

Intégration de la composante « eaux souterraines karstiques » dans le système d'alerte crue de la Ville de Nîmes

d7-hta

.89 3740,46 -625.5

BRGM/RP-58286-FR

hit

de-hia

Juin 2010





Intégration de la composante « eaux souterraines karstiques » dans le système d'alerte de la Ville de Nîmes

Rapport « final »

BRGM/RP-58286-FR Juin 2010

> P. Fleury Avec la collaboration de M. Raymond

Vérificateur :

Nom : J-C. Maréchal

Approbateur :

Nom : M. Audibert

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 9001:2000.







Mots clés : inondation, karst, hydrogéologie, prévision, système d'alerte, Ville de Nîmes

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Fleury P., Raymond M. (2010) - Intégration de la composante « eaux souterraines karstiques » dans le système d'alerte de la Ville de Nîmes, Rapport final, Rapport BRGM RP-58286-FR, 174 p, 114 illustrations, 3 annexes.

© BRGM, 2010, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la convention de recherche et développement partagés avec la ville de Nîmes, le BRGM a pour objectif de « Caractériser et modéliser le fonctionnement de la composante eaux souterraines d'origine karstique en vue de son intégration dans le système d'alerte de la Ville de Nîmes » (projet PSP07LRO12). Ce présent document constitue le rapport final et présente ainsi une synthèse des travaux réalisés durant ce projet (juillet 2007 – avril 2010).

Lors des fortes crues, les cadereaux de la Ville de Nîmes sont alimentés par deux composantes : la première est appelée « composante ruissellement » et la seconde « composante karst ». La composante karst est constituée à la fois par des débordements de l'aquifère karstique et aussi par une augmentation du ruissellement induit par la saturation de l'aquifère karstique (refus à l'infiltration).

Le système d'alerte crue de la Ville de Nîmes nommé réseau ESPADA, a été mis en œuvre par Egis Eau. Il repose sur l'utilisation d'un modèle réservoir de type GR. Ce dernier intègre la composante ruissellement. Aussi afin d'améliorer la compréhension de la formation de cette composante, la **perméabilité** des sols et leur épaisseur ont été caractérisées à partir d'une étude spatialisée hydro-pédologique réalisée par l'Ecole des Mines d'Alès. Concernant la composante karst, responsable de l'essentiel des débits en période de fortes crues, cette dernière n'est pas directement explicitée dans le modèle Gr et pose le souci d'initialisation du modèle qui simule les débits en mode événementiel. C'est pourquoi, afin de s'affranchir de cette initialisation, le système karstique a été caractérisé par le biais d'indicateurs dits « indicateurs karsts » qui doivent permettre de caractériser l'évolution de la saturation de l'aquifère, saturation qui va conditionner l'apparition de la composante karst.

Ainsi, le réseau piézométrique mis en place (BRGM/RP-55836-FR) et le suivi réalisé depuis plusieurs années ont permis de caractériser le fonctionnement du système karstique et notamment son comportement lors des fortes précipitations (BRGM/RP-57767-FR). Ces études ont abouti à l'utilisation de la piézométrie à l'**Aven Mazauric** (Fontaine de Nîmes) pour la caractérisation de la saturation de l'aquifère. Ce point est ainsi considéré comme un « **Indicateur Karst** » du système.

Les études réalisées ont permis de **définir des seuils d'alerte** à partir des niveaux piézométriques de l'indicateur karst. Ces derniers sont définis à partir des observations réalisées sur les épisodes historiques. Trois niveaux d'alerte ont ainsi été définis, ils correspondent à (i) la **vigilance**, (ii) l'**alerte orange** et (iii) l'**alerte rouge**. Le seuil d'alerte orange correspond au moment où le karst est saturé et est associé à la mise en place de la composante karst. Le comportement de l'indicateur karst a été étudié et un modèle conceptuel de fonctionnement défini. Ce travail a permis de réaliser un modèle numérique de type modèle réservoir au pas de temps 15 minutes, développé à partir du logiciel Vensim. Il est constitué de deux modules : sol et karst. Ce dernier permet de simuler les évolutions piézométriques à Mazauric. A partir du modèle et des

seuils d'alerte un **abaque** « **Pluie-Piézométrie** » a été réalisé. Utilisé en temps réel, à partir de scénarios de prévisions météorologiques, il permet d'anticiper l'alerte, selon les trois valeurs seuils précédemment définies.

Aussi, afin de simuler la composante karst dans le modèle Gr utilisé dans le réseau Espada, un modèle réservoir a été réalisé à partir du logiciel Vensim au pas de temps du quart d'heure. Ce modèle a été réalisé pour chaque station des cadereaux suivis, il est constitué des deux modules précédents à savoir, d'un module sol et karst (représentant les fluctuations de l'indicateur karst) et d'un module cadereau. L'alimentation du réservoir cadereau permettant de reproduire les débits de la composante karst est fonction du remplissage du réservoir karst. Ainsi lorsque le seuil de saturation du karst est atteint (correspondant à la saturation et au débordement) le réservoir cadereau est alimenté. Afin de s'affranchir des changements de condition sur les sous bassins versants, dus à la mise en place échelonnée dans le temps des bassins de stockage, le modèle GR a été adapté afin de fournir des hydrogrammes des composantes ruissellement et karst en l'absence de bassin de rétention. Les conditions initiales sont alors identiques pour les hydrogrammes calculés par le modèle Gr sur les différentes crues. Les paramètres du modèle ont étés calés afin de reproduire les débits de la composante karst calculés pour l'ensemble des crues selon la même condition initiale, c'est-à-dire en l'absence de bassin de rétention. Ces derniers ont étés calculés et fournis par Egis-Eau. Les résultats sont de bonne qualité validant le modèle. Les paramètres de ce modèle serviront par la suite à compléter le modèle Gr du réseau ESPADA, ce qui permettra de simuler les débits totaux dans les cadereaux en prenant comme initialisation la valeur de la piézométrie simulée de l'indicateur karst avant l'épisode de pluie.

Le modèle réalisé à partir du logiciel Vensim, a par la suite été complété d'un module permettant de simuler la composante ruissellement. Les paramètres de ce dernier sont calés sur les hydrogrammes de la composante ruissellement calculés sans bassins de rétention (fournis par Egis-Eau). Ce modèle complété permet de retranscrire l'évolution des débits totaux pour chaque station à l'aval des cadereaux, au pas de temps du quart d'heure. Ce modèle a ainsi été utilisé à partir de différents scénarios de précipitation (durée de l'épisode compris entre 1 et 24 h, cumul de 100 à 600 mm). Les résultats de ces simulations ont servis à la réalisation par cadereau d'un **abaque** « **Pluie – Débit** », qui permet, une fois le karst saturé (seuil de l'alerte orange), de prédire à partir des scénarios de pluie (durée, cumul) l'évolution des débits.

Ainsi, ce projet a conduit à la définition d'un indicateur karst permettant d'évaluer le risque de crue associé à un épisode de pluie. Un modèle réservoir a été réalisé, il permet de simuler les débits de la composante karst en fonction du comportement de l'indicateur karst. Ce modèle a par la suite été implémenté dans le modèle GR du réseau ESPADA. La modélisation du comportement du système à également abouti à la réalisation d'outils simples de type abaques, permettant de prédire en fonction de la prévision météorologique (i) le type de risque associé (vigilance, alerte orange, alerte rouge), et aussi (ii) le maximum de débit possible dans les cadereaux.

Sommaire

In	troduction	.13
1.	Modélisation des débits de la composante karst en fonction de la saturation de l'aquifère	.15
	1.1. MODELISATION DE LA PIEZOMETRIE – INDICATEUR KARST 1.1.1.Réservoir sol 1.1.2.Réservoir karst	.15 .17 .19
	 1.2. MODELISATION DES DEBITS DE LA « COMPOSANTE KARST DANS LE CADEREAU » - DEVELOPPEMENT SUR LE CADEREAU D'ALES	.23 .25 .27 .30 .32
	 1.3. APPLICATION AUX AUTRES CADEREAUX. 1.3.1.Cadereau de Pondre 1.3.2.Cadereau de Valdegour 1.3.3.Cadereau d'Uzès 1.3.4.Cadereau de Valladas 	.34 .34 .36 .38 .46
2.	Abaque pour la définition de l'alerte à partir de l'indicateur karst	.49
	2.1. OBJECTIF	.49
	 2.2. UTILISATION DE L'ABAQUE 2.2.1. Initialisation du réservoir sol 2.2.2. Tarissement du système karstique 2.2.3. Initialisation du système karstique 2.2.4. Exemples d'utilisation de l'abaque à partir des épisodes importants 	.50 .50 .51 .51 .52
	2.3. CONCLUSION SUR L'UTILISATION DE L'ABAQUE « PLUIE - PIEZOMETRIE »	.59
3.	Réalisation d'abaques (« Pluie – Débit ») pour l'évaluation des débits dans le cadereaux en fonction de la prévision météorologique	es .61
	3.1. OBJECTIF	.61

3.2. COMPOSANTES RUISSELLEMENT61	
3.2.1. Composante ruissellement cadereau Alès (station Cimpro)63	
3.2.2. Composante ruissellement cadereau Pondre64	
3.2.3. Composante ruissellement cadereau Valdegour65	
3.2.4. Composante ruissellement cadereau Uzès (VanDyck total)	
3.2.5.Composante ruissellement cadereau de Valladas67	
3.3. UTILISATION DU MODELE COMPLETE DES COMPOSANTES RUISSELLEMENT POUR LA REALISATION D'ABAQUES « PLUIE – DEBIT »67	7
3.4. TEST DE SENSIBILITE	
3.4.1.Echéance à 4 h68	
3.4.2. Conclusion tests de sensibilité90	
3.5. REALISATION DES ABAQUES90	
3.6. UTILISATION DES ABAQUES97	
3.6.1. Episode du 3 octobre 1988 à Alès98	
3.6.2. Episode du 3 octobre 1988 à Uzès	
3.6.3. Episode du 8 au 9 septembre 2002 à Alès101	
3.6.4. Episode du 8 au 9 septembre 2002 à Uzès 102	
3.6.5. Episode du 6 au 8 septembre 2005 à Alès104	
3.6.6.Episode du 6 au 8 septembre 2005 à Uzès106	
4. Intégration de la composante karst dans le modèle Gr ESPADA109	
4.1. ELABORATION DES HYDROGRAMMES DE CALAGE POUR LE MODELE DE	
REPRESENTATION DU KARST109	
4.1.1. Présentation de la modélisation mise en place pour ESPADA 109	
4.1.2. Méthodologie110	
4.2. TESTS DES MODELES SUR LA TOPOLOGIE ESPADA	
4.2.1. Tests des modèles sur la topologie ESPADA111	
4.2.2. Tests de modification des modèles ESPADA 115	
Conclusion117	
Bibliographie	

Liste des illustrations

Illustration 1. Carte de localisation des cadereaux et station de mesure (source : Ville de Nîmes)	14
Illustration 2. Localisation des lames d'eau ESPADA	16
Illustration 3. Piézométrie à Mazauric	17
Illustration 4. Structure d'un réservoir	18
Illustration 5. Structure du réservoir sol	18
Illustration 6. Evolution de la hauteur d'eau dans le réservoir sol	19
Illustration 7. Débit et piézométrie à Mazauric du 6 au 8 septembre 2005	20
Illustration 8. Structure du réservoir karst	21
Illustration 9. Résultats graphiques des niveaux à Mazauric calculés par le module kast	22
Illustration 10. Structure du modèle « composante karst dans le cadereau »	24
Illustration 11. Hydrogrammes de la composante karst à la station d'Anduze, simulés par les modèles GR ESPADA et modèle « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales	26
Illustration 12. Hydrogrammes de la composante karst à Cimpro tot simulés par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) pour la crue de mai 1998 avec 10 % de précipitation en plus ou en moins	28
Illustration 13. Hydrogrammes de la composante karst à Cimpro tot, simulés par les modèlse GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales	29
Illustration 14. Hydrogrammes de la composante karst pour la branche Camplanier à Cimpro, simulés par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales	31
Illustration 15. Hydrogrammes simulés, de la composante karst de Anduze à Cimpro, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales	33
Illustration 16. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau de la Pondre, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales	35
Illustration 17. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau de Valdegour, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales	37
Illustration 18. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau de d'Uzès, station Engances, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales	39
Illustration 19. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau de d'Uzès, station Engances à Oliveraie, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales	41

Illustration 20. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau de d'Uzès, station Oliveraie à VanDyck, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales	43
Illustration 21. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau d'Uzès, station VanDyck, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales	45
Illustration 22. Résultat des modélisation à Valladas pour l'épisode de septembre 2005 avec 10 et 20 % de pluie en moins	47
Illustration 23. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau de Valladas, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales	48
Illustration 24. Abaque pour la définition de l'alerte à partir de l'indicateur karst (piézométrie à Mazauric)	50
Illustration 25. Exemple d'utilisation de l'abaque pluie - piézométrie	52
Illustration 26. Abaque pour la crue d'octobre 1988	53
Illustration 27. Abaque pour la crue de mai 1998	55
Illustration 28. Abaque pour la crue de septembre 2002	56
Illustration 29. Abaque pour la crue de novembre 2004	57
Illustration 30. Abaque pour la crue de septembre 2005	59
Illustration 31. Structure des réservoirs ajoutés au modèle permettant de calculer les composantes ruissellement et ruissellement urbain	62
Illustration 32. Débit des composantes ruissellement et ruissellement urbain sur le cadereau d'Alès, calculé par le modèle ESPADA et le modèle Vensim sur les quatre crues principales	63
Illustration 33. Débit des composantes ruissellement et ruissellement urbain sur le cadereau de Pondre, calculé par le modèle ESPADA et le modèle Vensim sur les quatre crues principales	64
Illustration 34. Débit des composantes ruissellement et ruissellement urbain sur le cadereau de Valdegour, calculé par le modèle ESPADA et le modèle Vensim sur les quatre crues principales	65
Illustration 35. Débit des composantes ruissellement et ruissellement urbain sur le cadereau d'Uzès (à Van Dyck), calculé par le modèle ESPADA et le modèle Vensim sur les quatre crues principales	66
Illustration 36. Débit des composantes ruissellement et ruissellement urbain sur le cadereau de Valladas, calculé par le modèle ESPADA et le modèle Vensim sur les quatre crues principales	67
Illustration 37. Cumul horaire des précipitations en mm pour la pluie homogène sur 4 heures pour les 4 cumuls testés	70
Illustration 38. Cumul des précipitations en mm sur 4 h pour les épisodes d'octobre 1988, centennal et extrême	71
Illustration 39. Différentes structures de pluie utilisées pour le test de sensibilité pour un cumul de 100 mm	72

Illustration 40. Intensité maximale horaire en mm des trois répartitions observées en octobre 1988 et septembre 2005 pour les différents cumuls	73
Illustration 41. Débits observés pour un cumul de 100 mm à partir des différentes structures de pluie	75
Illustration 42. Débits observés pour un cumul de 200 mm à partir des différentes structures de pluie	76
Illustration 43. Débits observés pour un cumul de 300 mm à partir des différentes structures de pluie	77
Illustration 44. Débits observés pour un cumul de 400 mm à partir des différentes structures de pluie	77
Illustration 45. Récapitulatif des maximums de débit pour le cadereau d'Alès	78
Illustration 46. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Pondre	79
Illustration 47. Débits observés au cadereau de Pondre pour les 4 cumuls à partir des différentes structures de pluie	80
Illustration 48. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valdegour	82
Illustration 49. Débits observés au cadereau de Valdegour pour les 4 cumuls à partir des différentes structures de pluie	83
Illustration 50. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Uzès	85
Illustration 51. Débits observés au cadereau d'Uzès pour les 4 cumuls à partir des différentes structures de pluie	86
Illustration 52. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valladas	88
Illustration 53. Débits observés au cadereau de Valladas pour les 4 cumuls à partir des différentes structures de pluie	89
Illustration 54. Abaque pluie-débit sur le cadereau d'Alès à Cimpro	92
Illustration 55. Abaque pluie-débit sur le cadereau de Pondre	93
Illustration 56. Abaque pluie-débit sur le cadereau de Valdegour	94
Illustration 57. Abaque pluie-débit sur le cadereau d'Uzès à Van-Dyck	95
Illustration 58. Abaque pluie-débit sur le cadereau de Valladas	96
Illustration 59. Abaque pluie – piézométrie pour Alès et Valladas (sol = 50 mm)	97
Illustration 60. Abaque pluie – piézométrie pour Pondre et Uzès (sol = 80 mm)	98
Illustration 61. Utilisation couplée des deux abaques pour l'épisode d'octobre 1988 au cadereau d'Alès (station Cimpro)	99
Illustration 62. Utilisation couplée des deux abaques pour l'épisode d'octobre 1988 au cadereau d'Uzès (station Van-Dyck)	100
Illustration 63. Utilisation couplée des deux abaques pour l'épisode de septembre 2002 au cadereau d'Alès (station Cimpro)	102
Illustration 64. Utilisation couplée des deux abaques pour l'épisode de septembre 2002 au cadereau d'Alès (station Cimpro)	103
Illustration 65. Utilisation couplée des deux abaques pour le doube épisode de septembre 2005 au cadereau d'Alès (station Cimpro)	105

Illustration 66. Utilisation couplée des deux abaques pour l'épisode du 8 septembre 2005 au cadereau d'Uzès (station Van-Dyck)	107
Illustration 67. Découpage des bassins versants des cadereaux pour le système ESPADA	110
Illustration 68. Résultats graphiques des tests mis en œuvre à Cimpro (épisodes d'octobre 1988, mai 1998 et septembr 2002)	113
Illustration 69. Résultats graphiques des tests mis en œuvre à Cimpro (épisode de septembre 2005)	114
Illustration 70. Quantiles établis par la méthode SHYREG pour la Ville de Nîmes (Cémagref, 2005)	123
Illustration 71. Intensité maximale horaire en mm des deux répartitions observées en octobre 1988 et septembre 2005 pour les différents cumuls	128
Illustration 72. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Alès (8 h)	130
Illustration 73. Débits observés au cadereau d'Alès pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	131
Illustration 74. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Pondre (8 h)	132
Illustration 75. Débits observés au cadereau de Pondre pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	133
Illustration 76. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valdegour (8 h)	134
Illustration 77. Débits observés au cadereau de Valdegour pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	135
Illustration 78. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Uzès (8 h)	136
Illustration 79. Débits observés au cadereau d'Uzès pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	137
Illustration 80. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valladas (8 h)	138
Illustration 81. Débits observés au cadereau de Valladas pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	139
Illustration 82. Intensité maximale horaire en mm des deux répartitions observées en octobre 1988 et septembre 2005 pour les différents cumuls	141
Illustration 83. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Alès (12 h)	142
Illustration 84. Débits observés au cadereau d'Alès pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	143
Illustration 85. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Pondre (12 h)	144
Illustration 86. Débits observés au cadereau de Pondre pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	145
Illustration 87. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valdegour (12 h)	146
Illustration 88. Débits observés au cadereau de Valdegour pour les 6 cumuls à partir des différentes structures de pluie	147
Illustration 89. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Uzès (12 h)	148

Illustration 90. Débits observés au cadereau d'Uzès pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	149
Illustration 91. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valladas (12 h)	150
Illustration 92. Débits observés au cadereau de Valladas pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	151
Illustration 93. Intensité maximale horaire en mm des deux répartitions observées en octobre 1988 et septembre 2005 pour les différents cumuls	153
Illustration 94. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Alès (24 h)	153
Illustration 95. Débits observés au cadereau d'Alès pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	154
Illustration 96. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Pondre (24 h)	155
Illustration 97. Débits observés au cadereau de Pondre pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	156
Illustration 98. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valdegour (24 h)	157
Illustration 99. Débits observés au cadereau de Valdegour pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	158
Illustration 100. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Uzès (24 h)	159
Illustration 101. Débits observés au cadereau d'Uzès pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	160
Illustration 102. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valladas (24 h)	161
Illustration 103. Débits observés au cadereau de Valladas pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie	162
Illustration 104. Délimitation des bassins versants (en rouge) des différentes stations de jaugeage sur la carte topographique numérique	166
Illustration 105. Délimitation du bassin d'alimentation géologique (en jaune) de la Fontaine de Nîmes sur la carte géologique numérique	166
Illustration 106. Vérification des informations sur le terrain et intégration des données issues des cartes topographiques et géologiques au SIG	167
Illustration 107. Intégration des données de Mr. Gareli au système d'information numérique	168
Illustration 108. Intégration des observations de terrain au système d'informations numérique	169
Illustration 109. Intégration du réseau piézométrique au système d'informations numérique	169
Illustration 110. Informations complémentaires sur le réseau de mesure, accessible sous le système d'information numérique	170
Illustration 111. Informations complémentaires accessibles sous le système d'information numérique	171
Illustration 112. Informations complémentaires accessibles dans la table « Photos_geologie »	172
Illustration 113. Informations présentes sur le SIG (fond : carte topographique)	173

Illustration 114. Informations présentes sur le SIG (fond : carte géologique) 174

Liste des annexes

Annexe 1 SHYREG.	Evaluation de la récurence des épisodes de pluie à partir de la méthode	121
Annexe 2	Tests de sensibilité pour les échéances à 8, 12 et 24 h pour les 5 cadereaux	125
Annexe 3	Présentation du SIG	163

Introduction

Ce rapport présente les études réalisées par le BRGM en partenariat avec Egis-Eau et l'Ecole des Mines d'Alès. Le travail effectué a pour objectif la caractérisation du comportement de l'aquifère karstique lors des fortes crues et sa contribution en termes de débit dans les cadereaux pour ces épisodes. Les précédentes études hydrogéologiques réalisées ont en effet montré que la saturation de l'aquifère karstique jouait un rôle prépondérant dans la genèse des crues survenant dans les cadereaux. Ainsi lorsque le karst est saturé, il se produit simultanément des débordements localisés au niveau de sources de trop plein (boulidous par exemple), mais aussi une augmentation du ruissellement induit par un refus à l'infiltration de l'aquifère karstique. Ces deux phénomènes sont ainsi identifiés sous le terme de **composante karst**.

Ainsi, afin de caractériser les débits issus de cette composante karst, il est nécessaire dans un premier temps de caractériser la saturation de l'aquifère karstique. C'est pourquoi, un réseau piézométrique a été mis en place dans le cadre de ce projet, constitué d'au moins un ouvrage à proximité de chaque cadereau. La saturation peut ainsi être définie à partir de points représentatifs de l'état de remplissage de l'aquifère, identifiés sous l'appellation d'**Indicateur Karst**.

Du fait de l'absence de crue significative sur la période d'étude (septembre 2007 – avril 2010) le nouveau réseau mis en place s'est malheureusement révélé inexploitable. C'est pourquoi, les chroniques anciennes ont été utilisées pour définir l'évolution de la saturation de l'aquifère. Le site de **Mazauric** a ainsi été retenu comme Indicateur Karst. Ce dernier va être utilisé dans un but de (i) caractérisation du fonctionnement de la composante karst et des débits associés, (ii) d'anticipation de l'alerte mais aussi de (iii) mise en place d'outil d'aide à la décision. Pour ce faire les tâches suivantes doivent être réalisées, elles sont présentées par la suite dans ce rapport :

- Modélisation des débits de la composante karst en fonction de la saturation de l'aquifère
- Réalisation d'un abaque « Pluie Piézométrie » pour la définition de l'alerte
- Réalisation d'un abaque « Pluie Débit » pour l'évaluation des débits dans les cadereaux

L'ensemble des travaux ont étés réalisés sur les cadereaux d'Alès, Pondre, Valdegour, Uzès et Valladas. Une carte de localisation de ces cadereaux est fournie ci-après (Illustration 1).



Illustration 1. Carte de localisation des cadereaux et station de mesure (source : Ville de Nîmes)

La dernière partie de ce travail (chapitre 4) présente les résultats de l'intégration du modèle réalisé au modèle Gr utilisé dans le réseau ESPADA. Ces travaux ont étés réalisés puis synthétisés par Egis-Eau.

Enfin, le SIG réalisé dans le cadre de ce projet synthétisant les informations de terrain, est fournit sur Cdrom. Il est présenté à l'annexe 3.

1. Modélisation des débits de la composante karst en fonction de la saturation de l'aquifère

Initialement, le modèle ESPADA permettait de reproduire la composante karst, mais nécessitait une initialisation du modèle avant chaque épisode de crue. Or cette initialisation résultait d'un calage et non pas de données physiques mesurables ou observables sur le terrain. C'est pourquoi, cette initialisation rend l'utilisation du modèle difficile en temps réel notamment en période d'alerte. Afin de s'affranchir de cette initialisation, il est devenu nécessaire d'intégrer l'évolution de la saturation de l'aquifère karstique et du sol. Ainsi, un suivi de l'aquifère karstique a été mis en place via la réalisation de piézomètres. Une modélisation prenant en compte l'état de saturation de cet aquifère à partir des mesures de terrain et du sol est entreprise. Cette modélisation a été réalisée à partir d'un calage sur les hydrogrammes des différentes composantes, à savoir ruissellement urbain, rural et composante karts, calculés par Egis Eau pour les crues majeures (octobre 1988, mai 1998, septembre 2002 et septembre 2005).

La réalisation de bassins de stockage s'est faite de façon échelonnée depuis les années 1990. Afin de travailler sur les différentes crues avec des conditions comparables, les calculs des différents hydrogrammes dans le modèle GR ESPADA ont été faits sans incidence des bassins de stockage.

1.1. MODELISATION DE LA PIEZOMETRIE – INDICATEUR KARST

Le site de l'aven Mazauric ou source de la Fontaine de Nîmes est l'exutoire principal du système karstique. Les variations observées sont représentatives du comportement de l'aquifère karstique et de sa saturation. D'un point de vue régional, le comportement en ce point est représentatif du karst nîmois qui englobe plus spécifiquement les bassins versants des différents cadereaux. La source de la fontaine de Nîmes appartient au bassin versant du cadereau d'Alès. Il a par ailleurs été montré dans les précédents rapports (RP-57767-FR et RP-55558-FR) que les piézomètres connectés au réseau de drainage de la zone noyée présentent des variations comparables avec toutefois des amplitudes différentes. L'information de la piézométrie à Mazauric est ainsi intégratrice du comportement de l'ensemble du bassin d'alimentation du karst. C'est pourquoi ce site a été retenu comme **indicateur karst** pour caractériser le remplissage et la saturation de l'aquifère ainsi que les débordements engendrés.

La piézométrie à la Fontaine de Nîmes est suivie en continu par les services techniques de la Ville, tout comme la piézométrie à l'aven Mazauric par le Brgm. Le site a été instrumenté en novembre 1998. Cette chronique est caractérisée par une longue durée et présente des données lors de la forte crue de septembre 2005, mais aussi lors de crues d'importance moindre (novembre 2004 par exemple). Concernant la crue de septembre 2002 l'appareil de mesure était défaillant, il n'y a donc pas eu de mesures durant la crue. Aussi, le suivi en direct de l'indicateur karst est un atout pour ce projet car il permet d'évaluer le degré de remplissage de l'aquifère. L'avantage du

suivi en direct de la piézométrie, est qu'en période de crise la saturation de l'aquifère en temps réel couplée aux résultats issus du travail de modélisation réalisé dans le cadre de ce projet permettra d'optimiser l'anticipation des débordements.

Ainsi un modèle réservoir appelé **«module piézométrie »** a été mis en place pour reproduire les variations piézométriques à Mazauric. Il est développé au **pas de temps du quart d'heure** à l'aide du logiciel simulateur de système **Vensim**. Les données d'entrée du modèle sont la pluie. La pondération des lames d'eau pour la Fontaine de Nîmes a été calculée par Egis Eau à partir de la délimitation du bassin d'alimentation et de la localisation des différentes lames d'eau (Illustration 2). Les différents poids sont :

- UZAM (Uzès amont) : 0,07 ;
- UZMO (Uzès moyen) : 0,07 ;
- UZAV (Uzès aval) : 0,03 ;
- ALMO (Alès moyen) : 0,13 ;
- POMO (Pondre moyen) : 0,25 ;
- ALAM (Alès amont) : 0,45.



Illustration 2. Localisation des lames d'eau ESPADA

Cette pondération va ainsi être utilisée pour définir les précipitations lors des quatre crues principales. Pour la période 2007-2009 ces lames d'eau n'ont pas été calculées

par Egis Eau, c'est pourquoi, en première approximation, les données des stations d'Anduze, Bonfa et Uzès ont été utilisées avec chacune 1/3 du poids total.

1.1.1. Réservoir sol

L'analyse des chroniques de précipitations et niveaux d'eau a montré que l'amplitude des variations piézométriques peut être identique pour des épisodes associés à des précipitations très différentes. A titre d'exemple trois épisodes récents sont analysés, tous caractérisés par une augmentation de la piézométrie de 0,8 m. Il s'agit de septembre - octobre 2007, novembre 2007 et décembre 2008 (Illustration 3). Ils font suite à respectivement 110, 90 et 60 mm de précipitation. Le premier épisode a eu lieu après une longue période d'étiage avec seulement 25 mm de précipitation en 3 mois, le second survient après 30 mm de précipitation le mois précédent et le dernier a eu lieu en condition de hautes eaux avec 70 mm de précipitations au cours des deux semaines précédentes.

Ce point met en évidence la nécessité de prendre en compte la saturation des premiers horizons du sol et du sous-sol, ces derniers permettant d'intercepter une partie des précipitations. Après calcul, la hauteur moyenne de pluie ne participant pas à la crue à Mazauric lorsque le sol est sous-saturé, a été évaluée à 50 mm. Dans la suite de cette étude ce fonctionnement sera simplifié et modélisé de façon simple à l'aide d'un réservoir appelé « sol » caractérisé par une hauteur d'eau permettant de reproduire les phénomènes d'interception d'une partie des précipitations.



Illustration 3. Piézométrie à Mazauric

Le réservoir appelé « réservoir sol » est utilisé en amont du modèle, il permet après les périodes d'étiages d'intercepter une partie des précipitations, qui de ce fait n'alimentent pas l'aquifère karstique. La capacité de ce réservoir a été définie par calage et vaut 50 mm. Après une période d'étiage, les 50 premiers mm de pluie servent à le remplir et ne participent pas à la crue. A l'inverse s'il y a eu des précipitations conséquentes les jours qui ont précédé un événement, alors le réservoir est saturé, et lors des précipitations supplémentaires, le réservoir n'est plus en mesure de stocker de l'eau.

Les nouvelles précipitations participent alors à la recharge de l'aquifère, on parlera alors de « pluie efficace ».

L'utilisation d'une loi de vidange linéaire de type **loi de Maillet** (Illustration 4) s'est révélée efficace pour reproduire ces phénomènes d'interception des pluies.



Illustration 4. Structure d'un réservoir

Avec :

- Ht1 = Ht0 + Pluie Hsortant ;
- H la hauteur dans le réservoir ;
- Hsortant = K * H, avec K un paramètre calé assimilé au coefficient de vidange du réservoir.

La structure du réservoir sol est schématisée dans l'Illustration 5.



Illustration 5. Structure du réservoir sol

Hréservoir sol est la hauteur d'eau dans le réservoir sol. Hvidange sol est la hauteur d'eau évacuée par le réservoir, conceptuellement, cette hauteur correspond à l'évapotranspiration réelle.

Un exemple des variations du niveau dans le réservoir est fourni Illustration 6 pour la période d'octobre 2004 à juillet 2006. Ce dernier montre qu'avant la crue de septembre 2005 faisant suite à un étiage de plus de 8 mois, les niveaux dans le réservoir sol étaient au plus bas, permettant ainsi d'écrêter les 50 premiers mm de pluie. Pour la crue de novembre 2004, le réservoir étant saturé l'ensemble des précipitations a participé à la recharge de l'aquifère et ainsi à la crue.



Illustration 6. Evolution de la hauteur d'eau dans le réservoir sol

Les paramètres calés du modèle réservoir sol sont les suivants :

- Ksol = 0,0003 ;
- Hmax réservoir sol= 0,05 m ;
- Si Hréservoir sol > 0,05 m alors Pluie efficace = Pluie, sinon Pluie efficace = 0.

1.1.2. Réservoir karst

Ce réservoir va permettre de reproduire les variations de la piézométrie observée à Mazauric. Il est alimenté par la pluie efficace. La structure du réservoir est schématisée Illustration 4, et est caractérisée par une loi de Maillet. Le modèle simule ainsi les variations de niveau d'eau dans le réservoir, la valeur du coefficient de vidange (Kkarst) est déduite d'un calage. La hauteur Hsortant karst est évacuée du système, elle correspond conceptuellement au débit alimentant la Fontaine et les autres sorties du système (sources de trop plein, petites sources, alimentation souterraine de la nappe de la Vistrinque ...). La piézométrie est ensuite calculée à partir du niveau dans

le réservoir (Hkarst), d'une porosité (déduite d'un calage) et d'une valeur nommée « niveau de base » correspondant « à la piézométrie dite du niveau de base », selon la formule :

Piézométrie = Niveau de base + Hkarst / porosité.

Le niveau de base observé sur la plupart des cycles hydrologiques est égal à 51,1 m. Lors de l'étiage extrême de 2004-2005 faisant suite à 8 mois d'étiage, la piézométrie descend en deçà de cette valeur. Dans le cadre de ce travail une valeur homogène du niveau de base égale à 51,1 m a été testée en première approximation. La modélisation s'est révélée adaptée sur la période 1998-2009 (y compris l'épisode de septembre 2005), les paramètres calés ont été conservés.

Les premières simulations utilisant un modèle simple (alimentation par 100% de la pluie efficace et coefficient de vidange homogène) se sont révélées inadaptées. En effet, il n'était pas possible de reproduire convenablement, à la fois les augmentations piézométriques lors des petites crues et l'augmentation lors de la crue de septembre 2005. Une bonne représentation de l'événement de septembre 2005 se traduisait par une large sous-estimation des petites crues et inversement. Le système semble donc présenter une non linéarité dans son fonctionnement, ce qui est communément observé dans le cas des aquifères karstiques. Aussi l'analyse des débits classés réalisée en 2006 (BRGM/RP-54723-FR), révèle qu'à partir de 13 à 14 m³/s le système évacue moins facilement les eaux. Ce fonctionnement doit être relié à la mise en fonction de trop plein associé à un « refus partiel » à l'infiltration du fait de la saturation de l'aquifère. Ce débit correspond à une piézométrie d'environ 1,7 m (Illustration 7) soit un niveau de 52,45 m NGF (= 54,15 - 1,7).



Illustration 7. Débit et piézométrie à Mazauric du 6 au 8 septembre 2005

La valeur « hauteur seuil karst » est ajoutée au modèle karst. Ainsi lorsque le niveau d'eau dans le réservoir karst atteint 52,45 m, alors une part moins importante de la pluie efficace vient recharger ce réservoir. Après calage une valeur de 30 % de la pluie

efficace donne de bons résultats. Conceptuellement cette hauteur Hseuil karst correspond à la hauteur de saturation de l'aquifère karstique. A partir du moment où ce seuil est atteint, une plus faible partie des précipitations peuvent s'infiltrer et continuer à recharger l'aquifère. Ce phénomène implique aussi une **augmentation de la part du ruissellement**. En parallèle, des **débordements locaux du karst** peuvent se produire sur le bassin d'alimentation. Ces deux phénomènes ont été identifiés sous l'appellation **composante karst**. Ainsi, la structure du réservoir karst est schématisée dans l'Illustration 8.



Illustration 8. Structure du réservoir karst

Les résultats concernant la crue de septembre 2005 présentés Illustration 9, révèlent que globalement les variations sont bien rendues, à l'exception de la fin du second tarissement. En effet ce tarissement est caractérisé par un bombement sur la chronique mesurée qui n'est pas représenté sur la chronique simulée. Ce comportement n'a pas été observé sur les autres crues de moindre importance, si bien qu'il semble qu'un fonctionnement particulier se mette en place pour des épisodes extrêmes. La vidange des bassins de rétention au travers du karst via des avens notamment et l'apport d'eau de la Fontaine de Nîmes en provenance des zones de débordement sont probablement responsables de ces valeurs piézométriques plus élevées. Ce comportement particulier n'a pas été représenté par le modèle faute de données et informations de terrain permettant d'expliquer les phénomènes mis en jeux. Aussi, bien que le modèle semble relativement correct, il faut noter l'existence d'une incertitude quant aux résultats. Cette dernière est d'environ 10 cm.

Ainsi, le modèle karst développé permet de reproduire les grandes tendances des variations piézométriques à la Fontaine de Nîmes, à la fois pour la crue de septembre 2005 mais aussi pour les autres crues secondaires, comme celle de novembre 2004 (Illustration 9). Cette simulation est basée sur le modèle conceptuel de fonctionnement et est caractérisé par une évolution du système lorsque la piézométrie à Mazauric atteint 52,4 – 52,5 m NGF.



Illustration 9. Résultats graphiques des niveaux à Mazauric calculés par le module kast

Les paramètres calés du modèle sont les suivants :

- Niveau de base = 51,1 m ;
- porosité = 0,06 ;
- Kkarst = 0,007 ;
- Hseuil karst = 52,45 m.

1.2. MODELISATION DES DEBITS DE LA « COMPOSANTE KARST DANS LE CADEREAU » - DEVELOPPEMENT SUR LE CADEREAU D'ALES

Le modèle « **composante karst dans le cadereau** » va ainsi permettre de reproduire les variations de débit dans le cadereau issues de la composante karst (débordement du karst et augmentation du ruissellement induit par un refus à l'infiltration). Les hydrogrammes calculés vont être calés à partir des hydrogrammes issus du modèle Gr d'Egis-EAU.

Les données de précipitations sont calculées pour chaque sous bassin versant à partir d'une pondération des lames d'eau ESPADA (Illustration 2) fournie par Egis-Eau.

Le module karst est ainsi intégré à un modèle plus vaste dit **modèle composante karst dans le cadereau**, les paramètres calés précédemment des réservoirs sol et karst sont conservés. L'architecture du modèle est schématisée Illustration 10. Un nouveau réservoir est ajouté, il s'agit du **réservoir « cadereau »**. Ce nouveau réservoir est également caractérisé par une vidange linéaire de type loi de Maillet (Illustration 4).

Lorsqu'un seuil (Hseuil 1 pour cadereau avec Hseuil 1 pour cadereau > Hseuil karst) est atteint dans le réservoir karst alors le réservoir cadereau est alimenté par les pluies efficaces. Afin de reproduire les débits de la composante karst dans le cadereau 100 % de la pluie efficace est nécessaire. Ainsi, par rapport au bilan hydrologique, le modèle réalisé est alimenté par un flux d'eau supérieur. Cette différence s'explique probablement par le fait que la surface topographique des bassins versants des cadereaux, calculée et fournie par Egis-Eau, est inférieure à la surface des bassins d'alimentation du karst, entraînant ainsi une sous-estimation du flux d'eau alimentant cette composante. Afin de s'affranchir de cette sous-estimation la quantité de précipitation participant à la crue est augmentée, c'est pourquoi, pour les fortes pluies, les débits de la composante karst reçoivent 100 % des pluies efficaces et le karst continu à être alimenté par 30 % des précipitations

La valeur Hseuil 1 pour cadereau sera définit par calage. Les niveaux d'eau dans le réservoir cadereau sont tels que :

Hcadereau(t1) = Hcadereau(t0) + 100 % Pluie efficace – Hcadereau sortant(t1);

Et Hcadereau sortant = Kcadereau * Hcadereau, avec Kcadereau un paramètre calé assimilé au coefficient de vidange du réservoir cadereau.

Enfin le débit issu de ce réservoir est calculé, tel que :

Qcomposante karst cadereau = Hcadereau sortant * SBV



Illustration 10. Structure du modèle « composante karst dans le cadereau »

Les paramètres du modèle composante karst dans le cadereau, à savoir Hseuil 1 pour cadereau et 2, Kcadereau 1 et 2, ont étés calés afin de reproduire au mieux les hydrogrammes de la composante karst calculés par le modèle GR d'ESPADA.

Pour le cadereau d'Alès, les hydrogrammes de la composante karst des quatre sousbassins suivants ont été simulés :

- Anduze,
- Cimpro tot,
- Cimpro branche Caplanier,
- Anduze à Cimpro.

Les modèles ont été calés avec les paramètres du sol et du karst définis ci-après :

Sol : Ksol = 0,0003 et Hseuil sol = 50 mm

Karst : Kkarst = 0,007 et Hseuil karst = 52,45 m

1.2.1. Anduze

Pour reproduire l'hydrogramme de crue d'octobre 1988 caractérisé par une non linéarité se traduisant par une augmentation plus forte des débits, un seuil identifié sous l'appellation de Hseuil 2 pour cadereau (avec Hseuil 2 pour cadereau > Hseuil 1 pour cadereau) a été ajouté dans le réservoir karst. Au dessus de ce seuil le Kcadereau augmente (Kcadereau 2 = 0,18) permettant d'accélérer la vidange et l'augmentation du pic de crue.

Les paramètres du modèle associés au cadereau sont :

Cadereau : Kcadereau 1 = 0,09 et Hseuil 1 pour cadereau = 52,7 m

Kcadereau 2 = 0,18 Hseuil 2 pour cadereau= 53 m

 $SBV = 6 \text{ km}^2$

La lame d'eau utilisée est ALAM.

Les résultats graphiques sont présentés Illustration 11. Ils sont satisfaisants pour l'ensemble des épisodes, validant ainsi le modèle mis en œuvre et les paramètres calés.



Illustration 11. Hydrogrammes de la composante karst à la station d'Anduze, simulés par les modèles GR ESPADA et modèle « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

1.2.2. Cimpro tot

Les paramètres du modèle associés au cadereau sont :

Cadereau : Kcadereau 1 = 0,035 et Hseuil 1 pour cadereau = 52,6 m

Kcadereau 2 = 0,07 Hseuil 2 pour cadereau= 53,5 m

 $SBV = 21 \text{ km}^2$

Le poids des lames d'eau est : ALAM = 0.52; ALMO = 0.25 et POMO = 0.23.

Les résultats graphiques sont présentés Illustration 13. L'ensemble des crues sont bien reproduites à l'exception de celle de mai 1998 où le pic simulé est surestimé. Cette différence est due à une mise en place trop rapide pour cet épisode de la composante karst. La reprise des simulations en augmentant la valeur du seuil de débordement dans le réservoir karst pour l'alimentation de la composante karst (Hseuil 1 pour cadereau) de seulement 10 cm permet d'obtenir des débits comparables pour mai 1998. Rappelons que cette différence correspond à la gamme d'incertitude évaluée sur le module piézométrie. Toutefois cette modification entraîne une diminution des débits simulés pour septembre 2002 et le 6 septembre 2005. Ainsi, la valeur initiale du seuil a été conservée.

Il est également nécessaire de prendre en compte l'incertitude sur les précipitations. Cette dernière est évaluée à au moins 10 % pour les différents épisodes. Aussi, des tests ont étés réalisés en diminuant et en augmentant de 10 % la pluie pour l'épisode de mai 1998 (cumul de respectivement 170 et 208 mm au lieu de 189 mm utilisés initialement). Les débits simulés diminuent fortement avec seulement 10 % de précipitation en moins (le débit de pointe passe de 17 à 4 m³/s) et deviennent proches des débits calculés par Egis Eau. Avec 10 % de pluie en plus, l'hydrogramme simulé est faiblement modifié (le débit de pointe passe de 17 à 19 m³/s). Compte tenu de la gamme d'incertitude sur les précipitations, ce test montre que le modèle est acceptable, les paramètres calés sont ainsi validés.



Illustration 12. Hydrogrammes de la composante karst à Cimpro tot simulés par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) pour la crue de mai 1998 avec 10 % de précipitation en plus ou en moins



Illustration 13. Hydrogrammes de la composante karst à Cimpro tot, simulés par les modèlse GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

BRGM/RP-58286-FR – Rapport final

1.2.3. Cimpro branche Camplanier

Les paramètres du modèle associés au cadereau sont :

Cadereau : Kcadereau 1 = 0,12 et Hseuil 1 pour cadereau = 52,7 m

Kcadereau 2 = 0,15 Hseuil 2 pour cadereau= 53,1 m

SBV = 8,5 km²

Le poids des lames d'eau est : ALAM = 0,2 ; ALMO = 0,27 et POMO = 0,53.

Les résultats graphiques sont présentés Illustration 14. A l'exception du pic de crue de septembre 2002, qui est sous estimé par le modèle Vensim, les autres hydrogrammes simulés sont proches de ceux calculés par ESPADA. Cette crue est correctement simulée en abaissant la valeur Hseuil 1 pour cadereau de 10 cm. Malheureusement en abaissant ce seuil, les crues du mai 1998 et du 6 septembre 2005 deviennent surestimées. Finalement les paramètres de calage sont conservés malgré la différence pour septembre 2005.



Illustration 14. Hydrogrammes de la composante karst pour la branche Camplanier à Cimpro, simulés par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

BRGM/RP-58286-FR - Rapport final

1.2.4. Anduze à Cimpro

Les paramètres du modèle associés au cadereau sont :

Cadereau : Kcadereau 1 = 0,07 et Hseuil 1 pour cadereau = 52,6 m

Kcadereau 2 = 0,095 et Hseuil 2 pour cadereau= 53,5 m

 $SBV = 6,6 \text{ km}^2$

Le poids des lames d'eau est : ALAM = 0.5 et ALMO = 0.5.

Les résultats graphiques sont présentés Illustration 15. Ils sont globalement de bonne qualité à l'exception de mai 1998, mais comme pour la simulation de Cimpro tot, une diminution de 10 % des précipitations pour cet épisode entraîne un maximum de débit simulé comparable à celui obtenu avec le modèle GR ESPADA. Les paramètres calés sont ainsi validés et conservés.



Illustration 15. Hydrogrammes simulés, de la composante karst de Anduze à Cimpro, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

BRGM/RP-58286-FR - Rapport final

1.3. APPLICATION AUX AUTRES CADEREAUX

Le modèle développé est ici adapté pour la simulation des débits issus de la composante karst pour les autres cadereaux. Pour les cadereaux localisés à l'Ouest (Pondre et Valdegour), l'information remplissage du karst peut être approchée à partir de la piézométrie de Mazauric. En effet ce site est jugé représentatif de la zone d'alimentation ouest du bassin d'alimentation du système karstique Nîmois. Pour les cadereaux localisés à l'Est (Uzès et Valladas), il était initialement envisagé de définir un indicateur karst régional situé à l'Est du bassin versant du système karstique nîmois. C'est la raison pour laquelle plusieurs piézomètres ont été réalisés en août 2007 sur cette zone dans le cadre de ce projet (Torte 1 et 2, Carrière). Les conditions climatiques depuis la mise en place de ces ouvrages n'ont conduit à aucune crue significative avec saturation du système karstique, si bien qu'il n'est pas possible à ce jour d'évaluer la pertinence des ouvrages réalisés pour la caractérisation d'un indicateur karst localisé à l'Est du bassin versant. Ainsi, par défaut, le site de Mazauric a été utilisé comme indicateur de la saturation du système karstique Est. Le modèle de piézométrie développé va ainsi être utilisé pour la simulation de la composante karst sur les autres cadereaux. Les caractéristiques du réservoir sol sont également redéfinies pour chaque station à partir des données de terrain.

1.3.1. Cadereau de Pondre

Paramètres calés

Les paramètres du modèle sont :

Sol : Ksol = 0,0003 et Hseuil sol = 80 mm

Karst : Kkarst = 0,007 et Hseuil karst = 52,45

Cadereau : Kcadereau 1 = 0,1 et Hseuil 1 pour cadereau = 52,5 m

Kcadereau 2 = 0,105 et Hseuil 2 pour cadereau= 55 m

 $SBV = 11 \text{ km}^2$

Le poids des lames d'eau est : POMO = 30,5 et POAV = 69,5.

Résultats

Les résultats sont fournis Illustration 16. Dans l'ensemble les débits de la composante karst simulés sont proches de ceux calculés par le modèle ESPADA, à l'exception du premier pic de crue du 8 septembre 2005 et de la crue de mai 1998 où le modèle simule des pics de crue à 5 m³/s alors que le modèle ESPADA est caractérisé par une absence de débit.


Illustration 16. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau de la Pondre, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

1.3.2. Cadereau de Valdegour

Paramètres calés

Les paramètres du modèle sont :

Sol : Ksol = 0,0003 et Hseuil sol = 50 mm

Karst : Kkarst = 0,007 et Hseuil karst = 52,5

Cadereau : Kcadereau 1 = 0,06 et Hseuil 1 pour cadereau = 52,5 m

Kcadereau 2 = 0,12 et Hseuil 2 pour cadereau = 53,2 m

 $SBV = 4,07 \text{ km}^2$

Le poids des lames d'eau est : POMO = 0,65 , ALMO = 0,11, POAV = 0,19, ALAV = 0,05.

Résultats

Les résultats sont de bonnes qualité pour l'ensemble des 4 crues (Illustration 17). En effet, le modèle reproduit la bonne amplitude des pics de fortes crues (octobre 1988, 8 septembre 2005), des faibles crues (mai 1998) et celle des crues intermédiaires (septembre 2002, 6 septembre 2005). Il faut également noter qu'il existe un décalage faible (inférieur à 1 heure) entre les deux hydrogrammes, ce qui représente un argument supplémentaire quant à la bonne simulation du modèle.



Illustration 17. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau de Valdegour, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

1.3.3. Cadereau d'Uzès

Ce cadereau est situé à l'Est à distance significative de l'aven Mazauric. Du fait de la distance et de la forte hétérogénéité des précipitations associées, les mesures à Mazauric ne peuvent pas être utilisées telle quelle, comme cela a été réalisé pour le cadereau d'Alès. Toutefois, faute de point représentatif de la zone noyée du karst à proximité du cadereau d'Uzès, le modèle calé à Mazauric est conservé. Cela revient à faire l'hypothèse que le fonctionnement du système karstique est comparable sur les bassins versants des cadereaux d'Alès et d'Uzès, hypothèse réaliste du fait de la proximité des bassins versants. Le modèle Mazauric est ainsi utilisé, afin de fournir un indicateur karst basé sur un résultat de modèle et non pas sur de la donnée de terrain. Ce modèle sera alimenté par les précipitations calculées sur le cadereau d'Uzès. N'ayant pas de contrôle sur les niveaux réels dans le karst sur ce bassin versant, il est inutile de mettre en place le seuil de débordement (Hseuil karst). L'indicateur karst est la résultante du calcul du modèle précédemment développé.

Station Engances

• Paramètres calés

Les paramètres du modèle sont :

Sol : Ksol = 0,0003 et Hseuil sol = 80 mm

Karst : Kkarst = 0,007

Cadereau : Kcadereau 1 = 0,02 et Hseuil 1 pour cadereau = 52,3 m

Kcadereau 2 = 0,14 et Hseuil 2 pour cadereau= 55 m

SBV = 1,63 km²

La lame d'eau est UZAM.

Résultats

Les résultats présentés Illustration 18, sont de bonne qualité. En effet, l'amplitude maximale de la forte crue d'octobre 1988 est globalement bien reproduite et la gamme de débit pour les faibles crues est également en cohérence avec les hydrogrammes du karst fournis par le modèle Gr ESPADA.



Illustration 18. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau de d'Uzès, station Engances, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

Station Engances à Oliveraie

• Paramètres calés

Les paramètres du modèle sont :

Sol : Ksol = 0,0003 et Hseuil sol = 80 mm

Karst : Kkarst = 0,007

Cadereau : Kcadereau 1 = 0,1 et Hseuil 1 pour cadereau = 52,5 m

SBV = 2,3 km²

La lame d'eau est UZAM.

• Résultats

Les résultats présentés Illustration 19, sont de bonne qualité pour l'ensemble des crues, les intensités maximales étant synchrones et globalement de même amplitude.



Illustration 19. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau de d'Uzès, station Engances à Oliveraie, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

Station Oliveraie à VanDyck

• Paramètres calés

Les paramètres du modèle sont :

Sol : Ksol = 0,0003 et Hseuil sol = 50 mm

Karst : Kkarst = 0,007

Cadereau : Kcadereau 1 = 0,1 et Hseuil 1 pour cadereau = 52,3 m

 $SBV = 2,3 \text{ km}^2$

Le poids des lames d'eau est : UZAM = 0,268 et UZMO = 0,732.

• Résultats

Les résultats présentés Illustration 20, sont de bonne qualité (pics de crue synchrones et d'intensité comparable).



Illustration 20. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau de d'Uzès, station Oliveraie à VanDyck, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

BRGM/RP-58286-FR - Rapport final

Station VanDyck (Uzès total)

• Paramètres calés

Les paramètres du modèle sont :

Sol : Ksol = 0,0003 et Hseuil sol = 80 mm

Karst : Kkarst = 0,007

Cadereau : Kcadereau 1 = 0,05 et Hseuil 1 pour cadereau = 52,4 m

Kcadereau 1 = 0,12 et Hseuil 2 pour cadereau = 55 m

$SBV = 5,83 \text{ km}^2$

Le poids des lames d'eau est : UZAM = 0,712 et UZMO = 0,288.

• Résultats

Les résultats présentés Illustration 21, sont de bonne qualité (pics de crue synchrones et d'intensité comparable).



Illustration 21. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau d'Uzès, station VanDyck, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

BRGM/RP-58286-FR – Rapport final

1.3.4. Cadereau de Valladas

Paramètres calés

Les paramètres du modèle sont :

Sol : Ksol = 0,0003 et Hseuil sol = 50 mm

Karst : Kkarst = 0,007

Cadereau : Kcadereau 1 = 0,13 et Hseuil 1 pour cadereau = 52,6 m

Kcadereau 2 = 0,27 et Hseuil 2 pour cadereau = 52,8 m

 $SBV = 5,2 \text{ km}^2$

Le poids des lames d'eau est : UZAM = 0,808 et UZMO = 0,192.

Résultats

Les résultats présentés Illustration 23, sont de bonne qualité. Seule la crue de septembre 2005 est surestimée par le modèle Vensim. Deux tests ont ainsi étés réalisés avec 10 et 20 % de précipitation en moins pour cet épisode. Les résultats sont présentés ci-après et sont en accord avec le débit observé.



Illustration 22. Résultat des modélisation à Valladas pour l'épisode de septembre 2005 avec 10 et 20 % de pluie en moins

Il n'y a pas eu de crue simulée avec le modèle Vensim pour l'épisode du 6 septembre 2005 alors que les débits simulés avec le modèle Gr sont proches de 10 m³/s. Les mesures de terrain fournissent un débit maximum de 4 m³/s. Ce débit total intègre à la fois la composante karst et la composante ruissellement. Il apparait donc que les débits réels de la composante karst aient été très faibles sur cet épisode. Le modèle Vensim semble mieux représenter cet épisode, permettant ainsi sa validation.



Illustration 23. Hydrogrammes simulés, de la composante karst au cadereau de Valladas, par les modèles GR ESPADA et « composante karst dans le cadereau » (Vensim) sur les quatre crues principales

2. Abaque pour la définition de l'alerte à partir de l'indicateur karst

2.1. OBJECTIF

L'objectif est de réaliser un abaque à partir du modèle piézométrie karst, qui permette d'évaluer les niveaux d'eau de l'aquifère et donc son degré de saturation en fonction des précipitations. Il s'agit donc d'un abaque dit « Pluie – Piézométrie ». Ce dernier est construit de manière empirique à partir des résultats du modèle et des observations de terrain. La piézométrie à Mazauric est ainsi utilisée comme « indicateur karst ».

L'impact des crues historiques (octobre 1988, mai 1998, septembre 2002 et septembre 2005) est ainsi analysé et comparé avec les niveaux piézométriques observés (septembre 2005) ou reconstitués à partir de la modélisation.

Trois types de seuil de l'indicateur karst sont définis en accord avec la Vile de Nîmes à partir de l'historique des crues et des risques associés en termes de débit, débordement et inondation. Ces seuils définis pour la piézométrie à Mazauric correspondent aux seuils d'alerte ou de vigilance caractérisés ci-après :

- piézométrie inférieure à 52 m : **pas d'intervention particulière**. Le karst est faiblement rempli,
- piézométrie comprise entre 52 et 52,5 m : **vigilance**. Le karst est rempli et se rapproche de la saturation. Les précipitations à venir pourraient causer sa saturation et entraîner la mise en place de la composante karst. Les niveaux d'eau dans le karst sont ainsi à surveiller tout comme les prévisions météorologiques,
- piézométrie comprise entre 52,5 et 52,9 m : **alerte orange**. Le karst est saturé, les débordements du karst et la composante karst se produisent. Il s'agit d'épisode conduisant à des réponses type mai 1998, sept 2002 et 6 sept 2005,
- piézométrie supérieure à 52,9 m : **alerte rouge**. Cette situation correspond aux très fortes crues, comparables aux épisodes historiques du 8 septembre 2005 et d'octobre 1988, occasionnant des débordements aux conséquences dramatiques dans les cadereaux et dans la ville.

La piézométrie est suivie en temps réel à Mazauric par la Ville de Nîmes. Ses variations en période de vigilance ou d'alerte permettent d'estimer en temps réel le remplissage et la saturation du karst. Aussi, à partir des modèles réalisés et présentés précédemment, un abaque a été construit ; il permet d'évaluer les variations de la piézométrie à Mazauric en fonction du cumul de précipitation attendu et ainsi d'anticiper, selon les scénarios de pluie proposés, la piézométrie à Mazauric.

Attention : l'abaque défini est réalisé à partir des résultats du modèle. La modélisation présente des incertitudes liées au modèle mais aussi à l'erreur sur l'information pluie,

si bien qu'il existe des différences entre la piézométrie simulée et mesurée. Il a également été observé l'existence possible d'un décalage pouvant atteindre 1 à 2 heures entre les deux séries. Le modèle global intégrant les débordements du karst ayant été calé en prenant en compte ces erreurs, il est conseillé de ne pas procéder à des réajustements en temps réel à partir des observations de terrain puisque le modèle va s'auto corriger lors des pas de temps suivants.

L'abaque Illustration 24 a ainsi été réalisé à partir de l'intégration des résultats des modélisations mises en œuvre. Sur ce dernier les trois niveaux d'alerte (vigilance, alerte orange, alerte rouge) précédemment caractérisés sont identifiés.



Illustration 24. Abaque pour la définition de l'alerte à partir de l'indicateur karst (piézométrie à Mazauric)

2.2. UTILISATION DE L'ABAQUE

Cet abaque est constitué en abscisse par le cumul des précipitations et en ordonnée par les niveaux piézométriques à Mazauric. Les 50 premiers mm de précipitations permettent de saturer le sol, les précipitations suivantes deviennent alors efficaces et remplissent le réservoir karst. Il faut alors se positionner sur le point O de coordonnée (50 mm ; 51,1 m NGF) et se déplacer sur la diagonale selon la valeur du cumul attendu sans interruption supérieure à 1 h.

2.2.1. Initialisation du réservoir sol

Concernant la saturation du réservoir sol, il faut utiliser les précipitations des deux mois précédant l'épisode du jour dit « J ». Ce dernier se vidange au rythme de 1 mm par

jour. Un exemple est envisagé ci-après, afin de présenter le mode de remplissage et de vidange de ce réservoir.

- Exemple : 80 mm à J 60 et 30 mm à J 10.
- A J 60 le sol se remplit et atteint sa saturation (50 mm), il se vidange ensuite au rythme de 1 mm/j pendant 50 jours. A J 10 lors du second épisode, il est vide, il se remplit pour atteindre un niveau égal à 30 mm. Il se vidange ensuite pendant 10 j et le jour J son niveau de remplissage atteint 20 mm.

2.2.2. Tarissement du système karstique

En cas d'interruption des précipitations supérieure à 1 heure, la vidange du système karstique intervient et se traduit par une diminution des niveaux piézométriques. Cette diminution est approchée, à partir des résultats de la modélisation, par les valeurs suivantes :

- Piézométrie > 52,25 m : diminution de 1 cm par intervalle de 15 min, soit 4 cm/h ;
- 52,25 m > Piézométrie > 51,5 m : diminution de **2 cm/h**,
- Piézométrie < 51,5 m : diminution de **1 cm/h**.

2.2.3. Initialisation du système karstique

A partir des vitesses de vidange présentées au-dessus, le temps pour que le système karstique retourne à sont état initial a été évalué. Après une crue extrême avec dépassement du seuil d'alerte rouge, il faut moins de 5 jours au système pour retrouver son niveau initial. On choisira ainsi pour l'initialisation du système karstique ce délais. L'exemple suivant est traité :

Précipitations de 100 mm à J-30 et 100 mm à J-1 (Illustration 25).

A J – 30 le sol se remplit (50 mm), les 50 mm supplémentaires alimentent le karst, le niveau piézométrique atteint 51,75 m NGF. Au cours des trois jours qui suivent, le karst se vidange et atteint sa valeur initiale (51,1 m). A J-1, soit 29 jours plus tard, le karst est vide et le sol est au niveau 21 mm (50 – 29). Ainsi les 29 premiers mm de précipitations permettent de recharger le sol, passant alors au point O sur l'abaque, les 71 mm de précipitations restants permettent de recharger le karst. Il faut alors se déplacer le long de la diagonale jusqu'à l'intersection avec le cumul 121 mm (71 + 50 mm). La piézométrie correspond alors à 52 m NGF (point A). Il s'ensuit un tarissement de 24 h pendant lequel le niveau décroit de 48 cm (tarissement de - 2 cm/h pour cette gamme de piézométrie). Donc le jour j, au début de l'épisode, le sol est saturé et le karst est également partiellement rechargé avec un niveau à 51,52 m NGF (point B).



Illustration 25. Exemple d'utilisation de l'abaque pluie - piézométrie

2.2.4. Exemples d'utilisation de l'abaque à partir des épisodes importants

Les quatre fortes crues sont traitées ainsi que celle de novembre 2004, à titre d'exemple, les abaques sont également fournis (Illustration 26 à Illustration 30).

Episode du 3 octobre 1988

L'abaque Illustration 26 est construit pas à pas selon les conditions listées ci-dessous :

- **Conditions initiales** : n'ayant pas d'information pluviométrique ou piézométrique avant le 29/09/88, le niveau piézométrique est fixé à 51,1 m NGF et le sol est considéré vide à cette date. Il faut donc se placer le 29/09/1988 au point **A**.
- Du 29/09 à 0h00 au 01/10 à 16h30 : 50 mm de précipitation. Le sol initialement sec est rechargé, il faut alors se déplacer sur l'abaque du point A au point O. La piézométrie est toujours égale à 51,1 m NGF. Les précipitations suivantes vont donc contribuer à la recharge du karst.
- Du 01/10 à 16h45 au 02/10 à 20h45 : 45 mm de précipitation. Le point suivant, noté
 B, est défini en se déplaçant sur la diagonale à partir du point O jusqu'à
 l'intersection avec l'abscisse 95 mm de cumul de pluie (50 mm + 45 mm). La
 piézométrie est alors égale à 51,65 m NGF.
- Du 02/10 à 21h00 au 03/10 à 3h00 : interruption de la pluie pendant six heures. La décrue est de 2 cm/h pour cette gamme piézométrique, le niveau piézométrique décroit de 12 cm, passant du point B au point C, sur l'axe de cumul de pluie 95 mm, le niveau piézométrique est alors égal à 51,54 m NGF (51,66 m 0,12 m).

- Du 03/10 à 3h15 au 03/10 à 5h30 : 35 mm de précipitation. Le point D est obtenu en se déplaçant sur la diagonale en pointillée jusqu'à l'intersection avec le cumul de 130 mm (95 mm + 35 mm). Le seuil de vigilance est alors atteint (piézométrie à 52 m NGF).
- **Du 03/10 à 5h45 au 03/10 à 6h15** : précipitations de 40 mm. Le point **E** correspond à l'intersection de la diagonale avec le cumul 170 mm (130 mm + 40 mm). Le seuil d'alerte orange (piézométrie à 52,5 m NGF) est atteint.
- **Du 03/10 à 6h30 au 03/10 à 7h30** : 70 mm de précipitation. Le point **F** est obtenu en se déplaçant jusqu'au cumul de pluie de 240 mm. La piézométrie associée est 52,9 m soit à la limite du seuil d'alerte rouge.
- Du 03/10 à 7h45 au 03/10 à 11h30 : précipitations de 210 mm. A partir de ce moment le système est placé en alerte rouge et la piézométrie continue d'augmenter. La valeur maximale est atteinte pour un cumul de 450 mm (240 mm + 210 mm), il s'agit du point G associé à une piézométrie de 53,75 m.



- L'épisode de précipitation s'achève ensuite.

Illustration 26. Abaque pour la crue d'octobre 1988

Episode du 27 mai 1998

L'abaque est construit pas à pas selon les conditions listées ci-dessous :

Conditions initiales : cumul des précipitations le mois précédant (jusqu'au 1^{er} mai) : 50 mm. Ces précipitations ont contribué à recharger le sol. Du 1^{er} au 27 mai, il n'y a plus eu de précipitation, le niveau d'eau dans le sol s'abaissant au rythme de 1 mm/j, il reste alors environ 24 mm d'eau dans le réservoir sol. Le point A noté sur

l'abaque correspond ainsi à la position obtenue la vieille de l'épisode de crue. Les 26 premiers mm de précipitations serviront donc à recharger le sol.

- Du 27/05 à 3h00 au 27/05 à 17h30: 27 mm de précipitation. Le sol est alors rechargé, il faut alors se déplacer du point A au point O sur l'abaque (niveau piézométrique égale à 51,1 m NGF). La recharge du karst va ainsi s'opérer à partir des précipitations suivantes.
- Du 27/05 à 17h45 au 27/05 à 20h00 : 85 mm de précipitation. Le point B est obtenu en se déplaçant le long de la première diagonale du point O jusqu'à l'intersection avec l'abscisse 135 mm (50 mm + 85 mm). Le niveau piézométrique 52,2 m NGF est atteint, il correspond au franchissement du seuil de vigilance.
- Du 27/05 à 20h15 au 27/05 à 21h30 : 25 mm de précipitation. Le point C est obtenu en se déplaçant le long de la diagonale jusqu'à interception avec l'abscisse 160 mm de cumul (135 mm + 25 mm). Le niveau piézométrique atteint est égal à 52,5 m NGF et correspond au niveau d'alerte orange associé aux premières contributions de la composante karst dans le cadereau.
- Du 27/05 à 21h45 au 28/05 à 03h15 : interruption des précipitations pendant 5h30.
 Pour ces valeurs de piézométrie, la diminution du niveau piézométrique associée au tarissement est de 4 cm/h, correspondant à une diminution de 20 cm environ. Le point D est atteint sur l'abaque, il correspond à un niveau piézométrique de 52,3 m NGF.
- Du 28/05 à 03h30 au 28/05 à 04h30 : 5 mm de précipitation. Le point E correspond à l'intersection de la diagonale passant par D et interceptant l'abscisse à 165 mm. La piézométrie associée est 52,35 m NGF.
- Du 28/05 à 4h45 au 28/05 à 8h45 : interruption de 4h00. La diminution de la piézométrie est de 4 cm/h, correspondant dans le cas présent à une diminution d'environ 16 cm. Le point F est ainsi atteint sur l'abaque et correspond à une piézométrie de 52,20 m NGF (52,4 m 0,16 m). La situation associée étant la vigilance.
- Du 28/05 à 9h00 au 28/05 à 14h00 : 20 mm de précipitation. Pour obtenir le point G, il faut se déplacer sur la diagonale passant par F jusqu'à la valeur de cumul de 185 mm (160 mm + 25 mm). Le niveau piézométrique est de 52,45 m NGF, à nouveau au niveau du seuil d'alerte orange.
- Du 28/05 à 14h15 au 28/05 à 18h00 : interruption de 4h00. La diminution est d'une quinzaine de centimètres, la piézométrie associée est 52,30 m NGF (52,5 mm 0,15 mm). Il s'agit du point H.
- **Du 28/05 à 18h15 au 29/05 à 0h15** : 16 mm de précipitation. Le point I est obtenu en se déplaçant sur la diagonale partant de H et recoupant le cumul de piézométrie de 200 mm. A nouveau la piézométrie atteint la valeur de 52,5 m correspondant à l'alerte orange et aux premiers débordements.
- L'épisode de précipitation s'achève ensuite.



Illustration 27. Abaque pour la crue de mai 1998

8 et 9 septembre 2002

L'abaque est construit pas à pas selon les conditions listées ci-dessous :

- Conditions initiales : 87 mm de précipitation les 25 et 26 août. Les 50 premiers mm rechargent le sol, les 37 mm suivants participent à la recharge du karst. Lors des 7 jours suivants, il n'y a pas de précipitation. Le niveau piézométrique du karst s'abaisse au rythme de 1 cm/h, revenant ainsi à sa valeur initiale (51,1 m NGF). Le niveau d'eau dans le sol s'abaisse de 1 mm/j, soit de 7 mm. Il reste donc 43 mm d'eau dans le sol. Les 3, 4 et 5 septembre le cumul de précipitation atteint 25 mm. 7 mm rechargent le sol et 18 mm le karst, la piézométrie augmentant d'une vingtaine de cm. Du fait de l'interruption des précipitations les 3 jours suivants, le niveau d'eau dans le karst retrouve son niveau initial, le niveau d'eau dans le sol est proche de sa saturation à 47 mm, pour la suite, le sol sera considéré en approximation comme étant saturé. Le point A noté sur l'abaque correspond ainsi à la position obtenue la vieille de l'épisode de crue.
- Du 08/09 à 10h30 au 08/09 à 21h15 : 75 mm de précipitation. Le point B est obtenu en se déplaçant le long de la première diagonale partant du point A jusqu'à l'intersection avec l'abscisse 125 mm (50 mm + 75 mm). Le niveau piézométrique 52 m NGF est atteint, il correspond au seuil de vigilance.
- Du 08/09 à 21h30 au 08/09 à 22h30 : 18 mm de précipitation. Le point C est obtenu en se déplaçant le long de la diagonale jusqu'à l'intersection avec l'abscisse 143 mm de cumul (125 mm + 18 mm). Le niveau piézométrique atteint est égal à 52,3 m NGF.

- Du 08/09 à 22h45 au 09/09 à 01h45 : interruption des précipitations pendant 3h00.
 Pour ces valeurs de piézométrie, la diminution du niveau piézométrique associée au tarissement est de 2 cm/h, correspondant à une diminution de 6 cm environ. Le point D est atteint sur l'abaque, il correspond à un niveau piézométrique de 52,24 m NGF.
- Du 09/09 à 02h00 au 09/09 à 05h15 : 17 mm de précipitation. Le point E correspond à l'intersection de la diagonale passant par D et interceptant l'abscisse à 160 mm (143 + 17 mm). La piézométrie associée est 52,45 m NGF.
- Du 09/09 à 5h30 au 09/09 à 9h30 : interruption des précipitations pendant 4h00. La diminution du niveau piézométrique associée au tarissement s'effectue en deux phases :
 - 4 cm/h pendant 2h30, soit ici une diminution de 10 cm environ,
 - 2 cm/h pendant 1h30, soit ici une diminution de 3 cm environ ;

Le point F est atteint sur l'abaque, il correspond au niveau piézométrique 52,32 m NGF.

- Du 09/09 à 09h45 au 09/09 à 10h45 : 27 mm de précipitation. Le point G est obtenu en se déplaçant le long de la diagonale jusqu'à interception avec l'abscisse 187 mm de cumul (160 mm + 27 mm). Le niveau piézométrique atteint est 52,57 m NGF et correspond au niveau d'alerte orange associé aux premières contributions de la composante karst dans le cadereau.
- Du 09/09 à 11h00 au 09/09 à 13h30 : 60 mm de précipitation. Le point H est obtenu en se déplaçant le long de la diagonale jusqu'à l'intersection avec l'abscisse 247 mm (187 mm + 60 mm). Le niveau piézométrique atteint est proche de 52,9 m NGF correspondant à la limite du seuil d'alerte rouge.



- L'épisode de précipitation s'achève ensuite.

Illustration 28. Abaque pour la crue de septembre 2002

4 novembre 2004

L'abaque est construit pas à pas selon les conditions listées ci-dessous :

- Conditions initiales : du 25/10/04 au 02/11/04 à 22 h : 60 mm de précipitation. Le sol est rechargé, passant sur l'abaque du point A au point O. Le niveau piézométrique est égal à 51,1 m NGF. Le karst se recharge à partir de 22h00.
- **Du 02/11 à 22h00 au 03/11 à 20h00** : 15 mm de précipitation. Le point **B** est obtenu en se déplaçant le long de la première diagonale jusqu'à atteindre l'abscisse 65 mm. Le niveau piézométrique est alors égal à 51,25 m NGF.
- Du 03/11 à 20h15 au 04/11 à 5h45 : interruption de 9h30. La baisse du niveau piézométrique est de 1 cm/h, soit une baisse de 10 cm environ. Le point C est atteint sur l'abaque et correspond au niveau piézométrique 51,15 m NGF (51,25 m 0,10 m).
- **Du 04/11 à 6h00 au 04/11 à 18h00** : 85 mm de précipitation. Le point D est obtenu à partir du point C en longeant la diagonal jusqu'à la valeur de cumul 150 mm. Le niveau piézométrique est égal à 52,25 m NGF, dépassant le niveau de vigilance.



- L'épisode de précipitation s'achève ensuite.

Illustration 29. Abaque pour la crue de novembre 2004

6 au 8 septembre 2005

L'abaque est construit pas à pas selon les conditions listées ci-dessous :

- **Conditions initiales** : le cumul des précipitations du 05/09 à 13h00 au 06/09 à 15h15 est égal à 50 mm. Ces précipitations contribuent à recharger le sol. Le point

A noté sur l'abaque correspond à la position obtenue avant le 05/09 à 13h00. Il faut ensuite se déplacer du point A au point **O** sur l'abaque (niveau piézométrique égal à 51,1 m NGF).

- Du 06/09 à 15h30 au 06/09 à 16h15 : 70 mm de précipitation. Le point B est obtenu en se déplaçant le long de la diagonale jusqu'à l'intersection avec l'abscisse 120 mm (50 + 70). Le niveau piézométrique 52 m NGF est atteint, il correspond au seuil de vigilance.
- Du 06/09 à 16h30 au 06/09 à 17h45 : 40 mm de précipitation. Le point C est obtenu en se déplaçant le long de la diagonale jusqu'à l'intersection avec l'abscisse 160 mm de cumul de précipitation (120 mm + 40 mm). Le niveau piézométrique 52,5 m NGF est atteint, il correspond au seuil d'alerte orange.
- Du 06/09 à 18h00 au 06/09 à 18h45 : 17 mm de précipitation. Le point D est obtenu en se déplaçant le long de la diagonale jusqu'à l'intersection avec l'abscisse 177 mm de cumul (160 mm + 17 mm). Le niveau piézométrique 52,61 m NGF est atteint.
- Du 06/09 à 19h00 au 06/09 à 20h15 : interruption des précipitations pendant 1h30.
 Pour ces valeurs de piézométrie, la diminution du niveau piézométrique associée au tarissement est de 4 cm/h, correspondant à une diminution de 6 cm environ. Le point E est atteint sur l'abaque, il correspond à un niveau piézométrique de 52,55 m NGF.
- Du 06/09 à 20h30 au 07/09 à 02h15 : 53 mm de précipitation. Le point F est obtenu en se déplaçant le long de la diagonale jusqu'à l'intersection avec l'abscisse 230 mm de cumul (177 mm + 53 mm). Le niveau piézométrique 52,85 m NGF est atteint, proche du seuil d'alerte rouge.
- **Du 07/09 à 02h30 au 08/09 à 07h00 :** interruption des précipitations pendant 28h30. La diminution du niveau piézométrique associée au tarissement s'effectue en deux phases :
 - de 2h30 à 17h15 : 4 cm/h, soit une diminution de 60 cm environ en 15h00.
 Le niveau piézométrique est alors de 52,25 m NGF,
 - de 17h30 à 7h00 : 2 cm/h, soit une diminution de 26 cm environ en 13h30. Le niveau piézométrique est alors d'environ 52 m NGF.

Le point **G** est atteint sur l'abaque (52 m NGF), il correspond à la limite du seuil de vigilance.

Ainsi, après l'épisode du 6 septembre et avant la reprise des précipitations le 8 septembre le système était en vigilance.

- Du 08/09 à 07h15 au 08/09 à 13h00 : 40 mm de précipitation. Le point H est obtenu en se déplaçant le long de la diagonale jusqu'à l'intersection avec l'abscisse 270 mm de cumul (230 mm + 40 mm). Le niveau piézométrique 52,5 m NGF est atteint, correspondant au seuil d'alerte orange.
- Du 08/09 à 13h15 au 08/09 à 15h30 : 70 mm de précipitation. Le point l est obtenu en se déplaçant le long de la diagonale jusqu'à l'intersection avec l'abscisse 340 mm de cumul (270 mm + 70 mm). Le niveau piézométrique 52,9 m NGF est atteint, correspondant au seuil d'alerte rouge.

- Du 08/09 à 15h45 au 08/09 à 17h00 : 27 mm de précipitation. Le point J est obtenu en se déplaçant le long de la diagonale jusqu'à l'intersection avec l'abscisse 367 mm de cumul (340 mm + 27 mm). Le niveau piézométrique 53,05 m NGF est atteint. Le système est en alerte rouge.
- Du 08/09 à 17h15 au 08/09 à 20h30 : interruption des précipitations pendant 3h30.
 Pour ces valeurs de piézométrie, la diminution du niveau piézométrique, associée au tarissement est de 4 cm/h, correspondant à une diminution de 14 cm environ. Le point K est atteint sur l'abaque, il correspond à un niveau piézométrique de 52,91 m NGF. Le système se maintient en alerte rouge.
- Du 08/09 à 20h45 au 08/09 à 23h45 : 67 mm de précipitation. Le point L est obtenu en se déplaçant le long de la diagonale jusqu'à l'intersection avec l'abscisse 434 mm de cumul. Le niveau piézométrique 53,2 m NGF est atteint. L'alerte rouge se poursuit. L'abscisse finale obtenue 434 mm correspond ainsi au cumul total de pluie du double épisode de septembre 2005.





Illustration 30. Abaque pour la crue de septembre 2005

2.3. CONCLUSION SUR L'UTILISATION DE L'ABAQUE « PLUIE - PIEZOMETRIE »

Cet abaque permet d'apprécier les niveaux piézométriques selon la valeur initiale du niveau et les cumuls de précipitation attendus. Toutefois, il existe une imprécision qu'il faut garder à l'esprit du fait de l'approximation de l'information météorologique qui représente environ 10 cm, mais aussi de l'erreur sur la modélisation qui est également évaluée à environ 10 cm. De ce fait l'abaque permet d'évaluer la piézométrie maximale

avec une incertitude de l'ordre de 20 cm. Pour l'épisode de septembre 2005 où les niveaux ont été mesurés de manière fiable, la piézométrie atteignait 53 m. L'abaque fournit une piézométrie maximale pour cet épisode de 53,20 m. Ce résultat est en accord avec l'observé, dans la gamme d'incertitude. Ainsi, malgré le degré d'incertitude, l'abaque permet d'approcher les risques associés à une précipitation attendue et d'anticiper le type d'alerte, à savoir vigilance ou alerte orange et rouge selon les niveaux de remplissage du karst prévus.

3. Réalisation d'abaques (« Pluie – Débit ») pour l'évaluation des débits dans les cadereaux en fonction de la prévision météorologique

3.1. OBJECTIF

Ce travail nécessite de reconstituer les débits de pointe à l'aval des cadereaux à partir de l'ensemble des composantes constituant le flux. L'objectif n'est pas de proposer une alternative au modèle GR Espada. Le modèle GR est un modèle semi distribué, qui prend en compte l'existence des bassins de rétention et permet le transfert des lames d'eau au cours du temps entre les différentes mailles du modèle. Il est proposé ici d'intégrer l'information ruissellement afin d'approcher les débits de pointe à l'aval des cadereaux, pour évaluer la gamme de débits de crue attendue. Ce travail permettra d'approcher, avec une certaine incertitude, le débit à l'aval des cadereaux. Ces débits seront à priori moins précis que ceux obtenus avec Espada. Ces résultats seront utilisés afin d'évaluer les débits de pointe. Ces abaques « **Pluie – Débit** », permettront comme l'abaque « Pluie – Piézométrie », d'anticiper l'alerte.

A ce stade, les travaux réalisés permettent d'approcher les débits de la composante karst. Or, afin de caractériser la réponse globale des cadereaux, il est indispensable de prendre en compte les autres composantes de l'écoulement à savoir les débits issus des ruissellements « urbain » et « rural ». C'est pourquoi il est nécessaire d'approcher ces deux composantes et ainsi compléter les modèles déjà réalisés à l'aide de ces nouveaux modules.

Ces modules vont être développés et calés à partir des hydrogrammes des deux composantes ruissellement calculées par le modèle Gr d'ESPADA. Les hydrogrammes fournis sont, comme pour les hydrogrammes de la composante karst, calculés sans bassin de rétention.

Une fois les modèles réalisés sur les différents cadereaux complétés des composantes du ruissellement, ils permettront de simuler les débits totaux dans les cadereaux et ainsi d'approcher la réponse en termes de débit au niveau des cadereaux notamment le débit maximum au pic de crue.

L'abaque ainsi défini va constituer une approximation haute des débits, puisque le remplissage des bassins de stockage permettant d'écrêter la crue, n'est pas pris en compte dans le modèle.

3.2. COMPOSANTES RUISSELLEMENT

Le modèle est ainsi complété de deux nouveaux réservoirs, leur représentation schématique est fournie Illustration 31. Les résultats du calage sur les différentes

stations en aval des 5 cadereaux sont également présentés ci-après. Les débits issus du modèle Vensim, présentent parfois des différences significatives, toutefois les modèles ont été calés afin de reproduire l'ordre de grandeur de la somme des deux composantes ruissellement. Aussi, il faut rappeler que pour les fortes crues, les débits issus de la composante karst sont beaucoup plus importants que ceux issus du ruissellement. De ce fait, l'erreur sur les débits totaux engendrés par les composantes ruissellement devient alors faible devant les débits totaux. Par exemple pour le 8 septembre 2005 à la station Cimpro du cadereau d'Alès, les hydrogrammes des composantes ruissellement calculées par le modèle Gr fournissent un pic de débit compris entre 15 et 20 m³/s (Illustration 32) alors que le pic de crue de la composante karst est proche de 80 m³/s (Illustration 13).



Illustration 31. Structure des réservoirs ajoutés au modèle permettant de calculer les composantes ruissellement et ruissellement urbain

3.2.1. Composante ruissellement cadereau Alès (station Cimpro)

Les paramètres calés du modèle sont :

Pruissellement = 0,03 * Peff et Kruissellement = 0,6

Purbain = 0,02 * Peff et Kurbain = 0,6

Les résultats (Illustration 32) sont globalement de bonne qualité (bonne représentation du volume total et de l'intensité maximale pour chacune des 4 crues).



Illustration 32. Débit des composantes ruissellement et ruissellement urbain sur le cadereau d'Alès, calculé par le modèle ESPADA et le modèle Vensim sur les quatre crues principales

3.2.2. Composante ruissellement cadereau Pondre

Les paramètres calés du modèle sont :

Pruissellement = 0,04 * Peff et Kruissellement = 0,25

Purbain = 0,03 * Peff et Kurbain = 0,17

Les résultats (Illustration 33) sont dans l'ensemble de bonne qualité (bonne représentation du volume total et de l'intensité maximale pour chacune des 4 crues).



Illustration 33. Débit des composantes ruissellement et ruissellement urbain sur le cadereau de Pondre, calculé par le modèle ESPADA et le modèle Vensim sur les quatre crues principales

3.2.3. Composante ruissellement cadereau Valdegour

Les paramètres calés du modèle sont :

Pruissellement = 0,1 * Peff et Kruissellement = 0,22

Purbain = 0,3 * Peff et Kurbain = 0,22

Les résultats (Illustration 34) sont de bonne qualité (bonne représentation du volume total et de l'intensité maximale pour chacune des 4 crues).



Illustration 34. Débit des composantes ruissellement et ruissellement urbain sur le cadereau de Valdegour, calculé par le modèle ESPADA et le modèle Vensim sur les quatre crues principales

3.2.4. Composante ruissellement cadereau Uzès (VanDyck total)

Les paramètres calés du modèle sont :

Pruissellement = 0,05 * Peff et Kruissellement = 0,05

Purbain = 0,04 * Peff et Kurbain = 0,22

Les résultats (Illustration 35) sont de bonne qualité (bonne représentation du volume total et de l'intensité maximale pour chacune des 4 crues).



Illustration 35. Débit des composantes ruissellement et ruissellement urbain sur le cadereau d'Uzès (à Van Dyck), calculé par le modèle ESPADA et le modèle Vensim sur les quatre crues principales

3.2.5. Composante ruissellement cadereau de Valladas

Les paramètres calés du modèle sont :

Pruissellement = 0,06 * Peff et Kruissellement = 0,6

Purbain = 0,07 * Peff et Kurbain = 0,6

Les résultats (Illustration 36) sont de bonne qualité (bonne représentation du volume total et de l'intensité maximale pour chacune des 4 crues).



Illustration 36. Débit des composantes ruissellement et ruissellement urbain sur le cadereau de Valladas, calculé par le modèle ESPADA et le modèle Vensim sur les quatre crues principales

3.3. UTILISATION DU MODELE COMPLETE DES COMPOSANTES RUISSELLEMENT POUR LA REALISATION D'ABAQUES « PLUIE – DEBIT »

Le modèle désormais complété des composantes ruissellement va être utilisé pour réaliser un nouvel abaque cette fois ci **Pluie-Débit**, à partir du moment où l'indicateur karst est à saturation et que les premiers débordements sont observés. Cet abaque sera réalisé pour chaque station en aval des 5 cadereaux. Il sera proposé afin d'obtenir en première approximation une évaluation des débits maximaux envisagés.

L'utilisation du logiciel *Vensim* a permis de créer un modèle numérique développé à partir du modèle conceptuel de fonctionnement des cadereaux. Ce dernier peut prédire, à partir de différentes structures de pluies, les réponses en termes de débit associés (Q_{karst}, Q_{ruissellement}, Q_{urbain}, Q_{tot Vensim}) aux différents cadereaux. Le but est de comprendre la dynamique des crues associées aux fortes précipitations, alimentées par le système karstique, le ruissellement « rural » et le ruissellement « urbain ». In fine, ce modèle doit permettre d'établir un système préventif construit ici sous la forme d'abaque et sur la base de seuils d'alerte. Il permettra ainsi d'anticiper les crues selon différentes échéances définies à partir des prévisions météorologiques. Dans un premier temps, un test de sensibilité visant à caractériser l'influence de la structure des précipitations sur l'hydrogramme de crue est réalisé.

Le modèle est ainsi adapté pour simuler le comportement du système une fois qu'il est saturé, c'est-à-dire, une fois que le réservoir sol (dont la capacité a été définie entre 50 et 80 mm selon les modèles) et le réservoir karst est saturé. En termes de cumul de précipitations, cette saturation est effective entre 150 et 200 mm (seuil de débordement franchit dans le réservoir karst). Les résultats de cette modélisation vont ainsi caractériser les réponses du système suite à sa saturation dès les premiers débordements du karst observés. Les tests effectués ci-après, utilisent différents cumuls de précipitation et concernent un épisode de pluie qui succède à des précipitations comprises entre 150 et 200 mm, responsable de la recharge des réservoirs sol et karst.

3.4. TEST DE SENSIBILITE

Différentes structures de pluies vont ainsi être testées dans le modèle, avec plusieurs cumuls. Dans un premier temps ce travail va être réalisé sur le cadereau d'Alès à la station de CimPro au pas de temps du quart d'heure. La station CimPro a été choisie car elle est située à l'aval, elle est donc intégratrice des eaux écoulées sur l'ensemble du bassin versant. La sensibilité sera étudiée pour les différentes échéances envisagées à savoir 4 h, 8 h, 12 h et 24 h.

3.4.1. Echéance à 4 h

Six structures de pluie ont été retenues (Illustration 39), elles sont caractérisées au paragraphe suivant. Les trois premières correspondent aux pluies extrêmes observées ces 20 dernières années, les trois autres sont des structures reconstituées à partir d'hypothèses et observations de terrain. Ces structures seront testées sur 4 cumuls de pluie à savoir 100, 200, 300 et 400 mm. Ces cumuls sur 4 h correspondent aux épisodes observés et aux fréquences de retour estimées par la méthode SHYREG (Cemagref, 2005 ; voir annexe 2) :

- 100 mm : période de retour proche de 20 ans,
- 200 mm : période de retour de 500 ans et comparable à l'épisode du 6 septembre 2005,

- 300 mm : période de retour supérieure à 1000 ans et comparable à l'épisode d'octobre 1988 dont le cumul observé était 280 mm,
- 400 mm : maximum extrême envisagé dans le cadre de cette étude utilisée pour définir la gamme maximale d'évolution des débits (situation excessivement pessimiste).

Structure

Les différentes structures sont présentées ci-après. Concernant les trois dernières structures, leur intensité est définie au pas de temps horaire puis discrétisées pour obtenir l'information au pas de temps du quart d'heure.

• Structure 1

La première structure envisagée dite « *Pluie repart 1* » représente une répartition calquée sur l'enregistrement de l'épisode d'octobre 1988, la plus importante crue observée depuis 20 ans. La donnée provient de la station Mas de Ponge, le **3 octobre 1988 de 6 h à 10 h** qui a connu la plus grande accumulation sur 4 h, à savoir 280 mm, avec 34 % des précipitations en 1h, soit une intensité maximale de 95 mm/h.

• Structure 2

La deuxième structure dite « *Pluie repart 2* » représente le maximum de pluie sur 4 h, de l'épisode du **6 septembre 2005** avec un cumul de 201 mm et 48% des précipitations en 1 h soit une intensité maximale de 97 mm/h. Cet épisode fut lui aussi bien suivi en termes de mesures, les données proviennent de la station Kennedy.

• Structure 3

La troisième répartition dite « *Pluie repart 3* » est basée sur le début de l'épisode du **3 octobre 1988 de 4 h à 8 h**, caractérisée par un cumul de 206 mm de pluie (inférieur au cumul pour le même jour de 6h à 10 h) et 44 % des précipitations en 1 h, soit une intensité maximale de 91 mm/h.

• Structure 4

La quatrième structure « *Pluie repart 4* » ou « **Pluie homogène** », représente une répartition homogène sur 4 h de la pluie. Cette structure devrait logiquement conduire à la réponse la moins « intense » en termes de débits de pointe au cadereau. En effet, une pluie tombant en continu sur le bassin versant, entraîne une augmentation graduelle des débits et un pic de crue moins marqué que si la pluie avait connu un pic d'intensité. Le cumul des précipitations horaires est précisé ci-après.

Cumul / Durée	1 h	2 h	3 h	4 h
100	25	25	25	25
200	50	50	50	50
300	75	75	75	75
400	100	100	100	100

Illustration 37. Cumul horaire des précipitations en mm pour la pluie homogène sur 4 heures pour les 4 cumuls testés

• Structure 5

Cette structure « Pluie repart 5 » est la plus « intense », elle est identifiée sous le terme « Pluie extrême ». Cette pluie est construite afin d'être la plus intense possible. Aussi, les mesures de terrain nous montrent que le maximum d'intensité des précipitations sur la zone d'étude est de 97 mm par heure (épisode du 6 septembre 2005), aussi cette valeur correspond à une intensité de récurrence centennale (d'après les données CEMAGREF-Météo France fournies par Egis Eau). La valeur maximale d'intensité est définie à partir de ce maximum légèrement majoré afin de conserver une marge de sécurité par rapport à la pluie d'intensité supérieure à l'occurrence centennale. Cette intensité horaire maximale est égale à 100 mm/h. La pluie extrême est construite pour chaque cumul, de sorte que la première heure présente un maximum d'intensité ainsi que l'heure suivante afin d'obtenir le cumul désiré (par exemple pour un cumul de 200 mm, la pluie connaitra pendant les deux premières heures des intensités de 100 mm). Cette pluie de 200 mm en deux heures correspond à un épisode d'intensité supérieur à l'intensité de l'épisode d'octobre 1988 qui était de 160 mm en 2h. Les différentes intensités pour les cumuls sur 3 et 4 h sont ainsi présentées dans l'illustration suivante.


Illustration 38. Cumul des précipitations en mm sur 4 h pour les épisodes d'octobre 1988, centennal et extrême

Ainsi la pluie extrême proposée est très largement au dessus de la récurrence centennale définie. Elle constitue la limite supérieure, les débits associés à cette pluie constitueront le débit maximum qui pourra avoir lieu dans le cas le plus pessimiste.

• Structure 6

Cette structure « *Pluie repart 6* » a été testée en introduisant des cumuls séparés par des interruptions de précipitation. La structure est ainsi caractérisée par une impulsion suivie d'une interruption, cette série est reproduite sur la période de 4 h. Il s'agit d'une répartition qualifiée d'**intermédiaire** entre la pluie homogène et la pluie extrême. Différents enchainements ont été testés afin de voir si la variation de la structure peut modifier le maximum ou le minimum de débit simulé. Les résultats sont présentés et analysés ci-après.

• Récapitulatif sur les structures

Les différentes structures de pluie utilisées sont présentées ci-après pour un cumul de 100 mm.



Illustration 39. Différentes structures de pluie utilisées pour le test de sensibilité pour un cumul de 100 mm

Les structures des épisodes de 1988 et 2005 (Répartitions 1 à 3) présentent une importante variabilité. Elle est caractéristique de la variabilité associée à la structure de la pluie.

Concernant ces trois structures de pluie, pour chacune le maximum horaire représente respectivement de 34 %, 48 % et 44 % du cumul de pluie sur 4 h. L'intensité horaire maximale rapportée aux différents cumuls est ainsi précisée ci-après.

Répartition / Cumul	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm
Pluie repart 1 – 3 octobre 1988	34	68	102	136
Pluie repart 2 – 6 septembre 2005	48	96	154	192
Pluie repart 3 – 3 octobre 1988 bis	44	88	132	176

Illustration 40. Intensité maximale horaire en mm des trois répartitions observées en octobre 1988 et septembre 2005 pour les différents cumuls

Pour la première structure les intensités maximales associées aux trois premiers cumuls (100 à 300 mm) sont en accord avec l'intensité maximale définie (100 mm), par contre pour des cumuls plus importants, l'intensité maximale horaire est supérieure à cette intensité maximale. C'est pourquoi la répartition 1 ne sera pas utilisée pour définir les débits associés à un cumul supérieur à 300 mm. Aussi, cette pluie du 3 octobre de 6 h à 10 h a été caractérisée par un cumul sur 4 h de 280 mm, l'intensité horaire maximale observée était 95 mm. Ces valeurs observées sont finalement assez proches du cumul à 300 mm associé à une intensité maximale à 102 mm, pour ce cumul la pluie correspondra à l'épisode réellement observé.

Pour les structures 2 et 3, les intensités maximales horaires sont trop fortes dès le cumul de 300 mm. Ces structures ne seront donc pas utilisées pour simuler des débits avec des cumuls supérieurs à 300 mm.

Aussi, les pluies observées le 6 septembre 2005 et le 3 octobre 1988 de 4 à 8 h sont caractérisées par des cumuls de respectivement 199 et 206 mm. Ainsi, les structures 2 et 3 pour un cumul de 200 mm permettront de simuler ces épisodes réels.

Résultats des modélisations cadereau d'Alès – Station Cimpro tot

Les modèles ont été utilisés avec en entrée les différentes structures de pluies. Les modèles sont initialisés de sorte que le réservoir sol est saturé et que le niveau initial de la piézométrie corresponde à la valeur seuil du karst. Ainsi dès la première précipitation, les processus engendrés correspondront à ceux observés lorsque le karst est saturé ou proche de la saturation.

Dans le cas du modèle Cimpro tot (cadereau d'Alès) le niveau minimum du karst est fixé à 52,45 m et le seuil de débordement dans le cadereau (Hseuil 1 pour cadereau) pour la composante karst est fixée à 52,6 m. Les premières pluies vont ainsi permettre de saturer le karst jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur seuil de 52,6 m puis, elles contribueront à alimenter le cadereau via la composante karst.

• Cumul à 100 mm

Le maximum de débit est obtenu avec la pluie extrême, ce débit approche 70 m³/s (Illustration 41). Cette pluie d'une heure (et donc d'intensité 100 mm/h) produit un pic de crue après 1 heure, suivi d'un tarissement. La pluie homogène, produit un pic de crue 20 % plus faible, il vaut 55 m³/s. Avec cette pluie le débit augmente progressivement. Toutefois, une non-linéarité est observée au niveau des débits à 75 min. Cette non-linéarité est caractérisée par des débits faibles dans un premier temps, liés à l'alimentation des cadereaux par la composante ruissellement, puis le niveau de la piézométrie karst augmente et atteint à partir de 75 min (soit un cumul de précipitation d'environ 31 mm) le seuil de débordement de la composante karst (52,6 m). A partir de cet instant les débits de la composante karst alimentent le cadereau qui reçoit déjà le débit issu du ruissellement. Cette non linéarité est également observée entre 15 et 30 minutes pour l'épisode extrême (soit entre 25 et 50 mm de pluie) qui se poursuit par une augmentation plus forte à partir du moment où la composante karst intervient.

La crue n°6 obtenue avec des impulsions de pluies interrompues, produit un pic de débit d'intensité maximal supérieur à celui obtenu avec la pluie homogène et inférieur à celui obtenu avec la pluie extrême. Différentes impulsions ont été testées pour le cumul de 100 mm en faisant varier les temps d'interruption de précipitations. Globalement, ces structures produisent des pics de crue dont la valeur est comprise entre les scénarios de pluie homogène et extrême. Ainsi pour la suite de cette étude les résultats provenant de cette structure de pluie ne seront plus fournis, le débit maximum étant intermédiaire aux débits maximum et minimum simulés avec les pluies de répartition extrême et homogène.

Aussi les débits simulés avec les structures de pluie d'octobre 1988 et septembre 2005 sont finalement assez proches des débits obtenus avec la pluie homogène. Notons toutefois que le débit maximum obtenu dans les deux configurations d'octobre 1988, est supérieur à ceux obtenus avec la pluie homogène, alors qu'il est légèrement inférieur pour la structure de septembre 2005.



Illustration 41. Débits observés pour un cumul de 100 mm à partir des différentes structures de pluie

Cumul à 200 mm

Le débit maximum vaut 140 m³/s (Illustration 42), il est obtenu pour deux types de répartition à savoir après 2 h avec la pluie extrême (200 mm en 2 h, intensité = 100 mm/h) et la répartition bis d'octobre 1988 (Qtot Vensim 3) à savoir 50 mm les deux premières heures suivies de 2 heures avec 73 mm d'intensité horaire. Aussi, le second épisode d'octobre 1988 observé est caractérisé par une précipitation d'environ 200 mm en 4 heures et correspond donc finalement à la pluie simulée pour le cumul 200 mm. Le résultat en termes de débit montre que le débit maximum simulé à partir de la pluie extrême correspond à ce qui aurait pu être observé dans le passé.

Tout comme le cumul à 100 mm, les débits issus de la série homogène sont proches des débits calculés à partir des séries observées. Le maximum de débit obtenu avec la série de pluie homogène vaut 115 m³/s, soit environ 18 % de moins qu'avec la pluie extrême.



Illustration 42. Débits observés pour un cumul de 200 mm à partir des différentes structures de pluie

• Cumul à 300 mm

Les courbes de débit (Illustration 43) sont caractérisées par une nouvelle non-linéarité avec une augmentation plus forte des débits. Cela correspond à la transition dans le modèle entre le coefficient de vidange faible (Kcadereau 1) au coefficient de vidange fort (Kcadereau 2). Cette transition se produit à 120 min pour la courbe extrême soit après 200 mm de précipitations et à 165 min soit 206 mm pour la courbe homogène.

Aussi, la valeur du débit maximum est 350 m³/s, elle est obtenue avec la pluie extrême mais aussi la pluie d'octobre 1988. Cette dernière répartition pour un cumul de 300 mm correspond à la pluie réelle sur 4 h observée le 3 octobre 1988. Les débits associés correspondent ainsi au maximum défini par la pluie extrême.

La pluie homogène produit un débit de 320 m³/s, soit un écart de 9 % avec la pluie extrême.



Illustration 43. Débits observés pour un cumul de 300 mm à partir des différentes structures de pluie

• Cumul à 400 mm

Le cumul à 400 mm a été testé pour évaluer le maximum de débit sur cet intervalle de temps. Le résultat de la modélisation donne un débit de l'ordre de 420 m³/s après 4 h de précipitations à 100 mm/h.



Illustration 44. Débits observés pour un cumul de 400 mm à partir des différentes structures de pluie

	Qmax extrême	Qmax homogène	Différence
Cumul 100 mm	70	55	20 %
Cumul 200 mm	140	115	18 %
Cumul 300 mm	350	320	9 %
Cumul 400 mm	420		

• Récapitulatif des maximums de débit pour le cadereau d'Alès

Illustration 45. Récapitulatif des maximums de débit pour le cadereau d'Alès

Résultats des modélisations pour les autres cadereaux

• Cadereau de Pondre

Dans le modèle du cadereau de Pondre, le niveau minimum de la piézométrie karst est fixé à 52,5 m tout comme le seuil de débordement dans le cadereau (Hseuil 1 pour cadereau) qui conditionne la mise en place de la composante karst. Ainsi, dès les premières précipitations, la composante karst va alimenter le débit total. Les débits simulés pour le cadereau de Pondre pour les différents cumuls sont présentés ci-après et Illustration 47.

Cumul 100 mm

Le débit maximum est de 100 m³/s avec la pluie extrême (pluie de 100 mm/h pendant 1 h). Cette pluie produit un pic de crue après une heure, suivi d'un tarissement. Les débits associés à la pluie homogène sont 30 % inférieurs à ceux associés à la pluie extrême, avec un pic de crue de 70 m³/s. Le débit augmente progressivement, dès le début de la pluie, car le karst est déjà saturé et que la composante karst intervient dès les premières pluies. Les débits de la composante karst alimentent le cadereau en même temps que les débits issus du ruissellement.

Les débits simulés avec les structures de pluie d'octobre 1988 et septembre 2005 sont assez proches des débits obtenus avec la pluie homogène. Les débits maximums obtenus avec ces configurations sont compris entre le débit extrême et le débit maximum de la pluie homogène.

Cumul 200 mm

Le débit maximum vaut 205 m³/s, il est obtenu avec la pluie extrême après 2 h (200 mm en 2 h, intensité = 100 mm/h). Tout comme le cumul à 100 mm, les débits issus de

la série homogène sont proches des débits calculés à partir des séries observées. Le maximum de débit obtenu avec la série de pluie homogène vaut 145 m³/s, soit environ 30 % de moins qu'avec la pluie extrême.

Cumul 300 mm

La valeur du débit maximum est de 255 m³/s, obtenue avec la pluie extrême, après 3 h (100 mm/h pendant 3 h). La pluie homogène produit un débit de 220 m³/s, soit un écart de 14 % avec la pluie extrême. Le débit simulé avec la structure de pluie d'octobre 1988 est assez proche du débit obtenu avec la pluie homogène.

Cumul 400 mm

Le cumul à 400 mm a été testé pour évaluer le maximum de débit sur cet intervalle de temps. Le résultat de la modélisation donne un débit de l'ordre de 290 m³/s après 4 h de précipitations à 100 mm/h.

Récapitulatif des maximums de débit pour le cadereau de Pondre

	Qmax extrême	Qmax homogène	Différence
Cumul 100 mm	100	70	30 %
Cumul 200 mm	205	145	30 %
Cumul 300 mm	255	220	14 %
Cumul 400 mm	290		

Illustration 46. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Pondre



Illustration 47. Débits observés au cadereau de Pondre pour les 4 cumuls à partir des différentes structures de pluie

• Cadereau de Valdegour

Dans le modèle du cadereau de Valdegour, le niveau minimum de la piézométrie karst est fixé à 52,5 m tout comme le seuil de débordement dans le cadereau (Hseuil 1 pour cadereau) qui conditionne la mise en place de la composante karst. Ainsi, dès les premières précipitations, la composante karst va alimenter le débit total. Les débits simulés pour le cadereau de Valdegour pour les différents cumuls sont présentés ciaprès et Illustration 49.

Cumul 100 mm

Le débit maximum est 47 m³/s avec la pluie extrême. L'hydrogramme associé à cette pluie est comparable à celui obtenu pour les autres cadereaux, avec un pic de crue après une heure (pluie de 100 mm/h, pendant 1 h), suivi d'un tarissement. Les débits associés à la pluie homogène sont 40 % inférieur à ceux obtenus avec la pluie extrême. Le pic de crue est égal à 28 m³/s. Le débit augmente progressivement, dès le début de la pluie, car le karst est déjà saturé. Les débits de la composante karst alimentent le cadereau qui reçoit en parallèle les débits issus du ruissellement.

Les débits simulés avec les structures de pluie d'octobre 1988 et septembre 2005 sont assez proches des débits obtenus avec la pluie homogène. Le débit maximum obtenu avec les structures de pluies observées est compris entre les débits maximums simulés avec les pluies extrême et homogène.

Cumul 200 mm

Les courbes de débit sont caractérisées par une non-linéarité avec une augmentation plus forte des débits. Cette dernière correspond à la transition dans le modèle entre le coefficient de vidange faible (Kcadereau 1) et le coefficient de vidange fort (Kcadereau 2). Elle se produit à 75 min pour la courbe extrême soit après 125 mm de précipitations et à 165 min soit 140 mm environ pour la courbe homogène.

Le débit maximum vaut 120 m³/s et est obtenu après 2 h de pluie extrême. Par rapport au cumul à 100 mm, les débits issus de la série homogène sont plus éloignés des débits calculés à partir des séries observées. Le maximum de débit obtenu avec la série de pluie homogène vaut 80 m³/s, soit environ 34 % de moins qu'avec la pluie extrême, alors que les débits issus des séries observées varient de 85 m³/s (octobre 1988) à environ 100 m³/s (octobre 1988 bis). Néanmoins, ceux-ci restent compris entre le débit extrême et le débit maximum de la pluie homogène.

Cumul 300 mm

Les courbes de débit sont caractérisées par la même non-linéarité avec une augmentation plus forte des débits, à 75 min pour la courbe extrême (125 mm de précipitations) et à 105 min soit 130 mm de précipitations pour la courbe homogène.

La valeur du débit maximum est 135 m³/s, obtenue avec la pluie extrême, après 3 h (100 mm/h pendant 3 h). La pluie homogène produit un débit de 110 m³/s, soit un écart de 19 % avec la pluie extrême. Le débit simulé avec la structure de pluie d'octobre 1988 est assez proche du débit obtenu avec la pluie homogène.

Cumul 400 mm

Le cumul à 400 mm a été testé pour évaluer le maximum de débit sur cet intervalle de temps. Le résultat de la modélisation donne un débit de l'ordre de 145 m³/s après 4 h de précipitations à 100 mm/h.

Récapitulatif des maximums de débit pour le cadereau de Valdegour

	Qmax extrême	Qmax homogène	Différence
Cumul 100 mm	47	28	40 %
Cumul 200 mm	120	80	34 %
Cumul 300 mm	135	110	19 %
Cumul 400 mm	145		

Illustration 48. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valdegour



Illustration 49. Débits observés au cadereau de Valdegour pour les 4 cumuls à partir des différentes structures de pluie

• Cadereau d'Uzès

Dans le modèle du cadereau d'Uzès, le niveau minimum de la piézométrie karst est fixé à 52,4 m tout comme le seuil de débordement dans le cadereau (Hseuil 1 pour cadereau) qui conditionne la mise en place de la composante karst. Ainsi, dès les premières précipitations, la composante karst va alimenter le débit total. Les débits simulés pour le cadereau d'Uzès pour les différents cumuls sont présentés ci-après et Illustration 51.

Cumul 100 mm

Le débit maximum est 35 m³/s avec la pluie extrême. Les débits associés à cette pluie ont le même comportement que celui des autres cadereaux, avec un pic de crue après une heure (pluie de 100 mm/h, pendant 1 h), suivi d'un tarissement. Le débit maximum associé à la pluie homogène est 29 % inférieur à ceux issus de la pluie extrême, avec un pic de crue à 25 m³/s. Le débit augmente progressivement, dès le début de la pluie, car le karst est déjà saturé et alimente ainsi la composante karst.

Les débits simulés avec les structures de pluie d'octobre 1988 et septembre 2005 sont assez proches du débit obtenu avec la pluie homogène. Les débits maximums sont compris entre le débit maximum homogène celui-ci et le débit maximum extrême.

Cumul 200 mm

Les courbes de débit ont le même comportement que pour le cumul 200 mm modélisé à Valdegour. Elles sont caractérisées par une non-linéarité avec une augmentation plus forte des débits due au changement du coefficient de vidange (Kcadereau 1 < Kcadereau 2). Cette transition se produit à 90 min pour la courbe extrême soit après 150 mm de précipitations et à 180 min soit 150 mm environ pour la courbe homogène.

Le débit maximum vaut 130 m³/s et est obtenu après 2 h pour la pluie extrême. Les débits issus de la série homogène sont assez proches des débits calculés à partir des séries de précipitation observées. Le maximum de débit obtenu avec la série de pluie homogène vaut 100 m³/s, soit environ 23 % de moins qu'avec la pluie extrême, alors que les débits issus des séries observées varient de 103 m³/s (octobre 1988) à 115 m³/s (octobre 1988 bis). Néanmoins, ceux-ci restent compris entre le débit extrême et le débit maximum de la pluie homogène.

Cumul 300 mm

Les courbes de débit sont caractérisées par la même non-linéarité avec une augmentation plus forte des débits. Cette transition se produit à 90 min pour la courbe extrême (150 mm de précipitations) et à 120 min, soit également 150 mm pour la courbe homogène.

La valeur du débit maximum est 150 m³/s, obtenue avec la pluie extrême, après 3 h (100 mm/h pendant 3 h). La pluie homogène produit un débit de 125 m³/s, soit un écart de 17 % avec la pluie extrême. Le débit simulé avec la structure de pluie d'octobre 1988 est assez proche du débit obtenu avec la pluie homogène.

Cumul 400 mm

Le cumul à 400 mm a été testé pour évaluer le maximum de débit sur cet intervalle de temps. Le résultat de la modélisation donne un débit de l'ordre de 160 m³/s après 4 h de précipitations à 100 mm/h.

Récapitulatif des maximums de débit pour le cadereau d'Uzès

	Qmax extrême	Qmax homogène	Différence
Cumul 100 mm	35	25	29 %
Cumul 200 mm	130	100	23 %
Cumul 300 mm	150	125	17 %
Cumul 400 mm	160		

Illustration 50. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Uzès



Illustration 51. Débits observés au cadereau d'Uzès pour les 4 cumuls à partir des différentes structures de pluie

• Cadereau de Valladas

Dans le modèle du cadereau de Valladas, le niveau minimum de la piézométrie karst est fixé à 52,5 m, le seuil de débordement dans le cadereau (Hseuil 1 pour cadereau) est égal à 52,6 m. Les débits simulés pour le cadereau d'Uzès pour les différents cumuls sont présentés ci-après et Illustration 51.

Cumul 100 mm

Le débit maximum est de 110 m³/s avec la pluie extrême. Les débits associés à cette pluie ont le même comportement que celui des autres cadereaux, avec un pic de crue après une heure (pluie de 100 mm/h, pendant 1 h), suivi d'un tarissement. Le débit maximum associé à la pluie homogène est 50 % inférieur à ceux issus de la pluie extrême, avec un pic de crue à 55 m³/s.

Les débits simulés avec les structures de pluie d'octobre 1988 et septembre 2005 sont assez proches du débit obtenu avec la pluie homogène et sont compris entre celui-ci et le débit extrême.

Cumul 200 mm

Le débit maximum vaut 150 m³/s et est obtenu après 2 h pour la pluie extrême. Les débits issus de la série homogène sont assez proches des débits calculés à partir des séries de précipitation observées. Le maximum de débit obtenu avec la série de pluie homogène vaut 80 m³/s, soit environ 46 % de moins qu'avec la pluie extrême, alors que les débits issus des séries observées varient de 95 m³/s (octobre 1988) à 140 m³/s (octobre 2005). Néanmoins, ceux-ci restent compris entre le débit extrême et le débit maximum de la pluie homogène.

Cumul 300 mm

La valeur du débit maximum est 160 m³/s, obtenue avec la pluie extrême, après 3 h (100 mm/h pendant 3 h). La pluie homogène produit un débit de 120 m³/s, soit un écart de 24 % avec la pluie extrême. Le débit simulé avec la structure de pluie d'octobre 1988 est assez proche du débit obtenu avec la pluie homogène.

Cumul 400 mm

Le cumul à 400 mm a été testé pour évaluer le maximum de débit sur cet intervalle de temps. Le résultat de la modélisation donne un débit de l'ordre de 160 m³/s après 4 h de précipitations à 100 mm/h.

Récapitulatif des maximums de débit pour le cadereau de Valladas

	Qmax extrême	Qmax homogène	Différence
Cumul 100 mm	110	55	50 %
Cumul 200 mm	150	81	46 %
Cumul 300 mm	160	122	24 %
Cumul 400 mm	162		

Illustration 52. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valladas



Illustration 53. Débits observés au cadereau de Valladas pour les 4 cumuls à partir des différentes structures de pluie

BRGM/RP-58286-FR – Rapport final

3.4.2. Conclusion tests de sensibilité

L'analyse de sensibilité a également été conduite pour les échéances à 8, 12 et 24 h sur l'ensemble des cadereaux. Elle est fournie en annexe 2. Les résultats de cette analyse montrent que quels que soient les échéances et cumuls envisagés, les structures réelles de la pluie fournissent un débit maximum qui évolue entre le débit calculé à partir d'un épisode extrême constitué par des cumuls d'intensité horaire égal à 100 mm et un débit plus faible défini à partir d'une pluie homogène.

3.5. REALISATION DES ABAQUES

Les abaques vont ainsi être construits à partir des modèles calculant les hydrogrammes extrêmes et homogènes aux différentes échéances horaires (de 1 à 24 h). L'hydrogramme extrême simulé permettra à partir de la valeur du pic de crue, de prédire pour chaque heure le débit maximum possible. De la même façon l'hydrogramme avec la pluie homogène caractérisera la valeur approximative basse des débits. Le débit envisagé sera alors situé entre ces deux courbes. Ces abaques seront utilisés une fois le karst saturé, c'est-à-dire à partir du moment où la piézométrie de l'indicateur karst est égale à 52,5 m NGF. Cet abaque s'utilise donc après l'abaque pluie-piézométrie pour évaluer les débits une fois le seuil de débordement (alerte orange) atteint.

Aussi, les débits de pointe des hydrogrammes utilisés pour la construction des abaques proviennent des résultats des simulations avec les modèles réservoirs mis en œuvre à partir du logiciel Vensim. Ces modèles ont été calés sur les stations avales des cadereaux à partir des hydrogrammes calculés par le modèle Gr ESPADA, en condition d'absence de bassin de rétention. Les débits maximums ainsi fournis ne prennent donc pas en compte les capacités de stockage et d'écrêtage de ces bassins, ils constituent ainsi une approximation surestimée du débit réel.

Ces valeurs bien qu'approximatives, seront toutefois conservées car elles permettent d'évaluer le débit maximum. Dans le cas où les bassins seraient vides au début de la mise en place de la composante karst, alors l'abaque risque de surestimer les débits en début de crue. A l'inverse dans le cas où les bassins de rétention sont déjà saturés au début de la crue, alors le débit observé s'approchera du débit défini à partir de l'abaque.

Ainsi, les abaques sont réalisés pour les échéances horaires allant jusqu'à 24 h pour chaque station en aval des cadereaux. Ils fournissent une gamme d'évolution possible des débits pour des cumuls de précipitation allant de 25 à 500 mm (25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500 mm). La valeur de 500 mm correspond en réalité à un épisode d'au moins 650 mm car il faut à minima 150 mm pour saturer le sol et le karst avant la mise en place de la composante karst. Cette valeur de 650 mm peut être considérée comme excessivement pessimiste et borne ainsi l'abaque. La méthode de construction de l'abaque est précisée ci-après pour le cadereau d'Alès.

Sur l'abaque correspondant au graphique débit en fonction du temps pour les 24 échéances (Illustration 54), les courbes de débit minimum et maximum sont calculées avec les structures de pluie extrême et homogène pour différents cumuls.

Aussi, les hydrogrammes extrêmes, du fait de leur construction (forte intensité en début d'épisode), présentent un maximum de débit d'épisode. Par exemple (Illustration 54) pour le cumul de 300 mm (pluie constituée de 100 mm les trois premières heures), le maximum de crue se produit au bout de trois heures (débit = 350 m³/s après 3 h), puis le tarissement intervient. Dans l'utilisation de l'abaque, afin d'envisager des répartitions différentes de la pluie (300 mm aux heures 12 à 14 par exemple), il conviendra de conserver la valeur maximale du débit (350 m³/s dans le cas de l'exemple) quel que soit l'échéance.

Ainsi plus la durée des précipitations sera courte, plus la gamme de débit sera resserrée. Par exemple si Météo France annonce un cumul de 300 mm pour les 6 heures à venir, l'abaque Alès évalue le maximum des débits entre 275 et 350 m³/s. Par contre si le même cumul est attendu sur une durée de 24 h, le débit sera compris entre 140 et 350 m³/s, la gamme d'incertitude est alors beaucoup plus grande.



Illustration 54. Abaque pluie-débit sur le cadereau d'Alès à Cimpro



Illustration 55. Abaque pluie-débit sur le cadereau de Pondre



Illustration 56. Abaque pluie-débit sur le cadereau de Valdegour



Illustration 57. Abaque pluie-débit sur le cadereau d'Uzès à Van-Dyck



Illustration 58. Abaque pluie-débit sur le cadereau de Valladas

3.6. UTILISATION DES ABAQUES

Le premier abaque **pluie – piézométrie** permet d'évaluer l'**évolution de la piézométrie** et ainsi la **saturation de l'aquifère karstique**. Le second, **pluie – débit**, permet, une fois le karst saturé d'approcher le maximum de débit du pic de crue. Les deux abaques s'utilisent donc successivement.

La valeur de la capacité de rétention du sol est égale à 50 mm pour Mazauric et également pour les cadereaux d'Alès, de Valdegour et de Valladas. Par contre pour les cadereaux de Pondre et Uzès (station Van-Dyck) elle est égale à 80 mm. Selon le cadereau étudié, il faudra donc prendre soit l'abaque sol = 50 mm (Illustration 59); soit sol = 80 mm (Illustration 60).



Illustration 59. Abaque pluie – piézométrie pour Alès et Valladas (sol = 50 mm)



Illustration 60. Abaque pluie – piézométrie pour Pondre et Uzès (sol = 80 mm)

La méthode d'utilisation des abaques est fournie à titre d'exemple pour les trois fortes crues (octobre 1988, septembre 2002 et septembre 2005) au cadereau d'Alès à la station CimPro et au cadereau d'Uzès à Van-Dyck. Les données de précipitations utilisées sont celles de CimPro (ALAM = 0.52; ALMO = 0.25 et POMO = 0.23) et celles d'Uzès total (UZAM = 0.71 et UZMO = 0.29).

3.6.1. Episode du 3 octobre 1988 à Alès

L'abaque pluie-piézométrie (Illustration 26) est réutilisé à partir du point C (cf. p 52) puis les événements suivants se succèdent :

- De 3h15 à 6h30 : 81 mm de précipitation. Passage au point D (Illustration 61), le niveau devient supérieur à la limite de débordement (52,5 m). A partir de cet instant le second abaque (pluie-débit) est utilisé.
- De 6h30 à 10h30 : 240 mm de précipitation en 4 h (point E abaque pluie piézométrie). L'abaque Alès est utilisé à 4 h avec le cumul directement supérieur à 240 mm, c'est-à-dire 250 mm. D'abrès l'abaque, les débits maximums sont compris entre 295 et 310 m³/s. Le débit total calculé avec le modèle Gr Espada vaut 330 m³/s, il est légèrement supérieur à celui de l'abaque mais reste très proche. L'abaque est donc cohérent avec les résultats du modèle Gr ESPADA.



Illustration 61. Utilisation couplée des deux abaques pour l'épisode d'octobre 1988 au cadereau d'Alès (station Cimpro)

3.6.2. Episode du 3 octobre 1988 à Uzès

L'abaque pluie-piézométrie est utilisé à partir du point A (cf. p 52) puis les événements suivants se succèdent :

- Du 29/09 au 3/10 à 6h30 : 200 mm de précipitation. Passage au point B (Illustration 61), le niveau devient supérieur à la limite de débordement (52,5 m). A partir de cet instant le second abaque (pluie-débit) est utilisé.
- De 6h45 à 11h45 : 280 mm de précipitation en 5 h (point C). L'abaque Uzès est utilisé à 5 h avec le cumul 300 mm. D'abrès l'abaque, les débits maximums sont compris entre 105 et 148 m³/s. Le débit total calculé avec le modèle Gr Espada vaut 125 m³/s. Ce résultat est en accord avec l'abaque.



Illustration 62. Utilisation couplée des deux abaques pour l'épisode d'octobre 1988 au cadereau d'Uzès (station Van-Dyck)

3.6.3. Episode du 8 au 9 septembre 2002 à Alès

L'abaque pluie-piézométrie (Illustration 28) est réutilisé à partir du point A (cf. p 55) puis les événements suivants se succèdent :

- Du 08/09 à 10h30 au 09/09 à 10h15 : 120 mm de précipitation. Le point B (cumul de précipitation = 120 + 50 = 170 mm) localisé au niveau du débordement est atteint (Illustration 63). A partir de cet instant le second abaque pluie-débit est utilisé.
- Le 09/09 de 10h30 à 14h30 : 70 mm de précipitation en 4 h (point C). Les deux cumuls encadrant la précipitation, à savoir 50 et 100 mm, sont utilisés pour 4 h. Pour le cumul à 50 mm, les débits sont compris entre 18 et 25 m³/s et pour le cumul à 100 mm, ils sont compris entre 55 et 69 m³/s. Les valeurs moyennes des bornes pour ces deux cumuls sont 37 à 47 m³/s. Le débit maximum calculé par Espada était égal à 45 m³/s, valeur en accord avec les résultats de l'abaque.



Illustration 63. Utilisation couplée des deux abaques pour l'épisode de septembre 2002 au cadereau d'Alès (station Cimpro)

3.6.4. Episode du 8 au 9 septembre 2002 à Uzès

L'abaque pluie-piézométrie (Illustration 28) est réutilisé à partir du point A (cf. p 55) puis les événements suivants se succèdent :

- Avant l'épisode du 8 septembre il y a eu 110 mm de précipitation, le sol est rechargé et le karst est vide (Point O).

- Du 08/09 à 10h00 au 09/09 à 10h00 : 120 mm de précipitation. Le point B (cumul de précipitation = 120 + 80 = 200 mm) localisé au niveau du débordement est atteint (Illustration 64). A partir de cet instant le second abaque pluie-débit est utilisé.
- Le 09/09 de 10h à 13h : 85 mm de précipitation en 3 h (point C sur l'abaque pluie piézométrie). Le cumul de 100 mm à 3h donne un débit compris entre 28 et 35 m³/s. Le débit maximum calculé par Espada est égal à 36 m³/s, cette valeur en accord avec le résultat de l'abaque.



Illustration 64. Utilisation couplée des deux abaques pour l'épisode de septembre 2002 au cadereau d'Alès (station Cimpro)

3.6.5. Episode du 6 au 8 septembre 2005 à Alès

L'abaque pluie-piézométrie (Illustration 30) est réutilisé à partir du point O puis les événements suivants se succèdent :

- Du 06/09 à 15h30 à 17h45 : 114 mm de précipitation. Le seuil de débordement est atteint au niveau du point B (cumul = 50 + 114 mm = 164 mm).
- Du 06/09 à 18h00 au 07/09 à 2h : 73 mm de précipitation en 8h (soit un cumul de 237 mm (164 + 73 mm), le point C est atteint, le niveau est 52,95 m NGF). L'abaque pluie débit est utilisé avec les cumuls de 50 et 100 mm et une durée de 8 h. Ce dernier évalue le débit maximum pour 50 mm entre 15 et 25 m³/s et pour 100 mm entre 45 et 70 m³/s. La moyenne calculée est ainsi égale à 30 à 47 m³/s. Aussi le débit calculé par le modèle Gr est d'environ 35 m³/s, ce qui est cohérent avec l'abaque.
- Du 07/09 à 2h au 08/09 à 8h : interruption des précipitations pendant 30 h associée à un fort tarissement.
 - De 2h à 19h, 17h de tarissement au rythme de 4 cm/h (piézométrie supérieure à 52,25 m NGF), soit une diminution de 68 cm. Le niveau atteint est 52,27 m (52,95 0,68).
 - Puis du 07/09 à 19 h au 08/09 à 8 h, soit 13 h d'interruption, diminution des débits de 2 cm/h, soit une chute de 26 cm. Le niveau atteint le point D à 52 m NGF.
- Le 08/09 de 8h à 13 h : 42 mm de précipitation. Cumul de précipitation égal à 279 mm, le point E est atteint au niveau du seuil de débordement à 52,5 m NGF.
- Le 08/09 de 13 h 15 à 17 h : 103 mm de précipitation en 4 h (point F sur l'abaque pluie piézométrie). L'abaque pluie débit à 4 h est utilisé pour un cumul de 100 mm. Cet abaque informe que le débit maximum doit être compris entre 55 et 70 m³/s, le débit maximum calculé par le modèle Gr Espada sur cet intervalle de temps est égal à 55 m³/s, cette valeur est en accord avec l'abaque.
- Du 08/09 à 13 h 15 au 09/09 à 1 h : 197 mm de précipitation en 12 h (point G sur l'abaque pluie piézométrie). L'abaque pluie débit est utilisé pour un cumul de 200 mm à 12 h. Cet abaque informe que le débit maximum doit être compris entre 80 et 140 m³/s, le débit maximum calculé par le modèle Gr Espada est égal à 90 m³/s, cette valeur est en accord avec l'abaque.



Illustration 65. Utilisation couplée des deux abaques pour le doube épisode de septembre 2005 au cadereau d'Alès (station Cimpro)

3.6.6. Episode du 6 au 8 septembre 2005 à Uzès

L'abaque pluie-piézométrie (Illustration 30) est utilisé à partir du point A puis les événements suivants se succèdent :

- Du 05/09 au 06/09 à 16h00 : 80 mm de précipitation. Le sol est rechargé, le point O est atteint.
- Du 06/09 à 16h00 au 07/09 à 2h : 105 mm de précipitation (soit un cumul de 185 mm), le point B est atteint, à la limite du débordement (52,45 m).
- Du 07/09 à 2h au 08/09 à 8h : interruption des précipitations pendant 30 h associée à un fort tarissement.
 - De 2h à 7h, 5 h de tarissement au rythme de 4 cm/h (piézométrie supérieure à 52,25 m NGF), soit une diminution de 20 cm. Le niveau atteint est 52,25 m (52,45 0,20).
 - Puis du 07/09 à 7 h au 08/09 à 8 h, soit 25 h d'interruption, diminution des niveaux de 2 cm/h, soit une chute de 50 cm. Le niveau atteint le point C à 51,75 m NGF.
- Le 08/09 de 7 h à 14 h30 : 67 mm de précipitation. Le cumul des précipitations est égal à 279 mm, le point D est atteint au niveau du seuil de débordement à 52,5 m NGF.
- Le 08/09 de 14 h 45 à 16 h 30 : 45 mm de précipitation en 2 h. L'abaque pluie débit Uzès pour un cumul de 50 mm à 2 h est utilisé. L'abaque informe que le débit maximum doit être compris entre 15 et 19 m³/s, le débit maximum calculé par le modèle Gr Espada sur cet interval de temps est égal à 18 m³/s, cette valeur est en accord avec l'abaque.
- Du 08/09 à 14 h 45 au 09/09 à 1 h 45 : 80 mm de précipitation en 10 h (point E sur l'abaque pluie piézométrie). L'abaque pluie débit est utilisé pour le cumul de 100 mm à 10 h. Cet abaque informe que le débit maximum doit être compris entre 15 et 35 m³/s, le débit maximum calculé par le modèle Gr Espada est égal à 18 m³/s, cette valeur est en accord avec l'abaque.


Illustration 66. Utilisation couplée des deux abaques pour l'épisode du 8 septembre 2005 au cadereau d'Uzès (station Van-Dyck)

4. Intégration de la composante karst dans le modèle Gr ESPADA

L'intégration de la composante karst au modèle Gr ESPADA a été réalisée par Egis Eau, tout comme la rédaction de la synthèse du travail réalisé. Cette synthèse est présentée ci-après.

4.1. ELABORATION DES HYDROGRAMMES DE CALAGE POUR LE MODELE DE REPRESENTATION DU KARST

4.1.1. Présentation de la modélisation mise en place pour ESPADA

Le système ESPADA est basé sur une modélisation hydrologique des épisodes pluvieux, sur la base d'un découpage des bassins versants des cadereaux en sousbassins versants. Cette topologie permet de prendre en compte la variabilité spatiale de la pluie et celle des caractéristiques des bassins versants et des réseaux hydrauliques, ainsi que de représenter les différents bassins de stockage présents sur ces bassins.

L'Illustration 67 montre la topologie mise en place sur la Ville de Nîmes.



Illustration 67. Découpage des bassins versants des cadereaux pour le système ESPADA

Les modèles suivants sont mis en place pour la représentation de la transformation pluie-débit et des écoulements :

- Modèle GR4 pour la modélisation pluie-débit des parties non imperméables des bassins versants (zones rurales et parties non imperméabilisées des sous-bassins versants urbains),
- Modèle RERAM pour la modélisation pluie-débit des secteurs urbanisés (les bassins versants représentés par ce modèle sont indiqués sur l'Illustration 67),
- Modèle de propagation simplifié armvar pour la propagation dans les réseaux hydrauliques,
- Modèle d'écrêtement pour les retenues.

Ces modèles ont été calés sur les épisodes de crue disponibles.

Les épisodes de faible importance ont été utilisés pour le calage du modèle « urbain » RERAM, pour ces épisodes seules les zones imperméabilisées participent à la crue.

Les épisodes plus importants utilisés pour le calage sont les épisodes principaux suivants :

- Octobre 1988
- Mai 1998
- Septembre 2002
- Novembre 2004
- Septembre 2005 (2 épisodes : 5-6 septembre et 8-9 septembre) : ces épisodes ont donné lieu à un recalage de certains paramètres des modèles.

Les observations disponibles pour le calage étaient variables selon les épisodes :

- les observations aux stations limnis ont été utilisées quand elles existaient,
- des estimations de terrain ont été effectuées pour les épisodes récents marquants, afin de disposer d'une valeur estimée du maximum de la crue. Ces estimations ont été faites à l'aide de modélisations hydrauliques locales,
- pour la crue d'octobre 1988, les informations disponibles sont issues des travaux de la commission hydraulique.

4.1.2. Méthodologie

La méthodologie employée pour l'élaboration des hydrogrammes de travail pour le projet est la suivante :

- calcul des hydrogrammes de crue pour les épisodes choisis sans incidence des bassins de stockage,

- calcul des hydrogrammes de crue générés par le ruissellement (urbain et ruissellement direct à l'exutoire du bassin versant),
- calcul des hydrogrammes générés par le réservoir eau gravitaire du modèle GR4. Ces hydrogrammes constitueront les hydrogrammes de calage du modèle « karst ».

Pour les épisodes pris en compte pour l'étude, les hydrogrammes correspondants aux trois composantes de l'écoulement ont été déterminés, sans incidence des bassins de stockage, pour les points suivants :

- Cadereau d'Alès : limni Anduze, branche Alès amont limni Cimpro, branche Camplanier amont limni Cimpro, limni Cimpro
- Cadereau d'Uzès : limni Engances, entrée retenue de l'Oliveraie, limni VanDyck
- Cadereau de Valladas : limni Valladas
- Cadereau de Valdegour : limni Valdegour
- La Pondre : limni Pondre

Les hydrogrammes intermédiaires ont également été déterminés lorsque le cadereau est découpé en plusieurs sous-zones.

4.2. TESTS DES MODELES SUR LA TOPOLOGIE ESPADA

4.2.1. Tests des modèles sur la topologie ESPADA

Les modèles de représentation du comportement du karst élaborés dans les phases précédentes ont été testés sur la base de la topologie ESPADA, afin de valider le mode d'utilisation du modèle en sous-bassin versant. En effet, ce mode de calcul permettra ensuite la prise en compte explicite des bassins de stockage.

Pour ces tests, les modules de calcul ont été modifiés de façon à prendre en compte les nouveaux paramètres et modes de calcul de la composante « karst » de l'hydrogramme de crue.

Le réservoir sol utilisé pour initialiser le karst a été intégré dans le modèle.

Dans un premier temps, il remplace le réservoir sol du modèle GR4, en conservant la fonction de transfert à l'exutoire (hydrogramme unitaire).

La composante ruissellement urbain n'a pas été modifiée.

Les tests ont été effectués sur le cadereau d'Alès, en prenant en compte les jeux de paramètres établis pour les différents secteurs du bassin versant :

- amont Anduze
- branche Alès de Anduze à Cimpro
- branche Camplanier

Les résultats obtenus (Illustration 68 et Illustration 69) montrent une bonne représentation des hydrogrammes pour la composante karst.

Pour la composante ruissellement direct, un travail complémentaire est à réaliser.



Illustration 68. Résultats graphiques des tests mis en œuvre à Cimpro (épisodes d'octobre 1988, mai 1998 et septembr 2002)



Illustration 69. Résultats graphiques des tests mis en œuvre à Cimpro (épisode de septembre 2005)

4.2.2. Tests de modification des modèles ESPADA

Les réflexions entre Egis Eau, le BRGM et la Ville de Nîmes ont conduit à proposer différents principes de représentation de la partie « réservoir sol » de GR4 et de la fonction de production associée au déclenchement des écoulements du karst.

En effet, dans le système ESPADA, le réservoir sol est actuellement initialisé en début de crue sur la base du cumul pluviométrique des dernières 48 heures. Les pistes à étudier sont les suivantes :

- voir s'il est possible de remplacer le réservoir sol du modèle GR4 par le réservoir sol permettant d'initialiser le karst, en modifiant le coefficient de répartition de la pluie nette du modèle GR4 selon un indicateur disponible. Les premiers tests réalisés avec un coefficient de répartition fixe pour tous les épisodes montrent des résultats cohérents, avec la nécessité de trouver un indicateur permettant de faire varier la part de pluie qui contribue au ruissellement direct, en fonction du niveau de saturation du sol (pour les tests effectués sur le cadereau d'Alès, le coefficient a été fixé à 0.0374 au lieu de 0.1 dans le modèle GR4 initial)
- conserver le réservoir sol du modèle GR4, avec mise au point d'une fonction de répartition de la pluie qui l'alimente,
- conserver les fonctions de transfert du modèle GR4, et utiliser les modèles solpiézo-karst comme fonction de production.

Dans tous les cas, la fonction « ruissellement urbain », sera conservée.

Le travail en cours de l'EMA permettra d'améliorer la représentativité des paramètres du sol (taille des réservoirs notamment selon la nature du sol) et la recherche d'un indicateur pour la part de pluie participant au ruissellement direct.

Conclusion

A partir de l'étude hydrogéologique menée sur le bassin d'alimentation de la Ville de Nîmes en relation avec le fonctionnement des cadereaux, le site de l'**Aven Mazauric** s'est révélé représentatif de l'état de saturation de l'aquifère. Ce point a ainsi été utilisé comme « **Indicateur Karst** ». Ainsi, une fois le karst saturé, la composante karst associée au débordement de l'aquifère et aussi à l'augmentation du ruissellement du fait du refus à l'infiltration, se met en place engendrant des débits significatifs dans les cadereaux. Un **modèle réservoir** « **karst** » calé sur les chroniques piézométriques de Mazauric a été réalisé au pas de temps du quart d'heure à l'aide du logiciel Vensim. Il permet de simuler les niveaux dans le karst et ainsi d'anticiper à partir des niveaux d'alerte et de vigilance définis à partir des crues historiques, le degré de gravité de la crue attendue. Les résultats de ce modèle ont été utilisés pour mettre en place un outil d'aide à la décision, il a été réalisé sous forme d'un **abaque** appelé « **Pluie – Piézométrie** ».

Le modèle a par la suite été complété à l'aide d'un **module dit « cadereau »** afin de reproduire les **débits de la composante karst**. Ce dernier est alimenté par les précipitations en fonction du degré de saturation du réservoir karst. Les paramètres de ce module ont étés calés afin de reproduire les débits de la composante karst, calés à partir des hydrogrammes recalculés en l'absence de bassin de rétention par Egis Eau. Un modèle a été réalisé pour chacune des stations suivies sur les 5 cadereaux. Ce modèle permet ainsi de simuler à partir de différents scénarios de pluies, le débit de la composante karst en fonction du comportement de l'indicateur karst.

La structure du modèle (réservoir karst et module cadereau) développé et calé a ensuite été **implémentée dans le modèle GR du réseau ESPADA**. Les résultats obtenus sont comparables à ceux issus de la précédente version du modèle Gr, modèle qui posait le problème de l'initialisation. Désormais le modèle Gr permet de simuler le débit de la composante karst, l'initialisation des paramètres dépendra des précipitations survenues les deux mois précédent l'épisode. Afin de s'affranchir de cette initialisation, le modèle Gr doit encore être adapté pour pouvoir tourner en continu. Ce travail est prévu par la Ville de Nîmes et doit être réalisé au cours du deuxième semestre 2010 en collaboration avec Egis Eau.

Enfin, le modèle réalisé a été complété d'un module permettant de simuler la **composante ruissellement**. Il permet alors de simuler les débits totaux à chacune des stations en aval des cinq cadereaux. Ces modèles utilisés en mode prévisionnels ont permis de reconstituer la gamme de débit associée aux différents scénarios climatiques. Ces résultats ont été utilisés pour construire des abaques, simple d'utilisation, dits « **Pluie – Débit** ». Couplés aux premiers abaques réalisés (Pluie – Piézométrie), **ils permettent d'anticiper l'alerte mais aussi les débits maximums dans les cadereaux**.

Bibliographie

Fleury P., Ladouche B., Courtois N., 2007. Aléas inondations de la ville de Nîmes par contribution des eaux souterraines. Rapport final. BRGM/RP-55558-FR, 152 p.

Fleury P., Izac J-L., 2007. Rapport de fin de sondages hydrogéologiques réalisés sur la ville de Nîmes. Rapport final. BRGM/RP-55836-FR, 33 p.

Fleury P., Ladouche B., Cubizolles J., 2009. Contribution des eaux souterraines d'origine karstique aux crues Nîmoises. Rapport intermédiaire juillet 2007 – Février 2009. BRGM/RP-57099-FR, 55 p.

Fleury P., Raymond M., 2009. Prise en compte de la composante karst dans le système ESPADA, réseau d'alerte de la ville de Nîmes. Rapport d'activité. BRGM/RP 57767-FR, 27 p.

Maréchal J-C., Ladouche B., 2006. Fonctionnement hydrogéologique du système karstique de la Fontaine de Nîmes en crue. Rapport final. BRGM/RP-54723-FR, 111 p.

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.

VENSIM Software. Ventana Systems, Inc. http://www.vensim.com.

Annexe 1

Evaluation de la récurence des épisodes de pluie à partir de la méthode SHYREG

		1h	2h	3h	4h	6h	12h	24h	48h	72h
10	000 ans	136,7	158,7	190,6	219,6	262,1	341,2	410,8	450,5	464,7
5	00 ans	124,4	143,3	169,7	196,2	236,3	310,7	374,2	412,4	424,4
1	00 ans	97,4	111,9	128,4	145,3	180,5	234,5	284,5	315,8	324,8
5	50 ans	85,7	99,6	114,0	126,7	152,7	202,9	240,3	270,8	279,4
2	20 ans	70,8	83,7	96,5	106,3	123,4	157,0	187,7	208,6	215,6
1	10 ans	60,4	71,9	83,8	92,1	105,6	130,6	152,0	168,6	176,2
	5 ans	50,1	60,7	71,0	78,2	89,0	109,0	125,1	139,2	146,4
	2 ans	37,6	46,9	55,0	61,0	69,0	83,5	96,5	108,1	114,2

Illustration 70. Quantiles établis par la méthode SHYREG pour la Ville de Nîmes (Cémagref, 2005)

Annexe 2

Tests de sensibilité pour les échéances à 8, 12 et 24 h pour les 5 cadereaux

ECHEANCE A 8 H

Structure

Quatre structures de pluie ont été retenues. Les deux premières correspondent aux pluies extrêmes observées ces 20 dernières années, les deux autres (pluie extrême et pluie homogène) sont des structures reconstituées à partir d'hypothèses et observations de terrain.

Structure 1

La première structure envisagée dite « *Pluie repart 1* » est issue de l'enregistrement à la station Mas de Ponge de l'épisode d'**octobre 1988**, avec une accumulation de 420 mm en 8 h et 23 % des précipitations en 1 h, soit 95 mm. Etant donné que l'épisode d'octobre 1988 dura 8 h, la structure dite « *octobre 1988 bis* » présentée précédemment pour le cumul de 4 h disparaît ici, car elle est automatiquement incluse dans « *Pluie repart 1* ».

Structure 2

La deuxième structure dite « *Pluie repart 2* » représente le maximum de pluie sur 8 h, de l'épisode du **6 septembre 2005** avec un cumul de 229 mm et 42 % des précipitations en 1 h soit 97 mm. Cet épisode fut lui aussi bien suivi, en termes de mesures à la station Kennedy.

Structure 3

La troisième structure envisagée, « *Pluie repart 3* », représente la « *Pluie homogène* » sur 8 h.

Structure 4

La quatrième et dernière structure de pluie envisagée, « *Pluie repart 4* », correspond à la « *Pluie extrême* ». L'intensité horaire maximale sur 8 h reste la même (100 mm/h). Cette pluie extrême est construite de la même façon que pour celle de l'échéance à 4 h, de sorte que la première heure présente un maximum d'intensité ainsi que l'heure suivante afin d'obtenir le cumul désiré (par exemple pour un cumul de 200 mm, la pluie connaitra pendant les deux premières heures des intensités de 100 mm, puis absence de précipitation les 6 heures restantes). Ainsi cette pluie extrême proposée constitue la limite supérieure, les débits associés à cette pluie constitueront ainsi le débit maximum qui pourra avoir lieu dans le cas le plus pessimiste à savoir un maximum d'intensité.

Cumuls testés

Ces structures sont testées sur 5 cumuls de pluie à savoir 100, 200, 300, 400 et 500 mm. Ces cumuls sur 8 h correspondent à :

- 100 mm : période de retour d'environ 5 ans
- 200 mm : période de retour proche de 100 ans
- 300 mm : période de retour supérieure à 100 ans et à l'épisode du 6 septembre 2002, inférieure à 500 ans
- 400 mm : période de retour supérieure à 1000 ans et comparable à l'épisode d'octobre 1988 dont le cumul observé était de 420 mm
- 500 mm : maximum extrême envisagé dans le cadre de cette étude, utilisé pour définir la gamme maximale d'évolution des débits et représentant une situation excessivement pessimiste.

Récapitulatif des structures

Les structures des épisodes de 1988 et 2005 (Répartitions 1 et 2) présentent une importante variabilité, associée à la structure de la pluie.

L'intensité horaire maximale rapportée aux d	lifférents cumuls est précisée ci après.
--	--

Répartition / Cumul	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm	500 mm
Pluie repart 1 - octobre 1988	22	45	68	90	113
Pluie repart 2 - sept. 2005	31	63	94	125	157

Illustration 71. Intensité maximale horaire en mm des deux répartitions observées en octobre 1988 et septembre 2005 pour les différents cumuls

Pour la première structure les intensités maximales associées aux quatre premiers cumuls sont en accord avec l'intensité maximale définie (100 mm), par contre pour des cumuls plus importants, l'intensité maximale horaire peut être supérieure à cette intensité maximale. Cependant, la répartition 1 sera aussi utilisée pour définir les débits associés à un cumul de 500 mm, la différence restant relativement faible. Aussi, cette pluie du 3 octobre a été caractérisée par un cumul sur 8 h de 420 mm, l'intensité horaire maximale observée était 95 mm. Donc, pour le cumul 400 mm, cette répartition correspondra à l'épisode réellement observé.

Pour la structure 2, les intensités maximales horaires sont trop fortes (supérieures à 100 mm) dès le cumul de 400 mm. Cette structure ne sera donc pas utilisée pour simuler des débits pour les cumuls supérieurs à 400 mm.

Aussi, la pluie observée le 6 septembre 2005 est caractérisée par un cumul de 229 mm. Ainsi, la structure 2 pour un cumul de 200 mm permettra de simuler l'épisode réel.

Résultats des modélisations cadereau d'Alès – Station Cimpro tot

Les modèles ont été utilisés avec en entrée les différentes structures de pluies. Les modèles sont initialisés de sorte que le réservoir sol est saturé et que le niveau initial de la piézométrie corresponde à la valeur seuil du karst. Ainsi dès la première précipitation, les processus engendrés correspondront à ceux observés lorsque le karst est saturé ou proche de la saturation. Les mêmes paramètres (Niveau minimum du karst, Hseuil 1 pour cadereau...) que pour l'échéance 4 h sont utilisés dans le modèle Cimpro tot. Les débits simulés pour le cadereau d'Alès et les différents cumuls sont présentés ci-après et à l'Illustration 73.

Cumul à 100 mm

Le maximum de débit est obtenu avec la pluie extrême, ce débit approche 70 m³/s. Cette pluie d'une durée de 1 heure (et donc d'intensité 100 mm/h) produit un pic de crue après 1 heure, suivi d'un tarissement. Cet hydrogramme est comparable à celui obtenu avec l'échéance à 4 h, s'agissant de la même pluie utilisée. La pluie homogène, produit un pic de crue 36 % plus faible, il vaut environ 45 m³/s. Avec cette pluie le débit augmente progressivement.

Aussi les débits simulés avec les structures de pluie d'octobre 1988 et de septembre 2005 sont finalement assez proches des débits obtenus avec la pluie homogène. Les débits maximums obtenus avec ces configurations sont compris entre le débit extrême et le débit maximum de la pluie homogène.

Cumul à 200 mm

Le débit maximum vaut 140 m³/s, il est obtenu après 2 h avec la pluie extrême (200 mm en 2 h, intensité = 100 mm/h). Tout comme le cumul à 100 mm, les débits issus de la série homogène sont proches des débits calculés à partir des séries observées. Le maximum de débit obtenu avec la série de pluie homogène vaut 95 m³/s, soit environ 32 % de moins qu'avec la pluie extrême.

Cumul à 300 mm

Les courbes de débit sont caractérisées par une nouvelle non-linéarité avec une augmentation plus forte des débits. Cette transition se produit à 120 min pour la courbe extrême soit après 200 mm de précipitations et à 360 min, soit 225 mm pour la courbe homogène.

Aussi, la valeur du débit maximum est 350 m³/s, elle est obtenue avec la pluie extrême. La pluie homogène produit un débit de 245 m³/s, soit un écart de 30 % avec la pluie extrême.

Cumul à 400 mm

Le débit maximum vaut 420 m³/s. Il est obtenu après 4 h avec la pluie extrême (400 mm en 4 h, intensité = 100 mm/h). Le maximum de débit obtenu avec la série de pluie homogène vaut 290 m³/s, soit environ 31 % de moins qu'avec la pluie extrême.

Cumul à 500 mm

Le cumul à 500 mm a été testé pour évaluer le maximum de débit sur cet intervalle de temps. Le résultat de la modélisation donne un débit de l'ordre de 465 m³/s après 5 h de précipitations à 100 mm/h, le débit maximum obtenu avec la série homogène est de 355 m³/s soit 24 % plus faible que le débit extrême.

Récapitulatif des maximums de débit pour le cadereau d'Alès

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
Cumul 100 mm	70	45	36 %
Cumul 200 mm	140	95	32 %
Cumul 300 mm	350	245	30 %
Cumul 400 mm	420	290	31 %
Cumul 500 mm	465	355	24 %

Illustration 72. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Alès (8 h)



Illustration 73. Débits observés au cadereau d'Alès pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

Résultats des modélisations pour les autres cadereaux

Cadereau de Pondre

Les mêmes paramètres (Niveau minimum du karst, Hseuil 1 pour cadereau...) que pour l'échéance 4 h sont utilisés dans le modèle de Pondre. Les débits simulés pour le cadereau de Pondre pour les différents cumuls sont présentés Illustration 75.

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
Cumul 100 mm	100	40	60 %
Cumul 200 mm	205	85	58 %
Cumul 300 mm	255	125	51 %
Cumul 400 mm	290	170	41 %
Cumul 500 mm	310	210	32 %

Illustration 74. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Pondre (8 h)



Illustration 75. Débits observés au cadereau de Pondre pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

Cadereau de Valdegour

Les mêmes paramètres (Niveau minimum du karst, Hseuil 1 pour cadereau...) que pour l'échéance 4 h sont utilisés dans le modèle de Valdegour. Les débits simulés pour le cadereau de Valdegour pour les différents cumuls sont présentés Illustration 77.

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
Cumul 100 mm	47	18	62 %
Cumul 200 mm	120	55	54 %
Cumul 300 mm	135	70	48 %
Cumul 400 mm	145	80	45 %
Cumul 500 mm	150	100	33 %

Illustration 76. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valdegour (8 h)



Illustration 77. Débits observés au cadereau de Valdegour pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

Cadereau d'Uzès

Les mêmes paramètres (Niveau minimum du karst, Hseuil 1 pour cadereau...) que pour l'échéance 4 h sont utilisés dans le modèle d'Uzès. Les débits simulés pour le cadereau d'Uzès pour les différents cumuls sont présentés Illustration 78 et Illustration 79.

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
Cumul 100 mm	35	18	49 %
Cumul 200 mm	130	80	38 %
Cumul 300 mm	150	90	40 %
Cumul 400 mm	160	100	38 %
Cumul 500 mm	165	110	33 %

Illustration 78. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Uzès (8 h)



Illustration 79. Débits observés au cadereau d'Uzès pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

Cadereau de Valladas

Les mêmes paramètres (Niveau minimum du karst, Hseuil 1 pour cadereau...) que pour l'échéance 4 h sont utilisés dans le modèle Valladas. Les débits simulés pour le cadereau de Valladas pour les différents cumuls sont présentés Illustration 80 et Illustration 81.

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
Cumul 100 mm	110	37	77 %
Cumul 200 mm	150	55	73 %
Cumul 300 mm	160	70	57 %
Cumul 400 mm	162	80	49 %
Cumul 500 mm	163	100	37 %

Illustration 80. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valladas (8 h)



Illustration 81. Débits observés au cadereau de Valladas pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

ECHEANCE A 12 H

Structure

Les quatre mêmes structures de pluie ont été retenues que lors de l'échéance 8 h.

Structure 1

La première structure envisagée dite « *Pluie repart 1* » représente la répartition observée lors de l'épisode d'**octobre 1988** (mesure au Mas de Ponge), avec une accumulation de 420 mm en 12 h et également 23 % des précipitations en 1 h, soit 95 mm.

Structure 2

La deuxième structure dite « *Pluie repart 2* » représente le maximum de pluie sur 12 h, de l'épisode du **6 septembre 2005** (station Kennedy) avec un cumul de 269 mm et 36 % des précipitations en 1 h soit 97 mm.

Structure 3

La troisième structure envisagée, « *Pluie repart 3* », représente la structure intitulée « *Pluie homogène* » sur 12 h.

Structure 4

La quatrième et dernière structure de pluie envisagée, « *Pluie repart 4* », correspond à la « *Pluie extrême* ». L'intensité horaire maximale sur 12 h reste la même (100 mm/h). Cette pluie extrême est construite de la même façon que pour celle des échéances à 4 h et 8 h, de sorte que la première heure présente un maximum d'intensité ainsi que l'heure suivante, afin d'obtenir le cumul désiré. Ainsi cette pluie extrême proposée constitue la limite supérieure et les débits associés à cette pluie constitueront ainsi le débit maximum qui pourra avoir lieu dans le cas le plus pessimiste.

Cumuls testés

Ces structures seront testées sur 6 cumuls de pluie à savoir 100, 200, 300, 400, 500 et 600 mm. Ces cumuls sur 12 h correspondent à :

- 100 mm : période de retour légèrement inférieure à 5 ans
- 200 mm : période de retour égale à 50 ans
- 300 mm : période de retour supérieure à 500 ans

- 400 mm : période de retour supérieure à 1000 ans, épisode légérement inférieure à l'épisode d'octobre 1988 dont le cumul observé sur 12 h était 420 mm
- 500 mm : période de retour supérieure à l'épisode d'octobre 1988

Récapitulatif des structures

Les structures des épisodes de 1988 et 2005 (Répartitions 1 et 2) présentent une importante variabilité, caractéristique de la variabilité associée à la structure de la pluie.

Répartition / Cumul	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm	500 mm
Pluie repart 1 - octobre 1988	22	45	68	90	113
Pluie repart 2 - sept. 2005	36	72	108	144	180

L'intensité horaire maximale rapportée aux différents cumuls est précisée ci après.

Illustration 82. Intensité maximale horaire en mm des deux répartitions observées en octobre 1988 et septembre 2005 pour les différents cumuls

Pour la première structure les intensités maximales associées aux quatre premiers cumuls sont en accord avec l'intensité maximale définie (100 mm), par contre pour des cumuls plus importants (supérieurs à 500 mm), l'intensité maximale horaire peut être supérieure à cette intensité maximale. La répartition 1 sera quand même utilisée pour définir les débits associés à un cumul de 500 mm l'intensité maximale (113 mm) restant proche de l'intensité maximale définie Aussi, la pluie du 3 octobre a été caractérisée par un cumul sur 12 h de 420 mm, l'intensité horaire maximale observée était 95 mm. Pour le cumul 400 mm, cette répartition correspondra à l'épisode réellement observé.

Pour la structure 2, les intensités maximales horaires sont trop fortes dès le cumul de 400 mm. Cette structure ne sera donc pas utilisée pour simuler des débits avec les cumuls 400 et 500 mm.

Aussi, la pluie observée le 6 septembre 2005 est caractérisée par un cumul de 269 mm. Ainsi, la structure 2 pour un cumul de 300 mm permettra de simuler cet épisode réel.

Résultats des modélisations cadereau d'Alès – Station Cimpro tot

Comme pour les précédentes échéances testées (4 h et 8 h) les modèles mis en place sur 12 h utilisent en entrée les différentes structures de pluies. Aussi, ils sont initialisés de la même façon avec des paramètres calés identiques. Les débits simulés pour le cadereau d'Alès pour les différents cumuls sont présentés Illustration 83 et Illustration 84.

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
Cumul 100 mm	70	35	50 %
Cumul 200 mm	140	80	43 %
Cumul 300 mm	350	215	39 %
Cumul 400 mm	420	235	44 %
Cumul 500 mm	465	250	46 %

Illustration 83. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Alès (12 h)


Illustration 84. Débits observés au cadereau d'Alès pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

Résultats des modélisations pour les autres cadereaux

Cadereau de Pondre

Les mêmes paramètres (Niveau minimum du karst, Hseuil 1 pour cadereau...) que pour les échéances 4 h et 8 h sont utilisés dans le modèle de Pondre. Les débits simulés pour le cadereau de Pondre pour les différents cumuls sont présentés Illustration 85 et Illustration 86.

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
Cumul 100 mm	100	30	70 %
Cumul 200 mm	205	60	71 %
Cumul 300 mm	255	85	67 %
Cumul 400 mm	290	115	60 %
Cumul 500 mm	310	145	53 %

Illustration 85. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Pondre (12 h)



Illustration 86. Débits observés au cadereau de Pondre pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

Cadereau de Valdegour

Les mêmes paramètres (Niveau minimum du karst, Hseuil 1 pour cadereau...) que pour les échéances 4 h et 8 h sont utilisés dans le modèle de Valdegour. Les débits simulés pour le cadereau de Valdegour pour les différents cumuls sont présentés Illustration 87 et Illustration 88.

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
Cumul 100 mm	47	13	72 %
Cumul 200 mm	120	43	64 %
Cumul 300 mm	135	55	59 %
Cumul 400 mm	145	65	55 %
Cumul 500 mm	150	75	50 %

Illustration 87. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valdegour (12 h)



Illustration 88. Débits observés au cadereau de Valdegour pour les 6 cumuls à partir des différentes structures de pluie

Cadereau d'Uzès

Les mêmes paramètres (Niveau minimum du karst, Hseuil 1 pour cadereau...) que pour les échéances 4 h et 8 h sont utilisés dans le modèle d'Uzès. Les débits simulés pour le cadereau d'Uzès pour les différents cumuls sont présentés Illustration 89 et Illustration 90.

Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
35	13	63 %
130	60	54 %
150	80	47 %
160	90	44 %
105	05	40.0/
	Q _{max} extrême 35 130 150 160 165	Q _{max} extrême Q _{max} homogène 35 13 130 60 150 80 160 90 165 95

Illustration 89. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Uzès (12 h)



Illustration 90. Débits observés au cadereau d'Uzès pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

Cadereau de Valladas

Les mêmes paramètres (Niveau minimum du karst, Hseuil 1 pour cadereau...) que pour les échéances 4 h et 8 h sont utilisés dans le modèle Valladas. Les débits simulés pour le cadereau de Valladas pour les différents cumuls sont présentés Illustration 91 et Illustration 92.

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
Cumul 100 mm	110) 27	
Cumul 200 mm	150	45	70 %
Cumul 300 mm	160	55	66 %
Cumul 400 mm	162	60	63 %
Cumul 500 mm	163	70	57 %

Illustration 91. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valladas (12 h)



Illustration 92. Débits observés au cadereau de Valladas pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

ECHEANCE A 24 H

Structure

Les quatre mêmes structures de pluie ont été retenues que lors des échéances 8 h et 12 h.

Structure 1

La première structure envisagée dite « *Pluie repart 1* » représente une répartition de l'épisode d'**octobre 1988**, avec une accumulation de 420 mm en 24 h et également 21 % des précipitations en 1 h, soit 95 mm.

Structure 2

La deuxième structure dite « *Pluie repart 2* » représente le maximum de pluie sur 24 h, de l'épisode du **6 septembre 2005** avec un cumul de 274 mm et 35 % des précipitations en 1 h soit 97 mm.

Structure 3

La troisième structure envisagée, « *Pluie repart 3* », représente la structure intitulée « *Pluie homogène* » sur 24 h.

Structure 4

La quatrième et dernière structure de pluie envisagée, « *Pluie repart 4* », correspond à la « *Pluie extrême* ». L'intensité horaire maximale sur 24 h reste la même (100 mm/h). Cette pluie extrême est construite de la même façon que pour les précédentes échéances.

Cumuls testés

Ces structures seront testées sur 6 cumuls de pluie à savoir 100, 200, 300, 400 et 500 mm. Ces cumuls sur 24 h correspondent à :

- 100 mm : période de retour égale à 2 ans
- 200 mm : période de retour égale à 20 ans
- 300 mm : période de retour inférieure à 100 ans
- 400 mm : période de retour de près de 1000 ans et inférieure à l'épisode de 1988
- 500 mm : période de retour supérieure à 1000 ans et à l'épisode d'octobre 1988

Récapitulatif des structures

L'intensité horaire maximale rapportée aux différents cumuls est précisée ci après.

Répartition / Cumul	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm	500 mm
Pluie repart 1 - octobre 1988	22	45	68	90	113
Pluie repart 2 - sept. 2005	35	70	106	141	176

Illustration 93. Intensité maximale horaire en mm des deux répartitions observées en octobre 1988 et septembre 2005 pour les différents cumuls

Avec la pluie répartition 2 pour les cumuls supérieurs à 400 mm, l'intensité maximale associée est fortement supérieure à l'intensité maximale définie pour le système. De ce fait, cette structure ne sera pas utilisée.

Aussi, la pluie observée le 6 septembre 2005 est caractérisée par un cumul de 274 mm. Ainsi, la structure 2 pour un cumul de 300 mm permettra de simuler cet épisode réel. Pour octobre 1988, c'est avec un cumul de 400 mm que l'on s'approchera de l'épisode réel.

Résultats des modélisations cadereau d'Alès – Station Cimpro tot

Comme pour les précédentes échéances testées (4, 8 et 12 h) les modèles mis en place sur 24 h utilisent en entrée les différentes structures de pluies. Aussi, ils sont initialisés de la même façon avec des paramètres calés identiques. Les débits simulés pour le cadereau d'Alès pour les différents cumuls sont présentés Illustration 94 et Illustration 95.

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
	70		
	70	23	67 %
Cumul 200 mm	140	50	64 %
Cumul 300 mm	350	145	59 %
Cumul 400 mm	420	170	60 %
Cumul 500 mm	465	200	57 %
Sumu 300 mm	-00	200	51 /0

Illustration 94. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Alès (24 h)



Illustration 95. Débits observés au cadereau d'Alès pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

Résultats des modélisations pour les autres cadereaux

Cadereau de Pondre

Les mêmes paramètres (Niveau minimum du karst, Hseuil 1 pour cadereau...) que pour les précédentes échéances sont utilisés dans le modèle Pondre. Les débits simulés pour le cadereau de Pondre pour les différents cumuls sont présentés ciaprès.

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
Cumul 100 mm	100	15	85 %
Cumul 200 mm	205	30	85 %
Cumul 300 mm	255	45	82 %
Cumul 400 mm	290	60	79 %
Cumul 500 mm	310	70	77 %

Illustration 96. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Pondre (24 h)



Illustration 97. Débits observés au cadereau de Pondre pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

Cadereau de Valdegour

Les mêmes paramètres (Niveau minimum du karst, Hseuil 1 pour cadereau...) que pour les échéances 4 h, 8 h et 12 h sont utilisés dans le modèle de Valdegour. Les débits simulés pour les différents cumuls sont présentés ci-après et à l'Illustration 99.

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
Cumul 100 mm	47	7	85 %
Cumul 200 mm	120	22	82 %
Cumul 300 mm	135	33	76 %
Cumul 400 mm	145	42	71 %
Cumul 500 mm	150	50	67 %

Illustration 98. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valdegour (24 h)



Illustration 99. Débits observés au cadereau de Valdegour pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

Cadereau d'Uzès

Les mêmes paramètres (Niveau minimum du karst, Hseuil 1 pour cadereau...) que pour les échéances 4 h, 8 h et 12 h sont utilisés dans le modèle d'Uzès. Les débits simulés pour le cadereau d'Uzès pour les différents cumuls sont présentés Illustration 100 et Illustration 101.

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
Cumul 100 mm	35	7	80 %
Cumul 200 mm	130	17	87 %
Cumul 300 mm	150	50	67 %
Cumul 400 mm	160	60	63 %
Cumul 500 mm	165	70	58 %

Illustration 100. Récapitulatif des maximums pour le cadereau d'Uzès (24 h)



Illustration 101. Débits observés au cadereau d'Uzès pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

Cadereau de Valladas

Les mêmes paramètres (Niveau minimum du karst, Hseuil 1 pour cadereau...) que pour les échéances 4 h, 8 h et 12 h sont utilisés dans le modèle Valladas. Les débits simulés pour le cadereau de Valladas pour les différents cumuls sont présentés Illustration 102 et Illustration 103.

	Q _{max} extrême	Q _{max} homogène	Différence
Cumul 100 mm	110	14	87 %
Cumul 200 mm	150	27	82 %
Cumul 300 mm	160	37	77 %
Cumul 400 mm	162	45	72 %
Cumul 500 mm	163	19	70 %

Illustration 102. Récapitulatif des maximums pour le cadereau de Valladas (24 h)



Illustration 103. Débits observés au cadereau de Valladas pour les 5 cumuls à partir des différentes structures de pluie

Annexe 3

Présentation du SIG

Ce système d'information géographique est fourni au format ArcGis. Pour le réaliser, il a été nécessaire dans un premier temps, de synthétiser les informations issues des différents rapports. Ensuite, une campagne de terrain a été effectuée, visant, d'une part à vérifier la pertinence des données anciennes, et d'autre part, à acquérir de nouvelles données. Ainsi, le système d'information numérique final, sans être exhaustif, représente un « état des lieux » des connaissances actuelles au niveau de la région Nîmoise.

LES DONNEES

Diverses données ont été utilisées pour réaliser ce système d'information géographique. Elles ont été vérifiées sur le terrain, sélectionnées selon leur pertinence, homogénéisées et rassemblées sous des fichiers communs (les « tables » du système d'information géographique).

Limitation des bassins versants des cadereaux et du bassin d'alimentation de la Fontaine de Nîmes

Le fond topographique numérique au 1/25 000^{ème} ainsi que le fond géologique numérique au 1/50 000^{ème}, de la région Nîmoise, tous les deux géo-référencés dans le même système de projection (Projection Lambert II Carto-Paris) constituent les cartes numériques de bases sur lesquelles différentes informations vont être présentées.

Le fond topographique numérique correspond aux tables suivantes sous le système d'information numérique : S75_50_C, S75_51_C, S76_50_C, S76_51_C, S77_50_C, S77_51_C. Le fond géologique numérique correspond aux tables suivantes : I_struct, I_fgeol, s_fgeol.

Sur la carte topographique numérique, pour chacune des stations de jaugeage des cadereaux de la ville de Nîmes, les bassins versants topographiques associés ont été délimités (Illustration 104). Ils sont au nombre de 10.



Illustration 104. Délimitation des bassins versants (en rouge) des différentes stations de jaugeage sur la carte topographique numérique

Sur la carte géologique numérique, le bassin d'alimentation géologique de la Fontaine de Nîmes a également été délimité, à partir des différentes données d'essais de traçages et de l'analyse de la carte géologique (Illustration 105).



Illustration 105. Délimitation du bassin d'alimentation géologique (en jaune) de la Fontaine de Nîmes sur la carte géologique numérique

Données issues des cartes topographiques au 1/25 000ème et des cartes géologiques au 1/50 000ème

Les cartes topographiques au 1/25 000^{ème} Nîmes (2942 ouest) et Vergèze (2842 est) et les cartes géologiques au 1/50 000^{ème} Nîmes XXIX-42 (N°965) et Sommières XXVIII-42 (N°964), recèlent de nombreuses informations, notamment sur la position de

certaines sources, de pertes et d'avens. Les informations disponibles sur ces cartes ont été vérifiées sur le terrain, synthétisées et intégrées au système d'information numérique. La figure ci-dessous (Illustration 106) présente un des modes opératoires suivis.



Illustration 106. Vérification des informations sur le terrain et intégration des données issues des cartes topographiques et géologiques au SIG

Données issues du site Internet de Mr. Gareli

Le site Internet « http://www.sources-nimes.fr/ » de Mr Gareli, un habitant de Nîmes, comprend de nombreuses informations sur les eaux souterraines de la région Nîmoise. Il y a notamment un recensement des sources dans et aux alentours de la ville. Toutes les informations disponibles (soit 75 sources recensées en 2008) ont été vérifiées lors de campagne de terrain et les informations pertinentes ont été intégrées au SIG (Illustration 107).



Illustration 107. Intégration des données de Mr. Gareli au système d'information numérique

Les données issues de campagnes de terrain

Lors de visites de terrain, différentes observations, sur des sources qui n'étaient référencées ni sur les cartes topographiques et géologiques, ni sur le site de Mr. Gareli, ont été réalisées. Ces informations ont été intégrées au SIG lorsqu'elles étaient pertinentes (Illustration 108).



Illustration 108. Intégration des observations de terrain au système d'informations numérique

Les données issues du réseau de mesure suivi par le BRGM

Le réseau de piézomètres suivi a également été intégré au système d'informations numérique (Illustration 109).



Illustration 109. Intégration du réseau piézométrique au système d'informations numérique

Utilisation de liens hypertextes

Certaines tables d'informations comprennent des liens hypertextes, ce qui permet, lorsque l'on navigue sur le système d'information numérique, d'avoir accès à des informations supplémentaires. Il suffit pour cela, de cliquer sur le bouton « Hotlink » , sur le point d'information choisit. Dès lors, un fichier PDF contenant différentes informations s'ouvre automatiquement. L'Illustration 110 présente le type d'informations complémentaires accessibles, pour le réseau de piézomètres suivi. Lorsque peu d'informations sont disponibles, seule une photo au format JPEG s'ouvre.



Illustration 110. Informations complémentaires sur le réseau de mesure, accessible sous le système d'information numérique

L'illustration suivante présente le type d'informations complémentaires accessibles, pour les sources permanentes, les sources temporaires, les puits et les avens (Illustration 111). Les observations effectuées sur le terrain y sont consignées.



Illustration 111. Informations complémentaires accessibles sous le système d'information numérique

Enfin, la table « photos_geologie » permet d'avoir accès à différentes photos d'affleurements caractéristiques (Illustration 112).



Illustration 112. Informations complémentaires accessibles dans la table « Photos_geologie »

Système d'informations géographiques réalisé

Les illustrations ci-après présentent les informations disponibles sous le système d'information numérique (Illustration 113 et Illustration 114).



Illustration 113. Informations présentes sur le SIG (fond : carte topographique)



Illustration 114. Informations présentes sur le SIG (fond : carte géologique)



Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 Service géologique régional LRO Unité RMD 1039 rue de Pinville 34 000 Montpellier - France Tél. : 04 67 15 79 80