

Appui au SCHAPI 2011 -Module 1 : Mise en place d'un indicateur d'aide à la décision pour la prévision de crue en milieu karstique : les bassins versants du Lez et de la Tardoire - Rapport final.

Perrine Fleury, Jean-Baptiste Charlier, V. Borrell, M Coustau

▶ **To cite this version:**

Perrine Fleury, Jean-Baptiste Charlier, V. Borrell, M Coustau. Appui au SCHAPI 2011 -Module 1 : Mise en place d'un indicateur d'aide à la décision pour la prévision de crue en milieu karstique : les bassins versants du Lez et de la Tardoire - Rapport final.. [Rapport de recherche] BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) (Bureau de recherches géologiques et minières). 2011. hal-03143774

HAL Id: hal-03143774
https://brgm.hal.science/hal-03143774

Submitted on 17 Feb 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Document public

Appui au SCHAPI 2011 – Module 1 : Mise en place d'un indicateur d'aide à la décision pour la prévision de crue en milieu karstique : les bassins versants du Lez et de la Tardoire

Rapport final

BRGM/RP-60380-FR
décembre 2011

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Appui au SCHAPI 2011 – Module 1 : Mise en place d'un indicateur d'aide à la décision pour la prévision de crue en milieu karstique : les bassins versants du Lez et de la Tardoire

Rapport final

BRGM/RP-60380-FR
décembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2011 11RISI01

P. Fleury, J.-B. Charlier, V. Borrell*, M. Coustau*
*** Hydrosciences Montpellier UMR5569**

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : J.C. Marechal	*Nom : E. Foerster*
Date : 25/10/2011	*Date : 20/12/2011*
Signature :	*Signature :*

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

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

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : Karst, Alerte, Vigilance, outil de prévision des crues.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
P. Fleury, J.-B. Charlier, V. Borrell, M. Coustau – 2011 - Appui au SCHAPI 2011 – Module 1 - Mise en place d'un indicateur d'aide à la décision pour la prévision de crue en milieu karstique : les bassins versants du Lez et de la Tardoire. Rapport BRGM RP-60380-FR

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la convention entre le BRGM et la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques) pour le compte du SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations), trois axes de travail ont été définis pour l'année 2011 :

- **L'application de l'indicateur karst sur deux bassins versants (Lez et Rochefoucauld - Tardoire) sélectionnés parmi les propositions de plusieurs SPC**
- L'intérêt la caractérisation du comportement hydrodynamique des BV basée sur l'Indicateur de Persistance des réseaux
- le rattachement de l'étude sur les remontées de nappe faite pour le compte du SPC Artois – Picardie sur le site expérimental de Warloy Baillon (Hallue) ainsi que la modélisation maillée du bassin de l'Hallue.

Ce programme de travail est financé à 80% par la DGPR, et à 20% par le BRGM dans le cadre de ses actions de Services Publics.

L'étude portant sur le bassin du Lez a bénéficié de résultats acquis par Hydrosciences Montpellier UMR5569 et le BRGM dans le cadre du projet « Lez – Gestion Multi-Usages » réalisé pour l'Agglomération de Montpellier.

L'application de l'indicateur karst sur les bassins versants du Lez et de la Tardoire s'appuie sur les travaux menés

- depuis 2005 avec la Ville de Nîmes sur le karst Nîmois,

- en 2009 et 2010 avec le SCHAPI avec la définition d'un outil d'aide à la décision à l'attention des prévisionnistes des SPC (Service de Prévision des Crues) : l'indicateur Karst.

Sommaire

1. Introduction 9

2. Rappel de la méthodologie de définition de l'indicataur d'aide à la vigilance . 11

3. Le bassin versant du Lez 13

3.1. PRESENTATION DU SYSTEME DU LEZ 13
3.1.1. Structure de l'exutoire 13
3.1.2. Description du bassin d'alimentation 13
3.1.3. Exploitation du système karstique pour l'AEP 15
3.1.4. Fonctionnement en période de crue 16
3.1.5. Données 17
3.1.6. Dualité de fonctionnement - exemple 17

3.2. MODELISATION EVENEMENTIELLE DES CRUES DE SURFACE 18
3.2.1. Concept 18
3.2.2. Calage 22
3.2.3. Bilan 26

3.3. ETUDE DES EPISODES PRINCIPAUX 26
3.3.1. Situation 1 : recharge de l'aquifère karstique et absence de crue 27
3.3.2. Situation 2 : aquifère karstique rechargé, les pluies contribuent à la crue 28
3.3.3. Situation 3 : recharge de l'aquifère karstique puis genèse de la crue 37
3.3.4. Conclusion sur les relations pluie – débit 40

3.4. DEFINITION D'UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION POUR LES PREVISIONNISTES 41
3.4.1. Contribution à la recharge du karst 41
3.4.2. Contribution des pluies au débit 44
3.4.3. Utilisations des abaques 47
3.4.4. Complément de l'outil d'aide à la décision : feuille de calcul Excel 52

3.5. CONCLUSION 52

4. Le bassin versant de la Tardoire 53

4.1. PRESENTATION DU SYSTEME DE LA TARDOIRE 53
4.1.1. Description du bassin d'alimentation 53
4.1.2. Un hydrosystème karstique dit « binaire » 54

4.1.3. Données 55

4.2. MODELE CONCEPTUEL DU BASSIN DE LA TARDOIRE 57
4.2.1. Processus hydrologiques 57
4.2.2. Processus hydrogéologiques 60
4.2.3. Schéma de fonctionnement et contrainte pour la modélisation 62

4.3. MODELISATION 64
4.3.1. Structure du modèle 64
4.3.2. Calage et validation du modèle 68

4.4. INDICATEUR D'AIDE A LA VIGILANCE 73
4.4.1. Un indicateur piézométrique peu adapté pour la Tardoire 73
4.4.2. Propositions pour la vigilance 73
4.4.3. Conclusion 74

5. Conclusion 75

6. Bibliographie 76

Liste des illustrations

Illustration 1. Présentation de la méthode de définition de l'indicateur karst. 12

Illustration 2. Réseau karstique de la source du Lez et dispositif de captage (d'après Comex, 1979). 13

Illustration 3. Affleurements calcaires constitutifs de l'aquifère karstique au sein du bassin d'alimentation de la source du Lez. 14

Illustration 4. Réseau hydrographique de surface du système du Lez. 15

Illustration 5. Débit et variations piézométriques en condition de karst saturé et sous saturé consécutifs à un épisode de pluie d'environ 120 - 130 mm. 18

Illustration 6. Schéma des processus de transfert simulés par Athys (Coustau, 2011) 19

Illustration 7. Structure schématique du modèle 19

Illustration 8. Schéma de la fonction de transfert « Lag and Route Simple » 21

Illustration 9. Valeur de la condition intiale et du critère de Nash en fonction de la nature de la pluie utilisée en entrée du modèle hydrologique 23

Illustration 10. Relations d'initialisation 25

Illustration 11. Réponses aux pluies significatives en contexte de karst sous saturé. 27

Illustration 12. Impact des précipitations sur la remontée du niveau piézométrique. 28

Illustration 13. Episodes de crue en condition de karst rechargé. 29

Illustration 14. Débit à Lavalette en fonction des cumuls de précipitation journalière en condition de karst rechargé. 30
Illustration 15. Débits à Lavalette associés à des précipitations journalières comprises entre 70 et 90 mm. 32
Illustration 16. Caractéristiques des épisodes de crue en contexte de karst rechargé.(débit à Lavalette) 33
Illustration 17. Débit au pic de crue en fonction du cumul de précipitation pour les épisodes en condition de karst rechargé 35
Illustration 18. Réponse aux pluies significatives en contexte de karst saturé en cours de recharge. 37
Illustration 19. Episodes avec recharge du karst puis crue. 39
Illustration 20. Débits en fonction des précipitations participants aux crues après la recharge du karst 40
Illustration 21. Débit du pic de crue en fonction des précipitations et intensité en mm/h (rouge : I > 30, orange 15 < I < 30, jaune : 10 < I < 15 et vert < 10). 41
Illustration 22. Abaque n° 1 : « Pluie - niveau du karst ». 42
Illustration 23. Exemple d'utilisation de l'abaque « Pluie – niveau du karst ». 43
Illustration 24. Débit du pic de crue horaire en fonction du cumul de précipitation pour différentes intensités. 45
Illustration 25. Abaque « Débit en fonction du cumul des précipitations efficaces » et épisodes mesurés. 46
Illustration 26. Abaque « Débit en fonction du cumul des précipitations efficaces ». 47
Illustration 27. Abaque à double entrée : « niveau karst et débit en fonction des pluies ». 48
Illustration 28. Episode de septembre 2005. 49
Illustration 29. Exemple d'utilisation de l'abaque – épisode de septembre 2005, karst sous saturé. 50
Illustration 30. Exemple d'utilisation de l'abaque – épisode de pluie de septembre 2005 en condition de karst rechargé. 51
Illustration 31. Feuille de calcul Excel pour approcher les débits. 52
Illustration 32. Contexte géologique et hydrogéologique du bassin de la Tardoire. 53
Illustration 33. Caractéristiques des bassins d'alimentation au niveau des stations hydrométriques sur la Tardoire et le Bandiat. 55
Illustration 34. Spatialisation de la pluie sur le bassin de la Tardoire. 56
Illustration 35. Caractéristiques des piézomètres du bassin Tardoire-Bandiat. 57
Illustration 36. Chroniques horaires de pluie, débit et débit spécifique (janvier-février 2008). 58
Illustration 37. Temps de réponse aux stations hydrométriques de la Tardoire. 59

Illustration 38. Débits classés sur la période du 01/01/2006 au 03/08/2010 (Note : pour une meilleure représentation, la classe de débit correspondant à des valeurs nulles (Coulgens) a été fixée à 1l/s sur le graphique). 60

Illustration 39. Auto-correlation des chroniques de pluie et de piézométrie (Note : le graphe de gauche montre les tendances pluri-annuelles, et le graphe de droite les tendances pluri-journalières). 61

Illustration 40. Corrélation croisée des chroniques de pluie et de piézométrie. 62

Illustration 41. Schéma de fonctionnement hydro(géo)logique du système de la Tardoire. L'épaisseur des flèches est proportionnelle aux flux. 63

Illustration 42. Découpage en Unités Hydrologiques (UH) du bassin de la Tardoire. 64

Illustration 43. Structure du modèle pour chaque UH. Les paramètres en bleu et rouge correspondent respectivement aux paramètres calés et fixés (cf. Illustration 44). 65

Illustration 44. Paramètres du modèle. 67

Illustration 45. Calage de la fonction de production sur les formations calcaires du bassin d'Argentor à Poursac (novembre 2008 à février 2009). 68

Illustration 46. Simulation sur le cycle hydrologique 2008-2009. 70

Illustration 47. Débit des pertes en fonction du débit amont et calcul des pertes du cours d'eau sur les tronçons Feuillade et Coulgens (cycle hydrologique 2008-2009). 71

Illustration 48. Simulation de la crue quinquennale 2009 (janvier-février 2009). 72

Illustration 49. Simulation des pertes lors de la crue quinquennale 2009 (janvier-février 2009). 73

1. Introduction

La mise en place d'un indicateur Karst sur les bassins versants du Lez et de la Tardoire s'appuie sur les développements méthodologiques réalisés dans la cadre de la convention SCHAPI-BRGM sur le karst Nîmois.

Ces bassins versants ont fait l'objet d'une procédure de sélection, en discussion entre le BRGM, le SCHAPI et les SPC.

Le BRGM a proposé une fiche de synthèse explicative pour la mise en place de l'indicateur, détaillant notamment les données requises pour les modélisations hydrologiques.

Après diffusion de la fiche aux SPC par le SCHAPI, environ 20 bassins versants ont été proposés. Une sélection a été opérée, basée essentiellement sur la qualité des données disponibles (données piézométriques, hydrologiques, ..) mais aussi sur l'existence d'une réelle problématique karstique (l'indicateur proposé est totalement applicable aux zones karstiques, mais pas aux aquifères en zone de craie avec un recouvrement important comme en pays de Caux).

Deux bassins ont alors été retenus par le SCHAPI : le bassin versant du Lez, dans l'Hérault, et le bassin versant de la Tardoire qui recoupe la Haute-Vienne, la Dordogne et la Charente.

Concernant le bassin du Lez, les études antérieures ont montré que le rôle du karst semblait significatif dans la genèse des crues. Or, à ce jour, ce paramètre n'est pas pris en compte dans la mise en place de la vigilance. L'objet de cette étude est ainsi de proposer un outil de prévision des crues prenant en compte les précipitations (cumul, durée, intensité), mais aussi l'état de remplissage de l'aquifère karstique. Pour ce faire, dans un premier temps, l'ensemble des principaux épisodes associés aux fortes précipitations vont être analysés et une typologie sera alors déduite. Ensuite, à partir de cette analyse mais aussi des résultats de modélisation mise en œuvre sur ce système, un outil de prévision sera élaboré pour la gestion de la vigilance. Ce travail a bénéficié des résultats acquis par le BRGM et HydroSciences Montpellier UMR5569 dans le cadre du projet de recherche « Lez – Gestion Multi-Usages », réalisé pour le compte de l'Agglomération de Montpellier.

Concernant le bassin de la Tardoire, les études antérieures ont montré que ce bassin de surface est caractérisé par de fortes pertes dans sa partie aval quand le cours d'eau drainant des formations de socle peu perméables en amont, arrive au contact des formations carbonatées du karst de la Rochefoucauld. Ces pertes modifient fortement la réponse hydrologique du bassin en asséchant le cours d'eau en étiage. Sur ce bassin au fonctionnement complexe, l'objet de l'étude est donc de mieux comprendre le rôle des pertes lors des crues.

Pour cela, dans un premier temps, il est nécessaire de définir un schéma de fonctionnement en surface comme en souterrain par l'étude des chroniques hydrologiques. Puis sur la base de ce schéma, une approche de modélisation sera présentée pour déterminer le rôle des pertes sur la genèse des crues. Les résultats de modélisation permettront de proposer un outil de prévision pour la gestion de la vigilance.

2. Rappel de la méthodologie de définition de l'indicataur d'aide à la vigilance

La méthodologie définie sur Nîmes d'un indicateur de saturation des karsts en vue de la prévision des crues a été explicitée dans le document ci-après (Illustration 1). Ce document diffusé par le SCHAPI à l'ensemble des SPC présente les enjeux, la méthodologie et les critères de sélection des bassins versants.





Caderau de Nîmes lors de la crue de septembre 2005 © BRGM

Crues karstiques
Établissement d'indicateurs d'aide à la vigilance

Dans le cadre de ses activités de recherche avec le Schapi, le BRGM travaille sur la contribution des eaux souterraines d'origine karstique à la genèse des crues. Malgré la spécificité des systèmes karstiques, le BRGM propose d'établir des niveaux de vigilance sous la forme d'abaques aisément utilisables en opérationnel. Le niveau prévisible du karst (et son éventuel débordement) est calculé en fonction de son niveau initial et de la quantité de pluie.

> **Les eaux souterraines** sont généralement caractérisées par une dynamique d'écoulement lente en particulier en milieu poreux. Leur temps de concentration est supérieur à celui des eaux de ruissellement. En période de crue, il en résulte un pouvoir régulateur des aquifères lié à leur capacité de rétention.

> **Certains systèmes karstiques** peu saturés peuvent jouer le rôle de réservoir si leurs capacités de stockage sont grandes.

À l'inverse, lorsqu'ils sont saturés, il y a très rapidement un refus à l'infiltration et le karst ne joue plus le rôle d'écrêteur de crue. De plus, les écoulements souterrains rapides caractérisés par des temps de concentration brefs s'additionnent alors aux eaux de ruissellement au moment du pic de crue, augmentant ainsi le risque d'inondation. On parle alors de **crue karstique**

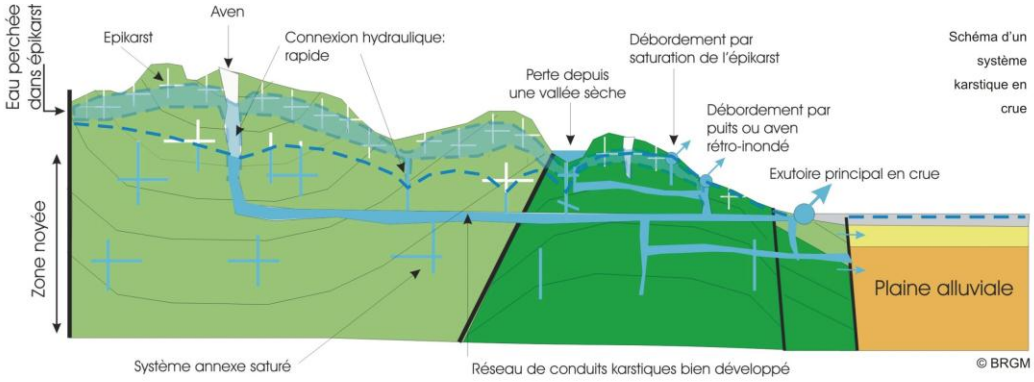
> **Les caractéristiques des karsts** favorisant les crues karstiques sont les suivantes : (i) forts taux d'infiltration suite à la présence de sols très perméables, (ii) rapide transfert de l'eau infiltrée vers les drains de la zone noyée au travers d'avens et de réseau de fissures, (iii) circulation rapide de l'eau dans un réseau de conduits karstiques en charge bien développé, (iv) mise en charge et inondation d'avens proches de la source suite à une constriction du conduit karstique et (v) faible capacité d'emmagasinement de la partie non saturée du karst (épikarst et zone d'infiltration).

> Il en résulte une **saturation et un débordement du système karstique** qui contribuent à augmenter l'amplitude de la crue par **refus à l'infiltration** et **contribution directe** du karst.

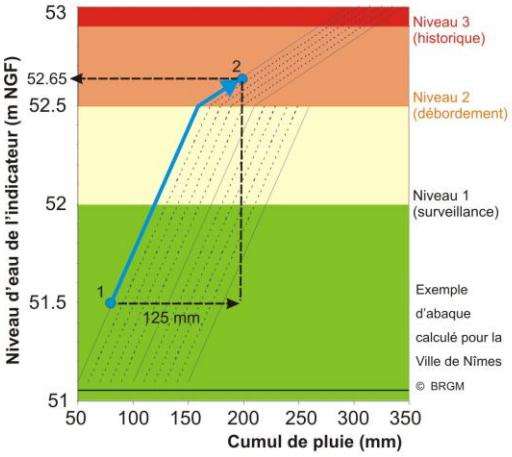


Ancien puits romain et aven karstique mis en charge et inondés par les eaux souterraines © G. Jouanen

Géosciences pour une Terre durable
brgm



> Il est possible de surveiller l'état de saturation du système karstique au moyen d'un **réseau d'observation des niveaux d'eau constitué d'indicateurs adaptés** (piézomètres, aven, source...). **L'analyse des débits** de l'exutoire du système karstique (source), des débits dans les rivières ou cours d'eau de surface ainsi que des niveaux d'eau de plusieurs points considérés comme représentatifs permettent de définir un seuil au-delà duquel le système karstique est saturé et provoque une crue karstique. Ce seuil s'exprime par un niveau d'eau NGF. Selon le comportement du système et les impacts associés aux différentes crues engendrées, quatre niveaux de vigilance peuvent être définis sur le modèle des cartes de vigilance du Schapi ou de Météo France.



> **Une modélisation numérique** reliant les précipitations aux niveaux d'eau et aux débits observés a été développée au moyen de modèles réservoirs par le BRGM sur le système karstique de Nîmes en collaboration avec la Ville de Nîmes. Les résultats de ce modèle permettent de concevoir un **abaque simple** présentant les variations des niveaux d'eau en fonction du cumul de pluie. Cet indicateur constitue un outil d'aide à la décision au service des prévisionistes. Facilement utilisable en période de vigilance, il permet d'anticiper la saturation du karst et ses débordements alimentant la crue karstique, à partir des différents scénarios de pluie envisagés. Un exemple d'un tel abaque utilisé par la Ville de Nîmes en période de crue est présenté ci-contre. Son mode d'emploi est expliqué à partir de l'exemple suivant. En supposant que le niveau initial de l'indicateur est de 51.5 m NGF résultant de divers épisodes antérieurs de pluies, il convient de représenter ce point sur la diagonale de gauche de l'abaque selon le niveau correspondant (point 1). Si à titre d'exemple, une pluie de 125 mm est prévue par Météo-France dans les heures qui suivent, il suffit de se déplacer sur l'abaque le long de la même diagonale, selon une distance horizontale correspondant sur l'axe des abscisses à la pluie prévue. On obtient le point 2 qui correspond au niveau attendu sur l'indicateur (dans le cas présent, 52.65 m NGF). Un **niveau de vigilance (niveau 2)** sera déclenché si le niveau calculé est supérieur à un niveau de vigilance prédéfini comme débordement du karst. C'est le cas de cet exemple. Un **niveau de vigilance** supplémentaire peut-être défini - comme dans l'exemple de Nîmes - si le niveau calculé dépasse un niveau (niveau 3) correspondant à une crue historique. Le même abaque permet la simulation d'un événement composé de plusieurs averses successives séparées de périodes sèches, en tenant compte du tarissement intermédiaire des niveaux.

> **La méthodologie développée sur le site de Nîmes** peut être adaptée à d'autres bassins versants susceptibles d'être le siège de crues karstiques dès lors qu'une partie significative est constituée de roches karstifiées.

> **Conditions d'application de la méthode**

L'application de cette méthodologie nécessite des chroniques de niveaux d'eau sur les systèmes karstiques durant plusieurs crues significatives ainsi que des données de débit sur les cours d'eau ou l'exutoire du système.

BRGM
P. Fleury & JC. Maréchal
RMD Service EAU
1039, rue de Pinville
34000 Montpellier
tél. 04 67 15 79 90
p.fleury@brgm.fr
jc.marechal@brgm.fr

Schapi
C. Wittwer & A. Marchandise
42, av. Gaspard Coriolis
31057 Toulouse
tél. 05 34 63 85 53
arthur.marchandise@developpement-durable.gouv.fr
caroline.wittwer@developpement-durable.gouv.fr

24/02/2010

Illustration 1. Présentation de la méthode de définition de l'indicateur karst.

3. Le bassin versant du Lez

3.1. PRESENTATION DU SYSTEME DU LEZ

3.1.1. Structure de l'exutoire

Ce système est caractérisé par un exutoire principal, la source du Lez et par plusieurs sources de trop plein. La source du Lez est de type Vauclusien, l'eau s'écoule au travers d'une vasque, dont le débordement est à la cote +65 m NGF, et alimente la rivière Lez (Illustration 2).

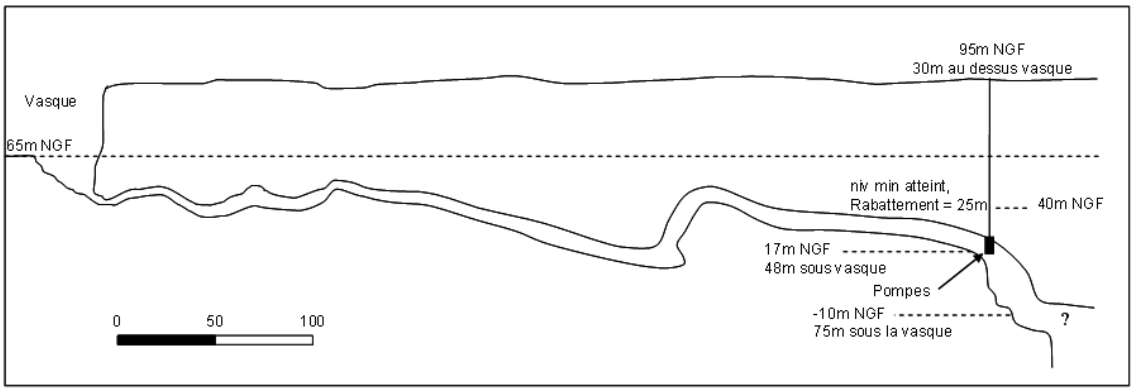


Illustration 2. Réseau karstique de la source du Lez et dispositif de captage (d'après Comex, 1979).

3.1.2. Description du bassin d'alimentation

La superficie de son bassin d'alimentation souterrain, établie à partir des traçages et de l'identification des limites structurales imperméables, est de l'ordre de 380 km². L'aire de recharge de cet aquifère alimentant la source du Lez correspond essentiellement aux affleurements de calcaires constitutifs de l'aquifère karstique. Ces affleurements représentent une superficie d'environ 100 km² soit environ un quart de la superficie du bassin d'alimentation souterrain (Illustration 3). Toutefois, une part (non quantifiable) d'infiltration s'effectue au niveau de pertes dans les formations calcaires à marno-calcaires du toit de cet aquifère, le long d'accidents tectoniques (Faille des Matelles-Corconne notamment).

Cet aquifère karstique, de par sa géométrie et sa lithologie est donc à la fois libre et captif suivant les endroits.

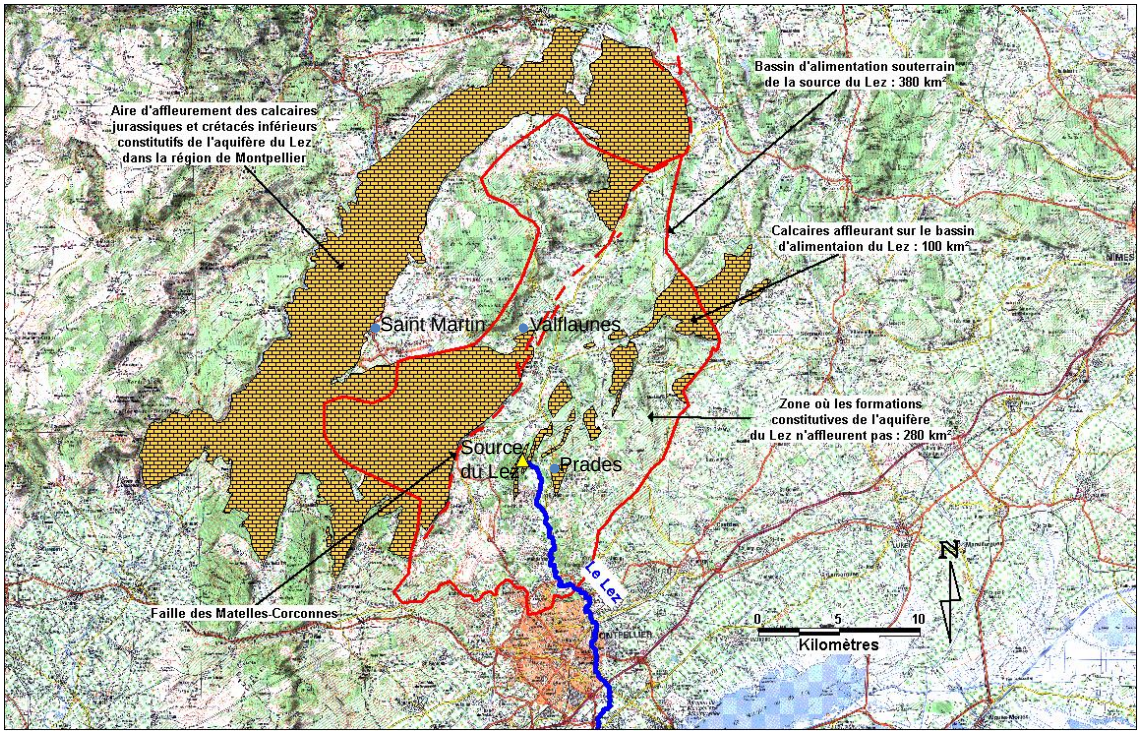


Illustration 3. Affleurements calcaires constitutifs de l'aquifère karstique au sein du bassin d'alimentation de la source du Lez.

En surface, le ruissellement est un facteur important dans la genèse des crues du système. Le réseau hydrographique est réduit pendant les périodes d'étiage ; seuls quelques cours d'eau sont pérennes : le Lez sur l'ensemble de son tracé et le Lirou dans la partie aval de son lit. Lors des périodes de fortes précipitations, de nombreux ruisseaux alimentés par le ruissellement sur les niveaux peu perméables, mais aussi par les sources de trop plein du système karstique, viennent accroître ce réseau (Illustration 4). Il est alors constitué :

- par un premier réseau dendritique (surface en hachuré bleu sur l'Illustration 4) correspondant au bassin versant topographique du Lez à Lavalette (station de jaugeage assimilée comme étant l'entrée du Lez à Montpellier). Ce bassin versant a une superficie de l'ordre de 120 km² ; il repose essentiellement sur les formations du toit de l'aquifère. Il est totalement inclus dans le bassin d'alimentation souterrain de la source du Lez.
- par un second réseau qui sort des limites du système (présenté en violet dans l'Illustration 4), il correspond à des parties des bassins versants topographiques du Vidourle au nord et à l'est, du Salaison et du ruisseau de la Cadoule au sud-est et de la Mosson au sud-ouest. Ce second réseau draine environ 200 km² en surface du bassin d'alimentation souterrain de la source du Lez.

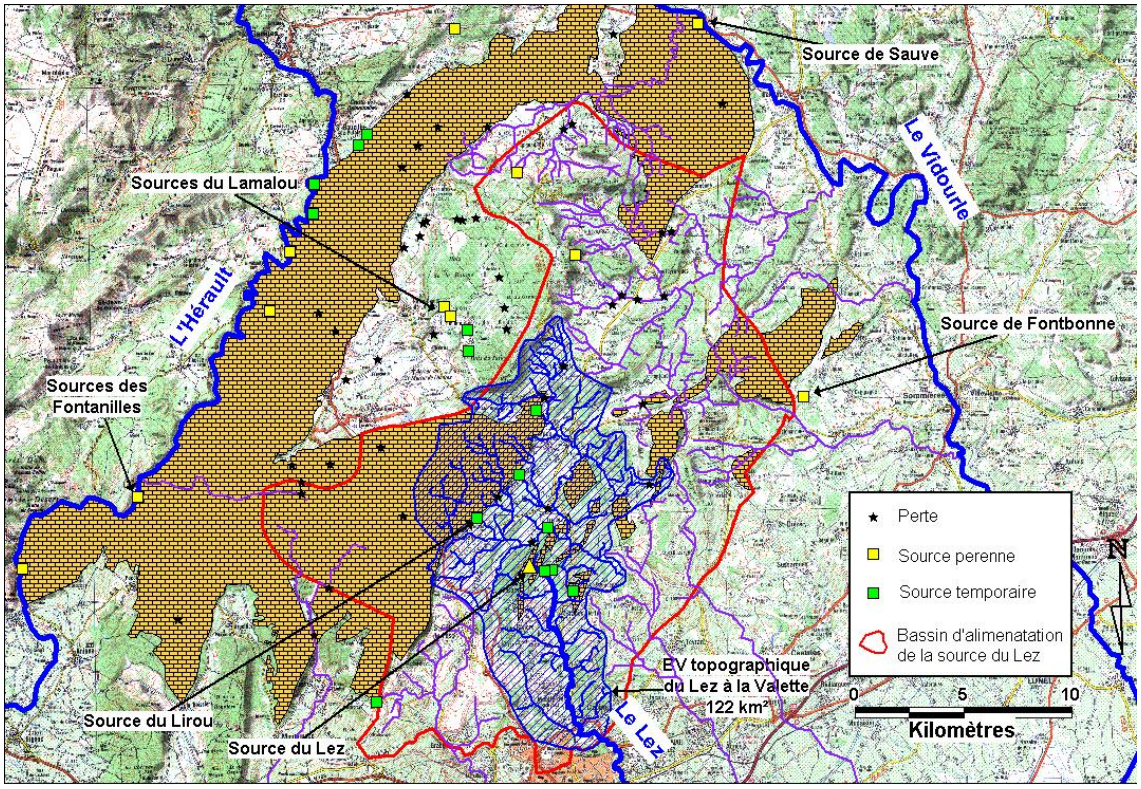


Illustration 4. Réseau hydrographique de surface du système du Lez.

La géologie et le couvert végétal semblent enfin être un facteur important dans le fractionnement ruissellement/infiltration :

- dans les zones où les calcaires sont affleurants (Causses de Viols-le-Fort, secteur de Claret, …), le sol est peu épais voire inexistant et la végétation est réduite, ce qui favorise la formation de lapiez et d'avens. L'infiltration est dominante.
- dans les zones où les calcaires sont sous recouvrement marneux, le sol est plus épais et la végétation plus dense, ce qui favorise l'interception et le ruissellement de l'eau de pluie. Cette eau rejoint soit le réseau hydrographique du Lez soit un réseau hydrographique sortant du bassin d'alimentation (Vidourle, Mosson …).

3.1.3. Exploitation du système karstique pour l'AEP

La particularité de ce système réside dans la gestion active de la ressource en eau. Cette gestion consiste à prélever l'eau directement dans le drain qui débouche à la source. Ce captage s'effectue plus de 400 m en amont dans le massif calcaire. Le pompage a lieu 48 m sous le niveau de la vasque, à la cote +17 m NGF (Illustration 2). Situé à un niveau inférieur à celui de la vasque, il permet de prélever l'eau des réserves initialement « non mobilisables ». Il fait l'objet d'un suivi avec notamment la mesure des débits pompés et celle du niveau dans le drain principal. Le débit moyen

pompé est 1.1 m^3/s (données CGE sur la période 97-05). Le niveau dans le drain permet d'approcher le niveau des réserves puisque le drain assure la fonction de drainage de la zone noyée. En période de hautes eaux, le niveau dans le drain est supérieur à la cote de débordement de la vasque, le pompage prélève alors de l'eau des réserves dites « mobilisables ». En période d'étiage l'eau prélevée provient des réserves « non mobilisables » en fonctionnement naturel du système, le niveau dans le drain est inférieur à celui de la vasque. Ainsi, en étiage le captage prélève l'eau des réserves qui étaient « non mobilisables » avant la mise en place du captage situé à un niveau inférieur à celui de la vasque. Ces réserves sont reconstituées au cours des pluies automnales et hivernales (le niveau dans le drain devient alors supérieur au niveau de la vasque).

Les débits de la source du Lez sont ainsi influencés par le pompage. Lorsque le débit de la rivière est inférieur au débit pompé, une partie du flux pompé est restitué à la rivière. Ce débit de restitution est de 160 l/s (débit fixé par la Déclaration d'Utilité Publique du 05 juin 1981), il correspond au débit réservé imposé.

3.1.4. Fonctionnement en période de crue

La région est caractérisée par la présence d'épisodes pluviométriques méditerranéens également appelés épisodes Cévenols. Ces derniers se manifestent par des fortes intensités de pluies qui contribuent à générer des pluies efficaces importantes concentrées sur de courtes périodes de quelques heures.

Le système du Lez fait par ailleurs l'objet d'une étude dans le cadre d'un projet de recherche pour le compte de l'Agglomération de Montpellier (projet dirigé par le BRGM en partenariat avec l'UMR HydroSciences Montpellier et d'autres laboratoires de la Région). A l'issue de ce projet et des études antérieures (Roesch et Jourde, 2006 ; Jourde et al. 2007 ; Fleury et al. 2009, Borrell et al., 2008, Coustau et al., 2011)[1], un modèle conceptuel de fonctionnement de ce système a été élaboré. Il révèle qu'en période de hautes eaux le fonctionnement du système dépend directement du degré de remplissage de l'aquifère karstique. En effet, l'analyse de la réponse du Lez aux épisodes de pluie montre une dualité de fonctionnement du système :

- lorsque le karst est saturé, le système se comporte comme un bassin hydrologique classique avec une forte contribution des pluies au ruissellement

- lorsque le karst est sous saturé, les pluies contribuent dans un premier temps à la recharge du système ; c'est seulement lorsque ce dernier est rechargé que le ruissellement classiquement observé sur les bassins versants se met en place.

[1] Projet Lez Gestion Multi Usages financé par l'agglomération de Montpellier, le CG11, le CR LR, l'AER&M, le BRGM et porté par le BRGM. Les partenaires scientifiques sont : BRGM, HSM, G-EAU, TETIS, CERFACS, BIOTOPE

Ainsi, du fait du mode de gestion active de l'aquifère, une partie des précipitations automnales est stockée dans le karst et ne participe pas à la crue. Le karst joue ainsi le rôle d'écrêteur de crue. Les niveaux d'eau dans le karst, lorsqu'il est saturé, atteignent 65 m NGF, l'écoulement se fait alors naturellement à la vasque. Par contre en période de sollicitation des réserves le niveau peut descendre 25 m sous le niveau de la vasque offrant une capacité d'écrêtage importante.

3.1.5. Données

Le débit est mesuré à la source et également sur le fleuve aux stations de Lavalette et de Garigliano (voir localisation Illustration 3). Les précipitations journalières pour le bassin d'alimentation de la source du Lez seront caractérisées par les données Météo France journalières aux stations de Prades, Saint Martin et Valflaunes selon la pondération suivante :

Précipitations BA(*) Lez = 0,2 * P Prades + 0,4 * P St Martin + 0,4 * P Valflaunes.

(*) : bassin d'alimentation

Cette pondération est définie à partir de l'outil de traitement du signal Tempo (Fleury et al., 2009). Les données horaires seront également utilisées pour l'étude spécifique d'épisodes majeurs, cette fois-ci non pas au niveau du bassin d'alimentation, mais pour le bassin versant à la station de Lavalette. Il s'agira ainsi soit d'une moyenne pondérée par la surface de représentation de chacun des postes de Prades, Mauguio, Saint Martin et Montpellier-Ensam (de type Thiessen), soit de la lame d'eau radar moyenne sur le bassin topographique. Le choix de l'une ou l'autre des données de pluie se fait en fonction de la qualité et de la disponibilité des images.

L'incertitude sur les précipitations est évaluée à dire d'expert entre 10 et 20 %. Du fait de la présence de cellules orageuses hétérogènes localisées, ces valeurs sont communément admises dans le domaine de l'hydrogéologie.

3.1.6. Dualité de fonctionnement - exemple

Pour illustrer la fonction d'écrêtage des crues par le karst, nous proposons de comparer les deux épisodes du 09/10/2001 et du 24/08/2002, caractérisés par des hauteurs de pluie journalières significatives et comparables de l'ordre de 120 mm. Pour ces deux épisodes, les niveaux d'eau dans le karst avant les précipitations étaient différents : le karst était plein pour le premier épisode et fortement déprimé pour le second. Les réponses en termes de débit et de variation piézométrique sont présentées dans le tableau ci-après.

L'épisode d'octobre 2001, caractérisé par un karst saturé, produit une crue avec un débit à Lavalette supérieur à 200 m^3/s, alors que l'épisode d'août 2008 ne donne pas de crue, les précipitations contribuant uniquement à recharger le karst.

Episode	Pluie j (mm)	Piézo ini (m)	Piézo fin (m)	Q source (m^3/s)	Q Valette (m^3/s)	Q Garigliano (m^3/s)
09/10/2001	environ 120	66	68.5	24	238	314
24/08/2002	environ 130	43	64	0	6	8

Illustration 5. Débit et variations piézométriques en condition de karst saturé et sous saturé consécutifs à un épisode de pluie d'environ 120 - 130 mm.

3.2. MODELISATION EVENEMENTIELLE DES CRUES DE SURFACE

Un modèle hydrologique de simulation des crues de surface du Lez à la station de Lavalette a été développé et est présenté dans cette partie. Compte tenu de l'objectif visé (la prévision des crues importantes pour des temps de réponse inférieurs à 6 heures) et des fortes variabilités spatio-temporelles des pluies méditerranéennes, un modèle pluie-débit à réservoir, événementiel, distribué, parcimonieux et fonctionnant à pas de temps horaire a été utilisé, il a été implémenté dans la plateforme ATHYS.[2]

3.2.1. Concept

Le modèle hydrologique de type réservoir est constitué d'une fonction de production et d'une fonction de transfert. La fonction de production (notée SCS instantané) détermine la quantité d'eau qui s'écoule en surface du bassin et la fonction de transfert (notée Lag and Route Simple) achemine cette eau de surface à l'exutoire.

L'exutoire retenu est la station de Lavalette en amont de Montpellier (114 km2). Le modèle hydrologique opère en mailles carrées régulières de 75 m x 75 m

2 A noter que le modèle événementiel pluie-débit à réservoir présenté ici fait l'objet du travail de thèse de Mathieu Coustau. Cette thèse est financée par une bourse ministérielle et son environnement a été assuré par le projet Lez Gestion Multi-usages ainsi que par des financements internes à HydroSciences Montpellier. Pour plus de précision ou d'informations, le lecteur pourra se référer à son manuscrit de thèse ou à ses publications.

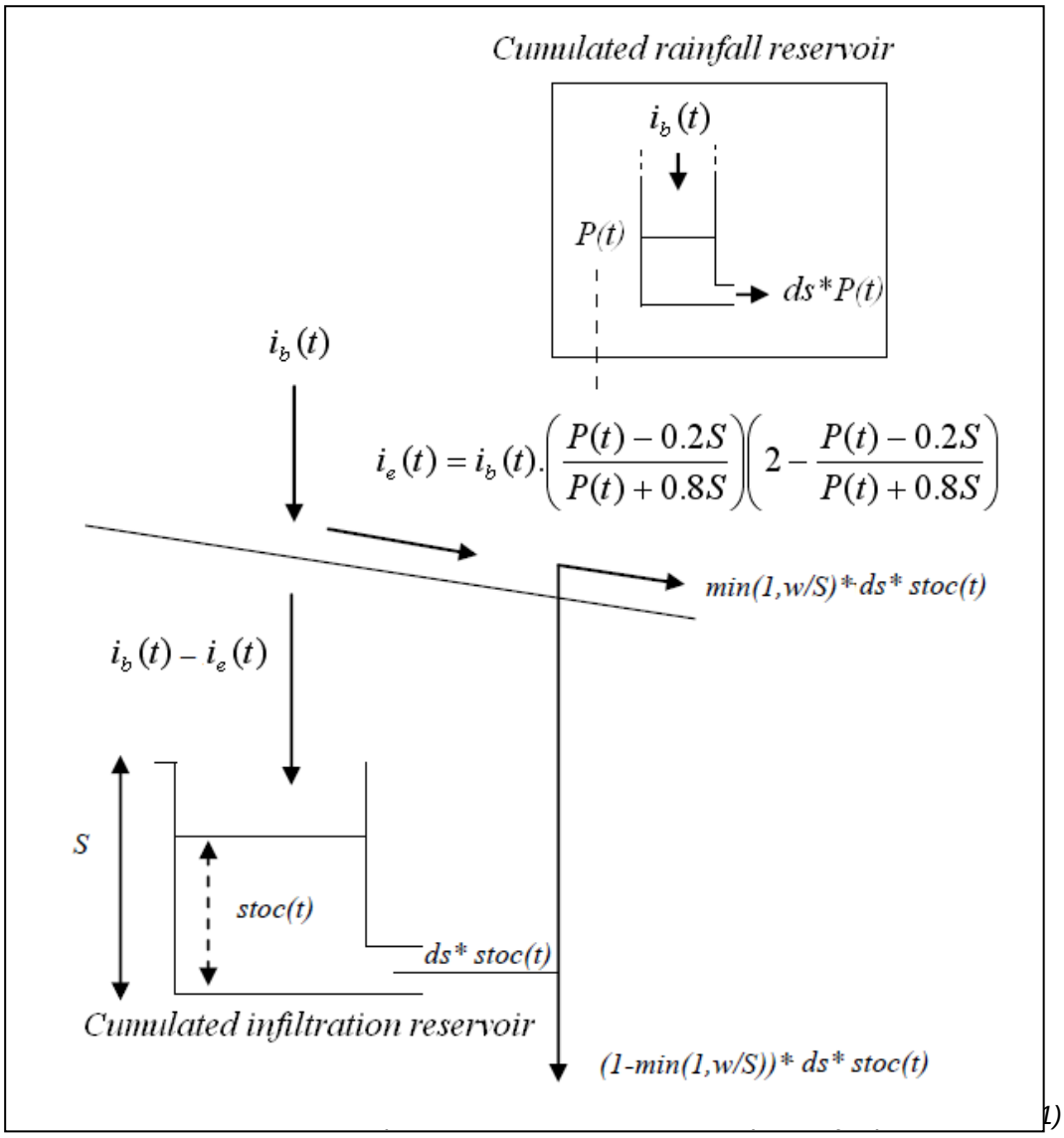


Illustration 7. Structure schématique du modèle

Fonction de production : SCS instantané

La fonction de production décrite ici est dérivée de la fonction SCS d'origine. Elle est représentée par un réservoir de cumul de pluie de capacité infinie qui détermine la pluie efficace (ou ruissellement direct) (Gaume et al., 2004) :

$$i_e(t) = C(t).i_b(t)$$

où $i_b(t)$ est l'intensité de pluie brute, $i_e(t)$ est l'intensité de pluie efficace et $C(t)$ est le coefficient de ruissellement :

$$C(t) = \begin{cases} 0, \; si \; P(t) < 0.2S \\ \left(\dfrac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right) \left(2 - \dfrac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right), \; si \; P(t) > 0.2S \end{cases}$$

Pour représenter la diminution du coefficient de ruissellement entre deux averses d'un même épisode, une vidange est appliquée au cumul de pluie *P(t)* dont l'évolution dans le temps est contrôlée par l'équation différentielle ordinaire suivante :

$$\frac{dP(t)}{dt} = i_b(t) - ds.P(t)$$

où *ds* est le coefficient de vidange appliqué au cumul de pluie *P(t)*. Pour tous les événements, ce coefficient de vidange est constant et le cumul de pluie au début de chaque événement est nul : *P(0) = 0*.

Pour mieux représenter les écoulements retardés, un réservoir « sol », de capacité maximale *S*, a été ajouté. Le niveau de stockage *stoc(t)* dans ce réservoir est nul en début d'événement : *stoc(0) = 0*. La taille du réservoir représente donc le déficit hydrique initial de l'hydrosystème. Ce réservoir se remplit par infiltration et se vidange proportionnellement à son niveau *stoc(t)* suivant l'équation différentielle ordinaire suivante :

$$\frac{dstoc(t)}{dt} = i_b(t) - i_e(t) - ds.stoc(t)$$

où *ds* est le coefficient de vidange du réservoir d'infiltration cumulée. Par souci de parcimonie, il s'agit du même coefficient de vidange que celui de la pluie cumulée.

L'écoulement retardé $i_d(t)$ s'exprime finalement comme une proportion min(1,*w*/*S*) de la vidange *ds.stoc(t)*.

$$i_d(t) = \min\left(1, \frac{w}{S}\right).ds.stoc(t)$$

Ainsi, plus *S* est grand (plus le bassin est sec), plus le rapport *w*/*S* est faible (moins la récession de l'hydrogramme est soutenue). Ce ruissellement retardé vient ensuite s'ajouter au ruissellement $i_e(t)$ déjà produit pour représenter le ruissellement total $i_t(t)$.

$$i_t(t) = i_e(t) + i_d(t)$$

La fonction de production possède donc trois paramètres : *S*, représentant le déficit hydrique initial du bassin ; *ds*, le coefficient de vidange et *w* qui contrôle la proportion de la vidange qui participe aux écoulements retardés.

Fonction de transfert : Lag and Route Simple

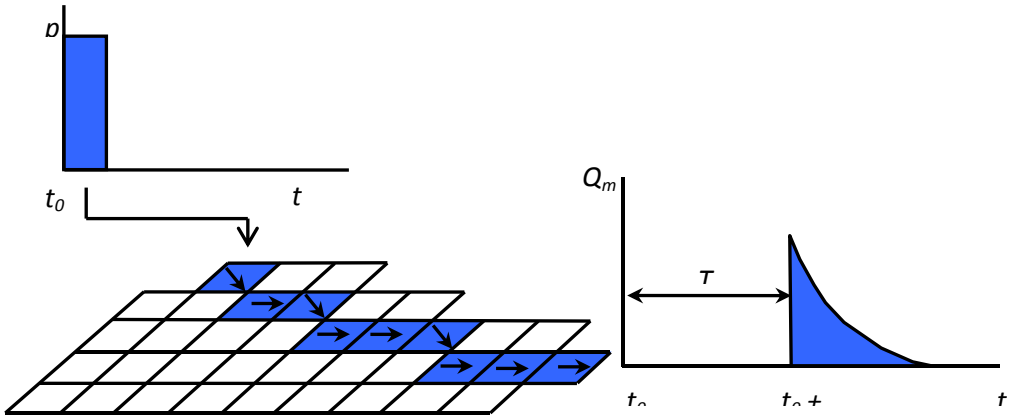


Illustration 8. Schéma de la fonction de transfert « Lag and Route Simple »

L'écoulement total $i_t(t)$ produit par chaque maille est ensuite acheminé à l'exutoire du bassin par une fonction de transfert de type « lag and route » [Maidment 1992 [26-9]; Bouvier and Delclaux, 1996; Lhomme et al., 2004) (Illustration 8). La contribution d'une maille parvient à l'exutoire après un temps de propagation T_m, calculé à partir de la vitesse de transfert V et de la longueur de la trajectoire séparant la maille de l'exutoire :

$$T_m = \sum_k \frac{l_k}{V}$$

où l_k est la distance parcourue par l'eau dans chacune des k mailles de la trajectoire. Cette contribution est également amortie par application d'un temps de diffusion K_m proportionnel au temps de propagation T_m.

$$K_m = K_0 . T_m$$

La fonction de transfert est donc pilotée par deux paramètres : V pour ajuster le temps de propagation T_m et K_0 pour ajuster le temps de diffusion K_m. L'hydrogramme élémentaire produit par chaque maille à l'exutoire du bassin peut alors être calculé par :

$$Q_m(t) = \frac{i_t(t_0)}{K_m} . \exp\left(-\frac{t - (t_0 + T_m)}{K_m} \right) . A$$

où A désigne l'aire de la maille. La contribution Qm(t) de chaque maille k est ensuite additionnée pour donner l'hydrogramme complet de crue.

3.2.2. Calage

Paramètres

Le modèle finalement retenu possède alors 5 paramètres : *S* qui représente le déficit hydrique initial de l'hydrosystème (sol + karst), et qui est une condition initiale (donc variable d'un événement à l'autre), *w* qui permet d'ajuster le soutien de la courbe de récession en contrôlant la part de la vidange du réservoir « sol » qui participe aux écoulements de surface, *ds* qui est le coefficient de vidange des réservoirs « cumul de pluie » et « sol », *V* qui est la vitesse de transfert et K_0 qui permet d'ajuster la diffusion de l'hydrogramme produit. Ces paramètres restent constants pour l'ensemble des épisodes à l'exception de S qui varie d'un épisode sur l'autre.

Le modèle a été calibré sur les 21 crues sélectionnées pour l'étude Le critère optimisé est celui de Nash.

- critère de Nash : $Nash = 1 - \frac{\Sigma(Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)^2}{\Sigma(Q_{sim}(t) - \overline{Q_{obs}})^2}$
- *ds* = 0.28 j^{-1}
- K_0 = 0.3
- *V* = 1.3 m/s
- *w* = 101 mm
- La condition initiale est variable selon l'événement.

Pluies utilisées par le modèle	Pluies au sol (pluviographes)		Pluies radar traitement HYDRAM		Pluies radar traitement CALAMAR	
Event	S	Nash	S	Nash	S	Nash
oct-94	200	0.66	Pas de données radar		Pas de données radar	
nov-94	121	0.60				
déc-95	135	0.82				
mars-96	154	0.85				
déc-96	146	0.82				
nov-97	266	0.83				
déc-97	150	0.68	208	0.48	Pas de données radar	
nov-99	168	0.75	204	0.59		
sept-00	**143**	**0.94**	**267**	**0.91**		
déc-00	117	0.61	150	0.65		
janv-01	101	0.84	116	0.81		
oct-01	**164**	**0.81**	Pas de données radar		**139**	**0.94**
sept-02	238	0.90	304	0.27	Pas de données radar	
oct-02	196	0.54	321	0.45		
déc-02	95	0.88	146	0.78	157	0.82
sept-03	**481**	**0.81**	**254**	**0.90**	**276**	**0.89**
nov-03	112	0.88	229	0.68	Pas de données radar	
déc-03	101	0.89	143	0.91	115	0.90
sept-05	**33**	**0.72**	**246**	**0.81**	**240**	**0.90**
janv-06	132	0.85	202	0.82	Pas de données radar	
oct-08	**386**	**0.81**	**392**	**0.88**		

Illustration 9. Valeur de la condition intiale et du critère de Nash en fonction de la nature de la pluie utilisée en entrée du modèle hydrologique

De manière générale, le modèle simule correctement 18 des 21 épisodes de crue avec un coefficient de Nash allant de 0.66 à 0.94 et un jeu de paramètres constant pour tous les épisodes, excepté la taille du réservoir de production *S*. De plus, *S* présente de fortes valeurs pour les épisodes de début d'automne survenant après une longue période de sécheresse et de faibles valeurs pour les autres épisodes survenant après les premières pluies de l'automne. Comme attendu, la valeur de *S*, représentant le déficit hydrique initial, dépend de la saison et des pluies antécédentes (qui déterminent l'état hydrique du bassin en début d'épisode). Le modèle paraît donc bien refléter la saisonnalité.

Initialisation

Utilisé en mode évènementiel, le modèle est initialisé à partir d'indicateur de l'état de saturation du sol et du karst. Plusieurs relevés piézométriques ont été utilisés pour

établir cette relation. Les indicateurs de l'état hydrique de l'hydrosystème ont été pris avant le début de l'épisode de pluie à 6h00 TU.

La condition initiale *S* a aussi été comparée avec le niveau de remplissage de l'aquifère mesuré à pas de temps horaire pour 12 piézomètres appartenant à l'aquifère du Lez. Elles présentent un coefficient de détermination compris entre 0.50 et 0.81. Les meilleures corrélations sont obtenues pour les piézomètres des Matelles, de Bois Saint Mathieu et de Claret. Ces derniers sont situés près de la faille des Matelles qui représenterait un axe de drainage préférentiel de l'aquifère du Lez (Karam, 1989). Les piézomètres situés près de la source du Lez (piézomètres de Saint-Gély, Bois des Avants, Bois des Rosiers et Gour Noir) et fortement influencés par son débordement présentent aussi des corrélations satisfaisantes.

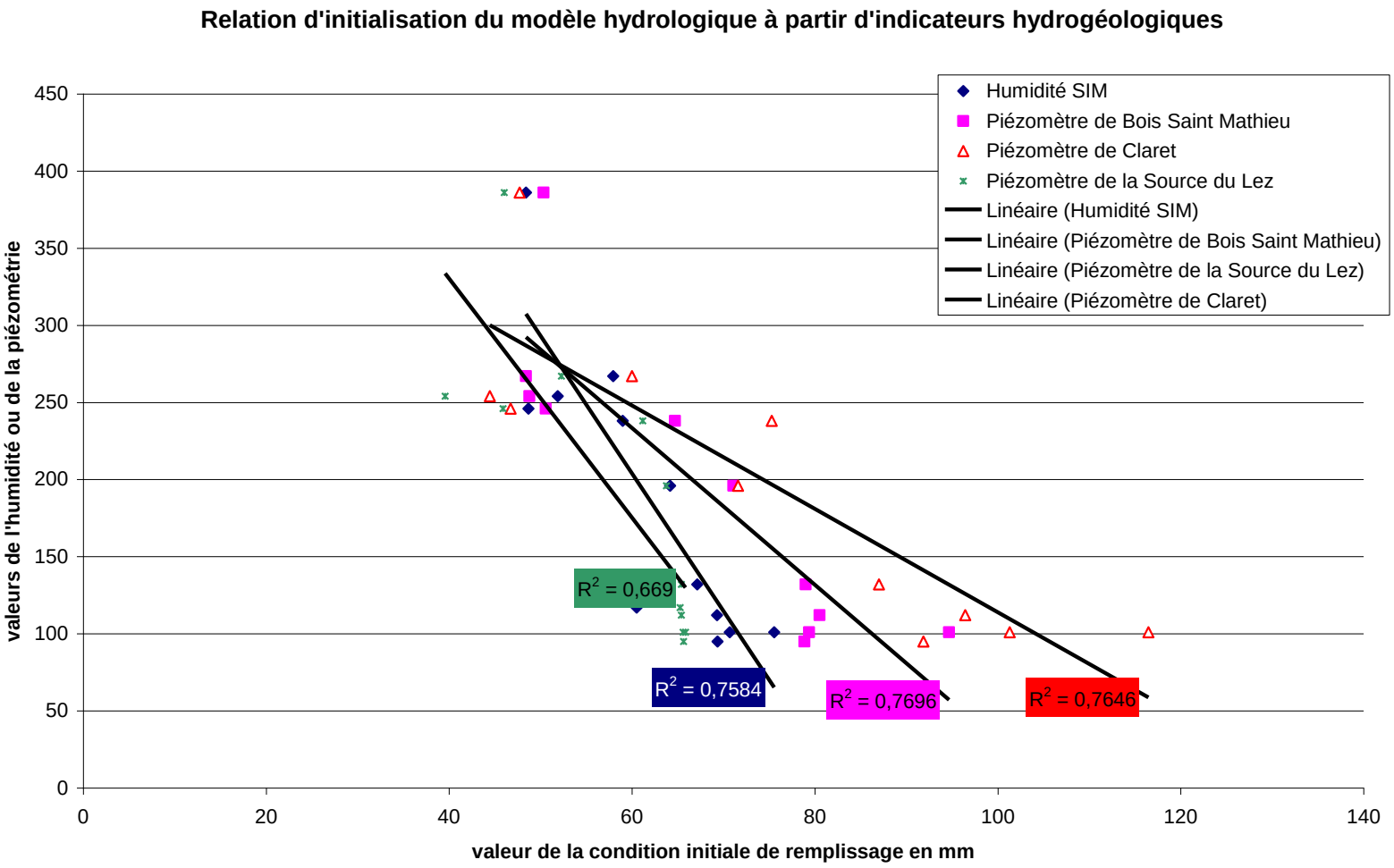


Illustration 10. Relations d'initialisation

3.2.3. Bilan

Le modèle proposé reproduit de façon relativement satisfaisante les crues de surface du bassin karstique du Lez. Son utilisation nécessite un nombre limité de données, principalement les pluies horaires mesurées pendant l'épisode de crue. Il contient aussi un nombre réduit de paramètres qui restent constants pour l'ensemble des 21 événements testés sur la période 1994 – 2008, à l'exception de la condition initiale S que l'on ajuste d'un épisode sur l'autre afin de représenter le déficit hydrique initial de l'hydrosystème en début d'événement. La condition initiale du modèle est également bien corrélée aux indicateurs de l'état hydrique de l'hydrosystème comme la piézométrie.

La parcimonie, la frugalité, l'initialisation robuste et facile de ce modèle en font un outil utilisable pour de nombreuses applications hydrologiques opérationnelles comme la prédétermination ou la prévision en temps réel. Cependant le modèle se révèle inadapté pour les épisodes où le karst est significativement sous-saturé puisque par construction même, ce modèle se veut perceptuel, i.e. qu'il ne simule que les processus à l'origine des crues importantes à extrêmes et ignore les écoulements souterrains en période de basses eaux.

Les résultats de modélisation des épisodes traités seront présentés dans les graphiques par la suite. Pour chacun, le modèle a été utilisé en mode événementiel et a nécessité le calage du paramètre S qui est rappelons le, variable en fonction de l'état du système. L'amélioration de la prévision grâce à l'utilisation de ce modèle passera ainsi par une caractérisation de l'état du karst.

3.3. ETUDE DES EPISODES PRINCIPAUX

Il s'agit ici de caractériser les réponses en termes de débit dans le fleuve mais aussi de variation du niveau d'eau dans le karst, suite aux principaux épisodes pluvieux (cumul épisode supérieur à 50 mm). Ces épisodes sur la période 2000-2010 vont ainsi être détaillés par la suite selon trois situations distinctes :

- Le karst est initialement sous-saturé, les précipitations contribuent à sa recharge, les débits à la source et dans le fleuve sont faibles. Ce type d'épisode se produit à la fin des périodes estivales.

- Le karst est déjà saturé en début d'épisode (côte proche ou supérieure à 65 m NGF), les précipitations sont responsables d'une crue sur le Lez.

- Le karst sous saturé initialement se remplit dans un premier temps, il atteint sa côte de saturation (65 m NGF) au cours de l'épisode pluvieux. Les pluies se poursuivent ensuite et entrainent une augmentation des débits à la source et dans le fleuve.

Par ailleurs l'état de saturation du sol va également être caractérisé d'un point de vue qualitatif. En effet, l'analyse des chroniques montre que le système du Lez possède

une capacité de rétention de l'ordre de 20 à 30 cm de précipitation selon les périodes de l'année. Ainsi en approchant les hauteurs des précipitations les jours qui ont précédé l'épisode de pluie, on peut évaluer si le sol est globalement saturé ou non et si de ce fait il peut retenir les premiers mm de pluie.

3.3.1. Situation 1 : recharge de l'aquifère karstique et absence de crue

L'analyse qualitative présentée ci-après permet d'évaluer l'impact des précipitations sur le remplissage du karst. On vérifie ainsi que pour l'ensemble des épisodes présentés, les précipitations significatives (supérieures à 45 mm), n'engendrent pas de crue. Les précipitations sont issues des données journalières. Le débit de pointe horaire est fourni pour caractériser les écoulements dans le fleuve.

Date	somme P (mm)	Précipitations antérieures	caractérisation du sol	Niveau initial karst (m)	Pic niveau piézo (m)	variation piézo (m)	Débit Lez source (m^3/s)	Débit Lavalette (m^3/s)	Débit Garigliano (m^3/s)
19/09/2000	56	50 mm à 20 j	rechargé	40	52	12	0	4	23
14/07/2001	57	29 mm à 7 j	rechargé	50	60	10	0	0	6
29/09/2001	50	64 mm à 7 j	rechargé	42	52	10	0	3	10
24-26/08/2002	132	21 mm à 25 j	rechargé	43.5	64.5	21	0	6	8
07/09/2003	49	25 mm à 20 j	rechargé	43	51	8	0	1	4
11/09/2004	52	46 mm à 30 j	rechargé	45	53	8	0	11	24
13-14/09/2004	57	52 mm à 2 j	rechargé	53	65	12	1	2	4
13/09/2006	120	-	sec	41	65	24	0	22	35
22/11/2007	47	30 mm à 2 j	rechargé	48	61	13	0	0	5

Illustration 11. Réponses aux pluies significatives en contexte de karst sous saturé.

A l'exception de l'épisode du 13/09/2006 le sol peut être caractérisé comme relativement saturé du fait de précipitations significatives au cours des jours antérieurs. Compte tenu de la nature du sol, on considère qu'une RFU (Réserve Facilement Utilisable) de l'ordre de 20 mm est pertinente. Ainsi pour l'épisode de septembre 2006 on considère une pluie efficace de l'ordre de 100 mm (120 mm – 20 mm).

Pour l'ensemble de ces épisodes les précipitations contribuent à la recharge du karst, mais n'impactent pas ou sinon très peu les débits du Lez. La source ne s'écoule pas et les débits du fleuve sont limités (débit inférieur à 40 m^3/s à Garigliano). A partir des variations piézométriques calculées et des précipitations associées, il est possible d'évaluer la hauteur de précipitations nécessaire à la recharge de l'aquifère. Pour les épisodes étudiés il faut entre 3,6 et 6,5 mm de pluie pour faire remonter de 1 m le niveau d'eau dans le karst (Illustration 12). La moyenne calculée sur les 9 épisodes est ainsi égale à 5,3 mm de pluie pour une remontée de 1 m.

date	quantité de pluie engendrant 1 m de recharge
19/09/2000	4.7
14/07/2001	5.7
29/09/2001	5.0
24-26/08/2002	6.3
07/09/2003	6.1
11/09/2004	6.5
13-14/09/2004	4.8
13/09/2006	4.2
22/11/2007	3.6
Moyenne	5.3

Illustration 12. Impact des précipitations sur la remontée du niveau piézométrique.

Au vu des incertitudes, on prendra pour la suite de l'étude une valeur arrondie égale à 5 mm pour une remontée de 1 m, soit 50 mm de précipitation pour une remontée de 10 m du niveau piézométrique ou 100 mm de précipitation pour une remontée de 20 m.

Ainsi, lorsque le karst est à son niveau minimum (- 25 m sous le niveau de la vasque), il possède une capacité d'écrêtage correspondant à environ 125 mm de pluie.

3.3.2. Situation 2 : aquifère karstique rechargé, les pluies contribuent à la crue

Dans le tableau Illustration 13, sont présentés les épisodes caractérisés par un karst rechargé ou proche de sa saturation (niveaux piézométriques supérieurs à 60 m NGF). Les épisodes caractérisés par des cumuls de pluie journalière supérieure à 40 mm sont présentés. Les débits de pointe horaires sont fournis pour les différents épisodes.

Les épisodes surlignés en grisé dans le tableau ont été étudiés plus spécifiquement par Mathieu Coustau lors de sa thèse. La donnée horaire est ainsi disponible pour ces épisodes. Cette dernière a été calculée soit (i) par une pondération des pluies horaires sur 4 postes pluviométriques présents sur le bassin d'alimentation et en fonctionnement le jour de l'épisode, soit (ii) par des pluies calculées à partir de la donnée radar. La distinction entre données radar ou au sol sera précisée dans la légende des graphiques présentés (PSol pour la pondération des stations au sol et Pradar pour la donnée radar). Il faut noter que pour certains épisodes il existe une différence par rapport aux données journalières, ces dernières ayant été calculées sur le bassin d'alimentation de la source du Lez et non pas sur le bassin versant à la station de Lavalette. Ainsi, les données selon les sources peuvent être différentes. Nous avons toutefois vérifié qu'à l'exception de quelques cas présentés dans la suite

de l'étude les différences sont globalement faibles, de l'ordre de l'incertitude associée à ces données (10 à 20 %).

date	Pluie j (mm)	Q Lez (m^3/s)	Q Lavalette (m^3/s)	Q Garigliano (m^3/s)
24/12/2000	90	9	48	60
18/01/2001	80	14	93	115
28/01/2001	60	8	44	50
07/03/2001	70	7	38	51
06/10/2001	70	4	50	76
09/10/2001	100	24	238	314
18/10/2001	40	3	12	19
08/09/2002	115	8	107	130
09/10/2002	95	5	43	56
24/11/2002	65	7	43	52
10-11/12/2002	50	7	61	65
11-12/12/2002	185	16	376	433
14/12/2002	40	10	84	105
27/02/2003	50	4	11	19
27/09/2003	40	2	4	7
30/09/2003	40	2	23	30
19/10/2003	40	3	5	8
28/10/2003	60	6	49	60
16/11/2003	75	8	64	80
23/11/2003	70	10	68	82
01/12/2003	40	7	25	27
03/12/2003	140	28	424	539
18/12/2003	40	5	14	20
30/03/2004	45	5	23	28
29/04/2004	70	6	26	33
28/01/2006	90	lacune	53	70
25/09/2006	70	lacune	23	30
30/12/2008	90	lacune	pb mesure	100
02/02/2009	110	lacune	79	150
11/04/2009	70	lacune	18	60

Illustration 13. Episodes de crue en condition de karst rechargé.

Le débit de pointe horaire à Lavalette en fonction du cumul journalier des précipitations est exprimé dans le graphique ci-dessous (Illustration 14).

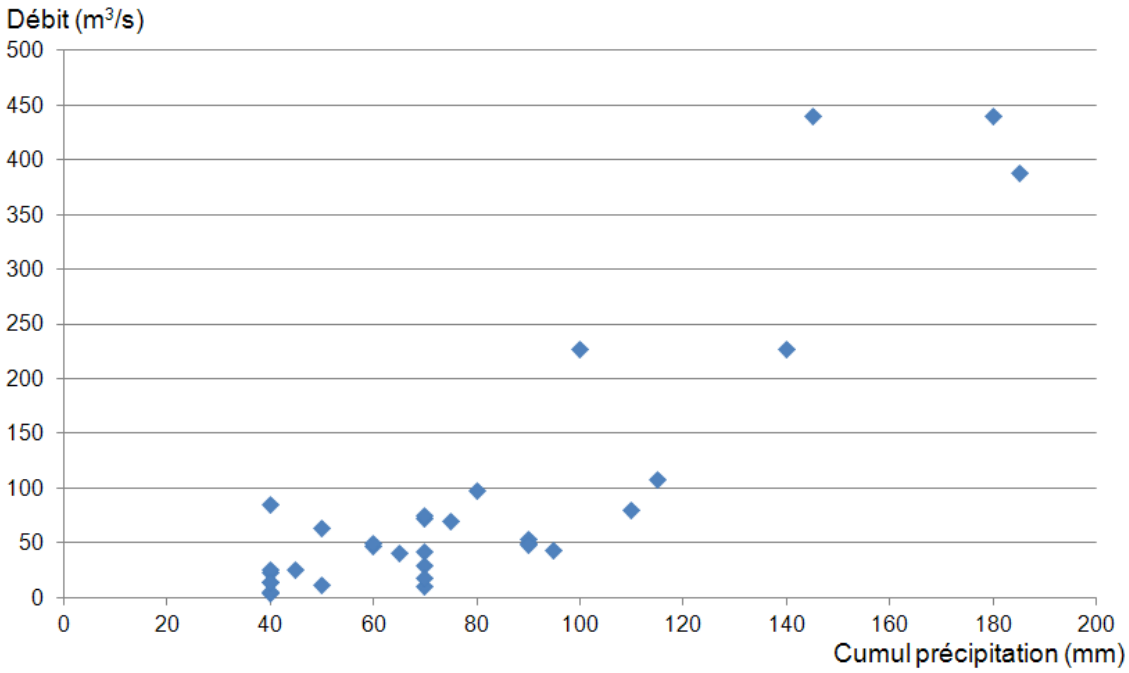


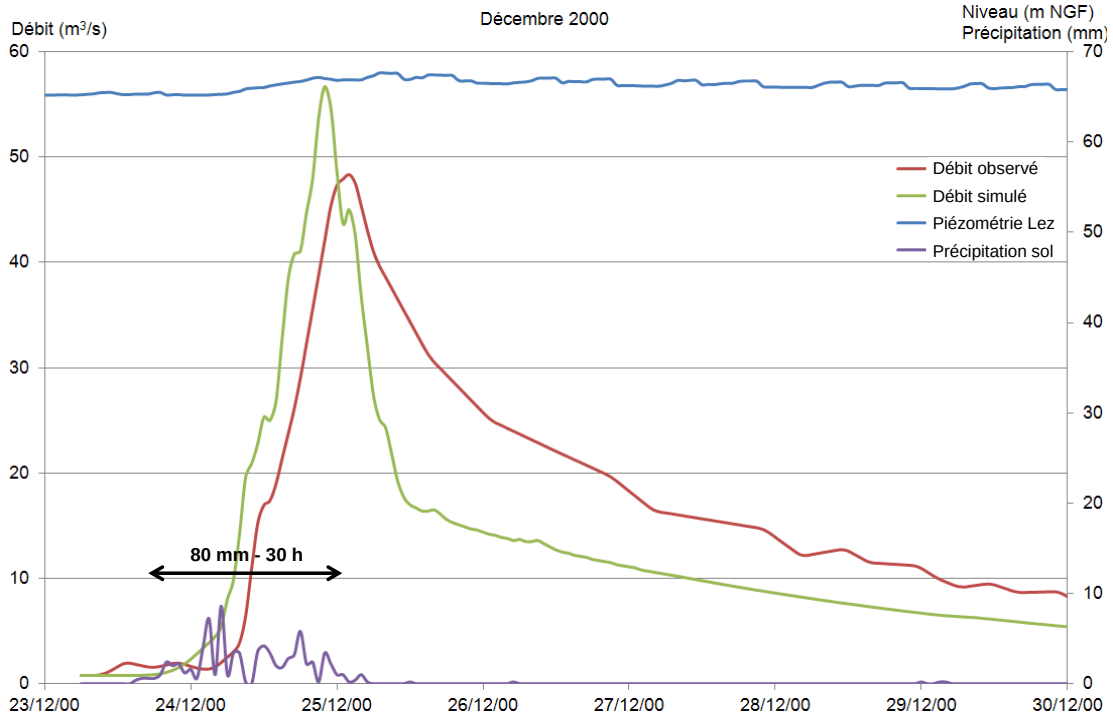
Illustration 14. Débit à Lavalette en fonction des cumuls de précipitation journalière en condition de karst rechargé.

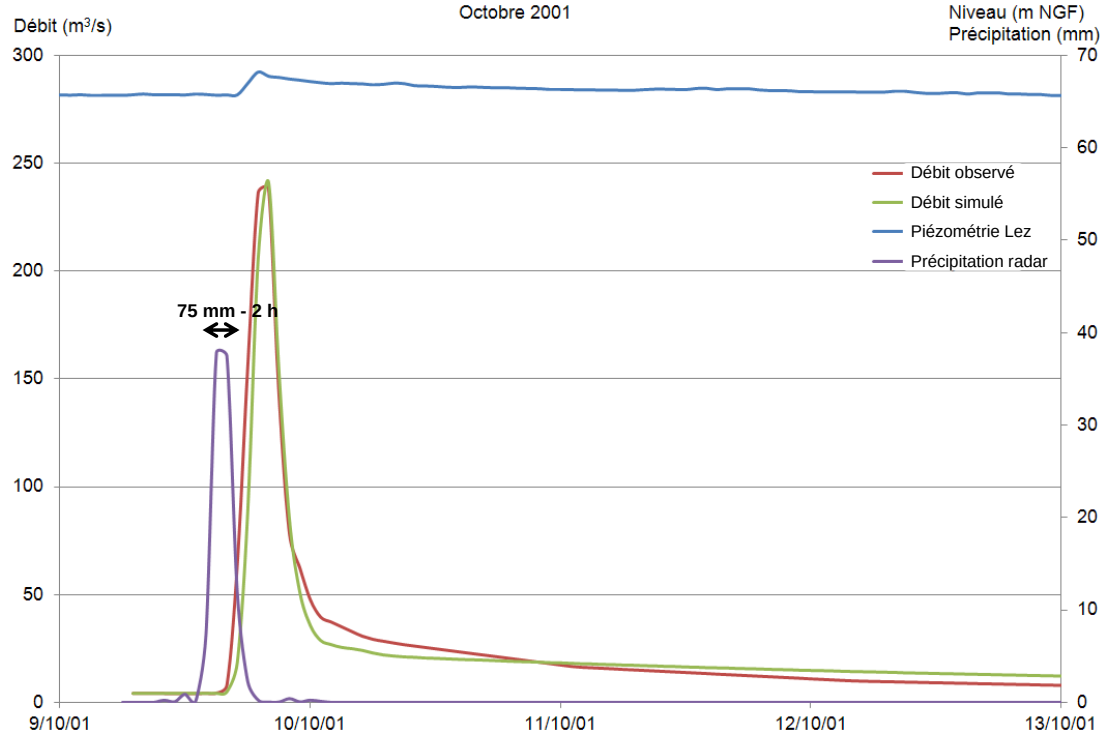
Ce graphique montre que pour des cumuls journaliers comparables, la réponse en termes de débit varie grandement. Par exemple, pour un cumul journalier compris entre 90 et 100 mm le pic de crue varie entre 43 et 238 m^3/s.

Les 4 épisodes associés à ces précipitations ont ainsi été étudiés plus spécifiquement à partir des données horaires. Ils sont datés du 24/12/00, 09/10/01, 09/10/02 et 28/01/06. Pour ces épisodes, la pluie horaire, les cumuls et la durée des pluies sont présentés (Illustration 13). Les épisodes de décembre 2000 et janvier 2006 sont assez proches : ils sont tous deux caractérisés par des cumuls de l'ordre de 70 à 80 mm sur une durée de 24 h avec une intensité moyenne faible, proche de 3 mm/h et un maximum d'intensité inférieur à 9 mm/h. Ces épisodes caractérisés par une pluie de faible intensité, mais de cumul significatif du fait de leur durée, produisent des crues dont le débit est d'environ 50 m^3/s à la station de Lavalette.

L'épisode de précipitation d'octobre 2002 ressemble aux deux épisodes précédents, il existe toutefois une interruption des précipitations pendant 5 heures ; cette dernière a entrainé une phase de tarissement. Finalement pour un cumul de près de 90 mm sur 21 h le débit est légèrement inférieur à celui des deux autres épisodes.

Enfin, l'épisode du 9 octobre 2001 est caractérisé par une pluie courte et intense avec 76 mm de précipitation en seulement 2 h, soit une intensité horaire égale à 38 mm. Cette pluie a engendré un pic de crue proche de 240 m^3/s.


Décembre 2000
Débit (m³/s)
Niveau (m NGF)
Précipitation (mm)
Débit observé
Débit simulé
Piézométrie Lez
Précipitation sol
80 mm - 30 h
23/12/00
24/12/00
25/12/00
26/12/00
27/12/00
28/12/00
29/12/00
30/12/00


Octobre 2001
Débit (m³/s)
Niveau (m NGF)
Précipitation (mm)
Débit observé
Débit simulé
Piézométrie Lez
Précipitation radar
75 mm - 2 h
9/10/01
10/10/01
11/10/01
12/10/01
13/10/01

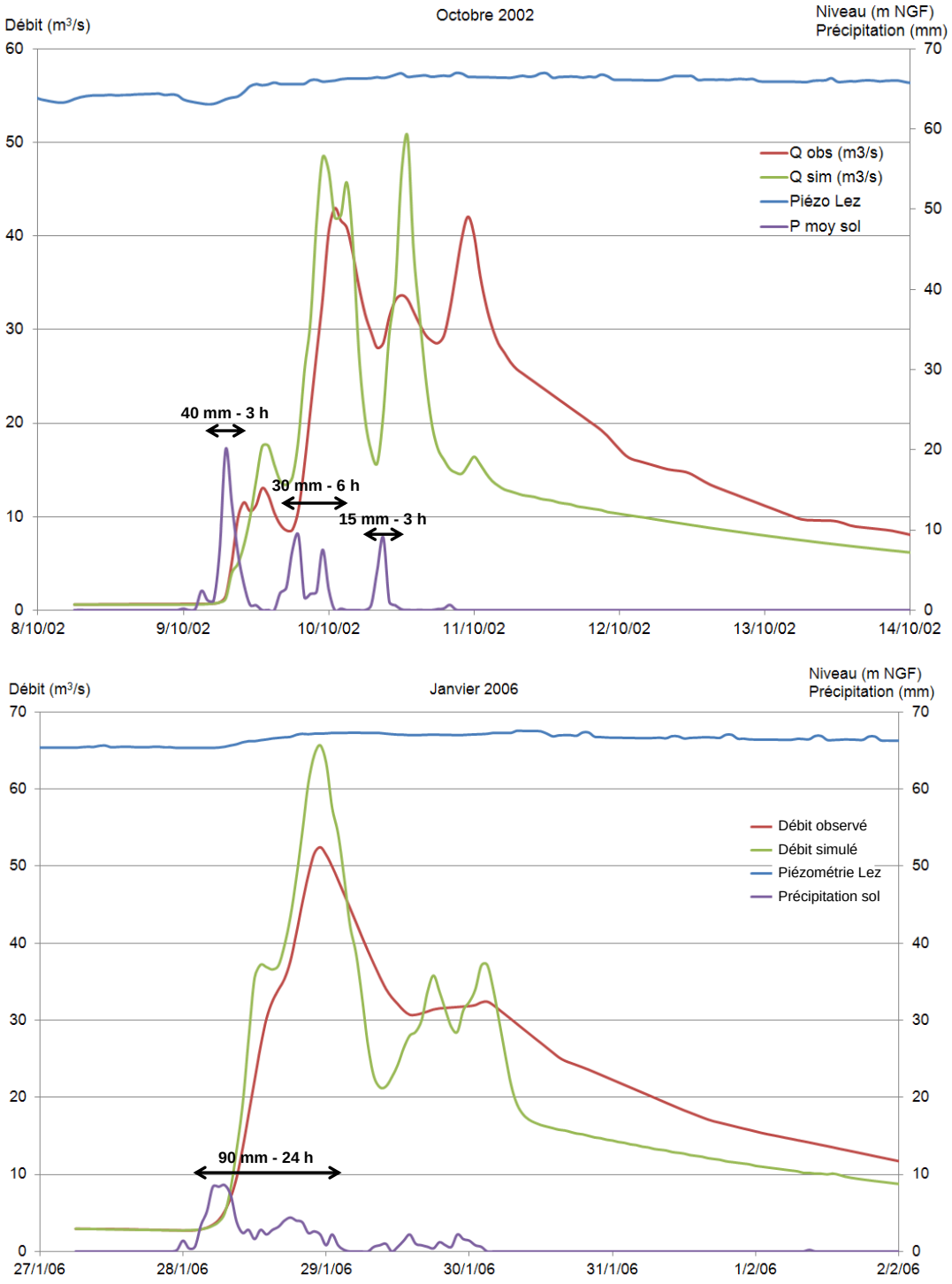


Illustration 15. Débits à Lavalette associés à des précipitations journalières comprises entre 70 et 90 mm.

A l'issue de l'analyse de ces épisodes, il apparait que pour caractériser les débits il est nécessaire de prendre en considération la structure de la pluie (cumul, durée, intensité, interruption …). L'étude va ainsi se poursuivre à partir de l'analyse des épisodes présentant de la donnée de pluie horaire (épisodes grisés dans l'Illustration 13)).

La caractérisation des épisodes en contexte d'aquifère rechargé et la réponse en termes de débit est fourni dans l'Illustration 16. Pour les deux épisodes présentés en bleu, la donnée horaire pondérée présentait une aberration par rapport aux chroniques mesurées ; la donnée est alors corrigée. Pour le 08/09/2002, la précipitation journalière à Prades est égale à 116 mm, ce qui correspond à la valeur fournie dans le tableau ci-dessous. Or, les stations de Saint Martin et Montpellier - Ensam ont reçu lors de cette journée des hauteurs d'eau de 42 et 51 mm. C'est pourquoi une valeur corrective d'environ 70 mm est proposée. Concernant l'épisode du 11/12/2002, selon les postes utilisés, l'épisode de pluie présente un cumul comparable, mais sur une durée beaucoup plus courte, de l'ordre de 3 h.

Episode	Cumul précipitation (mm)	Durée (h)	Intensité moyenne (mm/h)	Débit initial (m^3/s)	Débit pic de crue (m^3/s)	Débit pic de crue corrigé (m^3/s)
24/12/2000	80	30	2.7		48	
18/01/2001	75	16	4.7		93	
09/10/2001	75	2	37.5		238	
08/09/2002	110	6	18.3		103	
08/09/2002	70	6	11.7		103	
09/10/2002 - 1	40	3	13		13	
09/10/2002 - 2	30	6	5		42	
11/12/2002 - 1	45	13	3.5		60	
11/12/2002 - 2	55	7	7.9	40	307	267
11/12/2002 - 2	50	3	16.7	40	307	267
12/12/2002	90	8	11.3	125	376	250
15/12/2002	25	3	8.3	35	77	42
16/11/2003	35	4	8.8		64	
17/11/2003	20	5	4	38	57	19
02/12/2003	65	46	1.4		37	
03/12/2003	100	7	14.3		423	
28/01/2006	90	24	3.8		52	
22/10/2008	45	2	22.5		98	

Illustration 16. Caractéristiques des épisodes de crue en contexte de karst rechargé.(débit à Lavalette)

Le pic de crue est également corrigé pour les épisodes multiples, afin de prendre en compte uniquement les variations de débit engendrées par l'épisode de pluie. C'est pourquoi pour les épisodes multiples, le débit initial est déduit (voir colonne « débit pic de crue corrigé » (Illustration 16), on considère alors la variation de débit engendrée.

A partir de cette analyse, les épisodes sont replacés dans un graphique « cumul des précipitations – Pic de crue » (Illustration 17). Deux grandes tendances sont définies à ce stade de façon encore approximative, elles permettent d'approcher les réponses du système aux épisodes de fortes et faibles intensités lorsque le karst est rechargé.

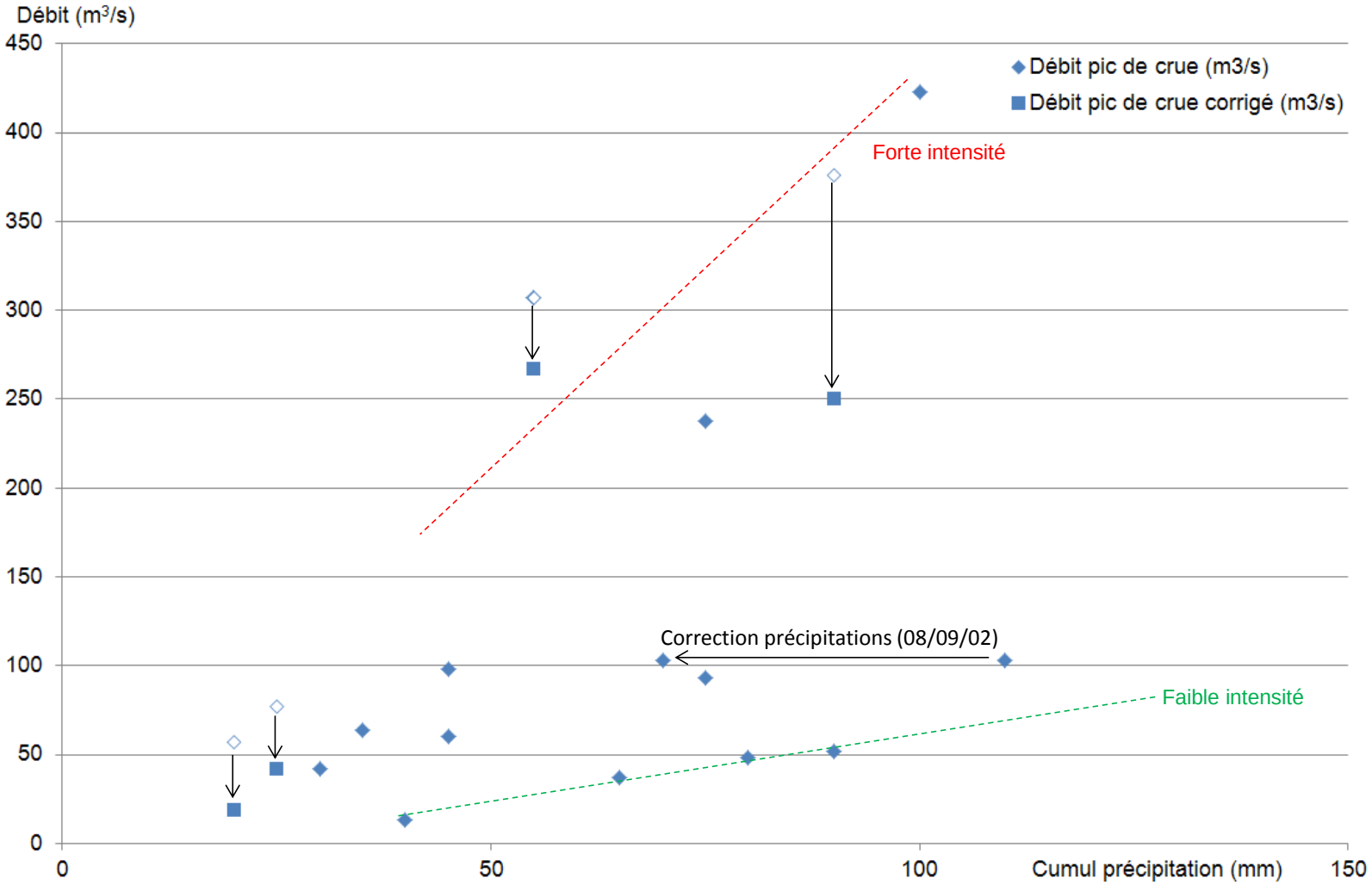


Illustration 17. Débit au pic de crue en fonction du cumul de précipitation pour les épisodes en condition de karst rechargé

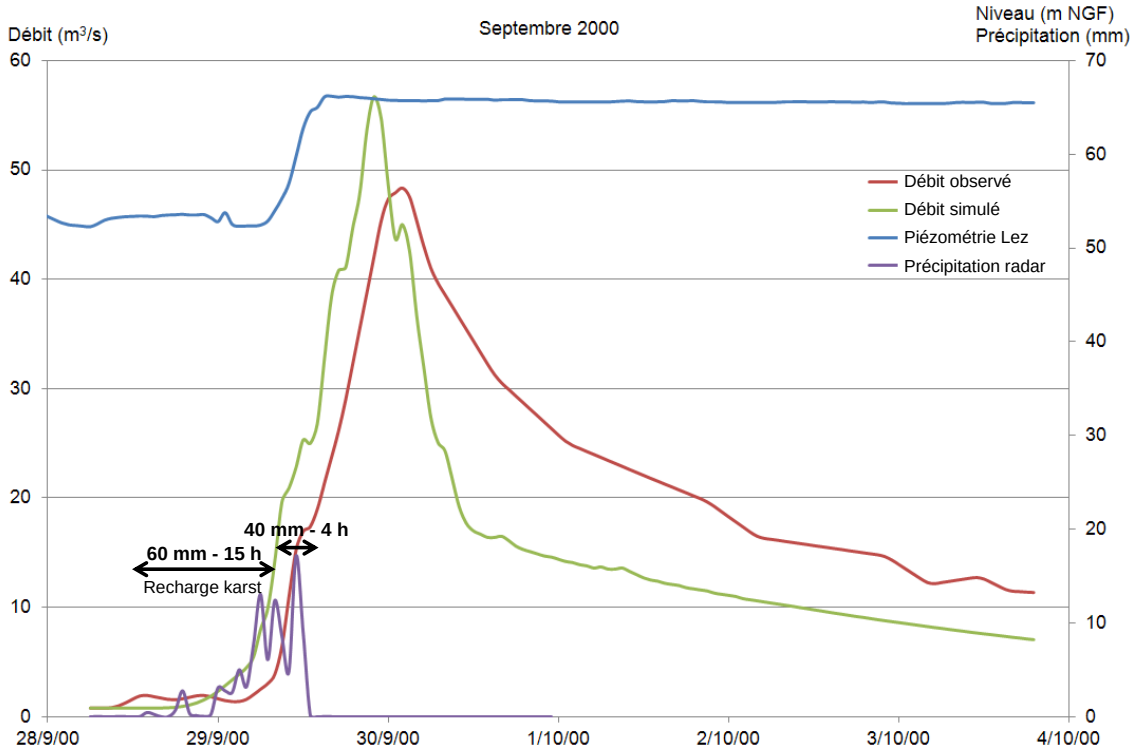
3.3.3. Situation 3 : recharge de l'aquifère karstique puis genèse de la crue

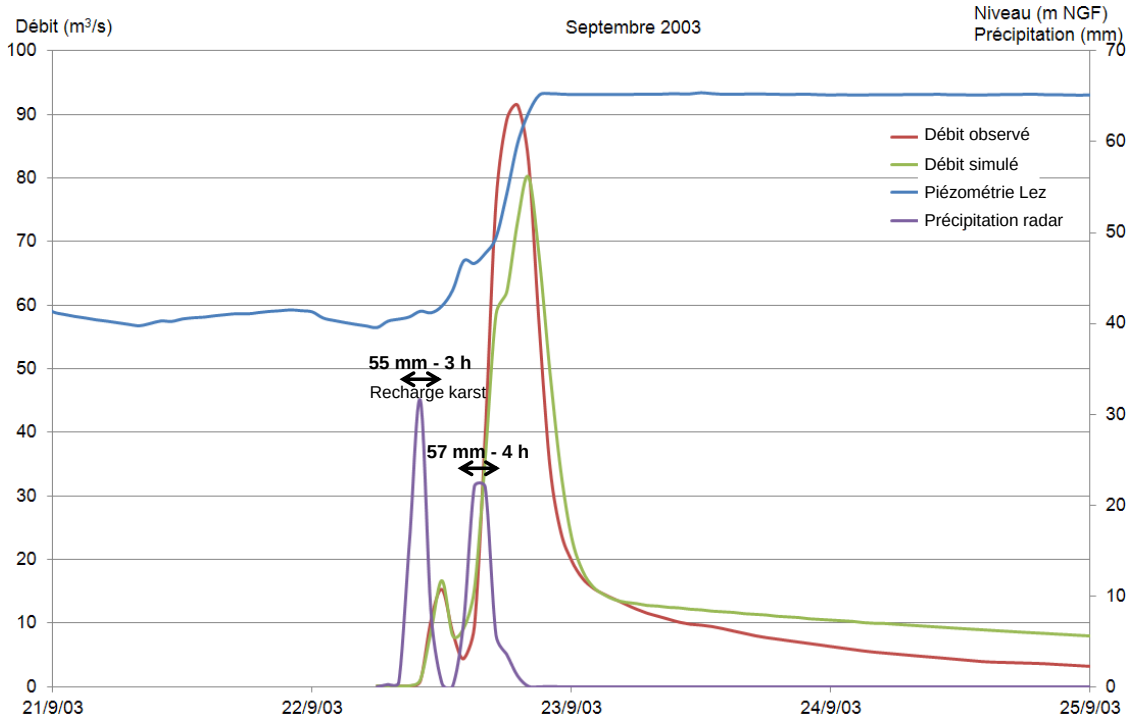
Quatre épisodes associés à des précipitations significatives (supérieures à 50 mm), sont concernés sur la période étudiée. Les caractéristiques de ces épisodes sont présentées (Illustration 18 et Illustration 19). A partir du calcul de l'impact des précipitations sur la remontée de la piézométrie, à savoir 5 mm pour + 1 m NGF jusqu'à 65 m (voir partie 3.3.1) la quantité de pluie rechargeant le karst est approchée. Par soustraction on en déduit la quantité de pluie participant à la crue.

Episode	Piézométrie initiale (m NGF)	Piézométrie finale (m NGF)	Pluie recharge karst calculée (mm)	Pluie totale (mm)	Pluie participation crue (mm)	Durée (h)	Intensité moyenne (mm/h)	Débit pic de crue (m^3/s)
29/09/2000	52	66	65	100	35	3	11.7	48
22/09/2003	40	65	125	120	40	3	13.3	91
06/09/2005	46	67	95	205	110	3	36.7	467
20/10/2008	47	65	90	135	45	3	15	109

Illustration 18. Réponse aux pluies significatives en contexte de karst saturé en cours de recharge.

Soulignons le cas particulier de septembre 2003 caractérisé par de très fortes précipitations localisées essentiellement au Sud du bassin versant. La contribution de la pluie à la crue de surface a ainsi été nettement supérieure que ce qu'elle aurait dû être. En effet, d'après le modèle conceptuel, la pluie aurait normalement dû servir uniquement à recharger le karst. La part des précipitations contribuant à la crue a été évaluée à 40 mm.


Débit (m³/s)
Septembre 2000
Niveau (m NGF)
Précipitation (mm)
Débit observé
Débit simulé
Piézométrie Lez
Précipitation radar
40 mm - 4 h
60 mm - 15 h
Recharge karst
28/9/00
29/9/00
30/9/00
1/10/00
2/10/00
3/10/00
4/10/00


Débit (m³/s)
Septembre 2003
Niveau (m NGF)
Précipitation (mm)
Débit observé
Débit simulé
Piézométrie Lez
Précipitation radar
55 mm - 3 h
Recharge karst
57 mm - 4 h
21/9/03
22/9/03
23/9/03
24/9/03
25/9/03

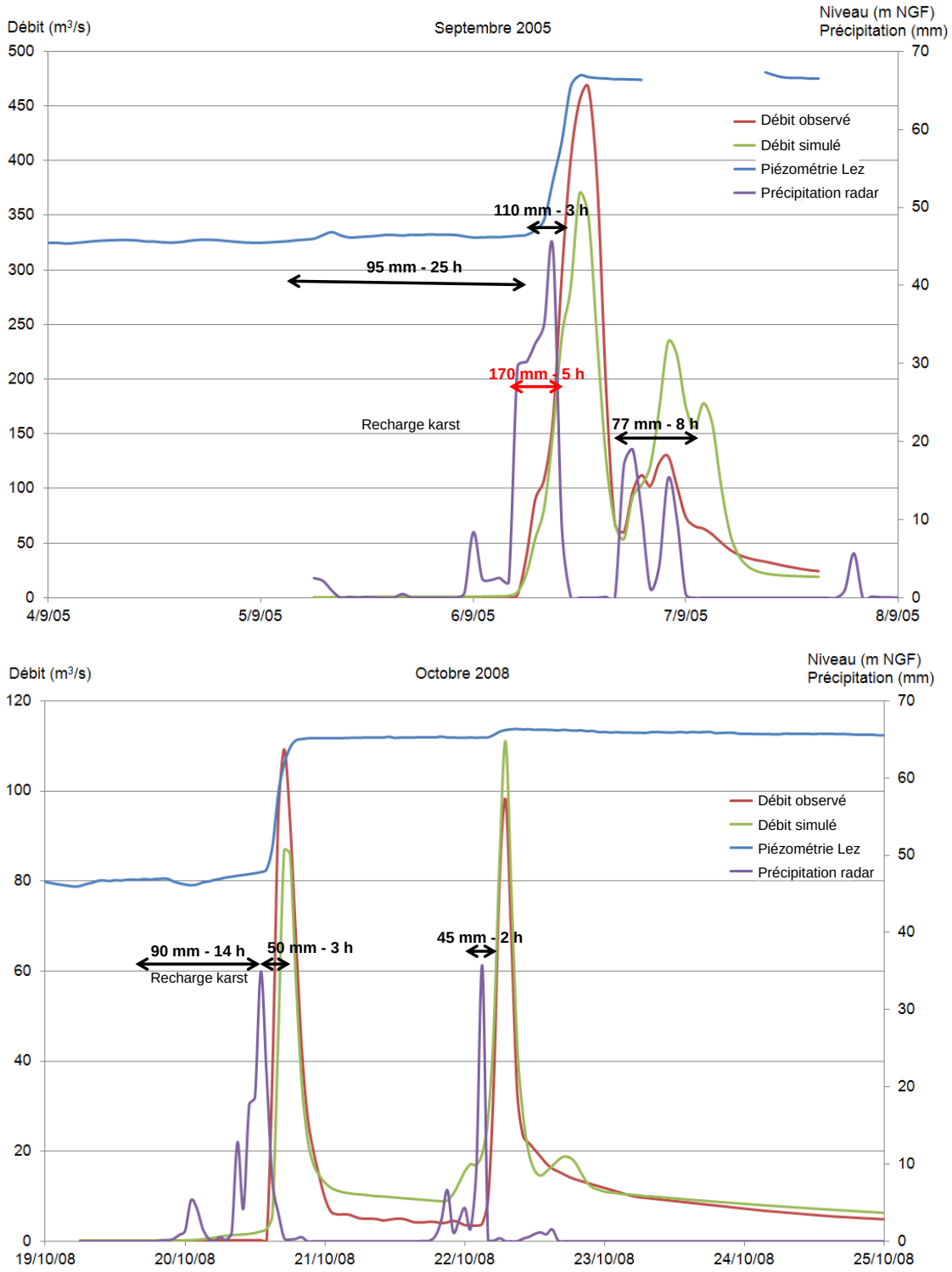


Illustration 19. Episodes avec recharge du karst puis crue.

Pour ces quatre épisodes, le débit associé aux précipitations ayant contribué à la crue sont présentés Illustration 20. Ces épisodes sont caractérisés par des intensités relativement fortes, comprises entre 11 et 37 mm/h.

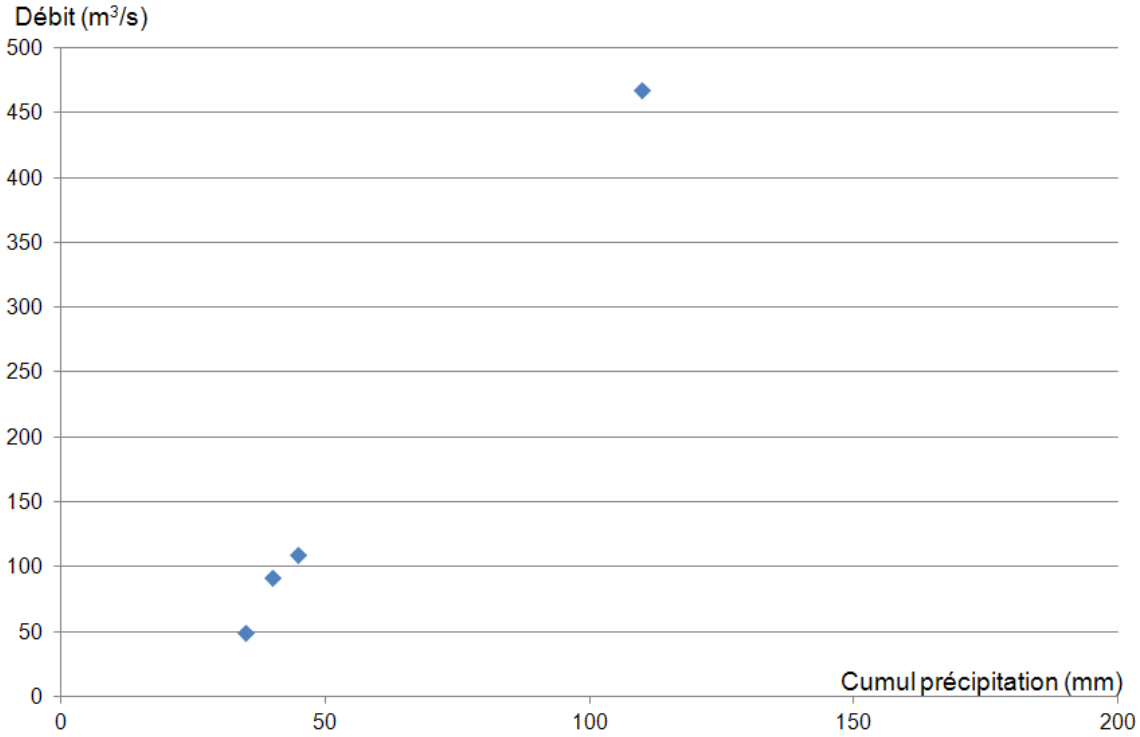


Illustration 20. Débits en fonction des précipitations participants aux crues après la recharge du karst

L'épisode du 6 septembre 2005 caractérisé par une crue importante (débit de pointe supérieur à 450 m^3/s à Lavalette) a eu une partie des précipitations écrêtées, le karst étant initialement sous saturé. On évalue la contribution de la pluie à la crue (après recharge du karst) à 110 mm pendant 3 h. Aussi, si le karst avait été rempli la contribution à la crue aurait alors approché 170 mm en 5 h (intensité de 30 à 45 mm/h pendant 5 h). Des débits bien supérieurs auraient pu se propager. Une estimation de ce débit sera effectuée ultérieurement.

3.3.4. Conclusion sur les relations pluie – débit

Sur un même graphique (Illustration 21) sont présentés les cumuls de précipitations participants à la crue, à la fois pour les épisodes en condition de karst rechargé et les épisodes où le karst est initialement sous-saturé. Dans le cas d'épisodes multiples, le débit de pointe fourni correspond en fait à la variation de débit associée à l'épisode (le débit initial avant le second épisode est retranché). Sur ce graphique sont également approchées qualitativement les différentes intensités des précipitations.

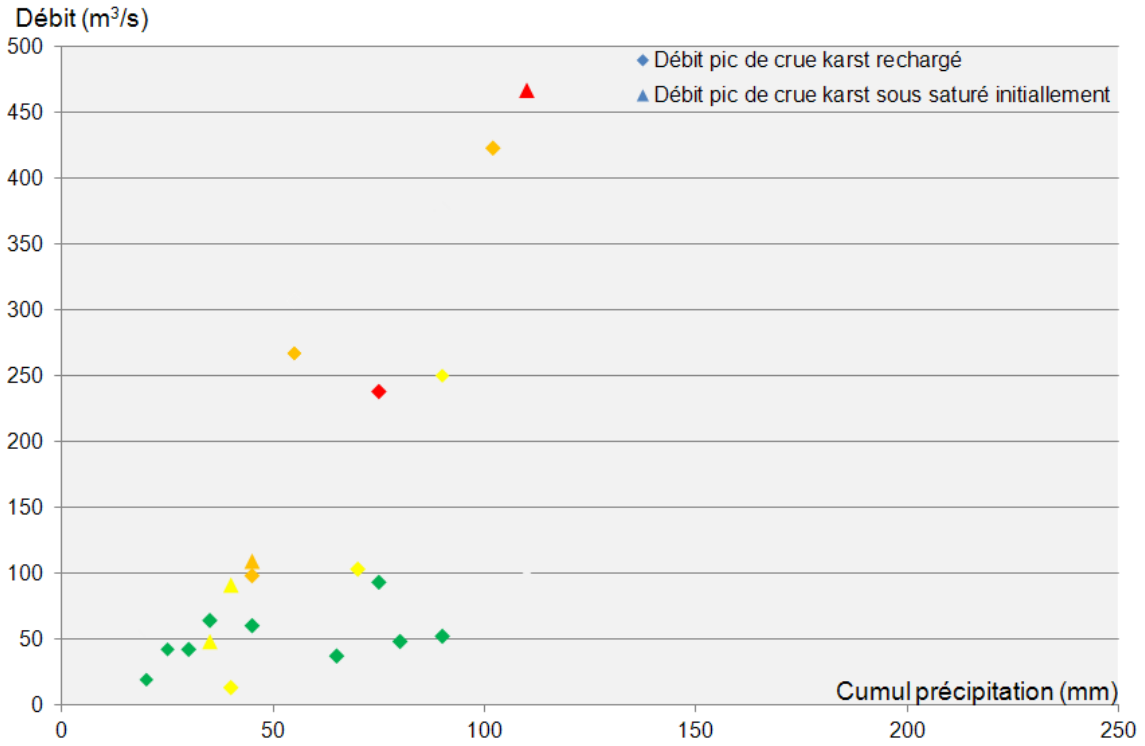


Illustration 21. Débit du pic de crue en fonction des précipitations et intensité en mm/h (rouge : I > 30, orange 15 < I < 30, jaune : 10 < I < 15 et vert < 10).

Ce graphique met en évidence le fait que, plus les intensités sont fortes, plus le pic de crue est important.

3.4. DEFINITION D'UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION POUR LES PREVISIONNISTES

Cet outil d'aide à la décision sera constitué de deux abaques, qui s'utilisent conjointement. Le premier permettra d'appréhender en fonction du niveau dans le karst la part des précipitations écrêtées. Le second utilisé une fois le karst rempli permettra d'évaluer le débit du Lez à Lavalette en fonction de la lame d'eau précipitée après saturation du karst.

3.4.1. Contribution à la recharge du karst

Le paragraphe 3.3.1 a permis de quantifier la recharge du karst par les précipitations. La relation suivante a ainsi été définie :

5 mm de pluie → remontée de 1 m NGF

Un premier abaque est ainsi défini à partir de cette loi (Illustration 22). Il permet ainsi d'approcher en fonction du niveau initial et du cumul de pluie le niveau final de remplissage du karst.

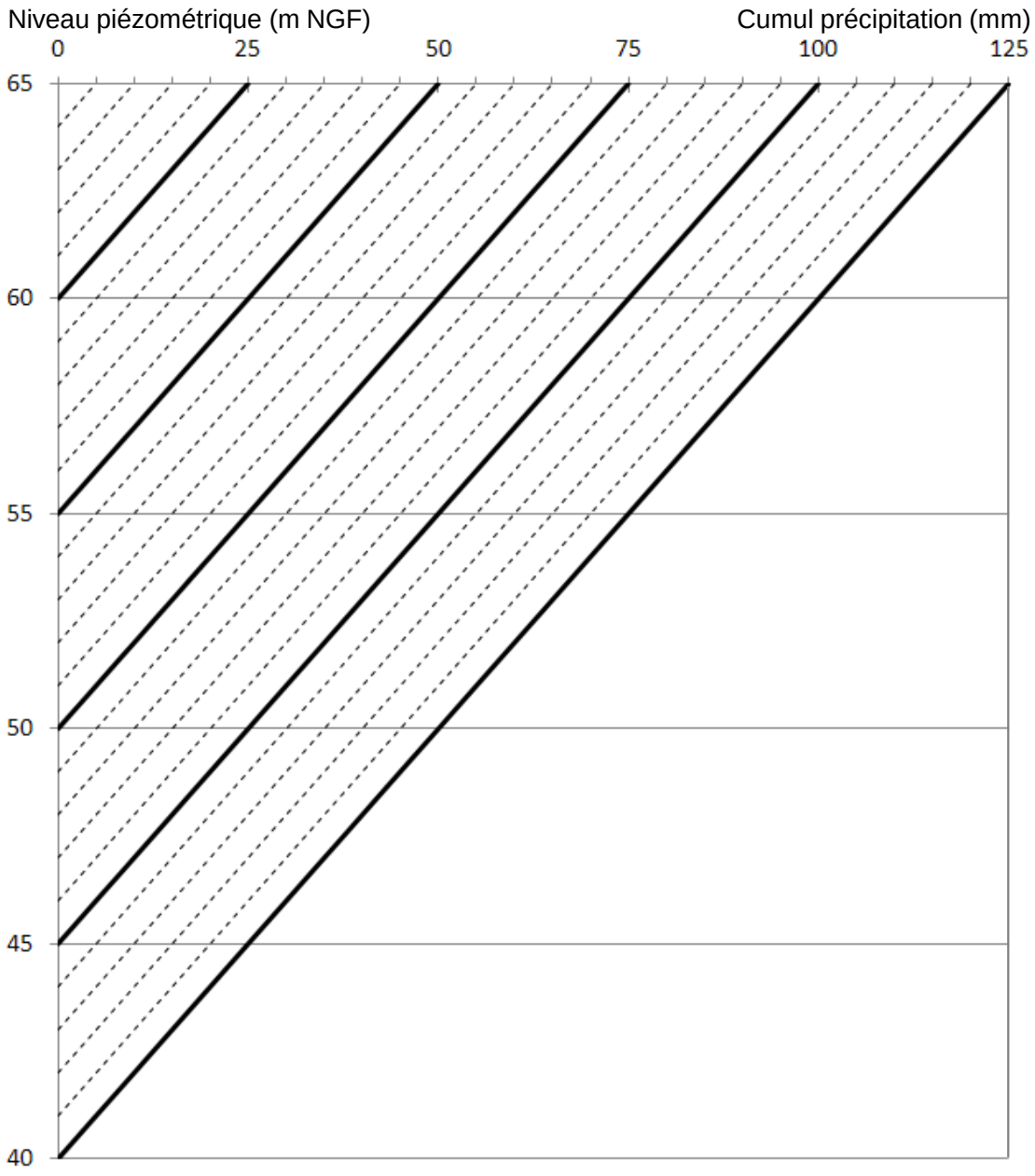


Illustration 22. Abaque n° 1 : « Pluie - niveau du karst ».

Deux exemples d'utilisation pour un niveau initial du karst à 40 m NGF sont fournis (Illustration 23) :

Précipitation 1 = 50 mm, alors niveau karst final = 50 m ;

Précipitation 2 = 125 mm, alors niveau karst final = 65 m.

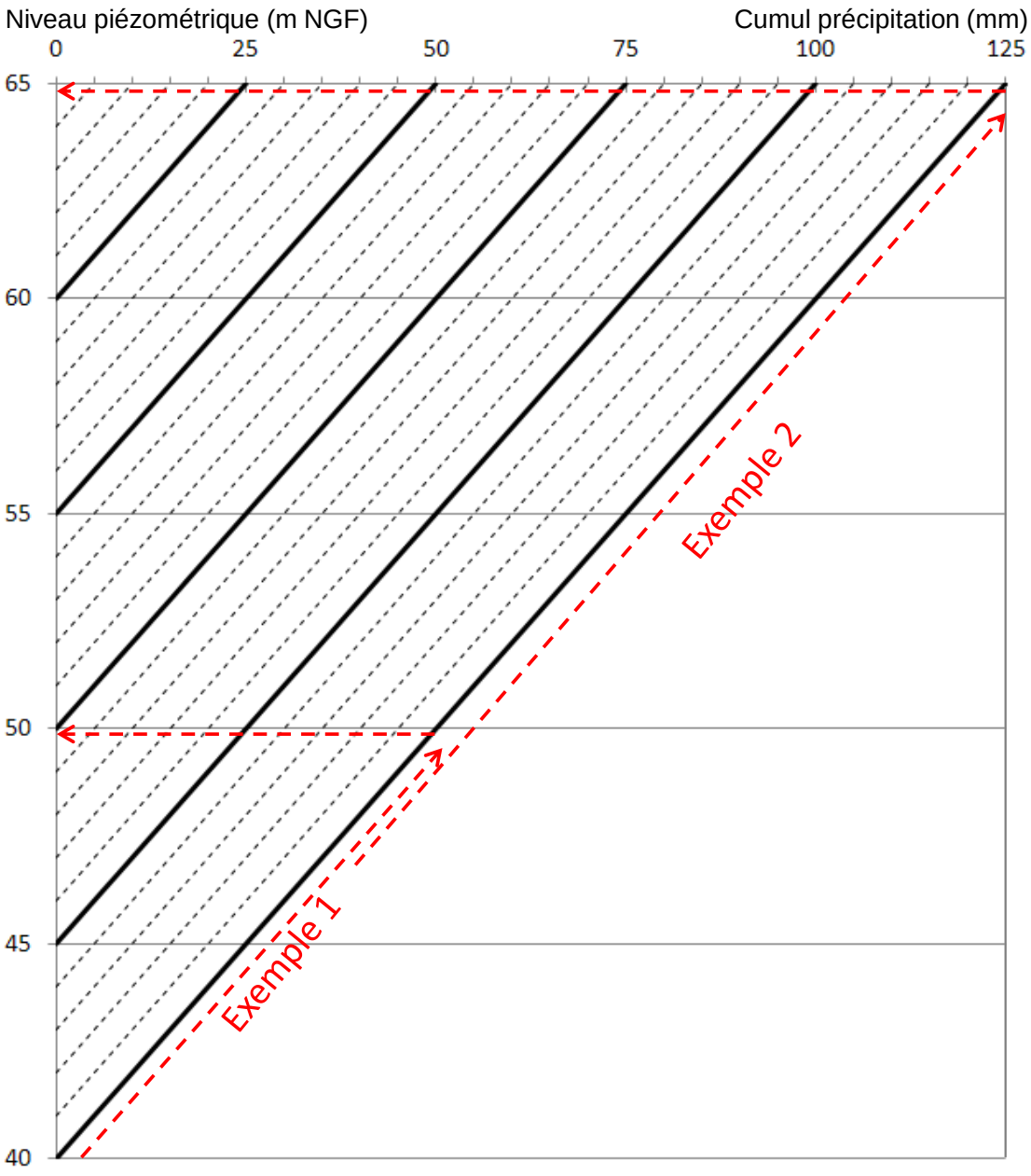


Illustration 23. Exemple d'utilisation de l'abaque « Pluie – niveau du karst ».

L'étude réalisée permet désormais de prendre en compte l'influence du karst. Il est désormais nécessaire de s'intéresser aux contributions des pluies au débit du fleuve une fois le karst rechargé.

3.4.2. Contribution des pluies au débit

Le modèle développé (Mathieu Coustau, 2011) fournit globalement des résultats satisfaisants : les pics de crue sont relativement bien reproduits. L'erreur moyenne sur le débit maximum est inférieure à 20 %, ce qui est un résultat acceptable au vu de l'incertitude sur les données de précipitations. On note cependant que le modèle présente une tendance générale à la surestimation des pics de crue. En effet, moins d'un tiers des épisodes sont sous-estimés, les deux tiers restants surestiment ou représentent convenablement le pic de crue. Du fait de la tendance à la surestimation ce modèle est jugé pessimiste, il est ainsi plus « sécuritaire » par rapport à la gestion de l'alerte.

Ce modèle va ainsi être utilisé en mode prévisionnel, afin d'évaluer une fois le karst plein, l'impact des pluies selon différents scénarios, sur les débits une fois le karst plein. Dans ces conditions S est égal à 0.

Dans un but de gestion de l'alerte, il est nécessaire de s'intéresser aux épisodes « extrêmes ». Sur la chronique étudiée l'épisode de pluie le plus « critique » a été obtenu le 06/09/2005 avec plus de 170 mm en 5 h, soit une intensité moyenne égale à 35 mm/h, un pic à 45 mm/h et une intensité minimale à 30 mm/h.

Par ailleurs le système karstique nîmois a également été étudié pour ce même épisode de septembre 2005 (Fleury et al, 2010) ; les pluies sur le bassin d'alimentation ont atteint 200 mm en seulement 4 h. Aussi, l'analyse des précipitations par la méthode SHYREG (Royet et al., 2005, rapport Cémagref) a révélé que ces précipitations correspondaient à une pluie de période de retour 500 ans.

Au vu des précipitations observées le 6 septembre 2005 à Nîmes mais aussi dans la région montpelliéraine, il a été décidé d'élaborer un outil de vigilance allant jusqu'à des intensités de 50 mm/h pendant au maximum 6 heures.

Ainsi, les intensités de 5 à 50 mm/h par pas de 5 mm/h vont être testées, sur des durées allant de 1 à 6 heures par pas de 1 h puis de 12, 18 et 24 h. Les résultats sont fournis Illustration 24.

Ainsi, pour des cumuls faibles inférieurs à 70 mm, et une intensité forte comprise entre 15 et 50 mm/h, le pic de crue est compris entre 200 et 250 m^3/s. Par contre les débits sont significativement plus faibles pour les intensités inférieures ou égales à 10mm/h, ils ne dépassent pas 100 m^3/h.

Pour des cumuls forts et des intensités supérieures à 15 mm/h, les débits sont importants. Par contre pour des intensités inférieures ou égales à 10 mm/h le débit reste limité. Il est par exemple inférieur à 250 m^3/h pour un cumul de 230 mm. Il apparaît ainsi que l'intensité 15 mm/h représente une transition entre un impact fort et un impact faible. Cette valeur « charnière » d'intensité sera conservée par la suite.

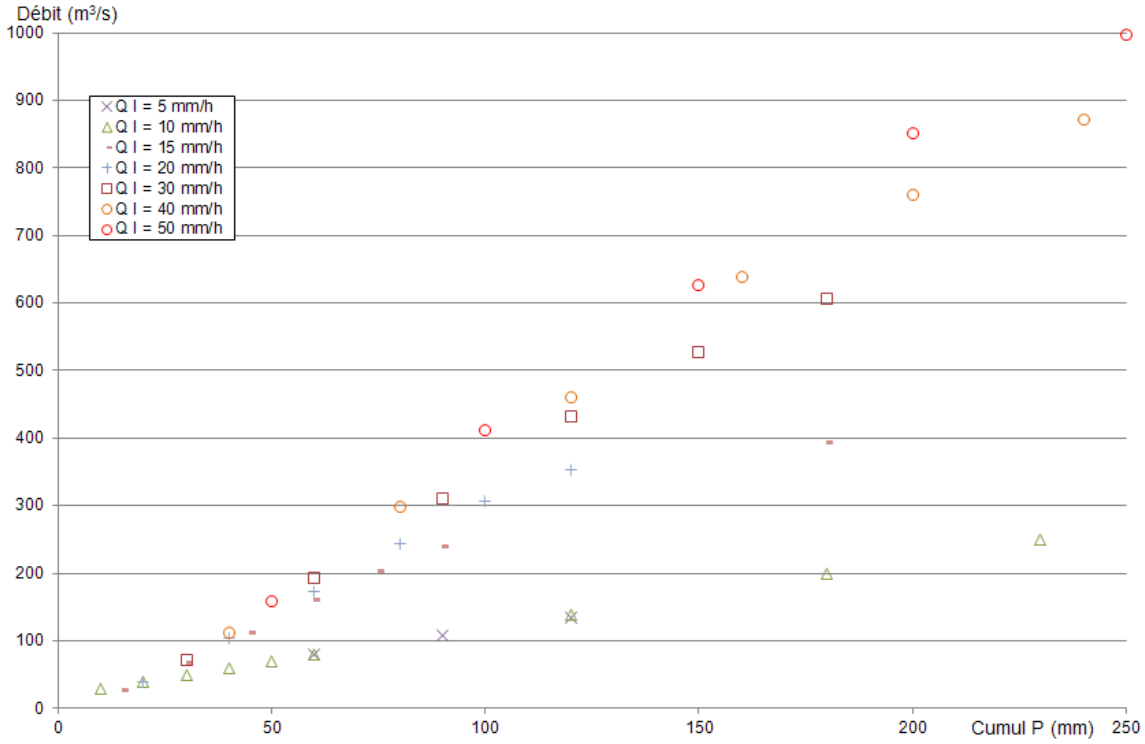


Illustration 24. Débit du pic de crue horaire en fonction du cumul de précipitation pour différentes intensités.

Le Lez fait partie des 14 tronçons surveillés par le Service de Prévision des Crues Méditerranée Ouest (SPCMO). Le tronçon surveillé du Lez débute à la station de Garigliano et va jusqu'à la mer. Les missions du SPCMO sur ce tronçon sont l'élaboration d'une vigilance à 24h et la diffusion de prévisions en période de crue. Nous aborderons seulement la partie vigilance à 24h dont l'élaboration est mise à disposition du public via le site internet : http://www.vigicrues.gouv.fr/ 2 fois par jour.

Les prévisionnistes du SPCMO utilisent pour élaborer leur vigilance à 24h une grille qui prend en compte les données de la station de Garigliano et les cumuls de pluie annoncés par Météo France. Cette grille de vigilance n'est pas adaptée car elle ne prend pas en compte l'état du karst, ni les variations d'intensité des pluies d'où de nombreuses fausses alertes.

Nous proposons ainsi, d'adapter les résultats du modèle à cette grille. Il nous faut dans un premier temps transformer les niveaux définis à Garigliano au site de Lavalette. En effet, le modèle complexe (Coustau, 2011) a été développé à partir des données de Lavalette, l'outil développé sera donc basé sur les travaux réalisés à Lavalette. Ces niveaux convertis en débits sont :

- Vigilance jaune : $H_{Garigliano}$ = 1,75 m ; $Q_{Garigliano}$ ≈ 75 m^3/s ; $Q_{Lavalette}$ ≈ 70 m^3/s.
- Vigilance orange : $H_{Garigliano}$ = 3,25 m ; $Q_{Garigliano}$ ≈ 400 m^3/s ; $Q_{Lavalette}$ ≈ 350 m^3/s.

- Vigilance rouge : $H_{Garigliano}$ = 4,25 m ; $Q_{Garigliano}$ ≈ 600 m^3/s ; $Q_{Lavalette}$ ≈ 500 m^3/s.

Ces trois niveaux, vigilance jaune, orange, rouge, seront indiqués dans l'outil qui sera utilisé pour la vigilance du tronçon. Ils correspondent à la symbologie utilisée par le SCHAPI pour ses cartes de vigilance « crue ».

Ensuite, trois courbes, « débit en fonction des précipitations » selon différentes intensités, sont ajoutées à partir des résultats de l'analyse sur le rôle de l'intensité des précipitations présentés précédemment. La courbe d'intensité 10 mm/h (courbe en vert pointillé) fournira la limite avec les épisodes de faible intensité. La courbe d'intensité 15 mm/h (en pointillés orange) permettra d'approcher les épisodes d'intensité significative mais non extrême. Enfin la courbe d'intensité égale à 50 mm/h (pointillés rouges), permettra d'approcher les épisodes extrêmes. Les épisodes étudiés (voir Illustration 21) sont replacés dans l'abaque (Illustration 25).

On vérifie que les épisodes en rouge et orange sont au-dessus de la courbe pointillée orange, proche de la courbe rouge. De la même façon, les épisodes de faible intensité en vert sont en dessous de la courbe de faible intensité. Les épisodes intermédiaires en jaune évoluent entre les courbes verte et orange. Globalement les limites proposées sont cohérentes avec les épisodes observés, validant ainsi ces dernières.

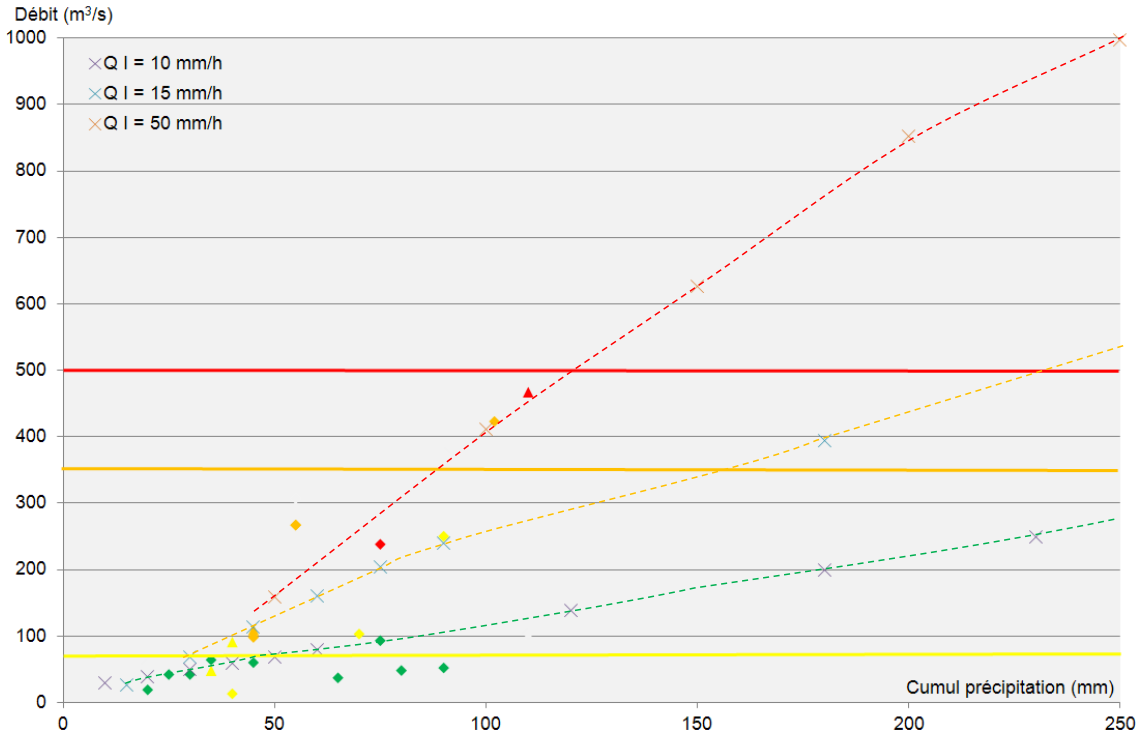


Illustration 25. Abaque « Débit en fonction du cumul des précipitations efficaces » et épisodes mesurés.

La version finale de l'abaque est représentée sur l'Illustration 26.

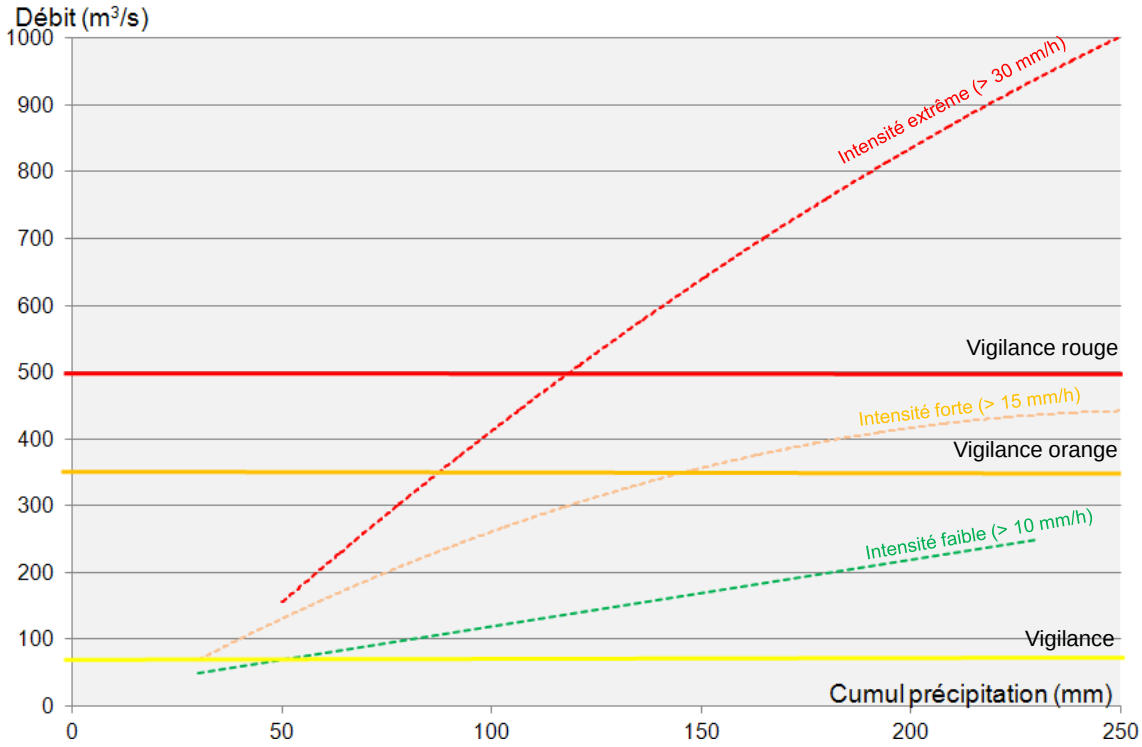


Illustration 26. Abaque « Débit en fonction du cumul des précipitations efficaces ».

3.4.3. Utilisations des abaques

Les deux abaques doivent s'utiliser conjointement et ne former qu'un. Nous proposons ainsi d'utiliser en partie inférieure celui correspondant au karst et dans la partie supérieure celui affecté au ruissellement (Illustration 27). L'abaque fourni en pièce jointe à ce rapport est constitué des deux parties pouvant coulisser l'une par rapport à l'autre (représenté par la flèche Illustration 27) afin de pouvoir être utilisé pour l'ensemble des états de saturation du karst.

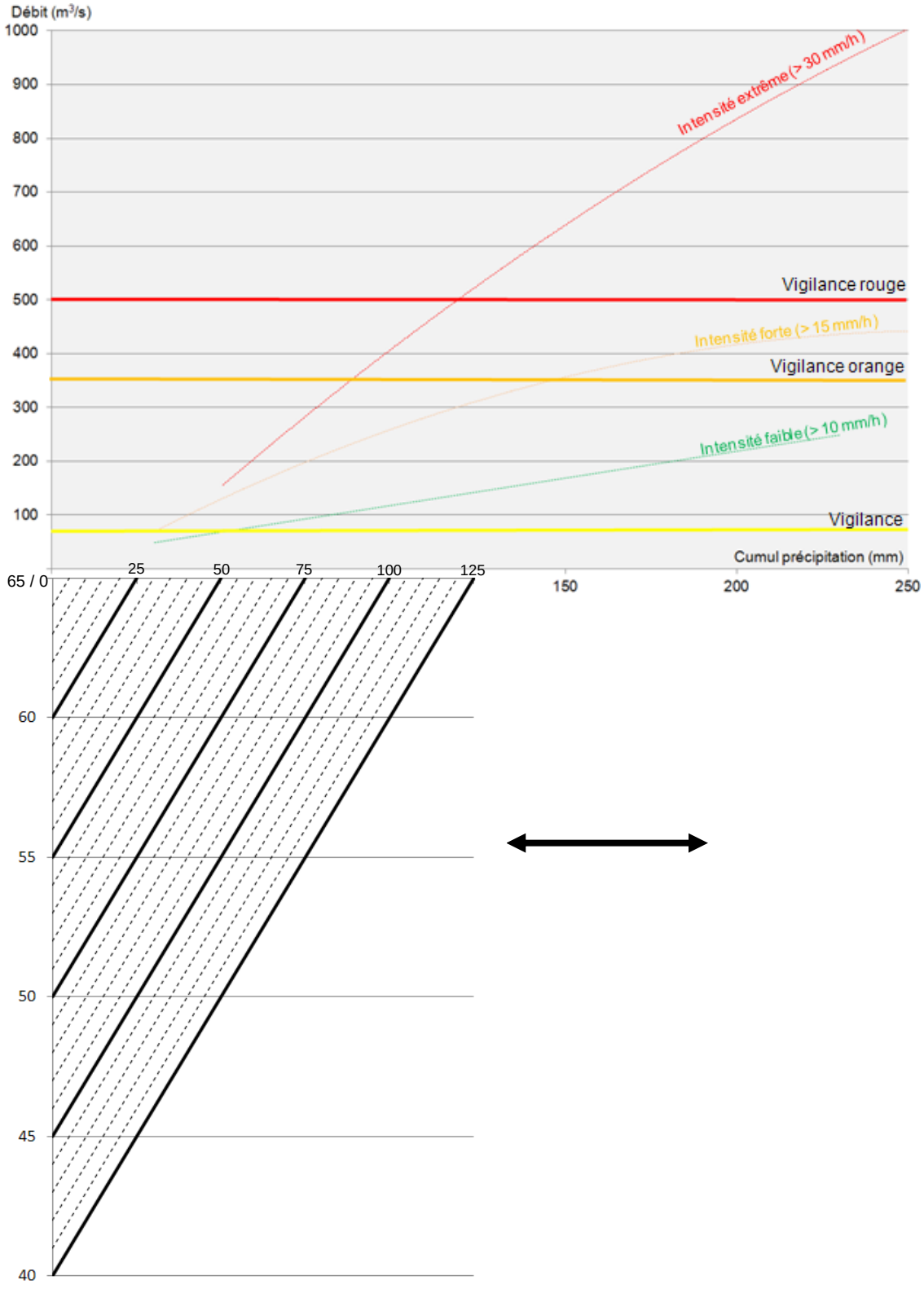


Illustration 27. Abaque à double entrée : « niveau karst et débit en fonction des pluies ».

L'abaque va ainsi être testé à partir de l'épisode de septembre 2005 dont les caractéristiques sont présentées dans l'Illustration 28.

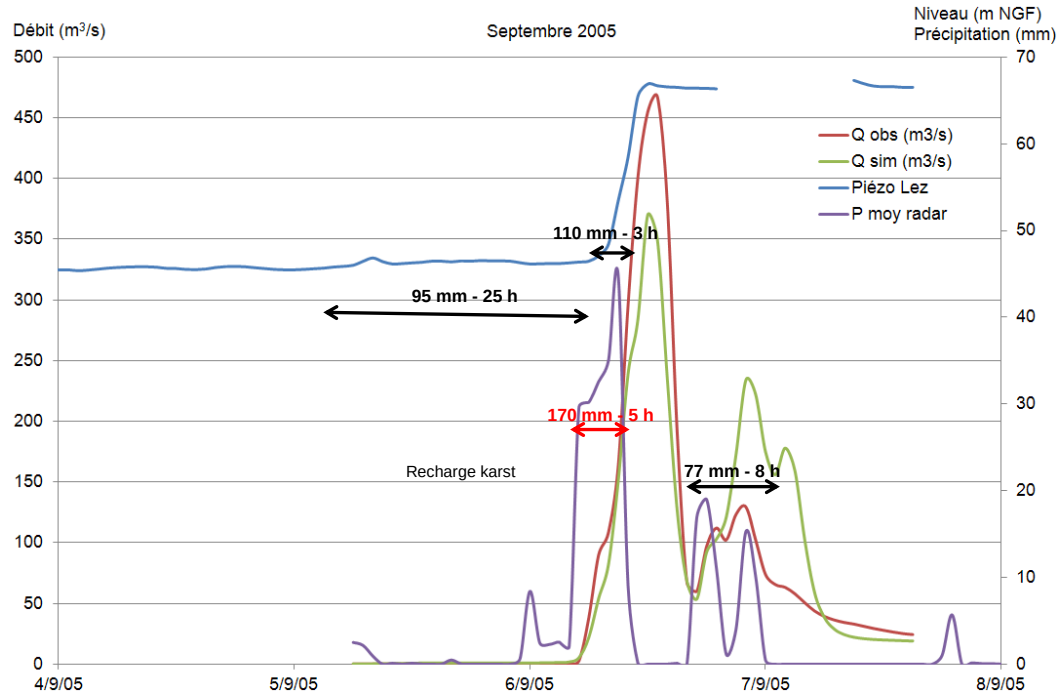


Illustration 28. Episode de septembre 2005.

Cet épisode est précédé d'environ 20 mm de pluie au cours des 10 jours précédents, le sol est ainsi considéré comme saturé, les premières précipitations ne seront donc pas écrêtées.

Les premières précipitations (cumul de 95 mm) permettent de saturer le karst. Le niveau passe ainsi de 46 m NGF (point A sur l'abaque, illustration 25) à 65 m NGF (point B). Les précipitations sur le système sont ensuite de 110 mm en 3 h. Compte tenu de l'intensité moyenne horaire de 37 mm l'épisode est considéré comme extrême. Le point C est obtenu pour un cumul de 110 mm et une intensité extrême. Le système passe en vigilance orange et est proche de la vigilance rouge. Le débit associé ainsi défini à partir de l'abaque est égal à 460 m^3/s, ce qui est comparable au débit mesuré.

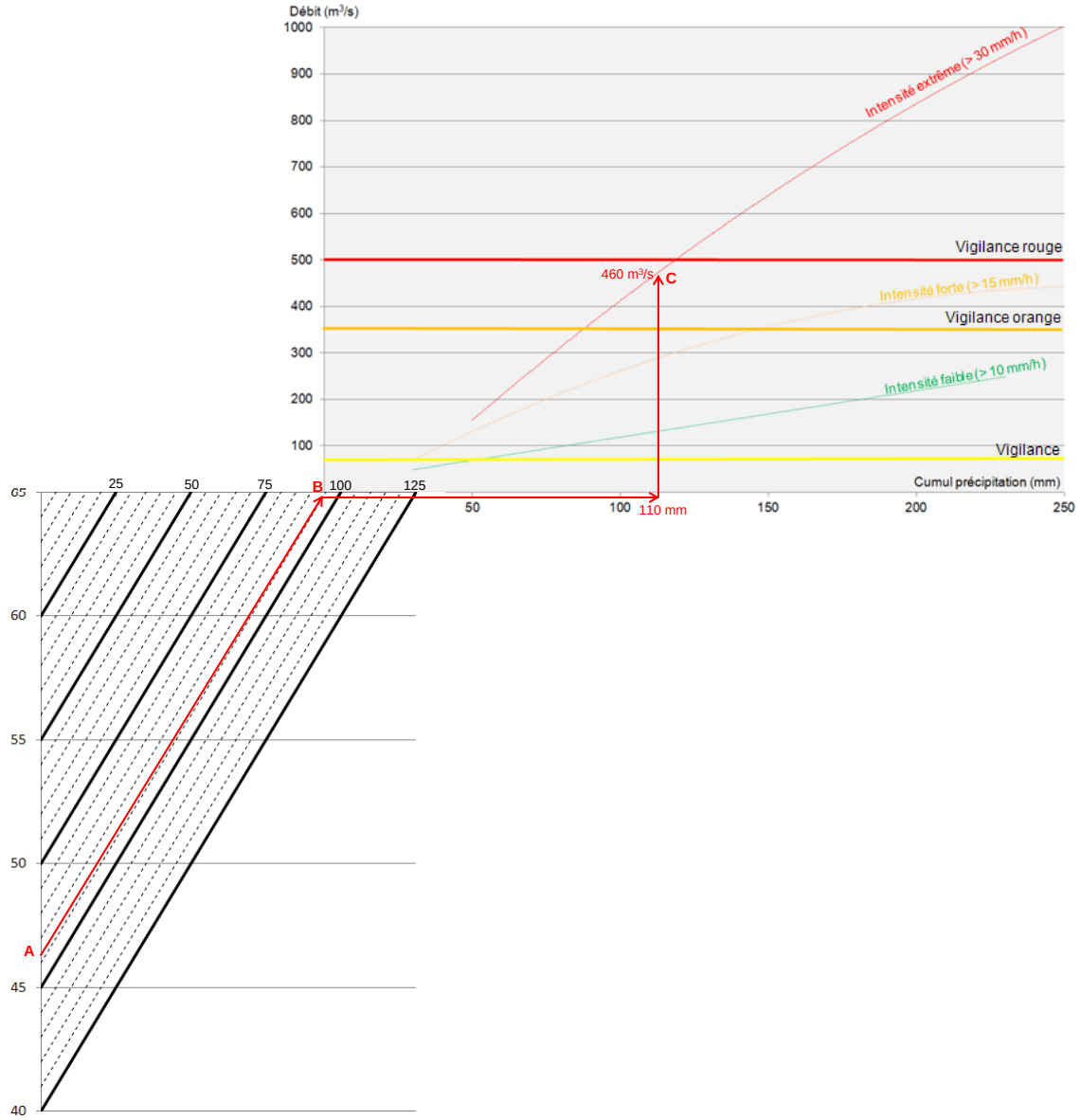


Illustration 29. Exemple d'utilisation de l'abaque – épisode de septembre 2005, karst sous saturé.

On se propose de reprendre l'exercice mais cette fois-ci en faisant l'hypothèse que le karst est initialement saturé. L'épisode contribuant à la crue est désormais caractérisé par un cumul supérieur à 170 mm en 5 h soit une intensité moyenne proche de 35 mm/h. A partir de ces informations l'abaque nous permet d'évaluer le débit qui aurait pu être atteint si le karst avait été rechargé. On obtient un débit d'environ 720 m^3/s. plaçant le système en vigilance rouge.

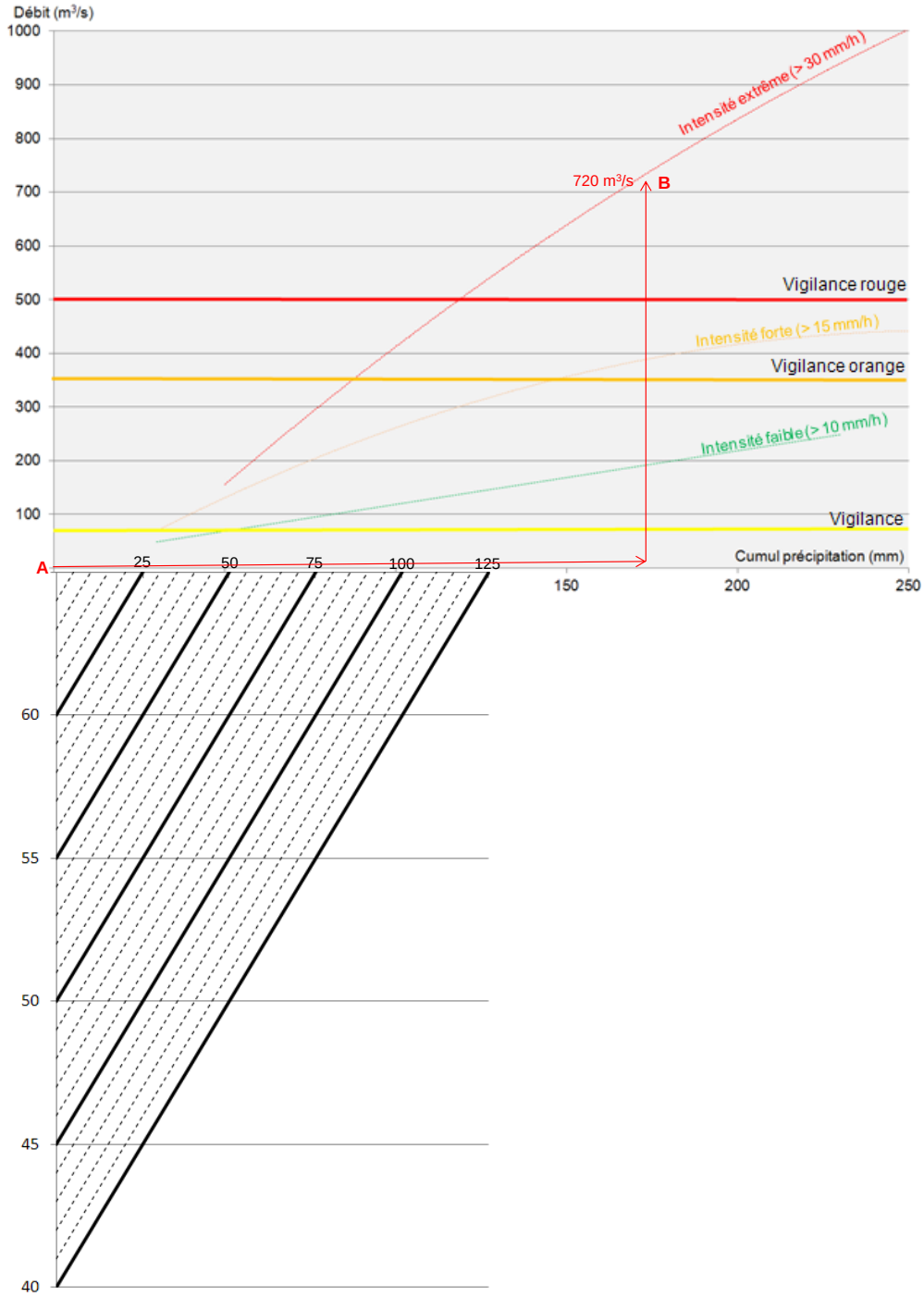


Illustration 30. Exemple d'utilisation de l'abaque – épisode de pluie de septembre 2005 en condition de karst rechargé.

3.4.4. Complément de l'outil d'aide à la décision : feuille de calcul Excel

En complément de l'abaque réalisé, une feuille Excel est proposée, elle permet d'obtenir le même type d'information, mais synthétisée.

Les données d'entrée sont (Illustration 31 - colonnes en rouge) : (1) le cumul de précipitation, (2) l'interception par le sol et (3) le niveau du Lez.

Les données en sortie sont alors les 3 débits. Ils sont fournis selon l'intensité des pluies (extrême, forte, faible). L'épisode de septembre 2005 est traité à titre d'exemple, en condition de karst sous saturé (situation réelle, ligne 1) et saturé (scénario testé, ligne 2). Cet épisode de pluie étant caractérisé par une intensité extrême, le débit de crue se lit dans la colonne « Débit associé à Intensité extrême ».

Pluie (mm)	interception sol mm (0 si sol saturé, 20 sinon)	Niveau initial Lez (m NGF)	Niveau final Lez (m NGF)	Pluie nécessaire pour recharger le karst (mm)	Pluie contribuant crue (mm)	Débit associé à Intensité extrême (m^3/s)	Débit associé à Intensité forte (m^3/s)	Débit associé à Intensité faible (m^3/s)
205	**0**	**46**	65	95	110	459	281	129
170	**0**	**65**	65	0	170	720	382	189
500 m^3/s								
350 m^3/s								
70 m^3/s								

Illustration 31. Feuille de calcul Excel pour approcher les débits.

3.5. CONCLUSION

L'étude et la modélisation des principales crues et la caractérisation du fonctionnement de l'aquifère karstique ont permis de mettre en place un outil d'aide un outil d'aide à l'élaboration de la couleur de vigilance à 24h du tronçon du Lez. Réalisé sous la forme d'un abaque double entrée (cumul de pluie et niveau dans le karst), il permet, à partir de l'état de remplissage du karst, des cumuls de pluie précédent et des prévisions de pluie à venir (cumul envisagé, intensité) de prévoir la réponse du système en terme de débit et ainsi définir l'état de ce dernier vis-à-vis de l'alerte.

Cet outil devrait être utilisé dès l'automne 2011 par le SPC Méditerranée-Ouest en charge de l'alerte sur le tronçon règlementaire du Lez. Toutefois, la donnée temps réel du niveau du karst est indispensable pour une utilisation optimale de cette grille de vigilance.

4. Le bassin versant de la Tardoire

4.1. PRESENTATION DU SYSTEME DE LA TARDOIRE

4.1.1. Description du bassin d'alimentation

Le bassin versant de la Tardoire à Coulgens recoupe d'amont en aval les départements de la Haute-Vienne, de la Dordogne et de la Charente sur une superficie de 1190 km². La Tardoire possède un affluent principal - le Bandiat - dont le sous-bassin couvre une superficie de 560 km² environ. La Tardoire est un affluent de la Bonnieure qui se jette dans la Charente environ 3 km plus en aval (Illustration 32).

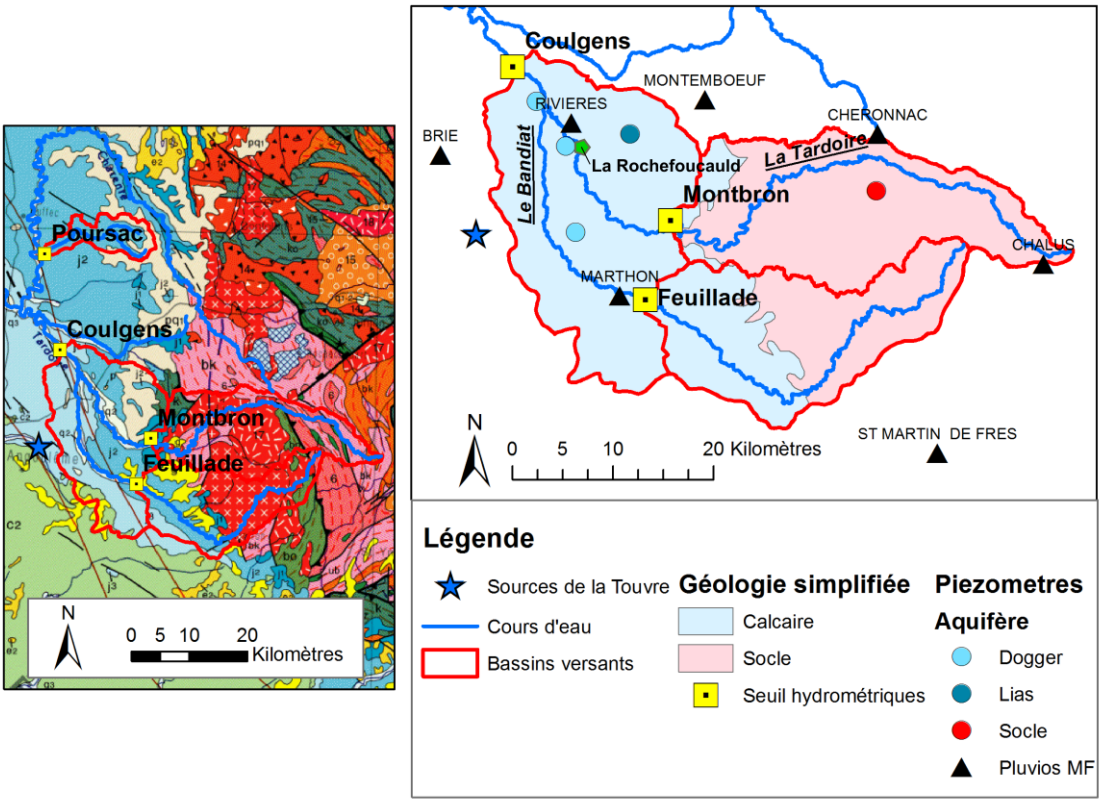


Illustration 32. Contexte géologique et hydrogéologique du bassin de la Tardoire.

Le bassin de la Tardoire se situe sur la bordure nord-est du bassin d'Aquitaine. Le contexte hydrogéologique est alors marqué par deux types de formations :

- à l'est les **terrains cristallins du Massif Central** (granite, granodiorite) des hautes vallées de la Tardoire et du Bandiat (formations en rouge sur la carte

géologique, Illustration 32). Ces terrains regroupent des formations granitiques, gneissiques ou schisteuses altérées en surface et abritant des aquifères localisés,

- à l'ouest, en recouvrement, **les formations carbonatées du Jurassique** de la région d'Angoulême et de la Rochefoucauld (formations en bleu sur la carte géologique, Illustration 32). Ces formations sont monoclinales à pendage général faible vers le sud-ouest et sont compartimentées par des grands accidents sud-est - nord-ouest. Les études portant sur le karst de la Rochefoucauld dont l'exutoire principal est l'ensemble des sources de la Touvre à l'est d'Angoulême, amènent à différencier deux aquifères dans le Jurassique : i) le Dogger très karstifié et abritant les principaux conduits karstiques du karst de la Rochefoucauld, et ii) le Lias peu perméable non connecté aux sources de la Touvre (Larocque, 1997 ; Larocque et Razack, 1998).

4.1.2. Un hydrosystème karstique dit « binaire »

Ce contexte lithologique est à l'origine du fonctionnement hydrologique particulier du bassin de la Tardoire que l'on peut découper en deux zones hydrogéomorphologiques :

- sur les terrains cristallins en amont, le réseau hydrographique est pérenne et relativement dense avec une orientation est - ouest ou nord-est - sud-ouest. Les vallées sont étroites avec une pente du cours d'eau de l'ordre de 2,5%

- sur les terrains carbonatés en aval, le réseau hydrographique est intermittent (assèchement complet en étiage) et d'orientation sud-est – nord-ouest qui est l'axe de déformation principale. La pente du cours d'eau est de l'ordre de 0,75%.

D'après Larocque et Razack (1998), dès qu'elles rentrent en contact avec les formations carbonatées, le Bandiat et la Tardoire participent à l'alimentation du karst de la Rochefoucauld via des pertes qui absorbent la totalité du débit en étiage. Le réseau de surface sur ce tronçon aval ne fonctionne donc qu'en période de hautes eaux. Larocque et Razack (1998) estiment que les pertes du Bandiat et de la Tardoire contribuent à hauteur de 50% de l'eau de l'exutoire du karst de la Rochefoucauld. En conséquence, nous pouvons considérer que le bassin versant de la Tardoire est un bassin « topographique » inclus dans le bassin hydrogéologique du karst de la Rochefoucauld (bassin Touvre-Tardoire-Bonnieure-Karst de la Rochefoucauld). Le karst de la Rochefoucauld **est dit binaire**, comprenant une partie de son bassin d'alimentation sur une **zone non karstifiable (socle à l'amont) et concentrant l'infiltration en un point (pertes sur les calcaires à l'aval)**.

4.1.3. Données

Caractéristiques du bassin

La demande du SPC Littoral Atlantique concerne les bassins Tardoire–Bandiat, et particulièrement la Tardoire à La Rochefoucauld. Comme il n'existe pas de station de mesures hydrométriques à La Rochefoucauld, l'étude porte sur le bassin de la Tardoire à Coulgens qui inclue les 2 sous-bassins de la Tardoire à Montbron et du Bandiat à Feuillade (voir localisation Illustration 32) pour lesquelles les caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques sont reportées dans le tableau Illustration 33.

Bassin		**Sous-bassins**		**Géologie**	**Types d'aquifères**	**Hydrologie**
Station hydrométrique	**Impluvium (km²)**	**Station hydrométrique**	**Impluvium (km²)**			
Tardoire à Coulgens	1 190	Tardoire à Montbron	390	Socle du Primaire	Aquifère fracturé localisé dans la zone d'altération	Ecoulement pérenne
		Bandiat à Feuillade	329			
		/	471	Calcaires du Jurassique	Aquifère karstique	Ecoulement intermittent

Illustration 33. Caractéristiques des bassins d'alimentation au niveau des stations hydrométriques sur la Tardoire et le Bandiat.

Pluie et ETP

Le climat est océanique du fait de la proximité du site avec l'océan Atlantique (environ 100 km à l'ouest). Les conditions climatiques sont semblables sur toute la zone, avec toutefois des précipitations légèrement plus abondantes à l'approche du Massif Central. A l'échelle annuelle, le cumul est de 850 mm avec un contraste saisonnier marqué (moins de 60 mm/mois l'été et plus de 80 mm/mois l'hiver). Le régime pluviométrique se caractérise par des averses pluri-journalières. Les averses isolées sont rares durant la saison pluvieuse. La majorité des pluies sont de faibles intensités : les fortes averses (> 15 mm) représentent moins de 10% de la pluie totale (Rouiller, 1987).

Les précipitations journalières sont mesurées sur 7 stations Meteo France dont la contribution à chaque bassin et sous-bassin (à partir des polygones de Thiessen) est donnée dans l'Illustration 34.

L'évapotranspiration potentielle ETP journalière est estimée d'après une fonction sinusoïdale calée sur l'ETP Thornthwaite (données SPC Littoral Atlantique).

		Contribution des stations pluviométriques Meteo France (%)						
Surface du bassin	**Type d'aquifère**	**Brie**	**Chalus**	**Cheronnac**	Marthon	**Montem-boeuf**	**Rivières**	**St Martin de Fressengeas**
Montbron	Socle (92.4%)	0	15.93	56.04	7.70	12.79	0	0
390 km²	Karst (7.8%)	0	0	0	2.49	5.05	0	0
Feuillade	Socle (54.3%)	0	13.0	7.0	9.8	0	0	24.6
329 km²	Karst (45.7%)	0	0	0	39.7	0	0	5.98
Coulgens	Socle (45.3%)	0	8.8	20.3	5.2	4.2	0	6.8
1190 km²	Karst (54.7%)	2.1	0	0	29.9	5.5	15.5	1.6

Illustration 34. Spatialisation de la pluie sur le bassin de la Tardoire.

Débit

Le débit en continu à pas de temps journalier (Banque Hydro) est disponible aux stations de Montbron et de Coulgens pour la Tardoire et à la station de la Feuillade pour le Bandiat.

Les données horaires pluie et débit (fournies par le Service de Prévision des Crues Littoral Atlantique) du premier trimestre 2008 seront également utilisées pour mieux caractériser le temps de transfert de l'onde de crue de l'amont vers l'aval.

Piézométrie

La piézométrie en continue au pas de temps journalier ou pluri-journalier est disponible au niveau des forages présentés Illustration 35. Après une première sélection réalisée à partir de la géologie et de l'analyse des chroniques (similitudes de comportements hydrogéologiques), les forages en gras/italiques ont été retenus pour l'interprétation hydrogéologique.

Code BSS	Commune	Altitude (m NGF)	Prof. (m)	Géologie	Type d'aquifère
07111X0033_P1	***St-Mathieu***	***338,19***	***28***	***Granite***	***Socle***
06866X0018_F	Yvrac-et-Malleyrand	145,00	144	Calcaires Lias	Karst
07101X0041_S	Chazelles	125,13	130	Calcaires Dogger	Karst
07106X0517_PZ1	***Feuillade***	***106,87***	***176***	***Calcaires Lias***	***Karst***
06865X0020_S	La Rochefoucauld	94,36	98	Calcaires Dogger	Karst
06858X0036_F	***Agris***	***75,8***	***63***	***Calcaires Dogger***	***Karst***

Illustration 35. Caractéristiques des piézomètres du bassin Tardoire-Bandiat.

4.2. MODELE CONCEPTUEL DU BASSIN DE LA TARDOIRE

4.2.1. Processus hydrologiques

Régimes hydrologiques des sous-bassins et bassin versants

Une étude comparative des débits aux trois stations de Montbron, Feuillade et Coulgens va permettre de caractériser la variabilité spatiale du régime hydrologique sur le bassin de la Tardoire. L'Illustration 36 présente une chronique de deux mois au pas de temps horaire de la pluie, du débit et du débit spécifique. Les courbes de débit montrent un plus faible écoulement en surface pour les stations de Montbron, Coulgens puis Feuillade. En comparant Montbron (390 km²) avec Feuillade qui est un bassin légèrement plus petit (330 km²), la courbe des débits spécifiques montre clairement un écoulement moins important à Feuillade. Cette diminution du débit de l'amont vers l'aval est due aux pertes des cours d'eau quand ils rentrent au contact des calcaires jurassiques.

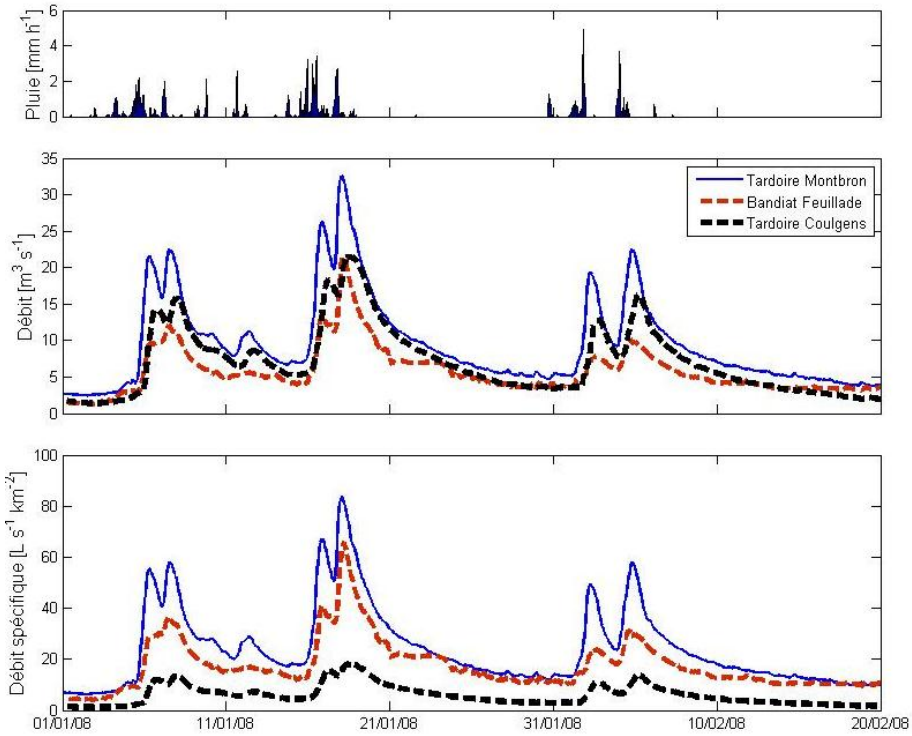


Illustration 36. Chroniques horaires de pluie, débit et débit spécifique (janvier-février 2008).

A partir de cette chronique horaire, le temps de réponse aux stations hydrométriques a été calculé pour chacune des 3 crues bi-pics notées Crue 1a, 1b, …., 3a, 3b (Illustration 37). Pour les deux sous-bassins à Montbron et Feuillade, le temps de réponse est compris entre 4 et 17 h. Il est quasiment doublé pour Coulgens (entre 15 et 23 h). Le décalage des pics de crue donne une idée de la vitesse de propagation de l'onde de crue dans le réseau hydrographique. Si ce décalage reste stable entre Montbron et Coulgens (9,5 h en moyenne), il est très variable entre Feuillade et Coulgens (entre 0 et 14h).

	Station	Crue 1a	Crue 1b	Crue 2a	Crue 2b	Crue 3a	Crue 3b
Temps de réponse	Montbron (390 km²)	13 h	5 h	9 h	6 h	8 h	16 h
	Feuillade (329 km²)	/	4 h	11 h	9 h	17 h	14 h
	Coulgens (1190 km²)	23 h	15 h	17 h	15 h	17 h	21 h
Décalage des pics de crue	Montbron -> Coulgens	10 h	10 h	8 h	11 h	9 h	9 h
	Feuillade -> Coulgens	/	11 h	8 h	7 h	0 h	14 h

Illustration 37. Temps de réponse aux stations hydrométriques de la Tardoire.

De cette analyse, il ressort que les deux sous-bassins de Montbron et Feuillade qui ont un bassin d'alimentation comparable en taille mais différent par la nature du substratum diffèrent au niveau de la réponse hydrologique. Le débit moyen est plus faible à Feuillade, et le temps de réponse y est plus variable. Cette différence est vraisemblablement due à l'hétérogénéité des formations géologiques sur Feuillade qui recoupe et le socle et les calcaires en aval (alors que Montbron ne draine que des formations de socle).

Débits classés

Le principe général des débits classés est d'identifier des événements particuliers à partir des modifications qu'ils induisent sur l'hydrogramme. L'Illustration 38 montre la distribution log normale associée aux débits journaliers de chacune des 3 stations de Montbron, Feuillade et Coulgens. L'interprétation du graphique repose sur l'identification d'anomalies affectant la droite représentative par des ruptures de pentes. Pour les faibles ou forts pourcentages, les points situés au-dessus de la droite représentative (ici en pointillés) montrent une surreprésentation des classes de débits. Cela peut s'interpréter, pour les faibles pourcentages, par des pertes qui amènent à surreprésenter les débits les plus faibles. Pour les pourcentages les plus forts, cela amène à considérer également des pertes qui écrêtent les pointes de crue.

En considérant que pour les 3 stations, les débits supérieurs à 3 000 l/s s'alignent sur la droite représentative, on peut alors définir la station de Montbron comme station référence sans anomalies de débits. Pour la station de Feuillade, on observe une légère influence des pertes pour les bas débits (< 3 000 l/s) mais un fort écrêtage des crues au-dessus de 12 000 l/s. Pour Coulgens, la surreprésentation des bas débits illustre parfaitement l'assèchement progressif de la Tardoire à Coulgens pendant l'étiage.

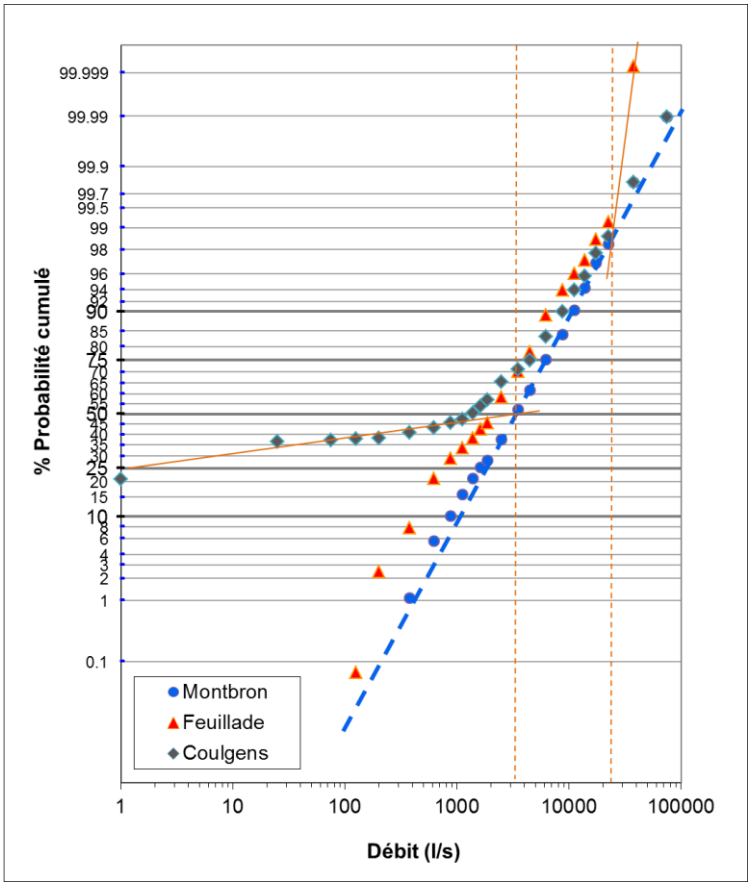


Illustration 38. Débits classés sur la période du 01/01/2006 au 03/08/2010 (Note : pour une meilleure représentation, la classe de débit correspondant à des valeurs nulles (Coulgens) a été fixée à 1l/s sur le graphique).

4.2.2. Processus hydrogéologiques

Dans le cas du bassin de la Tardoire marqué par des pertes conséquentes qui assèchent en partie le cours d'eau en étiage, la recharge des nappes est partagée entre une recharge diffuse sur les versants et une recharge localisée au niveau du réseau hydrographique (pertes).

L'application de techniques de traitement du signal sur les chroniques de pluie et piézométrie va permettre de mieux caractériser les processus hydrogéologiques sur le bassin. Dans cette approche, l'aquifère est assimilé à un filtre modifiant le signal d'entrée (pluie). L'étude des séries pluviométriques et piézométriques permet de préciser la nature de ce filtre au niveau de la zone non saturée.

Inertie des aquifères

La fonction d'auto-corrélation met en évidence la dépendance des événements entre eux pour des intervalles de plus en plus grands et traduit l'effet mémoire du système.

La forme de la fonction d'auto-corrélation est interprétée comme un indice de l'importance des réserves de l'aquifère.

L'Illustration 39 représente les fonctions d'auto-corrélation pour la pluie, et 3 piézomètres situés (i) dans le socle, (ii) dans l'aquifère calcaire du Lias peu perméable et (iii) dans l'aquifère calcaire du Dogger (karst de la Rochefoucauld). Deux représentations sont utilisées pour caractériser les tendances à long et court termes : respectivement à l'échelle pluri-annuelle (à gauche) et à l'échelle pluri-journalière (à droite). Dans les deux cas, le corrélogramme de la pluie décroit très rapidement et montre le caractère aléatoire de la série. Seul le piézomètre du Lias montre un phénomène cyclique pluri-annuel pour une période de 8 ans. La diminution très lente du corrélogramme pour ce piézomètre montre une très forte inertie du système qui est cohérente avec le caractère peu perméable de cet aquifère (Larocque et Lazrack, 1998). Les deux autres piézomètres dans le socle et dans le Dogger ont un corrélogramme très comparable avec un effet mémoire plus court que celui du Lias et une composante cyclique annuelle classique pour des piézomètres sous climat tempéré avec une saisonnalité marquée.

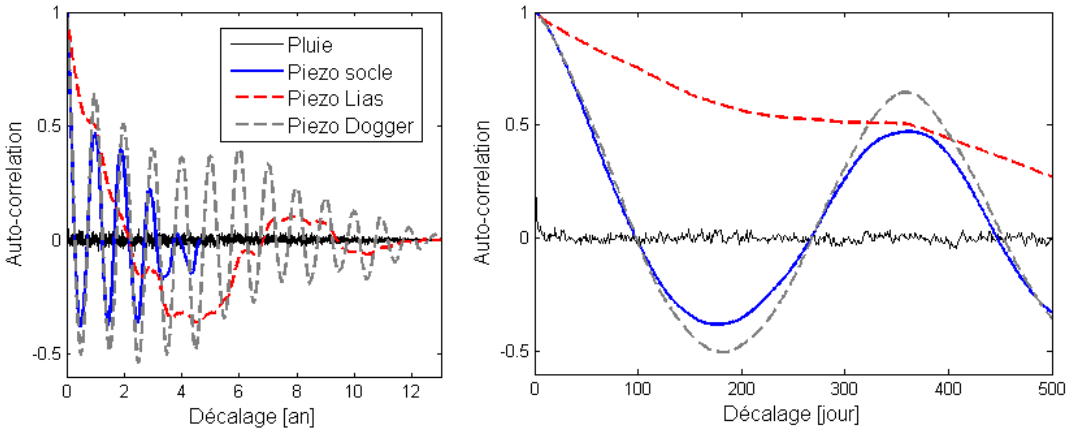


Illustration 39. Auto-correlation des chroniques de pluie et de piézométrie (Note : le graphe de gauche montre les tendances pluri-annuelles, et le graphe de droite les tendances pluri-journalières).

Recharge des nappes

La fonction de corrélation croisée permet de décrire la relation de cause à effet entre deux séries. La forme de la fonction de corrélation croisée pluie et piézométrie représente la réponse impulsionnelle de la partie superficielle de l'aquifère.

L'Illustration 40 présente les corrélogrammes croisés pluie-piézométrie pour les 3 types d'aquifère socle, Lias, et Dogger. Globalement, les faibles valeurs de corrélation montrent l'importance du rôle de filtre de la zone non saturée (ZNS). En comparant les piézomètres entre eux, on observe une plus forte corrélation dans le socle, signifiant que la ZNS dans les arènes granitiques filtre moins le signal de pluie que l'épikarst. En analysant l'allure des corrélogramme croisés, on peut différencier deux types de

transfert dans la ZNS : un transfert rapide (pic marqué à moins de 25 jours) pour le socle, et un transfert lent (pic atténué à 170 jours environ) pour le Lias. Pour le Dogger, la présence d'un pic marqué à 11 jours suivi d'un palier à 180 jours montre que le piézomètre du karst de la Rochefoucauld présente deux types de transfert : lent et rapide.

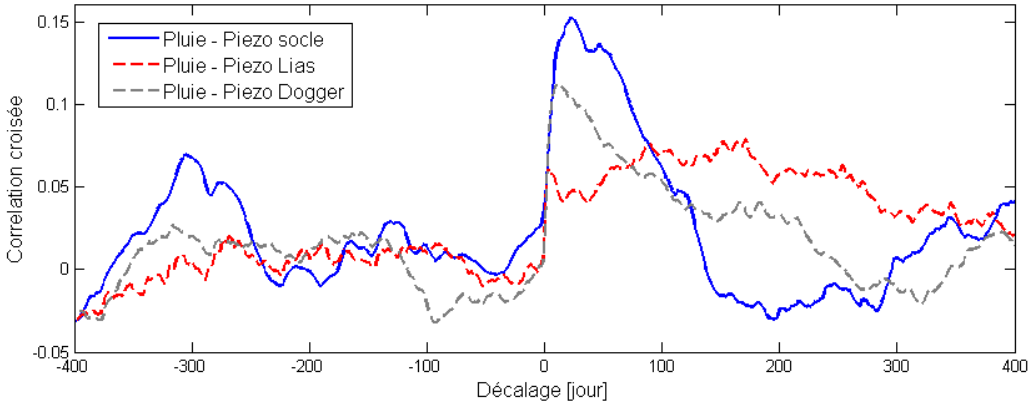


Illustration 40. Corrélation croisée des chroniques de pluie et de piézométrie.

Ces deux types de transfert peuvent être associés à deux types de recharge dépendant de l'état de fracturation et de karstification des systèmes :

- Un socle altéré et très fracturé en surface engendrant une contribution prépondérante de la recharge rapide et une très faible contribution de la recharge diffuse,

- Un karst peu développé dans le Lias engendrant une contribution prépondérante de la recharge diffuse.

- Un karst très développé dans le Dogger engendrant une double contribution de la recharge concentrée via les drains et de la recharge diffuse via la matrice fissurée.

4.2.3. Schéma de fonctionnement et contrainte pour la modélisation

Schéma de fonctionnement du système de la Tardoire

L'Illustration 41 représente schématiquement les grands processus hydrologiques et hydrogéologiques mis en évidence sur le système de la Tardoire. Ce schéma montre l'importance du rôle des pertes (localisées au niveau des affleurements du calcaire du Dogger) sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant. Il illustre le fonctionnement du système binaire de la Tardoire engendrant une diminution des débits de l'amont vers l'aval.

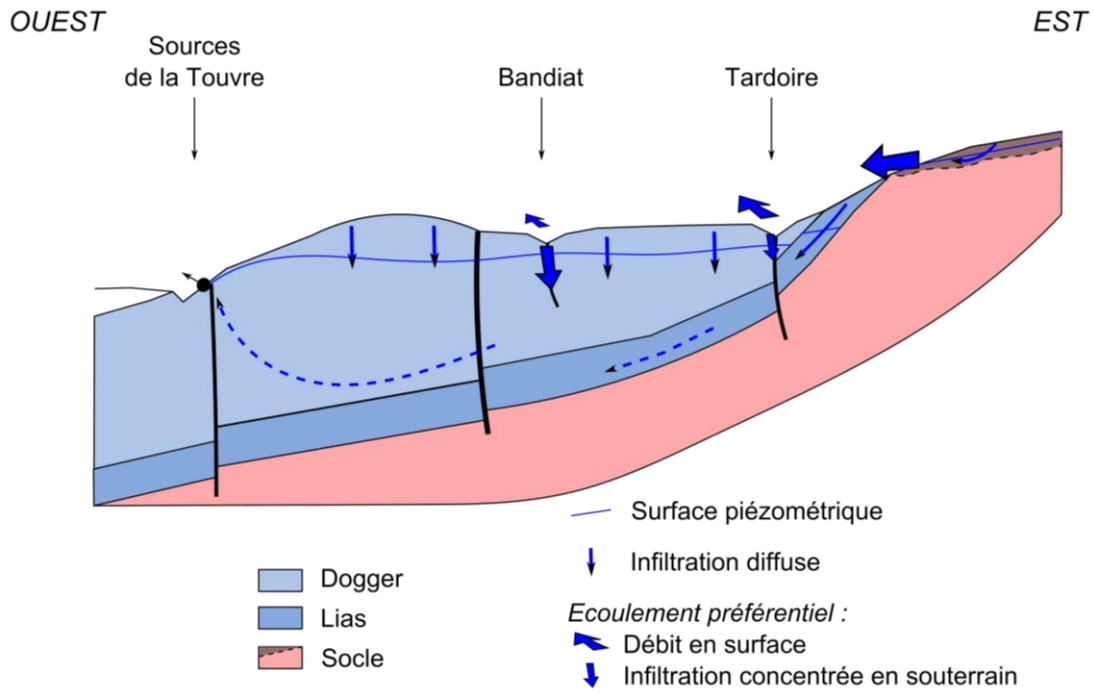


Illustration 41. Schéma de fonctionnement hydro(géo)logique du système de la Tardoire. L'épaisseur des flèches est proportionnelle aux flux.

Contrainte pour la modélisation

L'approche qualitative du fonctionnement hydrologique a mis en évidence le rôle clé des pertes du réseau hydrographique sur les affleurements des calcaires Jurassiques. **Avec l'objectif de mieux comprendre la dynamique des crues sur le tronçon Montbron-Feuillade-Coulgens, la problématique de l'étude est de quantifier l'influence des pertes du cours d'eau sur le régime hydrologique de la Tardoire, et en particulier lors des crues extrêmes.**

Sur la base du schéma de fonctionnement (Illustration 41), l'approche de modélisation doit intégrer tous les principaux processus suivants :

- le partage ruissellement / infiltration de la pluie dans le compartiment sol sur les versants,

- la recharge de l'aquifère par infiltration diffuse (infiltration depuis les versants) et infiltration concentrée (pertes depuis le cours d'eau),

- la propagation du débit dans le réseau hydrographique comprenant 3 types d'écoulements : rapide (ou ruissellement de surface), intermédiaire (ou ruissellement de subsurface au niveau du sol), lent (ou débit de base) provenant de la nappe.

4.3. MODELISATION

4.3.1. Structure du modèle

Description du modèle

L'objectif de ce travail est de modéliser les processus de crue aux deux échelles du sous-bassin (Tardoire à Montbron et Bandiat à Feuillade) et du bassin (Tardoire à Coulgens). L'approche est une modélisation semi-spatialisée découpant l'espace de manière simple : le bassin est découpé à partir des sous-bassins aux 3 stations de Montbron, Feuillade et Coulgens, et à partir du type d'aquifère socle ou karst. Ceci nous amène à considérer 4 unités hydrologiques (UH) sur lesquelles l'approche de modélisation est globale (Illustration 42) :

- 1 UH socle pour le sous-bassin de Montbron,

- 1UH socle et 1 UH karst pour le sous-bassin de Feuillade,

- 1 UH karst pour le sous-bassin de Coulgens.

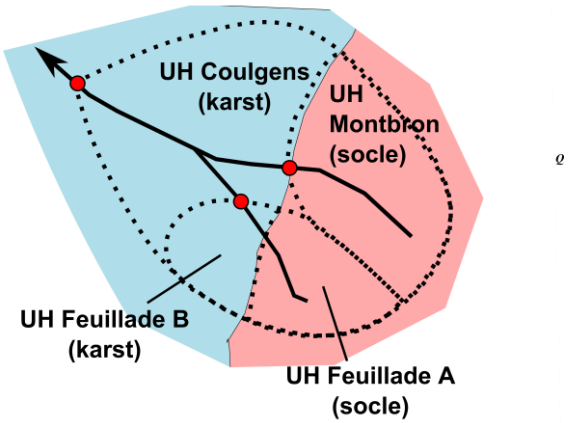


Illustration 42. Découpage en Unités Hydrologiques (UH) du bassin de la Tardoire.

Sur chaque UH, le bilan hydrologique est déterminé à partir de deux réservoirs superposés (Illustration 43). Le premier représente le sol où le ruissellement de surface, l'infiltration, l'écoulement de sub-surface et la recharge se produisent. Tous ces processus sont modélisés à partir de la pluie et de l'ETP, et des caractéristiques du sol (capacité d'infiltration et stockage). Le second réservoir représente l'aquifère rechargé depuis le sol par infiltration diffuse et depuis le cours d'eau par infiltration concentrée (pertes), et drainé au niveau superficiel (débit de base) et en profondeur. Ensuite, une fonction de transfert basée sur l'onde diffusante est utilisée pour acheminer le ruissellement des versants du sous-bassin à travers le réseau hydrographique.

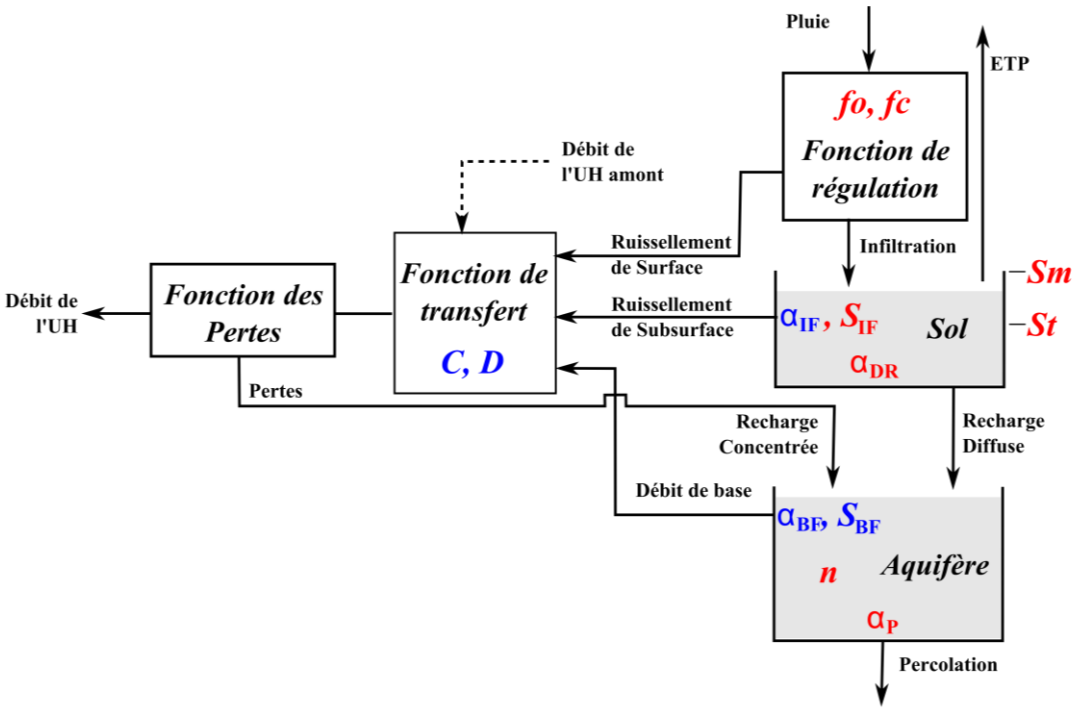


Illustration 43. Structure du modèle pour chaque UH. Les paramètres en bleu et rouge correspondent respectivement aux paramètres calés et fixés (cf. Illustration 44).

Bilan vertical

Le ruissellement sur les versants est fonction des états hydriques initiaux au cours de l'année qui engendrent une réponse hydrologique variable selon la saison. En gardant une approche conceptuelle, nous avons choisi d'utiliser une fonction de production qui partage le ruissellement de surface et l'infiltration en faisant varier la capacité d'infiltration *f* en fonction du stock d'eau du sol *S* (Diskin et Nazimov, 1995). Ceci permet notamment d'atténuer le pic de crue calculé lors des épisodes automnaux quand le sol du bassin est sous-saturé. L'eau infiltrée est ensuite stockée dans le sol. Une partie s'évapore si le stock est non nul, une partie contribue par trop-plein à l'écoulement de sub-surface, et une partie contribue à la recharge de l'aquifère.

Sur la zone karstifiée, le cours d'eau fonctionne en ré-infiltration (pertes). Ce type de fonctionnement est représentatif d'une grande partie du bassin où la nappe est systématiquement plus basse que le lit du cours d'eau. Dans le même temps, comme ce processus ne s'observe pas sur le socle, ceci implique tout de même de tenir compte des échanges entre nappe et cours d'eau aussi bien en ré-infiltration qu'en drainage. Pour le drainage (débit de base), le réservoir aquifère fonctionne en trop plein qui alimente le cours d'eau. Pour la ré-infiltration, le débit des pertes est calculé à partir d'un coefficient fonction du débit dans l'UH située à l'amont. Ce coefficient de pertes correspond à la pente de la régression linéaire de la distribution.

D'autres processus souterrains se rajoutent à ce fonctionnement en surface. L'aquifère karstique se vidange en profondeur au niveau de l'exutoire du karst de la Rochefoucauld. Ces flux peuvent représenter environ 50 % du bilan annuel des sources de la Touvre d'après Larocque et Lazrack (1998), et doivent être intégrés dans la modélisation. Pour représenter au mieux les fluctuations de nappe et les comparer aux données piézométriques, la porosité efficace *n* de l'aquifère a été utilisée comme paramètre d'ajustement.

Comme notre problématique est de simuler la variabilité du débit à plusieurs stations amont et aval, il est important de simuler le transfert du ruissellement dans le cours d'eau entre chaque station. Un modèle linéaire d'hydrogramme unitaire, basé sur la méthode du noyau d'Hayami (1951) qui est une résolution de l'équation de l'onde diffusante, a été utilisée pour simuler le transfert (Moussa et Bocquillon, 1996). Les deux paramètres sont la célérité et la diffusivité qui peuvent être tous deux définis à partir des observations de terrain :

Célérité [$L\ T^{-1}$] = longueur du réseau / temps de réponse

Diffusivité [$L^2\ T^{-1}$] = Débit moyen / (pente * largeur cours d'eau)

Paramètres du modèle

Les paramètres du modèle sont présentés dans l'Illustration 44.

Fonction ou Réservoir	Paramètre	Signification	Valeur fixée	Valeur calée
Fonction de régulation (cf. Diskin et Nazimov, 1995) **&** **SOL**	fo	Infiltration max	/	4.2 mm h^{-1} (socle) 4.2 mm h^{-1} (Karst)
	fc	Infilration à saturation	/	0.54 mm h^{-1} (socle) 0.62 mm h^{-1} (karst)
	Sm	Stock max d'eau dans le sol	/	100 mm (socle) 100 mm (karst)
	St	Seuil de la saturation (St < Sm)	/	65 mm (socle) 38 mm (karst)
	α_{IF}	Vidange du compartiment de subsurface (Interflow)	0.10 j^{-1} (socle) 0.035 j^{-1} (karst)	/
	S_{IF}	Seuil de sub-surface	/	15 mm (socle) 10 mm (karst)
	α_{DR}	Vidange pour la recharge diffuse	/	0.08 j^{-1} (socle) 0.12 j^{-1} (karst)
AQUIFERE	n	Porosité efficace	/	0.050 (socle 0.035 (Lias) 0.004 (Dogger)
	S_{BF}	Seuil de débit de base (Baseflow)	Altitude du fond du cours d'eau – Altitude moy. piézométrique	/
	α_{BF}	Vidange pour le débit de base	0.015 j^{-1} (socle) Pas de debit de base au Lias et au Dogger	/
	α_{P}	Vidange en profondeur de la nappe	/	0.0003 j^{-1} (socle) 0.0002 j^{-1} (Lias) 0.002 j^{-1} (Dogger)
Fonction de transfert dans le RESEAU (cf. Moussa et Bocquillon, 1996)	C	Célérité (Vitesse de propagation dans le réseau)	1.44 m s^{-1} (Montbron) 1.44 m s^{-1} (Feuillade) 0.77 m s^{-1} (Coulgens)	/
	D	Diffusivité (Forme de l'hydrogramme de crue)	16 m^2 s^{-1}	/
Fonction des pertes	Pas de paramètres	/	/	/

Illustration 44. Paramètres du modèle.

Stratégie de modélisation

Le modèle nécessite un calage des fonctions de production sur les deux entités karst et socle à l'échelle de l'UH. L'UH située sur le bassin de la Tardoire à Montbron (constitué à 92% par du socle) permet de caler la fonction de production sur le socle. Comme les 3 stations ne délimitent pas un sous-bassin uniquement composé de calcaires, il a été nécessaire de caler cette fonction sur un bassin situé dans le même contexte géomorphologique et géologique. En concertation avec le Service Géologique Régional Poitou-Charentes, la fonction de production sur calcaires a été calée sur le bassin de l'Argentor à Poursac situé 20 km au nord de Coulgens (localisation sur l'Illustration 32). Ce bassin est situé sur les calcaires du Dogger, et d'après les dires d'experts, n'est pas affecté par des pertes du cours d'eau aussi importantes que sur la Tardoire. La période de calage sur le bassin de l'Argentor correspond aux données disponibles en 2009, soit la période de novembre 2008 à février 2009 (Illustration 45). La période de calage pour les autres UH correspond au cycle hydrologique 2008-2009.

Le modèle calé à l'échelle de l'UH (Montbron et Poursac) est validé aux échelles supérieures sur les stations de Feuillade et Coulgens.

Les performances du modèle sont évaluées à l'aide du critère de Nash sur les débits des 3 stations hydrométriques et sur la piézomètrie des 3 aquifères à savoir, le socle, les calcaires du Lias et du Dogger.

4.3.2. Calage et validation du modèle

Calage de la fonction de production sur calcaire

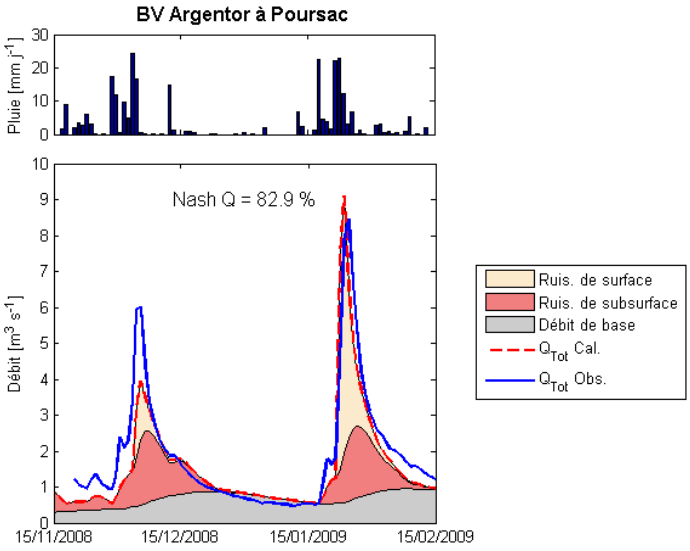


Illustration 45. Calage de la fonction de production sur les formations calcaires du bassin d'Argentor à Poursac (novembre 2008 à février 2009).

Le calage de la fonction de production sur les calcaires a été réalisé sur les données disponibles qui incluent la crue quinquennale de 2009 (Illustration 45). Les valeurs des paramètres sont données dans l'Illustration 44.

Calage de la fonction de production sur socle et validation du modèle

Pour valider le modèle, le cycle hydrologique 2009 a été choisi, il est jugé représentatif des hautes eaux, une crue quinquennale s'étant produite en janvier 2009 (Illustration 46).

Concernant les débits, le modèle est calé de manière satisfaisante sur les trois stations de Montbron, Feuillade et Coulgens, avec un Nash de respectivement 82 %, 85 %, et 76 %. La dynamique d'écoulement en étiage et en crue est parfaitement reproduite, ainsi que les pics de crue (les erreurs sur les débits max sont de seulement -5 %, 13

%, et -5 %). **Ces résultats montrent les bonnes performances du modèle, et valident le schéma de fonctionnement établi auparavant.**

Sur Feuillade et Coulgens, on observe que la somme des débits calculés (ruissellement UH amont + ruissellement de surface + ruissellement de sub-surface + débit de base) est supérieure au débit observé à la station hydrométrique. La différence correspond au débit des pertes calculé à l'aide du modèle. L'Illustration 47 montre une relation de proportionnalité entre le débit des pertes et le débit de l'UH amont :

- Débit pertes à Feuillade = 45 % du débit produit sur le socle dans le sous-bassin de Feuillade,

- Débit pertes à Coulgens = 64 % de la somme des débits à Montbron et Feuillade.

Concernant les piézomètres, le modèle reproduit parfaitement la recharge de la nappe de socle (Nash = 91 % sur le piézomètre de Montbron) et de la nappe karstique du Dogger (Nash = 82 % sur le piézomètre de Coulgens) et plus difficilement celle du Lias (Nash < 0 sur le piézomètre de Feuillade). En effet, ce piézomètre réagit fortement lors de la crue quinquennale. Alors que nous avons vu précédent que ce piézomètre a une inertie très forte, la recharge concentrée lors de la crue quinquennale laisse penser que le forage est mal étanchéifié et que des venues d'eau sont possibles depuis la zone superficielle.

L'étude des fluctuations piézométriques montre que le système karstique n'est jamais en état de saturation, même pendant la crue de 2009 (les niveaux d'eau restent toujours au moins 5 m sous la surface). On peut supposer que ce **phénomène est à l'origine du fonctionnement linéaire des pertes au cours du temps**. Dans ce cadre, on peut supposer alors que l'absence de saturation, et donc d'un seuil d'infiltration, fait que le débit des pertes est principalement fonction de la mise en charge dans le cours d'eau (profondeur de l'eau).

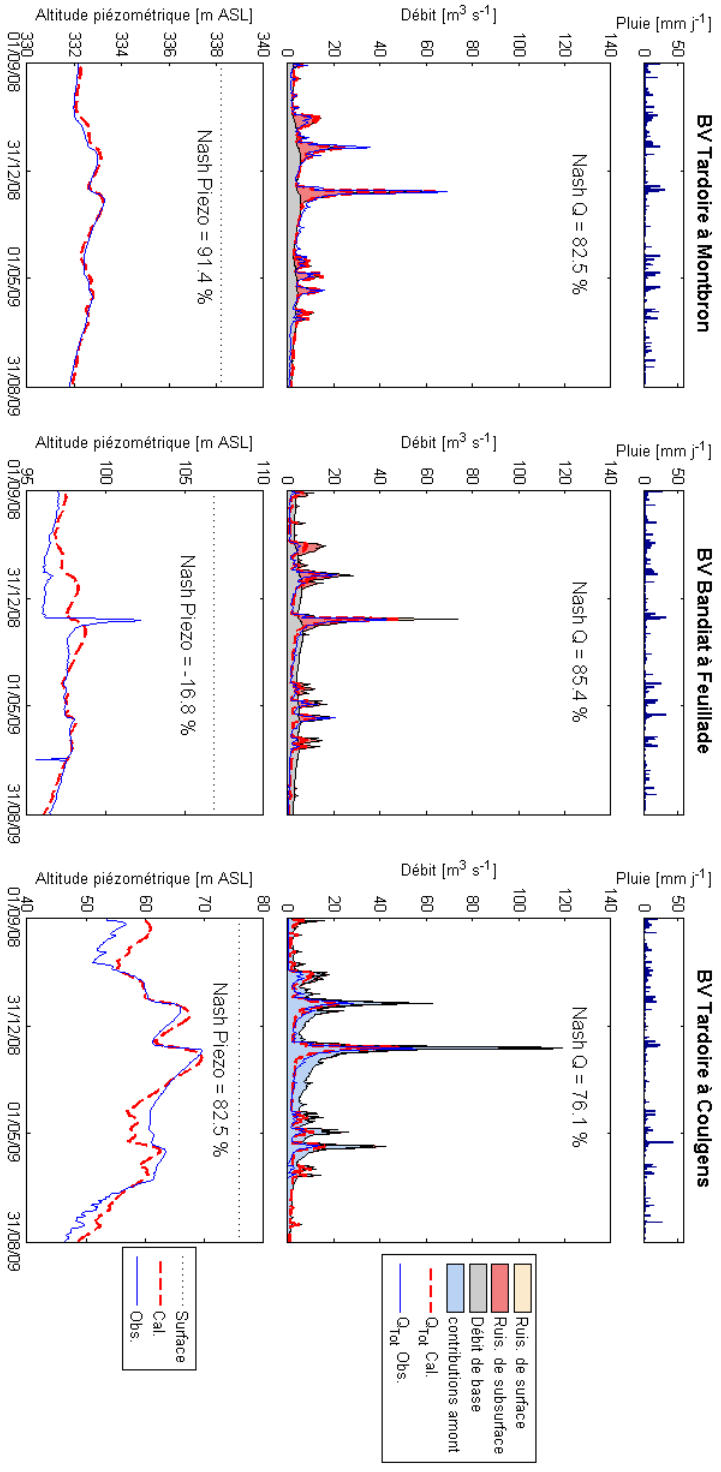


Illustration 46. Simulation sur le cycle hydrologique 2008-2009.

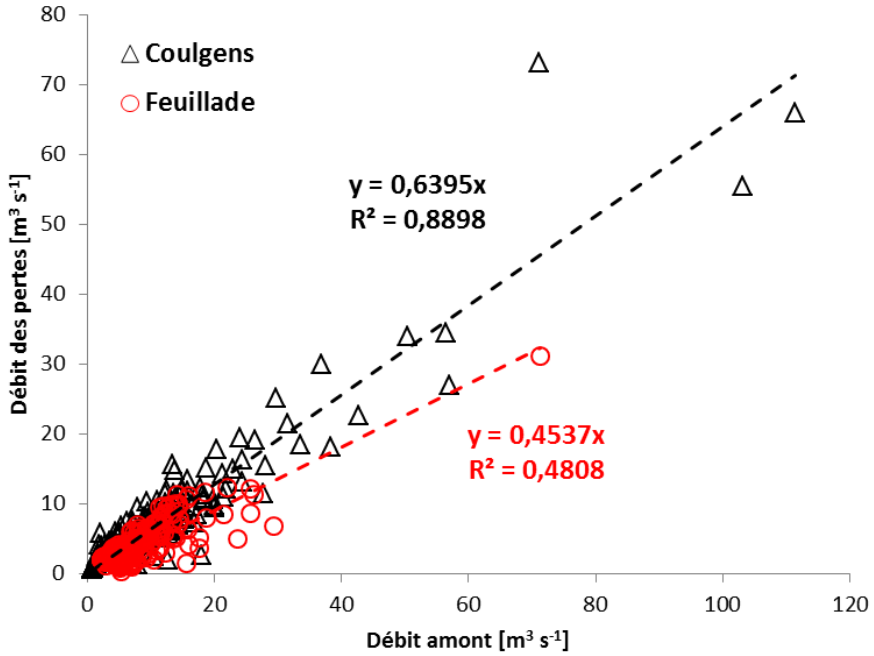


Illustration 47. Débit des pertes en fonction du débit amont et calcul des pertes du cours d'eau sur les tronçons Feuillade et Coulgens (cycle hydrologique 2008-2009).

Simulation de la crue quinquennale 2009

La simulation de la crue quinquennale (Illustration 48), à l'image d'un zoom sur le début de l'année 2009, illustre les conclusions amenées précédemment, et confirme les bonnes performances du modèle. Le coefficient des pertes pour Feuillade et Coulgens est de respectivement 35 % et 60 % des débits amont (Illustration 49).

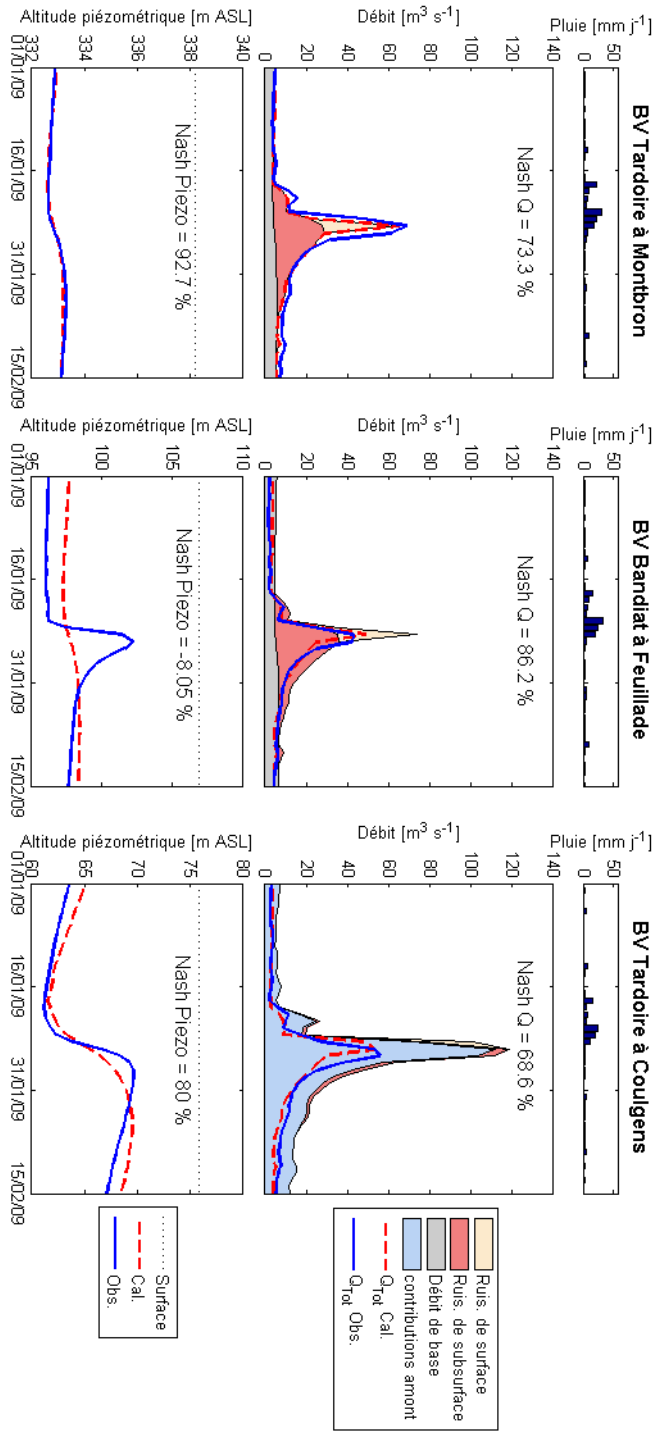


Illustration 48. Simulation de la crue quinquennale 2009 (janvier-février 2009).

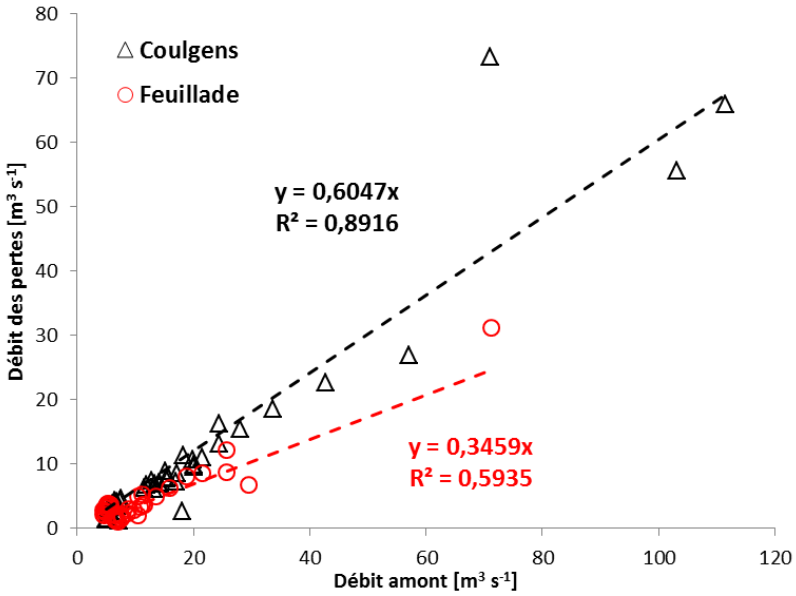


Illustration 49. Simulation des pertes lors de la crue quinquennale 2009 (janvier-février 2009).

4.4. INDICATEUR D'AIDE A LA VIGILANCE

4.4.1. Un indicateur piézométrique peu adapté pour la Tardoire

L'analyse du fonctionnement hydro(géo)logique du système de la Tardoire a montré que **les débits à Coulgens sont fortement contrôlés par le débit des pertes sur le tronçon**. Ce dernier étant proportionnel au débit amont (partie socle notamment), sans lien direct avec la piézométrie, **il n'y a pas d'effet de saturation du karst**, et donc pas d'effet de seuil sur le débit des pertes. Deux phénomènes peuvent expliquer ce comportement. D'une part, **le climat océanique de la zone donne des intensités de pluies journalières relativement faibles** (intensités maximales < 60 mm / j), ce qui ne permet pas de saturer le système lors d'un événement pluvieux. D'autre part, le **système est bien karstifié, le rendant suffisamment perméable en profondeur pour limiter les effets de saturation vers la surface**. **Ainsi, contrairement au système du Lez, la piézométrie n'est pas un indicateur adapté au système de la Tardoire.**

4.4.2. Propositions pour la vigilance

En concertation avec le SPC Littoral Atlantique, il n'existe pas à proprement parler de seuils de vigilance orange et rouge sur les tronçons du bassin de la Tardoire. Ceci est notamment dû au fort écrêtage des crues. Néanmoins, des enjeux existent notamment au niveau de la ville de La Rochefoucauld où des hauteurs d'eau à risque ont été enregistrées dans le passé.

Nous proposons dans ce cadre deux types d'outils d'aide à la vigilance. Un outil basé sur un suivi en temps réel des données hydrométriques pour une vigilance à moins de 24h, et une approche de modélisation pour une vigilance à plus de 24h.

Pour un suivi en temps réel :

Sur la base du fonctionnement hydrologique « relativement simple » du sous-bassin de Montbron sur le socle, nous proposons un suivi continu en temps réel des débits à cette station. Nous avons vu dans le paragraphe 4.2.1, que la propagation de l'onde était de 9,5 h en moyenne entre Montbron et Coulgens, et ce, de manière très constante selon les crues (contrairement à Feuillade et Coulgens). Au vu de la localisation de La Rochefoucauld sur le tronçon, il est alors envisageable de **définir un temps de 5 à 6 h entre Montbron et La Rochefoucauld pour la propagation de l'onde de crue. Cette durée permet d'anticiper les débits à La Rochefoucauld pour une prévision à moins de 24h**.

Pour une prévision à plus de 24h :

Nous proposons dans ce cas une modélisation type pluie-débit sur le bassin de la Tardoire à Coulgens. Deux approches peuvent être utilisées : soit celle développée dans cette étude, soit une approche spécifique dans le cas où le SPC Littoral Atlantique souhaiterait développer son outil de modélisation. Dans ce dernier cas, pour une mise en œuvre rapide, il semble préférable d'utiliser un modèle pluie-débit non spatialisé à l'échelle du bassin de la Tardoire à Coulgens, qui inclurait directement le débit des pertes calculé à partir des coefficients définis dans cette étude :

débit des pertes à Coulgens = (débit Montbron + débit Feuillade) * 64 %

4.4.3. Conclusion

L'étude du fonctionnement hydro(géo)logique du bassin de la Tardoire, et la modélisation des écoulements sur ce système karstique dit binaire ont permis de mettre en évidence le caractère « écrêteur » du karst sur les crues à Feuillade et à Coulgens. **Comme il n'existe pas de lien entre l'intensité des crues et l'état de saturation du karst, la piézométrie n'apparaît pas comme un indicateur adapté**. Par contre l'approche de modélisation hydrogéologique semi-spatialisée - développée dans cette étude - a permis de **quantifier les pertes abondantes** qui sont à l'origine des difficultés à simuler les débits sur le bassin versant de la Tardoire à l'aide de modèles hydrologiques classiques.

Concernant la prévision en temps réel, nous préconisons le suivi des débits à Montbron qui permet d'anticiper de 5 à 6h les débits à La Rochefoucauld.

Concernant la prévision à plus de 24h, nous proposons pour le SPC Littoral Atlantique en charge de la vigilance sur le tronçon règlementaire Bandiat-Tardoire, de tenir compte d'un coefficient de pertes qui est fonction des débits enregistrés aux stations de Montbron et Feuillade à l'amont.

5. Conclusion

Le fonctionnement des deux aquifères à composante karstique a été caractérisé dans le cadre de cette étude. Il a ainsi été montré que le système du Lez, grâce à la gestion active de la ressource mise en œuvre, est un très bon écrêteur de crue. Un indicateur karst a ainsi été défini selon la méthodologie mise en œuvre sur le système de Nîmes. Il s'agit des niveaux piézométriques mesurés directement dans le drain principal. Grâce à l'utilisation d'un modèle réservoir permettant de simuler les débits du fleuve, un second abaque s'utilisant conjointement à l'abaque de l'IK a été réalisé. Un outil a ainsi été fourni pour la prévision des crues sur le fleuve Lez, il prend en compte, le degré de saturation de l'aquifère et les prévisions de pluie (cumul et intensité). Cet outil sera utilisé par le SPC Méditerranée Ouest afin de réaliser la vigilance sur le tronçon réglementaire du Lez.

Concernant le bassin de la Tardoire, l'étude hydrogéologique a révélé que l'application de la méthode de l'IK n'était pas adaptée, le système karstique n'étant jamais à saturation. Deux raisons sont avancées pour expliquer ce phénomène, il y a d'abord les intensités limitées des précipitations (< 60 mm/j) et également la structure de l'aquifère caractérisée par une karstification importante associée à une capacité de stockage au niveau de la zone noyée suffisante pour limiter les effets de saturation vers la surface.

Ce système est caractérisé par des pertes importantes, posant des difficultés de simulation des débits à l'aide de modèles hydrologiques classiques. Afin de résoudre cette difficulté, une approche de modélisation hydrogéologique semi-spatialisée a été développée. Un coefficient de pertes fonction des débits enregistrés aux stations à l'amont a été défini. Une implémentation de cette fonction dans les modèles SPC est ainsi préconisée pour la prévision des débits. Enfin, concernant la prévision temps réel au niveau de la Rochefoucauld, nous préconisons le suivi en temps réel des débits à l'amont pour anticiper l'arrivée de l'onde de crue avec un déphasage de 5 à 6 h.

Pour les deux bassins karstiques étudiés, l'étude hydrogéologique réalisée a permis de définir l'outil le mieux adapté à la prévision des débits. Pour le système méditerranéen du Lez, l'IK est bien adapté. Par contre pour le système océanique de la Rochefoucauld une modélisation réservoir est préconisée.

6. Bibliographie

Borrell Estupina, V., Coustau, C., Jourde, H., Bouvier, C. 2008. Un modèle pluie-débit pour la prévision des crues sur un bassin karstique. Cas du Lez. Colloque SHF Prévisions hydrométéorologiques. Lyon 18 et 19 novembre 2008. Poster et Recueil des textes, 25-29

Bouvier, C., Delclaux, F. 1996. ATHYS : a hydrological environment for spatial modelling and coupling with a GIS. Proceedings HydroGIS96, Vienna, Austria, 19-28, IAHS publication n°235, 1996.

Coustau, M., Bouvier, C., Borrell-Estupina, V., Jourde, H. Flood modelling with a distributed event-based parsimonous rainfall-runoff model: case of the karstic Lez river catchment. Submitted to Journal of Hydrology 2011.

Diskin, M.H. et Nazimov, N., 1995. Linear reservoir with feedback regulated inlet as a model for the infiltration process. Journal of Hydrology, 172(1-4): 313-330.

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, 235-243, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.11.037.

Fleury, P., Raymond, M., Ayral, P.A., 2010. BRGM/RP-58286-FR BRGM/RP-58286-FR - Intégration de la composante "eaux souterraines karstiques" dans le système d'alerte crue de la Ville de Nîmes. Rapport "final".

Gaume, E., Livet, M., Desbordes, M., Villeneuve, J.P., 2004. Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. Journal of Hydrology. 286, 135–154.

Hayami, S., 1951. On the propagation of flood waves. Disaster Prevention Research Institute Bulletin, 1: 1-16.

Jourde, H., Roesch, A., Guinot, V., Bailly-Comte, V., 2007. Dynamics and contribution of karst groundwater to surface flow during Mediterranean flood. Environmental Geology 51, 725–730.

Karam, Y. 1989. Essais de modélisation des écoulements dans un aquifère karstique. Exemple de la source du Lez (Hérault France). Thèse. Montpellier, Université des sciences et techniques du Languedoc.

Larocque, M., 1997. Intégration d'approches quantitatives de caractérisation et de simulation des aquifères calcaires fissurés. Application à l'aquifère karstique de la Rochefoucauld (Charente, France). Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 247p.

Larocque, M., Razack, M., 1998. Synthèse hydrogéologique de l'aquifère karstique de La Rochefoucauld (Charente, France). Bilan des nouvelles connaissances. Hydrogéologie, 3, 35-45.

Lhomme, J., Bouvier, C., Perrin, J.L. 2004. Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchment. Journal of Hydrology. 299, 203-216.

Maidment, D.R. 1992. Handbook of Hydrology. David R. Maidment, editor in chief. ISBN 0-07-039732-5, McGraw-Hill.

Moussa, R. et Bocquillon, C., 1996. Algorithms for solving the diffusive wave flood routing equation. Hydrological Processes, 10(1): 105-123.

Roesch, A., et Jourde, H., 2006. Incidence d'une gestion active de la ressource en eau en milieu karstique sur le risque hydrologique. Exemple du fleuve Lez (Montpellier, France) GIRE3D congrès international (Marrakech, Maroc).

Rouiller D., 1987. Etude des systèmes karstiques de la Touvre et de la Lèche (Angoulême, Charente). Thèse de Doctorat, Université d'Avignon., 211p.

Royet P., Mériaux P, Folton N., Lavabre J., Arnaud P., 2005. Analyse de l'évènement pluviométrique des 6 et 8 septembre 2005 et comportement des barrages du PPCI. Rapport Cemagref. Département Ressources en Eau, usages et risques Unité de Recherche Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie, Octobre 2005.



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

Service géologique régional Languedoc-Roussillon
1039 rue de Pinville
34000 – Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 80