse
~ Union Européenne
~ Fonds Européen de Développement Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur

Bureau d'études :

CEREG Ingénierie