

DARDENNES

DARDENNES

La modélisation Pluie-Débit-Niveau de l'aquifère karstique de Dardennes : synthèse des modèles proposés au cours du projet Dardennes (2014-2018)

Auteurs : Thibaut GARIN et Bruno ARFIB

Date : 05/10/2018



Préambule

Le projet de recherche Dardennes porté par l'université Aix-Marseille de 2013 à 2018 a pour titre : Estimation des volumes d'eau souterraine exploitables dans les structures karstiques à l'échelle régionale : application à l'estimation des réserves karstiques Toulonnaises (Var). Ce projet a été coordonné par Bruno Arfib, hydrogéologue, maître de conférence à l'université Aix-Marseille, laboratoire CEREGE. Le projet a été financé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Véolia, la ville de Toulon, le cabinet d'expertises CENOTE et l'université Aix-Marseille.

Le projet a donné lieu à la réalisation de deux thèses de doctorats :

- Johan Jouves (2018) Origine, caractérisation et distribution prédictive des structures karstiques - De la karstologie aux modèles numériques 3D. Thèse de doctorat de l'université Aix-Marseille, soutenue le 14/05/2018.

- Cécile Baudement (2018) Évaluation des capacités d'écoulement et de stockage d'un aquifère karstique dynamique par caractérisation géologique et modélisation pluie-débit. Sources de Dardennes, Toulon, France. Thèse de doctorat de l'université Aix-Marseille, soutenue le 19/04/2018.

Suite à la soutenance de ces deux thèses de doctorat, un travail complémentaire de modélisation Pluie-Débit-Niveau des sources de Dardennes a été entrepris par Thibaut Garin (CDD) et B. Arfib, présenté dans ce rapport.

En fin de projet, le cabinet CENOTE a dirigé la rédaction d'une note de synthèse des résultats du projet, et proposer des recommandations et des scénarios de gestion de l'aquifère de Dardennes.

Pour plus d'informations : www.karsteau.fr

Remerciements :

Les auteurs du présent rapport souhaitent vivement remercier les personnes, organismes et institutions ayant contribué à l'aboutissement de ce travail :

- Les financeurs : l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Véolia, la ville de Toulon, le cabinet d'expertises CENOTE et l'université Aix-Marseille

- Les étudiants : Johan Jouves, Cécile Baudement, Guillaume Carles et Thérèse N'Dah.

- Les partenaires techniques et fournisseurs de données : Association SpéléH2O, Thierry Lamarque, Philippe Maurel, Météo-France, Véolia, la ville de Toulon et CENOTE

- La plateforme de modélisation KarstMod : Service National d'Observation Karst (SNO Karst), Naomi Mazzilli (université Avignon), Dominique Bertin (Génosis).

Tables des matières

1	Introduction -----	4
2	Matériel et méthodes -----	5
2.1	Logiciel KarstMod et la modélisation Pluie-Débit -----	5
2.2	Le débit des sources de Dardennes, le débit de pompage et le débit alimentant le Las au barrage de Dardennes -----	7
2.2.1	Le calcul du débit des sources-----	7
2.2.2	Le débit utilisé en fonction du modèle KarstMod considéré -----	8
2.3	Les données disponibles -----	8
2.3.1	Les débits-----	8
2.3.2	Le débit de captage AEP et les hauteurs d'eau-----	8
2.3.3	La pluie et l'ETP-----	9
3	Rappel sur le fonctionnement du karst de Dardennes entre 2012 et 2018 -----	9
3.1	Les précipitations entre 2012 et 2018-----	9
3.2	Le fonctionnement du karst de Dardennes entre 2012 et 2018 -----	10
3.3	Estimation du débit de drainage de l'aquifère lors des vidanges par les vannes de fond du barrage de Dardennes du 22/05/17 au 13/06/17-----	12
3.3.1	Principes de mesure et objectifs -----	12
3.3.2	Résultats et interprétation -----	13
4	Modélisation du fonctionnement des sources de Dardennes à partir de la structure proposée par Baudement (2018) -----	14
4.1	Structure et résultats du modèle « Baudement_2018 » -----	14
4.2	Simulation avec la version KarstMod V2.2.0.t et sur la période 2012 – 2018-----	15
4.2.1	Calage du modèle Baudement_V2.2.0.t-----	15
4.3	Critique du modèle Baudement (2018) sur la simulation du débit de crue -----	16
4.4	Critique du modèle Baudement (2018) sur la simulation du débit d'étiage -----	17
5	Calage d'un coefficient de récession d'après la méthode de Mangin -----	18
5.1.1	Détermination de la valeur de K_{tar} (coefficient de récession en tarissement) d'après Mangin-----	19
5.1.2	Abaque de l'évolution du débit au cours du temps durant le tarissement d'une source karstique -----	20
6	Proposition d'un nouveau modèle KarstMod pour une simulation du débit d'étiage améliorée -----	21
6.1	Application de K_{tar} au modèle proposé par C. Baudement (baudement_V2.2.0.t ; $K_{MS}=0,0025$) -----	21
6.2	Application d'un modèle numérique non linéaire (dard_non_lin) -----	22
6.3	Synthèse et conclusion sur le modèle à utiliser pour simuler le débit total des sources de Dardennes -----	25
7	Simulation à partir du nouveau modèle non linéaire (Dard_Non_Lin) sous différentes conditions -----	26
7.1	Déconvolution du débit lent et rapide sur la période 2013-2018 -----	26
7.1.1	Résultats graphiques sur l'ensemble de la période 2013-2018 -----	26
7.1.2	Évolution des composantes lentes et rapides du débit par année : un outil de réflexion pour une gestion durable de la ressource-----	28
7.1.3	Les écoulements rapides en crue (cas d'une série de crues observées en janvier-février 2014) -----	29

7.1.4	Comparaison des débits exploités pour l'AEP avec la simulation des débits lent et rapide	30
7.2	Simulation d'une crue suite à une pluie extrême	34
7.3	Longue chronique Pluie-ETP	34
7.4	Effet d'une année sans pluie	36
7.5	Conclusion	37
8	Modélisation du niveau d'eau et des pompages du Ragas de Dardennes avec un nouveau modèle Pluie-Débit-Niveau (Dard_Sans_Fond)	38
8.1	Structure du modèle Dard_Sans_Fond	38
8.2	Niveau piézométrique équivalent et variation du stock dans la retenue de Dardennes	39
8.3	Calage du modèle Dard_Sans_Fond	40
8.4	Simulation du niveau d'eau dans le Ragas et dans le lac à l'aide du niveau du réservoir C de 2013 à 2018	41
8.5	Simulation du niveau d'eau en cas de pompage pour l'AEP à débit constant 300 l/s (période 2013 à 2018)	42
8.6	Simulation du niveau d'eau dans le Ragas et dans le lac à l'aide du niveau du réservoir C de 1998 à 2018	45
8.7	Simulation du niveau d'eau en cas de pompage pour l'AEP à débit constant 300 l/s sur une longue période (19 ans)	46
9	Conclusion	48
10	Bibliographie	49
11	Annexes	50
11.1	Simulation du débit sur une longue chronique avec le modèle Dard_Non_Lin.	51
11.2	Simulation avec le modèle Dard_Non_Lin : débit total journalier et débit des composantes lentes et rapides en année hydrologique	53
11.3	Précipitations journalières maximales de 30 mm	54
11.4	Un calage alternatif du modèle Dard_Sans_Fond (le modèle C7)	55
11.5	Précipitations annuelles cumulées (Toulon, Le Castellet aérodrome, La Limate)	56
11.6	Précipitations annuelles cumulées par cycle hydrologique (Toulon, Le Castellet aérodrome, La Limate)	57
11.7	Note sur l'effet de vidange du lac de Dardennes sur le déstockage d'eau souterraine (étude de la période de vidange décennale de mai-juin 2017)	58
11.8	Calcul des proportions des débits lents et rapides par année civile (modèle Dard_Non_Lin)	63
11.9	Simulation du niveau d'eau dans le Ragas et dans le lac à l'aide du niveau du réservoir C de 1998 à 2018 : zoom sur l'année 2004	64
11.10	Comparaison du débit vers le Las simulé avec le modèle Dard_Sans_Fond entre 2013 et 2018 pour un débit de captage AEP observé ou imposé à 300 l/s	65

1 INTRODUCTION

Le projet Dardennes (2013-2018) avait pour objectif global d'étudier le système karstique des sources de Dardennes, au nord-ouest de Toulon, par une approche croisée de géologie structurale, karstologie et hydrodynamique des sources. Chaque thèse de doctorat (Jouves, 2018 ; Baudement, 2018) a apporté un ensemble de résultats détaillés sur le cas d'étude et offre une synthèse sur les méthodes d'étude utilisées, en particulier sur le diagnostic karstologique et la modélisation 3D des structures karstiques souterraines (thèse J. Jouves) et sur la modélisation Pluie-Débit et la définition du bassin versant des sources (thèse C. Baudement). Parmi les objectifs du projet, la quantification des écoulements était un des défis majeurs, en vue de proposer ensuite des scénarios de gestion de la ressource en eau de Dardennes.

Les études ont montré que le système karstique de Dardennes est un hydrosystème à deux composantes majeures d'écoulement avec un bassin d'alimentation de l'ordre de 70 km². D'une part c'est un système très dynamique, avec une forte composante karstique qui favorise les crues de forte intensité (plus de 30 m³/s) par le transfert rapide de l'onde de pression générée par les précipitations sur le bassin versant. D'autre part, le débit des sources reste conséquent à l'étiage, en général compris entre 50 et 100 l/s avant la reprise des hautes-eaux hivernales. De plus, les phases successives de karstification ont favorisé la mise en place d'un réseau de conduits karstiques en profondeur, à plus d'une centaine de mètres sous l'exutoire actuel. L'aquifère se développe ainsi dans les calcaires et dolomies potentiellement fantômisées du jurassique supérieur, et en moindre mesure dans le recouvrement de calcaires urgoniens sus-jacent (uniquement sur la partie sud-est du bassin versant à l'amont immédiat des sources de Dardennes).

Dans ce cadre géologique et hydrogéologique complexe, la modélisation hydrogéologique des écoulements est difficilement réalisable en 3 dimensions en tenant compte de toutes les hétérogénéités du système. Une alternative extrêmement performante est d'utiliser un modèle Pluie-Débit à 1 dimension. L'hydrosystème est traité dans sa globalité, et une relation, qui peut être complexe, est appliquée pour transformer le signal de pluie en débit des sources à l'exutoire du système. Les modèles Pluie-Débit présentent en effet l'avantage d'être modulables pour représenter finement le modèle conceptuel de fonctionnement de l'aquifère. Ils permettent par exemple de tenir compte des conditions d'infiltration (Tritz et al. 2011), puis des conditions de transfert en écoulements rapide ou lent (Fleury, 2007, 2008 ; Hartmann, 2012) ; ils peuvent aussi être adaptés pour simuler le mélange par intrusion saline d'eau de mer (Arfib et Charlier, 2016). Ce type de modèles offre aussi la possibilité de simuler le niveau d'eau dans un compartiment conceptuel du modèle (par exemple la matrice ou les conduits) et de le comparer avec des mesures représentatives faites in-situ. Le modèle sert ensuite à simuler des scénarios fixés par l'utilisateur, comme par exemple l'effet de la modification du régime des précipitations ou des pompages. Toutefois, un modèle ne reste qu'une représentation de la réalité, ce qui génère systématiquement des simplifications et des approximations, tout d'abord dans le schéma conceptuel de fonctionnement de l'aquifère, et aussi dans le processus de calage du modèle. Les études croisées telles que les deux thèses menées dans le projet Dardennes permettent d'affiner le ou les modèles conceptuels. Le processus de calage en modélisation est par ailleurs l'objet de travaux de recherche spécialisés. Dans le cadre du Service National d'Observation Karst, la plateforme de modélisation Pluie-Débit, KarstMod, a été développée (Open source). Cécile Baudement a participé à son amélioration au cours de sa thèse ; et une nouvelle version (V2.2.0.t et V2.2.0.u) avec des méthodes de calculs optimisées est aujourd'hui disponible. La plateforme KarstMod offre des solutions de mise en œuvre des structures de modèles Pluie-Débit les plus courantes, et s'adapte ainsi aux modèles conceptuels établis pour l'hydrosystème de Dardennes.

Ce rapport propose une synthèse des modèles globaux hydrogéologiques élaborés au cours du projet Dardennes. C'est un document complémentaire aux deux thèses de doctorat soutenues dans le cadre du projet (Baudement, 2018 ; Jouves, 2018). Il se concentre sur les résultats des deux modèles conceptuels les plus intéressants pour simuler le fonctionnement hydrogéologique des sources de Dardennes : (1) un

modèle qui sépare les écoulements en écoulement rapide (crue) et écoulement lent (écoulement de base), (2) un modèle qui tient compte de l'effet de stockage du lac de Dardennes et des pompages. Le lecteur est donc renvoyé aux deux thèses de doctorat pour trouver tout le détail sur le cadre géologique et karstologique de l'aquifère de Dardennes, ainsi que la méthodologie de la modélisation Pluie-Débit.

Les objectifs de ce rapport sont : (1) de montrer une analyse critique des résultats obtenus par les modèles Pluie-Débit, mettant ainsi en évidence leurs atouts et leurs faiblesses, (2) de proposer plusieurs modèles Pluie-Débit de l'aquifère de Dardennes afin de simuler le débit des sources de Dardennes ou le niveau d'eau du lac de Dardennes au cours du temps en fonction des prélèvements pour l'alimentation en eau potable (AEP). Les modèles sont calés et validés sur la période de mesure de 2012 à 2018. Ils sont ensuite utilisés pour simuler une plus longue chronique démarrant en 1998. Le modèle initialement proposé par C. Baudement (2018) durant sa thèse a été repris et amélioré pour une meilleure simulation des débits d'étiages. Il permet de déconvoluer le débit total entre le débit de base et le débit de crue. Ces débits sont comparés aux débits d'exploitation AEP. Le niveau d'eau du lac est simulé avec un nouveau modèle qui tient compte du prélèvement AEP et du volume stocké dans le lac, permettant ainsi de simuler le niveau d'eau pour différents scénarios de pompage. Ces modèles sont des outils pertinents pour discuter de la pérennité de l'exploitation de la ressource en eau souterraine de cet aquifère.

Ce rapport est structuré en un premier chapitre de présentation du matériel et des méthodes (logiciel KarstMod, données disponibles), un chapitre qui rappelle le fonctionnement hydrodynamique du karst de Dardennes étudié par les chroniques de données de 2012 à 2018, puis une série de chapitres sur la modélisation Pluie-Débit-Niveau.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 LOGICIEL KARSTMOD ET LA MODÉLISATION PLUIE-DÉBIT

Le logiciel (ou plateforme) KarstMod est développé dans le cadre du SNO Karst (Mazzilli et al., 2017), accessible gratuitement sur <http://www.sokarst.org/>. Le logiciel propose la transformation de la pluie en débit, en utilisant des lois de vidange de réservoirs. L'écoulement dans l'aquifère karstique, du sol jusqu'à la source, est simulé en respectant la structure des réservoirs en série ou en parallèle définie par l'utilisateur (Figure 1). Cette structure découle directement du modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéologique préalablement établi pour le cas d'étude investigué.

KarstMod propose une série d'outil pour faciliter le calage des paramètres nécessaires aux simulations, et pour analyser leurs sensibilités. L'utilisateur peut choisir de laisser faire le logiciel de manière quasi-autonome, ou au contraire de contraindre la liberté de variation des paramètres de calage. Ce choix dépend du problème à traiter et de l'expérience de l'utilisateur. Les données d'entrée indispensables au modèle sont la pluie et l'ETP, ainsi qu'un ordre de grandeur de la surface du bassin versant. Le calage est fait en comparant le débit simulé au débit observé (la série peut être incomplète, ce qui est un atout majeur car il est rare d'avoir des chroniques de débit sans lacune). Par contre, les séries de pluie et d'ETP doivent être complètes, sans lacune. Le modèle accepte aussi des débits de pompage. Cette démarche de calage, classique en modélisation, utilise diverses fonctions objectif pour estimer la pertinence des résultats obtenus. La série de données est généralement scindée en trois parties : une première partie pour atteindre les niveaux initiaux du modèle, c'est la période de chauffe (warm-up en anglais), une seconde partie pour le calage des paramètres (calibration en anglais), et une dernière partie des données pour valider le modèle (validation en anglais). En mode automatique, KarstMod réalise un nombre important de tirages de solutions possibles pour obtenir le meilleur calage sur la période prédéfinie, dans une démarche du type Monte-Carlo.

Ensuite, une fois le modèle calé, celui-ci peut être utilisé en mode « Run », c'est-à-dire que le modèle précédemment calé est appliqué pour simuler des scénarios. Dans ce cas, seules les données de pluie, d'ETP et éventuellement de pompage sont nécessaires ; le modèle simule alors le débit pour le scénario imposé par l'utilisateur (par exemple : comment réagit la source si il ne pleut plus pendant un an...).

Les modèles Pluie-Débit étant basés sur la modélisation de la vidange de réservoirs, il est donc possible d'assimiler les niveaux d'eau des réservoirs à des niveaux d'eau dans certains compartiments de l'aquifère. KarstMod fournit donc également les niveaux d'eau des réservoirs à l'utilisateur. Enfin, le logiciel fournit les débits internes du modèle, c'est-à-dire le débit transitant par chaque réservoir, qui peuvent être vus comme des fractions de l'écoulement plus ou moins rapide au sein de l'aquifère.

La plateforme KarstMod a évolué depuis 2014, date de mise en ligne de la première version, avec plus d'options de modélisation et une amélioration des schémas numériques de résolution des équations. Les dernières versions depuis un an ont peu évolué, mais le schéma numérique a été légèrement revu afin d'être à la fois plus performant et plus stable. Ainsi, dans le cadre du projet Dardennes, Cécile Baudement a publié ses résultats de thèse en utilisant la version V2.0.19. Dans le présent rapport, les simulations ont été réalisées avec la version V.2.2.0.t ou V.2.2.0.u.

Dans une configuration classique, le flux d'eau entre les réservoirs est simulé suivant une loi du type :

$$Q_{AB} = k_{AB} * \left(\frac{A}{L_{ref}} \right)^{\alpha_{AB}}$$

- Q_{AB} : Débit spécifique entre le réservoir A et B (mm/j)
- k_{AB} : Coefficient de récession de A vers B (mm/j). Un coefficient de récession est normalement en unité (j⁻¹) dans une loi classique de type Maillet ; ici il prend l'unité mm/j et se trouve corrigé par une longueur unitaire de référence L_{ref} . Cet artifice mathématique est imposé par la structure modulaire du logiciel KarstMod.
- L_{ref} : Longueur unitaire de référence (mm).
- A : Hauteur d'eau dans le réservoir A (mm)
- α_{AB} : Coefficient de non linéarité de l'écoulement de A vers B. Si $\alpha_{AB}=1$, l'écoulement est linéaire.

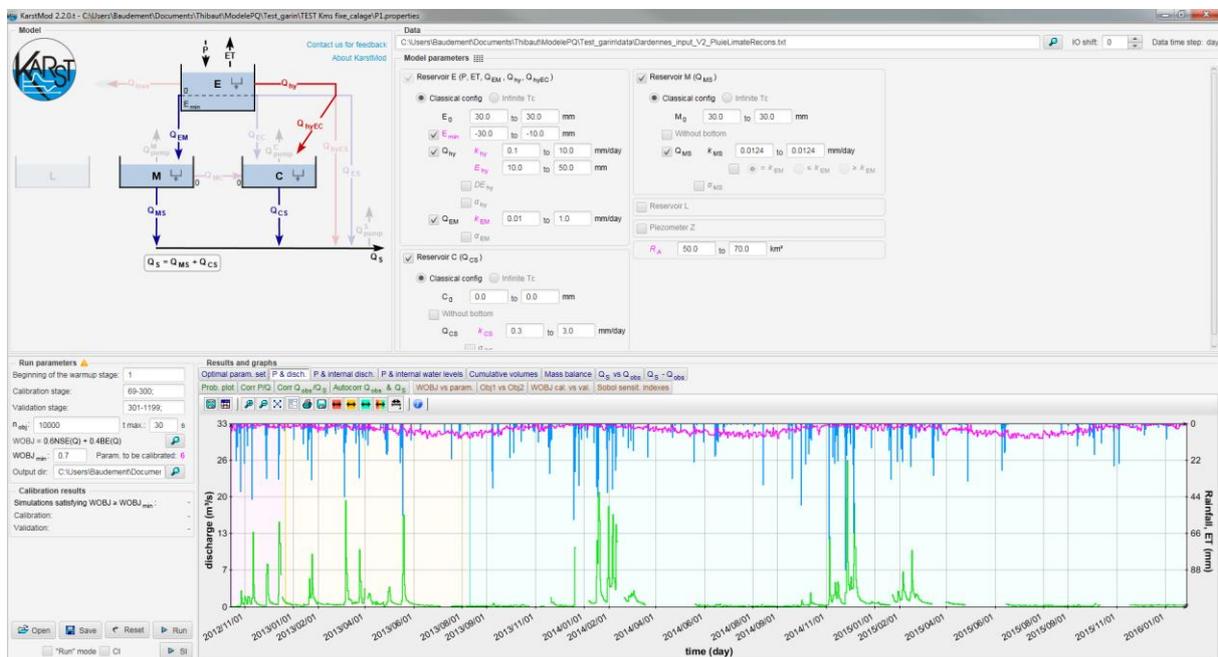


Figure 1: Interface du logiciel KarstMod V2.2.0.t. Dans cet exemple, trois réservoirs sont utilisés : le réservoir E qui reçoit la pluie (P), laisse partir l'évapotranspiration (ET) et alimente les réservoirs M et C, le réservoir M représentant l'écoulement lent (ou M comme matrice) vers la source, le réservoir C représentant l'écoulement rapide (ou C comme Conduit) vers la source (S).

2.2 LE DÉBIT DES SOURCES DE DARDENNES, LE DÉBIT DE POMPAGE ET LE DÉBIT ALIMENTANT LE LAS AU BARRAGE DE DARDENNES

2.2.1 Le calcul du débit des sources

Le système karstique de Dardennes est drainé par les sources de Dardennes, situées au fond d'un plan d'eau artificiel formé par le barrage de Dardennes mis en service en 1912 pour alimenter en eau potable la ville de Toulon. En amont des sources, le Ragas est une source karstique temporaire de trop-plein qui s'écoule durant les épisodes de crue (l'altitude de débordement est à 149 mètres NGF). Le niveau du lac de Dardennes varie entre 94 mètres d'altitude lorsqu'il est vide et 123 mètres lorsqu'il est plein. Une fois plein, l'eau du lac est évacuée gravitairement par un seuil à 123m, puis rejoint le Las, la rivière en aval qui va s'écouler jusqu'à la mer en traversant Toulon (Figure 2). Durant l'été, le débit naturel des sources est inférieur au débit de pompage pour l'alimentation en eau potable ; l'usine AEP située au pied du barrage prend alors l'eau du lac artificiel et le niveau du lac varie donc en fonction des prélèvements AEP. L'usine peut aussi ponctuellement ouvrir les vannes inférieures du barrage pour vidanger le lac. Dans ce contexte, la mesure directe du débit des sources de Dardennes n'est pas possible.

Dans le cadre du projet Dardennes, le « débit observé » (ou mesuré) des sources de Dardennes, indispensable pour la modélisation Pluie-Débit et nécessaire également pour établir des bilans hydrologiques, a dû être en partie calculé par des mesures complémentaires. La méthodologie est donnée dans la thèse de Cécile Baudement (2018). Nous ne retiendrons ici que le principe :

Le débit des sources de Dardennes est la somme du débit qui part vers le Las, du débit qui est pris par le captage de l'usine AEP, l'évaporation du lac de Dardennes et la variation de volume d'eau stocké dans le lac.

Lorsque le lac ne déborde pas, le débit des sources est alors assez simple à calculer car toutes les données sont disponibles. Par contre, lorsque le lac déborde, une petite erreur de mesure de la hauteur d'eau au-dessus du déversoir du lac engendre une grande erreur d'estimation du débit évacué. Le débit vers le Las a donc alors été obtenu par une station de mesure installée directement dans le Las en aval. L'hydrologie de terrain étant dépendante des données accessibles, ce débit du Las est mesuré à la station de Lagoubran (au niveau de Toulon) et nécessite une correction pour obtenir uniquement le débit venant de Dardennes (en enlevant l'arrivée d'eau par ruissellement urbain et la source de Saint Antoine). On parlera alors de calcul du débit des sources de Dardennes par déconvolution du débit du Las.

Seul le débit moyen journalier est accessible. C'est une échelle temporelle qui permet de travailler correctement pour l'évaluation de bilans hydrologiques, mais qui ne permet pas d'être précis sur les débits de pointes (la moyenne journalière ayant pour effet de minimiser le débit de pointe dans des systèmes hydrologiques aux réactions temporelles inférieures à la journée).

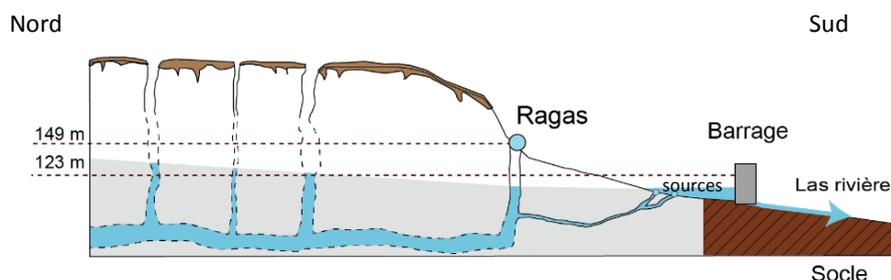


Figure 2 : Vue en coupe schématique (sans échelle) du système karstique de Dardennes. L'eau des sources de Dardennes sort dans le plan d'eau formé par le barrage de Dardennes. Le niveau du lac varie entre 94m et 123m d'altitude ; au-dessus de 123m, l'eau déverse vers le Las. En cas de fortes crues, le niveau d'eau monte dans le conduit karstique du Ragas situé 500 mètres en amont, jusqu'à déborder lorsqu'il dépasse l'altitude 149m.

2.2.2 Le débit utilisé en fonction du modèle KarstMod considéré

Le débit réel des sources de Dardennes n'est jamais observable sur le terrain car une partie de l'eau est en permanence captée par l'usine AEP. Cette configuration particulière, à la fois du mode de calcul du débit observé, et du stockage/déstockage dans la retenue de Dardennes, a contribué à proposer deux modèles Pluie-Débit dans le cadre du projet Dardennes (qui seront présentés plus en détail dans les chapitres suivants de ce rapport) :

1- un modèle va simuler le débit total des sources, sans différencier la part qui va vers le Las (et l'évaporation du lac) ou vers le captage AEP,

2- un second modèle va simuler le débit des sources qui part vers le Las (et l'évaporation du lac), et va stocker/déstocker l'eau du lac en fonction du prélèvement AEP.

Dans le premier modèle, le débit capté par l'usine AEP et le stockage/déstockage de l'eau du lac sont pris en compte et incorporés directement dans le calcul préalable du débit total des sources de Dardennes (avant même d'utiliser la plateforme KarstMod). Dans le second modèle, le débit n'est plus celui des sources de Dardennes, mais uniquement le débit qui part vers le Las ; le captage AEP et le stockage/déstockage du lac étant pris en compte dans la plateforme KarstMod.

2.3 LES DONNÉES DISPONIBLES

2.3.1 Les débits

Un autre facteur influence les données de débit utilisables, il s'agit des périodes de fonctionnement des instruments et des pannes engendrant des manques de données. Deux grandes périodes sont distinguées :

- Du 14/10/2012 au 07/05/2015, le débit des sources de Dardennes qui part vers le Las est obtenu par déconvolution du débit du Las mesuré à Lagoubran. Ce sont les données utilisées dans la thèse de C. Baudement.
- Du 07/05/2015 au 11/03/2018, la station du Las à Lagoubran n'est plus pleinement opérationnelle. Lorsque le lac déborde, le débit des sources de Dardennes débordant par le seuil du barrage n'est donc plus disponible. La série de données est donc limitée aux périodes où le lac ne déborde pas. Dans ce cas, le débit vers le Las se limite aux fuites sous le barrage et par l'ancien tunnel du Ragas, qui sont estimées par une relation hydraulique avec le niveau d'eau dans le lac. Fort heureusement, la période mai 2015 à mars 2018 a été une période peu pluvieuse, avec des forts étiages prolongés et très peu de débordement du lac. Des données représentatives sont donc disponibles pour cette période de faible débit.

2.3.2 Le débit de captage AEP et les hauteurs d'eau

Le débit de captage AEP est fourni par Véolia au pas de temps journalier depuis 1989 (le débit d'eau brute est utilisé lorsqu'il est disponible). Le débit de captage sera utilisé dans le second modèle KarstMod. Une erreur subsiste dans les données utilisées car le débit vidangé par les vannes de fond du barrage au cours d'opérations ponctuelles n'est pas connu. Seule la vidange du 22 mai 2017 au 10 juin 2017 a été suivie en détail (c'est l'objet de la partie 3.3). Le débit de captage a été corrigé sur cette période pour inclure le débit de vidange vers le Las, en assimilant ainsi ce débit de vidange comme une part d'eau distribuée et non stockée dans le lac.

Véolia fournit aussi le niveau du lac mesuré une fois par jour, vers 9h00 le matin, par un opérateur présent au barrage. En 2013-2014, l'université avait mis une sonde de mesure au pas d'acquisition de 15 minutes au fond du lac dans le tube de la source Platane, mais celle-ci est tombée en panne et n'a pas été renouvelée étant donné les difficultés techniques pour aller l'installer au fond du lac. Depuis 2016, Véolia a installé un radar qui mesure et enregistre le niveau de l'eau du lac en permanence.

Le Ragas a fait l'objet d'un suivi en continu depuis 2012, avec l'installation de deux sondes CTD (conductivité électrique, température et niveau d'eau) mesurant au pas de temps de 15 minutes

(référencement altitudinal des sondes à partir de octobre 2012). Les sondes sont installées à l'altitude 92 mètres, à proximité de la prise d'eau souterraine du tunnel du Ragas. La relève des données se fait en connectant les sondes sur un ordinateur de terrain par descente spéléologique dans le gouffre du Ragas (suivi technique par T. Lamarque, SpéléH2O). Les deux sondes installées au même emplacement permettent de vérifier qu'il n'y a pas de dérive des mesures au cours du temps (en plus des mesures ponctuelles lors des visites de terrain).

2.3.3 La pluie et l'ETP

Les précipitations étant un phénomène hétérogène, la pluie utilisée dans les modèles Pluie-Débit est une pluie composite, calculée à partir des mesures faites sur les trois pluviomètres disponibles autour du site d'étude : la station Météo-France de Toulon-La Mitre, la station Météo-France du Castellet aérodrome et la station installée par l'université dans le bassin versant à La Limate (plateau de Siou-Blanc, Signes). Le détail est donné dans la thèse de C. Baudement. La valeur moyenne des trois stations est utilisée.

L'ETP est fournie par Météo-France. Les données de Toulon et du Castellet aérodrome sont très proches. L'ETP est prise à la station Le Castellet aérodrome, disponible de 2004 à 2018. Sur la période 1998-2003, l'ETP de Toulon est utilisée, avec une correction linéaire par rapport à la station du Castellet.

3 RAPPEL SUR LE FONCTIONNEMENT DU KARST DE DARDENNES ENTRE 2012 ET 2018

Le projet Dardennes a bénéficié des mesures faites sur la source de trop-plein du Ragas dès octobre 2012, et de l'ensemble des données historiquement acquises par Véolia, Météo-France et l'université (sous la responsabilité de B. Arfib). Dans son travail de thèse, Cécile Baudement (2018) s'est concentrée sur la période 2012-2016. Elle propose ainsi une synthèse exhaustive de la connaissance du système karstique de Dardennes. Dans ce rapport, les données acquises sur les sources de Dardennes sont complétées jusqu'en mars 2018 (Figure 4). La nouvelle période de données disponible, de 2016 à 2018, offre la possibilité de tester les modèles sur une période particulièrement sèche.

Ce chapitre n'a pas pour objectif de rappeler toutes les caractéristiques du fonctionnement du karst de Dardennes ; le lecteur est renvoyé aux thèses de C. Baudement et J. Jouves. Ici, trois compléments sont exposés brièvement : (1) les conditions météorologiques sur la période d'observation du projet Dardennes, de 2012 à 2018, (2) les chroniques disponibles de niveau du lac, niveau du Ragas et débit des sources de Dardennes, en relation avec les précipitations, (3) une analyse de l'effet de la vidange du lac effectuée en mai et juin 2017.

3.1 LES PRÉCIPITATIONS ENTRE 2012 ET 2018

Les précipitations entre 2012 et 2018 peuvent être classées en deux périodes à l'échelle annuelle. Les tableaux ci-dessous (Tableau 1, Tableau 2) synthétisent les précipitations annuelles sur les trois stations Toulon, Castellet aérodrome et Limate, par année civile et par cycle hydrologique (1^{er} septembre au 31 août de l'année suivante). Les cycles hydrologiques 2012 à 2015 ont été particulièrement pluvieux, avec 944 à 1005 mm en moyenne sur les 3 stations ; alors que les deux cycles suivants, de 2015 à 2017, ont été beaucoup plus secs avec seulement 477 à 600 mm en moyenne, comparables aux cycles 2003-2004 et 2007-2008 (Figure 3). Ces valeurs sont à comparer avec la moyenne de pluie annuelle calculée sur les cycles hydrologiques, entre 1989 et 2018 : 633 mm/an à Toulon La Mitre, 681 mm/an au Castellet aérodrome. Il y a donc quasiment un rapport du simple au double entre les années sèches et les années humides au Castellet, et du simple au triple sur la station de Toulon.

À l'échelle d'une année civile, la pluie cumulée au cours de l'année 2017 à la station de Toulon La Mitre a atteint un record de minimum de pluie annuelle, avec seulement 262 mm, ce qui correspond à la plus petite valeur de cumul de pluie annuelle entre 1946 et 2018. La même année (2017), les stations de Le

Castellet et La Limate enregistreraient également de faibles valeurs, mais tout de même au-dessus de 466mm (Tableau 1)

Année civile	Toulon La Mitre (mm/an)	Le Castellet aérodrome (mm/an)	La Limate (mm/an)	Moyenne des trois stations (mm/an)
2012	609	584	729	641
2013	722	884	1238	948
2014	1123	1038	1380	1180
2015	510	562	661	578
2016	439	646	764	616
2017	262	466	510	412

Tableau 1 : Pluie annuelle par année civile sur les stations météorologiques de Toulon La Mitre (Météo-France), Le Castellet aérodrome (Météo-France) et La Limate (Université)

Année par cycle hydrologique (01 sept. N – 31 août N+1)	Toulon La Mitre (mm/an)	Le Castellet aérodrome (mm/an)	La Limate (mm/an)	Moyenne des trois stations (mm/an)
2012 - 2013	813	833	1187	944
2013 - 2014	757	978	1178	971
2014 - 2015	1026	868	1122	1005
2015 - 2016	376	439	615	477
2016 - 2017	375	679	746	600
2017 - 2018	618	688	781*	696
Moyenne interannuelle 1989-2018	633	681	-	-

Tableau 2 : Pluie annuelle par cycle hydrologique (01 septembre N au 31 août N+1) sur les stations météorologiques de Toulon La Mitre (Météo-France), Le Castellet aérodrome (Météo-France) et La Limate (Université) (* les données de La Limate s'arrêtent le 06 juillet 2018).

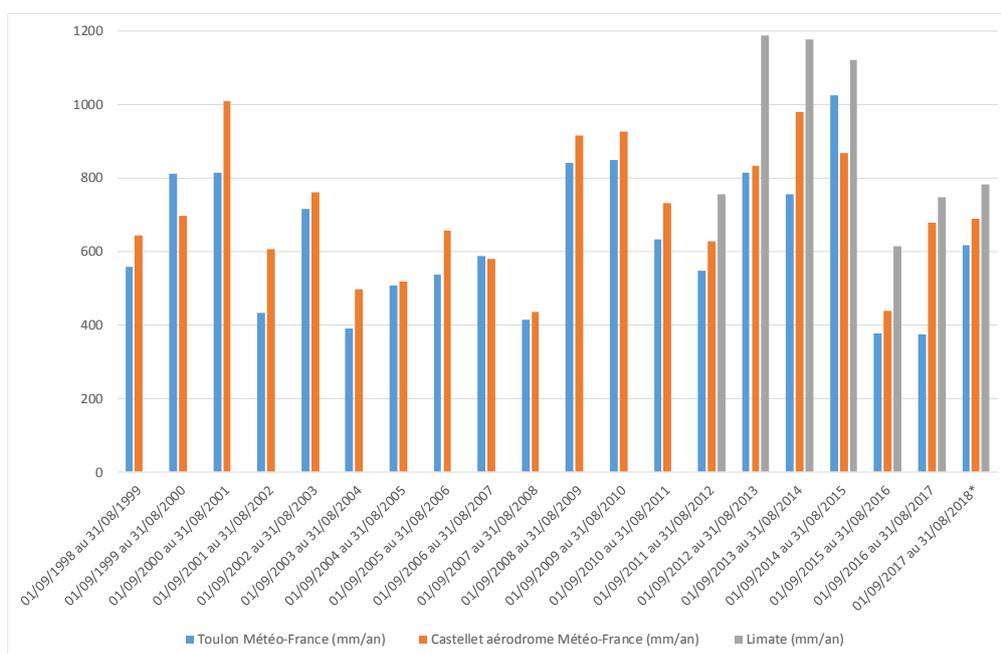


Figure 3 : Précipitations cumulées par année hydrologique (01 septembre N au 31 août N+1) pour les stations de Toulon La Mitre, Le Castellet aérodrome et La Limate (* les données de La Limate s'arrêtent le 06 juillet 2018).

3.2 LE FONCTIONNEMENT DU KARST DE DARDENNES ENTRE 2012 ET 2018

La Figure 4 présente l'évolution de octobre 2012 à mars 2018 du débit des sources de Dardennes (comme présenté dans le chapitre 2, il s'agit du débit total incluant le débit capté pour l'AEP et le stockage/déstockage du lac), le niveau d'eau dans le lac et le Ragas, et la pluie moyenne des trois stations Toulon La Mitre, Castellet aérodrome et La Limate.

Les débits de crue sont disponibles seulement sur la période de 2012 à mai 2015 ; le débit des crues de mai 2015 à mars 2018 n'est pas mesuré. Les périodes de crue peuvent être visualisées sur la Figure 4

grâce au niveau d'eau dans le Ragas. En effet, le niveau d'eau de cette source de trop-plein illustre semi-quantitativement l'ampleur des crues, car plus le niveau d'eau est haut, plus le débit est important aux sources de Dardennes.

En rapport avec les deux périodes de précipitations précédemment décrites, la réaction des sources de Dardennes (ou du Ragas) est également scindée en deux périodes (Figure 4) :

(1) De octobre 2012 à avril 2015, de fortes crues se succèdent régulièrement durant les hautes-eaux hivernales. Le Ragas déborde plusieurs fois par an. La plus forte crue est observée le 27/11/2014, avec un débit moyen journalier de l'ordre de 26 m³/s et une hauteur maximale instantanée du Ragas à 152,2 m (soit 3,2 mètres au-dessus du seuil de débordement).

(2) De mai 2015 à février 2018, le Ragas ne déborde pas une seule fois, signe qu'aucune crue d'ampleur équivalente aux années précédentes n'a eu lieu, alors que certains événements pluvieux sont intenses (par exemple en février et novembre 2016).

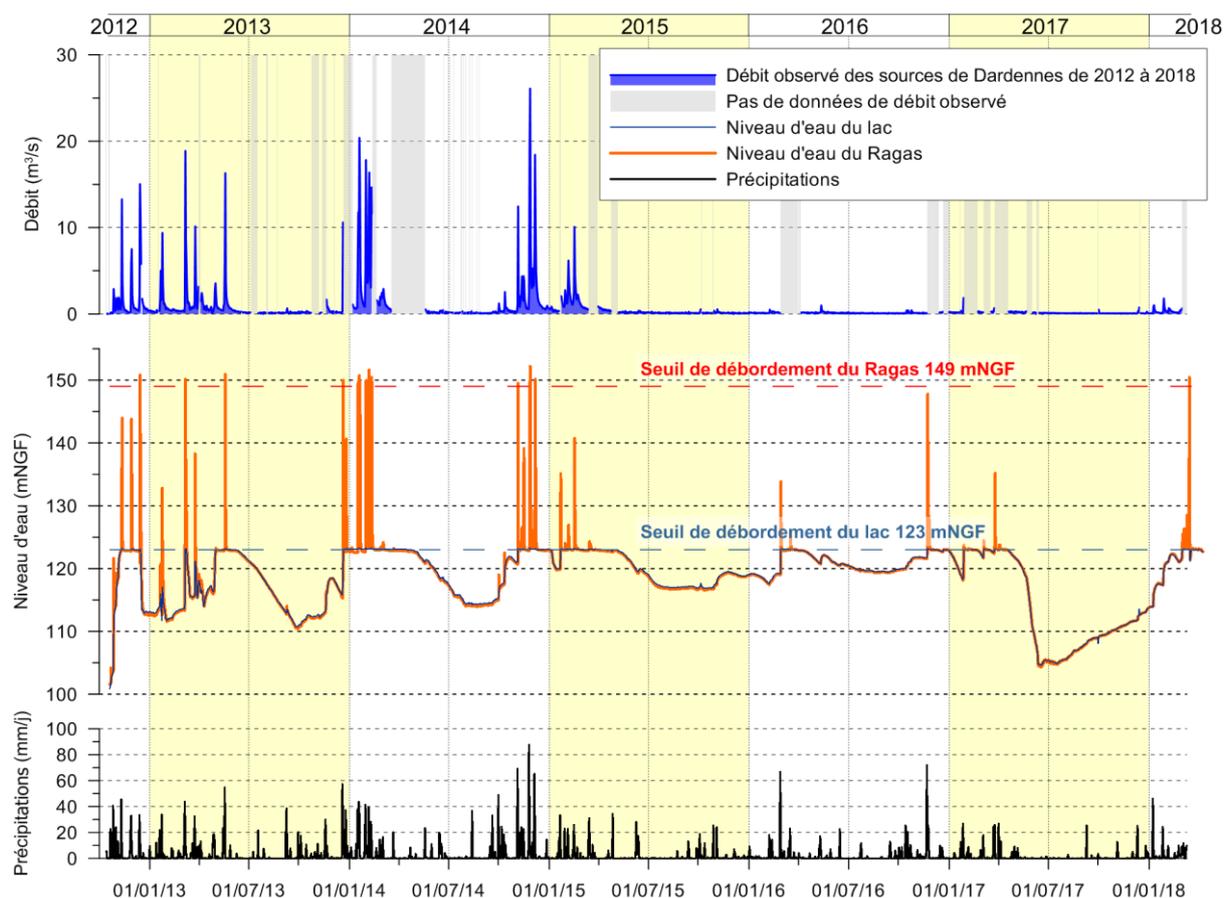


Figure 4 : Chronique de pluie, niveau d'eau et débit pour l'étude du karst de Dardennes entre octobre 2012 et mars 2018. Les précipitations journalières sont la moyenne des stations de Toulon La Mitre, Le Castellet aérodrome et La Limate. Le niveau d'eau dans le lac de Dardennes est mesuré une fois par jour par Véolia. Le niveau d'eau du Ragas est enregistré automatiquement toutes les 15 minutes. Les niveaux sont exprimés en altitude. Le débit observé est le débit total des sources de Dardennes au pas de temps journalier, incluant le débit vers le Las à l'aval du barrage, le débit capté pour l'AEP, l'évaporation sur le lac et le stockage/déstocage du lac.

L'analyse de la relation entre la hauteur d'eau maximale dans le Ragas (représentatif du débit maximal des sources) et le cumul de précipitations des événements générant les crues a été présentée dans la thèse de C. Baudement. Elle permet de montrer que les événements pluvieux provoquent des crues d'autant plus fortes en fonction de différents paramètres : (a) les événements pluvieux inférieurs à environ 38 mm ne font jamais déborder le Ragas, (b) plus le niveau du lac avant la crue est haut, plus la crue est forte, (c) à l'étiage, le stockage des premières pluies dans l'aquifère est plus important qu'en période de hautes-eaux.

Ainsi, durant la période moins pluvieuse d'avril 2015 à février 2018, les pluies sont majoritairement stockées dans l'aquifère et le sol, et provoquent uniquement des crues de moindre importance par rapport à la période précédente. L'acquisition de données sur ces deux périodes de régime pluviométrique différent est particulièrement intéressante car elle va permettre de tester la robustesse des modèles vis-à-vis de cette contrainte pluviométrique.

En dehors des périodes de crue, il faut retenir de l'analyse des courbes de la Figure 4 que l'aquifère karstique de Dardennes a chaque année un débit d'étiage de l'ordre de 100 l/s, variable en fonction de la pluviométrie annuelle. Sur la période peu pluvieuse 2015-2017, le débit naturel des sources de Dardennes en octobre 2017 était de l'ordre de 70 l/s, ce qui donne une valeur relativement importante étant donné les faibles précipitations sur les 2 années précédentes.

Par ailleurs, le niveau d'eau du lac varie entre 100 mètres et 123 mètres (avec quelques centimètres au-dessus du seuil de débordement du barrage). Ce niveau d'eau est contraint par le débit naturel des sources de Dardennes qui alimentent le lac, le seuil de débordement du lac, le débit de captage de l'usine AEP de Dardennes et la gestion du niveau d'eau du lac par ouverture des vannes de fond pour vidange dans le Las. C'est pourquoi, d'une année sur l'autre, le niveau d'eau du lac ne baisse pas toujours à la même côte. Le niveau du lac a été baissé à une côte particulièrement basse en septembre 2012 lors de la réalisation de tests de pompage par la prise d'eau du tunnel du Ragas, et en mai et juin 2017 pour l'inspection décennale du barrage. À certaines périodes, le lac est vidangé par le gestionnaire du barrage ; ces périodes sont variables d'une année sur l'autre et le débit vidangé n'est pas mesuré au barrage. Ces opérations de vidange vont compliquer les simulations de niveau d'eau avec les modèles numériques lorsque les données de vidanges ne sont pas disponibles. Les principales périodes de vidanges sont : l'année 2013 durant les études de stabilité du barrage, du 5 au 13 janvier 2015 durant l'étude des relations hydrauliques du Las et de la source Saint-Antoine, du 22 mai au 10 juin 2017 lors de l'inspection décennale du barrage.

3.3 ESTIMATION DU DÉBIT DE DRAINAGE DE L'AQUIFÈRE LORS DES VIDANGES PAR LES VANNES DE FOND DU BARRAGE DE DARDENNES DU 22/05/17 AU 13/06/17

Cette partie est détaillée en annexe à la fin de ce rapport. Ici, seulement les résultats principaux sont repris.

3.3.1 Principes de mesure et objectifs

En prévision de l'inspection décennale du barrage de Dardennes en juin 2017, le niveau du lac a été baissé rapidement par un lâcher de barrage via les vannes de fond. L'eau lâchée alimentait le Las, provoquant ainsi une augmentation de débit qui a été mesurée sur la station de Lagoubran. Deux périodes de vidange ont été enregistrées (Figure 5) :

- Du 22 mai 2017 au 2 juin 2017, le niveau d'eau du lac est descendu de 8,0 m.
- Du 10 au 13 juin 2017, le niveau d'eau est descendu de 2,6m.

Il est proposé de comparer le volume (ou débit) d'eau vidangé dans le las mesuré sur la station de mesure hydrométrique de Lagoubran, avec le volume déstocké du lac mesuré par la baisse du niveau d'eau du lac (bilan du lac). Ce calcul de bilan tient compte du volume d'eau pompé pour l'AEP dans le lac, ainsi que du débit initial des sources de Dardennes qui alimentent en permanence le lac. La différence entre le volume déstocké du lac et le volume réellement évacué vers le Las est interprétée comme une contribution supplémentaire de l'aquifère qui se retrouve ainsi sollicité par la baisse de niveau d'eau (le lac agissant comme une limite hydrogéologique à charge imposée variable).

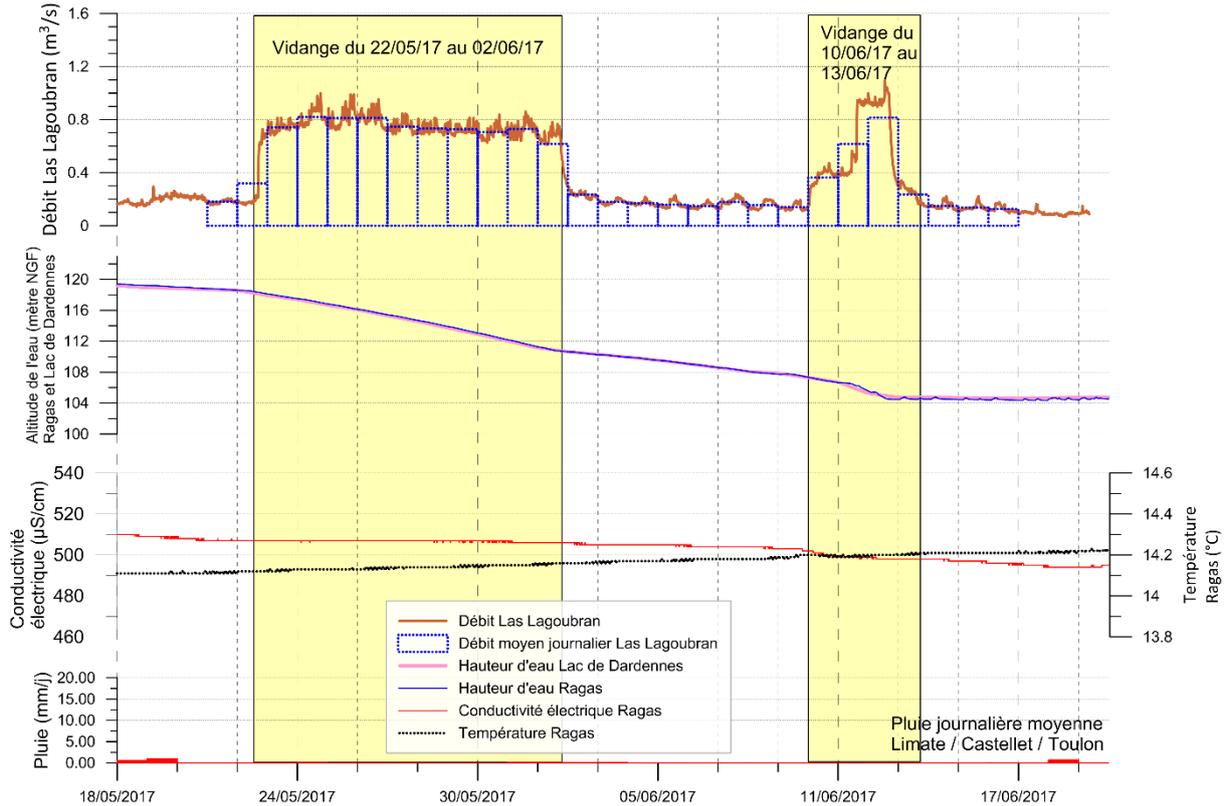


Figure 5 : Evolution au cours du temps du débit du Las mesuré à la station hydrométrique de Lagoubran lors des vidanges du barrage de Dardennes par les vannes de fond en préparation de l'inspection décennale du barrage (mai et juin 2017)

3.3.2 Résultats et interprétation

Sur la tranche d'altitude comprise entre 104 et 118 mètres (2 tranches testées : entre 118m et 110m, puis entre 108m et 104m), la variation du niveau du lac par vidange vers le Las par les vannes de fond a permis de drainer également l'aquifère et de récupérer ainsi un volume d'eau supplémentaire à celui du lac, de l'ordre de 226 000 m³ (dans le temps de réalisation du test, sur 16 jours). A la fin de chaque période de vidange, le débit des sources alimentant le lac n'est pas significativement supérieur au débit avant les tests, ce qui laisse penser que le drainage de l'aquifère a lieu rapidement, c'est-à-dire dans le temps de réalisation du test. C'est donc un volume facilement mobilisable, qui peut être contenu dans le réseau de conduits karstiques. Il est fort probable que d'autres volumes d'eau souterraine soit toujours en cours de drainage à la fin du test, mais avec une dynamique beaucoup plus lente. Ce volume d'eau souterraine drainée dépend également de la connectivité et de la longueur du réseau karstique sollicité, en lien avec les réserves dans la matrice connectée par le réseau karstique.

Par ailleurs, il a été montré dans la thèse de Cécile Baudement (2018) que lorsque le niveau d'eau remonte dans le lac lors des crues (le phénomène inverse à celui de la vidange artificielle), l'eau de recharge de la nappe est en partie stockée dans l'aquifère dans cette zone de battement imposée par les variations du niveau du lac. Ce phénomène limite ainsi l'arrivée de crues éclair aux sources de Dardennes.

4 MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT DES SOURCES DE DARDENNES À PARTIR DE LA STRUCTURE PROPOSÉE PAR BAUDEMMENT (2018)

Ce chapitre a pour objectif de présenter et d'utiliser le modèle Pluie-Débit proposé par Cécile Baudement dans sa thèse de doctorat (2018). Le modèle est utilisé avec la chronique de données d'entrée mise à jour, allant d'octobre 2012 à mars 2018 (les données de la thèse Baudement s'arrêtaient à janvier 2016). Une critique des résultats est proposée, et des solutions pour améliorer le modèle sont proposées dans les chapitres suivants.

4.1 STRUCTURE ET RÉSULTATS DU MODÈLE « BAUDEMMENT_2018 »

La structure du modèle Pluie-Débit proposée par C. Baudement dans sa thèse (2018) a été construite à partir de l'étude géologique, hydrodynamique et hydrochimique du fonctionnement de l'aquifère karstique des sources de Dardennes. Elle comprend un premier réservoir E (Epikarst) qui se vidange vers les réservoirs M (Matrice) et C (Conduit), ces derniers se vidangeant ensuite vers la source (Figure 6). Toutes les lois de vidange ont été prises comme linéaires, afin de minimiser la complexité du modèle et par souci de parcimonie (limiter le nombre de paramètres). Le réservoir E peut avoir un niveau d'eau E_{min} inférieur à 0 permettant de simuler la teneur en eau disponible dans le sol. Ce seuil représente la quantité d'eau disponible pour l'évapotranspiration. Le réservoir M, qui équivaut à la matrice géologique ainsi qu'à des petites fissures et fractures de la zone saturée et non-saturée, permet de simuler la composante lente du débit et donc le débit de base de l'aquifère vers les sources (S). La composante rapide, dynamique, des écoulements est permise par la mise en place du réservoir C qui sert de transfert entre l'épikarst et les sources lorsque le réservoir E atteint un seuil de débordement (E_{SeuilC} ou E_{hy}). Dans le cas des sources de Dardennes, la dynamique du réservoir C s'observe au Ragas et va reproduire les débits de crues. Ainsi, les sources S vont collecter le débit total, somme de la composante lente et de la composante rapide des écoulements. Ce modèle est particulièrement bien adapté pour simuler à chaque pas de temps et au cours du temps les variations du débit de base et du débit de crue. Ce modèle simule le débit total des sources de Dardennes qui a été précédemment défini comme le débit incluant le captage AEP et le stockage/déstockage dans le lac de Dardennes.

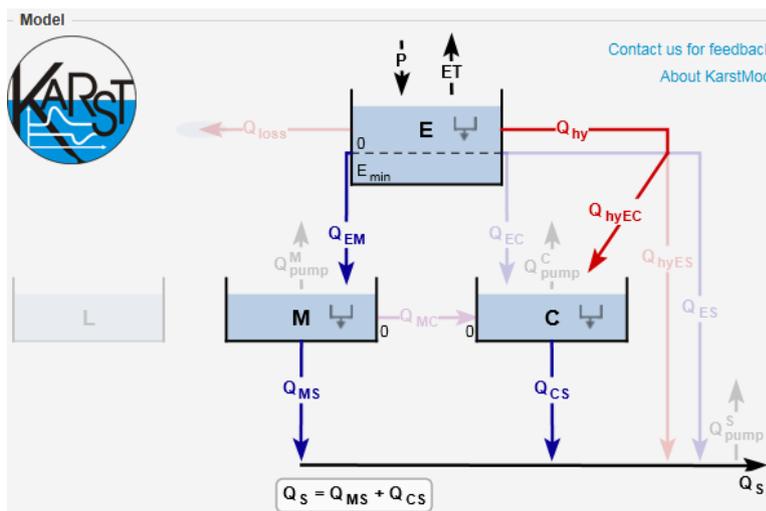


Figure 6 : Schéma conceptuel de modélisation Pluie-Débit de l'aquifère karstique des sources de Dardennes proposé par Baudement (2018)

Dans son travail de thèse, C. Baudement (2018) avait à sa disposition les données de pluies, d'ETP et de débit total des sources de Dardennes entre octobre 2012 et janvier 2016. Elle proposait une période de chauffe du modèle sur les 69 premiers jours et deux périodes de calages du modèle : P1 du 23/12/2012

au 18/10/2013 et P2 du 19/10/2013 au 26/01/2016. Les résultats du calage sur P1 et sur P2 sont donnés dans le Tableau 3.

Paramètre	Signification	Unité	Calage P1	Calage P2
RA	Aire d'alimentation	km ²	68,32	66,23
E _{min}	Niveau d'eau minimum dans le réservoir E (Epikarst)	mm	-18,15	-20,59
E _{SeuilC}	Seuil de niveau d'eau dans le réservoir E pour l'écoulement vers le réservoir Conduit (C)	mm	12,91	11,54
k _{EM}	Coefficient de récession du réservoir E (écoulement vers le réservoir Matrice)	mm/j	1,12 × 10 ⁻¹	1,66 × 10 ⁻¹
k _{EC}	Coefficient de récession du réservoir E (écoulement vers le réservoir Conduit)	mm/j	8,85 × 10 ⁻¹	7,67 × 10 ⁻¹
k _{MS}	Coefficient de récession du réservoir Matrice (écoulement vers la source)	mm/j	1,3 × 10 ⁻²	2,9 × 10 ⁻²
k _{CS}	Coefficient de récession du réservoir Conduit (écoulement vers la source)	mm/j	2,31	2,84

Tableau 3 : Paramètres du calage du modèle Pluie-Débit proposé par Baudement (2018). P1 du 23/12/2012 au 18/10/2013 et P2 du 19/10/2013 au 26/01/2016. Extrait de Baudement (2018), Tableau 3-2.

4.2 SIMULATION AVEC LA VERSION KARSTMOD V2.2.0.T ET SUR LA PÉRIODE 2012 – 2018

4.2.1 Calage du modèle Baudement_V2.2.0.t

Le logiciel utilisé pour la modélisation pluie-débit est la version KarstMod V.2.2.0.t. En incluant les années 2016 à 2018 dans le processus de calage et de validation, il est proposé deux nouvelles périodes :

- P1, période de calage du 22/12/2012 au 30/08/2014, qui représente une période pluvieuse.
- P2, période de calage du 31/08/2014 au 10/03/2018, qui représente une période majoritairement peu pluvieuse.

	Période de calage P1	Période de calage P2
Période de chauffe	Du 14/10/2012 au 21/12/2012 (69 jours)	
Calage	Du 22/12/2012 au 30/08/2014 (70 à 686 jours)	Du 31/08/2014 au 10/03/2018 (687 à 1974 jours)
Validation	Du 31/08/2014 au 10/03/2018 (687 à 1974 jours)	Du 22/12/2012 au 30/08/2014 (70 à 686 jours)

Tableau 4 : Périodes de calage utilisées pour les nouvelles simulations avec le modèle Baudement_V2.2.0.t

Dans la suite de ce rapport, les modèles seront nommés :

* « Baudement_2018 » pour la structure de modèle proposée par Cécile Baudement dans sa thèse, calé avec les données initialement disponibles (2012 à 2016).

* « Baudement_V2.2.0.t » pour la structure de modèle proposée par Cécile Baudement dans sa thèse, calé avec les données de 2012 à 2018, sur les deux nouvelles périodes présentées ci-dessus.

Le calage du modèle Baudement_V2.2.0.t est réalisé de manière automatique dans KarstMod, en utilisant la gamme de paramètres testés définie par Baudement (2018, Voir §3.6.2 du mémoire de thèse). Les résultats du calage des paramètres sont présentés dans le Tableau 5.

Paramètre	Signification	Unité	Baudement	
			V2.2.0.t	V2.2.0.t
			Période de calage	
			P1	P2
R_A	Aire d'alimentation	km ²	69,4	66,4
E_{min}	Niveau d'eau minimum dans le réservoir E (Epikarst)	mm	-15,1	-27,2
$E_{hy} = E_{SeuilC}$	Seuil de débordement du réservoir E vers le réservoir C (Conduit)	mm	23,5	26,3
k_{EM}	Coefficient de récession du réservoir E vers le réservoir M (Matrice)	mm/j	0,131	0,109
$k_{hy} = k_{EC}$	Coefficient de récession du réservoir E vers C (Conduit)	mm/j	1,97	0,806
k_{MS}	Coefficient de récession du réservoir M vers S (Source)	mm/j	0,012	0,013
k_{CS}	Coefficient de récession du réservoir C vers S (Source)	mm/j	1,79	1,64

Tableau 5 : Valeurs des paramètres calés selon les périodes de calages P1 (22/12/2012 au 30/08/2014) et P2 (31/08/2014 au 10/03/2018) avec le modèle Baudement_V2.2.0.t.

En se reportant au Tableau 3 et au Tableau 5, les paramètres calés par les deux modèles sont assez similaires sachant que les périodes de calages et le jeu de données ont été modifiés entre les deux simulations.

La performance du modèle est obtenue à l'aide d'une fonction objectif (W_{obj}) composite, utilisant le critère de Nash (NSE) et l'erreur sur les volumes (BE) : $W_{obj} = 0,6.NSE + 0,4.BE$

Les paramètres du modèle ont donc été calés en tenant compte du comportement dynamique du karst (NSE), tout en minimisant l'erreur sur le bilan hydrique (BE). Le seuil de coupure de la fonction objectif est fixé à $W_{obj} > 0,7$.

Le Tableau 6 présente ces résultats.

	Baudement_V2.2.0.t	
	Période de calage	
	P1	P2
Wobj Calage (ou calibration)	0,88	0,89
Wobj Validation	0,68	0,76

Tableau 6 : Valeurs des fonctions objectifs lors du calage du modèle Baudement_V2.2.0.t

4.3 CRITIQUE DU MODÈLE BAUEMENT (2018) SUR LA SIMULATION DU DÉBIT DE CRUE

Les débits simulés sont représentés graphiquement sur la Figure 7. De façon générale, les simulations Baudement_2018 et Baudement_V2.2.0.t sont très proches. La prise en compte des nouvelles données n'a pas amélioré sensiblement les résultats du modèle.

Dans le détail, les deux modèles ne donnent pas de différence notable avec le calage sur les périodes P1, c'est-à-dire le calage du 23/12/2012 au 18/10/2013 pour Baudement_2018 et du 22/12/2012 au 30/08/2014 pour Baudement_V2.2.0.t. En effet, ces périodes de calage P1 restent incluent dans une même période météorologique, avec des fortes précipitations hivernales. Ainsi le modèle calé sur la période P1 simule bien les pics de crue.

A l'inverse, les modèles calés sur les périodes P2 simulent mal les pics de crue, ce qui s'explique par le régime hydrologique moins pluvieux de la période P2. Les pics de crues sont systématiquement sous-estimés entre 2013 et 2015. Une différence apparaît entre les simulations Baudement_2018 et

Baudement_V2.2.0.t : le premier modèle engendre des pics de crue non observés durant les périodes d'été.

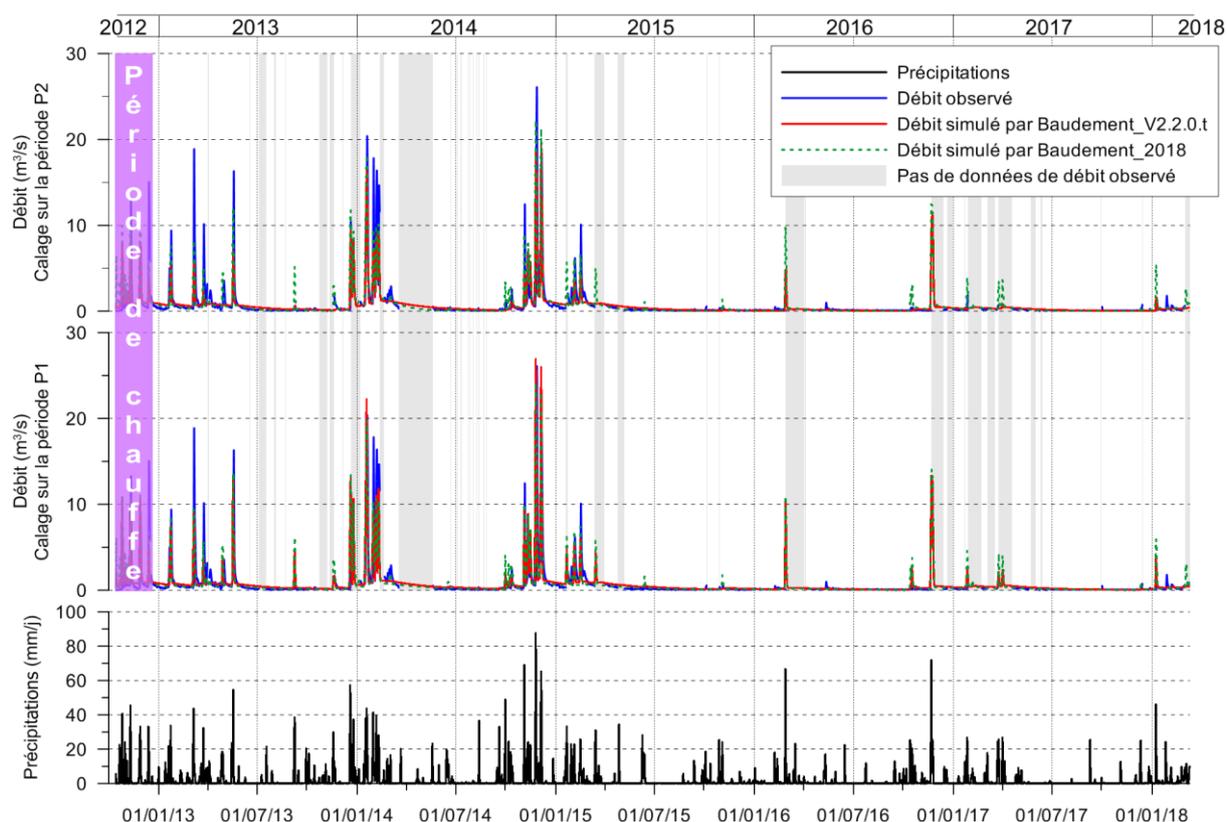


Figure 7 : Débits observé et simulés par les modèles Baudement_2018 et Baudement_V2.2.0.t pour les deux périodes de calage

4.4 CRITIQUE DU MODÈLE BAUDEMMENT (2018) SUR LA SIMULATION DU DÉBIT D'ÉTIAGE

La Figure 8 reprend les données de la Figure 7, en zoomant sur l'axe des débits observés et simulés sur une échelle de 0 à 1 m³/s uniquement. Ce faisant, il est ainsi possible de voir les résultats des deux modèles, toujours en utilisant les deux périodes de calages, en s'intéressant particulièrement aux périodes d'été. Il apparaît clairement que les modèles Baudement_2018 et Baudement_V2.2.0.t ne simulent pas de manière pleinement satisfaisante les écoulements observés (Figure 8).

Deux éléments principaux se remarquent :

- Le modèle Baudement_2018 simule des débits qui tendent vers 0 rapidement. Or, d'après les mesures de débit à l'été (données fiables car liées au débit d'exploitation de l'usine AEP), les sources de Dardennes fournissent des débits de l'ordre de 70 à 100 l/s même après une longue période d'été. Le modèle devrait donc être capable de simuler ces débits d'été.
- Le modèle Baudement_V2.2.0.t donne une surestimation de la décrue, ainsi qu'un tarissement perfectible.

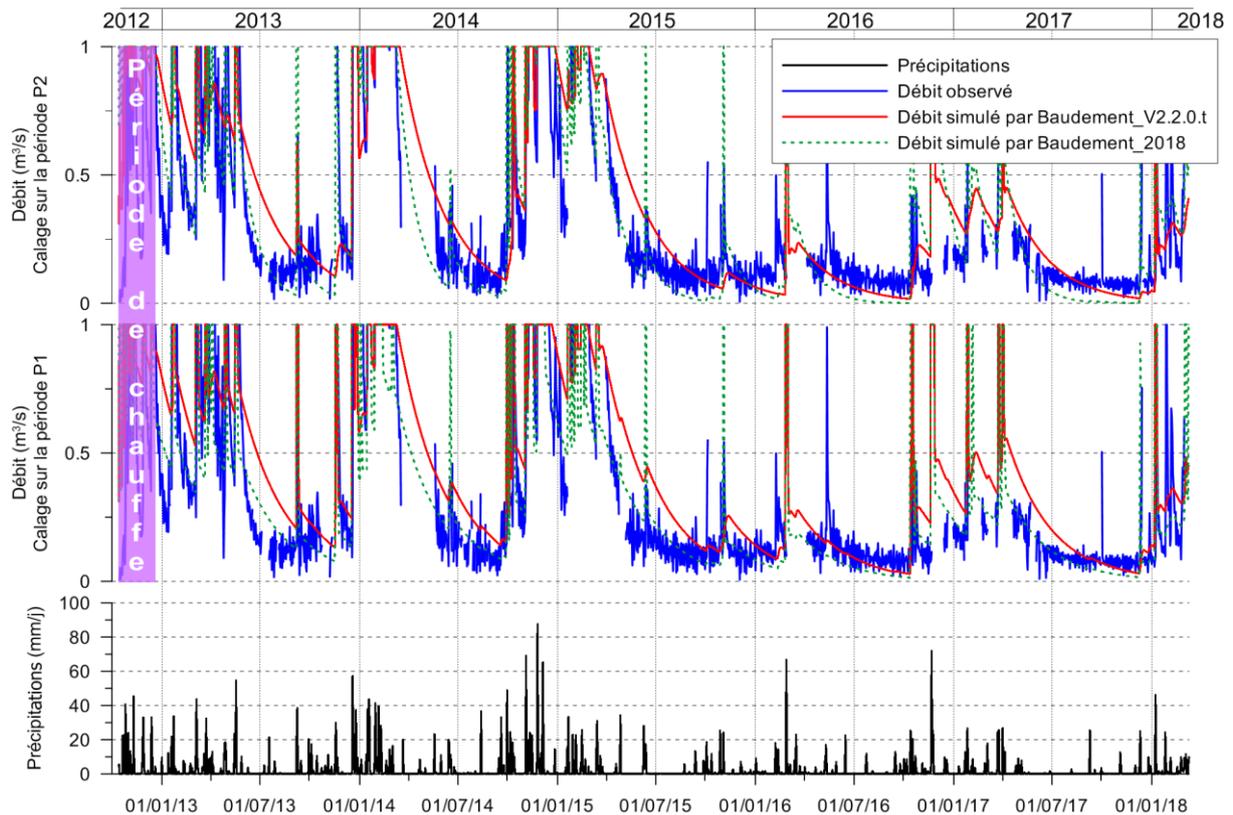


Figure 8 : Zoom sur les périodes d'étéages simulées par les modèles Baudement_2018 et Baudement_V2.2.0.t

➔ En conclusion de l'analyse des résultats des modèles Baudement_2018 et Baudement_V2.2.0.t, il apparaît que ces modèles restent perfectibles sur la simulation du débit d'étéage. Dans la structure de modèle utilisée, le débit d'étéage correspond à la circulation d'eau du réservoir matrice M vers la source S, Q_{MS} (Figure 6). Il doit donc être possible d'optimiser la simulation de Q_{MS} en fixant un coefficient de récession K_{MS} obtenu sur les données observées. Pour cela, la méthode de Mangin (1975) a été utilisée ; les résultats sont présentés dans le chapitre suivant. Cette méthode consiste à caler un coefficient de récession sur les données de débit lors du tarissement de la source karstique, pour chaque étéage annuel.

5 CALAGE D'UN COEFFICIENT DE RÉCESSION D'APRÈS LA MÉTHODE DE MANGIN

L'analyse critique des modèles Baudement_2018 et Baudement_V2.2.0.t a permis de mettre en évidence la nécessité d'améliorer la simulation du débit des sources de Dardennes en période d'étéage.

Pour résoudre ce biais, une optimisation de K_{MS} , coefficient de récession entre le réservoir M et la source S, a été mise en œuvre. Cela s'explique par la dynamique du système de Dardennes et le schéma proposé dans lequel la matrice est une structure de stockage et alimente la source lentement au cours du temps, tandis que le conduit est utilisé en tant que structure de transfert uniquement en période de crue (effet de seuil sur le réservoir E).

D'après Mangin (1975), le tarissement d'une source karstique se définit à partir de la relation suivante :

$$Q = Q_0 * e^{-K_{tar}*t}$$

- Q = Débit de la source (m^3/s)

- Q_0 = Débit au début du tarissement (m^3/s)
- K_{tar} = coefficient de récession (j^{-1})
- t = temps (j)

Dans la relation précédente, le coefficient de récession K_{tar} peut être associé au coefficient de récession K_{MS} du modèle Pluie-Débit.

5.1.1 Détermination de la valeur de K_{tar} (coefficient de récession en tarissement) d'après Mangin

Sur la chronique de données disponibles, les étiages de chaque année (2013 à 2017) ont été extraits et le coefficient de récession a été calculé par ajustement graphique de la loi de tarissement. Les données sont extrêmement bruitées, mais l'ajustement est réalisable sur chaque année. L'année 2016 est donnée en exemple sur la Figure 9.

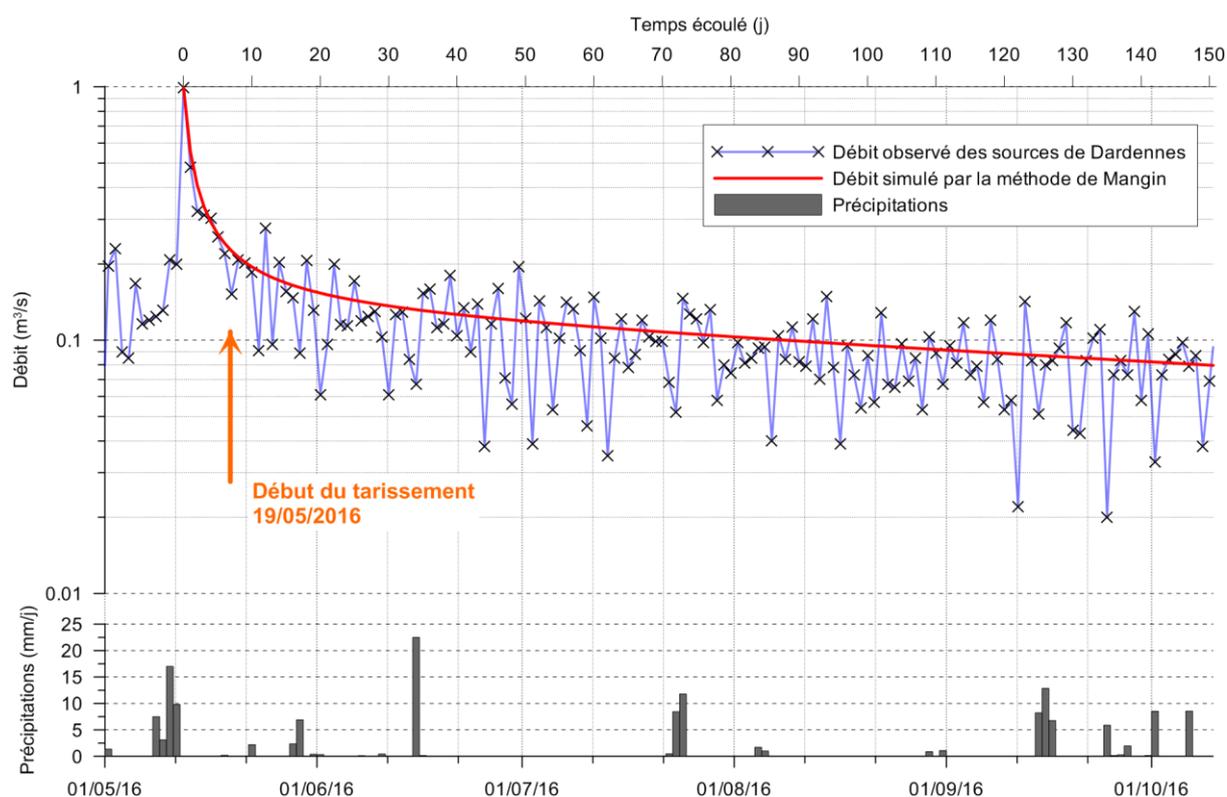


Figure 9 : Courbe de récession de la crue de mai 2016 initiant le début de l'étiage estival. Ajustement d'après la méthode de Mangin (fonction homographique en décroissance et fonction exponentielle décroissante en tarissement). Le débit simulé est obtenu dans un tableur par application de la méthode Mangin, sans modèle Pluie-Débit.

➔ Les coefficients de récession K_{tar} ont été déterminés pour chaque année et sont regroupés dans le Tableau 7. La valeur moyenne $K_{tar} = 0,0025 j^{-1}$ (années 2013 à 2016) est gardée comme valeur caractéristique du tarissement des sources de Dardennes. C'est cette valeur qui sera utilisée pour tenter d'améliorer les simulations du débit d'étiage dans un nouveau modèle KarstMod .

Début étiage	Fin étiage	Q_0 (m^3/s)	K_{tar} (j^{-1})
05/06/2013	07/09/2013	0,10	0,002
25/05/2014	29/09/2014	0,15	0,003
22/06/2015	30/09/2015	0,20	0,002
19/05/2016	10/10/2016	0,125	0,003
14/06/2017	29/09/2017	0,12	0,005
Valeur moyenne (2013-2016) : 0,0025			

Tableau 7 : Paramètres Q_0 et K_{tar} définis à partir de la méthode de Mangin pour les périodes d'étiages des sources de Dardennes entre 2013 et 2017

5.1.2 Abaque de l'évolution du débit au cours du temps durant le tarissement d'une source karstique

Indépendamment des modèles Pluie-Débit, Mangin (1975) a proposé d'estimer le débit d'une source karstique lors de son tarissement par l'application d'une loi de décroissance exponentielle. Ce modèle théorique permet de tracer un abaque de l'évolution du débit au cours du temps, pour un débit initial fixé (Q_0) et pour un coefficient de récession fixé (K_{tar}). Ce type d'abaque permet d'estimer le temps nécessaire pour passer du débit Q_0 à un débit plus faible en étiage. Le Tableau 8 et la Figure 10 donnent les résultats pour 4 valeurs de K_{tar} , dont $K_{tar}=0,0025 \text{ j}^{-1}$ la valeur retenue pour caractériser les sources de Dardennes. Avec cette valeur, le débit passe de 150 l/s à 100 l/s en 162 jours, et de 150 l/s à 50 l/s en 439 jours. Si le coefficient de récession est multiplié par deux ($K_{tar}=0,005 \text{ j}^{-1}$), le débit décroît alors deux fois plus vite.

Coefficient de récession $K_{tar} \text{ (j}^{-1}\text{)}$	$Q_0 \text{ (l/s)}$	300		150	
	$Q_{final} \text{ (l/s)}$	100	50	100	50
0,01	Temps (j)	109	179	40	109
0,005	Temps (j)	219	358	81	219
0,0025	Temps (j)	439	716	162	439
0,001	Temps (j)	1098	1791	405	1098

Tableau 8 : Nombres de jours de récession pour atteindre un débit en étiage de 100 ou 50 l/s en fonction du débit initial Q_0 et du coefficient de récession de Mangin K_{tar}

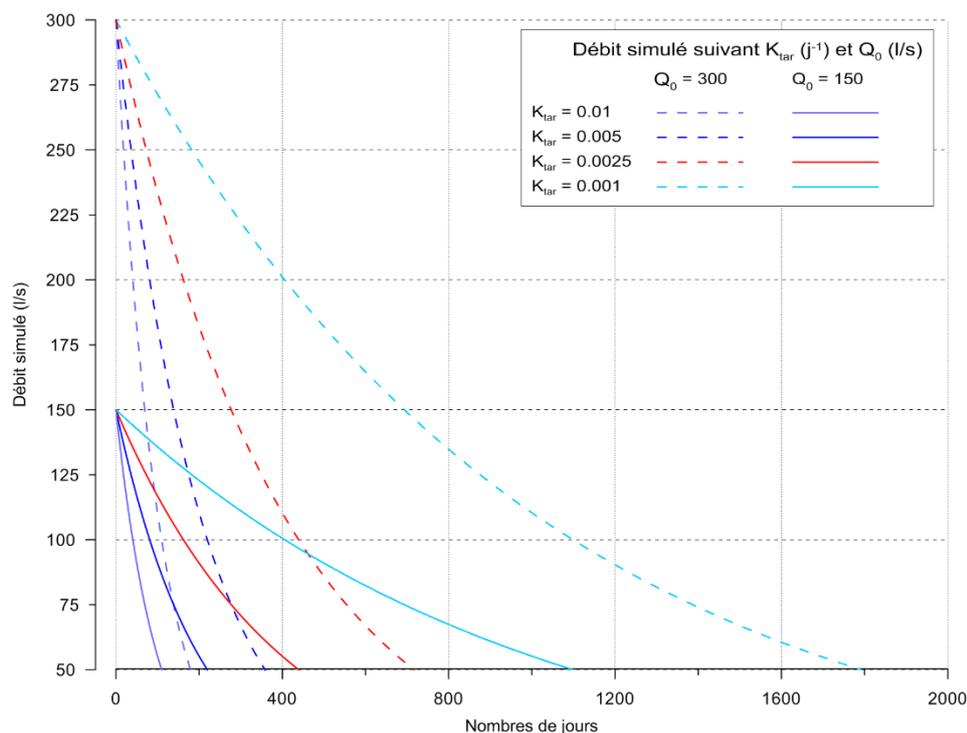


Figure 10 : Abaque des courbes de tarissement théoriques en fonction de K_{tar} et de Q_0

6 PROPOSITION D'UN NOUVEAU MODÈLE KARSTMOD POUR UNE SIMULATION DU DÉBIT D'ÉTIAGE AMÉLIORÉE

6.1 APPLICATION DE K_{TAR} AU MODÈLE PROPOSÉ PAR C. BAUDEMMENT (BAUDEMMENT_V2.2.0.T ; $K_{MS}=0,0025$)

À partir de la valeur de K_{tar} définie par la méthode de Mangin, un nouveau test du modèle proposé par C. Baudement (2018) est réalisé. Dans ce test, le calage des paramètres du modèle est fait automatiquement avec KarstMod, en fixant la valeur de K_{MS} à $0,0025 \text{ j}^{-1}$ (Baudement_V2.2.0.t ; $K_{MS}=0,0025 \text{ mm j}^{-1}$ dans l'unité utilisée par KarstMod). Ce test est effectué de nouveau sur les deux périodes de calages (Tableau 4).

Paramètre	Unité	Baudement_V2.2.0.t $K_{MS}=0,0025$	
		P1	P2
		Période de calage	
R_A	km ²	69,3	61,7
E_{min}	mm	-15	-16,2
$E_{hy} = E_{SeuilC}$	mm	10,6	41,9
k_{CS}	mm/j	1,45	2,82
k_{EM}	mm/j	0,139	0,032
$k_{hy} = k_{EC}$	mm/j	1,38	0,633
Wobj Calage (Calibration)	-	0,84	0,88
Wobj Validation	-	0,61	0,67

Tableau 9 : Paramètres calés par le modèle Baudement_V2.2.0.t en fixant la valeur de coefficient de récession $K_{MS} = 0,0025$ d'après Mangin

Les jeux de paramètres calés sont présentés dans le Tableau 9. La fonction objectif est supérieure à 0,8 sur chaque période de calibration, mais plus faible sur les périodes respectives de validation.

➔ La Figure 11 permet de comparer l'influence du K_{MS} sur la simulation du tarissement des sources de Dardennes. La pente du débit simulé durant les étiages avec le modèle Baudement_V2.2.0.t_ $K_{MS}=0,0025$ s'avère être graphiquement équivalente à la pente du débit observé. Toutefois, les valeurs simulées sont systématiquement trop fortes par rapport aux données observées, que ce soit sur le calage de la période P1 ou de la période P2. L'amélioration attendue en fixant K_{MS} n'est pas effective. Un nouveau modèle est donc nécessaire pour réellement améliorer la simulation des débits d'étiage, tenant compte de l'ensemble des résultats préalablement présentés ; c'est l'objet de la partie suivante du rapport.

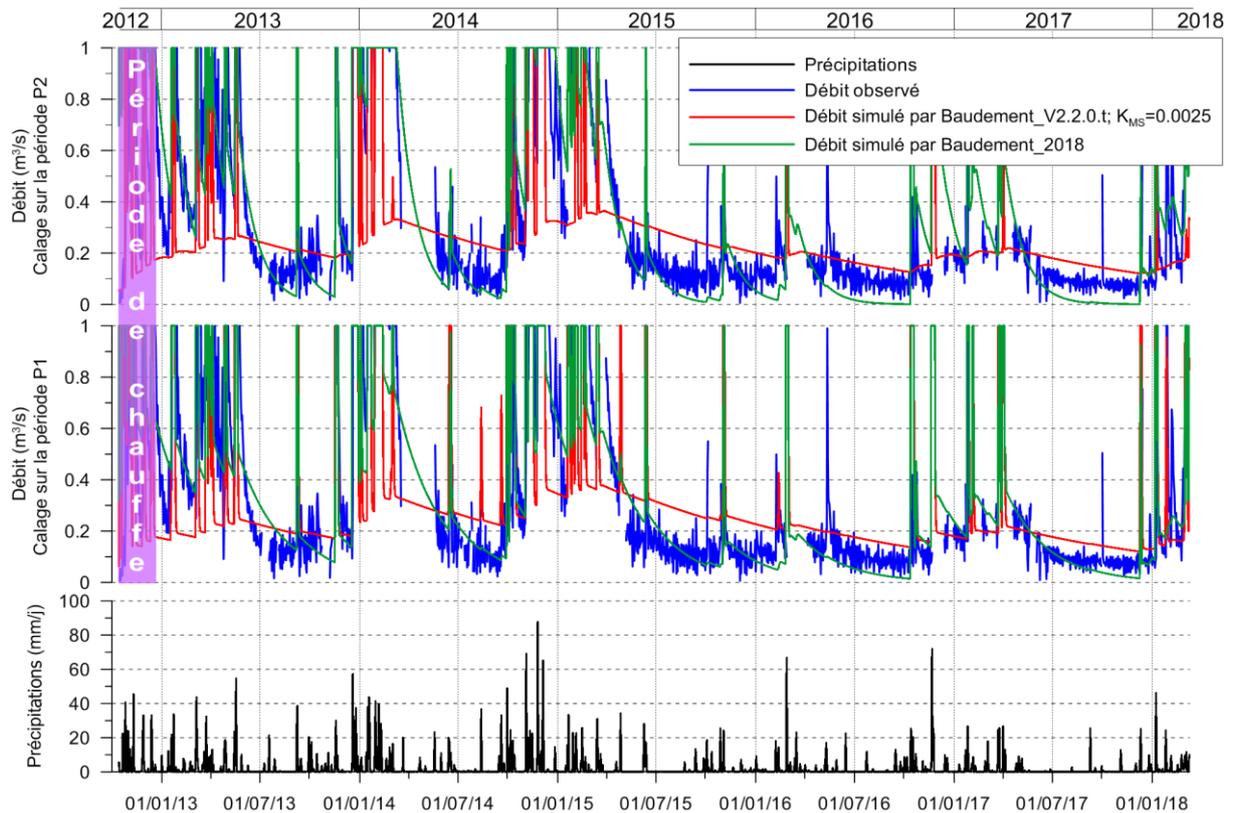


Figure 11 : Comparaison des débits simulés entre le modèle initial Baudement_2018 et le modèle Baudement_V2.2.0.t avec le coefficient de récession K_{MS} optimisé ($K_{MS} = 0.0025$)

6.2 APPLICATION D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE NON LINÉAIRE (DARD_NON_LIN)

Compte tenu des différents tests et résultats obtenus par Baudement (2018) et dans ce travail, le modèle Pluie-Débit peut être amélioré à condition de tenir compte à la fois de la lente récession à l'été et des variations très fortes de débit en crue. Ce type de comportement est typique d'un fonctionnement non linéaire. KarstMod étant un outil dédié à la simulation des systèmes karstiques, une fonction non linéaire peut être paramétrée sur les réservoirs. Toujours dans un objectif de parcimonie, et étant donné que la simulation doit être améliorée sur les périodes d'été, il a été choisi de ne rajouter qu'un seul paramètre au modèle : un coefficient de non linéarité de simulation du débit sortant du réservoir M en direction de la source. L'écoulement suit alors une loi du type : $Q_{MS} = k_{MS} * M^{\alpha_{MS}}$

Pour tester ce nouveau modèle non linéaire (nommé Dard_Non_Lin dans la suite du rapport), deux procédures de calages sont effectuées, avec respectivement les données de la période P1 et P2 (Tableau 4), dans les gammes de paramètres du Tableau 10.

Paramètre	Signification	Unité	Dard_Non_Lin
R_A	Aire d'alimentation	km ²	50 – 70
E_{min}	Niveau d'eau minimum dans le réservoir E (Epikarst)	mm	(-30) – (-10)
$E_{hy} = E_{SeuilC}$	Seuil de débordement du réservoir E vers le réservoir C (Conduit)	mm	10 – 50
$k_{hy} = k_{EC}$	Coefficient de récession du réservoir E vers C	mm/j	0,1 – 3,0
k_{CS}	Coefficient de récession du réservoir C vers S (Source)	mm/j	0,3 – 3,0
k_{EM}	Coefficient de récession du réservoir E vers le réservoir M (Matrice)	mm/j	0,1 – 1,0
$k_{MS} = K_{tar}$	Coefficient de récession du réservoir M vers S	mm/j	0,0025
α_{MS}	Coefficient de non-linéarité	-	1 - 5

Tableau 10 : Gamme des paramètres utilisés pour caler le modèle Dard_Non_Lin

Les paramètres calés sont présentés dans le Tableau 11.

Paramètre	Unité	Dard_Non_Lin	
		P1	P2
Période de calage			
		P1	P2
R_A	km ²	69,8	59,3
E_{min}	mm	-14,7	-17,0
$E_{hy} = E_{SeuilC}$	mm	16,5	20,4
k_{CS}	mm/j	2,6	0,884
k_{EM}	mm/j	0,118	0,108
$k_{hy} = k_{EC}$	mm/j	0,974	1,86
$k_{MS} = K_{tar}$	mm/j	0,0025	0,0025
α_{MS}	-	1,86	1,63
Wobj Calage (Calibration)	-	0,89	0,89
Wobj Validation	-	0,70	0,78

Tableau 11 : Paramètres calés du modèle Dard_Non_Lin pour les deux périodes de calage P1 (22/12/2012 au 30/08/2014) et P2 (31/08/2014 au 10/03/2018)

D'après les fonctions objectifs, le modèle Dard_Non_Lin simule de manière satisfaisante les débits observés sur les sources de Dardennes, en prenant en compte la valeur théorique de K_{MS} optimisée précédemment (§5.1.1). Pour s'assurer que ce modèle a bien amélioré la simulation des débits en étiage et en crue, ils sont présentés sur la Figure 12.

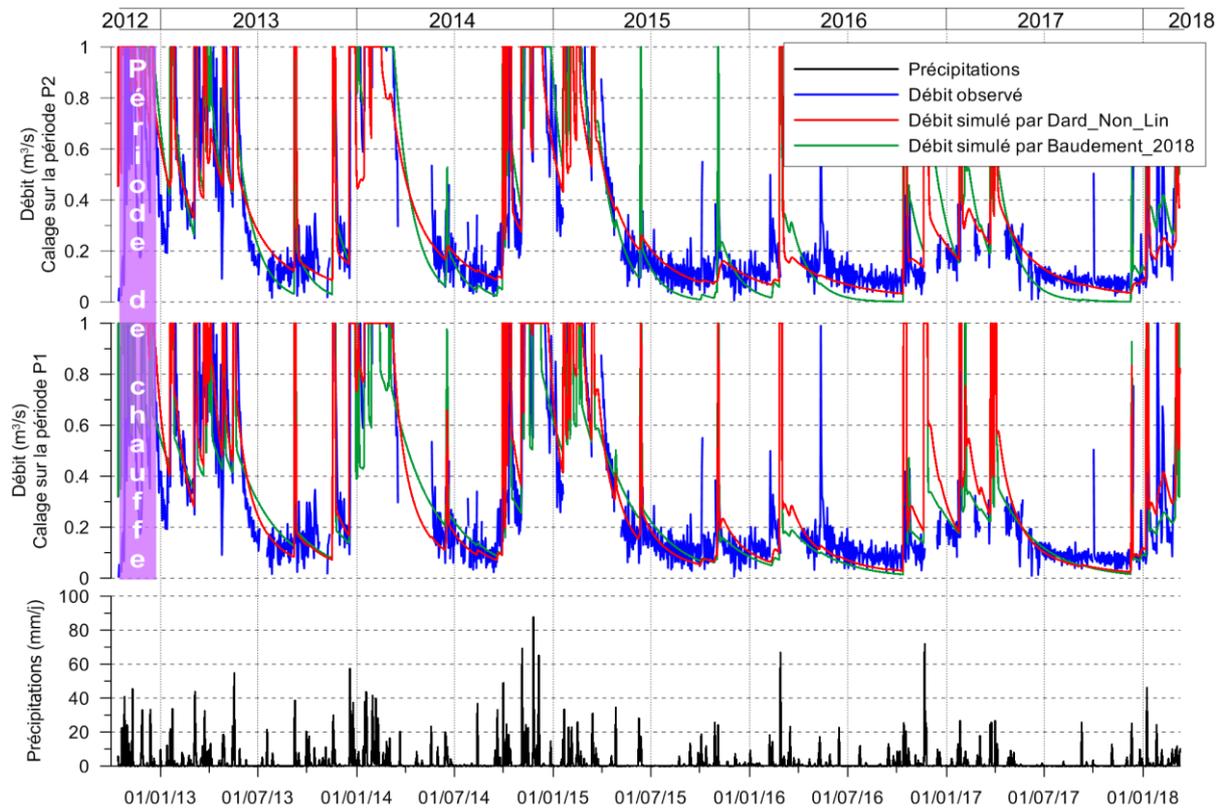


Figure 12 : Simulation des débits d'étiages avec le modèle Dard_Non_Lin calé sur les périodes P1 et P2

Le calage sur la période P2, qui prend en compte deux années sèches (2016-2017), permet de proposer une meilleure simulation des écoulements au niveau des étiages et lors de la décrue que le modèle Baudement_2018. Pour la période P1, le modèle Dard_Non_Lin simule des débits proches du modèle Baudement_2018 en étiage.

Il est aussi nécessaire de prendre en compte les pics de crues. La Figure 13 permet de comparer le débit observé avec le débit simulé par les deux modèles (calage sur la période P1). Pour les crues les plus importantes, en 2013 et 2014, le débit simulé par Dard_Non_Lin est légèrement plus fort que le modèle Baudement_2018, et donne des résultats satisfaisants en comparaison avec le débit observé. Les résultats du modèle Dard_Non_Lin calé sur les périodes P1 et P2 sont aussi proposés dans la partie suivante du rapport, en Figure 14 et Figure 15.

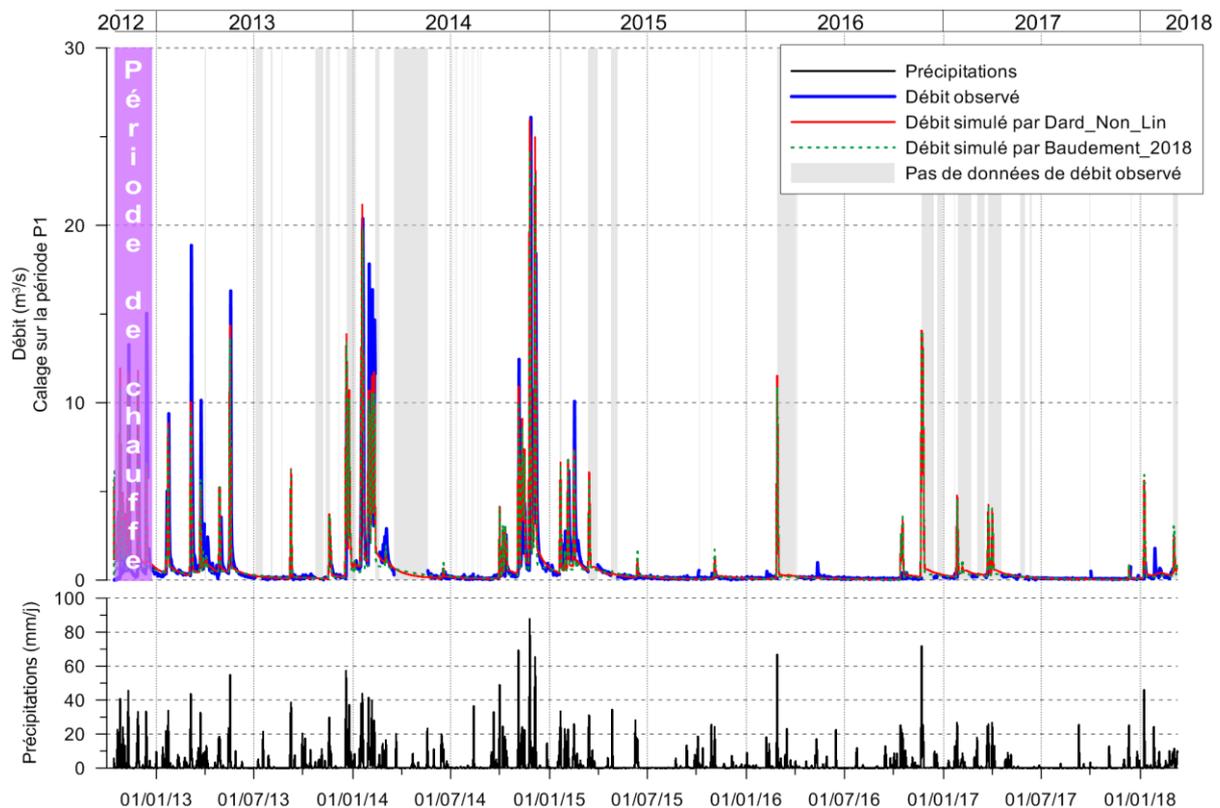


Figure 13: Simulations des débits par les modèles Baudement_2018 et Dard_Non_Lin calé pour la période P1

6.3 SYNTHÈSE ET CONCLUSION SUR LE MODÈLE À UTILISER POUR SIMULER LE DÉBIT TOTAL DES SOURCES DE DARDENNES

De nombreuses structures de modèles Pluie-Débit ont été testées au cours du projet Dardennes, afin de simuler le débit total des sources de Dardennes. Au terme de sa thèse de doctorat, C. Baudement (2018) propose une structure de modèle Pluie-Débit très bien adaptée au modèle conceptuel de fonctionnement de l'aquifère préalablement établi par le croisement des études de géologie structurale, de karstologie et d'hydrodynamique et hydrochimie. Cette structure de modèle Pluie-Débit a été mise en œuvre dans la plateforme KarstMod, avec trois réservoirs : E, M et C, ainsi qu'une réserve d'eau dans E (valeur de Emin négative) et un seuil pour activer l'écoulement de E vers C. Cette structure permet de déconvoluer le débit en deux composantes : un écoulement lent (souvent appelé Matrice) et un écoulement rapide (souvent appelé Conduit). Cette décomposition du débit est très utile pour discuter du fonctionnement de l'aquifère.

Le modèle initialement calé et validé par C. Baudement avait été établi en travaillant sur les données acquises entre 2012 et 2016 (Pluie et débit des sources). L'acquisition de nouvelles données de 2016 à 2018, sur une période météorologique particulière caractérisée par de faibles précipitations, a permis de tester le modèle initial et de proposer une nouvelle version « Dard_Non_Lin ». La nouvelle version utilise : (1) un coefficient de récession beaucoup plus faible de l'écoulement lent vers la source afin de simuler correctement les étiages durant lesquels le débit diminue lentement, (2) une relation non linéaire sur la simulation de l'écoulement lent, afin de générer des variations de débit conséquentes durant les épisodes pluvieux.

Les différents tests réalisés montrent également qu'en fonction de la période de calage du modèle, les résultats obtenus peuvent être légèrement différents. Il n'y a donc pas qu'un seul modèle optimal. Il est proposé d'utiliser la structure de modèle Dard_Non_Lin avec deux calages différents (obtenus sur les périodes P1 et P2).

7 SIMULATION À PARTIR DU NOUVEAU MODÈLE NON LINÉAIRE (DARD_NON_LIN) SOUS DIFFÉRENTES CONDITIONS

Les premières parties de ce rapport ont permis de définir un nouveau modèle Pluie-Débit opérationnel dans la plateforme KarstMod : Dard_Non_Lin. Ce modèle Dard_Non_Lin propose un bon compromis entre simulation des pics de crues, des périodes de décrue et des débits d'étiages des sources de Dardennes. Deux jeux de paramètres de calage du modèle ont été établis (Tableau 11).

Dans ce chapitre, le modèle Dard_Non_Lin est appliqué pour tester différents scénarios et discuter du fonctionnement de l'hydrosystème karstique de Dardennes. Le mode « Run » de la plateforme KarstMod est utilisé.

7.1 DÉCONVOLUTION DU DÉBIT LENT ET RAPIDE SUR LA PÉRIODE 2013-2018

La séparation du débit entre les deux réservoirs Matrice et Conduit du modèle Pluie-Débit a pour but de quantifier respectivement la part de l'écoulement lent et rapide du débit total. Cette démarche est expliquée dans la thèse de C. Baudement. Le modèle donne ainsi à chaque pas de temps (chaque jour) l'évolution du débit de base (écoulement lent) et du débit de crue (écoulement rapide).

7.1.1 Résultats graphiques sur l'ensemble de la période 2013-2018

Les Figure 14 et Figure 15 (respectivement utilisant le modèle calé sur la période P1 ou P2) permettent de mettre en valeur les deux types d'écoulement caractéristiques d'un système karstique. Les deux modèles donnent des résultats comparables, même si dans le détail le modèle calé sur la période P1 simule des pics de débit plus forts et des débits de base légèrement plus importants durant l'hiver.

L'écoulement lent de la matrice vers la source S (Q_{MS}) présente des variations saisonnières liées à l'alternance des périodes pluvieuses hivernales et des périodes sèches estivales (voire automnale comme en 2017), et de longues courbes de récession à l'étiage. Au contraire, le débit du réservoir C (Q_{CS}) caractérise bien les écoulements rapides associés directement au débit de crue avec de fortes variations journalières et des pics de crue de forte ampleur. Sur les cinq ans de mesures, le cycle hydrologique 2015-2016 s'individualise car il n'y a pas eu de saison pluvieuse hivernale marquée, ce qui limite les pics de crue et la recharge de la matrice (les écoulements lents). Le cycle 2015-2016 avait déjà été identifié dans le Tableau 2 comme l'année hydrologique au cumul de précipitations le plus faible sur les 6 ans de suivi. Les résultats graphiques du modèle mettent ainsi en exergue les variations du débit des sources karstiques en fonction du régime pluviométrique de l'année et des années précédentes.

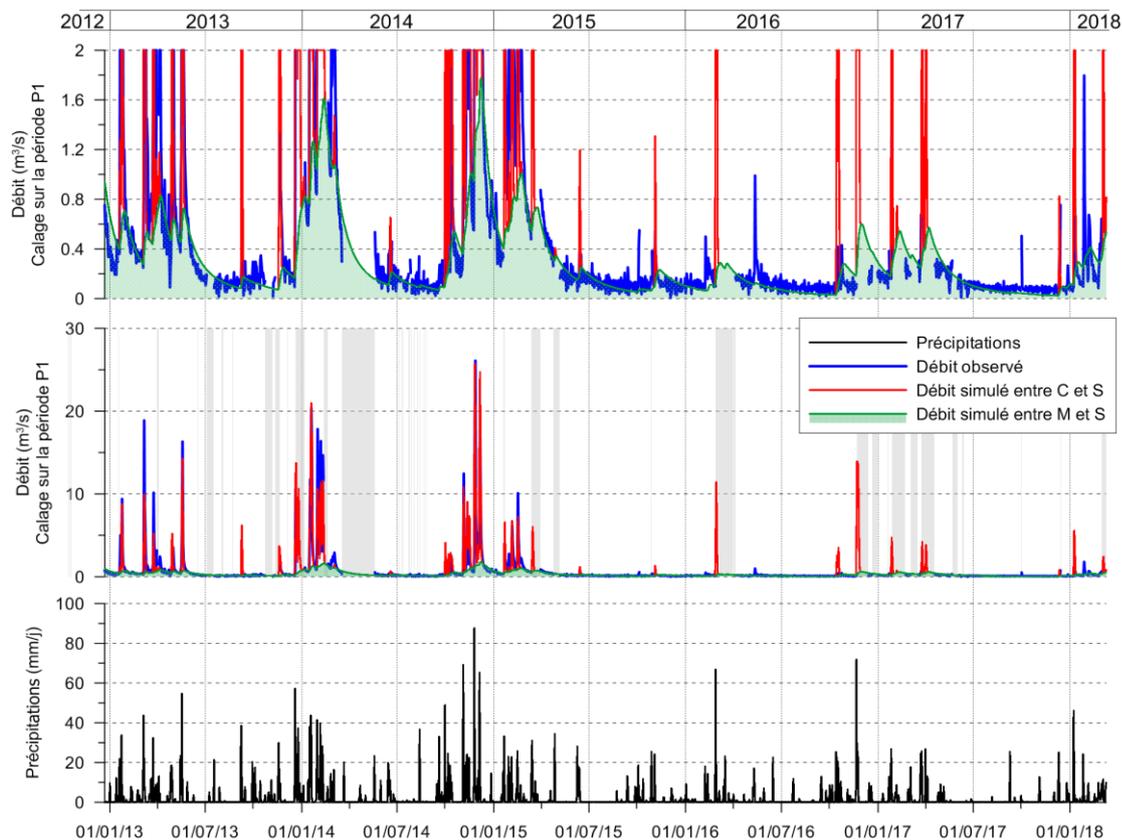


Figure 14 : Séparation du débit total entre le débit de M vers S (écoulement de base) et le débit de C vers S (écoulement rapide) avec le modèle Dard_Non_Lin calé sur la période P1

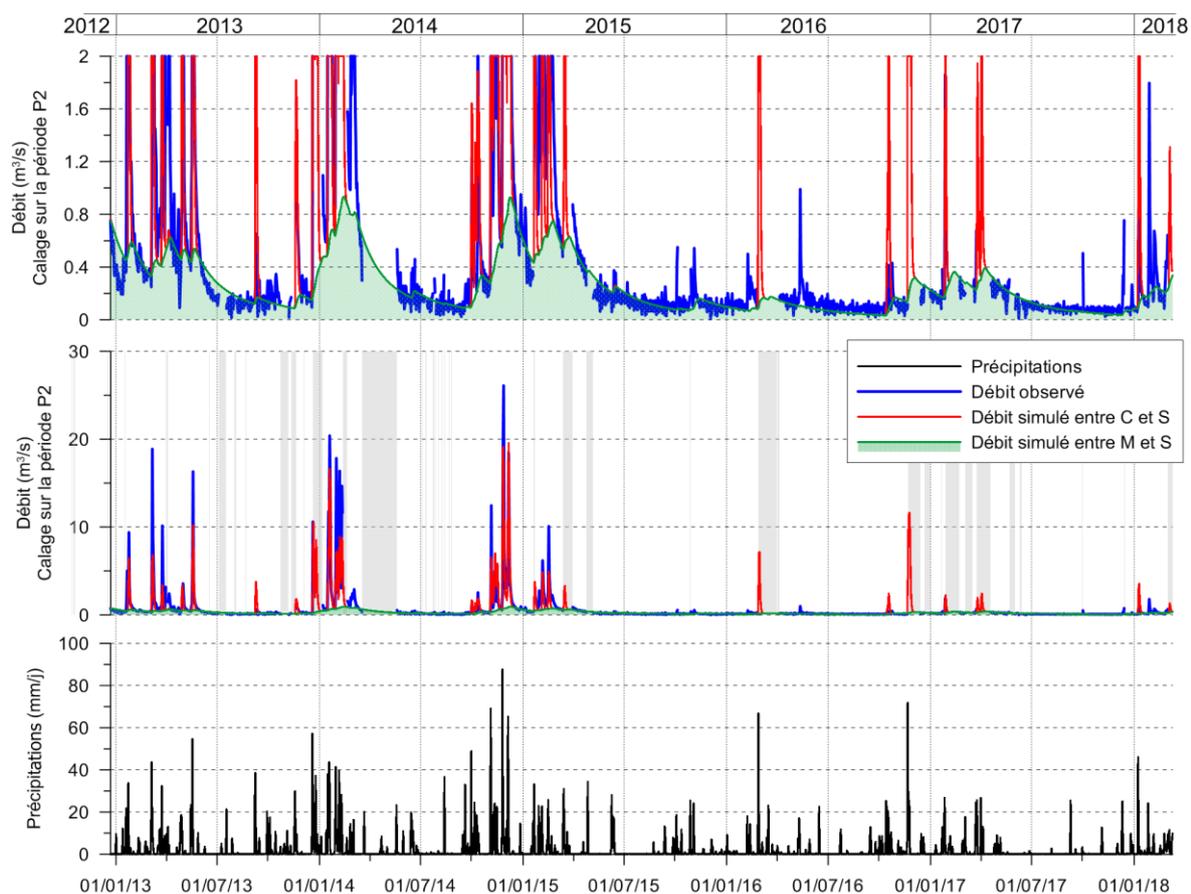


Figure 15 : Séparation du débit total entre le débit de M vers S (écoulement de base) et le débit de C vers S (écoulement rapide) avec le modèle Dard_Non_Lin calé sur la période P2

7.1.2 Évolution des composantes lentes et rapides du débit par année : un outil de réflexion pour une gestion durable de la ressource

L'utilisation des modèles permet de calculer les débits moyens des composantes lentes et rapides du débit des sources de Dardennes. Les données observées étant partiellement incomplètes, les modèles donnent également une estimation du débit total de chaque année.

Les données à l'échelle annuelle peuvent être classiquement présentées par année civile ou par année hydrologique. L'année hydrologique (1^{er} septembre N au 31 août N+1) présente l'avantage d'inclure la période humide hivernale et la période sèche qui suit, sans découpage arbitraire au 31 décembre. Dans la thèse de C. Baudement, les données utilisées démarraient fin 2012 pour finir début 2016, ce qui représente 3 années civiles complètes mais seulement 2 années hydrologiques ; les résultats étaient donc présentés par année civile pour ne négliger aucune donnée. Aujourd'hui nous disposons des données jusqu'en mars 2018, soit deux ans de plus, le découpage a donc pu être fait par année hydrologique (les données par découpage en année civile sont mises en annexe pour information).

Les résultats sont présentés pour le modèle Dard_Non_Lin calé sur la période P1 (Tableau 12) et sur la période P2 (Tableau 13), de manière à prendre en compte l'effet du calage du modèle sur l'interprétation des résultats.

Année hydrologique	Précipitations (mm)	Moyenne Q _{MS} (m ³ /s)	Moyenne Q _{CS} (m ³ /s)	Moyenne Q _{total} (m ³ /s)	%Q _{MS}	%Q _{CS}
2013-2014	971	0,38	0,67	1,05	0,36	0,64
2014-2015	1005	0,48	0,76	1,24	0,39	0,61
2015-2016	477	0,11	0,08	0,19	0,59	0,41
2016-2017	600	0,24	0,27	0,50	0,47	0,53
Moyenne des années	763	0,30	0,44	0,75	0,45	0,55

Tableau 12 : Résultats du modèle Dard_Non_Lin en moyenne par année hydrologique pour le calage sur la période P1. Moyenne annuelle des précipitations calculée en prenant la moyenne des trois stations météorologiques (Toulon La Mitre, Le Castellet aérodrome, Limate). Q_{MS} : débit du réservoir M vers la source, représentant le débit d'écoulement lent ; Q_{CS} : débit du réservoir C vers la source, représentant le débit d'écoulement rapide.

Année hydrologique	Précipitations (mm)	Moyenne Q _{MS} (m ³ /s)	Moyenne Q _{CS} (m ³ /s)	Moyenne Q _{total} (m ³ /s)	%Q _{MS}	%Q _{CS}
2013-2014	971	0,31	0,57	0,88	0,35	0,65
2014-2015	1005	0,39	0,64	1,02	0,38	0,62
2015-2016	477	0,10	0,06	0,16	0,62	0,38
2016-2017	600	0,19	0,21	0,40	0,47	0,53
Moyenne des années	763	0,25	0,37	0,62	0,46	0,54

Tableau 13 : Résultats du modèle Dard_Non_Lin en moyenne par année hydrologique pour le calage sur la période P2. Moyenne annuelle des précipitations calculée en prenant la moyenne des trois stations météorologiques (Toulon La Mitre, Le Castellet aérodrome, Limate). Q_{MS} : débit du réservoir M vers la source, représentant le débit d'écoulement lent ; Q_{CS} : débit du réservoir C vers la source, représentant le débit d'écoulement rapide.

Les résultats des modèles (Dard_Non_Lin_P1 et Dard_Non_Lin_P2) sont relativement proches. Ils montrent que le débit total moyen varie fortement d'une année sur l'autre. Avec le modèle P1, le débit moyen varie de 0,19 à 1,24 m³/s entre 2013 et 2017, et il varie de 0,16 à 1,02 m³/s avec le modèle P2. Les deux modèles montrent la même tendance : lorsque les précipitations sont faibles (le cycle 2015-2016 est deux fois moins arrosé que le cycle 2014-2015), le débit des sources chute fortement. Mais dès le cycle suivant, l'augmentation des précipitations permet au système de retrouver un débit plus fort.

La répartition des débits entre les écoulements rapides et lents montre une dynamique différente de ces deux types d'écoulement à l'échelle annuelle, en accord avec le modèle conceptuel de fonctionnement

de l'aquifère et la structure du modèle Pluie-Débit. En s'intéressant au modèle P1, le débit de base (Q_{MS}) varie entre 0,11 et 0,48 m³/s suivant les années, alors que l'écoulement rapide (Q_{CS}) varie entre 0,08 et 0,76 m³/s ; il y a donc un rapport d'environ 1 à 4 dans les variations du débit de base suivant les années, alors que le rapport est d'environ 1 à 10 dans les variations du débit rapide. Les années les plus pluvieuses sont caractérisées par une forte augmentation du débit rapide, c'est-à-dire par des crues éclair typiques du fonctionnement karstique observé au Ragas de Dardennes (visible sur les deux figures, Figure 14 et Figure 15). Chaque événement pluvieux intense engendre également une augmentation des écoulements lents et participe ainsi à la recharge du débit de base de l'aquifère. De plus, la baisse du niveau du lac permet d'augmenter la capacité de recharge de l'aquifère (les crues sont moins importantes quand le lac est bas) et favorise sa recharge lors d'évènements pluvieux intenses. Ainsi, l'aquifère a une réelle capacité à se recharger et à écrêter les crues quand il est préalablement déprimé.

La séparation des écoulements en composante lente et rapide permet également de discuter du bilan hydrologique, et de la part du **bilan hydrologique durable**. En effet, l'intégralité du débit des sources de Dardennes ne constitue pas un volume d'eau exploitable pour l'AEP, car toute l'eau débitée en crue ne peut pas être retenue dans l'aquifère ni dans des réservoirs artificiels. Il existe donc une véritable différence entre le bilan hydrologique, qui ne tient compte que de l'équilibre entre la recharge et la décharge d'un aquifère, et le bilan hydrologique durable qui permet de préciser la part d'eau durablement disponible pour l'utilisation humaine (Loáiciga, 2017). Ces notions sont discutées dans la littérature anglo-saxonne sous les termes : « water-budget myth » (= le mythe du bilan hydrologique global), « safe yield » or « sustainable yield » (= débit durable). Ce n'est donc qu'une partie de l'eau rechargée dans l'aquifère qui peut être exploitée dans une démarche de gestion durable. La gestion durable est un concept qui ne bénéficie pas d'une définition stricte, car la durabilité peut être vue à différentes échelles de temps et sous différents angles thématiques (Alley et Leake, 2004) comme l'économie, l'écologie, le bien-être social... On peut toutefois accepter qu'une gestion durable de ressources en eau souterraines de Dardennes doivent respecter un débit réservé au cours d'eau en aval des sources (Le Las) et assurer sur le long terme un équilibre quantitatif de la masse d'eau, ainsi qu'un maintien de la bonne qualité, tout en minimisant les impacts sur les masses d'eau de surface et souterraines connectées à celle de Dardennes. Dans ce cadre, pour un bilan hydrologique durable, seul le débit d'écoulement lent (ou débit de base) constitue le débit réellement disponible chaque année, à partager entre l'AEP et les milieux aquatiques de surface. Toutefois, la configuration particulière des sources de Dardennes, captée dans un barrage artificiel, favorise le stockage d'une partie de l'eau des crues dans le barrage et dans l'aquifère sur la zone de battement de la nappe imposée par le niveau variable du barrage. Une gestion durable pourra donc bénéficier de cette part d'eau d'écoulement rapide qui est stockée et devient ainsi disponible.

7.1.3 Les écoulements rapides en crue (cas d'une série de crues observées en janvier-février 2014)

La période de janvier à février 2014 est utilisée pour illustrer la part d'écoulement rapide et lent lors des crues. Cette période a déjà été présentée par C. Baudement dans sa thèse ; la même période est ici reprise avec le nouveau modèle Dard_Non_Lin (calages sur P1 et sur P2).

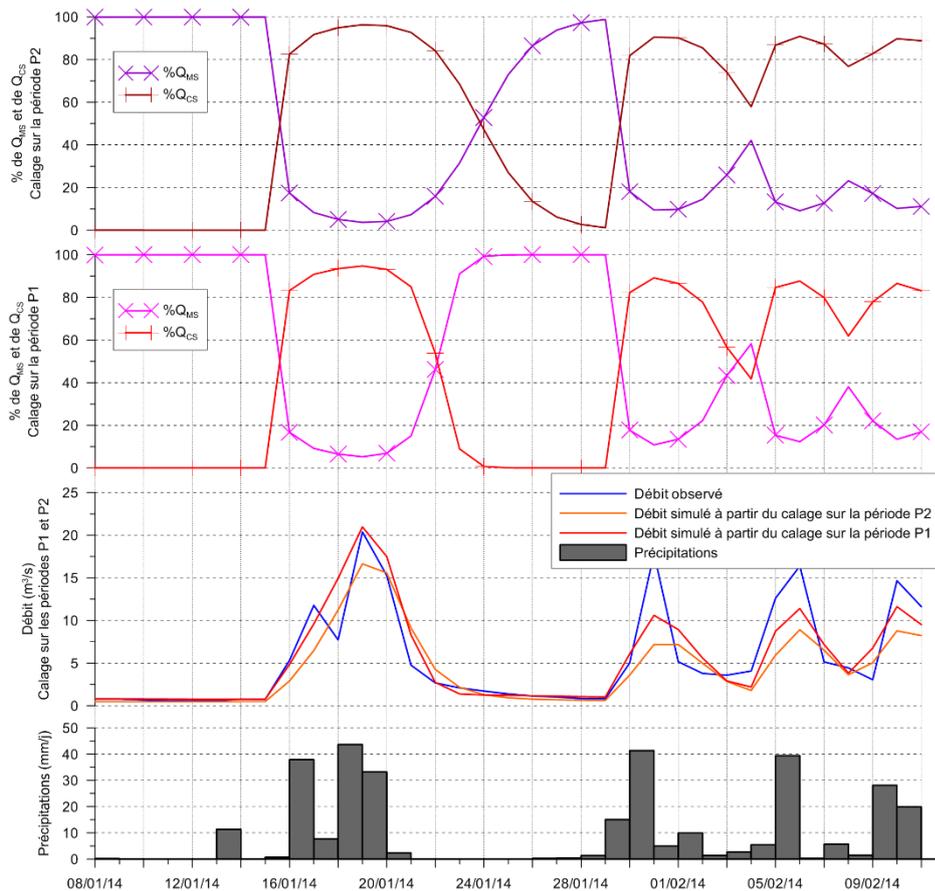


Figure 16 : Simulations des crues de janvier et février 2014 avec le modèle Dard_Non_Lin. Pourcentage de débit simulé pour Q_{MS} (débit de base fourni par le réservoir Matrice) et Q_{CS} (débit de crue fourni par le réservoir Conduit) pour les deux périodes de calages.

Avant la première crue, le débit provient uniquement de la matrice (100% de Q_{MS}). Cette tendance s'inverse complètement le 16 janvier avec les premières précipitations et la proportion de l'écoulement rapide Q_{CS} qui atteint 95% le 19 janvier. Pendant 6 jours, le débit provenant du réservoir Conduit est dominant ; il fournit même plus de 80% du débit total simulé pendant quatre jours, puis il revient à 0% en quelques jours. Ce débit rapide est donc une part de l'eau souterraine qui est évacuée sous l'effet de la recharge des précipitations et qui ne sera donc plus disponible dans l'aquifère. Ce débit, qui passe uniquement en crue, est donc indisponible pour un captage d'eau dans l'aquifère, sauf si l'aquifère a été préalablement pompé et que la crue est naturellement écrêtée par stockage. Cet écoulement rapide est simulé dans le modèle Pluie-Débit par un coefficient de récession extrêmement fort. Ceci implique que l'onde de pression engendrée par l'eau de pluie rechargée est transmise à travers l'aquifère, et que la totalité de la pluie rechargée vers le réservoir C se transforme en débit de crue aux sources.

7.1.4 Comparaison des débits exploités pour l'AEP avec la simulation des débits lent et rapide

Afin de discuter de la gestion des ressources en eau souterraine de l'aquifère de Dardennes, les volumes d'eau exploités pour l'AEP sont comparés avec les volumes simulés par le modèle Dard_Non_Lin. Comme vu précédemment, le volume d'eau écoulé par le débit rapide (réservoir Conduit) est évacué vers le Las et n'est donc pas disponible pour l'AEP. Le volume d'eau écoulé par le débit lent (réservoir Matrice) correspond donc au débit de base disponible naturellement aux sources toute l'année, à répartir entre les prélèvements pour l'AEP et le débit réservé pour l'équilibre de la vie aquatique du cours d'eau en aval. La Figure 17 et la Figure 18 donnent les résultats des modèles pour le calage sur les périodes P1 et P2 respectivement (le modèle est au pas de temps de journalier, les résultats sont cumulés ou moyennés par mois). Le volume annuel (année civile ou hydrologique) des débits lent et rapide est donné dans le Tableau 14 et le Tableau 15 pour le calage sur P1, et le Tableau 16 et le Tableau 17 pour le calage sur P2. Les deux périodes de calage donnent des résultats globalement comparables dans les tendances, seules quelques différences de volumes écoulés existent, car le débit total écoulé est plus

faible dans le modèle au calage P2. La discussion des résultats est faite en tenant compte des deux modèles, sans privilégier l'un plutôt que l'autre, ce qui permet de visualiser une gamme de variation des résultats.

Là encore, comme vu précédemment, le niveau d'eau dans le lac varie en fonction du débit de pompage et du débit des sources de Dardennes. En période d'étiage, le débit rapide est soit nul, soit faible, et lorsqu'il augmente en fin d'étiage alors le niveau d'eau dans le lac remonte jusqu'à son seuil de débordement (123 m).

À l'échelle annuelle, en s'intéressant aux cycles hydrologiques, le volume exploité pour l'AEP est de l'ordre de 6 millions de m³ par an, sauf durant le cycle le plus sec de 2015-2016 où le volume exploité a baissé à 3,5 millions de m³. Le volume exploité est en effet actuellement fortement dépendant du débit naturel des sources disponible en étiage. Dans une moindre mesure, le volume stocké dans le lac est également un facteur impactant le débit disponible pour l'AEP, qui est limité d'une part par la qualité de l'eau du lac et d'autre part par le volume maximum d'environ 1 million de m³ contenu dans le lac. Les résultats des modèles montrent que le débit exploité actuellement est équivalent au débit de base (débit du réservoir M du modèle Pluie-Débit) en période peu pluvieuse comme lors du cycle 2015-2016, alors qu'en années pluvieuses (par exemple les cycles 2013-2014 et 2014-2015) le débit de base annuel est environ deux fois plus fort que le débit exploité pour l'AEP. Par exemple pour le calage P1, en 2013-2014, le volume annuel débité du réservoir M est de 12 millions de m³ et le débit exploité est de l'ordre de 6 millions de m³. L'exploitation actuelle respecte donc l'équilibre du bilan hydrologique durable. Cet équilibre est tout simplement imposé par le mode de prélèvement de l'eau, car l'eau est exploitée par gravité. Le niveau de l'eau ne peut donc pas descendre sous le niveau des sources (ou de la prise d'eau du tunnel du Ragas à 92 mètres d'altitude).

Dans le cas d'un débit d'exploitation AEP augmenté, par exemple à 300 l/s (équivalent à 9,5 millions de m³/an), le débit de base serait suffisant les années pluvieuses, mais par contre il serait largement insuffisant les années peu pluvieuses. Ce débit d'exploitation est même supérieur au débit total écoulé aux sources, incluant les crues lors du cycle 2015-2016 (entre 5 et 6 millions de m³ suivant les modèles). Par contre, la recharge de l'aquifère par les écoulements rapides qui se retrouvent stockés lorsque le niveau d'eau de l'aquifère est préalablement bas, permettrait de revenir rapidement à l'équilibre lors d'un cycle pluvieux suivant. Il faut alors envisager que l'eau soit exploitée par pompage, et que le niveau d'eau descende à un niveau inférieur à celui des sources actuelles. Ce fonctionnement n'est toutefois pas inclus dans le modèle Pluie-Débit Dard_Non_Lin et ne pourrait donc pas être simulé avec cette structure de modèle. Un second modèle, Dard_Sans_Fond, sera proposé dans une partie ultérieure de ce rapport, pour tester ce comportement de l'aquifère.

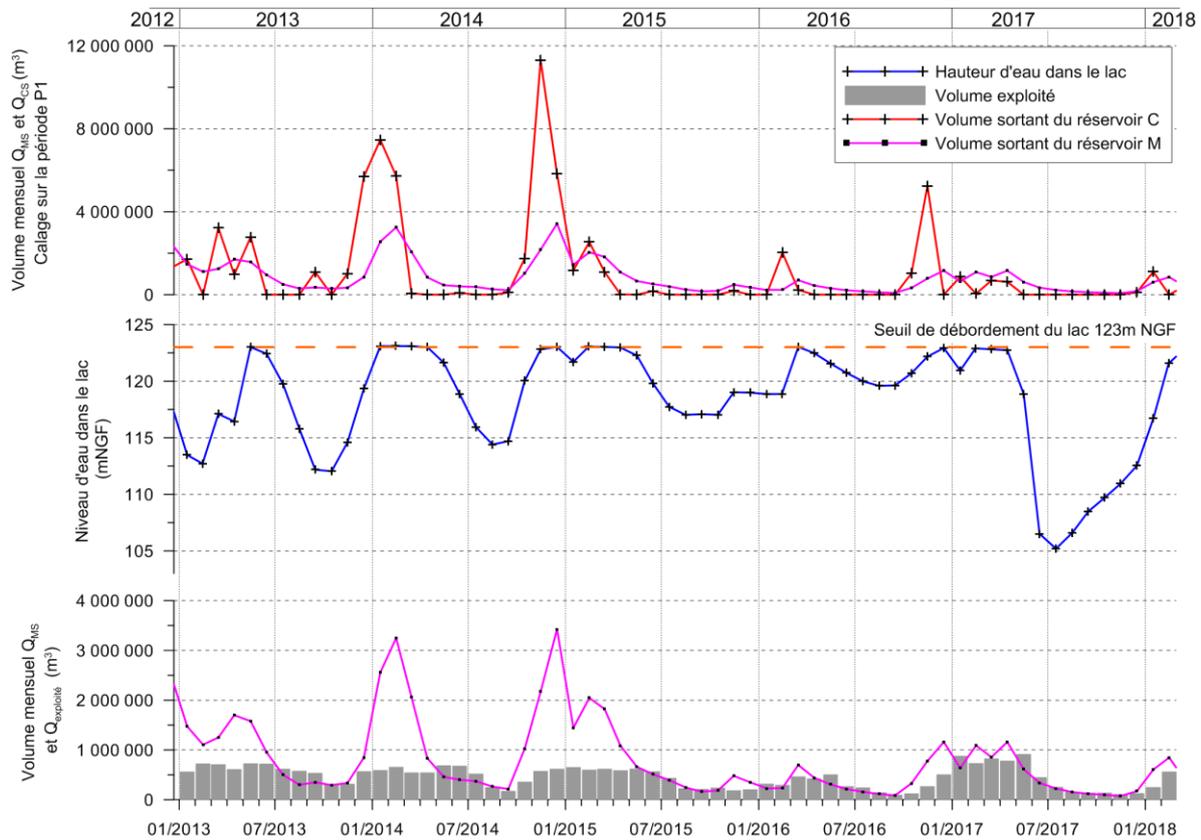


Figure 17 : Volume mensuel simulé par le modèle Dard_Non_Lin représentant le débit sortant du réservoir Matrice (Q_{Ms}) et le débit sortant du réservoir Conduit (Q_{Cs}) à partir de la période de calage P1. Hauteur d'eau moyenne mensuelle dans la retenue d'eau de Dardennes. Volume mensuel d'exploitation.

Année	Modèle Dard_Non_Lin calage P1		
	Volume moyen d'eau écoulé à travers le réservoir M (millions m^3/an)	Volume moyen d'eau écoulé simulé total (millions m^3/an)	Volume moyen d'eau exploité (millions m^3/an)
2013	10,7	27,2	6,9
2014	17,0	49,4	6,2
2015	9,4	14,6	5,1
2016	4,7	13,3	3,6
2017	5,5	7,9	5,5

Tableau 14 : Comparaison à l'échelle annuelle (année civile) entre le volume annuel d'eau provenant du réservoir M du modèle Pluie-Débit (= débit de base) et le volume d'eau moyen exploité pour l'alimentation en eau potable par l'usine de Dardennes. Le modèle utilisé est Dard-Non_Lin, calé sur la période P1.

Année hydrologique (1 ^{er} sept. N – 31 août N+1)	Modèle Dard_Non_Lin calage P1		
	Volume moyen d'eau écoulé à travers le réservoir M (millions m^3/an)	Volume moyen d'eau écoulé simulé total (millions m^3/an)	Volume moyen d'eau exploité (millions m^3/an)
2013-2014	12,0	33,2	6,2
2014-2015	15,0	39,0	6,0
2015-2016	3,5	6,0	3,5
2016-2017	7,4	15,9	6,0

Tableau 15 : Comparaison à l'échelle d'une année hydrologique entre le volume annuel d'eau provenant du réservoir M du modèle Pluie-Débit (= débit de base) et le volume d'eau moyen exploité pour l'alimentation en eau potable par l'usine de Dardennes. Le modèle utilisé est Dard-Non_Lin, calé sur la période P1.

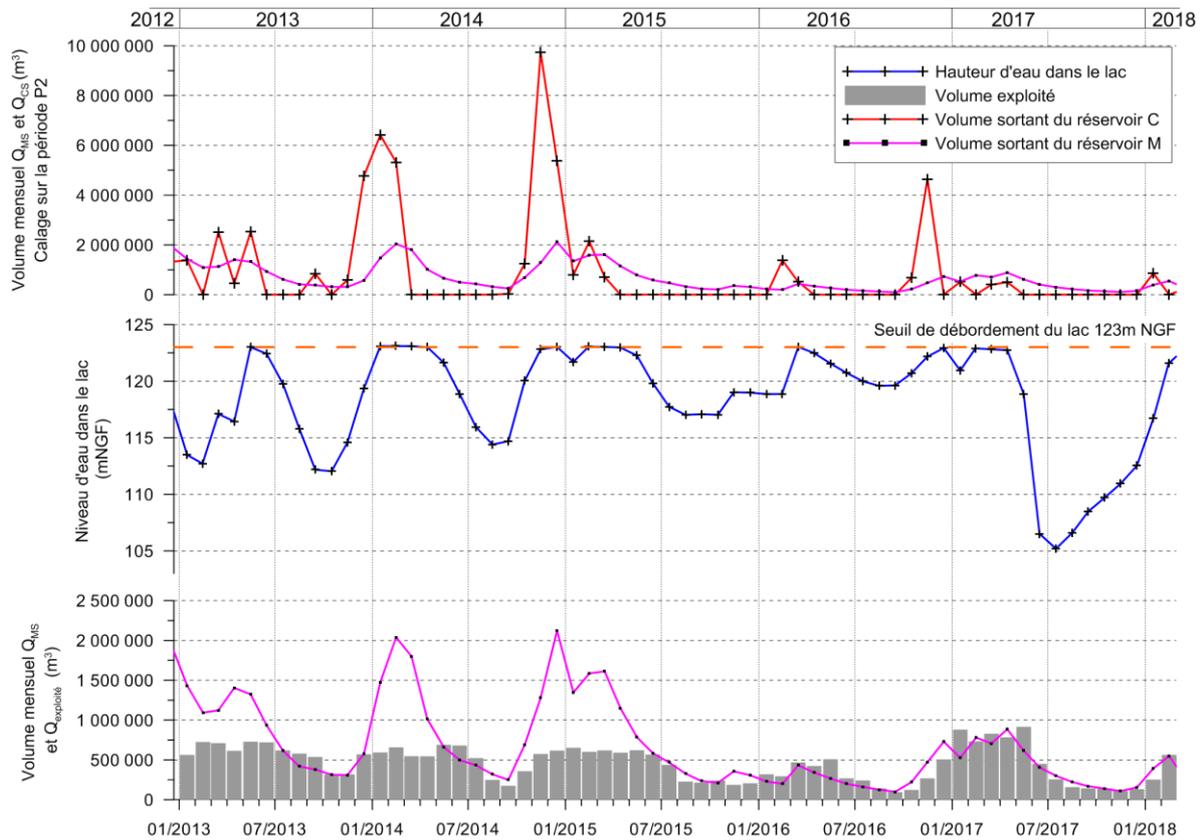


Figure 18 : Volume mensuel simulé par le modèle Dard_Non_Lin représentant le débit sortant du réservoir Matrice (Q_{Ms}) et le débit sortant du réservoir Conduit (Q_{Cs}) à partir de la période de calage P2. Hauteur d'eau moyenne mensuelle dans la retenue d'eau de Dardennes. Volume mensuel d'exploitation.

Année	Modèle Dard_Non_Lin calage P2		Volume moyen d'eau exploité (millions m ³ /an)
	Volume moyen d'eau écoulé à travers le réservoir M (millions m ³ /an)	Volume moyen d'eau écoulé simulé total (millions m ³ /an)	
2013	9,9	23,0	6,9
2014	12,6	40,7	6,2
2015	9,0	12,6	5,1
2016	3,5	10,7	3,6
2017	5,0	6,4	5,5

Tableau 16 : Comparaison à l'échelle annuelle (année civile) entre le volume annuel d'eau provenant du réservoir M du modèle Pluie-Débit (= débit de base) et le volume d'eau moyen exploité pour l'alimentation en eau potable par l'usine de Dardennes. Le modèle utilisé est Dard-Non_Lin, calé sur la période P2.

Année hydrologique (1er sept. N – 31 août N+1)	Modèle Dard_Non_Lin calage P2		Volume moyen d'eau exploité (millions m ³ /an)
	Volume moyen d'eau écoulé à travers le réservoir M (millions m ³ /an)	Volume moyen d'eau écoulé simulé total (millions m ³ /an)	
2013-2014	9,8	27,8	6,2
2014-2015	12,2	32,2	6,0
2015-2016	3,1	5,0	3,5
2016-2017	6,0	12,7	6,0

Tableau 17 : Comparaison à l'échelle d'un année hydrologique entre le volume annuel d'eau provenant du réservoir M du modèle Pluie-Débit (= débit de base) et le volume d'eau moyen exploité pour l'alimentation en eau potable par l'usine de Dardennes. Le modèle utilisé est Dard-Non_Lin, calé sur la période P2.

7.2 SIMULATION D'UNE CRUE SUITE À UNE PLUIE EXTRÊME

Les modèles Pluie-Débit permettent de tester des scénarios divers. La validité des résultats est toutefois limitée par deux critères majeurs : (1) l'échelle temporelle des phénomènes observés et modélisés, (2) la gamme de variation de données disponible, en particulier les mesures sur des phénomènes extrêmes rares. Le modèle Dard_Non_Lin a été établi à l'échelle journalière, il ne permet donc pas d'obtenir le débit de pointe maximum qui pourrait être observé aux sources de Dardennes car les crues sont généralement très rapides (1 à 2 jours). Par contre, c'est un modèle qui donne une valeur journalière moyenne valide. Toutefois, sur les périodes d'observations utilisées pour les calages, aucune pluie journalière supérieure à 90 mm/jour n'a été observée (Figure 4).

La région de Dardennes est un jour susceptible de faire face à un événement pluvieux de forte intensité, de type méditerranéen, comme ce fut le cas à Draguignan le 15 juin 2010 avec des précipitations atteignant 270 mm/j. Il est donc proposé d'utiliser le modèle Dard_Non_Lin pour simuler l'effet d'une pluie extrême, en gardant à l'esprit que le modèle est au pas de temps journalier et qu'il n'a pas été calé sur des pluies extrêmes.

Pour cela, une pluie artificielle de 100, 200 ou 300 mm/j est imposée le 15 mai 2015 (soit 3 simulations différentes). De même, pour prendre en compte le rôle d'une saturation de l'épikarst (réservoir E) dans ce type d'évènement, un second lot de simulations est fait en imposant une pluie supplémentaire de 30 mm/j le jour précédant la pluie extrême (le 14 mai 2015).

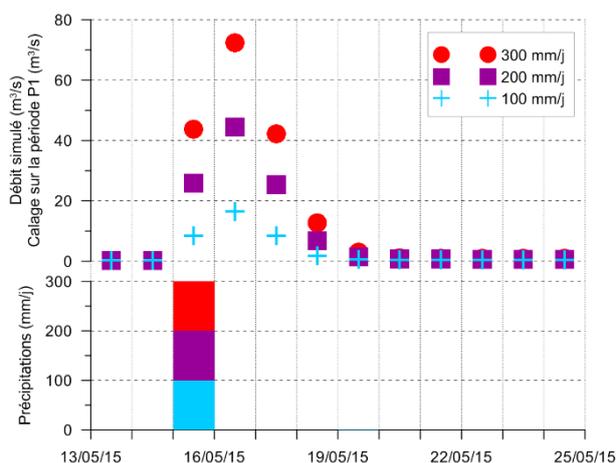


Figure 19 : Simulation du débit des sources de Dardennes dans le cas d'un événement pluvieux exceptionnel avec une pluie artificielle (100 mm/j, 200 mm/j ou 300 mm/j) insérée dans la chronique de données le 15 mai 2015

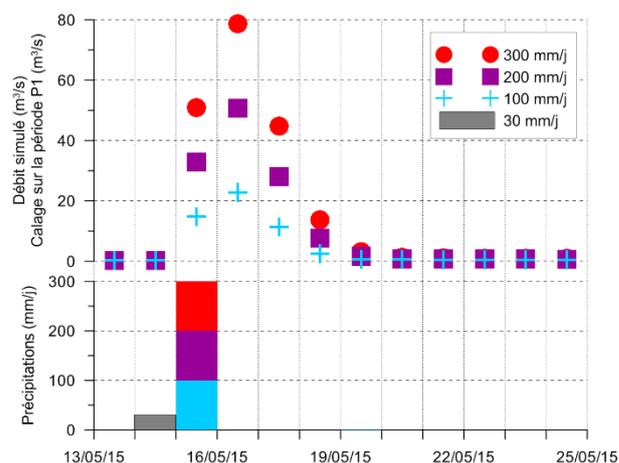


Figure 20 : Simulation du débit des sources de Dardennes dans le cas d'un événement pluvieux exceptionnel avec une pluie artificielle (30 mm/j puis 100 mm/j, 200 mm/j ou 300 mm/j) insérée dans la chronique de données le 14 et 15 mai 2015

En supposant des précipitations de 300mm en 1 jour, le débit maximal pourrait atteindre 72,4 m³/s le jour suivant les précipitations (Figure 19) ou 78,7 m³/s dans le cas où l'épikarst a été rechargé par la pluie de 30mm le jour précédant (Figure 20). De tels débits qui se déverseraient dans le Las engendreraient des inondations par débordement au niveau de l'entrée de la rivière couverte (Parc Burnett à Toulon, voir les documents du TRI de Toulon), qui pourraient également être amplifiées par le ruissellement urbain.

7.3 LONGUE CHRONIQUE PLUIE-ETP

Vingt ans de précipitations et d'évapotranspiration, de 1998 à 2018, sont disponibles pour simuler le débit des sources de Dardennes à l'aide du modèle Dard_Non_Lin avec les deux calages précédemment présentés. Cette longue chronique (Figure 21) montre l'occurrence de crues entre 25 et 30 m³/s tous les 3 ans environ, et de crues de quelques m³/s chaque année. L'évolution du débit est directement liée aux

précipitations et en particulier aux pluies de forte intensité (ici l'intensité est donné au pas de temps du modèle : journalier) qui génèrent les crues maximales bien identifiables graphiquement sur la Figure 21. Le débit moyen journalier maximal simulé est de $32,6 \text{ m}^3/\text{s}$ lors de la crue du 15 décembre 2008, qui fut également la plus forte crue observée utilisée comme crue de référence sur la rivière Huveaune (région d'Aubagne, station hydrométrique Y4424040). Les niveaux d'eau simulés dans les réservoirs M et C ont été ajoutés à la Figure 21 afin de montrer que les modèles n'ont pas de dérive à l'échelle interannuelle (pas de stockage ou de déstockage de l'eau).

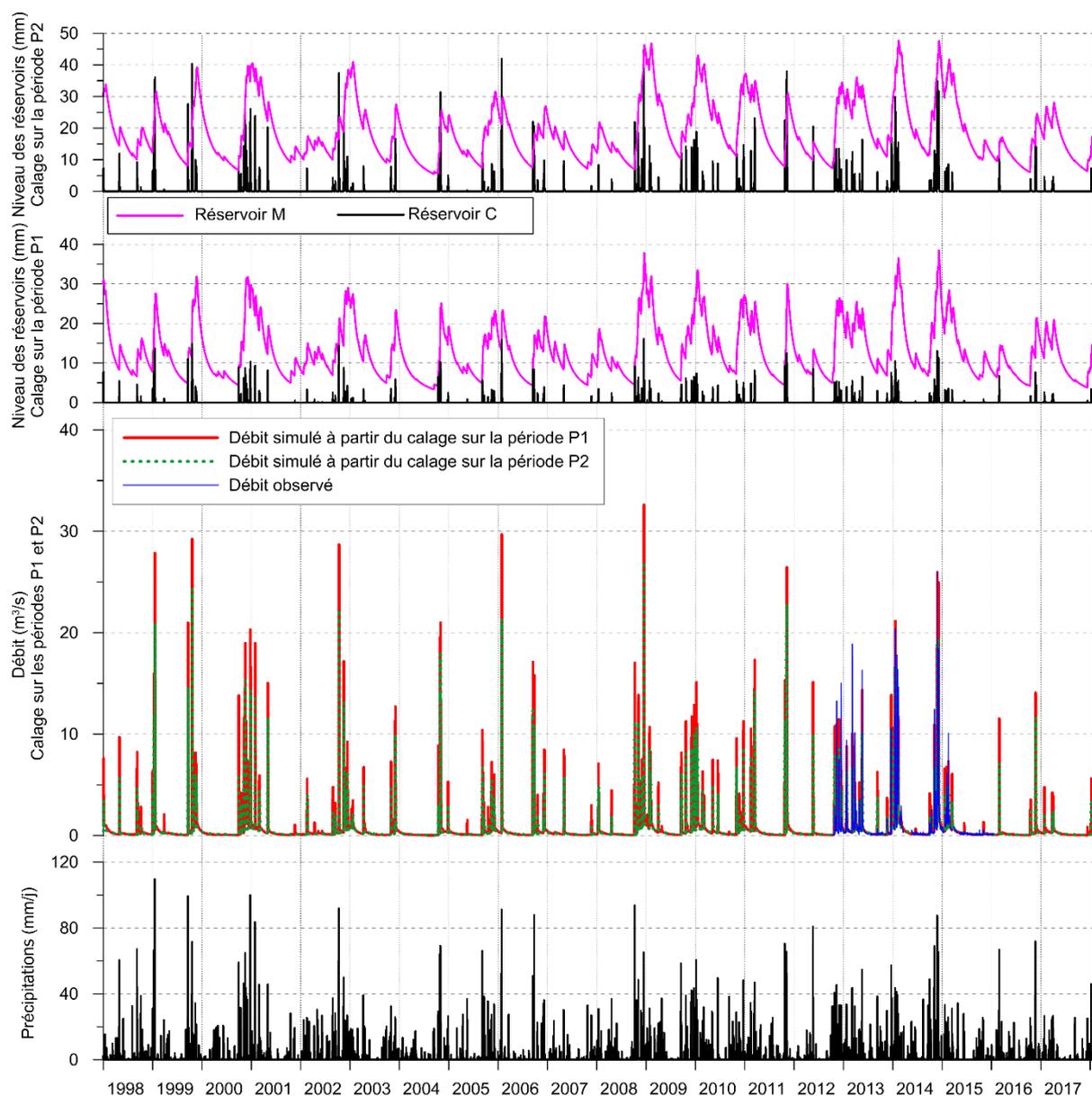


Figure 21 : Simulation du débit des sources de Dardennes sur une longue chronique (1998 à 2018) avec le modèle Dard_Non_Lin calé sur les périodes P1 et P2

Deux graphiques sont donnés en annexes 11.1a et 11.1b, présentant les simulations par décennie afin d'avoir une lecture plus aisée des résultats. L'annexe 11.2 est un graphique qui combine la Figure 21 et la Figure 22, donnant ainsi une comparaison des données journalières et par année hydrologique.

Les résultats des modèles sont synthétisés par année hydrologique dans la Figure 22. Cette figure permet de visualiser l'évolution au cours du temps du débit de base (débit du réservoir Matrice vers la source : Q_{MS}) et du débit de crue (Débit du réservoir Conduit vers la source : Q_{CS}). L'évolution du débit d'une année sur l'autre est variable en fonction des précipitations ; il se comporte comme sur la période 2012-2018 décrite dans la partie 7.1.2 de ce rapport. Les années peu pluvieuses sont facilement identifiables, avec un débit total annuel (somme de Q_{CS} et Q_{MS}) moyen aux sources de Dardennes qui est inférieur à

300 l/s, composé majoritairement de débit lié aux écoulements lents. Cette figure donne aussi l'évolution du débit total moyen annuel des sources de Dardennes de 1998 à 2017 (par cycle hydrologique). Sur les vingt années simulées, le débit de base moyen est compris entre 0,22 et 0,29 m³/s, et le débit total interannuel entre 0,60 et 0,73 m³/s (modèles Dard_Non_Lin P2 et P1 respectivement).

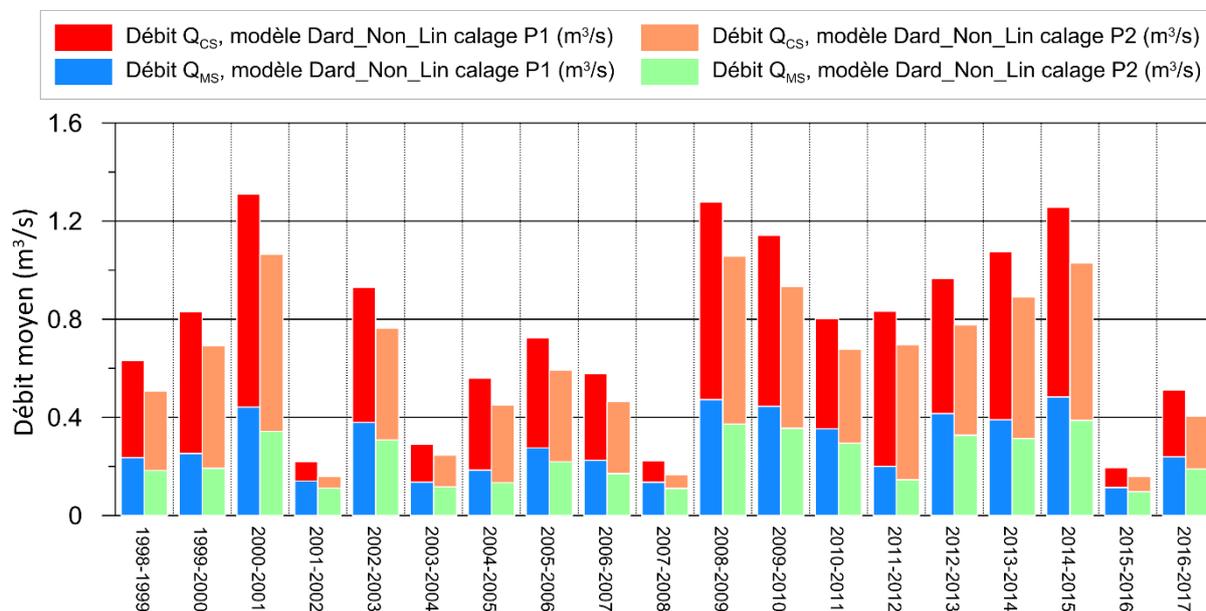


Figure 22 : Déconvolution entre l'écoulement lent (débit Q_{MS}) et l'écoulement rapide (Débit Q_{CS}) par cycle hydrologique du débit moyen annuel aux sources de Dardennes, simulé avec le modèle Dard_Non_Lin (calage sur la période P1 et la période P2), entre 1998 et 2017 (1^{er} septembre N au 31 août N+1)

7.4 EFFET D'UNE ANNÉE SANS PLUIE

Cette simulation consiste à imposer une année sans pluie à la suite de la période d'étiage de 2017, à partir du 30/09/2017. Le débit va donc décroître suivant la vidange du réservoir M vers la source. Les résultats sont donnés dans la Figure 23, avec un zoom sur les débits inférieurs à 1 m³/s. Dans le scénario choisi, au bout d'un an, le 30/09/2018, le débit serait minimum, de l'ordre de 5 à 8 l/s. Un tel scénario n'est bien évidemment pas attendu en réalité, car même lors des années peu pluvieuses il y a toujours quelques précipitations qui auraient pour effet de recharger en partie l'aquifère. Toutefois, les faibles précipitations du cycle 2015-2016 (Tableau 15, Tableau 17) ont montré que dans ces conditions le débit total des sources de Dardennes diminue fortement.

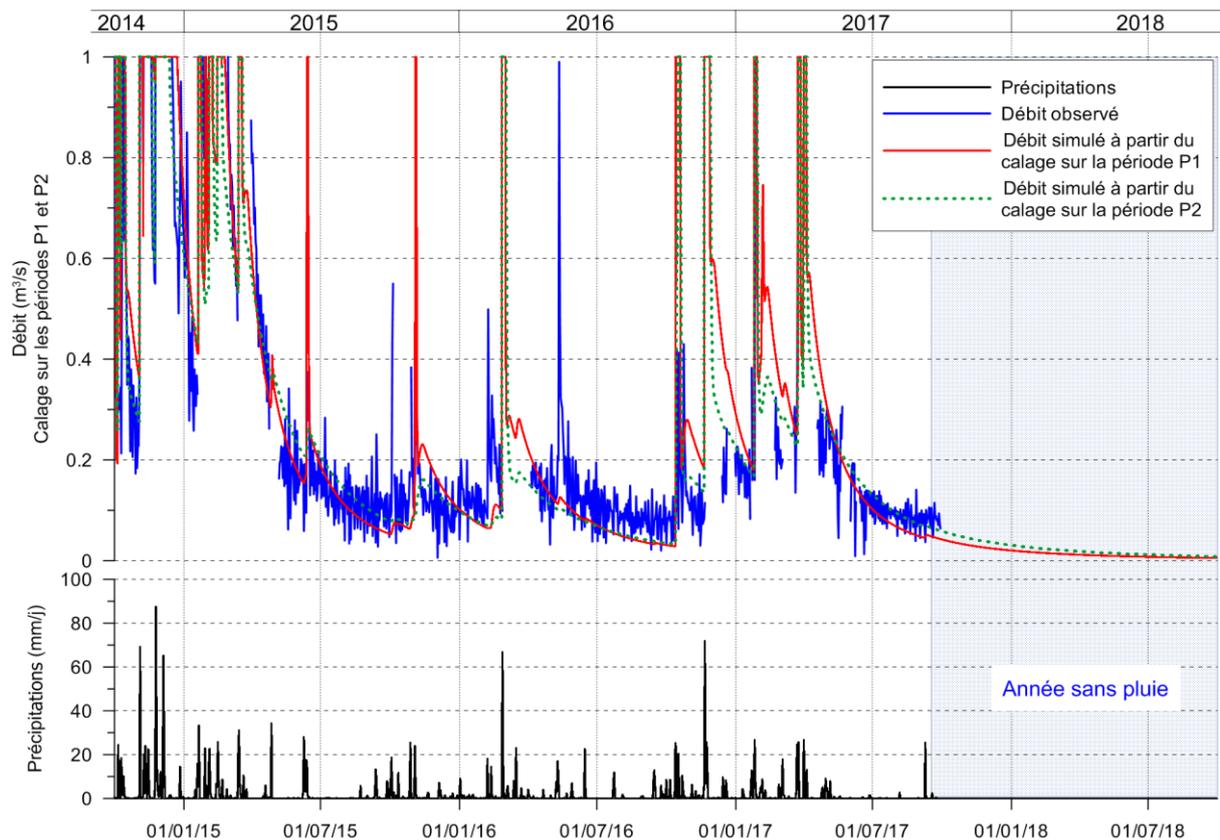


Figure 23: Simulation du débit des sources de Dardennes dans le scénario d'une année sans aucune précipitation qui ferait suite à l'été 2017 (démarrage de la période sans pluie le 30/09/2017). Le modèle utilisé est Dard_Non_Lin, avec les deux calages sur les périodes P1 et P2.

7.5 CONCLUSION

Le travail présenté par Baudement (2018) avait mis en évidence le fonctionnement hydrodynamique complexe du karst de Dardennes, et en particulier les modalités d'écoulement suivant deux composantes lentes et rapides. Le modèle Pluie-Débit Dard_Non_Lin est un outil de prédiction du débit total des sources de Dardennes en fonction de la pluie (et de l'évapotranspiration) sur le bassin versant. Ce modèle a permis d'améliorer la simulation des débits d'été, par rapport au modèle initialement proposé par Baudement (2018). Il utilise une structure qui simule les composantes rapides et lentes de l'écoulement, permettant ainsi de différencier les volumes d'eau qui transitent en crue et qui ne sont pas disponibles pour l'exploitation pour l'AEP, et les volumes d'eau qui assurent le débit de base. Le débit simulé est celui des sources de Dardennes, sans tenir compte du stockage de l'eau dans le lac ou dans l'aquifère si le niveau d'eau était artificiellement diminué par pompage. Pourtant les observations faites par les gestionnaires du lac de Dardennes (Véolia) et les données de niveau du lac montrent que lorsque le niveau d'eau du lac est bas, l'aquifère va stocker une partie des écoulements rapides et ainsi limiter les crues. Un second modèle, Dard_Sans_Fond va donc être proposé dans la partie suivante pour simuler les niveaux d'eau en cas d'exploitation de l'eau par pompage avec rabattement du niveau sous les sources actuelles.

8 MODÉLISATION DU NIVEAU D'EAU ET DES POMPAGES DU RAGAS DE DARDENNES AVEC UN NOUVEAU MODÈLE PLUIE-DÉBIT-NIVEAU (DARD_SANS_FOND)

L'objectif de ce chapitre est de proposer un nouveau modèle Pluie-Débit qui soit également capable de simuler le niveau d'eau représentatif dans la partie karstique à écoulement rapide de l'aquifère. Le modèle est développé avec la plateforme KarstMod. L'avantage de ce modèle est d'inclure un pompage, correspondant au prélèvement d'eau pour l'AEP du barrage de Dardennes, qui va faire varier le niveau du lac. Le débit simulé à la source (Q_s dans la structure KarstMod - Figure 24) n'est plus le débit total des sources de Dardennes comme dans le modèle Dard_Non_Lin précédant, mais seulement le débit des sources qui part vers le Las, c'est-à-dire le débit qui alimente le Las à l'aval du barrage de Dardennes. La part d'eau stockée/déstockée du lac est représentée par la variation de niveau d'eau dans les réservoirs M et C, et l'eau prélevée pour l'AEP est rajoutée comme donnée d'entrée du modèle KarstMod.

Un nouveau modèle Pluie-Débit, dénommé Dard_Sans_Fond, est donc construit, puis calé. Ensuite, le niveau d'eau est simulé en tenant compte du stock d'eau du lac de Dardennes et du stock d'eau emmagasiné ou libéré dans l'aquifère lorsque le niveau d'eau varie. Le niveau d'eau ainsi obtenu est comparé au niveau d'eau dans le Ragas de Dardennes, qui constitue un regard sur le réseau de conduits karstiques de l'aquifère. Le modèle est utilisé pour simuler l'évolution des niveaux d'eau au cours du temps en cas de pompage imposé à 300 l/s.

8.1 STRUCTURE DU MODÈLE DARD_SANS_FOND

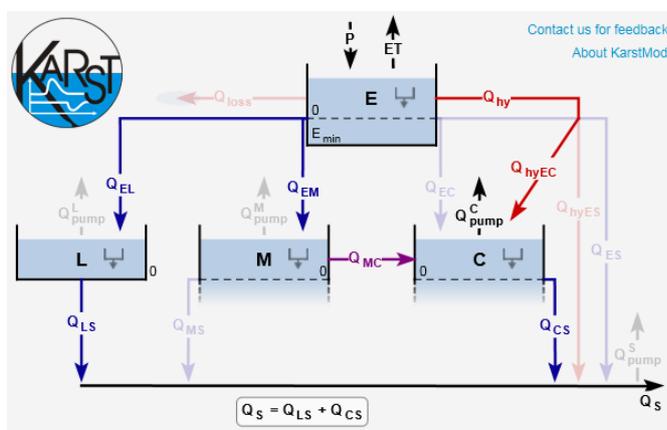


Figure 24: Structure du modèle Dard_Sans_Fond, simulant le débit des sources de Dardennes alimentant le Las à l'aval du barrage de Dardennes, et tenant compte du prélèvement AEP dans le réservoir C.

Le nouveau modèle Pluie-Débit Dard_Sans_Fond a pour objectif de simuler le débit qui alimente le Las à l'aval du barrage et le niveau d'eau du Ragas. Le débit Q_s est donc le débit du Las et non pas le débit de la source. Un modèle à 4 réservoirs est proposé (Figure 24) : le réservoir E pour la recharge (entrée = précipitation – évapotranspiration, sortie vers les réservoirs inférieurs), et trois réservoirs L, M, C pour le transfert vers le Las. Lorsque le lac ne déborde pas, l'eau qui alimente le Las vient des fuites du barrage (Q_{Ls}), qui seront simulées par un réservoir indépendant (réservoir L). Les réservoirs M et C sont interconnectés (Q_{MC}), et l'eau s'écoule vers le Las (Q_{Cs}) uniquement à partir du réservoir C car l'intégralité de l'aquifère (matrice + conduit) est drainé par les sources karstiques de Dardennes. Les réservoirs M et C sont des « réservoirs sans fond », c'est-à-dire que le niveau d'eau de ces réservoirs peut diminuer sous le niveau « zéro » lorsqu'un prélèvement par pompage AEP a lieu (Q_{C_pump}). Dans ce cas, l'eau ne s'écoule plus du réservoir C vers le Las (Q_{Cs}). Le pompage AEP est imposé dans le réservoir C, c'est-à-dire dans le karst, car le pompage réel a lieu soit directement dans le Ragas, soit dans le lac alimenté directement par les sources karstiques du fond du lac et connectées au Ragas. A

l'inverse, quand le débit de recharge est plus important que le débit AEP, le niveau d'eau dans le réservoir C remonte, reconstituant ainsi le stock d'eau, jusqu'à atteindre le niveau de débordement et alimenter de nouveau l'écoulement Q_{CS} . Dans cette structure de modèle, le réservoir M va représenter l'écoulement lent qui alimente à l'étiage le débit de pompage.

Synthèse des 4 réservoirs choisis dans la structure du modèle Dard_Sans_Fond :

- Le réservoir E, pour Epikarst, qui représente la zone supérieure de l'aquifère karstique et pour lequel un niveau minimum E_{min} est défini. Ce niveau minimum représente la réserve utile du sol, uniquement sollicitée par l'ETP. Un seuil E_{hy} est aussi imposé et représente le niveau d'eau à dépasser pour que la composante rapide du débit s'active ;
- Le réservoir M représente la Matrice de l'aquifère karstique. Ce réservoir va permettre de simuler la composante lente du débit (ou débit de base) et est alimenté par l'Epikarst (Q_{EM})
- Le réservoir C, pour Conduit, représente les structures karstiques, typiquement le Ragas dans le cas des sources de Dardennes. Ce réservoir est alimenté par l'Epikarst (Q_{hyEC}) via un seuil de débordement et par la Matrice (Q_{MC}).
- Le réservoir L, pour Latéral, permet de simuler un écoulement lent représentant les fuites observées sous le barrage et donc un apport quasi constant au débit de base.

Ce modèle a été initialement testé dans le cadre du stage de Master 2 de Guillaume Carles (2017). Le calage du modèle a été entièrement revu pour ce rapport. La transformation du niveau d'eau du réservoir C en niveau d'eau du Ragas a été développée pour ce nouveau modèle Dard_Sans_Fond.

8.2 NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE ÉQUIVALENT ET VARIATION DU STOCK DANS LA RETENUE DE DARDENNES

Le calage du modèle Dard_Sans_Fond repose à la fois sur la comparaison du débit simulé avec le débit observé alimentant le Las à l'aval du lac de Dardennes, et sur la comparaison du niveau d'eau simulé dans le réservoir C avec le niveau mesuré au Ragas.

La transformation du niveau d'eau d'un réservoir de modèle Pluie-Débit en niveau d'eau réel a déjà été proposée dans la littérature scientifique et prend la forme générale suivante (Mazzilli et al., 2017) :

$$Z = Z_0 + \frac{C}{\omega}$$

- Z : niveau piézométrique équivalent (m NGF)
- Z_0 : Niveau de référence (mNGF)
- C : Niveau d'eau simulé dans le réservoir C (m NGF)
- ω : Porosité effective

Dans le cas du système karstique de Dardennes, le niveau de référence Z_0 correspond à la côte de débordement du lac (=123 m NGF). Trois zones verticales sont définies :

- (1) au-dessus de 123m, il s'agit de la zone de variation du niveau d'eau en crue, lorsque l'eau monte dans le Ragas et déborde à 149 mètres.
- (2) entre 123 m et 94 m, il s'agit de la zone de variation du niveau d'eau dans le lac de Dardennes. Sur cette tranche, l'eau sera stockée à la fois dans le lac et dans la porosité de l'aquifère. La relation entre le volume d'eau stocké dans le lac et la hauteur d'eau est connue et fournie par Véolia.
- (3) sous 94 m, le lac est vide, la variation de niveau d'eau dépend du stock d'eau dans la porosité de l'aquifère.

En dehors des périodes de crue, le niveau d'eau dans le Ragas et dans le lac sont équivalents. La simulation du niveau du Ragas permet donc de simuler implicitement le niveau du lac.

Il a été choisi de fixer une valeur de porosité pour les hauteurs supérieures à 123m et une seconde valeur pour les altitudes de l'eau inférieures à 123m. Différents tests de calages du modèle Pluie-Débit et du niveau d'eau simulé donnent :

Pour $C > 123$ mNGF : porosité = 0,0009

Pour $C < 123$ mNGF : porosité entre 0,001 et 0,0005

La Figure 25 donne le volume d'eau stocké dans le lac et l'aquifère en fonction du niveau d'eau entre 94m et 123m. Ce volume varie en fonction de la porosité de l'aquifère, en considérant que l'intégralité de la surface de recharge est sollicitée (70 km²). Par exemple, si le niveau d'eau (H) descend de l'altitude 123 mètres à 109 mètres, il y aura environ 950 000 m³ d'eau déstockés du lac (courbe bleue) et entre 500 000 et 1 000 000 m³ supplémentaires pris de la porosité de la roche (courbes grise ou rouge). La Figure 26 exprime les mêmes résultats de volume en lame d'eau équivalente, montrant ainsi que le stock d'eau du lac et de la porosité de la roche correspond à une lame d'eau de plusieurs dizaines de mm d'eau (contenue dans un réservoir de surface la taille du bassin versant).

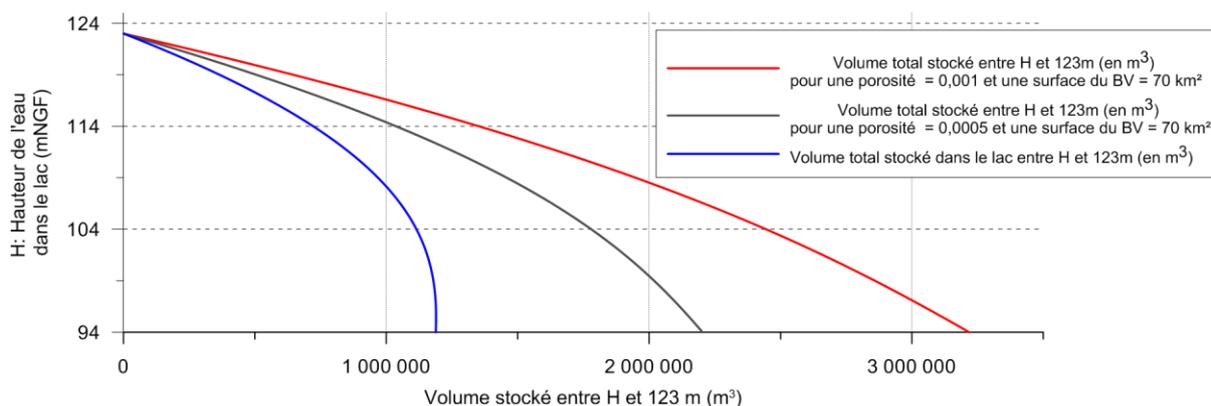


Figure 25 : Volume d'eau stocké dans le lac et l'aquifère en fonction de la hauteur d'eau dans le lac (résultats obtenus pour deux valeurs de porosité de l'aquifère et une surface de 70 km²)

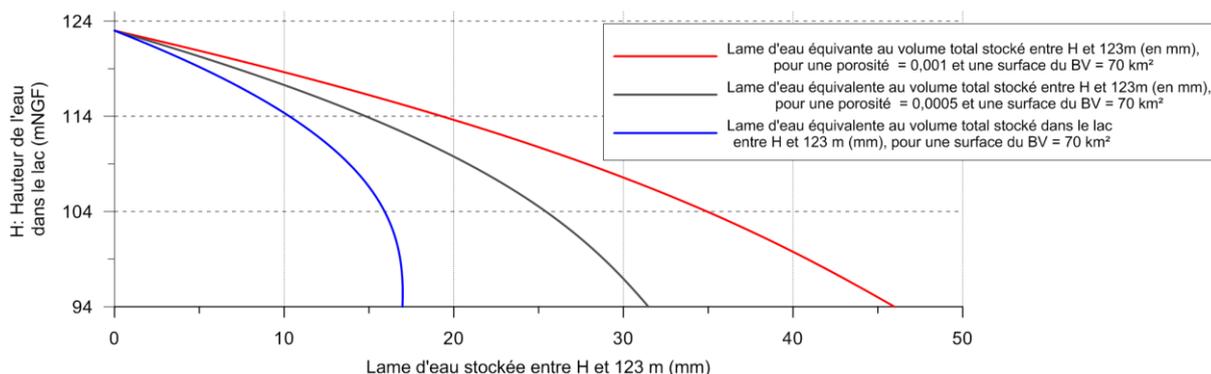


Figure 26 : Lame d'eau stockée en fonction de la hauteur d'eau dans le lac (résultats obtenus pour deux valeurs de porosité de l'aquifère et une surface de 70 km²)

8.3 CALAGE DU MODÈLE DARD_SANS_FOND

La gamme de paramètres utilisée est présentée dans le Tableau 18. Dans la gamme testée pour ce modèle, les paramètres R_a et K_{MC} sont fixés à partir du travail effectué sur le modèle Dard_Non_Lin. Pour le paramètre K_{LS} , il a été fixé pour simuler les fuites par une décharge lente du réservoir L.

Le calage du modèle a d'abord été réalisé par une optimisation automatique des paramètres dans KarstMod avec la même fonction objectif que le modèle Dard_Non_Lin (sur la période du 22/12/2012 au 30/08/2014), mais l'observation graphique des résultats n'était pas satisfaisante. Autrement dit, la fonction objectif basée uniquement sur les débits (Nash, Balance Error) n'était pas suffisante. Un calage

manuel par essai-erreur a finalement permis d'ajuster les paramètres, en comparant le niveau d'eau du Ragas avec le niveau du réservoir C (corrigé de la variation de stock du lac de Dardennes).

Paramètre	Unité	Dard_Non_Lin _P1	Gamme testée Dard_Sans _Fond	Modèle calé Dard_Sans _Fond
R_A	km ²	69,8	70	70
E_{min}	mm	-14,7	(-30) – (-10)	-20,7
E_{hy} = E_{seuilC}	mm	16,5	10 – 50	13,3
k_{EM}	mm/j	0,118	0,01 – 1	0,042
k_{hy} = k_{EC}	mm/j	0,974	0,01 – 3	1,50
k_{CS}	mm/j	2,6	0,3 – 3	1,37
k_{MS}	mm/j	0,0025	-	-
α_{MS}	-	1,86	-	-
K_{EL}	mm/j	-	0,009 – 0,09	0,01
K_{MC}	mm/j	-	0,0025	0,0025
K_{LS}	mm/j	-	0,01	0,01
Porosité au-dessus de 123m			0,0001 à 0,05	0,009
Porosité sous 123m			0,0001 à 0,005	entre 0,0005 et 0,001

Tableau 18 : Synthèse des paramètres calés avec le précédent modèle Dard_Non_Lin et avec le nouveau modèle Dard_Sans_Fond (gamme testée et valeurs retenues). Le modèle Dard_Sans_Fond est initialement calé automatiquement dans KarstMod sur la période de calage allant du 22/12/2012 au 30/08/2014 (70j-686j), puis ajusté manuellement par l'utilisateur pour obtenir une simulation du niveau d'eau satisfaisante.

8.4 SIMULATION DU NIVEAU D'EAU DANS LE RAGAS ET DANS LE LAC À L'AIDE DU NIVEAU DU RÉSERVOIR C DE 2013 À 2018

Le modèle Pluie-Débit Dard_Sans_Fond simule le débit s'écoulant vers le Las (Figure 27) et permet de simuler le niveau d'eau du karst à l'exutoire. Il simule correctement le niveau du Ragas, aussi bien en crue lorsque le trop-plein du Ragas s'active ($H > 123\text{m}$), qu'en période de captage pour l'usine AEP sans débordement du lac. La simulation du débit est globalement comparable à celle obtenue avec le modèle Dard_Non_Lin. Toutefois, dans le détail la décrue est généralement moins bien simulée, avec une pente trop abrupte et une rupture entre la décrue et le tarissement.

Le niveau d'eau simulé est représenté pour la gamme de porosité retenue (entre 0,0005 et 0,001). Les grandes tendances de variation du niveau d'eau sont reproduites. Durant l'hiver le niveau reste près de 123 mètres (le lac déborde par le seuil), puis le niveau d'eau diminue au fur et à mesure de l'étiage en fonction de la gestion des prélèvements AEP suivant les années. Le débit de prélèvement AEP diminue également chaque année en fin d'étiage du fait du stock limité du lac. La fin du printemps 2017 fut particulière, avec l'abaissement du niveau d'eau très bas pour permettre l'inspection décennale du barrage (vidange entre le 22 mai et le 13 juin 2017). Ensuite, durant l'été, les prélèvements AEP sont restés inférieurs au débit naturel des sources de Dardennes, engendrant la remontée progressive du niveau d'eau (données observées). Ce fonctionnement est bien simulé par le modèle Dard_Sans_Fond, qui simule également une remontée du niveau d'eau grâce à l'alimentation du réservoir C par le débit lent venant du réservoir M.

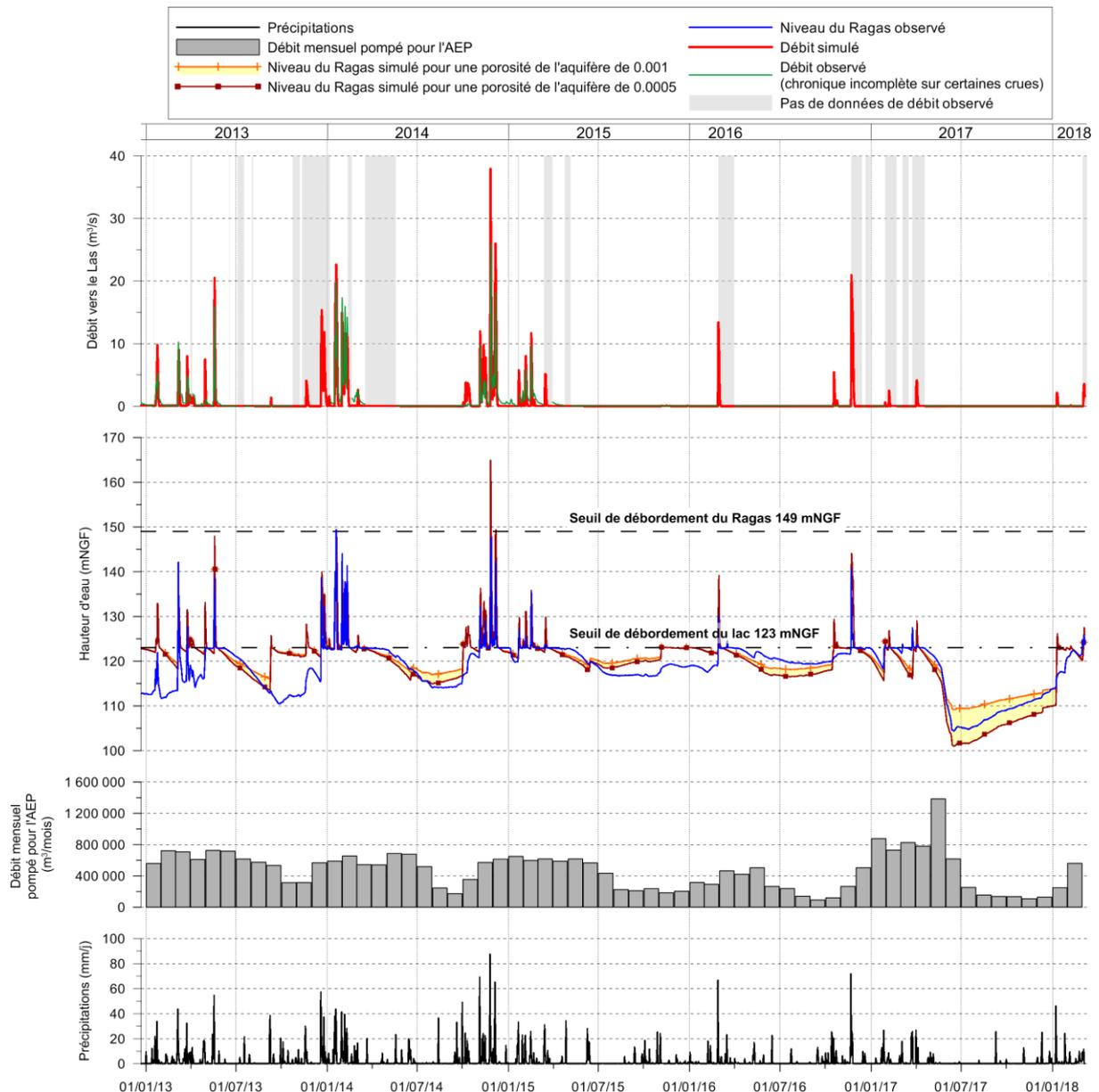


Figure 27 : Simulation par le modèle Dard_Sans_Fond du niveau d'eau moyen journalier dans le Ragas et du débit vers le Las à l'aval du barrage de Dardennes (ce débit inclut aussi la part d'eau évaporée du lac), entre 2013 et 2018. Le niveau d'eau simulé est proposé pour deux gammes de porosité de l'aquifère. Le débit mensuel pompé pour l'AEP et les précipitations journalières sont également représentées. Le débit pompé du mois de juin 2017 inclut environ 640 000 m³ d'eau lâchés dans le Las par ouverture des vannes du barrage pour la vidange décennale.

Le modèle présente toutefois une erreur systématique lors de la reprise de fin d'été. Des pluies estivales ou automnales de plus de 40 mm peuvent en effet générer une recharge du réservoir C par écoulement rapide et provoquer la remontée du niveau d'eau, alors que le niveau observé reste bas (Figure 27). Il s'agit dans ce cas d'un stockage dans la zone non saturée de l'aquifère, qui est ici sous-estimée.

8.5 SIMULATION DU NIVEAU D'EAU EN CAS DE POMPAGE POUR L'AEP À DÉBIT CONSTANT 300 L/S (PÉRIODE 2013 À 2018)

La Figure 28 représente la simulation des niveaux d'eau en imposant un débit de pompage constant de 300 l/s à partir du 1^{er} mars 2014. La période de simulation entre octobre 2012 et le 0/03/2014 sert de période de chauffe du modèle, avec le débit de prélèvement AEP réellement observé. Pour les deux

valeurs de porosité proposées, les niveaux d'eau simulés dans le Ragas (et donc dans le lac hors périodes de crue) sont inférieurs à 94 mètres d'altitude (niveau bas du lac). Il sera donc nécessaire de pomper pour pouvoir prélever ce débit. Avec la valeur de porosité la plus faible, le niveau descend jusqu'à l'altitude de 20 mètres. Le cycle 2015-2016 étant particulièrement peu pluvieux, le niveau d'eau simulé remonte lors du fort événement de février 2016, mais le niveau n'atteint pas la côte de débordement du lac. Il faut attendre les très fortes pluies de novembre 2016 pour que le niveau du lac retrouve son niveau initial, avec débordement à 123 mètres.

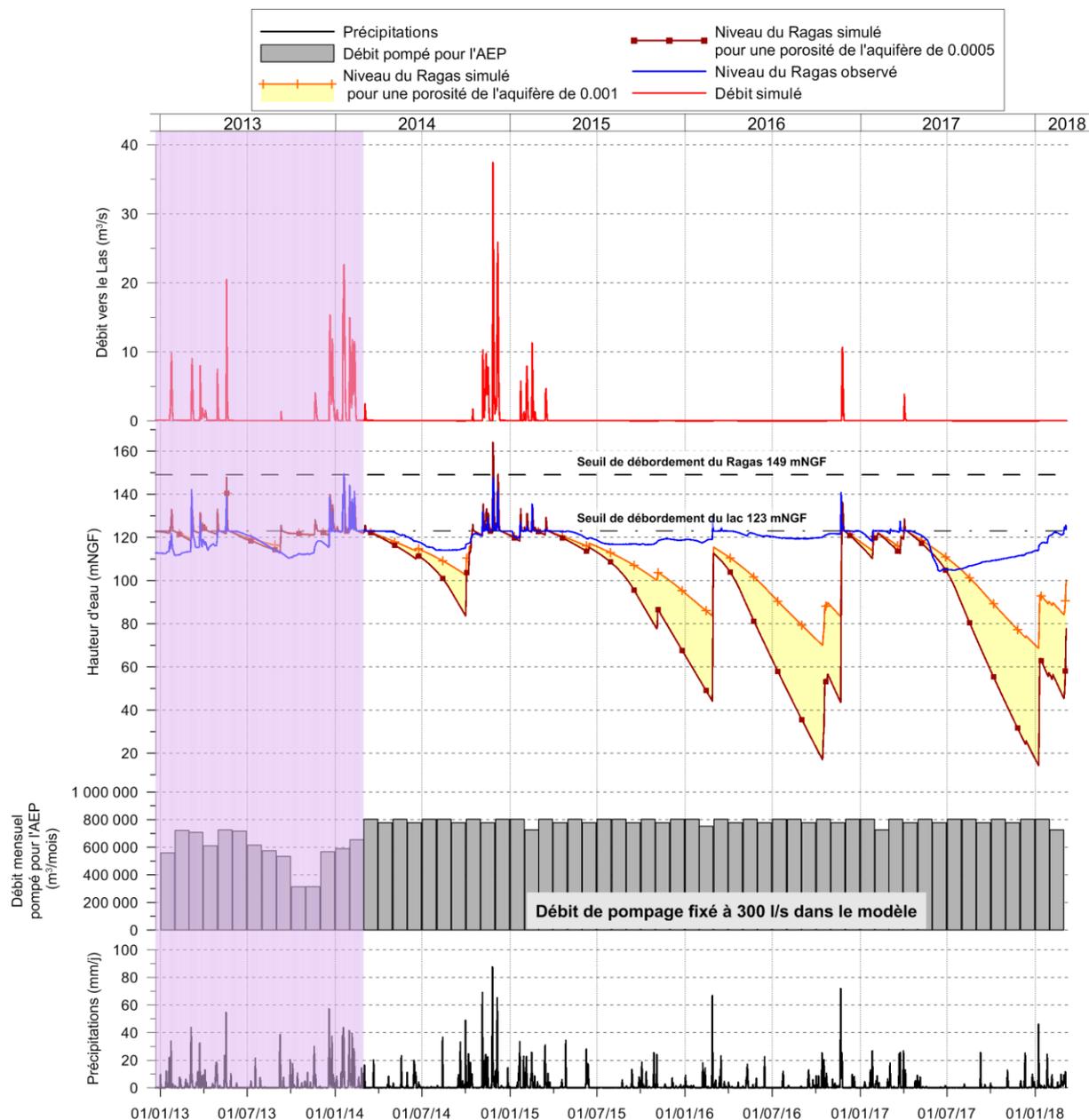


Figure 28 : Simulation par le modèle Dard_Sans_Fond du niveau d'eau moyen journalier dans le Ragas et du débit vers le Las à l'aval du barrage de Dardennes (ce débit inclut aussi la part d'eau évaporée du lac), entre 2013 et 2018. Le niveau d'eau simulé est proposé pour deux gammes de porosité de l'aquifère. Le débit pompé pour l'AEP est imposé à 300 l/s à partir du 01/03/2014. Il n'y a pas de débit observé dans ces conditions de pompage car il s'agit d'un scénario non observé.

Il a été montré avec le modèle Dard_Non_Lin que le débit total moyen annuel est généralement supérieur à 0,3 m³/s aux sources de Dardennes (Tableau 12, Tableau 13). Seul le cycle 2015-2016 donne un débit inférieur (0,19 à 0,16 m³/s suivant le calage P1 ou P2). Ces résultats montrent qu'un pompage à 300 l/s aux sources de Dardennes (nécessairement en profondeur) serait, certaines années comme 2015-2016, supérieur au débit naturel des sources et puiserait donc dans les réserves de l'aquifère. Toutefois,

l'aquifère sera rechargé rapidement lors des prochaines pluies intenses qui utiliseront le réseau dénoyé de conduits karstiques pour remplir le stock d'eau facilement ; c'est ce que la Figure 28 illustre avec la remontée du niveau d'eau lors des pluies de novembre 2016.

Ces résultats doivent tout de même être utilisés avec précaution car la méthodologie utilisée dans l'application du modèle Pluie-Débit a deux limites importantes : (1) le modèle n'a pas été calé ni validé pour des niveaux d'eau observés inférieurs à 104 mètres, (2) le pompage à un débit supérieur au débit naturel des sources va engendrer un rabattement avec un rayon d'action qui n'a ici pas été pris en compte. De plus, la simulation des niveaux d'eau est faite en considérant une porosité constante des formations géologiques sollicitées sans distinguer si il s'agit d'une porosité de conduits ou une porosité fissurale et intergranulaire, ce qui est nécessairement une approximation qui ajoute une erreur possible supplémentaire aux résultats du modèle.

8.6 SIMULATION DU NIVEAU D'EAU DANS LE RAGAS ET DANS LE LAC À L'AIDE DU NIVEAU DU RÉSERVOIR C DE 1998 À 2018

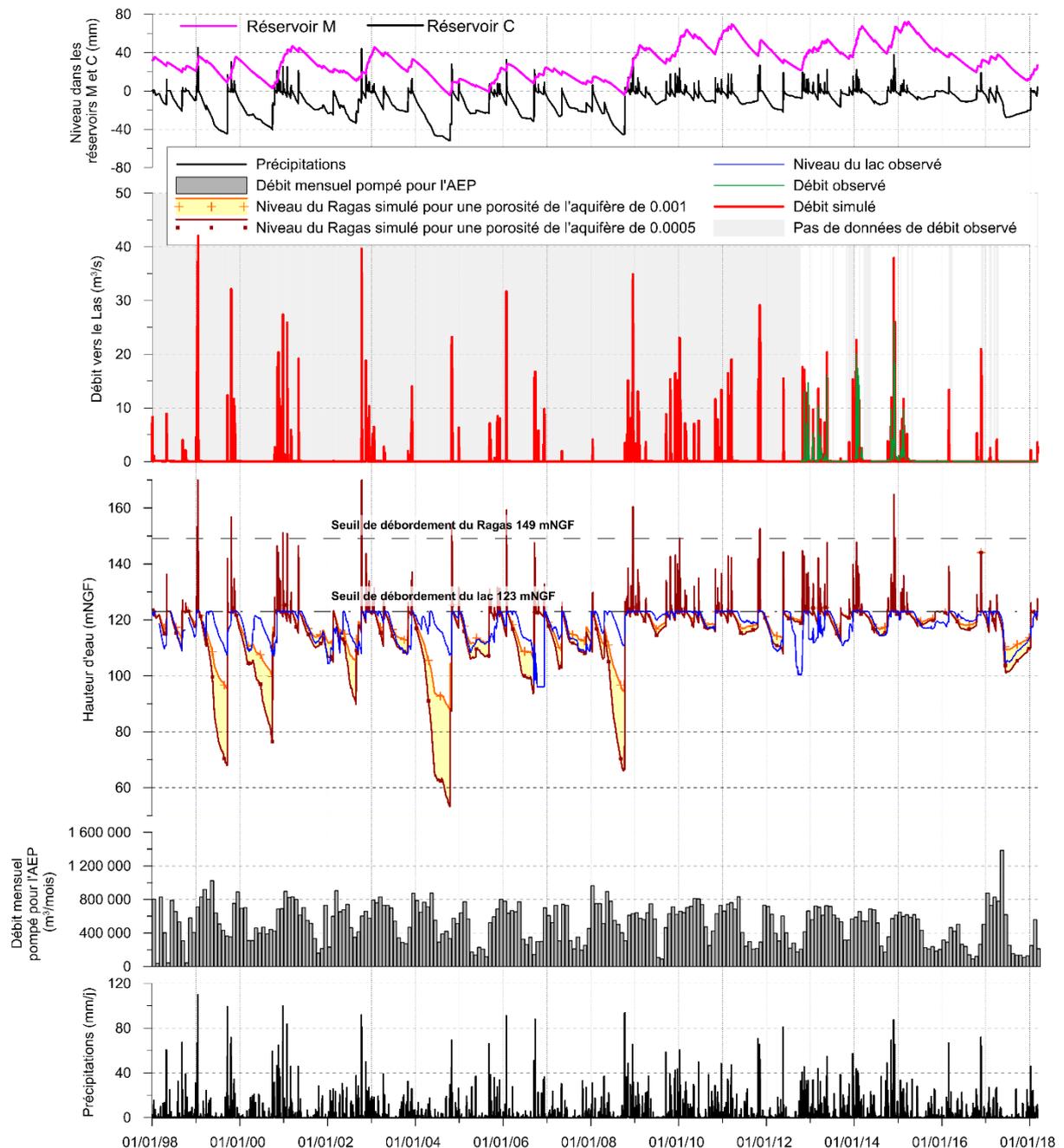


Figure 29 : Simulation par le modèle Dard_Sans_Fond du niveau d'eau moyen journalier dans le Ragas et du débit vers le Las à l'aval du barrage de Dardennes, entre 1998 et 2018. Le niveau d'eau simulé est proposé pour deux gammes de porosité de l'aquifère. Le débit mensuel pompé pour l'AEP et les précipitations journalières sont également représentées. Le débit pompé du mois de juin 2017 inclut environ 640 000 m³ d'eau lâchés dans le Las par ouverture des vannes du barrage pour la vidange décennale. Le niveau du Ragas n'étant pas mesuré avant 2012, c'est le niveau du lac observé qui est représenté sur la figure.

Le modèle Dard_Sans_Fond est utilisé avec la chronique journalière de Pluie et d'ETP et le débit prélevé pour l'AEP aux sources de Dardennes sur la période de 1998 à 2018. Le niveau d'eau du Ragas est simulé, mais il n'y a pas de données observées disponibles (sauf à partir de 2012). Les résultats du modèle vont donc être comparés aux niveaux du lac observés, qui sont équivalents aux niveaux du Ragas en dehors des périodes de crues.

Le niveau du Ragas simulé est donné dans la Figure 29, pour les deux valeurs de porosité précédemment définies. Trois résultats principaux peuvent être tirés de ces graphiques :

1- Certaines périodes apparaissent très mal simulées durant l'été (années 1999, 2000, 2002, 2004, 2008), avec un niveau d'eau simulé très bas, très inférieur au niveau bas du lac (le niveau simulé descend sous 60 mètres en 2004). L'analyse détaillée de ces périodes montre que le modèle génère une baisse continue du niveau d'eau dès le printemps et n'arrive pas à simuler des recharges réellement observées. Le niveau du lac, en bleu sur la Figure 29, remonte jusqu'à 123 mètres lors de ces années mal simulées, alors que le niveau simulé est déjà proche de 100 mètres et continue à baisser. Une explication serait que la pluie réellement tombée sur le bassin d'alimentation des sources soit très hétérogène et donc mal estimée car sur la période 1998 à 2011 seuls les pluviomètres de Toulon et du Castellet sont disponibles (à partir de 2011, les données de la Limate sont utilisées en complément).

D'autres périodes sont mal simulées : il s'agit des périodes où le lac est vidangé par les vannes de fond, car ce débit évacué vers le Las n'est pas connu et donc pas pris en compte dans les données observées. Ce problème a déjà été mis en évidence sur les vidanges de la période 2013-2018, mais il peut aussi s'observer sur cette longue chronique, par exemple lors des vidanges de l'été 2006 et de l'été 2012. Ce débit de vidange non pris en compte se répercute sur les simulations en générant un niveau d'eau simulé trop haut.

2- En dehors des périodes d'été mal simulées précédemment décrites, les tendances de variation du niveau d'eau sont bien simulées. Chaque année présente une période de hautes-eaux avec des pics de crue du Ragas puis une baisse du niveau d'eau dans le lac en fonction des prélèvements AEP. Le modèle ne donne pas des résultats précis au mètre près, mais il reflète correctement les tendances. La simulation sur cette longue chronique (20 ans de données) permet de mettre en évidence qu'il n'y a pas de dérive du modèle. En particulier, le niveau dans les réservoirs M et C ne montre aucune tendance sur le long terme qui pourrait être le signe d'un dysfonctionnement du modèle. De la même manière, il n'y a pas de dérive du système naturel à cette échelle d'observation : la succession de périodes plus sèches ou plus humides n'affecte pas le fonctionnement hydrodynamique de l'hydrosystème qui revient toujours à un état initial imposé par le niveau de débordement du lac.

3- Le système karstique de Dardennes présente des pics de crue importants, observables par les mises en charge du Ragas. Les années hydrologiques les moins pluvieuses (précédemment illustrées en Figure 3) sont 2001-2002, 2003-2004, 2004-2005, 2007-2008 et 2015-2016 ; ces années sont celles qui présentent le moins de pics de crue, voire aucun pic. Les pics les plus forts sont systématiquement associés aux pluies de plus forte intensité, à condition que le système karstique ait été préalablement rechargé par des pluies sur les jours précédents.

8.7 SIMULATION DU NIVEAU D'EAU EN CAS DE POMPAGE POUR L'AEP À DÉBIT CONSTANT 300 L/S SUR UNE LONGUE PÉRIODE (19 ANS)

Le modèle Dard_Sans_Fond est utilisé en mode « Run » pour simuler le débit et la hauteur d'eau dans le Ragas (à partir du niveau du réservoir C) sur la période de 1998 à 2018, en appliquant un débit de pompage pour le captage AEP constant égal à 300 l/s à partir du 1^{er} janvier 1999. L'année 1998 sert de période de chauffe du modèle ; ce sont donc 19 années qui sont simulées et représentées sur la Figure 30. Les résultats doivent être considérés avec prudence car il a été montré précédemment sur la chronique de débits AEP réels que le modèle simulait un niveau d'eau très bas sur les années 1999, 2000, 2002, 2004 et 2008, bien inférieur au niveau observé dans le lac (Figure 29).

Les résultats de la Figure 30 montrent que le niveau d'eau diminue durant chaque été sous l'effet des pompages à fort débit, puis revient à son niveau initial (lac plein à 123 mètres d'altitude) lors des pluies hivernales (le débit des sources est alors plus fort que le débit de pompage). Lorsque les pluies hivernales sont faibles, comme les hivers 2001-2002, 2007-2008 ou 2015-2016, alors le niveau d'eau remonte mais reste plus bas que la cote 100 mètres, engendrant une baisse encore plus importante lors de l'été suivant. Toutefois, sur les 20 ans de données, cette situation n'a jamais duré plus de deux ans. Le

déstockage lent de l'eau du réservoir M permet même d'emmagasiner de l'eau d'un cycle sur l'autre lors d'une succession d'années pluvieuses, comme sur la période 2010-2015 (le niveau dans M monte d'une année sur l'autre sur la Figure 30).

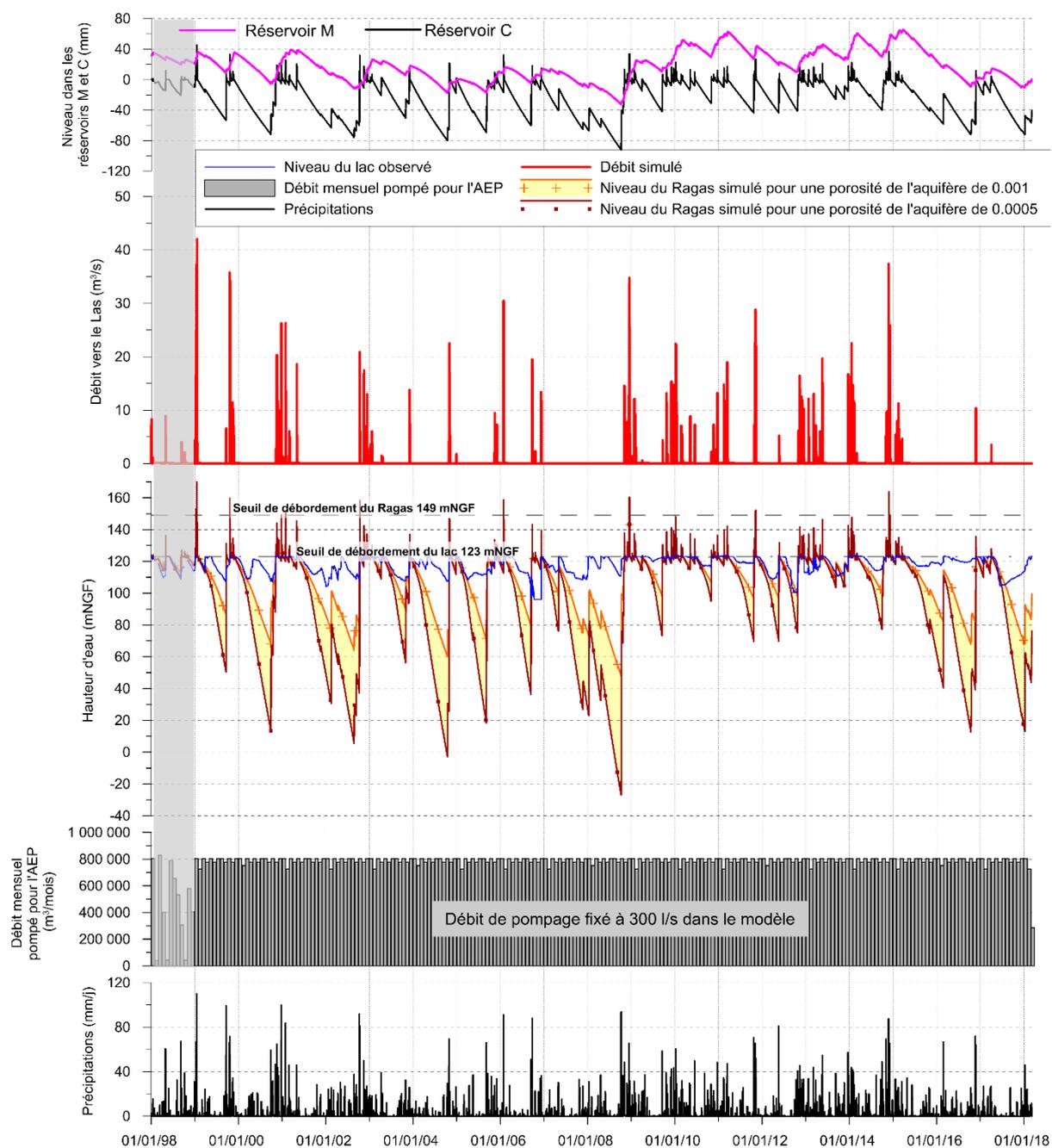


Figure 30 : Simulation par le modèle Dard_Sans_Fond du niveau d'eau moyen journalier dans le Ragas et du débit vers le Las à l'aval du barrage de Dardennes (ce débit inclut aussi la part d'eau évaporée du lac), entre 1998 et 2018. Le niveau d'eau simulé est proposé pour deux gammes de porosité de l'aquifère. Le débit pompé pour l'AEP est imposé à 300 l/s à partir du 01/01/1999. Le niveau du lac observé sur cette période est donné à titre indicatif, pour bien visualiser la chute du niveau d'eau imposée par les prélèvements à fort débit.

9 CONCLUSION

Deux modèles sont maintenant disponibles pour simuler la relation Pluie-Débit du karst de Dardennes au pas de temps journalier avec la plateforme KarstMod : Dard_Non_Lin et Dard_Sans_Fond. Les paramètres de calage et les résultats obtenus à l'aide de ces modèles ont été détaillés dans ce rapport. Chaque modèle répond à un objectif différent :

(1) Le modèle Dard_Non_Lin permet de faire la simulation du débit total des sources de Dardennes, et de déconvoluer le débit en deux composantes d'écoulement : un écoulement lent correspondant au débit de base et un écoulement rapide correspondant au débit en crue. Cette séparation des écoulements est indispensable pour établir un bilan hydrologique durable, qui vise à comparer le débit de base disponible aux sources de Dardennes avec les besoins en eau pour l'alimentation en eau potable (AEP) et les milieux aquatiques dans le Las en aval.

(2) Le modèle Dard_Sans_Fond permet de simuler le niveau d'eau dans le compartiment karstique de l'aquifère, comparable au niveau observé dans le Ragas de Dardennes (l'exutoire de trop-plein karstique des sources de Dardennes). Ce modèle inclut comme donnée d'entrée le prélèvement pour l'AEP, ce qui offre la possibilité de tester des scénarios de pompage.

Les modèles ont été calés et validés sur la période de données observées entre 2012 et 2018. Les débits sont ensuite simulés sur la période 1998 à 2018. Sur cette chronique de vingt ans, aucun événement pluvieux supérieur à environ 100 mm n'a été enregistré. Le débit maximum journalier simulé atteint 32 m³/s (Dard_Non_Lin_P1, crue du 16 décembre 2008). Le débit moyen annuel (par cycle hydrologique) varie entre 0,16 et 1,31 m³/s. Les années peu pluvieuses entraînent une chute importante du débit moyen des sources, avec une très forte réduction du débit de crue. Le débit moyen interannuel sur 20 ans de simulation est compris entre 0,60 et 0,73 m³/s (suivant le modèle Dard_Non_Lin_P1 ou P2), avec un débit de base moyen interannuel entre 0,22 et 0,29 m³/s. Ces valeurs annuelles montrent qu'une exploitation de la ressource en eau souterraine de Dardennes à un débit moyen de 0,3 m³/s nécessitera certaines années sèches un pompage dans les réserves de l'aquifère, alors que durant les années pluvieuses le débit de base (en moyenne annuelle) sera suffisant. À la suite d'années sèches ou en cas de baisse du niveau d'eau par pompage (actuellement observé par la variation du niveau du lac artificiel de Dardennes), les données observées montrent que l'aquifère présente une forte capacité à être rechargé par les écoulements rapides qui se retrouvent stockés sous le seuil de débordement du lac (ou des sources et du Ragas). Un bilan hydrologique durable peut être élaboré en prenant à minima le débit de base calculé par le modèle (écoulement lent Q_{MS} du modèle Dard_Non_Lin).

Le modèle Dard_Sans_Fond simule la variation du niveau d'eau de plusieurs mètres observée dans le lac, qui se répercute dans l'aquifère à travers le réseau karstique perméable en grand. La part d'eau ainsi stockée/déstockée dans la zone de battement de la nappe augmente la capacité d'écêtement des crues en fin d'été, par reconstitution du stock d'eau par écoulement rapide. En appliquant un scénario de pompage permanent à 0,3 m³/s pour l'AEP dans le Ragas de Dardennes (c'est-à-dire dans le karst connecté), le niveau d'eau simulé descend dans le scénario le plus extrême à près de 0 mètres d'altitude, soit 90 mètres sous le niveau des sources, mais ces résultats n'ont pas pu être validés car pour l'instant aucun test de pompage n'a été réalisé au fond du Ragas. Le modèle montre également que les écoulements rapides typiques du fonctionnement du karst de Dardennes permettent de recharger l'aquifère après une période d'été ou une succession d'années peu pluvieuses, engendrant une remontée jusqu'au seuil de débordement du lac.

Ce fonctionnement hydrogéologique, mis en évidence par les observations in-situ et les modèles, constitue un argument favorable pour mettre en place une gestion active de la ressource en eau du karst de Dardennes, visant à associer le besoin en eau du cours d'eau (débit réservé), la distribution d'eau potable et l'écêtement des crues d'automne.

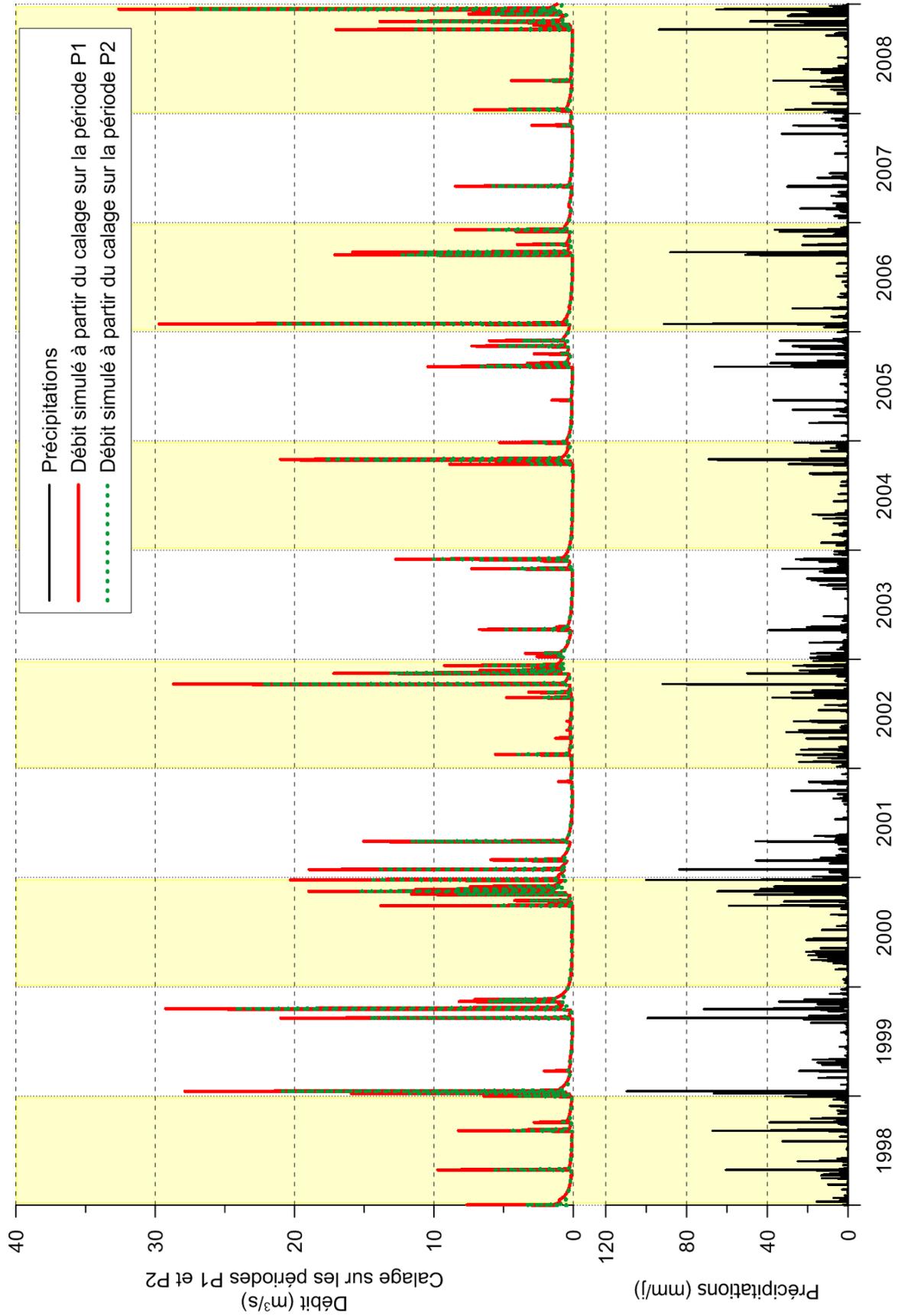
10 BIBLIOGRAPHIE

- Alley W., Leake S. (2004) The journey from safe yield to sustainability. *Ground Water*. Vol. 42, No.1, 12-16
- Arfib B., Charlier J.B. (2016) Insights into saline intrusion and freshwater resources in coastal karstic aquifers using a lumped Rainfall-Discharge-Salinity model (the Port-Miou brackish spring, SE France). *Journal of Hydrology*, 540: 148-161. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.06.010
- Baudement C, B. Arfib, N. Mazzilli, J. Jouves, T. Lamarque, Y. Guglielmi (2017) Groundwater management of a highly dynamic karst by assessing baseflow and quickflow with a rainfall-discharge model (Dardennes springs, SE France), *BSGF – Earth Sciences Bulletin*. 188: 40 <https://doi.org/10.1051/bsgf/2017203>
- Baudement Cécile (2018) Evaluation des capacités d'écoulement et de stockage d'un aquifère karstique dynamique par caractérisation géologique et modélisation pluie-débit. Sources de Dardennes, Toulon, France. Thèse de doctorat soutenue le 19/04/2018 à l'Université Aix-Marseille.
- Carles Guillaume (2017) Vers une gestion active de la ressource en eau karstique : réserve en eau potable et écrêtement des crues (Projet DARDENNES – Toulon). Master 2 Hydrogéologie Université Aix-Marseille. Sous la direction de B. Arfib.
- Fleury, P., Plagnes, V., Bakalowicz, M., 2007. Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: Application to Fontaine de Vaucluse (South of France). *Journal of Hydrology*, 345(1-2): 38-49. DOI:10.1016/j.jhydrol.2007.07.014
- Fleury, P., Ladouche, B., Conroux, Y., Jourde, H., Dörfliger, N., 2009. Modelling the hydrologic functions of a karst aquifer under active water management – The Lez spring. *Journal of Hydrology*, 365(3-4): 235-243. DOI:10.1016/j.jhydrol.2008.11.037
- Hartmann, A., Lange, J., Vivó Aguado, À., Mizyed, N., Smiatek, G., Kunstmann, H., 2012. A multi-model approach for improved simulations of future water availability at a large Eastern Mediterranean karst spring. *Journal of Hydrology*, 468-469: 130-138. DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.08.024
- Jouves Johan (2018) Origine, caractérisation et distribution prédictive des structures karstiques. De la karstologie aux modèles numériques 3D. Thèse de doctorat soutenue le 14/05/18 à l'université Aix-Marseille.
- Loáiciga H (2017) The Safe Yield and Climatic Variability: Implications for Groundwater Management. *Ground Water*. Vol 55-3, 334-345
- Mangin A., 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. PhD Thesis, Laboratoire souterrain du Centre national de la recherche scientifique, Annales de Spéléologie
- Mazzilli N., V. Guinot, H. Jourde, N. Lecoq, D. Labat, B. Arfib, C. Baudement, C. Danquigny, L. Dal Soglio, D. Bertin (2017) KarstMod: a modelling platform for rainfall - discharge analysis and modelling dedicated to karst systems. *Environmental Modelling and Software*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.015>
- N'Dah Thérèse (2015) Aquifère karstique de Dardennes : caractérisation du fonctionnement hydrogéologique, modélisation Pluie-Débit et relations avec le Las. Février-Août 2015. Master 2 Hydrogéologie Université Avignon. Sous la direction de B. Arfib.
- Tritz, S., Guinot, V., Jourde, H., 2011. Modelling the behaviour of a karst system catchment using non-linear hysteretic conceptual model. *Journal of Hydrology*, 397(3-4): 250-262. DOI:10.1016/j.jhydrol.2010.12.001

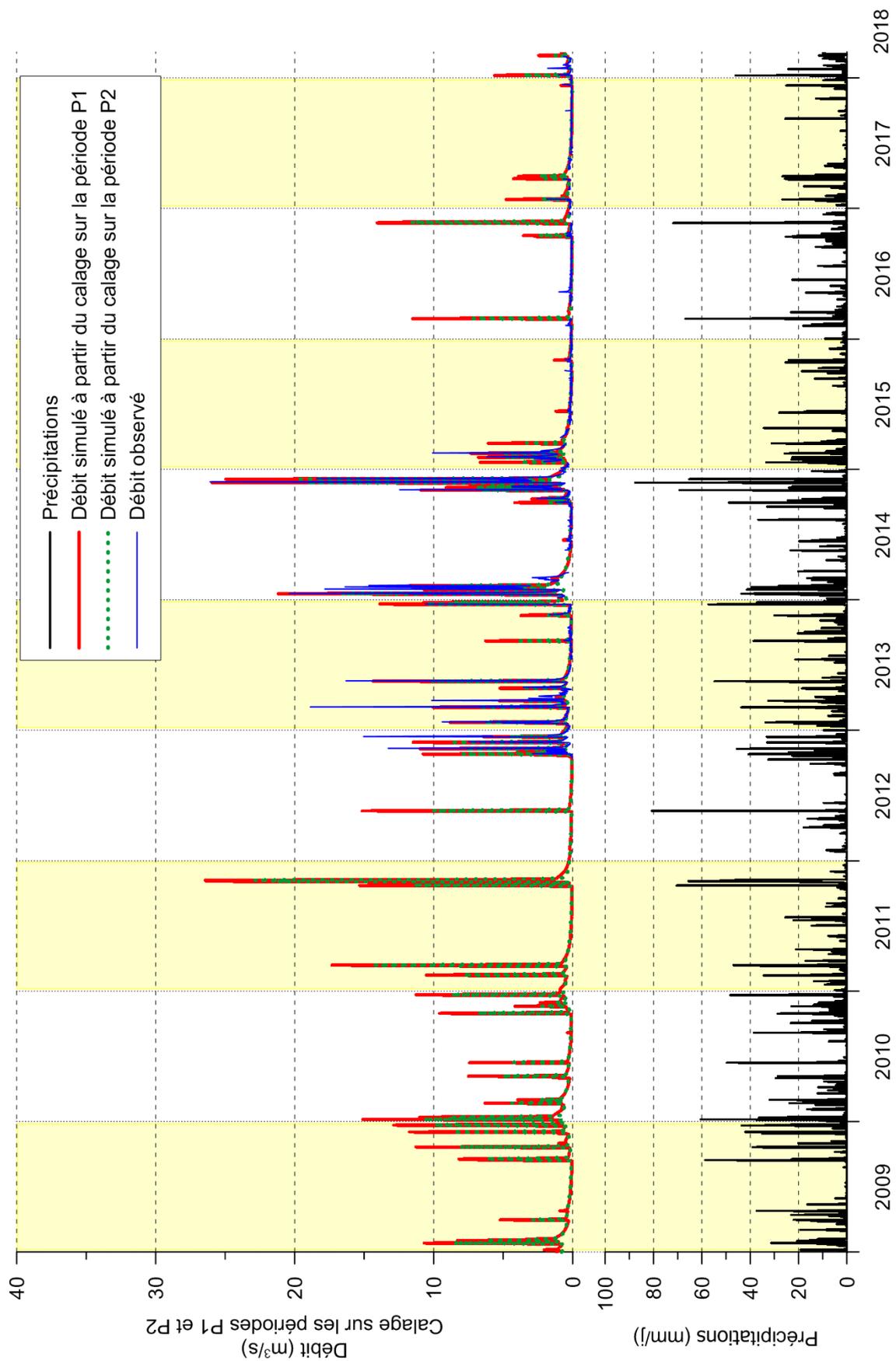
11 ANNEXES

11.1 SIMULATION DU DÉBIT SUR UNE LONGUE CHRONIQUE AVEC LE MODÈLE DARD_NON_LIN.

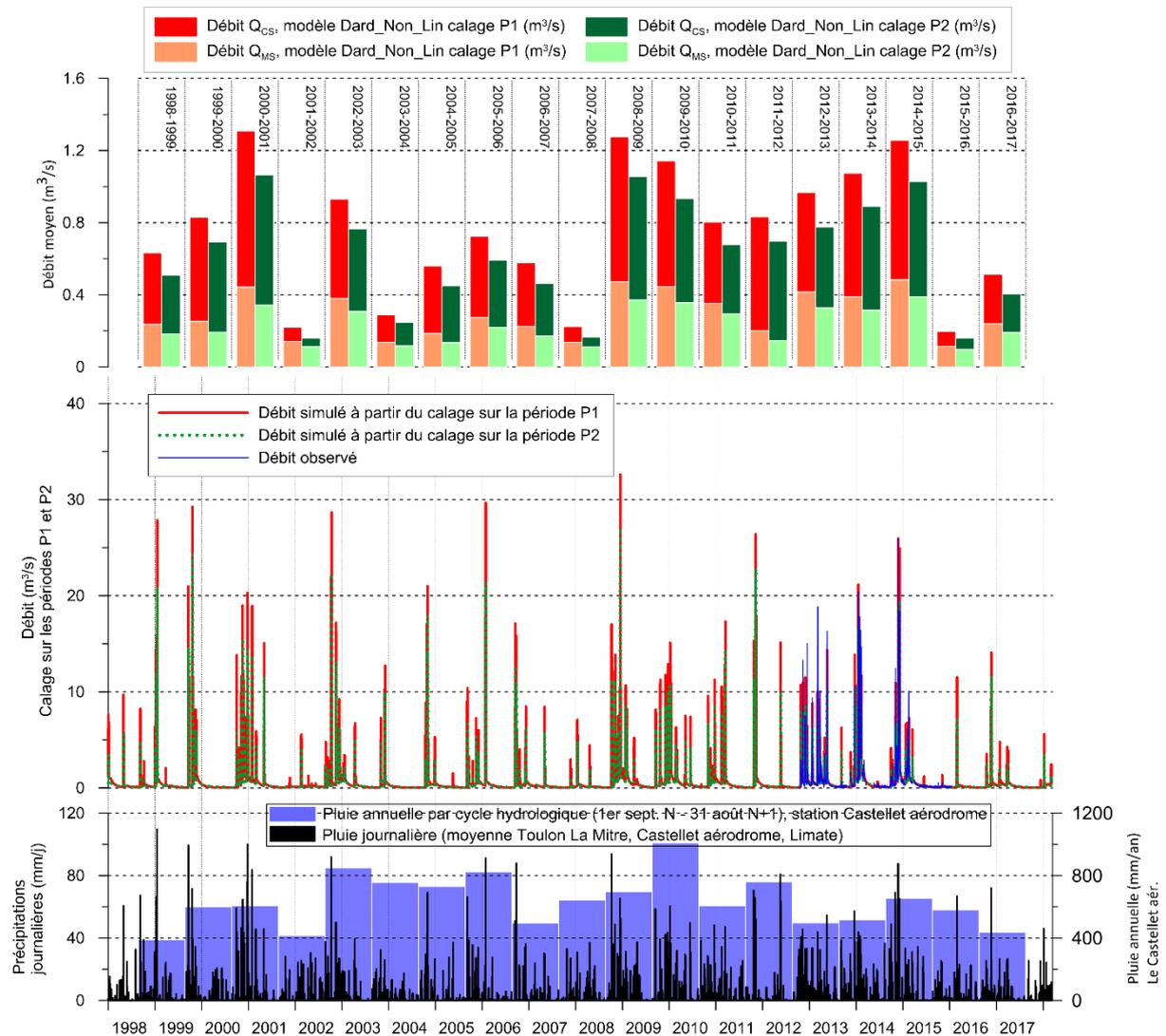
11.1a → Période de 1998 à fin 2008



11.1b → Période de 1998 à fin 2008



11.2 SIMULATION AVEC LE MODÈLE DARD_NON_LIN : DÉBIT TOTAL JOURNALIER ET DÉBIT DES COMPOSANTES LENTES ET RAPIDES EN ANNÉE HYDROLOGIQUE



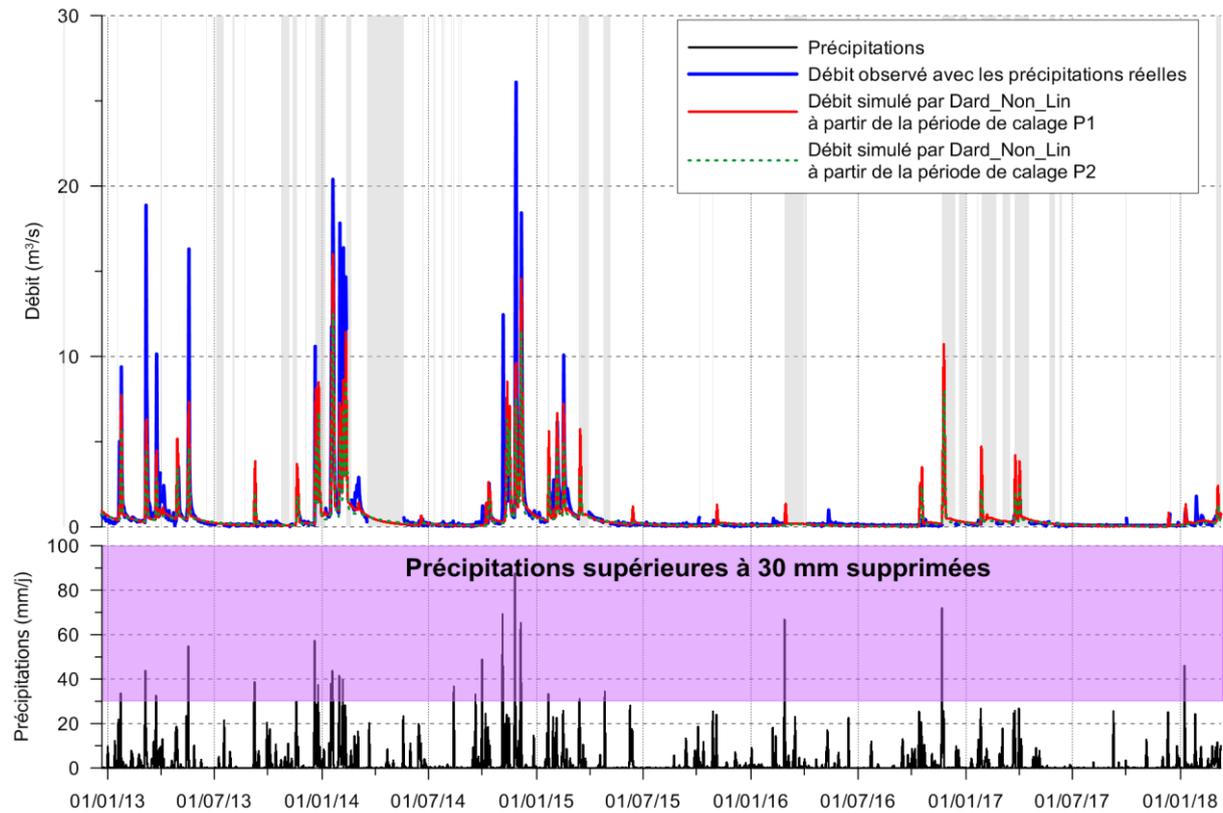
Le débit total est déconvolué en deux composantes :

- l'écoulement lent, simulé par le débit du réservoir M à la source (Q_{MS}),
- l'écoulement rapide, simulé par le débit du réservoir C à la source (Q_{CS}).

Le modèle est calé sur deux périodes (P1 et P2) qui donnent des résultats satisfaisants dans les deux cas.

11.3 PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES MAXIMALES DE 30 MM

Le modèle Dard_Non_Lin est utilisé dans un scénario où la pluie journalière ne dépasse jamais 30 mm. Cette simulation est effectuée pour observer la réaction du modèle en l'absence de fortes précipitations. Le fichier a été modifié simplement en appliquant une condition (Fonction « Si ») sur Excel qui a permis de transformer toutes les précipitations réelles supérieures à 30mm/j en précipitations égales à 30mm/j. La baisse des précipitations maximales engendre une forte baisse des pics de crue.

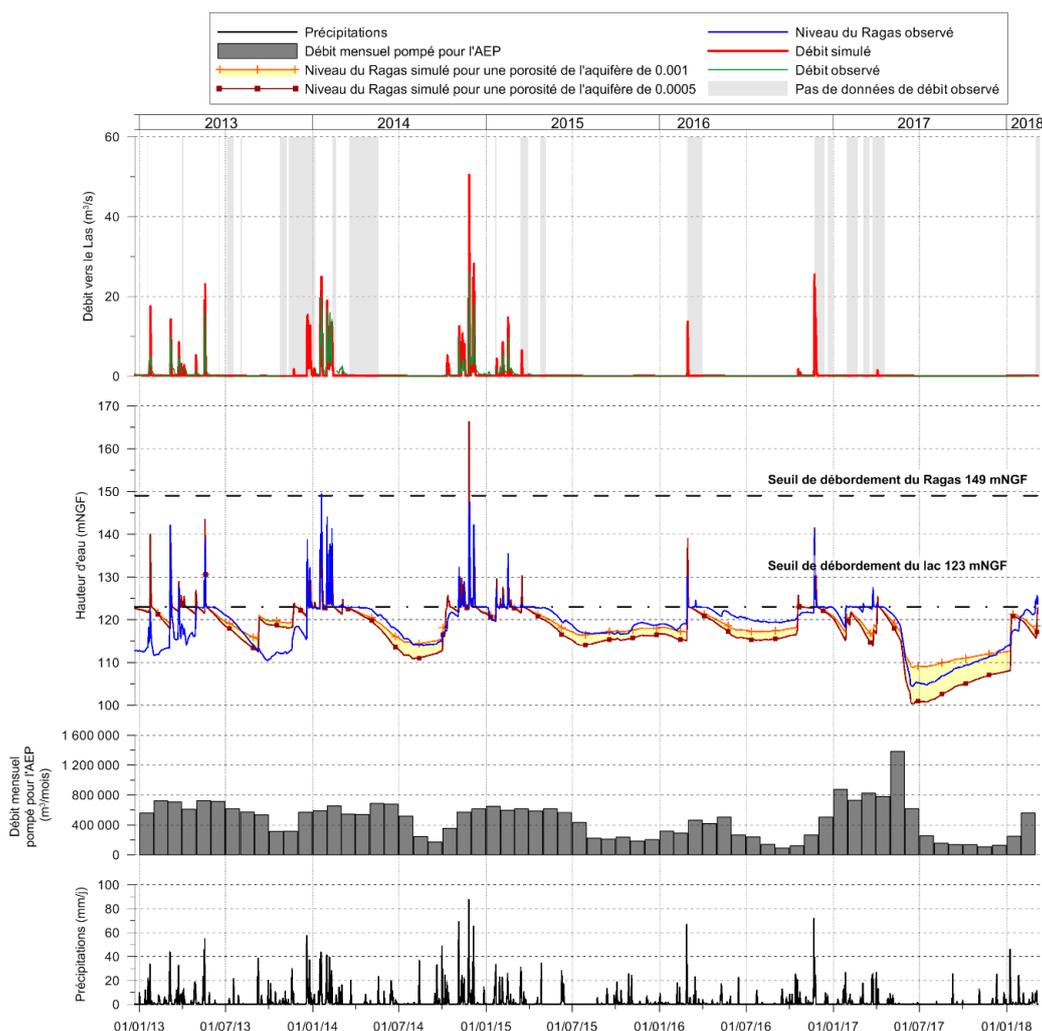


11.4 UN CALAGE ALTERNATIF DU MODÈLE DARD_SANS_FOND (LE MODÈLE C7)

Au cours des multiples tests de structures et de calages avec la plateforme KarstMod, un calage alternatif du modèle Dard_Sans_Fond a donné des résultats intéressants pour la simulation du niveau d'eau.

En effet, la plateforme KarstMod permet d'obtenir des calages automatiques très rapidement, mais lorsque les paramètres sont peu sensibles, le jeu de paramètre calé peut être différent d'un test à l'autre. C'est le cas avec les données de Dardennes. Le Modèle C7 utilise la structure de Dard_Non_Lin (réservoirs, seuils et lois de vidange). Les résultats obtenus pour la simulation du débit sont moins bons que le modèle retenu précédemment détaillé dans le rapport. En particulier, les pics de débit sont systématiquement beaucoup trop forts. Toutefois, malgré ces pics de débit mal simulés, le niveau d'eau est relativement bien simulé. Les résultats sont donc donnés ici en annexe pour illustrer les calages alternatifs possibles.

Paramètre	Unité	Dard_Sans_Fond Modèle C7
R_A	km ²	70
E_{min}	mm	-10,44
E_{hy}	mm	29,91
k_{CS}	mm/j	3,21
k_{EM}	mm/j	0,0139
k_{hy}	mm/j	1,38
K_{EL}	mm/j	0,0109
K_{MC}	mm/j	0,0025
K_{LS}	mm/j	0,0169



11.5 PRÉCIPITATIONS ANNUELLES CUMULÉES (TOULON, LE CASTELLET AÉRODROME, LA LIMATE)

Année	Toulon Météo France (mm/an)	Castellet aérodrome Météo France (mm/an)	Limite (mm/an)
1989	338	347	
1990	586	447	
1991	521	666	
1992	606	506	
1993	625	558	
1994	737	848	
1995	742	731	
1996	946	870	
1997	547	612	
1998	469	534	
1999	938	827	
2000	710	812	
2001	446	544	
2002	811	997	
2003	450	629	
2004	551	486	
2005	426	552	
2006	609	594	
2007	322	358	
2008	791	908	
2009	724	766	
2010	786	872	
2011	641	752	1094
2012	609	584	729
2013	722	884	1238
2014	1123	1038	1380
2015	510	562	661
2016	439	646	764
2017	262	466	510

11.6 PRÉCIPITATIONS ANNUELLES CUMULÉES PAR CYCLE HYDROLOGIQUE (TOULON, LE CASTELLET AÉRODROME, LA LIMATE)

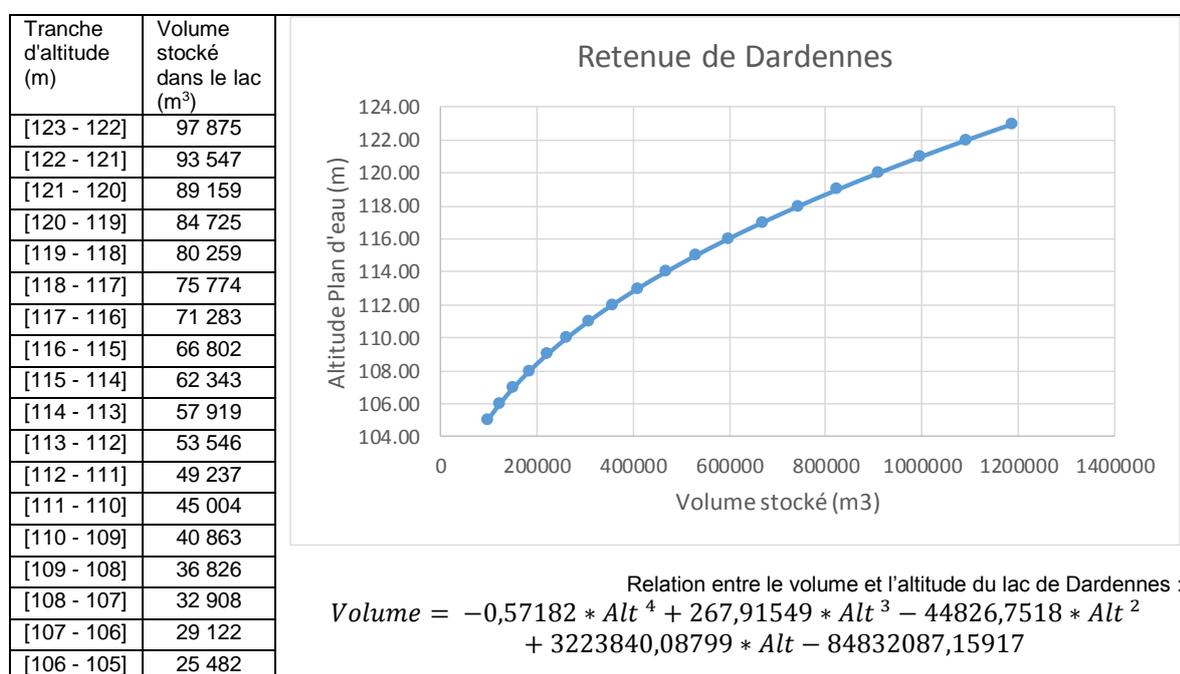
	Toulon Météo France (mm/an)	Castellet aérodrome Météo France (mm/an)	Limate (mm/an)
01/09/1989 au 31/08/1990	467	391	
01/09/1990 au 31/08/1991	589	599	
01/09/1991 au 31/08/1992	520	608	
01/09/1992 au 31/08/1993	571	416	
01/09/1993 au 31/08/1994	759	849	
01/09/1994 au 31/08/1994	719	757	
01/09/1995 au 31/08/1996	800	731	
01/09/1996 au 31/08/1997	873	823	
01/09/1997 au 31/08/1998	461	497	
01/09/1998 au 31/08/1999	559	643	
01/09/1999 au 31/08/2000	812	696	
01/09/2000 au 31/08/2001	813	1009	
01/09/2001 au 31/08/2002	433	607	
01/09/2002 au 31/08/2003	716	760	
01/09/2003 au 31/08/2004	390	498	
01/09/2004 au 31/08/2005	509	518	
01/09/2005 au 31/08/2006	538	656	
01/09/2006 au 31/08/2007	588	580	
01/09/2007 au 31/08/2008	414	437	
01/09/2008 au 31/08/2009	842	916	
01/09/2009 au 31/08/2010	849	926	
01/09/2010 au 31/08/2011	634	732	
01/09/2011 au 31/08/2012	547	627	756
01/09/2012 au 31/08/2013	813	833	1187
01/09/2013 au 31/08/2014	757	978	1178
01/09/2014 au 31/08/2015	1026	868	1122
01/09/2015 au 31/08/2016	376	439	615
01/09/2016 au 31/08/2017	375	679	746
01/09/2017 au 31/08/2018	618	688	781*
	*Limate incomplet (du 01/09/2017 au 06/07/2018)		

11.7 NOTE SUR L'EFFET DE VIDANGE DU LAC DE DARDENNES SUR LE DÉSTOCKAGE D'EAU SOUTERRAINE (ÉTUDE DE LA PÉRIODE DE VIDANGE DÉCENNALE DE MAI-JUIN 2017)

Bruno Arfib, le 28/08/2018

1- VOLUMES D'EAU STOCKÉS DANS LE LAC EN FONCTION DE LA HAUTEUR D'EAU

La relation entre le volume d'eau stocké dans le lac de Dardennes et la hauteur d'eau est extraite des documents fournis par Véolia dans le cadre du partenariat au cours du projet de recherche Dardennes. Il est ainsi possible de calculer le volume d'eau stocké dans le lac par tranche d'altitude. Au-dessus de 123m, le lac déborde par le déversoir.



2- VOLUME DE VIDE DANS LA ROCHE

Ci-dessous sont données quelques valeurs de volume de vide dans un matériau poreux, pour une tranche d'épaisseur de 1 mètre de matériaux et une surface de 70 km² (correspondant au bassin versant des sources de Dardennes).

Porosité du milieu	0,0100 (=1%)	0,0010 (=0,1%)	0,0001 (=0,01%)
surface du BV (km ²)	70	70	70
Volume de vide par tranche de 1 mètre d'épaisseur de milieu poreux (m ³)	700 000	70 000	7 000
lame d'eau équivalente (mm)	10	1	0,1

3- ESTIMATION DU DÉBIT DE DRAINAGE DE L'AQUIFÈRE LORS DES VIDANGES PAR LES VANNES DE FOND DU BARRAGE DE DARDENNES

3.1- PRINCIPE DE LA MÉTHODE APPLIQUÉE SUR LES VIDANGES DU 22/05/17 AU 02/06/17 ET DU 10 AU 13/06/17

En prévision de l'inspection décennale du barrage de Dardennes en juin 2017, le niveau du lac a été baissé rapidement par un lâcher de barrage via les vannes de fond. L'eau lâchée alimentait le Las, provoquant ainsi une augmentation de débit qui a été mesurée sur la station de Lagoubran. Deux périodes de vidange ont été enregistrées :

- Du 22 mai 2017 au 2 juin 2017, le niveau d'eau du lac est descendu de 8,0 m.
- Du 10 au 13 juin 2017, le niveau d'eau est descendu de 2,6m.

Il est donc proposé de comparer le volume (ou débit) d'eau vidangé dans le las mesuré sur la station de mesure hydrométrique de Lagoubran, avec le volume déstocké du lac mesuré par la baisse du niveau d'eau du lac (bilan du lac). Ce calcul de bilan tient compte du volume d'eau pompé pour l'AEP dans le lac, ainsi que du débit initial des sources de Dardennes qui alimentent en permanence le lac.

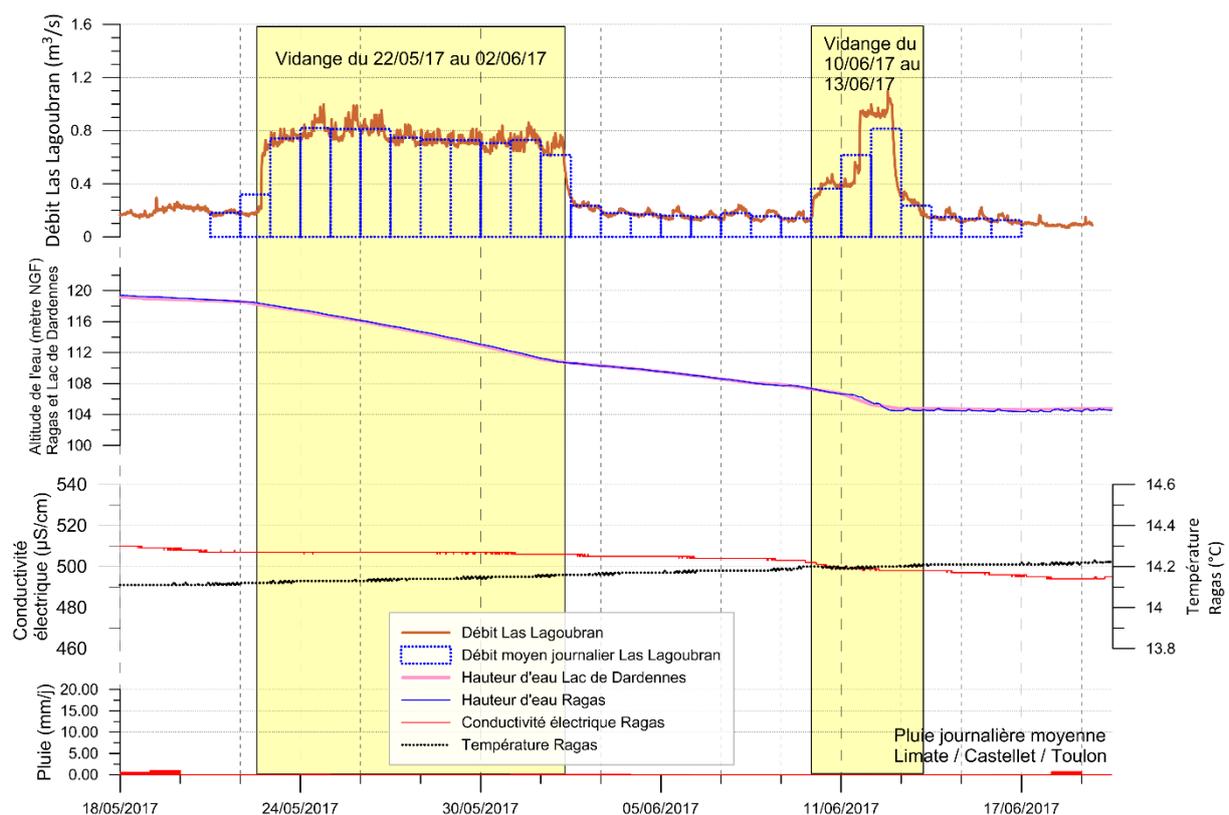


Figure 1 : Evolution au cours du temps du débit du Las mesuré à la station hydrométrique de Lagoubran lors des vidanges du barrage de Dardennes par les vannes de fonds en préparation de l'inspection décennale du barrage (mai et juin 2017)

3.2- ESTIMATION DU DÉBIT DE DRAINAGE DE L'AQUIFÈRE LORS DE LA VIDANGE DU 22/05/17 AU 02/06/17

Tableau synthèse journalier	Débit moyen journalier Las Lagoubran (m3/s)	Débit du lâcher de barrage calculé par le débit du Las (m3/s) (=Qlas_Lagoubran – Qlas_avant_lâcher)	Niveau du lac (m)
22/05/2017 avant le lâcher	0,170		
22/05/2017	0,319	0,149	118,60
23/05/2017	0,741	0,571	117,95
24/05/2017	0,820	0,650	117,41
25/05/2017	0,812	0,642	116,69
26/05/2017	0,812	0,642	116,08
27/05/2017	0,747	0,577	115,32
28/05/2017	0,733	0,563	114,58
29/05/2017	0,728	0,558	113,75
30/05/2017	0,705	0,535	112,93
31/05/2017	0,730	0,560	112,05
01/06/2017	0,617	0,447	111,15
02/06/2017	0,235	0,065	110,65
03/06/2017	0,179	0,009	110,31
04/06/2017	0,169	-0,001	109,95

Volume total lâché du 22/05/17 au 02/06/17, mesuré à Lagoubran (m3) :	514 822 m3
---	------------

Débit moyen des sources de Dardennes avant cette période (m3/s) [le débit après cette période est égal à celui avant l'ouverture des vannes, puis il baisse de jour en jour]	0.2
Débit moyen pompé QEB (m3/s)	0.35
Différence entre le Volume d'eau pompé (QEB) et le Volume produit par le débit naturel des sources durant les 12 jours du 22/05/17 au 02/06/17	155 520
Variation de volume de la retenue de Dardennes :	501 588
Volume initial (m3) le 22/05/17	791 588
Volume final (m3) le 02/06/17	290 000
Calcul du volume de la retenue de Dardennes lâché vers le Las par bilan sur la retenue (m3)	346 068

Le volume supplémentaire débité à Lagoubran durant les 12 jours de lâcher de barrage est égal à 515.10^3 m^3 . Le calcul par bilan d'eau sur la retenue donne un volume de 346.10^3 m^3 .

L'écart de volume entre les deux modes de calcul est de 169.10^3 m^3 . Ce volume correspond à un surplus d'eau lâché dans le Las à partir du lac de Dardennes par rapport au volume déstocké de la retenue. Ce volume correspond à de l'eau souterraine déstockée de l'aquifère sous l'effet de l'abaissement du niveau piézométrique engendré la chute du niveau du lac (noté dans la suite du rapport : Volume ou débit de drainage de l'aquifère).

Sur les 12 jours d'expérimentation, le débit moyen de drainage de l'aquifère est de $14\,063 \text{ m}^3/\text{j}$ ou $0,163 \text{ m}^3/\text{s}$, ou $21\,000 \text{ m}^3/\text{mètre}$ de rabattement du lac.

3.3 - ESTIMATION DU DÉBIT DE DRAINAGE DE L'AQUIFÈRE LORS DE LA VIDANGE DU 10 JUI 2017 AU 13 JUI 2017

Tableau synthèse journalier	Débit moyen journalier Las Lagoubran (m ³ /s)	Débit du lâcher de barrage calculé par le débit du Las (m ³ /s) (=Q _{las_Lagoubran} – Q _{las_avant_lâcher} [0.14m ³ /s])	Niveau du lac (m)
08/06/2017	0,155		108,07
09/06/2017	0,139		107,87
10/06/2017	0,363	0,223	107,30
11/06/2017	0,617	0,477	106,71
12/06/2017	0,815	0,675	105,28
13/06/2017	0,235	0,095	104,73
14/06/2017	0,149		104,74
15/06/2017	0,137		104,69
16/06/2017	0,126		104,67

Volume total lâché du 10/06/17 au 13/06/17, mesuré à Lagoubran (m ³)	127 005 m ³
--	------------------------

Débit moyen des sources de Dardennes avant cette période (m ³ /s) [le débit après cette période est égal à celui avant l'ouverture des vannes, puis il baisse de jour en jour]	0.14
Débit moyen pompé QEB (m ³ /s)	0.142
Différence entre le Volume d'eau pompé (QEB) et le Volume produit par le débit naturel des sources durant les 4 jours du 10/06/17 au 13/06/17 (m ³)	691
Variation de volume de la retenue de Dardennes :	70 122
Volume initial (m ³) le 10/06/17	160 847
Volume final (m ³) le 14/06/17 (pris le lendemain à 9h, pour faire 4 jours)	90 725
Calcul du volume de la retenue de Dardennes lâché vers le Las par bilan sur la retenue (m ³)	69 430

Le volume supplémentaire débité à Lagoubran durant les 4 jours de lâcher de barrage est égal à 127.10³ m³. Le calcul par bilan d'eau sur la retenue donne un volume de 69,5.10³ m³.

L'écart de volume entre les deux modes de calcul est de 57,5.10³ m³. Comme lors du premier lâcher de barrage du 22/05/17 au 02/06/17, ce volume correspond à un surplus d'eau lâché dans le Las à partir du lac de Dardennes par rapport au volume déstocké de la retenue. Ce volume correspond à de l'eau souterraine déstockée de l'aquifère sous l'effet de l'abaissement du niveau piézométrique engendré la chute du niveau du lac (abaissement de 3 mètres dans le lac).

Sur les 4 jours d'expérimentation, le débit moyen de drainage de l'aquifère est de 14 394m³/j ou 0,167 m³/s, ou 23 000 m³/mètre de rabattement du lac.

CONCLUSION

Sur la tranche d'altitude comprise entre 104 et 118 mètres (2 tranches testées : entre 118m et 110m, puis entre 108m et 104m), la variation du niveau du lac par vidange vers le Las par les vannes de fond a permis de drainer également l'aquifère et de récupérer ainsi un volume d'eau supplémentaire à celui du lac, de l'ordre de 226 000 m³ (dans le temps de réalisation du test, sur 16 jours). A la fin de chaque période de vidange, le débit des sources alimentant le lac n'est pas significativement supérieur au débit avant les tests, ce qui laisse penser que le drainage de l'aquifère a lieu rapidement, c'est-à-dire dans le

temps de réalisation du test. C'est donc un volume facilement mobilisable, qui peut être contenu dans le réseau de conduits karstiques. Il est fort probable que d'autres volumes d'eau souterraine soit toujours en cours de drainage à la fin du test, mais avec une dynamique beaucoup plus lente. Ce volume d'eau souterraine drainée dépend également de la connectivité et de la longueur du réseau karstique sollicité, en lien avec les réserves dans la matrice connectée par le réseau karstique.

De plus, il a été montré par ailleurs dans la thèse de Cécile Baudement (2018) que lorsque le niveau d'eau remonte dans le lac lors des crues, l'eau de recharge de la nappe est en partie stockée dans l'aquifère dans cette zone de battement imposée par les variations du niveau du lac. Ce phénomène limite ainsi l'arrivée de crues éclair aux sources de Dardennes.

11.8 CALCUL DES PROPORTIONS DES DÉBITS LENTS ET RAPIDES PAR ANNÉE CIVILE (MODÈLE DARD_NON_LIN)

Calage sur la période P1 (Dard_Non_Lin)

Année	Précipitations (mm)	Moyenne Q _{MS} (m ³ /s)	Moyenne Q _{CS} (m ³ /s)	Moyenne Q _{total} (m ³ /s)	%Q _{MS}	%Q _{CS}
2013	948	0,34	0,52	0,86	39,4	60,6
2014	1180	0,54	1,03	1,57	34,5	65,5
2015	578	0,30	0,16	0,46	64,4	35,6
2016	616	0,15	0,27	0,42	35,8	64,2
2017	412	0,18	0,07	0,25	70,4	29,6
Moyenne des années	747	0,30	0,41	0,71	48,9	51,1

Tableau A1 : Moyenne annuelle des précipitations calculées en prenant la moyenne des trois stations météorologiques (Toulon La Mitre, Le Castellet aérodrome, Limate). Résultats du modèle Dard_Non_Lin calé sur la période P1. QMS : débit du réservoir M vers la source ; QCS : débit du réservoir C vers la source. Résultats en moyenne par année civile.

Calage sur la période P2 (Dard_Non_Lin)

Année	Précipitations (mm)	Moyenne Q _{MS} (m ³ /s)	Moyenne Q _{CS} (m ³ /s)	Moyenne Q _{simulé} (m ³ /s)	%Q _{MS}	%Q _{CS}
2013	948	0,31	0,41	0,73	43,2	56,8
2014	1180	0,40	0,89	1,29	30,9	69,1
2015	578	0,28	0,12	0,40	71,1	28,9
2016	616	0,11	0,23	0,34	32,6	67,4
2017	412	0,16	0,05	0,20	77,9	22,1
Moyenne des années	747	0,25	0,34	0,59	51,1	48,9

Tableau A2 : Moyenne annuelle des précipitations calculées en prenant la moyenne des trois stations météorologiques (Toulon La Mitre, Le Castellet aérodrome, Limate). Résultats du modèle Dard_Non_Lin calé sur la période P2. QMS : débit du réservoir M vers la source ; QCS : débit du réservoir C vers la source. Résultats en moyenne par année civile.

11.9 SIMULATION DU NIVEAU D'EAU DANS LE RAGAS ET DANS LE LAC À L'AIDE DU NIVEAU DU RÉSERVOIR C DE 1998 À 2018 : ZOOM SUR L'ANNÉE 2004

En s'intéressant aux niveaux d'eau simulés dans les réservoirs E, M, C et L pour l'année 2004 (figure ci-dessous), année pour laquelle l'étiage est très fort, le modèle ne simule pas d'écoulement entre le réservoir E et les trois autres pendant les pluies de mai (il ne dépasse pas le niveau 0). Cependant, le niveau d'eau observé dans le lac à cette période montre que le lac est rempli pendant plusieurs jours. L'hypothèse est que les précipitations qui ont été utilisées pour le modèle sont sous estimées par rapport aux précipitations réelles, cela fait que le modèle « manque d'eau ».

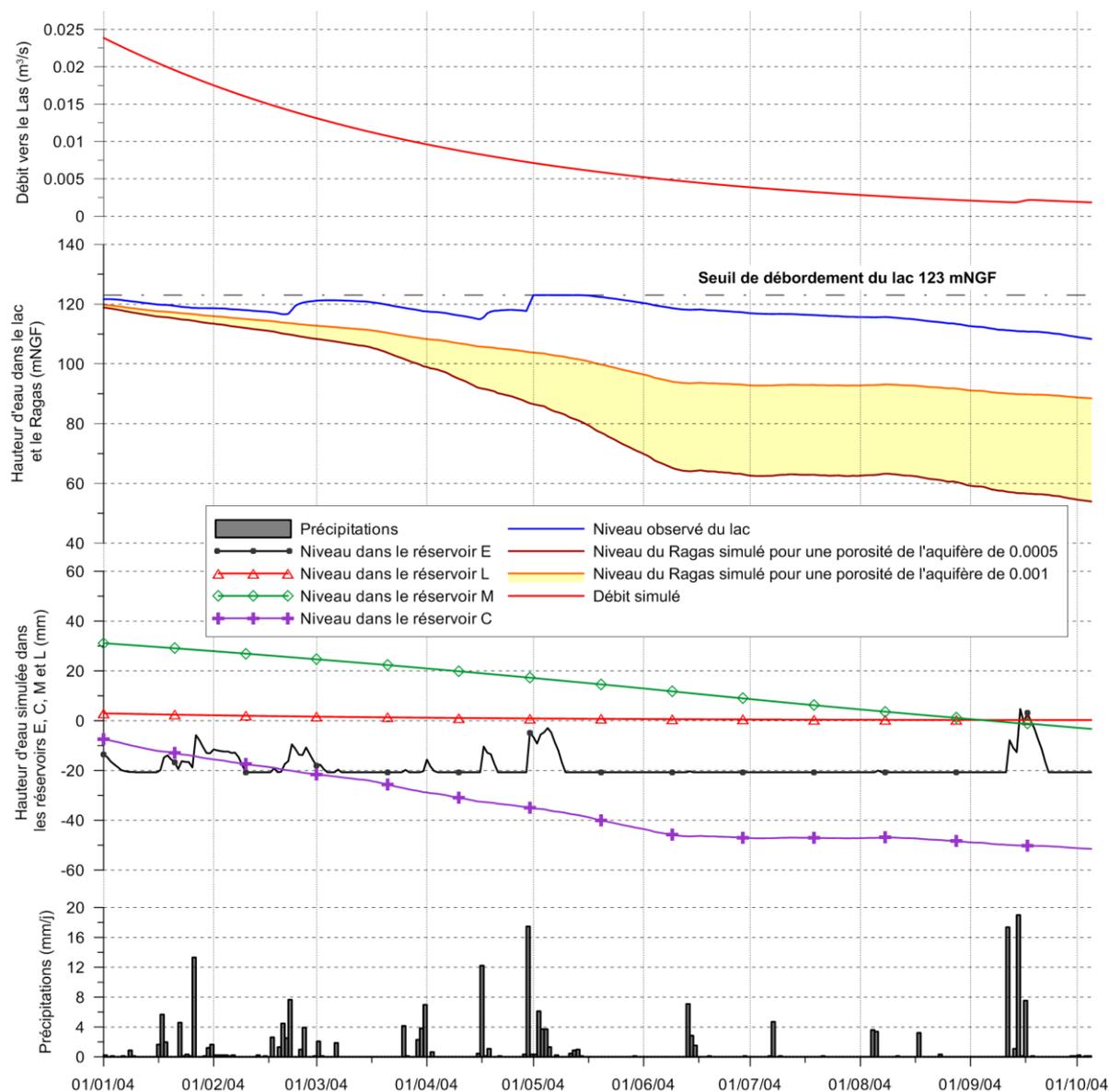


Figure A1: Niveau d'eau simulé dans les réservoirs et dans le Ragas par le modèle Dard_Sans_Fond pendant l'étiage de 2004

11.10 COMPARAISON DU DÉBIT VERS LE LAS SIMULÉ AVEC LE MODÈLE DARD_SANS_FOND ENTRE 2013 ET 2018 POUR UN DÉBIT DE CAPTAGE AEP OBSERVÉ OU IMPOSÉ À 300 L/S

Dans cette annexe, les résultats du modèle Dard_Sans_Fond sur la période 2013 à 2018 sont repris et comparés pour deux débits de captage AEP : le débit réellement mesuré à l'usine AEP sur cette période et un débit fictif imposé à 300 l/s. Il s'agit des mêmes scénarios que ceux présentés dans le rapport.

La Figure A2 permet de comparer le débit vers le Las simulé dans les deux scénarios. La différence n'est visible que sur les crues de fin d'été. En considérant le débit simulé à partir du débit AEP réel, des pics de crues se remarquent pendant le printemps et l'automne 2016 qu'on ne retrouve pas ou dans une moindre mesure pour le débit simulé à partir du pompage imposé. Cela est dû au volume d'eau stocké initialement dans le lac de Dardennes avant les précipitations. En forçant un débit de pompage à 300 l/s, la simulation des niveaux d'eau montre un fort abaissement du niveau dans le lac ce qui implique un volume stockable beaucoup plus important lors des précipitations. Les premières pluies ne génèrent donc pas de crue ou une crue plus faible quand le lac est plus bas.

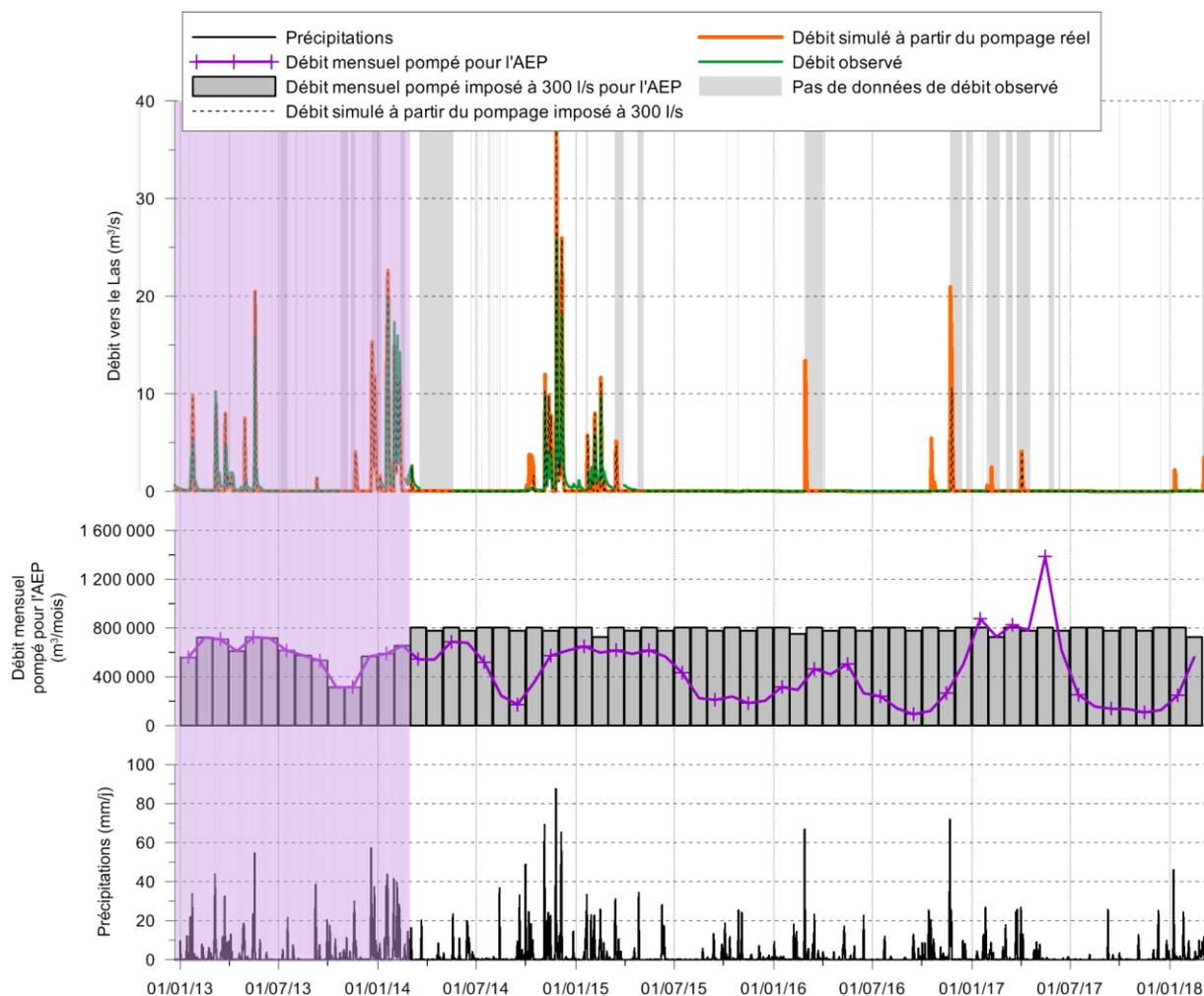


Figure A2 : Simulation par le modèle Dard_Sans_Fond des débits au niveau des sources de Dardennes à partir du débit réel et imposé pompé pour l'AEP et des précipitations