



HAL
open science

Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez -Simulations numériques de différents scénarios de changements globaux

Jean-Christophe Maréchal, V. Borell Estupina, Yvan Caballero, Flavie Cernesson, Perrine Fleury, M. Jay Allemand, Bernard Ladouche,
Pierre-Olivier Malaterre

► To cite this version:

Jean-Christophe Maréchal, V. Borell Estupina, Yvan Caballero, Flavie Cernesson, Perrine Fleury, et al.. Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez -Simulations numériques de différents scénarios de changements globaux. [Rapport de recherche] BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) (Bureau de recherches géologiques et minières). 2012. hal-03143862

HAL Id: hal-03143862

<https://brgm.hal.science/hal-03143862>

Submitted on 17 Feb 2021

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

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



Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez - Simulations numériques de différents scénarios de changements globaux

Rapport final L4.2.

BRGM/RP-61050-FR
Décembre 2012



Montpellier
Agglomération



établissement public du ministère chargé du développement durable



Département
Hérault
Conseil Général



HydroSciences
Montpellier



TETIS



Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez— Simulations numériques de différents scénarios de changements globaux

Rapport final L4.2.

BRGM/RP-61050-FR

Décembre 2012

J.-C. Maréchal, V. Borrell Estupina, Y. Caballero, F. Cernesson, P. Fleury, M. Jay-Allemand, B. Ladouche, P.-O. Malaterre

Avec la collaboration de

JP. Baume, G. Belaud, M. Coustau, C. Dejean, D. Dorchies



Montpellier
Agglomération



Établissement public du ministère
chargé du développement durable



Vérificateur :

Nom : V. Bailly-Comte

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : M. Audibert

Date :

Signature :

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

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



Mots clés : karst, modélisation numérique, hydrogéologie, crue, pompage, modèle réservoir, modèle distribué, hydrodynamique, simulation, changement global, précipitation, température, scénario, abaque de vigilance

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

Maréchal J.-C., Borrell-Estupina V., Caballero Y., Cernesson, F., Fleury P., Jay-Allemand M., Ladouche B., Malaterre P.-O. (2012) Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez— Simulations numériques de différents scénarios de changements globaux, Rapport RP-61050-FR, 235 pp., 157 ill., 13 tab., 2 ann.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le projet de recherche « Gestion multi-usages des aquifères karstiques méditerranéens – Le Lez, son bassin versant et son bassin d'alimentation » a pour objet de compléter la connaissance sur l'hydrosystème karstique du Lez en vue d'en améliorer la gestion. Parmi les méthodes et approches mises en œuvre, des modèles hydrogéologiques, hydrologiques et hydrauliques reproduisant le fonctionnement de l'hydrosystème du Lez permettent d'apporter des éléments de connaissance quant à l'impact du changement global sur l'hydrosystème ou relatifs à la réponse de l'hydrosystème à une sollicitation pluvieuse intense. Les modèles numériques mis en œuvre ont été décrits dans le livrable L4.1 (Borrell et al. 2012 ; rapport BRGM RP-60222-FR). Leur architecture et leur fonctionnement y sont présentés, comme les résultats des calages et une analyse de sensibilité pour certains d'entre eux. Le présent rapport constitue le livrable L4.2 du projet. Il décrit les résultats des simulations de scénarios climatiques et de gestion effectuées au moyen des modèles numériques sur les courts, moyens et longs termes.

Le climat actuel et ses tendances ont été étudiés. L'analyse des données disponibles au niveau des cinq stations météorologiques disponibles à proximité du bassin d'alimentation du Lez montre un comportement typiquement méditerranéen des précipitations avec les cumuls les plus importants observés en octobre-novembre (épisodes cévenols) et sur les reliefs plutôt que sur le littoral. L'analyse statistique montre une tendance à la hausse des précipitations d'automne sur les 30 dernières années, qui entraîne, pour la plupart des stations, une hausse des cumuls annuels. L'analyse statistique conduit à mettre en évidence une tendance significative à la hausse des températures moyennes annuelles sur toutes les stations, essentiellement reliée à une hausse des températures printanières et estivales.

Pour explorer le climat futur, neuf scénarios climatiques ont été obtenus à partir des simulations des modèles de climat désagrégés disponibles dans le cadre du projet SCRATCH 2010 du CERFACS, à l'horizon 2045-65, pour le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B qui constitue une hypothèse médiane parmi la fourchette de scénarios proposés par le GIEC. Ces scénarios, traduits en termes d'anomalies moyennes mensuelles, indiquent une augmentation de la température moyenne mensuelle comprise entre +1,5°C et +2,3°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) suivant la période de l'année, en moyenne multi-modèle.

Pour les précipitations, les scénarios prévoient une diminution des précipitations mensuelles de l'ordre de -5 à -10% en moyenne multi-modèle. Seul le mois de décembre présenterait des précipitations en augmentation de l'ordre de +10% par rapport au présent, en moyenne multi-modèle. Ces résultats sont cependant affectés par une très forte variabilité entre les scénarios (variations mensuelles de $\pm 50\%$ par rapport aux précipitations présentes) qui rend le signal moyen décrit très incertain. Les signaux obtenus présentent une variabilité spatiale qui s'exprime notamment par une diminution moindre (voire même une augmentation en hiver) des précipitations au niveau des extrêmes nord-est et sud-est de la zone d'étude, en toutes saisons, en dehors du printemps. Cette variabilité n'impactera cependant pas ou peu le signal moyen d'entrée pour la modélisation hydrologique et hydrogéologique.

Le modèle numérique Tempo montre que les scénarios de changement climatique semblent avoir un impact plus marqué sur la recharge par les pluies efficaces que sur la pluviométrie elle-même. La recharge par les pluies efficaces serait ainsi fortement diminuée dans le futur, se traduisant par une baisse de -30% du cumul annuel moyen de pluie efficace en valeur moyenne multi-modèles. Cette réduction s'observerait surtout sur les périodes automnales et printanières, et dans une moindre mesure en hiver. Cette diminution de la recharge se

manifesterait par une diminution de la piézométrie de la source du Lez notamment lors des périodes estivales, pendant lesquelles les niveaux piézométriques seraient plus fréquemment situés dans la tranche d'eau 45-35 m NGF (fréquence d'occurrence de 15% au futur contre 9% pour la période de référence). Il se traduirait aussi par une légère augmentation de la durée des assècs de la source du Lez (+30 jours en moyenne par rapport à la période de référence), ainsi que par une légère diminution du débit moyen de débordement de la source lors des périodes de hautes eaux. Enfin, il provoquerait une légère réduction des débits de crues décennaux.

Le comportement du système karstique a aussi été évalué pour différentes sollicitations de pompage avec ou sans changement climatique. L'ensemble des résultats sont résumés dans le tableau suivant qui décrit, pour chacun des scénarios simulés, la baisse de niveau d'eau durant l'été par rapport au scénario de référence, les fréquences d'occurrences de gammes de niveaux d'eau simulés à la vasque, les fréquences d'occurrences de gammes de débits de débordement simulés et la baisse du débit moyen de débordement simulé par rapport au scénario de référence. L'augmentation des rabattements augmente logiquement avec les prélèvements. Les scénarios 4 et 5 (ce dernier étant médian par rapport aux prévisions du SDAEP) permettent d'augmenter le volume prélevé de respectivement 8 et 22,5 % tout en maintenant un niveau piézométrique supérieur à 20 m NGF en moyenne mensuelle. Cependant, une telle exploitation nécessiterait de réviser la DUP actuelle.

Climat	Prélèvement	Nom Scénario (cf texte)	(*) Baisse été/ Référence (en moy. mensuelle)	Fréquences d'occurrences (médiane Multi-Modèle)					Fréquences d'occurrences Médiane Multi-Modèle			(**) Baisse Qd moy/ Référence (en moy. mensuelle)
				[45 à 35 mNGF]	[< 35 m NGF]	[< 30 m NGF]	[<20 m NGF]	[<10 m NGF]	Qd= 0 l/s (Qd=débit de débordement)	Qd<160 l/s	Qd>160 l/s	
Présent	33 Mm3	référence		9%	0%	0%	0%	0%	42%	46%	54%	
Present	39 Mm3	Qp2	-6 m à -11 m	13%	5%	n.d.	0,5%	0%	47%	50%	50%	-250 à -400 l/s
Present	40,4 Mm3	Qp5	-6 m à -12 m	14%	7%	n.d.	1,5%	0%	48%	52%	48%	-250 à -400 l/s
Présent	47,5 Mm3	1	-18 m à -20m	12%	18%	17%	13%	0,5%	54%	66%	34%	-200 à -400 l/s
Futur	33 Mm3	2	-4 m à -5m	15%	15%	4%	0%	0%	50%	54%	46%	-250 à -400 l/s
Futur	47,5 Mm3	3	-21 m à -22m	8%	35%	32%	19%	1,5%	62%	67%	33%	-600 à -750 l/s
Futur	35,7 Mm3	4	-7 m à -8 m	13%	21%	12%	0%	0%	52%	56%	44%	-300 à -600 l/s
Futur	40,4 Mm3	5	-12 m à -13m	10%	27%	21%	3%	0%	55%	61%	39%	-400 à -600 l/s
Futur	45 Mm3	6	-17 m à -19 m	8%	33%	28%	13%	0%	60%	64%	36%	-500 à -700 l/s
Futur	39 Mm3	Qp2	-10 m à -15 m	11%	25%	18%	1,5%	0%	54%	59%	41%	-400 à -600 l/s
Futur	39 Mm3	Qp3	-5 m à -6 m	14%	22%	10%	0%	0%	55%	62%	38%	-400 à -600 l/s

(*) mois de juillet à septembre

(**) mois de novembre à mai inclus

En grisé: scénario de pompage Qp5 correspondant à un scénario médian du SDAEP

Les fréquences d'occurrences sont calculées en considérant le nombre total d'occurrence des différents scénarios sur les périodes considérées (30 et 20 ans respectivement, pour le climat présent et le futur)

Exemple de lecture :

Pour le climat présent, le scénario de référence présente un niveau piézométrique compris dans la tranche d'eau [45m-35m, NGF] environ 9% du temps, soit près de 33 jours par an en moyenne interannuelle

Pour le scénario de référence, la fréquence d'occurrence d'un débit de débordement nul (Qd<=0 l/s) s'observe près de 42% du temps, soit environ 153 jours par an en moyenne interannuelle

L'impact du changement global (pompage et climat) se traduirait par une amplification des tendances à la diminution de l'intensité des crues de fréquence décennale. Ce phénomène traduit de manière globale, la reconstitution des réserves qui a lieu suite au période de sollicitation des réserves du karst par les pompages. Ces résultats sont également à mettre à mettre en perspective avec les valeurs des débits moyens mensuels de débordement de la source du Lez. Les débits de débordement (Q_d) en contexte de changement global seraient réduits par rapport à ceux du scénario de référence, dans des proportions variables selon les scénarios envisagés. L'impact du changement global se traduirait également par une augmentation de la durée des assecs de la source par rapport au scénario de référence et par une augmentation du nombre de jours moyen annuel où $Q_d < 160$ l/s.

En complément de l'approche de modélisation Tempo menée sur le long terme à un pas de temps journalier, l'approche POKA a permis de tester des scénarios de gestion des pompages plus fins à un pas de temps horaire. La comparaison entre les deux modèles montre que le modèle POKA perd de la précision pour des durées de simulations au-delà de 20 à 30 jours. C'est donc en complémentarité que les deux modèles ont été utilisés. Les simulations de courte durée effectuées montrent qu'à volume constant prélevé sur 30 jours, le mode de prélèvement (chronique du débit de pompage) impacte significativement les rabattements induits à la source du Lez, notamment autour de l'instant charnière où la vasque se dénoie (niveau à 65 m NGF). Le scénario de pompage le plus favorable est d'anticiper l'étiage de la source en prélevant fort au début de façon à capter l'ensemble du débit naturel à l'exutoire, puis réduire les prélèvements après un certain temps. Le deuxième scénario le plus favorable consiste à pomper à un débit moyen dans un premier temps, puis augmenter le débit dès que la vasque se dénoie et ensuite réduire le débit plus tard. Ceci permet d'étendre le rayon d'action du pompage au sein de la matrice carbonatée en réduisant les rabattements au sein du conduit karstique et de la vasque.

L'analyse détaillée d'un certain nombre de crues sur le fleuve Lez a montré l'importance de l'état de saturation initiale du karst dans la genèse des crues éclair de surface. Il est démontré que, lors d'un épisode pluvieux, les premières précipitations contribuent au remplissage du karst et c'est seulement une fois celui-ci saturé que les ruissellements deviennent prépondérants et génèrent une crue. De plus, cette analyse a permis de mettre en évidence le rôle fort de l'intensité de l'événement pluvieux dans la genèse de la crue. Pour un même cumul de pluie, un événement présentant une intensité de pluie deux fois supérieure à un autre événement, présentera en conséquence un débit à peu près deux fois plus important pour des gammes de crues situées en vigilance orange ou rouge.

Une approche couplant la prise en compte du karst dans le modèle hydrologique ATHYS a permis de développer un abaque de vigilance des crues au niveau de la station de Lavalette. Cette prévision de débit doit être établie à partir du niveau piézométrique initial de la vasque et d'une prévision du cumul de précipitations d'une part et d'un ordre de grandeur de l'intensité pluvieuse de ce futur événement d'autre part. La crue à venir est caractérisée en termes de débit de pointe.

Afin de traduire ces débits de pointe en amont de Montpellier, en niveaux d'eau à la traversée de Montpellier, une étude hydraulique a été réalisée. Elle a permis la mise en place d'un abaque représentant le débit injecté au seuil du moulin de Gasconnet en fonction de la cote de l'eau à la section aval étudiée. La mise en cascade entre l'abaque de débit à Lavalette et les abaques hydrauliques à la traversée de Montpellier permet d'anticiper les niveaux d'eau atteints le long du Lez et en particulier au droit des différents ouvrages de régulation, de protection, de contrôle. Cet abaque couplé "hydrogéologique - hydrologie - hydraulique" a été appliqué avec succès à la crue de septembre 2005. Il convient de le valider au cours de crues futures par les services concernés.

Sommaire

1. Introduction.....	19
2. Climat présent et scénarios climatiques futurs.....	21
2.1. INTRODUCTION	21
2.2. EVOLUTION ACTUELLE DES TEMPERATURES ET PRECIPITATIONS.....	21
2.2.1. Données et méthodes.....	21
2.2.2. Principaux résultats.....	23
2.3. SCENARIOS CLIMATIQUES FUTURS.....	50
2.3.1. Construction de scénarios climatiques	50
2.3.2. Les scénarios climatiques retenus	51
2.3.3. Résultats en termes d'évolution des températures et des précipitations	52
2.3.4. Anomalies moyennes mensuelles.....	54
2.3.5. Anomalies moyennes saisonnières.....	55
2.3.6. Dispersions moyennes saisonnières et annuelles.....	57
2.3.7. Dispersion spatiale des anomalies moyennes saisonnières.....	57
2.4. CONCLUSION	59
3. Simulations du compartiment « eaux souterraines ».....	61
3.1. INTRODUCTION	61
3.2. ETUDE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT GLOBAL PAR L'APPROCHE DE SIMULATION TEMPO	61
3.2.1. Introduction.....	61
3.2.2. Présentation du modèle et des données d'entrées	63
3.2.3. Résultats des simulations avec le climat observé (1962-2010) pour différents scénarios de pompages.....	70
3.2.4. Evaluation de l'impact du changement global (climatique et prélèvement) sur les ressources en eau du système karstique du Lez	73
3.2.5. Conclusion.....	95
3.3. IMPACT DU CHANGEMENT DE POMPAGE PAR L'APPROCHE POKA.....	98
3.3.1. Introduction.....	98
3.3.2. Résultats d'une simulation de longue durée – comparaison avec Tempo	98
3.3.3. Résultats de simulations de courte durée	100
3.3.4. Résultats de simulations de remontée	104
3.3.5. Conclusion.....	105
4. Fonctionnement du système karstique et du bassin versant : outil d'aide à la vigilance des crues du Lez.....	107

4.1. INTRODUCTION	107
4.2. DONNEES HYDROMETEOROLOGIQUES.....	107
4.3. DUALITE DU FONCTIONNEMENT EN PERIODE DE CRUE	108
4.4. ETUDE DES EPISODES PRINCIPAUX POUR LA CARACTERISATION DE LA RELATION "PLUIE - KARST - CRUE"	109
4.4.1. Situation 1 : recharge du sol et de l'aquifère karstique et absence de crue.....	109
4.4.2. Situation 2 : aquifère karstique rechargé, les pluies contribuent à la crue.....	111
4.4.3. Situation 3 : recharge de l'aquifère karstique puis genèse de la crue	119
4.4.4. Conclusion sur la relation "pluie - karst - débit"	122
4.5. DEFINITION D'UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION POUR LES PREVISIONNISTES	122
4.5.1. Conceptualisation de la relation pluie - état initial - niveau dans le karst.....	123
4.5.2. Conceptualisation de la relation "pluie - débit"	125
4.5.3. Utilisation des abaques	130
4.6. EVALUATION DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS GLOBAUX SUR LES CRUES DU LEZ	134
4.6.1. Actualisation de l'outil de prévision des crues.....	135
4.6.2. Complément de l'outil d'aide à la décision : feuille de calcul Excel	138
4.6.3. Synthèse graphique de l'impact des changements globaux sur les crues.....	138
4.7. CONCLUSION.....	139
5. Simulation hydraulique du fleuve Lez : propagation des crues.....	141
5.1. MODELE HYDRAULIQUE.....	141
5.1.1. Crues choisies pour le calage du modèle	141
5.1.2. Calage des coefficients (seuils du moulin de Gasconnet, de Garigliano et de la 3 ^{ème} écluse).....	142
5.1.3. Déversoir latéral de sécurité de Lattes.....	143
5.1.4. Cas particulier du seuil mobile du Pont du Moulin de l'Evêque	143
5.1.5. Reconstitution des apports aux nœuds de la Lironde et du Verdanson	146
5.1.6. Calage des coefficients de frottement et d'infiltration	147
5.1.7. Utilisation des laisses de crue observées lors de la crue de septembre 2005.....	147
5.1.8. Résultats aux stations hydrauliques de Lavalette et de Garigliano	149
5.1.9. Comparaison des résultats obtenu entre SIC et ISIS (étude BRLi 2010)	155
5.2. UTILISATION DU MODELE POUR L'AIDE A LA VIGILANCE DES CRUES DU LEZ	159
5.2.1. Comparaison entre les simulations en régime transitoire et celles en régime permanent pour les débits de pointes	159
5.2.2. Construction d'un abaque.....	162
5.3. CONCLUSION.....	177

6. Conclusions	179
7. Bibliographie	183

Liste des illustrations

Illustration 1 : Type et localisation des stations météorologiques considérées.	22
Illustration 2 : Caractéristiques des stations météorologiques considérées.	22
Illustration 3 : Cumuls de pluies annuelles pour les stations de Montpellier et de Gignac.	24
Illustration 4 : Pluies annuelles cumulées aux stations du Mont Aigoual, St Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.	25
Illustration 5 : Pluies automnales (sept - oct) cumulées pour les stations de Montpellier et de Gignac.	26
Illustration 6 : Pluies automnales (sept - oct) cumulées pour les stations du Mont Aigoual, St-Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.	27
Illustration 7 : Pluies hivernales (nov - jan) cumulées pour les stations de Montpellier et de Gignac.	28
Illustration 8 : Pluies hivernales (nov - jan) cumulées pour les stations du Mont Aigoual, St-Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.	29
Illustration 9 : Pluies printanières (fev - mai) cumulées pour les stations de Montpellier et de Gignac.	30
Illustration 10 : Pluies printanières (fev - mai) cumulées pour les stations du Mont Aigoual, St-Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.	31
Illustration 11 : Pluies estivales (juin - aout) cumulées pour les stations de Montpellier et de Gignac.	32
Illustration 12 : Pluies estivales (juin - aout) cumulées pour les stations du Mont Aigoual, St-Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.	33
Illustration 13 : Précipitations saisonnières normales calculées sur 30 ans pour les stations du Mont Aigoual, St-Martin-de-Londres, Montpellier et Gignac.	34
Illustration 14 : Synthèse des résultats des test de Mann-Kendall réalisés sur les précipitations annuelles et saisonnières sur la période 1979-2004.	35
Illustration 15 : Températures annuelles minimales, moyennes et maximales pour les stations de Montpellier et de Gignac.	36
Illustration 16 : Températures annuelles minimales, moyennes et maximales aux stations du Mont Aigoual, St Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.	37
Illustration 17 : Amplitude annuelle de la température (T max annuel – T min annuel) pour les stations du Mont Aigoual, de Gignac et de Montpellier.	38
Illustration 18 : Températures automnales (sept - oct) aux stations de Montpellier et de Gignac.	39
Illustration 19 : Températures automnales (sept - oct) aux stations du Mont Aigoual, St Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.	40
Illustration 20 : Températures hivernales (nov- jan) aux stations de Montpellier et de Gignac.	41
Illustration 21 : Températures hivernales (nov - jan) aux stations du Mont Aigoual, St Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.	42
Illustration 22 : Températures printanières (fev -mai) aux stations de Montpellier et de Gignac.	43
Illustration 23 : Températures printanières (fev - mai) aux stations du Mont Aigoual, St Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.	44

Illustration 24 : Températures estivales (juin - aout) aux stations de Montpellier et de Gignac.....	45
Illustration 25 : Températures estivales (juin - aout) aux stations du Mont Aigoual, St Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.	46
Illustration 26 : Ecart entre les valeurs maximales et minimales des températures en période estivale.....	47
Illustration 27 : Synthèse des résultats des tests de Mann-Kendall réalisés sur les températures minimales, moyennes et maximales, annuelles et saisonnières, sur la période 1979-2004.	49
Illustration 28 : Exemple de données de précipitations (mm/jour) couvrant la France. La figure (a) montre les données à la résolution typique d'un modèle global du climat (modèle IPSL CM4 IPCC-AR4 2.5°x 3.75°), tandis que la figure (b) montre les données désagrégées statistiquement à une résolution de 8 km. (Pagé et Terray, 2011)	50
Illustration 29 : Présentation schématique des scénarios d'émission de gaz à effet de serre (tiré de Nakicenovic et Swart, 2000).....	51
Illustration 30 : Couverture de la grille SAFRAN sur la zone d'étude.....	53
Illustration 31 : Anomalies moyennes mensuelles de température entre le présent et le futur pour chaque scénario climatique, en moyenne de tous les scénarios et en courbe enveloppant les valeurs minimales et maximales des anomalies pour chaque mois, tous scénarios confondus.	54
Illustration 32 : Anomalies moyennes mensuelles de précipitations entre le présent et le futur pour chaque scénario climatique, en moyenne de tous les scénarios et en courbe enveloppant les valeurs minimales et maximales des anomalies pour chaque mois, tous scénarios confondus.	55
Illustration 33 : anomalies moyennes saisonnières de température et de précipitation entre le présent et le futur (de gauche à droite et de haut en bas, DJF : décembre-janvier-février ; MAM : mars-avril-mai ; JJA : juin-juillet-août ; SON : septembre-octobre-novembre), pour chaque scénario et en moyenne multi-modèle.	56
Illustration 34 : Dispersion des anomalies moyennes saisonnières et annuelles de température et de précipitation des 9 scénarios climatiques, représentée en diagramme « Box-Plot » (cette représentation doit cependant être interprétée avec prudence car elle est construite à partir de seulement 9 valeurs).	57
Illustration 35 : Anomalies moyennes saisonnières de température spatialisées.....	58
Illustration 36 : Anomalies moyennes saisonnières de précipitation spatialisées.....	59
Illustration 37 : Architecture du modèle utilisé pour modéliser (1) le débit naturel de la source du Lez; (2) le niveau d'eau dans le conduit karstique (forage Suquet) situé près la source intermittente du Lirou ; (3) le niveau piézométrique dans la matrice (piézomètre Laudou) à partir des pluies efficaces et du débit de sollicitation (Qs) mobilisé par le pompage et (4) le niveau piézométrique du conduit principal de la source du Lez à partir des différentes composantes (pluie efficace, débit de sollicitation (Qs) mobilisé par le pompage, contribution de l'aquifère jurassique situé à l'ouest de la faille des Matelles-Corconne et contribution de la matrice).....	62
Illustration 38 : schéma de fonctionnement hydrodynamique de la source du Lez en hautes eaux (a) et basses eaux (b).....	64
Illustration 39 : Selection des mailles SAFRAN concernées par l'impluvium du bassin hydrogéologique du Lez	65
Illustration 40 : Fonction de pondération des précipitations	65
Illustration 41 : Evolution du débit de pompage journalier effectué à la source du Lez en 2010	67
Illustration 42 : Caractéristiques des scénarios de pompage utilisés dans les modélisations	68
Illustration 43 : Comparaison des scénarios de pompage Qp2 et Qp3 (39 Mm ³ /an).....	69

Illustration 44 : Evolution de la piézométrie calculée par le modèle en considérant les chroniques climatiques mesurées (pluie/Température) et le débit de pompage Qp0 (33 Mm³/an). Le focus porte sur la période 1980-1984 globalement déficitaire en précipitation par rapport à la moyenne71

Illustration 45 : Evolution de la piézométrie calculée par le modèle en considérant les chroniques climatiques mesurées (pluie/Température) et les différentes chroniques de débit de pompage Qp0 à Qp6. Le focus porte sur la période 1980-1984 globalement déficitaire en précipitation par rapport à la moyenne71

Illustration 46. : Evolution de la piézométrie calculée par le modèle en considérant une succession d'année identique (année 1995) et les débits de pompage Qp0 (33 Mm³/an) ; Qp2 (39 Mm³/an) et Qp3 (39 Mm³/an)72

Illustration 47 : Evolution relative (en m) des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie du drain karstique du Lez par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 1 : climat présent 1971-2000 et prélèvement augmenté [47,5 Mm³/an = Qp1]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an = Qp0])77

Illustration 48 : Evolution relative (A : en l/s ; B en %) des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement calculées par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 1 : climat présent 1971-2000 et prélèvement augmenté [47,5 M³/an = Qp1]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an = Qp0])78

Illustration 49 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 1 climat 1971-2000 et prélèvement augmenté [2010 + 50%= 47,5 Mm³/an = Qp1] (traits pointillé rouges). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle.79

Illustration 50 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement (calculé au pas journalier). Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 1 : climat 1971-2000 et prélèvement augmenté [2010 + 50%= 47,5 Mm³/an = Qp1] (traits pointillé rouges). Les courbes enveloppes délimitent la gamme des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle.....79

Illustration 51 : Evolution relative (en m) des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie du drain karstique du Lez par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 2 : climat futur [2046-2065] et prélèvement médian actuel [33 Mm³/an = Qp0]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an = Qp0])80

Illustration 52 : Evolution relative (A : en l/s ; B en %) des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement calculés par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 2 : climat futur [2046-2065] et prélèvement médian actuel [33 Mm³/an = Qp0]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an = Qp0])82

Illustration 53 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 2 [climat futur 2046-2065] et prélèvement médian actuel [33 Mm³/an = Qp0] (traits pointillé rouges). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle83

Illustration 54 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement (calculé au pas journalier). Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 2 [climat futur 2046-2065] et prélèvement médian actuel [33 Mm³/an = Qp0] (traits pointillé rouges). Les courbes enveloppes délimitent la gamme des moyennes interannuelles obtenues en

considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle.....	83
Illustration 55 : Evolutions relatives (en m) des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie du drain karstique du Lez calculées par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 3 : [climat futur 2046-2065] et prélèvement augmenté [2010+50% = 47,5 Mm ³ /an = Qp1]. La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat référence [1971-2000] et prélèvement de référence [33 Mm ³ /an = Qp0]).	84
Illustration 56 : Evolution relative (A en l/s ; B en %) des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement calculés par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 3 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [2010 + 50%= 47,5 Mm ³ /an =Qp1]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm ³ /an =Qp0])	86
Illustration 57 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 3 climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [47,5 Mm ³ /an = Qp1] (traits pointillé rouges). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle	87
Illustration 58 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement (calculé au pas journalier). Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 3 [climat futur 2046-2065] et prélèvement augmenté [2010 + 50%= 47,5 Mm ³ /an = Qp1] (traits pointillé rouges). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle	87
Illustration 59 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles des cumuls de pluie efficace. Scénario climatique de référence [1970-2000] et scénario climatique futur [2046-2065] des 9 modèles de climat.....	88
Illustration 60 : Dispersion des fréquences d’occurrences du niveau piézométrique calculées à l’aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de changement globaux (Climatique + Prélèvement augmenté) et le scénario de référence (représentation en diagramme « Boîtes à moustaches »), pour deux intervalles de niveau piézométrique distincts». Les fréquences d’occurrence sont calculées en considérant le nombre total d’occurrences des différents scénarios qui satisfont le critère d’analyse.	90
Illustration 61 : Dispersion de la fréquence d’occurrence pour lequel le débit de débordement à la vasque est nul (Qd = 0 l/s) calculée à l’aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les principaux scénarios de changements globaux (Climatique + Prélèvement augmenté) et le scénario de référence (représentation en diagramme « Box-Plot »). La même information statistique exprimée en nombre de jours moyen (moyenne interannuelle) où Qd = 0 l/s est également reportée	93
Illustration 62 : Dispersion du débit journalier maximal de période de retour 10 ans calculée à l’aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les scénarios 1, 2 et 3 et le scénario de référence. Les valeurs sont calculées à partir des fonctions de répartition théoriques (log-normal) qui ont été soumise au test de Kolmogorov Smirnov, avec un niveau de signification $\alpha=5\%$	94
Illustration 63 : Comparaison des résultats des simulations au moyen des modèles POKA et TEMPO sur une longue période	99
Illustration 64 : Evolution du rayon d’action du rabattement autour du réseau de drains karstiques au sein de la matrice calcaire	100
Illustration 65 : Evolution temporelle des niveaux d’eau simulés dans le drain karstique et des débits de pompages correspondant aux scénarios a, b, c et d.....	101
Illustration 66 : Evolution temporelle des débits de sollicitation de la matrice calcaire simulés et des débits de pompagescorrespondant aux scénarios a, b et c.....	102

Illustration 67 : Coupe hydrogéologique schématique du drain karstique pompé à la vasque du Lez – les niveaux d'eau en fin de scénarios b (référence) et d sont schématisés.....	103
Illustration 68 : évolution temporelle des niveaux d'eau simulés dans le drain karstique et des débits de pompages correspondant aux scénarios a, b, c et d.....	105
Illustration 69 : Débits et variations piézométriques en condition de karst saturé et sous saturé consécutifs à un épisode de pluie d'environ 120 - 130 mm.	109
Illustration 70 : Réponses aux pluies significatives en contexte de karst sous saturé.....	110
Illustration 71 : Impact des précipitations sur la remontée du niveau piézométrique.	110
Illustration 72 : Episodes de crue en condition de karst rechargé.....	112
Illustration 73 : Débits maximaux à Lavalette en fonction des cumuls de précipitation journalière en condition de karst rechargé	113
Illustration 74 : Débits à Lavalette associés à des précipitations journalières comprises entre 70 et 90 mm (épisodes de décembre 2000, octobre 2001, octobre 2002, janvier 2006)	115
Illustration 75 : Caractéristiques des épisodes de crue en contexte de karst rechargé (débit à Lavalette).....	116
Illustration 76 : Débit au pic de crue en fonction du cumul de précipitation pour les épisodes en condition de karst rechargé	117
Illustration 77 : Réponse aux pluies significatives en contexte de karst saturé en cours de recharge	119
Illustration 78 : Episodes avec recharge du karst puis crue (septembre 2000, septembre 2003, septembre 2005, octobre 2008)	121
Illustration 79 : Débit en fonction des précipitations participant aux crues après la recharge du karst	121
Illustration 80 : Débit du pic de crue en fonction des précipitations et intensité en mm/h (rouge : $I > 30$, orange $15 < I < 30$, jaune : $10 < I < 15$ et vert < 10)	122
Illustration 81 : Abaque n° 1 : « Pluie - niveau du karst »	124
Illustration 82 : Exemple d'utilisation de l'abaque « Pluie – niveau du karst ».....	125
Illustration 83 : Débit du pic de crue horaire simulé par le modèle pluie - débit en fonction du cumul de précipitation efficace pour différentes intensités et un état hydrique initial nul	127
Illustration 84 : Abaque au pont de Garigliano (se référer à l'illustration 134)	128
Illustration 85 : Abaque « Débit à Lavalette en fonction du cumul des précipitations efficaces » et épisodes mesurés	129
Illustration 86 : Abaque « Débit à Lavalette en fonction du cumul des précipitations efficaces pour différentes intensités ».....	130
Illustration 87 : Abaque à double entrée : « niveau karst et débit en fonction des pluies ».	131
Illustration 88 : Episode de septembre 2005.....	132
Illustration 89 : Exemple d'utilisation de l'abaque – épisode de septembre 2005, karst sous saturé.	133
Illustration 90 : Exemple d'utilisation de l'abaque – épisode de pluie de septembre 2005 en condition de karst saturé	134
Illustration 91 : Abaque : « Pluie - niveau du karst » pour un niveau minimum dans le karst à 20 m NGF.	136
Illustration 92 : Exemple d'utilisation de l'abaque – épisode de pluie de septembre 2005 avec en condition initial le karst à 20 m NGF.....	137
Illustration 93 : Synthèse des résultats de la crue de septembre 2005 en fonction de l'état initial de remplissage du karst	137
Illustration 94 : Feuille de calcul Excel pour approcher les débits à Lavalette.....	138

Illustration 95 : Photos du pont de l'Évêque	143
Illustration 96 : Schéma du Pont de l'Évêque.....	144
Illustration 97 : comparaison du mouvement du seuil simulé et observé lors de la crue du 09/12/2002. La courbe noire représente les données tandis que le courbe verte représente son mouvement simulé par SIC	145
Illustration 98 : Evolution de la cote de l'eau au niveau du seuil du moulin de l'évêque durant la crue du 09/12/2002.....	145
Illustration 99 : Valeurs du Strickler ([5] Degoutte G, Aide mémoire d'hydraulique à surface libre)	147
Illustration 100 : Evolution des débits à Garigliano sans apport au niveau de la Lironde (simulés en bleu et observés en vert)	149
Illustration 101 : Evolution de la hauteur d'eau à Garigliano sans apport au niveau de la Lironde (simulées en bleu et observées en vert).....	149
Illustration 102 : Reconstitution des apports de la Lironde par différence entre les hydrogrammes observés et modélisés à la station de Garigliano pour la crue du 27/11/2003.....	149
Illustration 103 : Evolution des débits à Garigliano avec apport au niveau de la Lironde (simulés en bleu et observés en vert)	150
Illustration 104 : Evolution de la hauteur d'eau à Garigliano avec apport au niveau de la Lironde (simulées en bleu et observées en vert).....	150
Illustration 105 : Courbe de Tarage à la station de Lavalette.....	150
Illustration 106 : Courbe de Tarage à la station de Garigliano	150
Illustration 107 : Hydrogrammes de crue du 19/10/2008 simulés et observés à la station de Garigliano	152
Illustration 108 : Hydrogrammes obtenus pour le deuxième pic de crue à Garigliano.....	153
Illustration 109 : Limnigrammes obtenus pour le deuxième pic de crue à Garigliano.....	153
Illustration 110 : Hydrogrammes obtenus pour le deuxième pic de crue à la 3 ^{ème} écluse.	153
Illustration 111 : Limnigrammes obtenus pour le deuxième pic de crue à la 3 ^{ème} écluse.	153
Illustration 112 : Ligne d'eau du Lez obtenue par les simulations avec SIC et ISIS pour un débit de période de retour 5 ans.....	156
Illustration 113 : Ligne d'eau du Lez obtenue par les simulations avec SIC et ISIS pour un débit de période de retour 10 ans.....	157
Illustration 114 : Ligne d'eau du Lez obtenue par les simulations avec SIC et ISIS pour un débit de période de retour 50 ans.....	158
Illustration 115 : Ligne d'eau du Lez obtenue par les simulations avec SIC et ISIS pour un débit de période de retour 100 ans.....	158
Illustration 116 : Ligne d'eau obtenue en régime transitoire (symbole +) et en régime permanent (ligne continue) pour les débits de pointe issus des 12 crues de référence. Partie amont.....	160
Illustration 117 : Ligne d'eau obtenue en régime transitoire (symbole +) et en régime permanent (ligne continue) pour les débits de pointe issus des 12 crues de référence. Partie centrale.	160
Illustration 118 : Ligne d'eau obtenue en régime transitoire (symbole +) et en régime permanent (ligne continue) pour les débits de pointe issus des 12 crues de référence. Partie aval	161
Illustration 119 : Ecart entre la ligne d'eau en régimes transitoire et permanent pour les 12 débits de pointes	161
Illustration 120 : Relation entre le débit et l'écart transitoire-permanent au niveau des seuils	162

Illustration 121 : Mouvement du seuil du pont de l'évêque en fonction du débit observé. Les croix noires représentent les observations. La courbe rouge est issue d'une interpolation polynomiale du 8 ^{ème} degré à travers le nuage de points. La droite bleu est le choix que nous avons fait afin d'extrapoler le mouvement suite au décrochage du polynôme. Pour les débits supérieurs 500 m ³ /s, la côte du seuil du pont de l'évêque est maintenue à 10m NGF	163
Illustration 122 : Écart entre la ligne d'eau avec et sans apports aux affluents (en rouge pour un apport à la Lironde et en bleu pour un apport au Verdanson). Le débit du Lez est de 400 m ³ /s. 80 m ³ /s sont ajoutés dans un premier cas à La Lironde (localisé par le trait violet) et dans un second cas au Verdanson (localisé par le trait noir)	164
Illustration 123 : Homothétie des 12 hydrogrammes (noir) vers le débit de pointe maximal (rouge) et le débit de pointe minimal (bleu)	166
Illustration 124 : Écart entre le régime transitoire et permanent aux 19 sections étudiées et pour les 12 débits de pointe. En couleur est représentée les 12 différentes formes d'hydrogrammes correspondant aux dates des crues (légende)	169
Illustration 125 : Courbe de tarage tracée à partir de simulation en régime permanent (courbe noire). En bleu, les couples de points [Q ;Z] issus des simulations transitoires pour 20 débits de pointes et 12 hydrogrammes de formes différentes. En rouge, les couples de points [Q ;Z] issus des simulations transitoires des hydrogrammes observés au moulin de Gasconnet avec les apports de la Lironde et du Verdanson reconstitués	170
Illustration 126 : Temps d'arrivée moyen des crues dépassant le seuil des 100 m ³ /s au niveau des 26 ouvrages en travers répertoriés sur le Lez	171
Illustration 127 : Temps d'arrivée moyen des crues dépassant le seuil des 100 m ³ /s au niveau des 26 ouvrages en travers répertoriés sur le Lez (zoom de la figure précédente).	171
Illustration 128 : Temps d'arrivée moyen des crues dépassant le seuil des 200 m ³ /s au niveau des 26 ouvrages en travers répertoriés sur le Lez	172
Illustration 129 : Temps d'arrivée moyen des crues dépassant le seuil des 300 m ³ /s au niveau des 26 ouvrages en travers répertoriés sur le Lez	172
Illustration 130 : Temps d'arrivée moyen des crues dépassant le seuil des 400 m ³ /s au niveau des 26 ouvrages en travers répertoriés sur le Lez	173
Illustration 131 : Exemple de l'effet du laminage d'un hydrogramme sur le dépassement d'un seuil de débit	173
Illustration 132 : Schéma du Lez et disposition des sections étudiées	175
Illustration 133 : Construction de l'abaque, exemple au niveau de la 1ère écluse de Lattes.	176
Illustration 134 : Abaque au pont de Garigliano	176
Illustration 135 : Abaque à la 2 ^{ème} écluse de Lattes	177
Illustration 136.: Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 4 climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [35,7 Mm ³ /an =Qp4] (traits pointillé bleus clairs). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle	189
Illustration 137.: Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement (calculé au pas journalier). Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 4 [climat futur 2046-2065] et prélèvement augmenté [35,7 Mm ³ /an =Qp4] (traits bleus clairs). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle	189
Illustration 138.: Evolution relative (en l/s) des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement calculées par les neuf modèles hydroclimatiques (scénario 4 : climat futur [2046-	

2065] et prélèvement augmenté [35,7 Mm ³ /an =Qp4]). La comparaison (evolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm ³ /an =Qp0])	190
Illustration 139.: Evolution relative (en m) des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie débit calculés par les neuf modèles hydroclimatiques (scénario 4 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [35,7 Mm ³ /an =Qp4]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm ³ /an =Qp0])	190
Illustration 140.: Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 5 climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [40,4 Mm ³ /an =Qp5] (traits pointillés roses). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les neuf modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle	191
Illustration 141.: Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement (calculé au pas de temps journalier). Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 5 climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [40,4 M m ³ /an =Qp5] (traits pointillés roses). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les neuf modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle.....	191
Illustration 142 : Evolution relative (en m) des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie calculées par les neuf modèles hydroclimatiques (scénario 5 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [40,4 Mm ³ /an = Qp4]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm ³ /an = Qp0])	192
Illustration 143.: Evolution relative (en l/s) des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement calculées par les neuf modèles hydroclimatiques (scénario 4 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [35,7 Mm ³ /an = Qp4]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm ³ /an = Qp0])	192
Illustration 144 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 6 climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [45 Mm ³ /an =Qp6] (traits pointillé jaunes). Les courbes enveloppes délimitent la gamme des moyennes interannuelles obtenues en considérant les neuf modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle	193
Illustration 145.: Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement (calculé au pas de temps journalier). Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 6 climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [45 Mm ³ /an =Qp6] (traits pointillé jaunes). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les neuf modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle.....	193
Illustration 146.: Evolution relative (en l/s) des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement calculés par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 6 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [45 Mm ³ /an = Qp6]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm ³ /an = Qp0]).....	194
Illustration 147.: Evolution relative (en m) des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie calculés par les neuf modèles hydroclimatiques (scénario 6 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [45 Mm ³ /an =Qp6]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm ³ /an =Qp0]).....	194
Illustration 148 : Evolution des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie et des débits de débordement calculés par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario Qp2 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [39 Mm ³ /an =Qp3]). La comparaison (évolution relative) est	

effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an =Qp0])195

Illustration 149 : Evolution des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie et du débit de débordement calculée par les neuf modèles hydroclimatiques (scénario Qp3 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [39 Mm³/an =Qp3]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an =Qp0])196

Illustration 150 : Dispersion des fréquences d’occurrences du niveau piézométrique calculées à l’aide des neuf modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : Climat Présent) , pour quatre intervalles de niveaux piézométriques distincts». Les fréquences d’occurrence sont calculées en considérant le nombre total d’occurrences des différents scénarios (**deux premières colonnes : scénario Qp0**).197

Illustration 151 : Dispersion des fréquences d’occurrences du niveau piézométrique calculées à l’aide des neuf modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : Climat Présent) , pour quatre intervalles de niveaux piézométriques distincts». Les fréquences d’occurrence sont calculées en considérant le nombre total d’occurrences des différents scénarios (**deux premières colonnes : scénario Qp1**).198

Illustration 152 : Dispersion des fréquences d’occurrences du niveau piézométrique calculées à l’aide des neuf modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : Climat Présent) , pour quatre intervalles de niveaux piézométriques distincts». Les fréquences d’occurrences sont calculées en considérant le nombre total d’occurrence des différents scénarios (**première colonne : scénario Qp2**).....199

Illustration 153 : Dispersion des fréquences d’occurrences du niveau piézométrique calculées à l’aide des neuf modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : Climat Présent) , pour quatre intervalles de niveaux piézométriques distincts». Les fréquences d’occurrences sont calculées en considérant le nombre total d’occurrences des différents scénarios (**première colonne : scénario Qp5**).....200

Illustration 154 : Dispersion des fréquences d’occurrences pour lesquelles le débit de débordement à la vasque est nul (Qd = 0 l/s) calculées à l’aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : climat Présent). Les fréquences d’occurrences sont calculées en considérant le nombre total d’occurrences des différents scénarios. Le col resserré des boites à moustache signifie que les médianes sont représentatives au niveau de signification $\alpha = 5\%$ (**première colonne : scénario Qp0**)201

Illustration 155 : Dispersion des fréquences d’occurrences pour lesquelles le débit de débordement à la vasque est nul (Qd = 0 l/s) calculées à l’aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F: climat Futur; P: climat Présent). Les fréquences d’occurrences sont calculées en considérant le nombre total d’occurrences des différents scénarios. Le col resserré des boites à moustache signifie que les médianes sont représentatives au niveau de signification $\alpha = 5\%$ (**première colonne : scénario Qp1**)201

Illustration 156 : Dispersion des fréquences d’occurrences pour lesquelles le débit de débordement à la vasque est nul (Qd = 0 l/s) calculées à l’aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : climat Présent). Les fréquences d’occurrences sont calculées en considérant le nombre total d’occurrence des différents scénarios. Le col resserré des boites à moustache signifie que les médianes sont représentatives au niveau de signification $\alpha = 5\%$ (**première colonne : scénario Qp2**).....202

Illustration 157 : Dispersion des fréquences d’occurrences pour lesquelles le débit de débordement à la vasque est nul (Qd = 0 l/s) calculées à l’aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : climat Présent). Les fréquences d’occurrences sont calculées en considérant le nombre total d’occurrences des différents scénarios. Le col resserré des boites à moustache signifie que les médianes sont représentatives au niveau de signification $\alpha = 5\%$ (**première colonne : scénario Qp5**)202

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des débits de prélèvements (mensuels et annuels) à la source du Lez	66
Tableau 2 : Hypothèses de prélèvements futurs à la source du Lez selon le SDAEP 2030 et scénarios simulés correspondants	70
Tableau 3 : Définition des scénarios étudiés (* ratio de pompage de 1,33 entre les mois d'été de d'hiver ; **ratio de pompage de 1,13 entre les mois d'été de d'hiver).....	75
Tableau 4 : Niveau minimum de la piézométrie journalière calculée par les modèles hydroclimatiques selon les scénarios considérés (NP : niveau piézométrique).....	92
Tableau 5 : Synthèse des principaux résultats de l'évaluation de l'impact de changement global (climatique et prélèvement)	97
Tableau 6 : tableau de synthèse des rabattements simulés et des volumes de sollicitation calculés en fin de simulation des scénarios a, b, c et d.....	103
Tableau 7 : synthèse des rabattements simulés et des volumes de sollicitation calculés en fin de simulation des scénarios de remontée a, b, c et d.	105
Tableau 8 : Tableau synthétique d'estimation de l'impact des changements globaux sur les crues du Lez	139
Tableau 9 : Synthèse des hydrogrammes de crue sélectionnés et lieu des enregistrements (L = Lavalette ; G = Garigliano ; E = 3 ^{ème} écluse)	142
Tableau 10 : Comparaison entre les observations des laisses de crues et des hauteurs d'eau maximales atteintes issues de la simulation numérique lors de la crue de septembre 2005	148
Tableau 11 : Débit minimum pour lequel l'écoulement au passage des seuils est dit noyé lors de la crue du 23/11/2003.....	151
Tableau 12 : Critère de Nash calculé entre les hydrogrammes observés et les hydrogrammes calculés par le modèle aux stations de Garigliano et de Lattes 3 ^{ème} écluse avec et sans les apports reconstitués aux affluents de la Lironde et du Verdanson	154
Tableau 13 : Critère de Nash calculé entre les limnigrammes observés et les limnigrammes calculés par le modèle aux stations de Lavalette, de Garigliano et de Lattes 3 ^{ème} écluse avec et sans les apports reconstitués aux affluents de la Lironde et du Verdanson.	155

Liste des annexes

Annexe 1 Eléments complémentaires des simulations hydroclimatiques et tests réalisés à l'aide du modèle Tempo	187
Annexe 2 Abaques hydrauliques du Lez	203

1. Introduction

L'hydrosystème du Lez, fleuve côtier dont la source d'origine karstique est exploitée par une gestion active depuis 1982 par la ville de Montpellier puis l'Agglomération de Montpellier, constitue un site de référence pour étudier, dans le cadre d'un projet pluridisciplinaire (géologie, hydrogéologie, hydrologie, hydraulique, biologie et économie), les possibilités d'une gestion multi-usages.

Le projet de recherche « Gestion multi-usages des aquifères karstiques méditerranéens – Le Lez, son bassin versant et son bassin d'alimentation » regroupe un partenariat scientifique et technique constitué par le BRGM, les UMR Hydrosiences, G-EAU, TETIS, le CERFACS et BIOTOPE. Les questions d'intérêt qui se posent dans ce cadre concernent :

- l'amélioration de la connaissance de l'aquifère karstique du Lez,
- l'évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère karstique et les contraintes associées en termes d'aménagement du territoire,
- l'évaluation de la ressource en eau exploitable au sein de l'aquifère,
- la caractérisation des impacts éventuels de nouveaux scénarios d'exploitation,
- la mitigation des risques d'inondation,
- la caractérisation des interactions du pompage de la source du Lez sur d'autres systèmes connexes,
- la connaissance de la biodiversité souterraine et la définition de bio-indicateurs des eaux,
- la gestion concertée de la ressource.

La mise en place des différents modèles hydrogéologiques, hydrologiques et hydrauliques reproduisant le fonctionnement de l'hydrosystème karstique du Lez et permettant d'apporter des éléments de réponse à ces questions font l'objet de l'atelier AT4.

Les résultats attendus pour cet atelier sont :

- i) reproduire et expliquer les fonctionnements et évolutions observés concernant la gestion de la ressource en eau souterraine et les crues de surface ;
- ii) simuler et évaluer des scénarios de gestion alternatifs des eaux souterraines et de surface, en contexte ou non de changement climatique.

Les modèles numériques mis en œuvre ont été décrits dans le livrable L4.1. Leur architecture et leur fonctionnement y sont présentés, comme les résultats des calages et une analyse de sensibilité pour certains d'entre eux.

Le présent rapport constitue le livrable L4.2. Il décrit les résultats des simulations de scénarios de gestion et climatiques effectuées au moyen des modèles numériques. Outre cette introduction (section 1), il comprend quatre sections :

- la section 2 décrit les scénarios de changement climatique avec le climat actuel et les scénarios futurs ;
- la section 3 présente les résultats des modèles hydrogéologiques Tempo et Poka sous différentes conditions de scénarios climatiques et de gestion (pompage) ;
- la section 4 présente les résultats de la prise en compte du karst dans la simulation des crues au moyen d'un modèle hydrologique, et sa présentation sous la forme d'un abaque de prévision des crues karstiques ;

- la section 5 décrit la simulation de la propagation des crues au moyen d'un modèle hydraulique dans le fleuve Lez ;
- la section 6 fait état des conclusions générales.

2. Climat présent et scénarios climatiques futurs

2.1. INTRODUCTION

Dans un premier temps, les données disponibles au niveau des principales stations météorologiques en termes de température et de précipitation du secteur étudié ont été analysées à l'aide de méthodes statistiques, pour caractériser l'évolution temporelle et spatiale du climat, au cours des dernières décennies. Ensuite, des scénarios de l'évolution future du climat à l'horizon 2045-65 sont présentés. Ces scénarios sont construits à partir des résultats des modèles climatiques globaux, régionalisés par le CERFACS à Toulouse et diffusés dans le cadre du programme SCRATCH 2010 (Pagé et Terray, 2011).

2.2. EVOLUTION ACTUELLE DES TEMPERATURES ET PRECIPITATIONS

L'essentiel du travail présenté dans le présent chapitre a été réalisé par des étudiants du Master II GERE 2011 de l'Université de Montpellier II (C. Gironde, S. Charguéron, J. Lange, R. Albasha, N. Grillot), dans le cadre de leur stage de fin d'études et encadré par une partie de l'équipe du projet Lez-GMU.

2.2.1. Données et méthodes

Stations météorologiques choisies

Pour étudier l'évolution des paramètres climatiques température et précipitation, les données enregistrées par le réseau de stations météorologiques de Météo France sur les bassins versants du Lez et de l'Hérault, ont été utilisées. Il s'agit des stations de Saint-Martin-de-Londres, Prades-le-Lez, du Mont Aigoual, de Montpellier et de Gignac (Illustration 1). La station de Saint-André-de-Sangonis, initialement retenue, n'a finalement pas été conservée du fait de sa courte chronique (6 ans), ainsi que la station de Valflaunès du fait du manque de donnée de température.



Illustration 1 : Type et localisation des stations météorologiques considérées.

Trois des stations considérées sont automatiques (St-Martin de Londres, Prades le Lez et Gignac), les postes du Mont Aigoual et de Montpellier étant des stations synoptiques professionnelles. La durée des chroniques varie d'une station à l'autre (Illustration 2).

	Mont Aigoual	St-Martin-de-Londres	Prades-le-Lez	Montpellier	Gignac
Bassin Versant	Hérault	Lez	Lez	Lez	Hérault
Altitude (m)	1567	194	85	2	58
Durée des chroniques	01/1896 au 09/2010	01/1928 au 09/2010	03/1979 au 09/2010	01/1946 au 09/2010	01/1902 au 10/2004

Illustration 2 : Caractéristiques des stations météorologiques considérées.

Les données étant disponibles à l'échelle mensuelle, des séries de précipitations cumulées et de températures minimales, moyennes et maximales ont été construites pour chaque mois de l'année et pour chaque station.

Traitements et méthodes d'analyse

En dehors de la station de Montpellier, toutes les stations présentent des lacunes sur les périodes affichées. Pour permettre l'analyse des séries mensuelles et leur inter-comparaison, elles ont été comblées suivant deux méthodes. Une régression linéaire multiple à partir des données des autres postes météorologiques est d'abord calculée. Si le coefficient de corrélation

des résidus de la régression est supérieur à 0,9, la régression est considérée valide et son résultat est utilisé pour combler la lacune. Sinon, cela est fait à l'aide de la valeur médiane de la série des valeurs du mois considéré. Pour vérifier que la méthode de comblement des lacunes n'a pas affecté les propriétés statistiques des séries mensuelles de manière exagérée, leur moyenne et leur écart-type ont été comparés avant et après le comblement des lacunes.

A ce stade, il convient de noter que les séries obtenues n'ont pas été *homogénéisées*. L'homogénéisation d'une série de données consiste à repérer des biais instrumentaux (dysfonctionnement, dérive ou remplacement d'un capteur ou d'une centrale d'acquisition, modification de l'environnement de la station, erreurs de l'opérateur, etc.), pouvant perturber les mesures effectuées par les capteurs de la station et introduire des variations imputées à tort au climat, pour les paramètres étudiés. Ce travail n'a pas pu être réalisé pour les postes étudiés car notre contact à Météo-France n'a pas pu nous fournir le suivi des opérations de maintenance réalisées.

Des *résumés climatiques* ont ensuite été réalisés à l'aide de méthodes de statistique descriptive pour décrire le comportement des séries construites pour chaque station. Ainsi, les propriétés statistiques des séries (cumuls, moyennes, écart-types et médianes) sur la totalité de la durée des séries ont tout d'abord été déterminées. Ensuite, l'évolution des valeurs normales saisonnières calculées de manière glissante sur 30 ans, a été analysée.

Pour les températures, l'amplitude maximale (différence entre la valeur maximale des T max et la valeur minimale des T min) a aussi été calculée.

Enfin, la non-stationnarité des séries construites (présence/absence d'une tendance) a été testée à l'aide du test non-paramétrique de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975). Ce test consiste à considérer que les valeurs de la série testée peuvent être représentées par une fonction continue monotone, croissante ou décroissante, dont on teste la significativité de la pente. De manière synthétique, l'hypothèse de stationnarité de la série (absence de tendance) est vérifiée si la statistique du test, qui calcule la somme des signes des différences entre les termes de la série pris deux-à-deux dans l'ordre anté-chronologique, est proche de zéro.

2.2.2. Principaux résultats

Précipitations - approche descriptive

Les cumuls annuels des pluies calculés pour toutes les stations montrent la variabilité interannuelle, typiquement méditerranéenne, des précipitations dans le secteur étudié (Illustration 3 et Illustration 4). Les cumuls moyens s'échelonnent entre plus de 2000 mm/an pour le Mont Aigoual et 650 mm/an à Montpellier, avec une amplitude (différence entre les valeurs extrêmes) pouvant dépasser les 3000 mm/an dans le cas du Mont Aigoual. L'analyse visuelle de ces chroniques ne met pas en évidence une tendance sur les périodes d'observation.

Les cumuls saisonniers (Illustration 5 à Illustration 12) les plus importants sont observés au cours des deux mois d'automne (septembre et octobre), en relation avec les précipitations convectives appelées *épisodes cévenols*. Ces cumuls décroissent ensuite au fil des saisons pour présenter les valeurs les plus faibles au cours de l'été. L'analyse visuelle des graphiques obtenus ne permet pas de mettre en évidence d'évolution claire sur les précipitations saisonnières, pour toutes les stations.

Le calcul des précipitations saisonnières normales sur 30 ans pour les 4 stations possédant des chroniques suffisamment longues (celle de Prades-le-Lez présente un historique de 30 ans), fait apparaître des évolutions à la baisse des précipitations d'automne pour la station du Mont Aigoual, du printemps sur les stations de St-Martin-de-Londres, de Gignac et de Montpellier et d'été pour la station de Montpellier (Illustration 13). La significativité de ces évolutions doit cependant être vérifiée, ce qui a été fait par application des tests de Mann-Kendall.

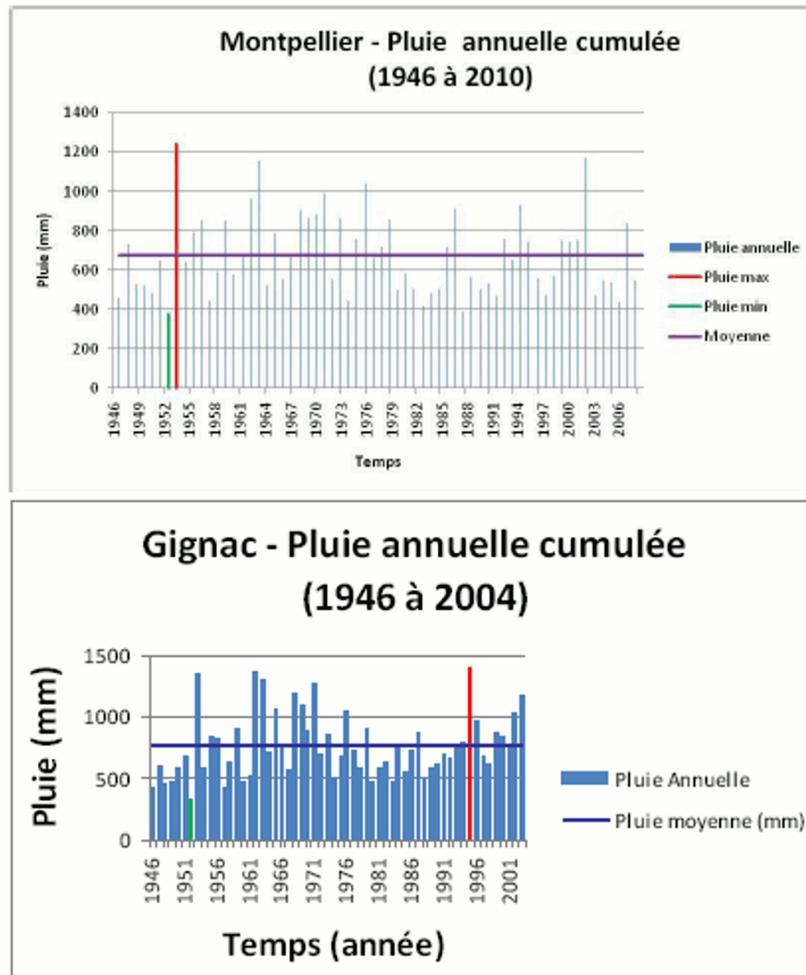


Illustration 3 : Cumuls de pluies annuelles pour les stations de Montpellier et de Gignac.

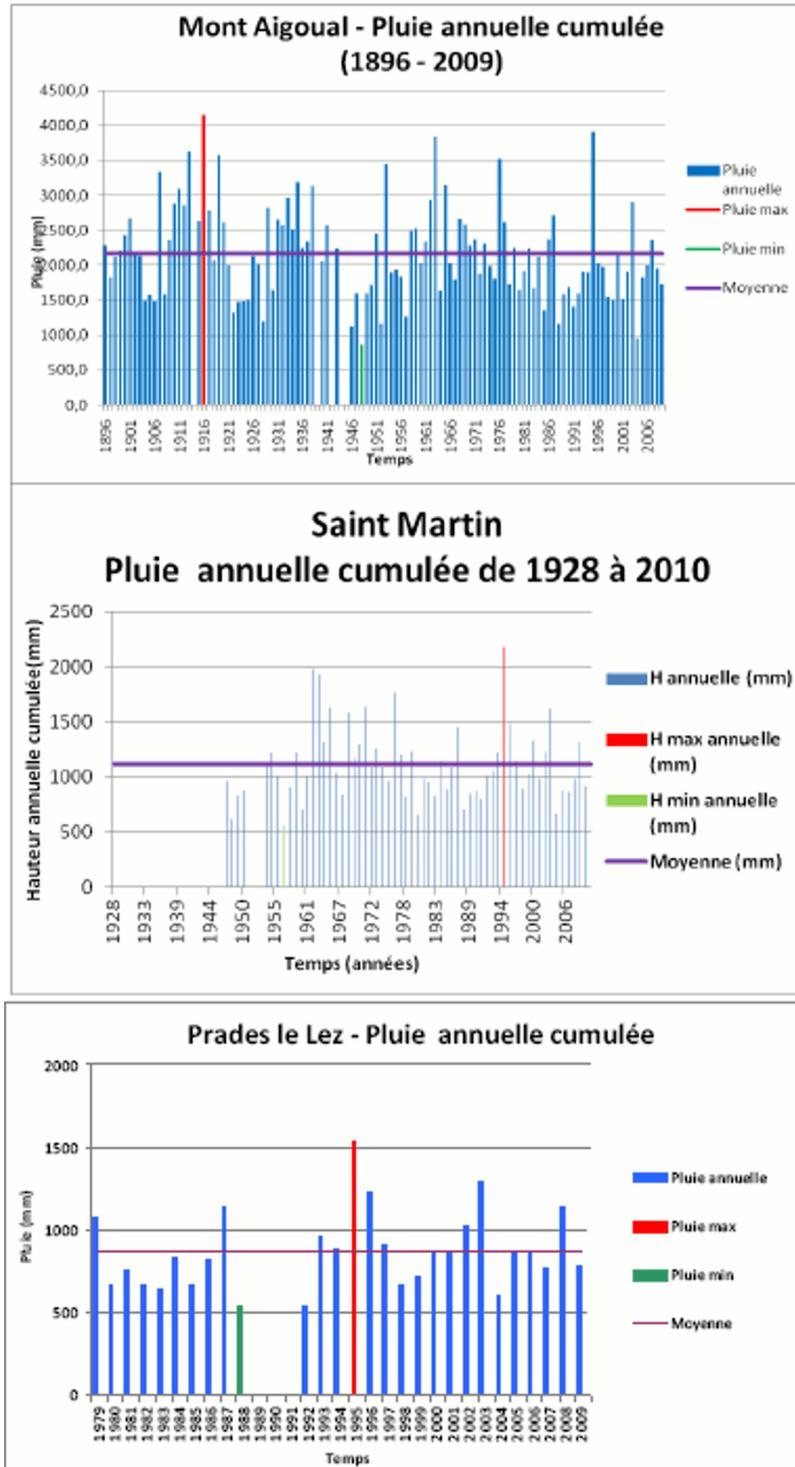


Illustration 4 : Pluies annuelles cumulées aux stations du Mont Aigoual, St Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.

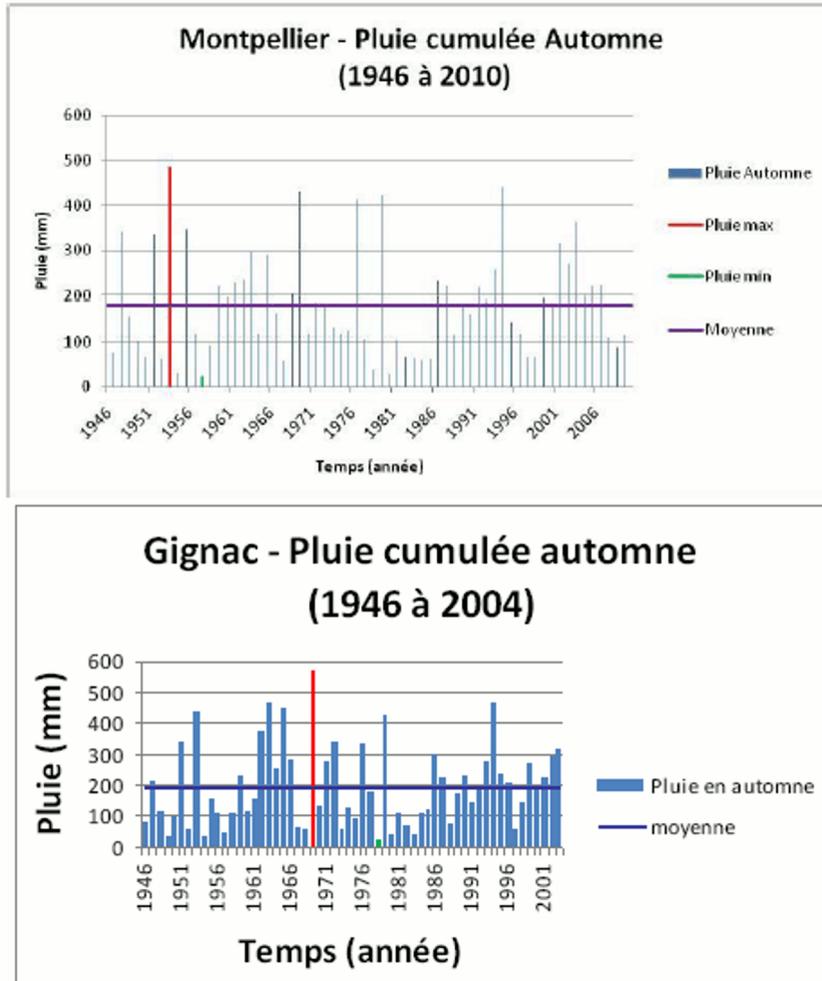


Illustration 5 : Pluies automnales (sept - oct) cumulées pour les stations de Montpellier et de Gignac.

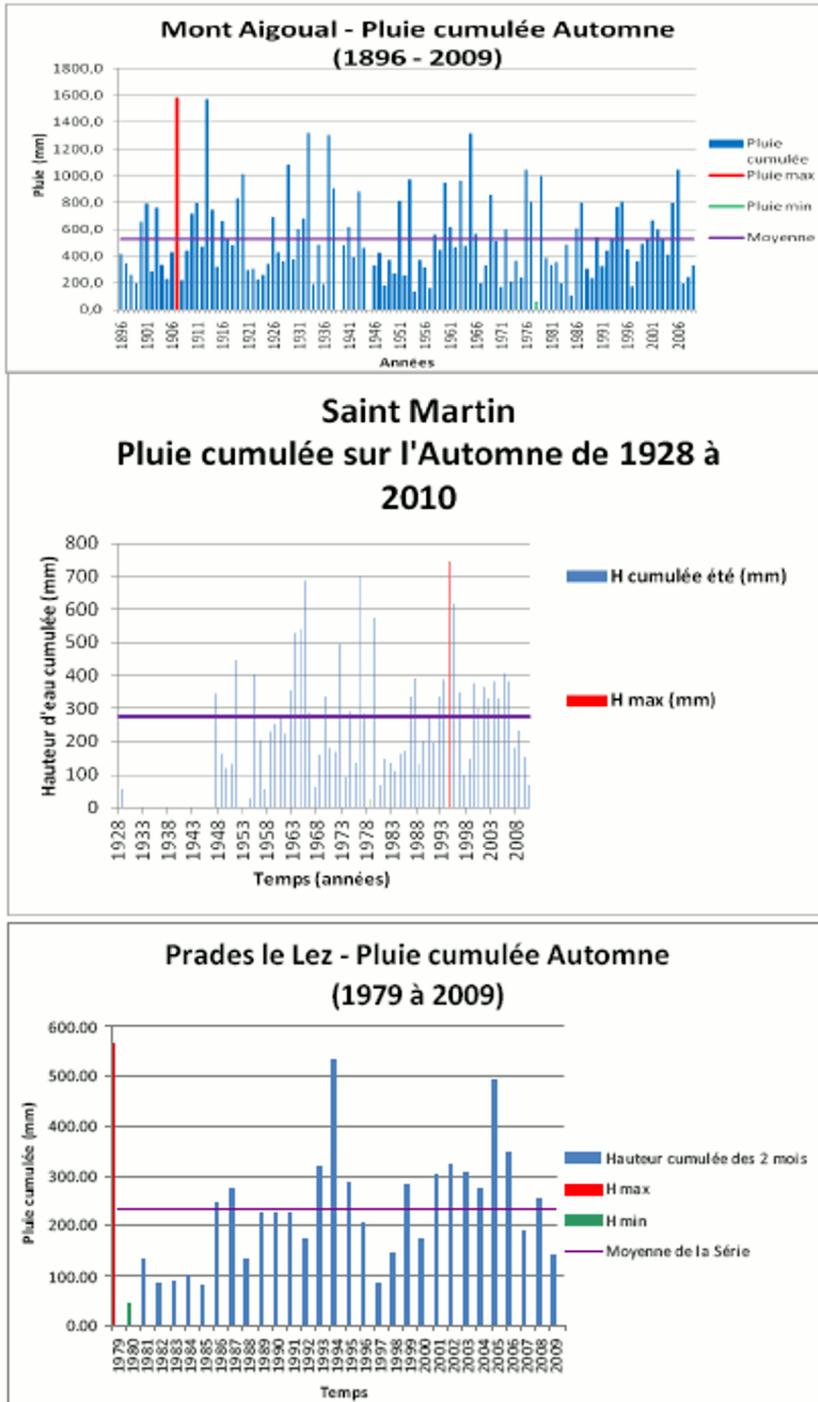


Illustration 6 : Pluies automnales (sept - oct) cumulées pour les stations du Mont Aigoual, St-Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.

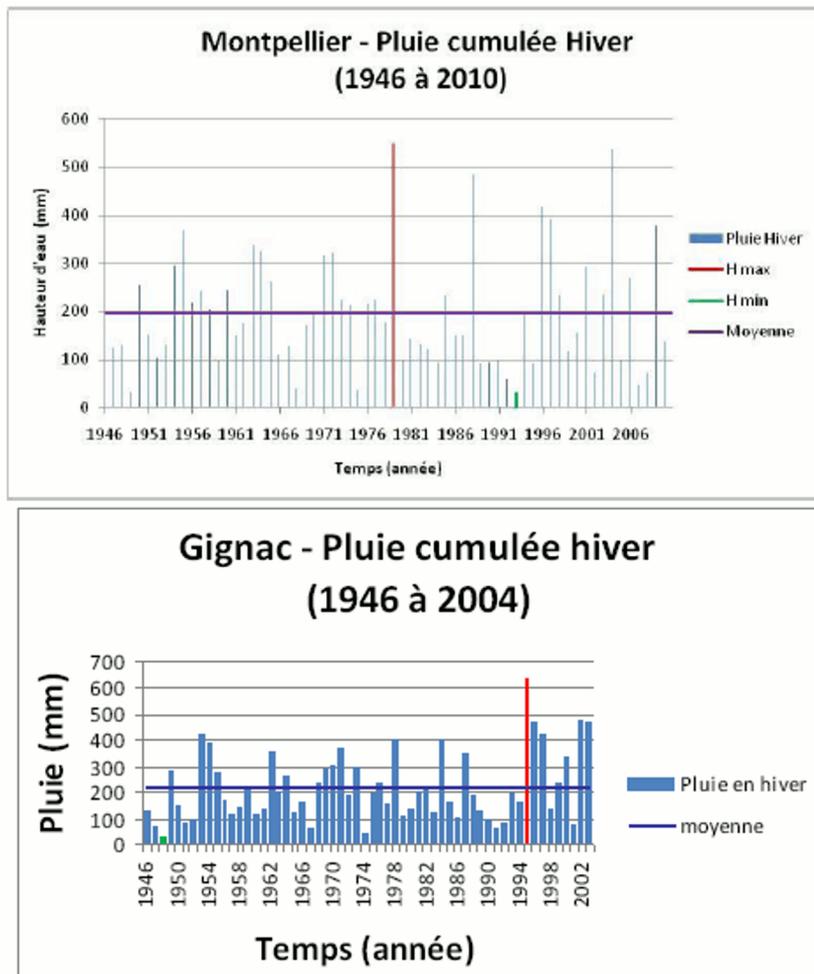


Illustration 7 : Pluies hivernales (nov - jan) cumulées pour les stations de Montpellier et de Gignac.

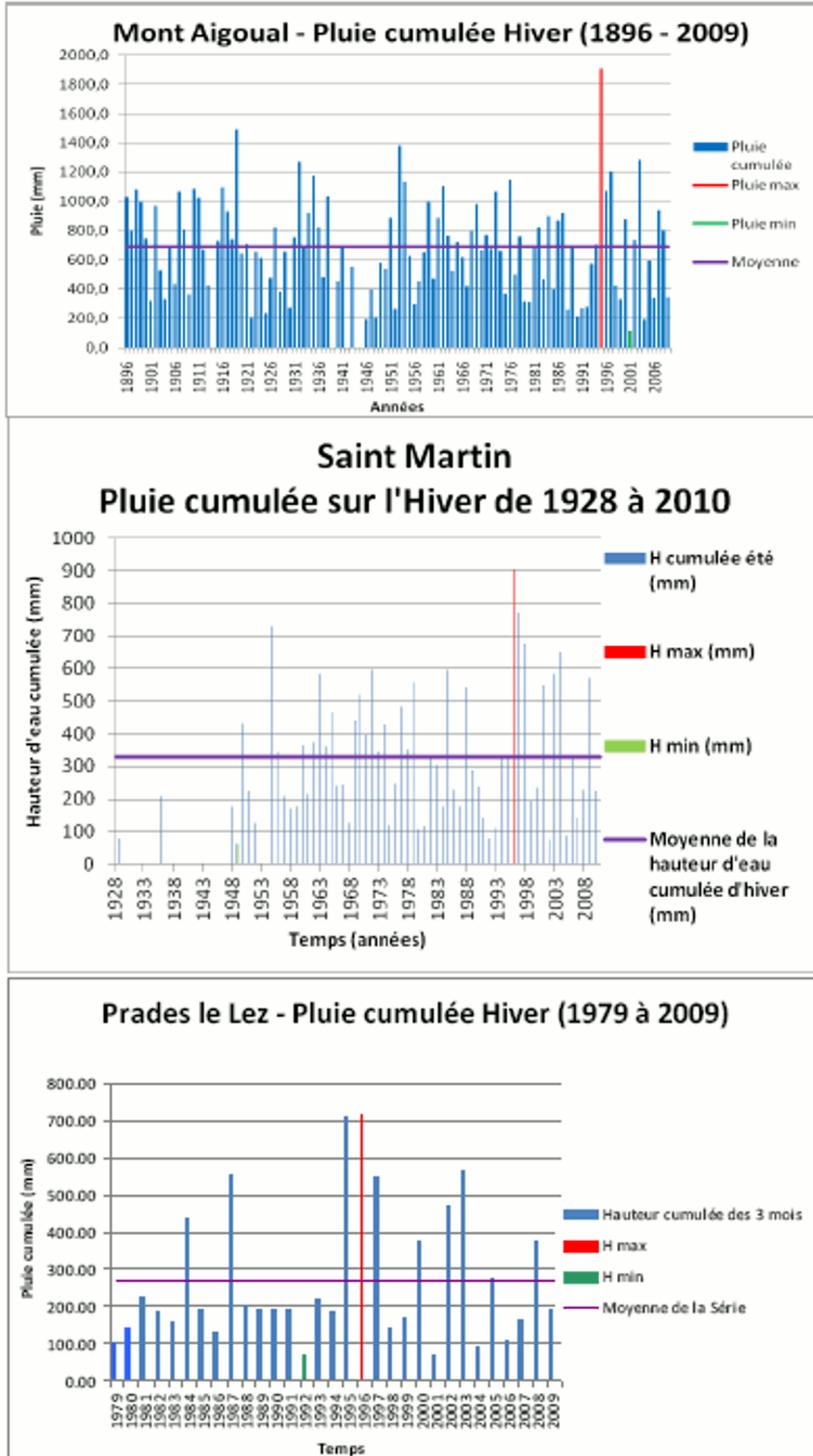


Illustration 8 : Pluies hivernales (nov - jan) cumulées pour les stations du Mont Aigoual, St-Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.

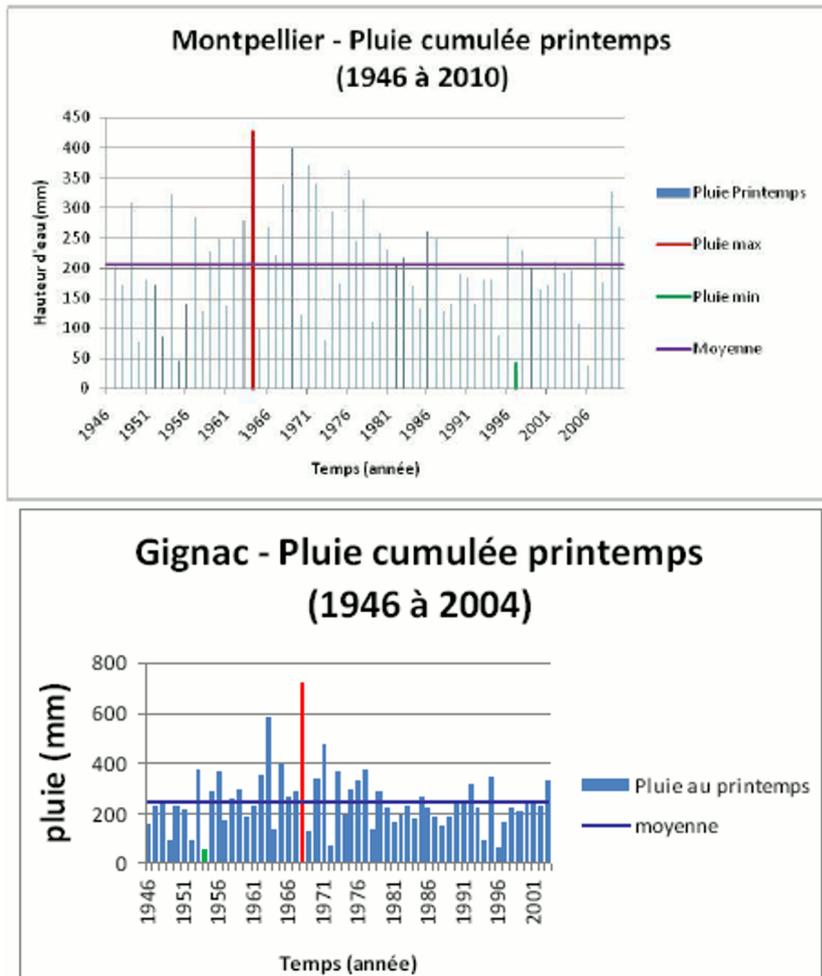


Illustration 9 : Pluies printanières (fev - mai) cumulées pour les stations de Montpellier et de Gignac.

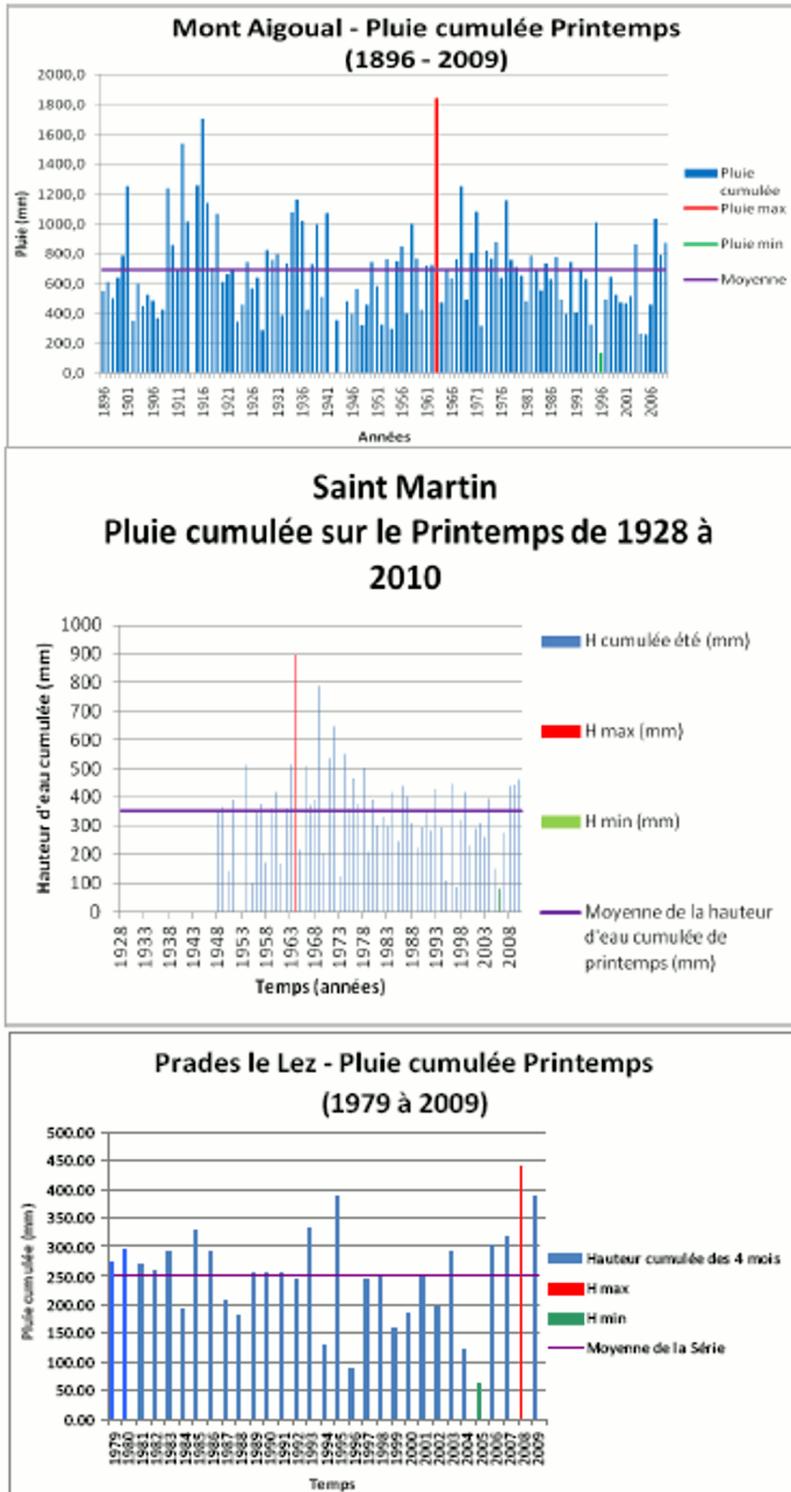


Illustration 10 : Pluies printanières (fev - mai) cumulées pour les stations du Mont Aigoual, St-Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.

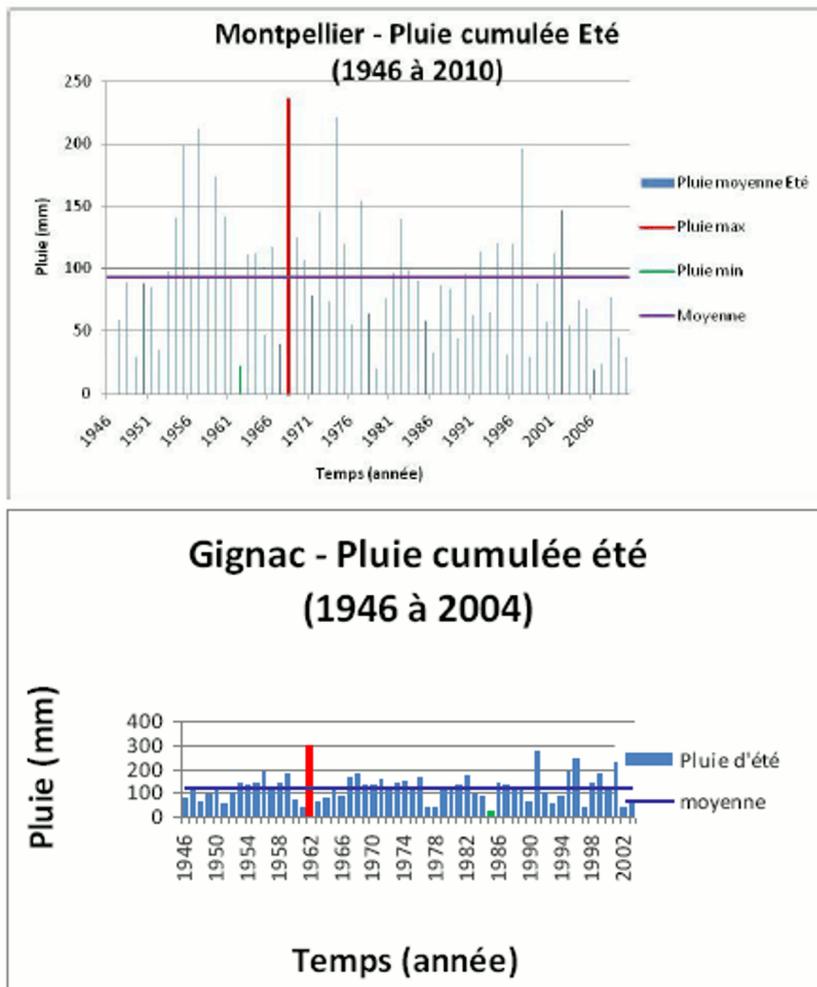


Illustration 11 : Pluies estivales (juin - aout) cumulées pour les stations de Montpellier et de Gignac.

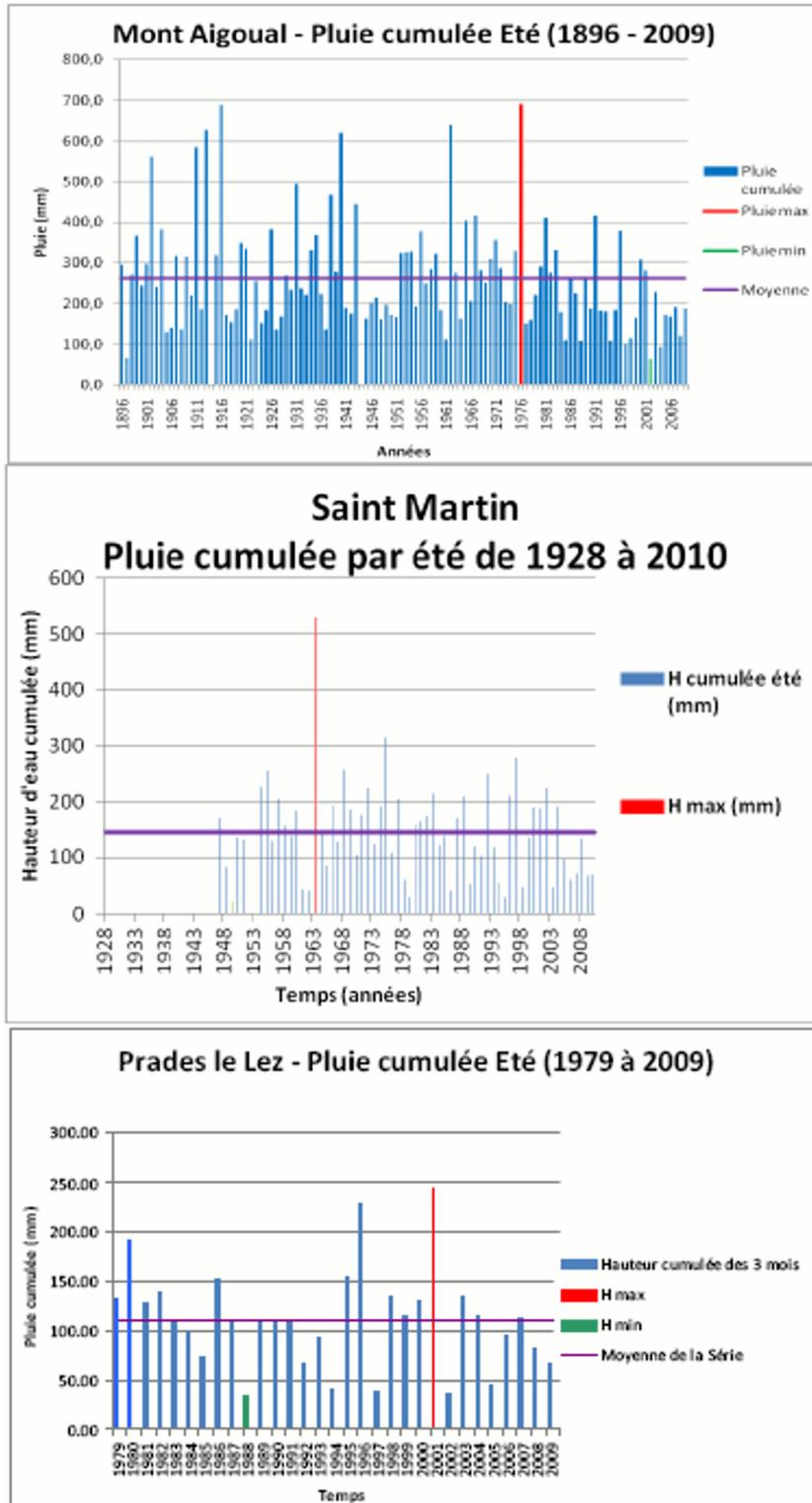


Illustration 12 : Pluies estivales (juin - aout) cumulées pour les stations du Mont Aigoual, St-Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.

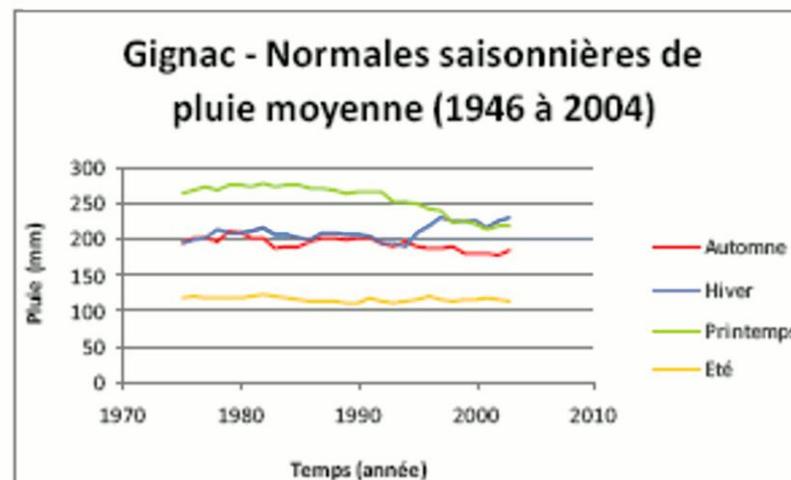
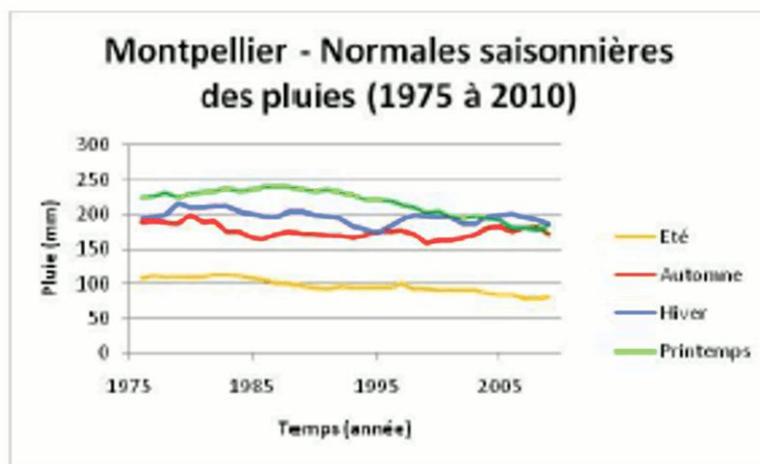
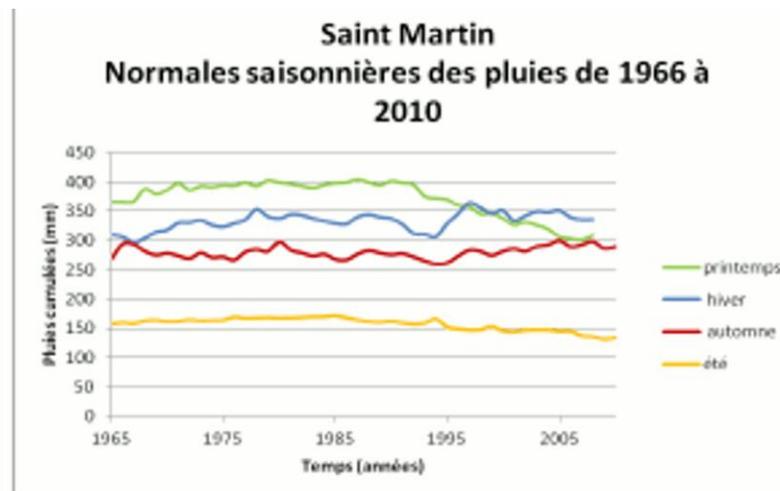
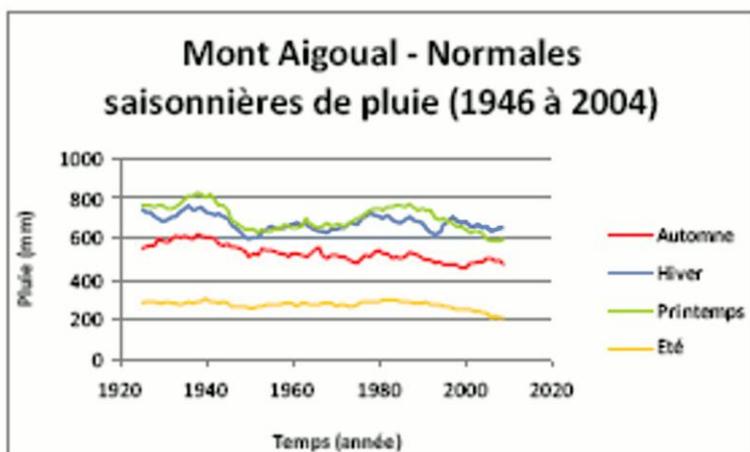


Illustration 13 : Précipitations saisonnières normales calculées sur 30 ans pour les stations du Mont Aigoual, St-Martin-de-Londres, Montpellier et Gignac.

Précipitations - non-stationnarité

De manière à pouvoir comparer le comportement des 5 stations météorologiques entre elles, les tests de Mann-Kendall ont été appliqués aux séries de précipitations annuelles et saisonnières, sur une période de longueur commune à toutes les chroniques (du début de la chronique de Prades-le-Lez en 1979 à la fin de la chronique du poste de Gignac en 2004).

Les résultats (Illustration 14) font ressortir une tendance à la hausse des précipitations d'automne sur tous les postes, qui entraîne une hausse des précipitations annuelles sur les stations du Mont Aigoual, de Montpellier et de Gignac. Toutes les stations présentent un comportement stationnaire en dehors de l'automne, sauf la station du Mont Aigoual qui affiche aussi une hausse des précipitations hivernales et printanières.

Malgré leur intérêt, les résultats obtenus par l'analyse de non-stationnarité présentée, doivent être pris avec précaution, notamment à cause du fait qu'ils ont été réalisés sur des séries de données non-homogénéisées. Ainsi, il ne peut être exclu qu'une partie des signaux mis en évidence par le test de Mann-Kendall s'expliquent par des biais instrumentaux (cf. § 2.2.1).

		Mont Aigoual				Saint-Martin				Prades-le-Lez			
Pluie cumulée	Pluie annuelle	+				=				=			
	Pluie saisonnière	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté
		+	+	+	=	+	=	=	=	+	=	=	=
		Montpellier				Gignac							
Pluie cumulée	Pluie annuelle	+				+							
	Pluie saisonnière	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté				
		+	=	=	=	+	=	=	=				

Illustration 14 : Synthèse des résultats des test de Mann-Kendall réalisés sur les précipitations annuelles et saisonnières sur la période 1979-2004.

Températures - approche descriptive

Les températures annuelles minimales (cependant pas disponibles à toutes les stations), moyennes et maximales enregistrées par les différentes stations traduisent leurs positions géographiques, avec des températures plus douces en bordure littorale que dans le massif des Cévennes (Illustration 15 et Illustration 16). On constate une relativement faible variabilité interannuelle des températures moyennes, alors que celle des températures minimales et maximales est plus marquée. Leur comportement est relativement stable à l'analyse visuelle pour les stations du Mont Aigoual et de Prades et en légère hausse pour les trois restantes. Cette hausse peut s'observer pour les trois paramètres (min, moy et max) comme dans le cas de Montpellier, mais ce n'est pas systématique (exemple de la station de Gignac qui affiche des températures minimales stables, alors que les deux autres semblent en hausse).

L'analyse de l'amplitude annuelle de la température (différence entre les températures maximales et minimales annuelles - Illustration 17), pour les stations qui enregistrent les trois paramètres, souligne l'importance de la position géographique des stations. Ainsi, des valeurs

d’amplitude nettement plus élevées sont observées en montagne (autour de 40° pour le Mont Aigoual) qu’en position littorale (autour de 18° pour Montpellier). De plus, les amplitudes de température annuelle enregistrées affichent une variabilité interannuelle modérée et un comportement relativement stable dans le temps.

L’analyse visuelle des courbes de température saisonnière (Illustration 18 à Illustration 25) révèle que la station du Mont Aigoual présente un comportement différent de celui des autres stations, avec des températures moyennes très proches des maximales en toute saison. Ceci indique une relative stabilité en termes de température, avec l’occurrence d’épisodes très froids. Les autres stations présentent des comportements plus équilibrés avec répartition d’événements froids et chauds relativement équilibrée. Les évolutions automnales, printanières et surtout estivales de certaines stations (Mont Aigoual, Saint Martin et Montpellier) semblent montrer un réchauffement au cours des 30 dernières années, alors que les stations restantes présentent un comportement qui semble plus stable. Ce réchauffement semble de plus affecter plus particulièrement les températures minimales, même si l’analyse de l’écart entre les valeurs minimales et maximales des températures estivales ne le traduit pas de manière franche et ce, même en été (Illustration 26). Ainsi, comme pour les précipitations, la significativité des évolutions décrites doit être vérifiée, ce qui a été fait par application des tests de Mann-Kendall.

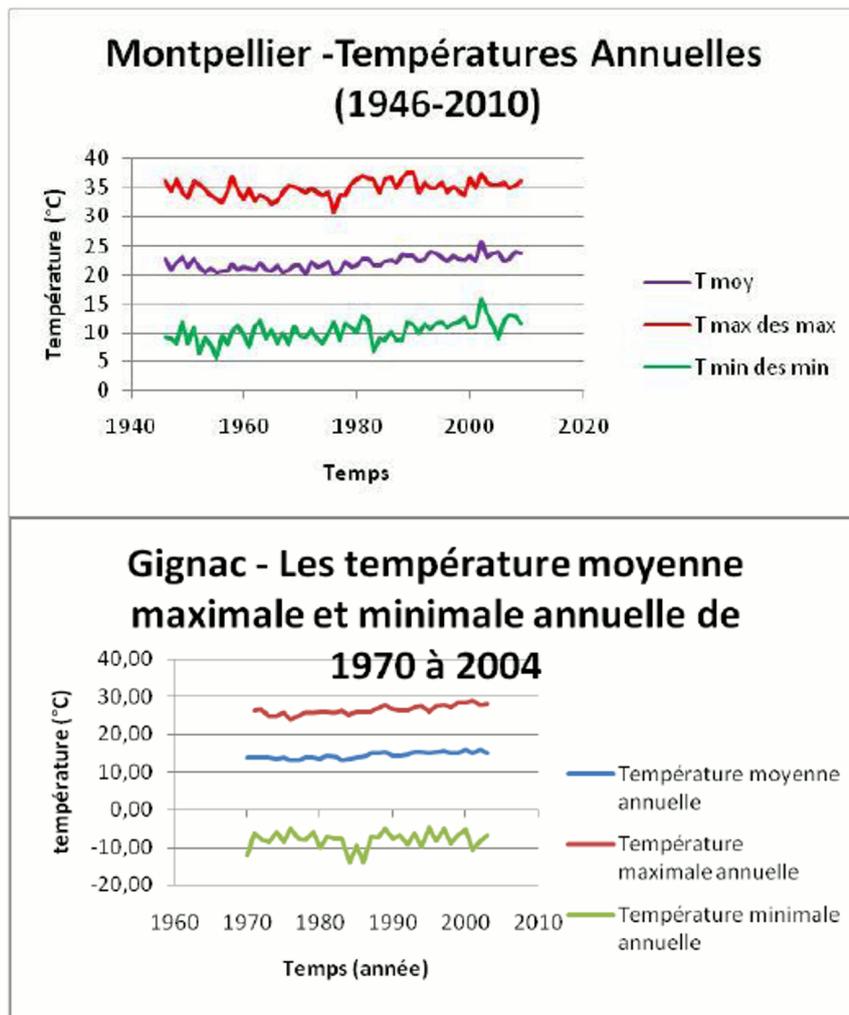


Illustration 15 : Températures annuelles minimales, moyennes et maximales pour les stations de Montpellier et de Gignac.

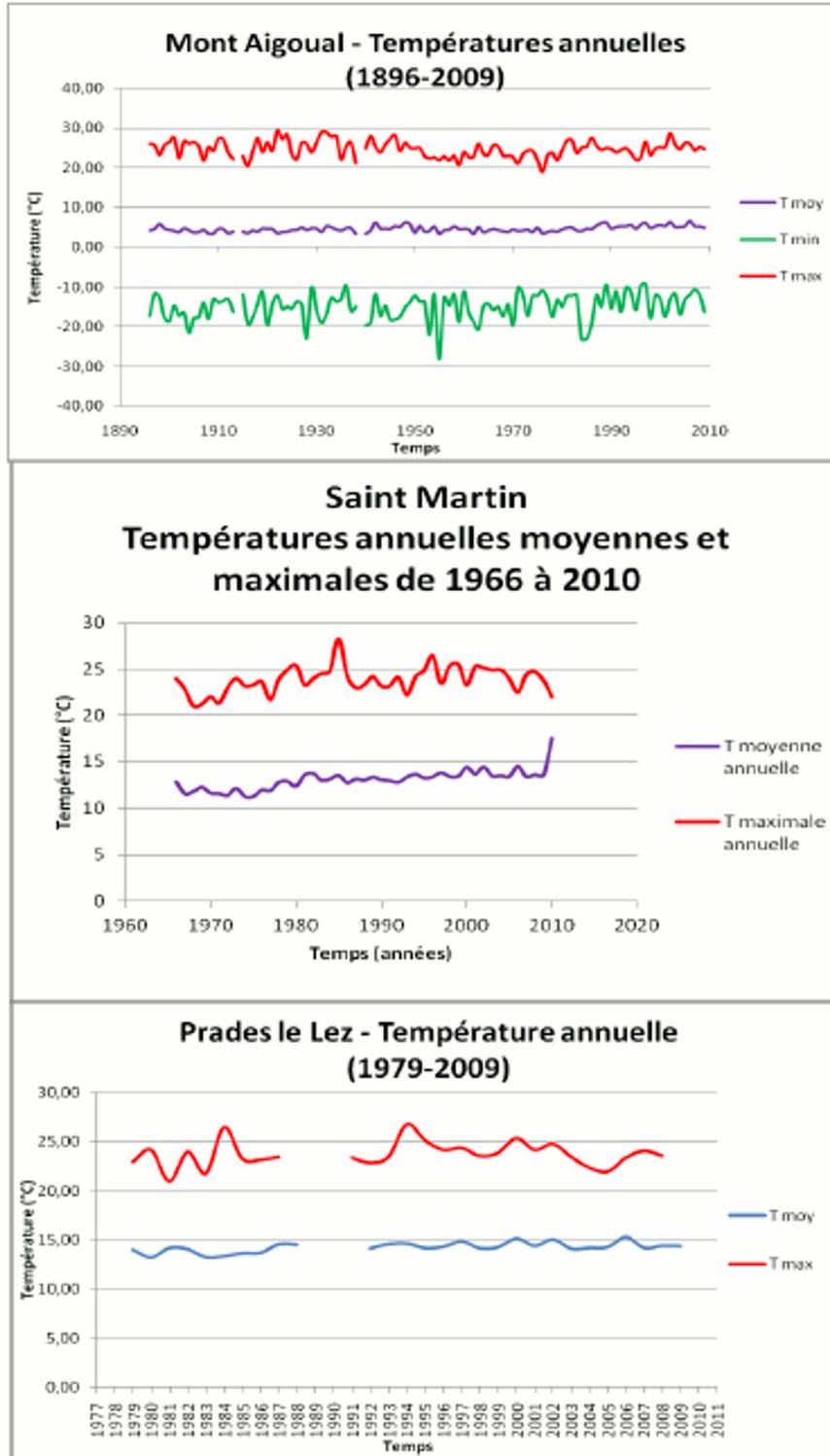


Illustration 16 : Températures annuelles minimales, moyennes et maximales aux stations du Mont Aigoual, St Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.

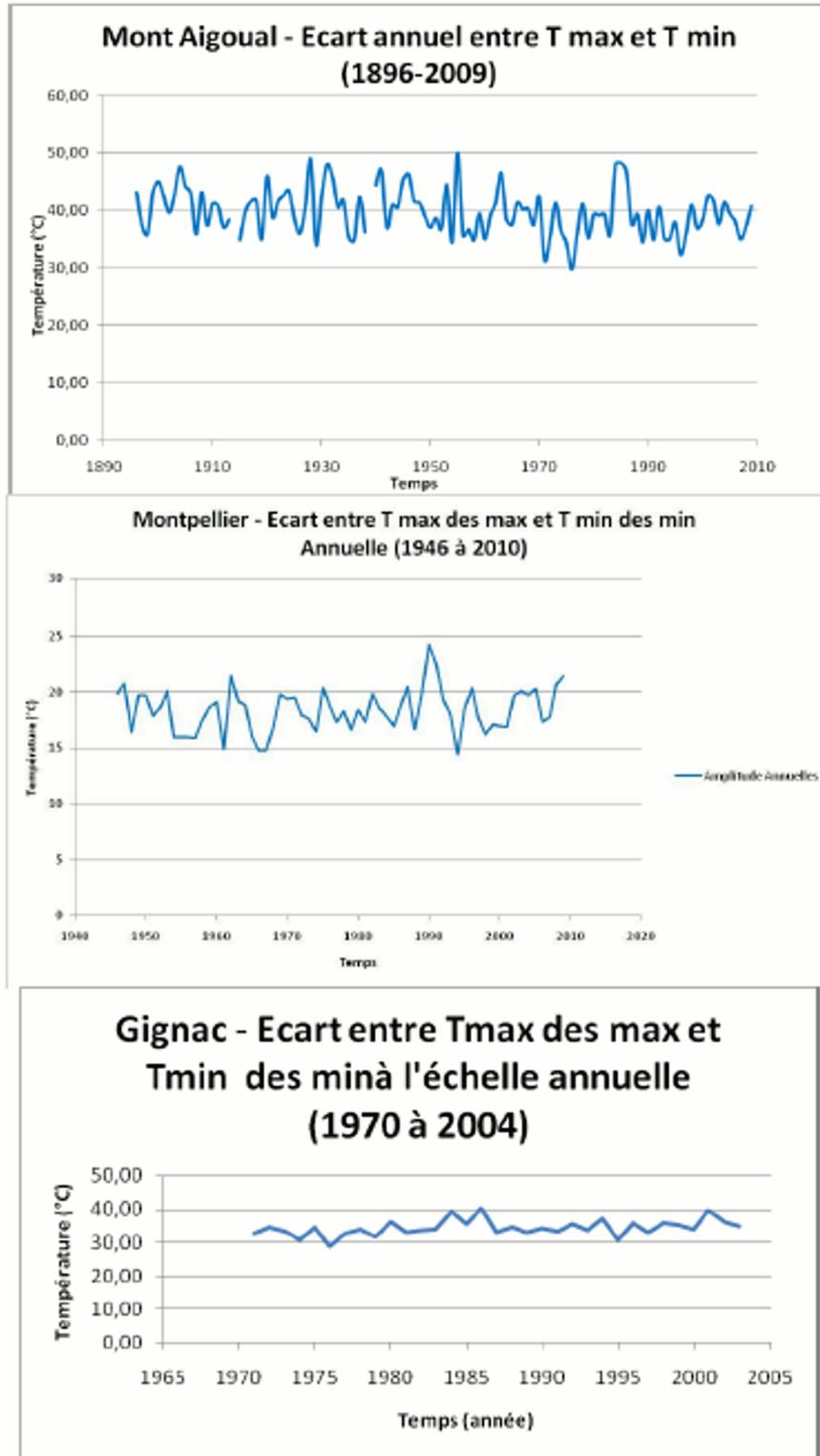


Illustration 17 : Amplitude annuelle de la température (T_{\max} annuel – T_{\min} annuel) pour les stations du Mont Aigoual, de Gignac et de Montpellier.

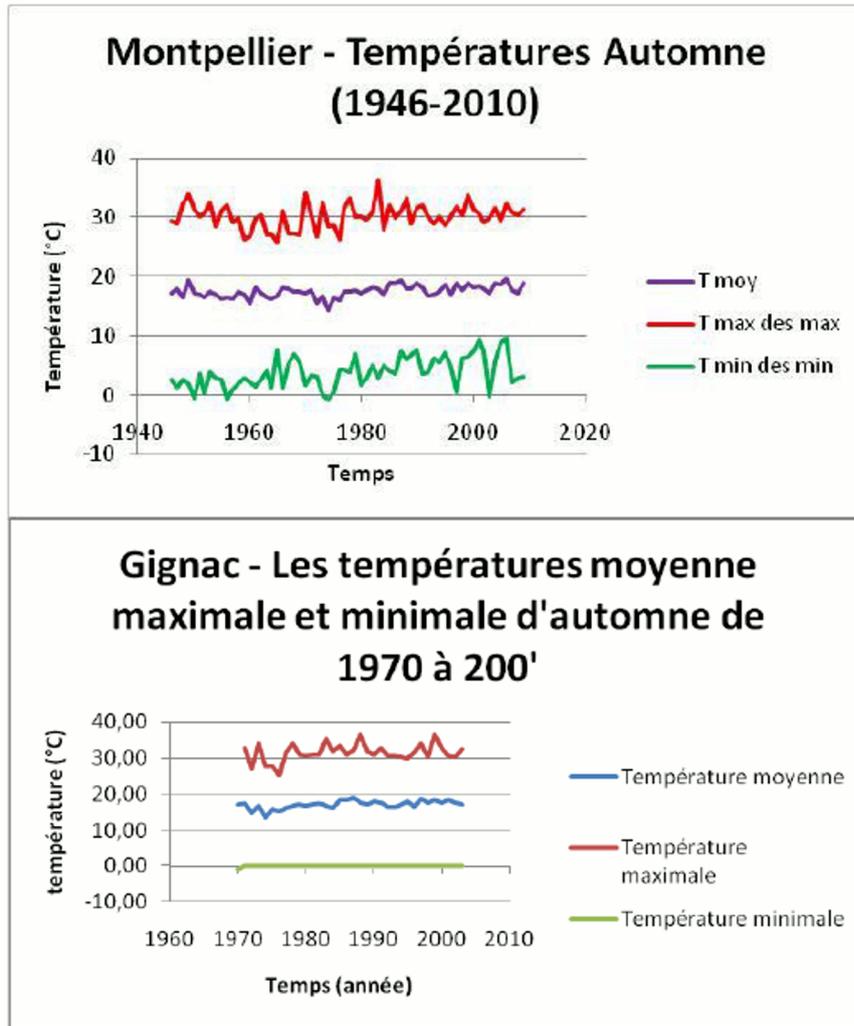


Illustration 18 :Températures automnales (sept - oct) aux stations de Montpellier et de Gignac.

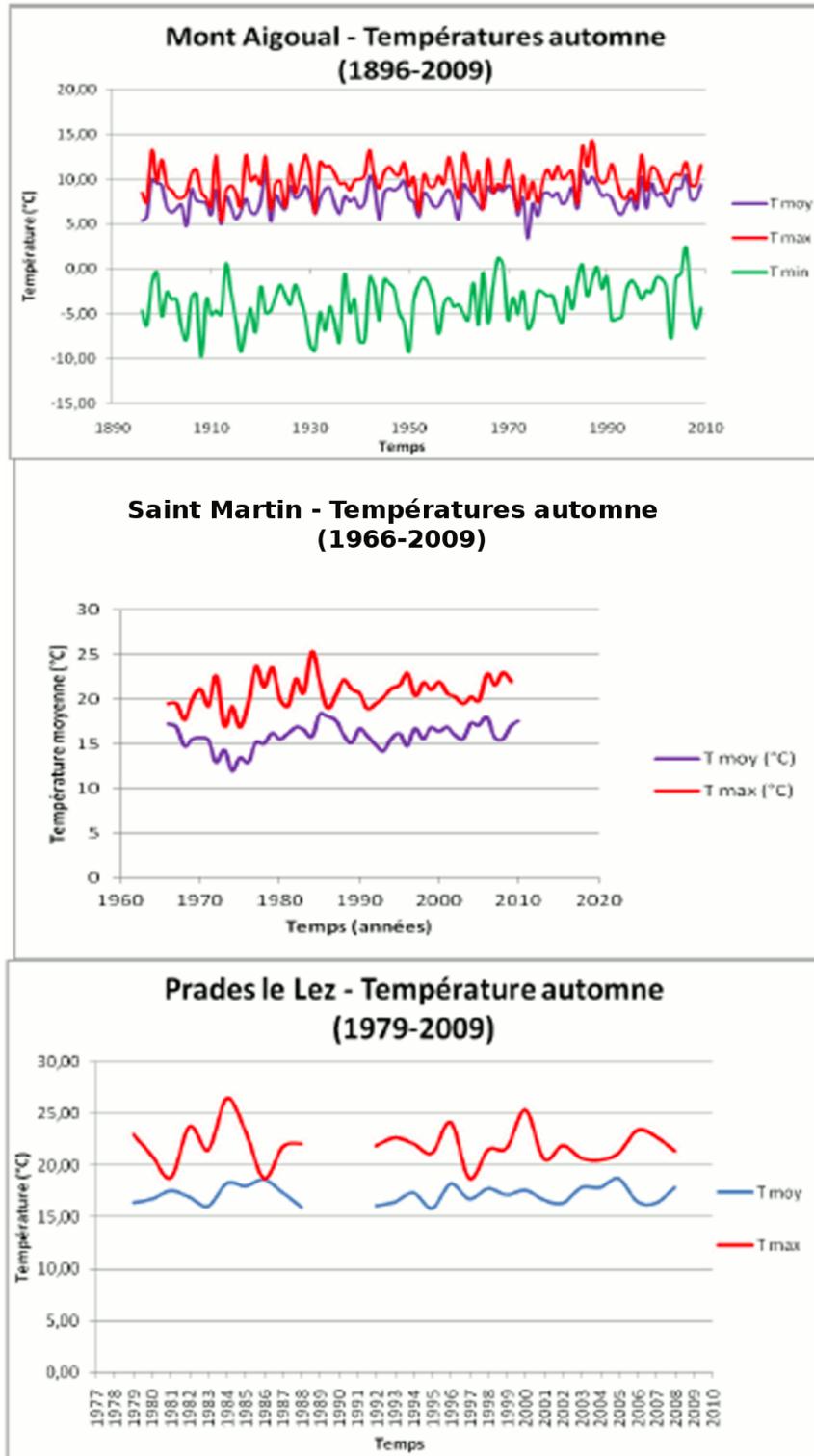


Illustration 19 :Températures automnales (sept - oct) aux stations du Mont Aigoual, St Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.

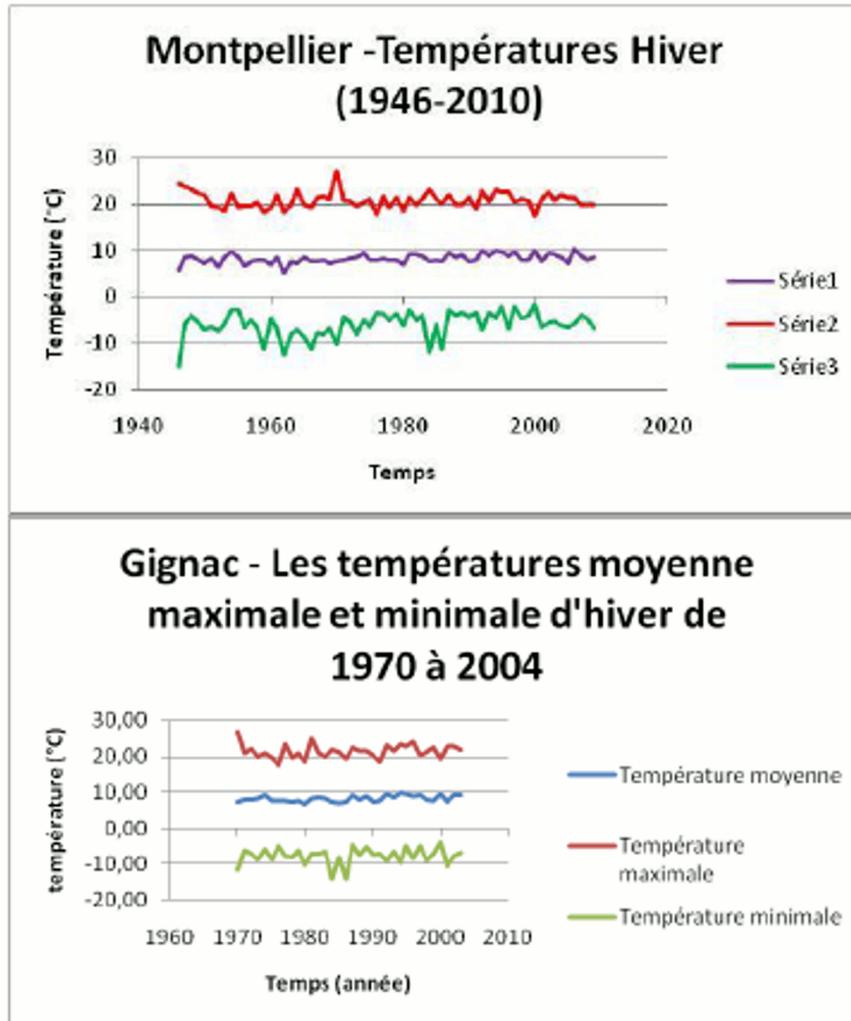


Illustration 20 : Températures hivernales (nov- jan) aux stations de Montpellier et de Gignac.

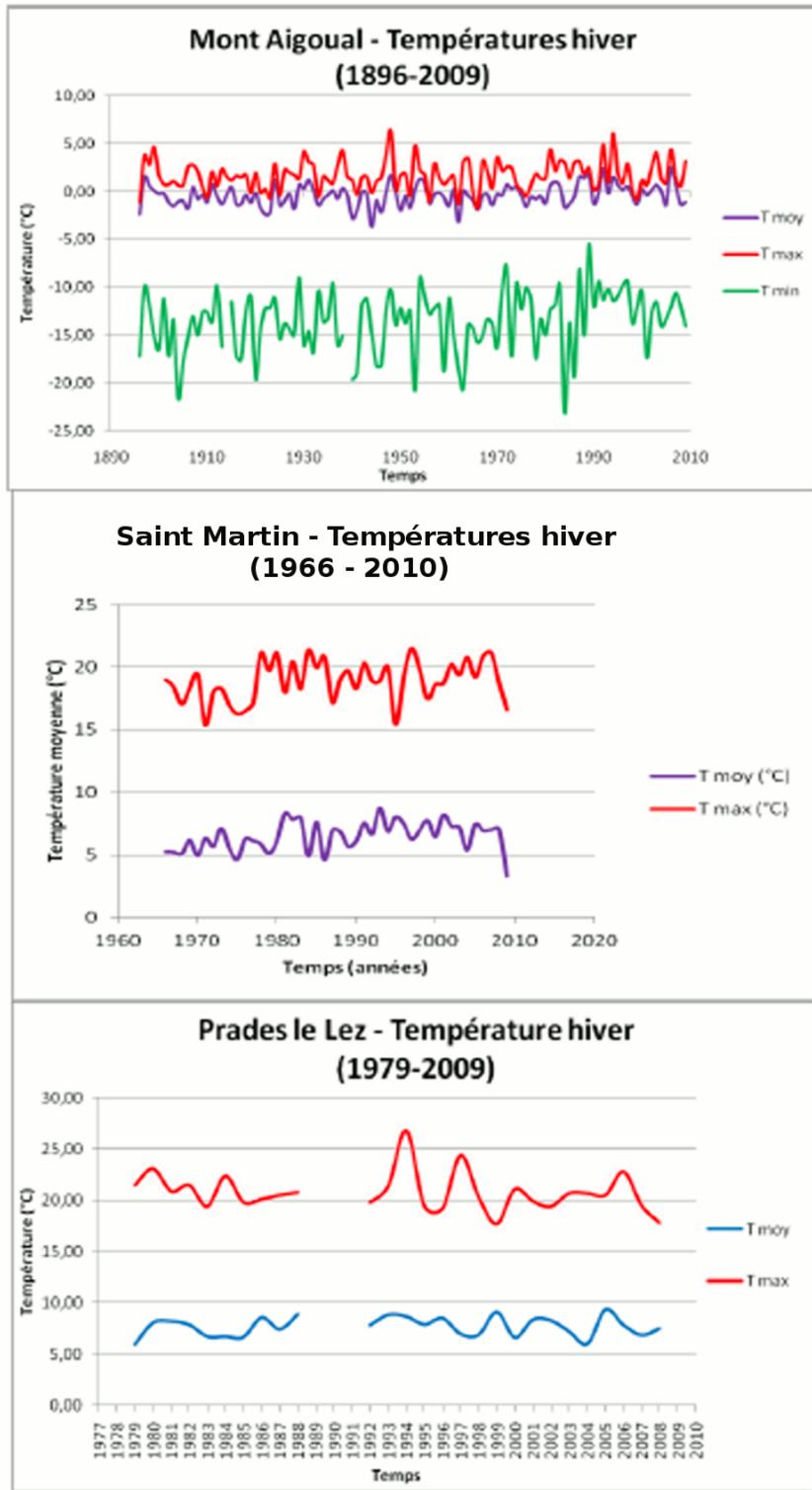


Illustration 21 : Températures hivernales (nov - jan) aux stations du Mont Aigoual, St Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.

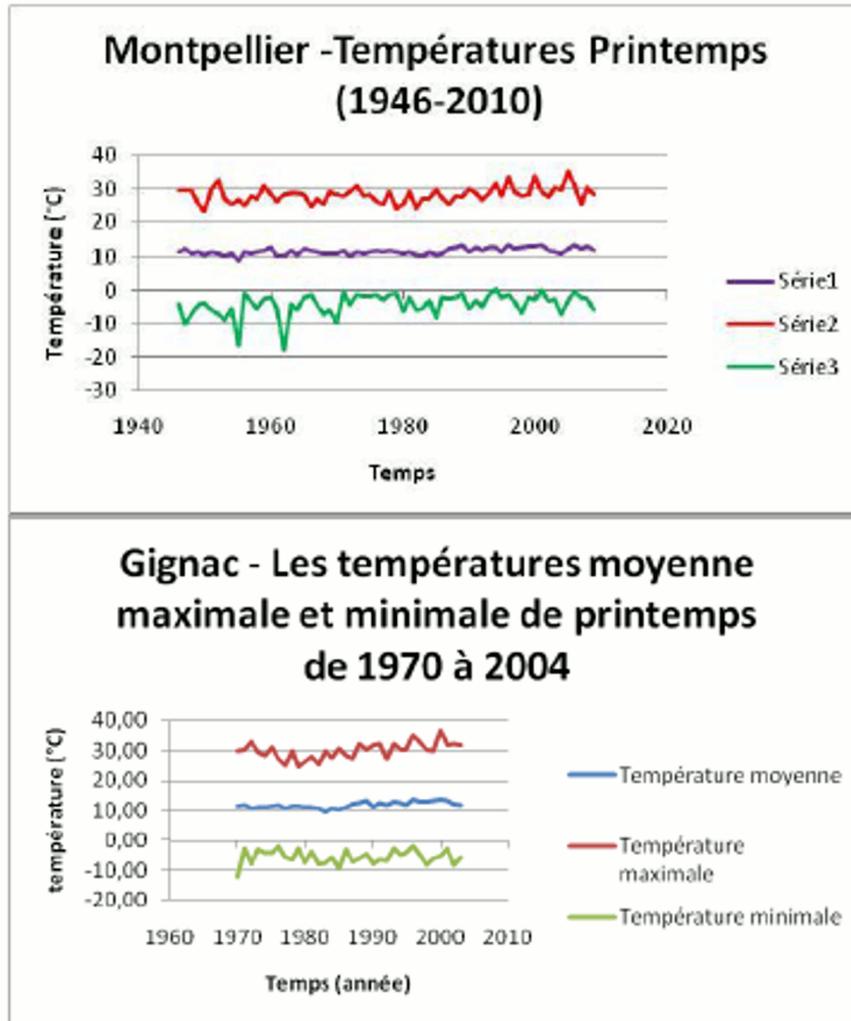


Illustration 22 :Températures printanières (fev -mai) aux stations de Montpellier et de Gignac.

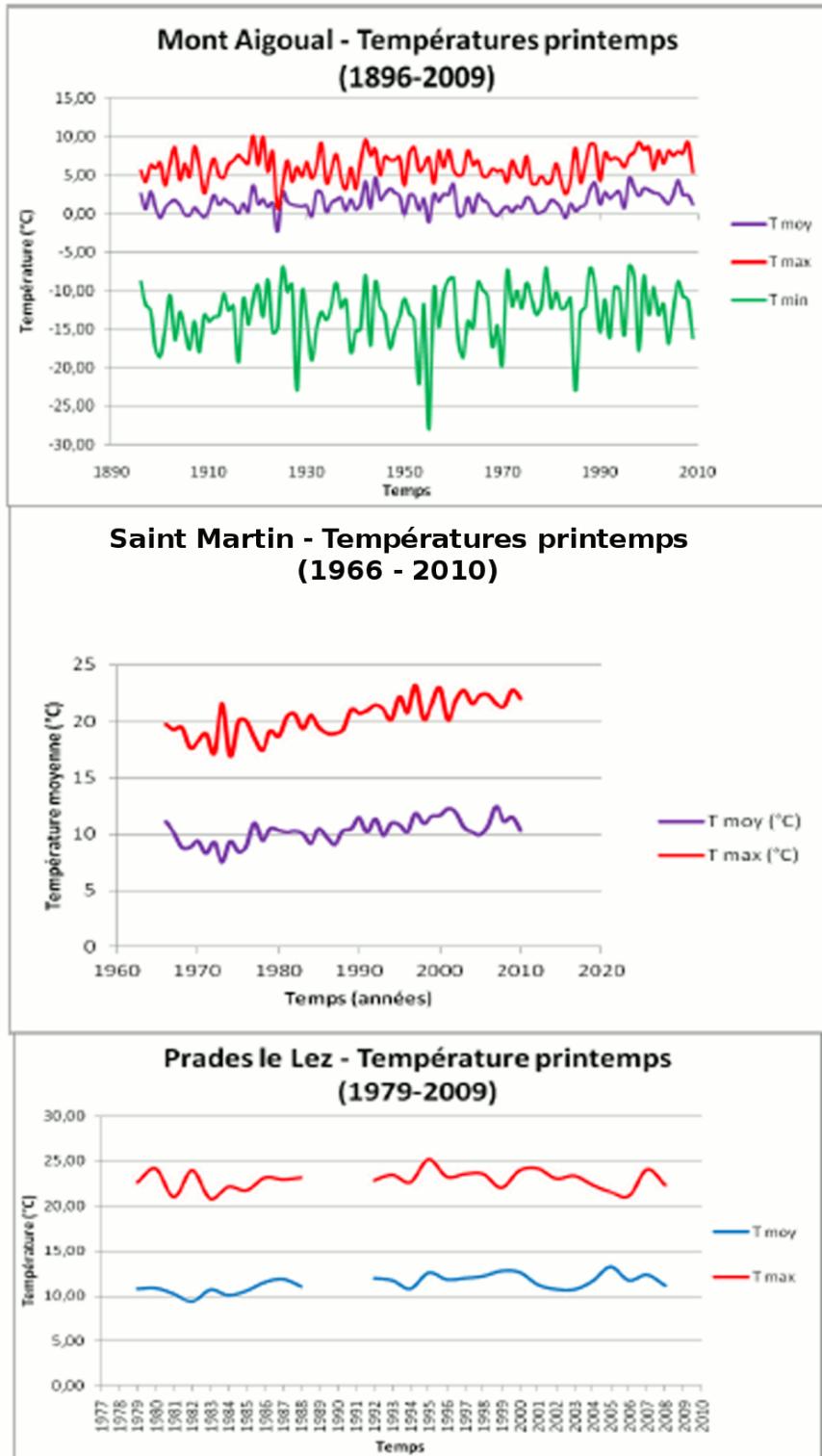


Illustration 23 : Températures printanières (fev - mai) aux stations du Mont Aigoual, St Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.

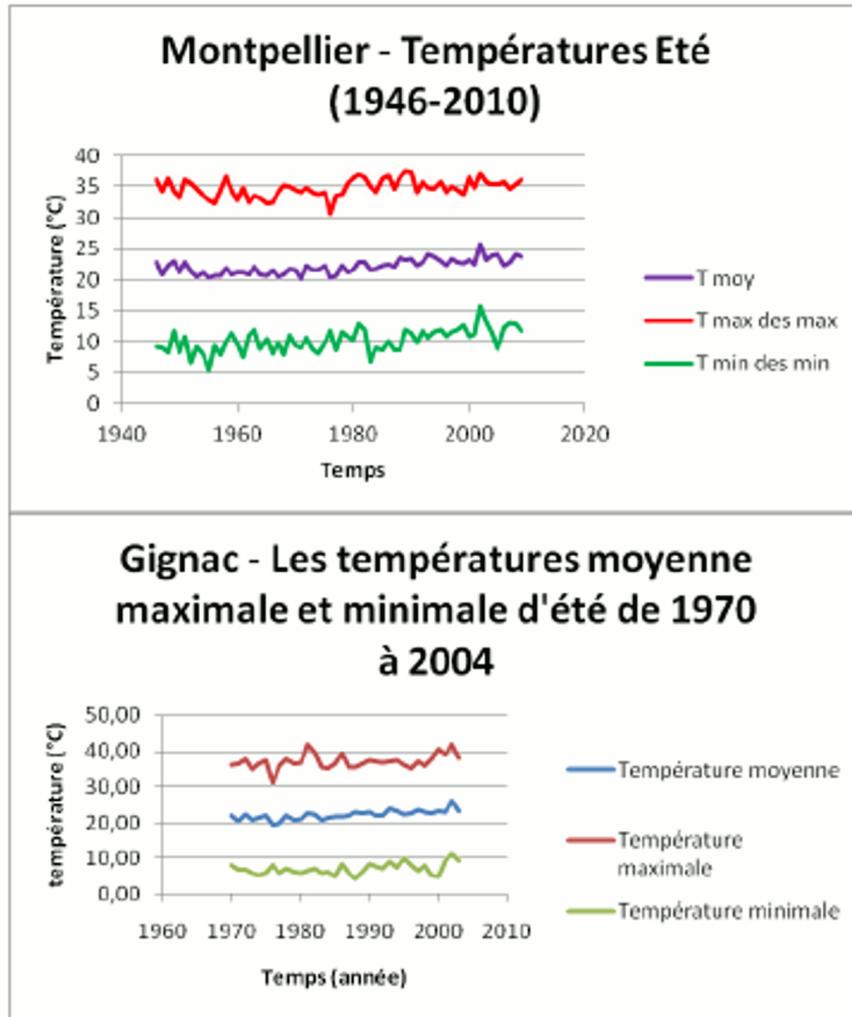


Illustration 24 : Températures estivales (juin - aout) aux stations de Montpellier et de Gignac.

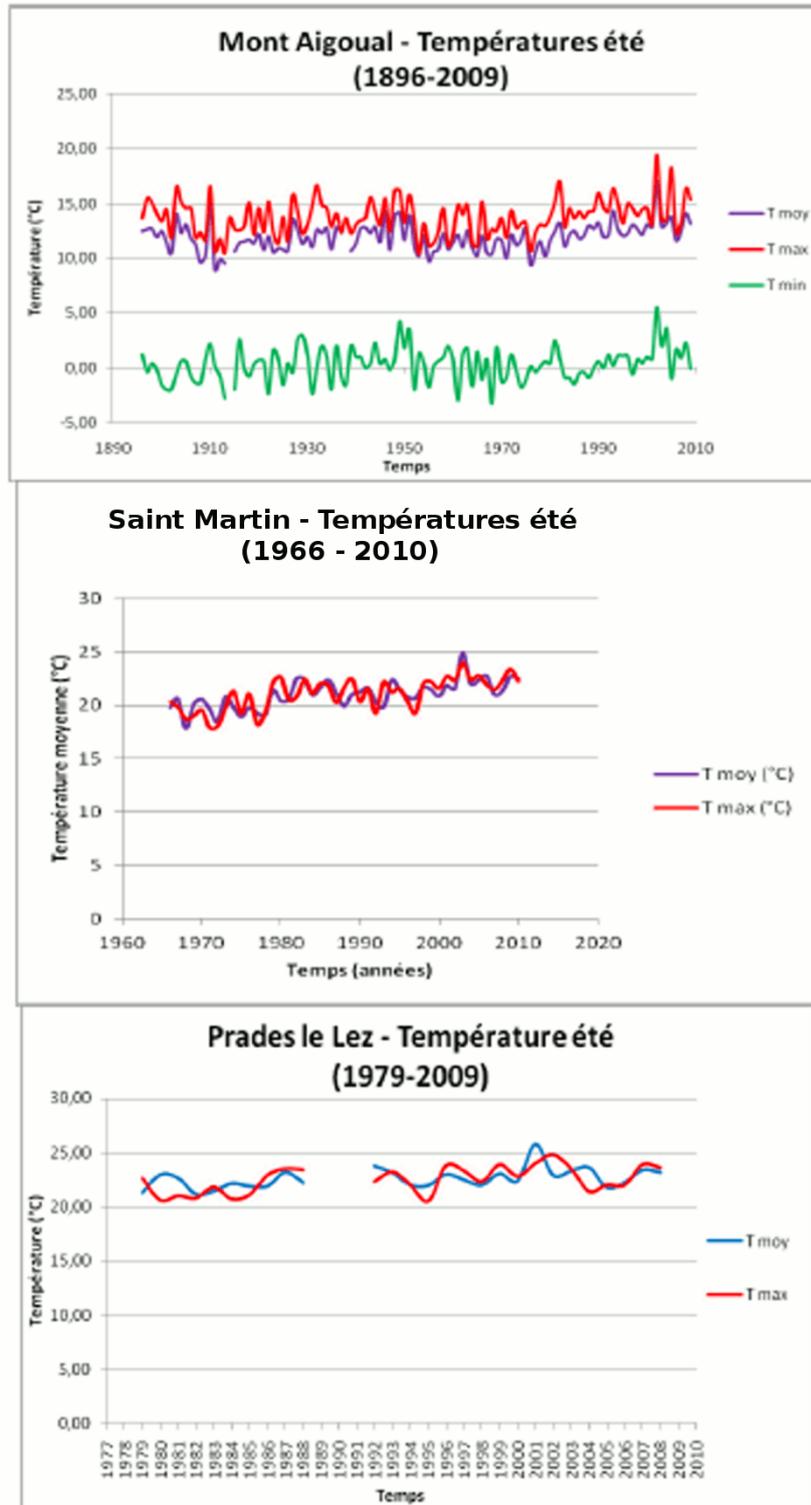


Illustration 25 : Températures estivales (juin - aout) aux stations du Mont Aigoual, St Martin-de-Londres et Prades-le-Lez.

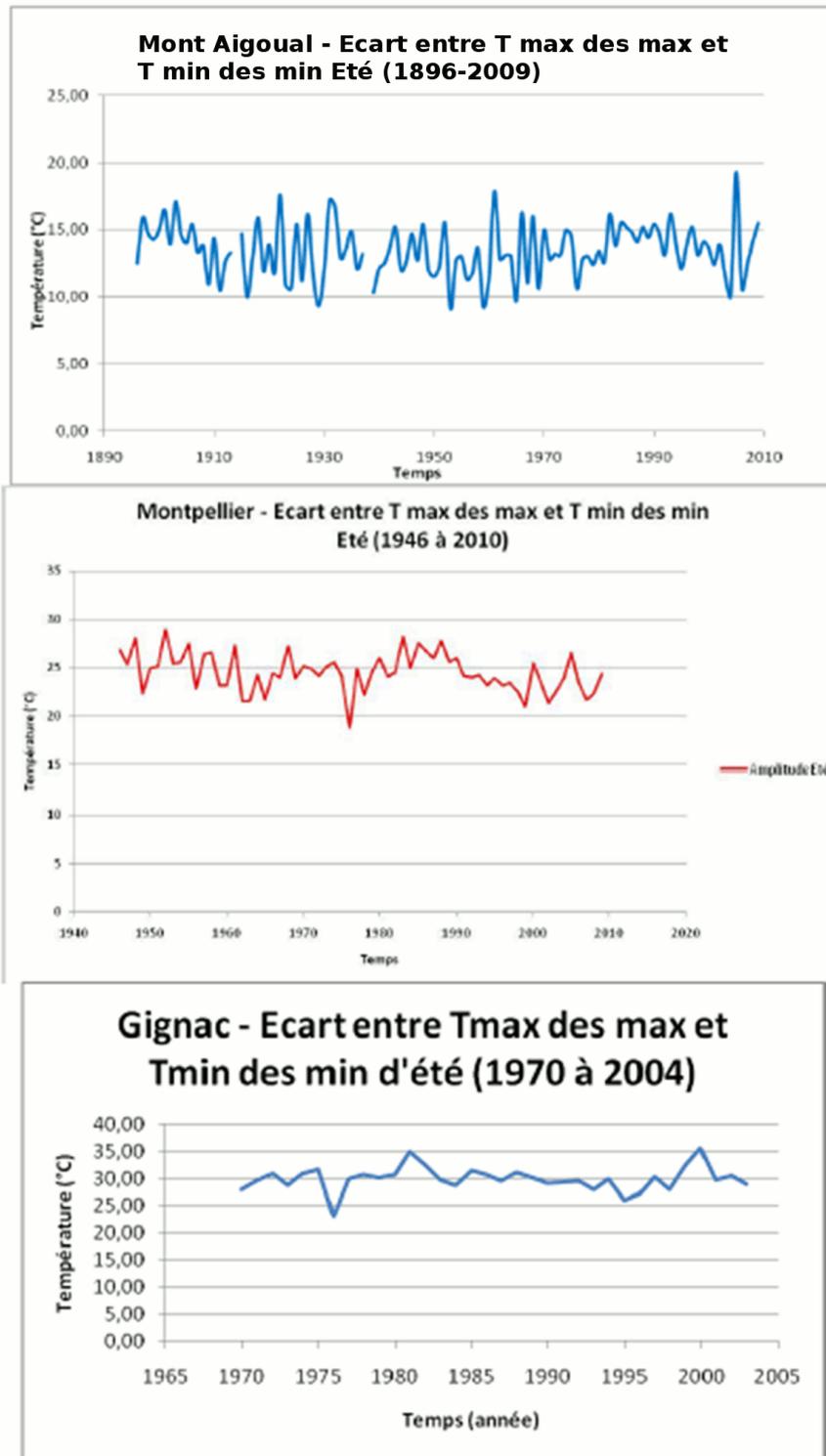


Illustration 26 : Ecart entre les valeurs maximales et minimales des températures en période estivale.

Températures - non-stationnarité

Comme pour la pluviométrie, les tests de Mann-Kendall ont été appliqués aux séries de températures minimales, moyennes et maximales annuelles et saisonnières, sur une période de

longueur commune à toutes les chroniques (du début de la chronique de Prades-le-Lez en 1979 à la fin de la chronique du poste de Gignac en 2004).

Les résultats (Illustration 27) indiquent une tendance significative à la hausse des températures moyennes annuelles sur toutes les stations, essentiellement reliée à une hausse des températures printanières et estivales. La hausse observée n'apparaît par contre pas systématiquement sur les séries de températures maximales et minimales. Ainsi, une tendance à la hausse des températures maximales est obtenue pour les stations de Prades-le-Lez, Montpellier et Gignac, alors que pour les températures minimales, seule la station de Montpellier affiche une tendance à la hausse (nous ne disposons pas de donnée pour ce paramètre pour les stations de St-Martin-de-Londres et Prades). Enfin, comme pour les températures moyennes, la hausse des températures maximales ou minimales observée semble essentiellement avoir lieu au printemps et, dans une moindre mesure, en été.

		Mont Aigoual				Saint-Martin				Prades-le-Lez				Montpellier				Gignac							
T°C annuelle	Température annuelle moyenne	+				+				+				+				+							
	Température annuelle maximale	=				=				+				+				+							
	Température annuelle minimale	=												+				=							
T°C saisonnière	Température saisonnière moyenne	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté
		=	=	+	+	=	=	+	=	=	=	+	+	=	=	+	+	=	=	+	+	=	+	+	+
	Température saisonnière maximale	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté
		=	=	+	=	=	=	+	=	=	=	+	+	=	=	+	=	=	=	+	=	=	=	+	=
	Température saisonnière minimale	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté	Aut	Hiv	Prin	Eté
		=	=	=	+													+	=	+	+	=	=	=	+

Illustration 27 : Synthèse des résultats des tests de Mann-Kendall réalisés sur les températures minimales, moyennes et maximales, annuelles et saisonnières, sur la période 1979-2004.

2.3. SCENARIOS CLIMATIQUES FUTURS

2.3.1. Construction de scénarios climatiques

La construction de scénarios climatiques à des fins d'analyse à l'échelle régionale, comme par exemple l'étude d'impact du changement climatique sur la ressource en eau d'un bassin versant ou d'un aquifère, nécessite de faire appel à des résultats de modèles de simulation du climat. Ces modèles ne permettent pas à l'heure actuelle de fournir ces résultats à des échelles spatiale et temporelle suffisamment fines pour traduire le comportement d'un système hydrologique tel que celui du Lez (Illustration 28). De plus, certains processus météorologiques (comme par exemple les épisodes d'orages cévenols) se déroulent à trop fine échelle pour être résolus par les modèles de climat.

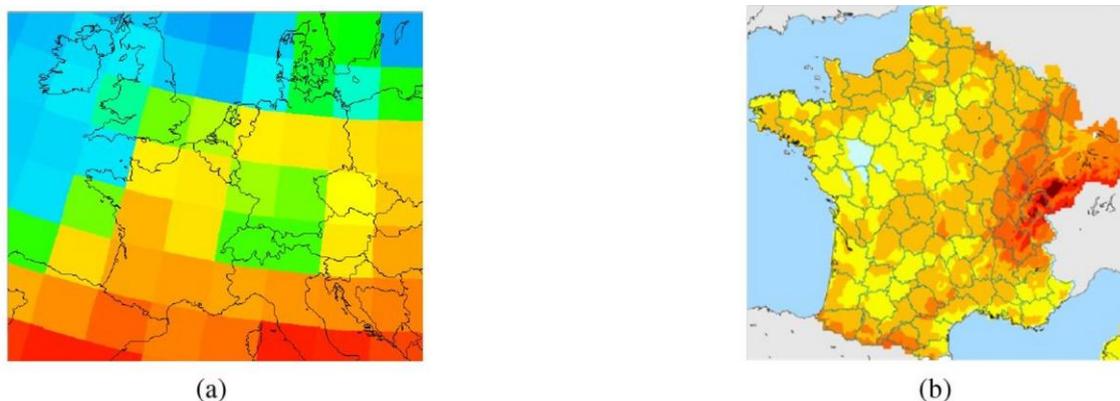


Illustration 28 : Exemple de données de précipitations (mm/jour) couvrant la France. La figure (a) montre les données à la résolution typique d'un modèle global du climat (modèle IPSL CM4 IPCC-AR4 2.5°x 3.75°), tandis que la figure (b) montre les données désagrégées statistiquement à une résolution de 8 km. (Pagé et Terray, 2011)

Pour ces raisons, de nombreuses techniques dites de désagrégation, soit dynamique (modélisation des processus) et/ou statistique (recherche d'une fonction de transfert entre les variables de grande échelle et les variables locales), ont été développées pour effectuer le changement ou la descente d'échelle (downscaling en anglais) nécessaire pour alimenter les modèles d'impact.

Parmi ces techniques, le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS), situé à Toulouse, a développé une méthode de désagrégation basée sur l'utilisation du concept de « type de temps ». Ce concept a été initialement développé par Julien Boé dans le cadre de sa thèse (Boé et al., 2007), puis implémenté dans le logiciel DSCLIM (Pagé et al. 2009), pour répondre à la demande croissante de scénarios à l'échelle du territoire.

Des scénarios climatiques ont ainsi été produits par le CERFACS en 2008 (SCRATCH08) puis en 2010 (SCRATCH2010) sur une grille de 8x8 km (grille SAFRAN, Quintana-Segui et al. 2010) couvrant l'ensemble du territoire français. Les scénarios SCRATCH2010 ont été réalisés en intégrant des améliorations de la méthodologie initiale de Boé (2007) et surtout les résultats du projet ANR-SCAMPEI (<http://www.cnrn.meteo.fr/scampe/>), axé sur l'étude de l'impact des changements climatiques sur les régions de montagnes (Pagé et Terray, 2011).

2.3.2. Les scénarios climatiques retenus

Les simulations désagrégées de 9 modèles de climat ont été choisies parmi l'ensemble des simulations disponibles dans le cadre de SCRATCH 2010.

Il s'agit des modèles :

- ARPEGE V4.6 (CNRM – Météo France) ;
- CCCMA CGCM3.1 T63 (CCCMA - Canada) ;
- CNRM-CM3 (CNRM – Météo France) ;
- GFDL-CM2.0 (NOAA GFDL – Etats Unis) ;
- GISS-AOM (NASA GISS – Etats Unis) ;
- IPSL CM4 (IPSL – France) ;
- MPI-ECHAM5 (MPI – Allemagne) ;
- MRI CGCM 2.3.2a (MRI - Japon) ;
- NCAR CCSM3.0 (NCAR – Etats Unis).

Tous ces modèles ont été forcés avec le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B. Ce scénario constitue une hypothèse médiane parmi la fourchette des scénarios d'émission (Illustration 29) proposée par le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat – www.ipcc.ch) dans le cadre de son rapport spécial SRES sur cette question (Nakicenovic et Swart, 2000).

Ces scénarios d'émission résultent de simulations faites en fonction d'hypothèses sur l'évolution future en termes de démographie, activité économique, évolution technologique, énergie, usage du sol et agriculture principalement.

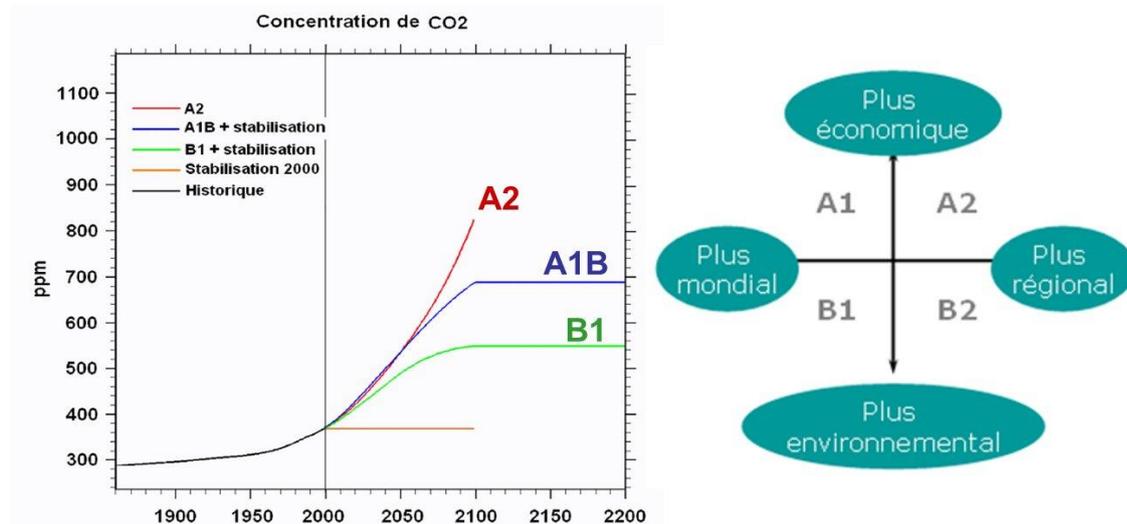


Illustration 29 : Présentation schématique des scénarios d'émission de gaz à effet de serre (tiré de Nakicenovic et Swart, 2000).

Les scénarios choisis couvrent deux périodes temporelles : l'une pour le présent (1971-2000) et l'autre pour le futur (2045-65), dont la durée minimale de 20 ans permet de considérer que la variabilité naturelle du climat est prise en compte dans les scénarios. L'utilisation de deux

périodes simulées (présent et futur) est nécessaire pour ne pas introduire dans l'analyse de l'impact des scénarios sur la ressource en eau, le biais entre les simulations des modèles de climat et le climat réellement observé. Ainsi, le ou les modèles conçus pour simuler le comportement de la ressource en eau sur la zone d'étude seront forcés à l'aide des scénarios climatiques pour la période présente et pour la période future. L'impact du changement climatique sera alors évalué de manière relative entre le présent et le futur, à partir des résultats des simulations des modèles hydrologiques.

Les variables climatiques utilisées sont la température et les précipitations totales (pluie et neige, bien que cette dernière soit probablement négligeable sur la zone d'étude), au pas de temps journalier.

2.3.3. Résultats en termes d'évolution des températures et des précipitations

L'ensemble du bassin d'alimentation (ou bassin hydrogéologique) de l'aquifère du Lez recoupe quinze mailles de la grille SAFRAN (Illustration 30). Les résultats obtenus pour les deux variables climatiques température et précipitation sont présentés en termes d'évolution relative des valeurs futures par rapport aux valeurs présentes (anomalies) mensuelles, saisonnières et annuelles. L'écart observé par rapport à l'actuel définit respectivement l'anomalie mensuelle, saisonnière et annuelle.

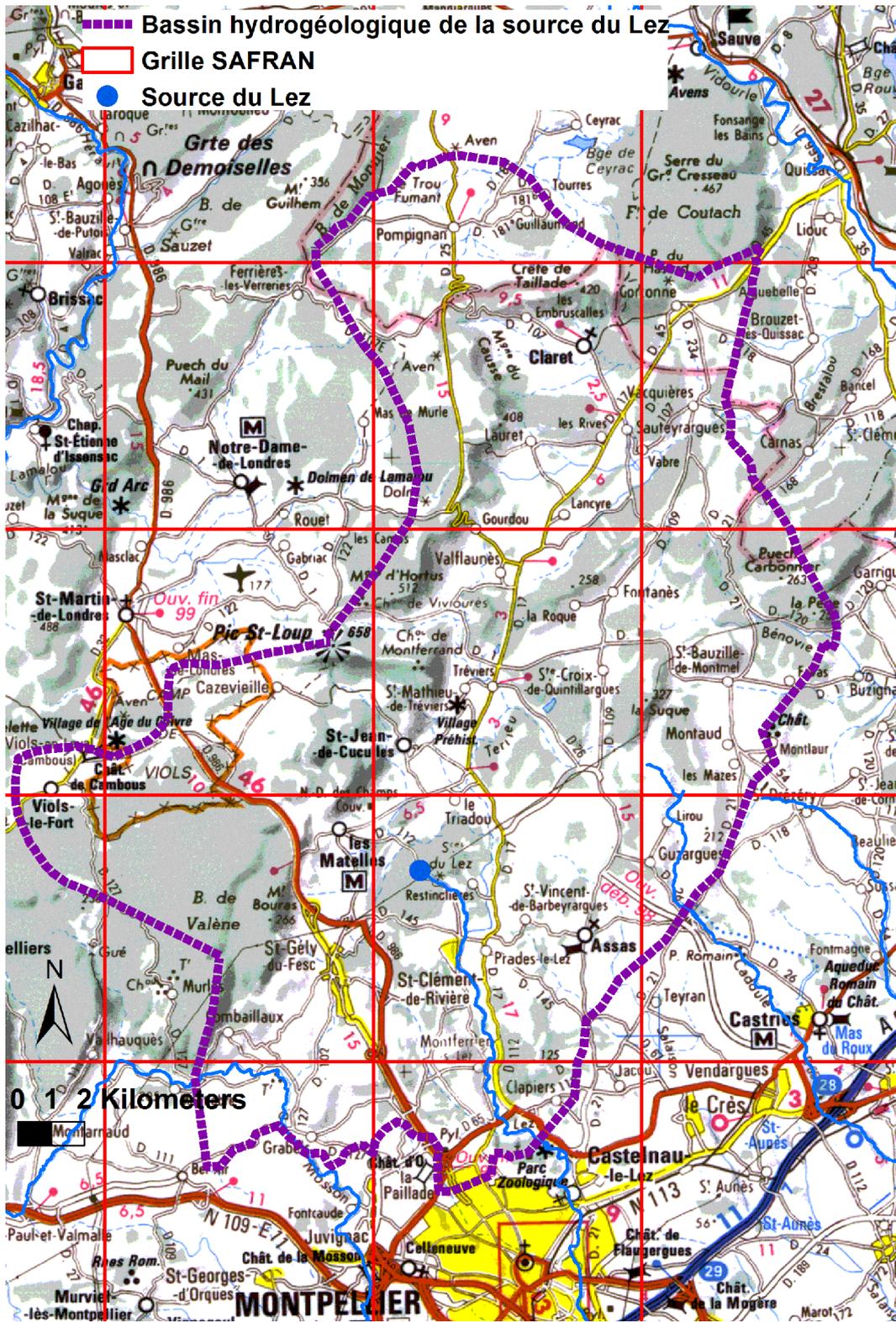


Illustration 30 : Couverture de la grille SAFRAN sur la zone d'étude

2.3.4. Anomalies moyennes mensuelles

La différence relative entre le présent et le futur (anomalie) sur l'ensemble de la zone d'étude, des températures moyennes mensuelles est présentée sur l'illustration 31 et celle des cumuls mensuels de précipitations est présentée sur l'illustration 32.

Pour les températures, il apparaît que les modèles prévoient d'ici la période 2045-65, une augmentation de la température comprise entre +1,5°C et +2,3°C en moyenne multi-modèle, suivant la période de l'année. La courbe enveloppant les résultats de tous les scénarios permet de noter que suivant le scénario considéré (qui au stade actuel des connaissances en modélisation du climat sont tous équiprobables), cette augmentation pourrait fluctuer d'environ ±1°C.

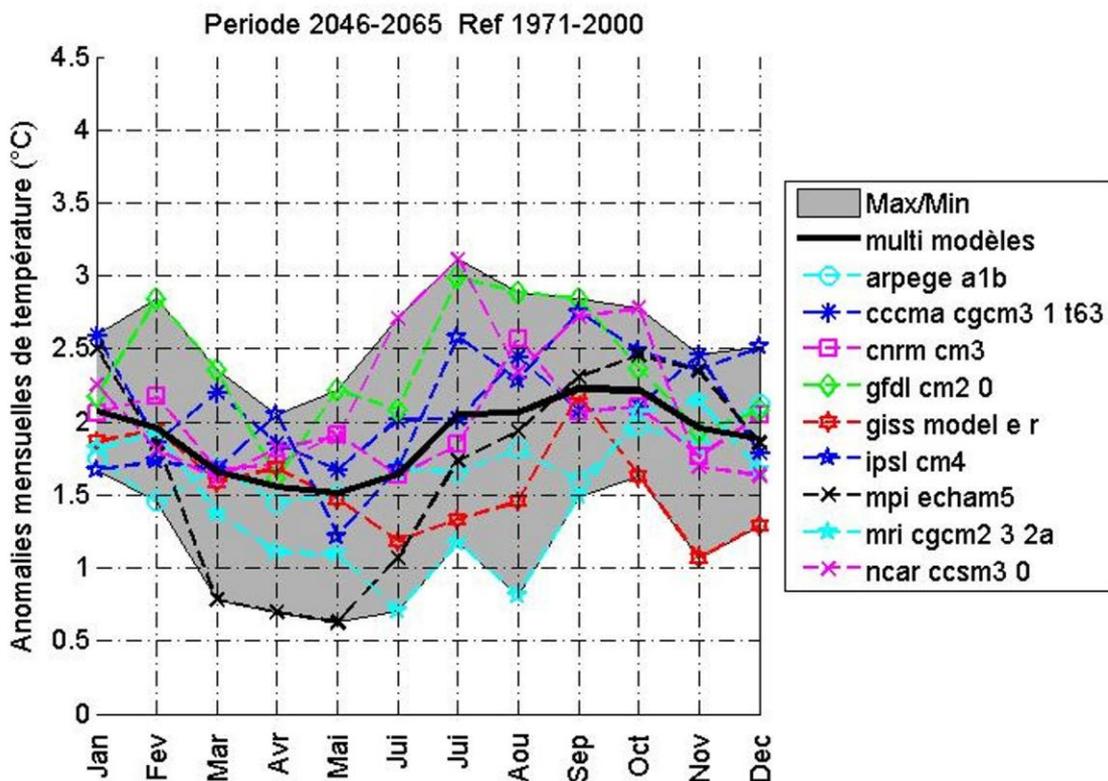


Illustration 31 : Anomalies moyennes mensuelles de température entre le présent et le futur pour chaque scénario climatique, en moyenne de tous les scénarios et en courbe enveloppant les valeurs minimales et maximales des anomalies pour chaque mois, tous scénarios confondus.

Pour ce qui concerne les précipitations, il apparaît en moyenne multi-modèles une légère diminution des précipitations mensuelles de l'ordre de -5 à -10%. Seul le mois de décembre présenterait des précipitations en augmentation de l'ordre de +10% par rapport au présent, en moyenne multi-modèle. La courbe enveloppant les scénarios indique cependant une très forte variabilité entre les scénarios (variations mensuelles de ±50% par rapport aux précipitations présentes) qui rend le signal à la baisse des précipitations, très incertain.

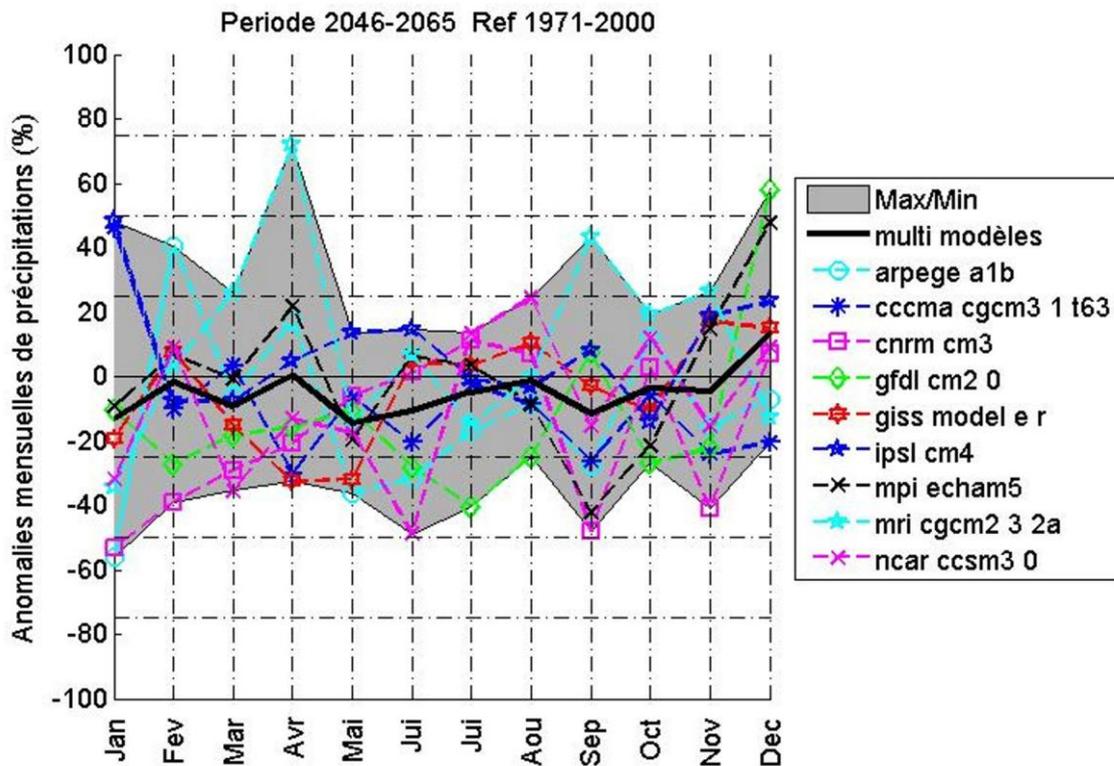


Illustration 32 : Anomalies moyennes mensuelles de précipitations entre le présent et le futur pour chaque scénario climatique, en moyenne de tous les scénarios et en courbe enveloppant les valeurs minimales et maximales des anomalies pour chaque mois, tous scénarios confondus.

2.3.5. Anomalies moyennes saisonnières

L'illustration 33 présente ces mêmes résultats ramenés à l'échelle saisonnière. Les augmentations de température apparaissent à la fois plus marquées (augmentation de la température supérieure ou égale à +2°C) et affectées d'une variabilité plus réduite (dispersion entre les scénarios de l'ordre de 1°C) pour l'automne et l'hiver, que pour le printemps et l'été. C'est cependant pour cette dernière que les scénarios peuvent présenter les valeurs les plus extrêmes (2 scénarios, NCAR CCSM3 et GFDL CM2, prévoient une augmentation supérieure à +2,5°C pour cette saison). En terme de précipitation, les modèles prévoient une baisse de l'ordre de -5% par rapport à la situation présente, pour toutes les saisons en dehors de l'hiver en moyenne multi-modèle. L'importante dispersion entre les scénarios signalée précédemment est globalement la même en toute saison, sauf en été où elle est un peu plus faible (et au printemps et automne, si l'on excepte le scénario MRI CGCM2.3.2), renforçant ainsi le signal à la baisse des précipitations prévu pour cette saison.

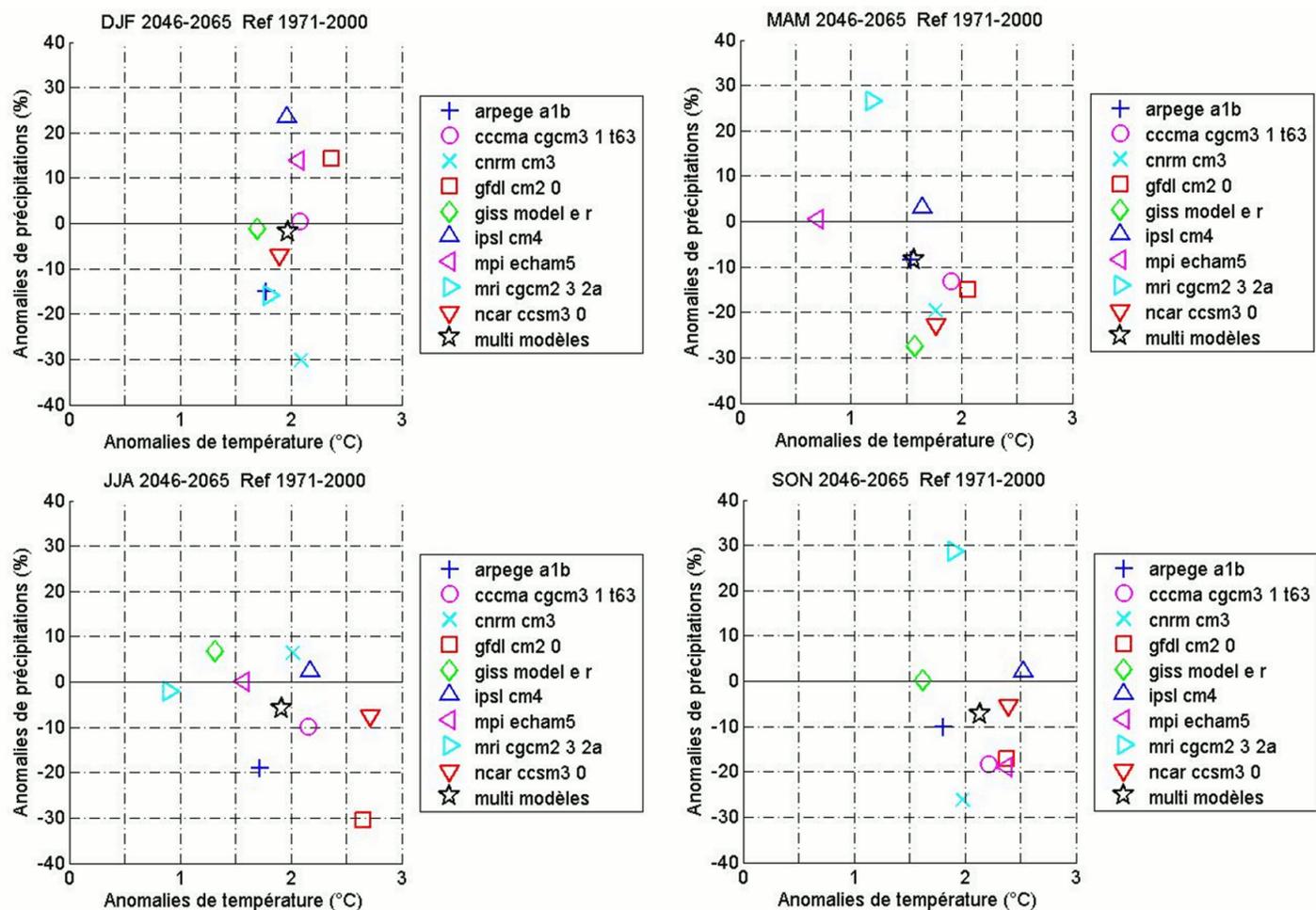


Illustration 33 : anomalies moyennes saisonnières de température et de précipitation entre le présent et le futur (de gauche à droite et haut en bas, DJF : décembre-janvier-février ; MAM : mars-avril-mai ; JJA : juin-juillet-août ; SON : septembre-octobre-novembre), pour chaque scénario et en moyenne multi-modèle.

2.3.6. Dispersion moyennes saisonnières et annuelles

Les résultats décrits précédemment peuvent être synthétisés par une représentation de type « boîte à moustache » (Illustration 34), où l'on retrouve les signaux saisonniers décrits précédemment (températures : automne et hiver globalement plus chauds et dispersion plus forte en été ; précipitations : tendance à la baisse en toutes saisons sauf en hiver, affectée d'une forte incertitude).

L'analyse des anomalies moyennes annuelles renforce cependant la représentativité des signaux saisonniers. Ainsi, au moins 6 scénarios sur les 9 utilisés prévoient une augmentation de la température moyenne annuelle supérieure à $+1.7^{\circ}\text{C}$ et une diminution de la précipitation moyenne annuelle pour la période 2045-65.

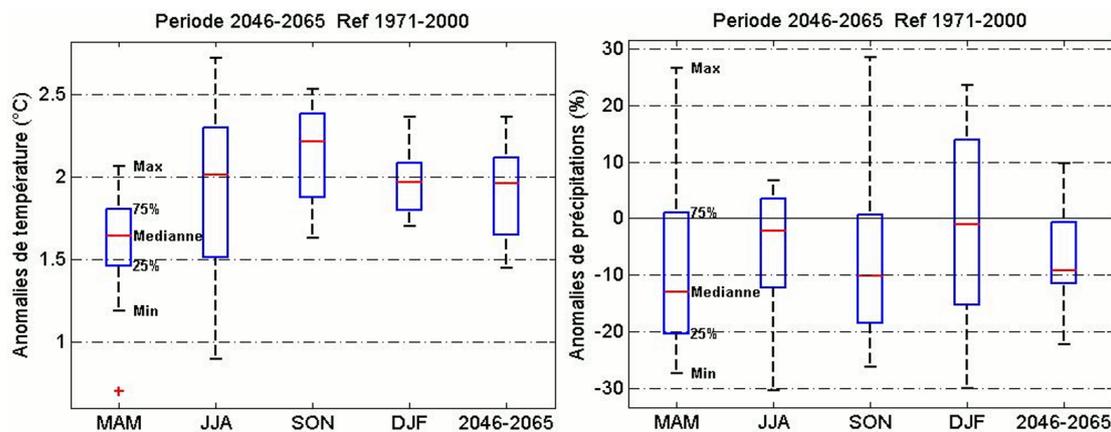


Illustration 34 : Dispersion des anomalies moyennes saisonnières et annuelles de température et de précipitation des 9 scénarios climatiques, représentée en diagramme « Box-Plot » (cette représentation doit cependant être interprétée avec prudence car elle est construite à partir de seulement 9 valeurs).

2.3.7. Dispersion spatiale des anomalies moyennes saisonnières

L'illustration 35 et l'illustration 36 permettent de visualiser la variabilité spatiale sur l'ensemble de la zone d'étude, des anomalies moyennes saisonnières pour, respectivement, les températures et les précipitations. Les températures apparaissent homogènes sur l'ensemble de la zone d'étude et ce, quelle que soit la saison, ce qui est tout à fait logique au regard de la taille du bassin étudié. Les précipitations présentent une certaine variabilité spatiale qui s'observe en toutes saisons en dehors du printemps. Cette variabilité s'exprime notamment par une diminution moindre (voire même une augmentation en hiver) des précipitations au niveau de l'extrême nord-est de la zone d'étude. Cette variabilité n'impactera cependant que peu la modélisation hydrologique car elle concerne des secteurs qui ne couvrent pas le bassin versant topographique du cours d'eau et participent de manière minoritaire à la recharge de l'aquifère.

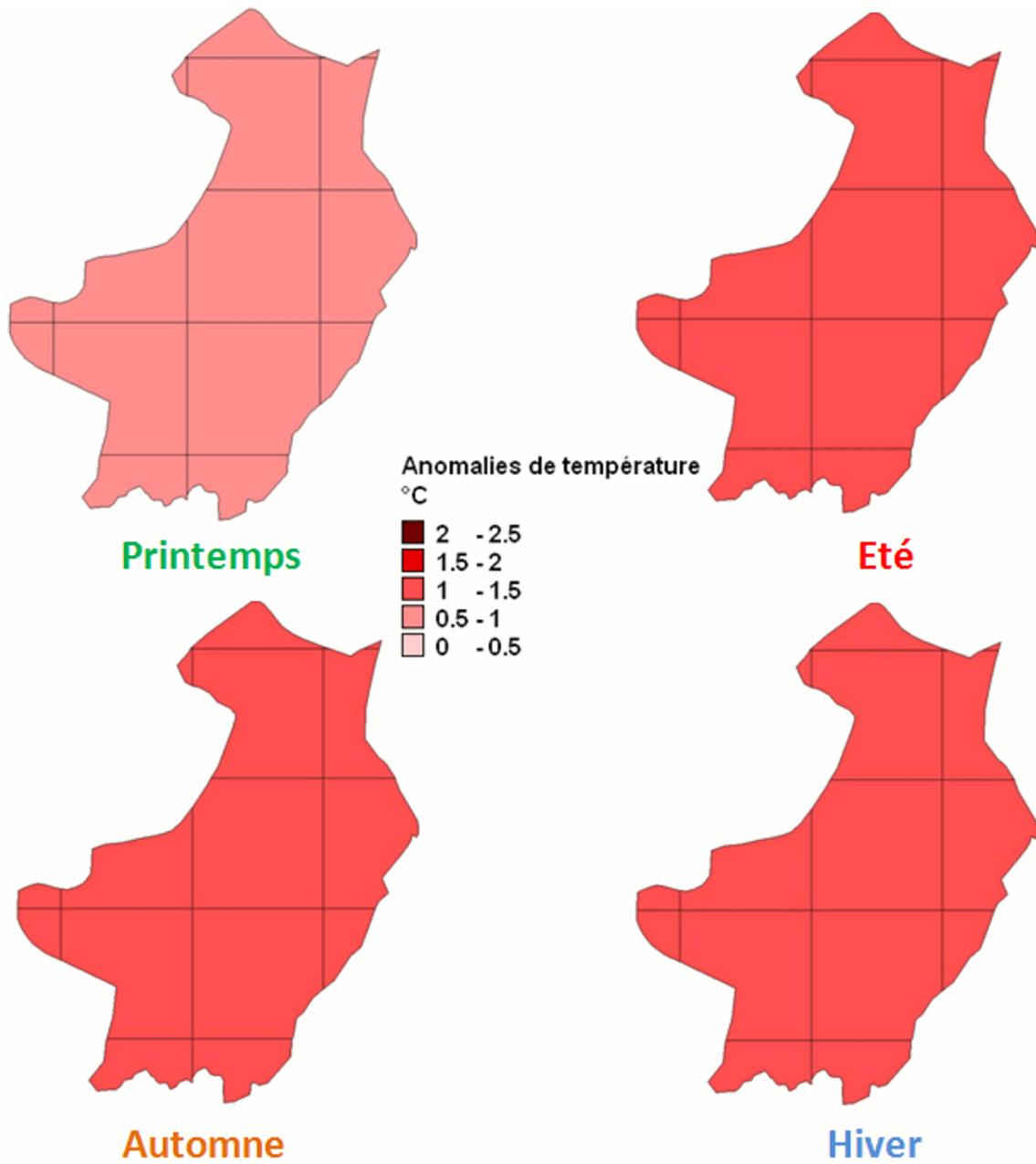


Illustration 35 : Anomalies moyennes saisonnières de température spatialisées

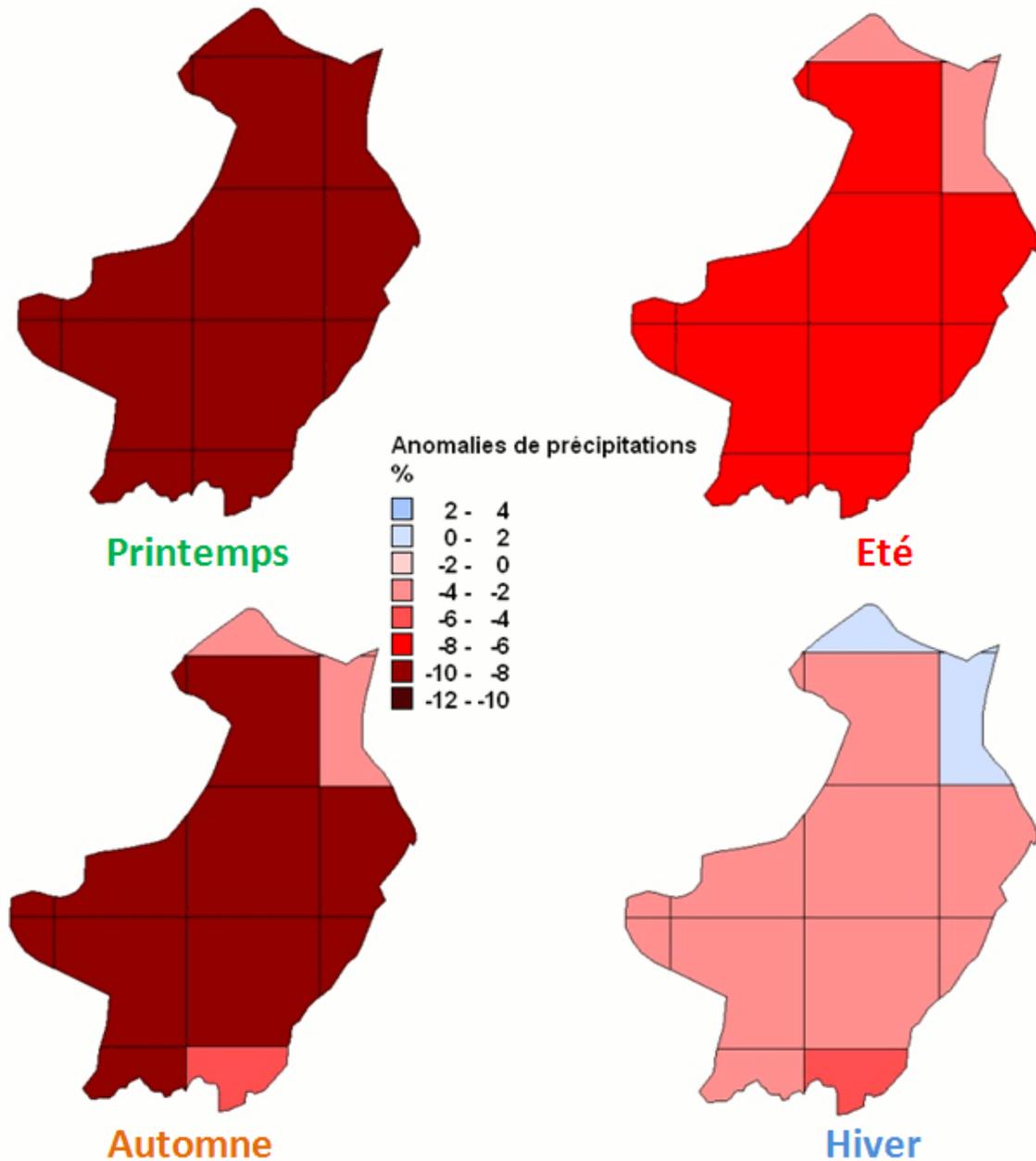


Illustration 36 : Anomalies moyennes saisonnières de précipitation spatialisées

2.4. CONCLUSION

L'analyse des données disponibles au niveau des 5 stations météorologiques disponibles à proximité du bassin d'alimentation du Lez montre un comportement typiquement méditerranéen des précipitations avec les cumuls les plus importants observés en octobre-novembre (épisodes cévenols) et sur les reliefs plutôt que sur le littoral. L'analyse statistique montre une tendance à la hausse des précipitations d'automne sur les 30 dernières années, qui entraîne, pour la plupart des stations, une hausse des cumuls annuels. Pour le reste de l'année, toutes les stations présentent un comportement stationnaire, sauf la station du Mont Aigoual qui affiche une hausse des précipitations hivernales et printanières.

Les données de température disponibles traduisent les positions géographiques des stations météorologiques, avec des températures plus douces et une amplitude thermique plus grande en bordure littorale que dans le massif des Cévennes. L'analyse statistique conduit à mettre en évidence une tendance significative à la hausse des températures moyennes annuelles sur toutes les stations, essentiellement reliée à une hausse des températures printanières et estivales. La hausse observée n'apparaît par contre pas systématiquement sur les séries de températures maximales et minimales (pour les stations qui enregistrent ce type de données) et lorsqu'on l'observe, c'est essentiellement au printemps et, dans une moindre mesure, en été.

Les résultats obtenus au terme de cette analyse sont cohérents avec d'autres études menées sur la même problématique et sur des territoires proches (Chaouche et al., 2010, Lespinas et al., 2010, Moisselin et al., 2002)

Pour explorer le climat futur, 9 scénarios climatiques ont été obtenus à partir des simulations des modèles de climat désagrégés disponibles dans le cadre du projet SCRATCH 2010 du CERFACS, à l'horizon 2045-65, pour le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B. Ces scénarios, traduits en termes d'anomalies moyennes mensuelles, indiquent une augmentation de la température moyenne mensuelle comprise entre +1,5°C et +2,3°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) suivant la période de l'année, en moyenne multi-modèle. Les augmentations de température obtenues s'expriment de manière plus marquée et sont affectées d'une variabilité intra-scénarios moindre pour l'automne et l'hiver, que pour le printemps et l'été. C'est à cette saison cependant que l'on observe les scénarios d'augmentation de la température les plus extrêmes. Les augmentations prévues par les scénarios apparaissent homogènes sur l'ensemble de la zone d'étude et ce quelle que soit la saison.

Pour les précipitations, les scénarios prévoient une diminution des précipitations mensuelles de l'ordre de -5 à -10% en moyenne multi-modèle. Seul le mois de janvier présenterait des précipitations en augmentation de l'ordre de +10% par rapport au présent, en moyenne multi-modèle. Ces résultats sont cependant affectés par une très forte variabilité entre les scénarios (variations mensuelles de $\pm 50\%$ par rapport aux précipitations présentes) qui rend le signal moyen décrit très incertain. Cette variabilité est cependant maximale en hiver et moindre au printemps, été et automne, ce qui renforce le signal globalement à la baisse des précipitations prévu à l'échelle annuelle. Les signaux obtenus présentent une variabilité spatiale qui s'exprime notamment par une diminution moindre (voire même une augmentation en hiver) des précipitations au niveau des extrêmes nord-est et sud-est de la zone d'étude, en toutes saisons, en dehors du printemps. Cette variabilité n'impactera cependant pas ou peu le signal moyen d'entrée pour la modélisation hydrologique et hydrogéologique.

La comparaison des évolutions observées au cours des 30 dernières années avec les scénarios climatiques obtenus font apparaître ces derniers comme cohérents, dans la mesure où ils prévoient une situation future qui serait dans la continuité des observations sur l'évolution de la température au cours de la période présente.

Concernant les précipitations, les scénarios climatiques proposent une situation future plutôt à la baisse qui semble apparemment contradictoire avec les observations sur les 30 dernières années, notamment au regard de la hausse des précipitations observée en automne. Aucune conclusion ne doit cependant être tirée de cette apparente contradiction, probablement issue de la combinaison des mécanismes majeurs susceptibles de contrôler l'évolution du climat (variabilité naturelle du climat, oscillations climatiques – ENSO par exemple, activité solaire, réchauffement atmosphérique d'origine anthropique). Ceci montre simplement l'importance des incertitudes qui affectent la compréhension et la modélisation des processus climatiques, qu'il apparaît crucial de garder à l'esprit lorsque l'on conduit des études d'impact du changement climatique.

3. Simulations du compartiment « eaux souterraines »

3.1. INTRODUCTION

Deux approches de modélisation de l'aquifère karstique du Lez ont été mises en œuvre de façon à simuler (i) les scénarios de changements climatiques définis précédemment (§ 2.3) et (ii) des scénarios de gestion (volumes pompés) définis avec l'Agglomération de Montpellier. Les deux approches répondent à des questionnements différents dans la mesure où elles s'appliquent à des échelles de temps différentes. Le modèle Tempo (à pas de temps journalier) permet de simuler de longues chroniques pluri annuelles de pluie et de pompages et leur impact sur le niveau d'eau au niveau de la source du Lez. Le modèle POKA (à pas de temps horaire) permet de simuler plus finement des augmentations / réductions de débits de pompage durant une période sèche de quelques semaines.

3.2. ETUDE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT GLOBAL PAR L'APPROCHE DE SIMULATION TEMPO

3.2.1. Introduction

Le modèle hydrogéologique développé à l'aide du logiciel TEMPO permet de caractériser et de simuler le fonctionnement du système karstique du Lez soumis à un pompage (BRGM/RP-60222-FR, Borrell-Estupina et al, 2012). Ce modèle qui permet de reproduire de manière jugée satisfaisante les évolutions piézométriques du drain karstique de la source du Lez (1974-2009) à un pas de temps journalier a été utilisé pour simuler différents scénarios de gestion de la ressource, en intégrant des scénarios de changements climatiques.

Les scénarios de pompage ont été définis en concertation avec le gestionnaire de la ressource (Agglomération de Montpellier) sur la base des informations contenues dans les chroniques de prélèvement de la période 1990-2010.

Les scénarios climatiques choisis couvrent deux périodes temporelles (§ 2.3), l'une pour le présent (1971-2000) et l'autre pour le futur (2045-65), dont la durée minimale de 20 ans permet de considérer que la variabilité naturelle du climat est prise en compte dans les scénarios. L'utilisation de deux périodes simulées (présent et futur) est nécessaire pour ne pas introduire dans l'analyse de l'impact des scénarios sur la ressource en eau, le biais entre les simulations des modèles de climat et le climat réellement observé.

Dans cette étude, 9 des 15 simulations du GIEC désagrégées par le CERFACS sont utilisées (cf 2.3.2). Ces 9 modèles climatiques régionaux s'appuient sur le même scénario d'émission de gaz à effet de serre (A1B) et la même méthode de changement d'échelle - méthode statistique multi variée de désagrégation, qui repose sur l'utilisation du concept de type de temps (Boé et al., 2006 ; Boé et al., 2007) et intégrée dans l'outil DsClim développé au CERFACS. Les données sont projetées sur la grille SAFRAN (Vidal et al. 2010) qui couvre l'ensemble du territoire national, avec une résolution spatiale de 8 km.

Les chroniques de pluie et température produites par ces 9 modèles constituent les entrées climatiques pour les 9 exercices de simulation réalisés (9 modèles Tempo), pour décrire les effets du changement global (pompage et climatique) sur les ressources en eau souterraine du Lez.

Les indicateurs analysés seront (1) la pluie efficace, (2) le niveau piézométrique du drain du Lez et (3) le débit résiduel de débordement de la source du Lez (Q_r). Ce débit est observé en période de hautes eaux à la vasque lorsque le débit de pompage (Q_p) est inférieur au débit naturel (Q_n) qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage : $Q_r = Q_n - Q_p$.

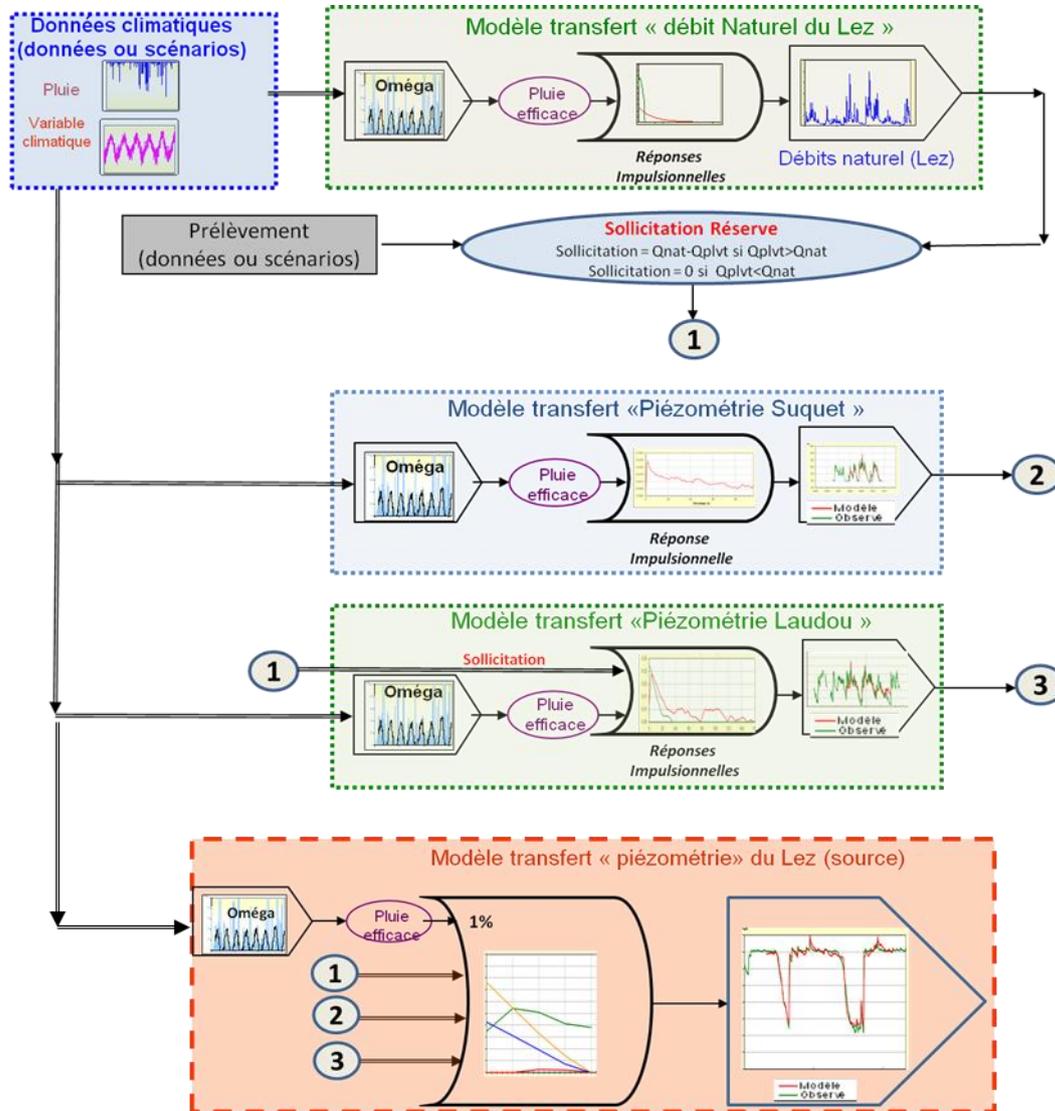


Illustration 37 : Architecture du modèle utilisé pour modéliser (1) le débit naturel de la source du Lez; (2) le niveau d'eau dans le conduit karstique (forage Suquet) situé près la source intermittente du Lirou ; (3) le niveau piézométrique dans la matrice (piézomètre Laudou) à partir des pluies efficaces et du débit de sollicitation (Q_s) mobilisé par le pompage et (4) le niveau piézométrique du conduit principal de la source du Lez à partir des différentes composantes (pluie efficace, débit de sollicitation (Q_s) mobilisé par le pompage, contribution de l'aquifère jurassique situé à l'ouest de la faille des Matelles-Corconne et contribution de la matrice).

3.2.2. Présentation du modèle et des données d'entrées

Modèle hydrogéologique

La description détaillée du modèle est présentée dans le rapport BRGM/RP-60222-FR (Borrell-Estupina et al, 2012). Le modèle de transfert développé dont l'architecture est rappelée (Illustration 37) est composé de quatre éléments en cascade. Le premier élément du modèle calcule le débit naturel de la source du Lez qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage. Le débit de sollicitation des réserves du karst est ensuite calculé par l'équation 1, le débit de pompage étant mesuré depuis 1974:

$$Q_s = \begin{cases} Q_n - Q_p & \text{if } Q_p \geq Q_n \text{ and } Q_r = 0 \\ 0 & \text{if } Q_p < Q_n \text{ and } Q_r = Q_n - Q_p \end{cases} \quad \text{eq. 1}$$

où Q_s représente le débit de sollicitation des réserves, Q_p le débit de pompage, Q_n le débit naturel qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage.

En période de hautes eaux (Illustration 38a), le premier élément du modèle de transfert permet de calculer le débit résiduel de débordement de la source ($Q_r = Q_n - Q_p$). En période de hautes eaux, les pompages ne mobilisent pas les réserves du karst et le débit pompé (Q_p) correspond à une partie du débit naturel (Q_n) qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage. Le débit résiduel de débordement ($Q_r = Q_n - Q_p$) est uniquement observé lorsque $Q_n > Q_p$, ce qui correspond aux périodes de hautes eaux ($h > 65$ m NGF).

En basses eaux (Illustration 38b), le débit de pompage (Q_p) est compris entre 1200 et 1700 l/s. Ce débit (Q_p) est supérieur au débit qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage (Q_n). Le pompage provoque alors le tarissement de la source ($Q_r = 0$). Le débit pompé (Q_p) lors de ces périodes s'interprète comme le résultat de la somme du débit qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage (Q_n) et du débit des réserves (Q_s) sollicité par le pompage : $Q_p = Q_n + Q_s$. Le débit d'eau issue des réserves (Q_s) s'interprète comme le résultat du déstockage des drains karstiques et la mobilisation de l'eau de la matrice carbonatée dans laquelle s'est développé le réseau de drainage karstique (Maréchal et al, 2008). Les pompages mobilisent donc les réserves en eau du système karstique peu ou pas accessibles en conditions naturelles de fonctionnement. Ce phénomène se traduit par une diminution de la charge piézométrique dans le drain karstique et un tarissement de la source ($Q_r = 0$)

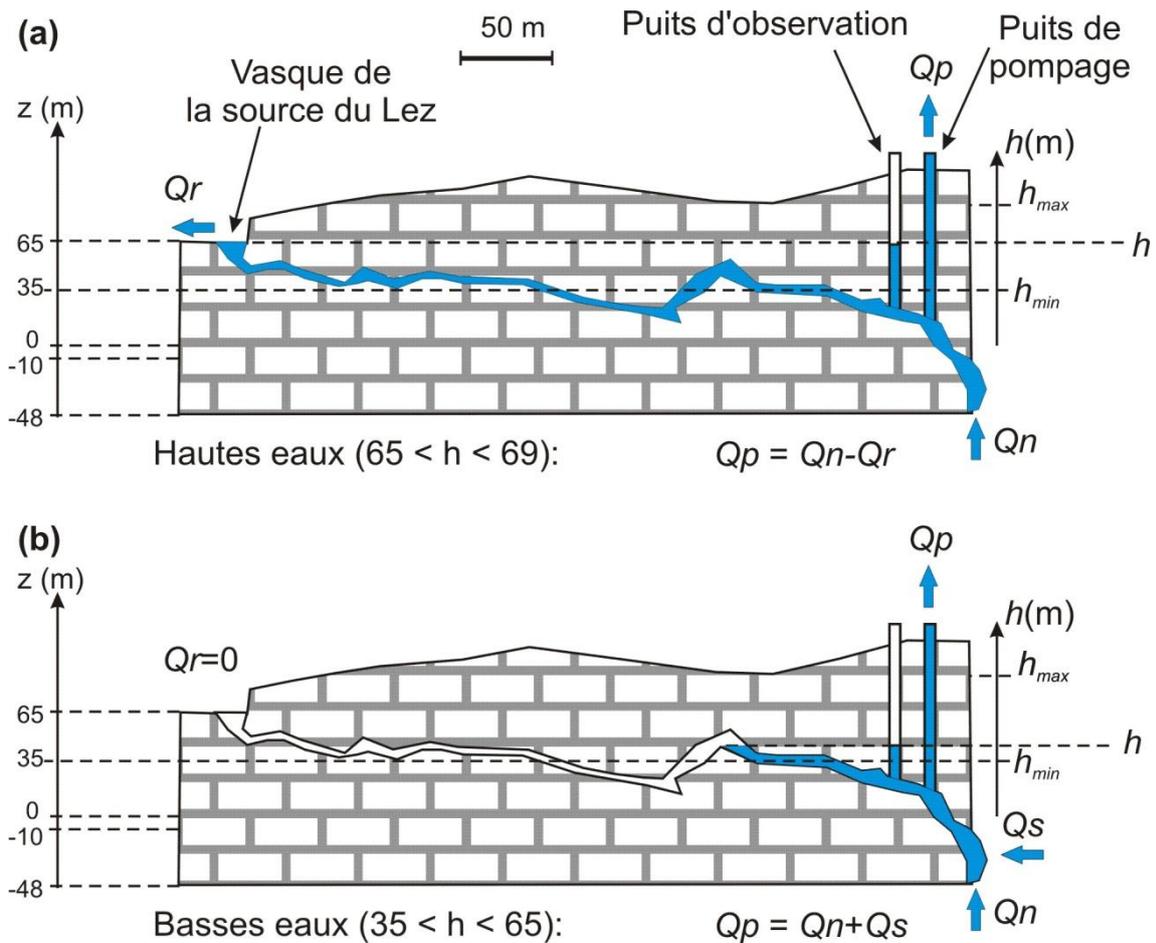


Illustration 38 : schéma de fonctionnement hydrodynamique de la source du Lez en hautes eaux (a) et basses eaux (b)

Le second élément du modèle (Illustration 37) permet de simuler la charge hydraulique du drain dans le compartiment jurassique situé à l'ouest de la Faille des Matelles-Corconne (forage du Suquet), à proximité de la source de trop plein du Lirou. En période de hautes eaux, la réponse piézométrique à la recharge par les pluies efficaces est très comparable à celle enregistrée au piézomètre de Claret, ce dernier ouvrage étant situé sur un drain à proximité immédiate de la faille des Matelles-Corconne. Cette faille constitue l'un des axes majeurs de drainage du système karstique (Lacas et Avias, 1976 ; Drogue et Grillot, 1976 ; Bérard 1983, Karam 1989). En période de basses eaux, les suivis piézométriques mettent en évidence l'existence d'une « déconnexion piézométrique » entre les deux compartiments aquifères situés de part et d'autre de la faille des Matelles-Corconne. Le niveau d'eau dans le compartiment ouest (forage du Suquet) cesse d'être influencé par les rabattements liés au pompage lorsque la charge piézométrique du drain karstique à Claret est de 53,5 m NGF ou 52 m NGF à la vasque du Lez. Le comportement mesuré au forage du Suquet peut s'expliquer si l'on considère qu'une déconnexion de type « cascade » se produit dans le drain. Ce type de connexion hydraulique n'exclut pas qu'un flux d'eau en provenance du compartiment ouest continue à alimenter le jurassique situé sous couverture, mais les deux charges hydrauliques mesurées de part et d'autre de la faille des Matelles-Corconne sont déconnectées et les flux en provenance du compartiment ouest n'augmente plus en fonction du rabattement induit par le pompage dans le compartiment principal.

Le troisième élément du modèle (Illustration 37) permet de prendre en compte l'effet lié à la drainance du Crétacé. Sur la base des données isotopiques du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), on

montre en effet que les eaux échantillonnées dans le piézomètre Laudou présentent une signature très comparable aux eaux échantillonnées dans le Crétacé (rapport BRGM RP-61013-FR ; Batiot-Guilhe et al., 2012). La piézométrie mesurée dans le piézomètre Laudou apparaît également influencée par l'effet lié aux pompages (Conroux 2007). La méthode de transfert permet donc de prendre en compte la recharge issue du Crétacé et l'effet lié au pompage par l'intermédiaire du débit (Qs) de sollicitation des réserves du karst.

Le dernier élément du modèle (Illustration 37) permet le calcul de la piézométrie du drain karstique à partir des contributions (sorties) des trois modèles de transfert intermédiaires.

Données climatiques (pluie, température)

Les chroniques de pluie et de température produites par les 9 modèles climatiques retenus sont projetées sur la grille SAFRAN (Vidal et al. 2010) qui couvre l'ensemble du territoire national, avec une résolution spatiale de 8 km. La première partie du travail a donc consisté à sélectionner les mailles SAFRAN concernées par l'impluvium de l'aquifère karstique du Lez (15 mailles, Illustration 39). Puis nous avons estimé, pour chacune d'elle, la proportion relative des surfaces « jurassique » et « crétacé » dans le but de calculer les lames d'eau de pluie pondérée pour chacune des surfaces individualisées. Ces calculs ont permis de définir deux fonctions de pondération de précipitations distinctes permettant de décrire la recharge des composantes jurassique et crétacé de l'impluvium du bassin hydrogéologique du Lez.

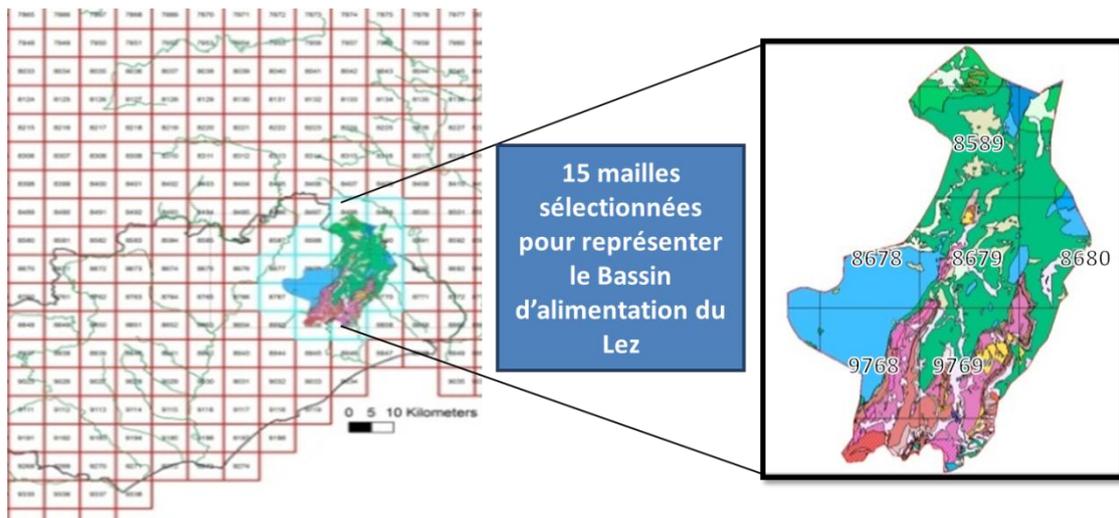


Illustration 39 : Selection des mailles SAFRAN concernées par l'impluvium du bassin hydrogéologique du Lez

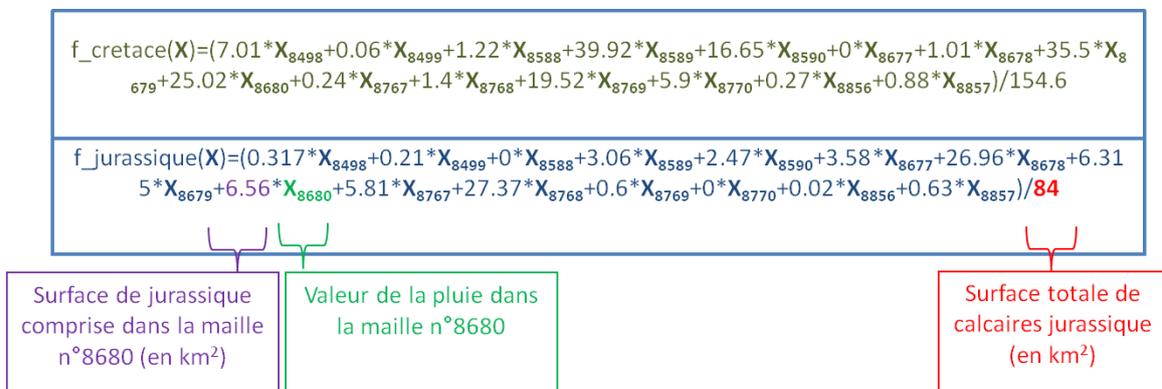


Illustration 40 : Fonction de pondération des précipitations

Pour la température, il n'est pas nécessaire de calculer des fonctions de pondération car la température calculée par les modèles apparaît homogène à l'échelle des quinze mailles représentatives de l'impluvium du Lez (Illustration 35). Dans la suite, c'est donc la moyenne inter-mailles qui est utilisée pour définir la variable température.

Données de prélèvement (à la source du Lez)

L'évolution des débits (mensuels et annuels) prélevés à la source du Lez sur la période 1974-2010 est reportée dans le Tableau 1. Les volumes pompés en 1986 apparaissent les plus élevés de toute la période (39 003 724 m³ ≈ 39 Mm³/an). De l'analyse des données disponibles, il ressort que le volume moyen interannuel de pompage est de 34 985 079 m³ (≈ 35 Mm³/an) sur la période 1983-2010 (période de gestion active par pompage dans le drain karstique). Les volumes moyens pompés lors de la dernière décennie apparaissent légèrement plus faibles (de l'ordre de 33 Mm³/an).

Q_plvt_Lez (en l/s)														
Mois													Q (l/s)	
Année	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Moy	Vol annuel (m3)
1973								635	580	601	583	613	603	19 025 314
1974	957	1049	1034			1187	1069	785	924	995	873	840	970	30 621 564
1975	891	990	997	1043	993	1029	872	743	965	840	728	867	912	28 789 523
1976	966	966	971	964	1013	1029	844	739	723	836	962	942	913	28 786 914
1977	972	965	986	971	975	1003	953	923	707	734	794	912	908	28 649 978
1978	935	949	979	959	984	1000	916	715	741	407	668	790	836	28 375 323
1979	1012	1042	1053	1061	1146	1069	847	791	765	944	1048	1045	985	31 073 429
1980	1171	1174	1285	1314	1257	1109	939	875	750	757	908	793	1027	32 410 819
1981	854	853	1061	1037	1040	978	1082	851	762	864	767	892	921	29 084 895
1982	1036	1017	1074	1078	1043	822	754	792	816	878	948	864	926	29 230 984
1983	969	1017	974	999	994	1174	1038	834	1093	912	847	866	975	30 781 320
1984	1147	1178	1197	1232	1225	1344	1179	941	773	1089	1022	1061	1116	35 205 736
1985	1239	1235	1247	1262	1230	1349	1325	1113	1016	1091	1070	1147	1194	37 667 584
1986	1198	1208	1207	1191	1269	1385	1389	1260	1214	1214	1165	1127	1236	39 003 724
1987	1183	1187	1202	1195	1242	1306	1302	1307	1283	1163	1135	1138	1221	38 516 180
1988	1152	1149	1169	1108	1157	1281	1339	1291	1277	1150	1129	1107	1193	37 838 387
1989	1104	1119	1131	1123	1249	1389	1311	1007	974	1016	1105	1082	1132	35 733 232
1990	1090	1132	1197	1148	1126	1192	1205	1120	1023	992	1044	1079	1112	35 100 653
1991	1061	1048	1076	1110	1168	1248	1320	1299	1198	1102	1063	1024	1144	36 096 835
1992	991	1015	1048	1071	1097	1092	1122	1201	1173	1074	1024	1001	1076	33 956 158
1993	1006	1060	1048	1023	1050	1154	1234	1225	1162	1055	1019	1013	1088	34 320 923
1994	1015	1040	1059	1059	1079	1201	1320	1265	1113	1043	1036	1010	1104	34 830 935
1995	1013	986	1027	1038	1076	1232	1195	1121	1046	1072	1035	992	1070	33 764 815
1996	993	1032	1042	1074	1115	1261	1225	1126	1116	1052	1011	1017	1089	34 357 912
1997	1019	1016	1078	1153	1128	1142	1181	1136	1165	1073	1045	1018	1097	34 603 065
1998	1016	1036	1095	1076	1212	1340	1389	1280	1165	1099	1077	1033	1152	36 362 417
1999	1076	1099	1141	1146	1113	1202	1327	1213	1176	1057	901	904	1113	35 127 174
2000	1021	1060	1114	1077	1183	1250	1273	1195	1094	1015	977	983	1104	34 831 820
2001	918	930	1015	1083	1189	1326	1339	1335	1185	1087	1105	1071	1133	35 754 652
2002	1060	1068	1019	959	1020	1215	1342	1299	1079	1038	963	966	1086	34 281 557
2003	963	982	983	1001	1173	1438	1399	1171	1133	1019	1030	1003	1109	34 984 812
2004	1003	989	992	987	1085	1396	1427	1291	1262	1188	1150	1089	1155	36 460 052
2005	1135	1148	1185	1201	1260	1115	988	855	975	1046	970	1109	1082	34 141 438
2006	1037	1026	957	1110	1193	1252	1081	916	985	926	972	1034	1040	32 832 887
2007	1018	971	1049	1098	1086	1178	1318	1195	1190	1117	1044	1003	1107	34 919 438
2008	928	1013	1095	1035	971	986	1299	1240	1192	1023	919	871	1048	33 072 355
2009	894	886	953	913	1012	1231	1290	1275	1110	1051	1089	1010	1061	33 467 789
2010	878	857	868	893	924	1145	1270	1232	1165	1064	891	881	1007	31 768 553
Moy	1025	1040	1070	1078	1113	1190	1181	1068	1028	992	977	979	1054	

Tableau 1 : Synthèse des débits de prélèvements (mensuels et annuels) à la source du Lez

Construction des scénarios de prélèvement (à la source du Lez)

Dans le but de discuter de l'effet du changement climatique sur les ressources en eau du système karstique du Lez, il faut au préalable définir une chronique de prélèvement de référence, constante d'un cycle hydrologique à l'autre.

Dans cette étude, pour construire la chronique de référence de pompage ($Qp0$), nous avons considéré la chronique d'évolution du débit de pompage de l'année 2010 (31,7 Mm³ pour l'ensemble de 2010). Cette chronique, qui inclut le volume nécessaire au débit réservé, permet de bien rendre compte de l'augmentation de la demande du printemps (à partir de mi-mai), puis de la demande soutenue des mois d'été (juillet, août) suivie d'une diminution progressive de la demande en automne (septembre, octobre) pour ensuite atteindre la demande de base (de novembre à avril). Nous supposons que l'allure de cette chronique de pompage permettra de bien décrire l'évolution future des prélèvements dans la mesure où l'augmentation de la demande en eau débute de façon plus précoce (fin du mois de mai).

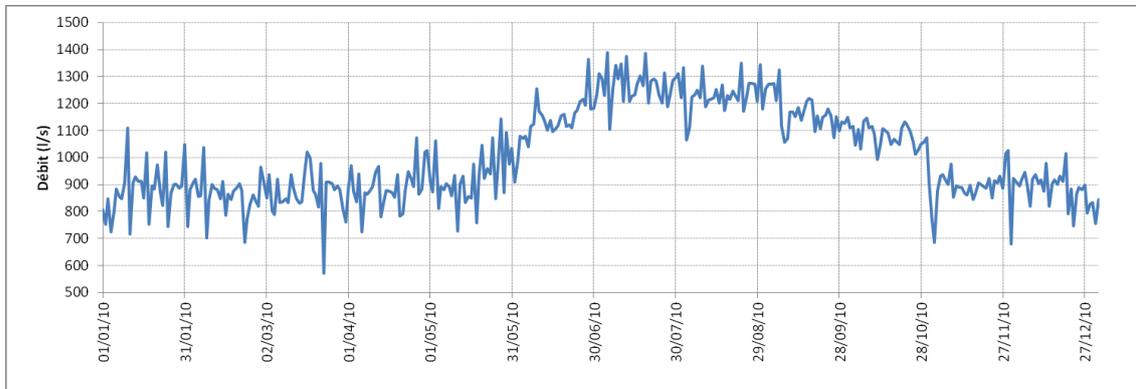


Illustration 41 : Evolution du débit de pompage journalier effectué à la source du Lez en 2010

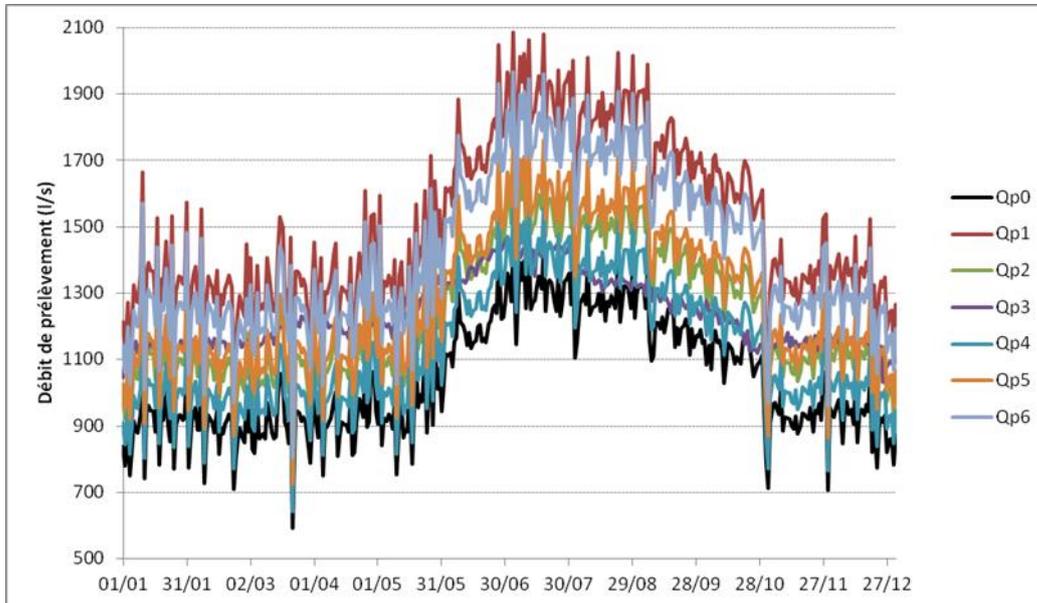
Le scénario de référence de pompage ($Qp0$) est construit à partir de la chronique de 2010 en considérant une augmentation globale de 4 % environ afin d'obtenir un volume de prélèvement annuel de 33 Mm³ correspondant au volume médian de la période 2000-2010.

A partir de la chronique de pompage de 2010, cinq scénarios de pompage ont été construits ($Qp1$; $Qp2$; $Qp4$; $Qp5$ et $Qp6$), correspondant à des valeurs croissantes de volumes annuels de manière à tester des sollicitations de plus en plus fortes du réservoir karstique. L'évolution des chroniques ainsi que leurs principales caractéristiques (débits minimum, maximum, moyen et volume annuel) sont reportées dans l'illustration 42.

Un autre scénario alternatif de pompage a été également considéré ($Qp3$). Ce scénario est construit sur la base de la chronique des débits moyens pompés sur la période 1990-2010 (volume de prélèvement annuel de 34,5 Mm³) en considérant une augmentation globale de 13 % environ afin d'obtenir un volume de prélèvement annuel de 39 Mm³ (c'est le volume de prélèvement le plus extrême jamais testé à ce jour sur le système du Lez, en 1986 cf. Tableau 1). Le volume annuel pompé du scénario $Qp3$ est identique au volume du scénario $Qp2$ (39 Mm³).

Ces deux chroniques ($Qp2$ et $Qp3$) permettront d'évaluer le comportement du système karstique pour deux stratégies de pompage différentes à volume annuel constant (Illustration 43). Dans le scénario $Qp2$, le débit de pompage (demande de base) de l'hiver est plus faible que celui du scénario $Qp3$ (1080 l/s contre 1170 l/s en moyenne, cf. tableau de

l'illustration 42) tandis que le débit pompé en été du scénario Qp2 est supérieur à celui de Qp3 (1440 l/s contre 1320 l/s en moyenne).



	Min	Max	Moy	V	Moy	Moy
	l/s	l/s	l/s	Mm3	JFMAM_ND	JJOSO
Qp0 (2010->33Mm3)	592	1441	1044	33	918	1219
Qp1 (2010->47.7Mm3)	856	2085	1510	47.7	1122	1763
Qp2 (2010-> 39 Mm3)	699	1704	1234	39	1084	1440
Qp3 (Qm 1990-2010)-> 39 M3	1033	1469	1237	39	1173	1324
Qp4 (2010->35.7Mm3)	641	1562	1131	35.7	994	1320
Qp5 (2010->40.3Mm3)	725	1765	1278	40.3	1123	1492
Qp6 (2010->44.9Mm3)	807	1966	1423	44.9	1251	1662

Illustration 42 : Caractéristiques des scénarios de pompage utilisés dans les modélisations

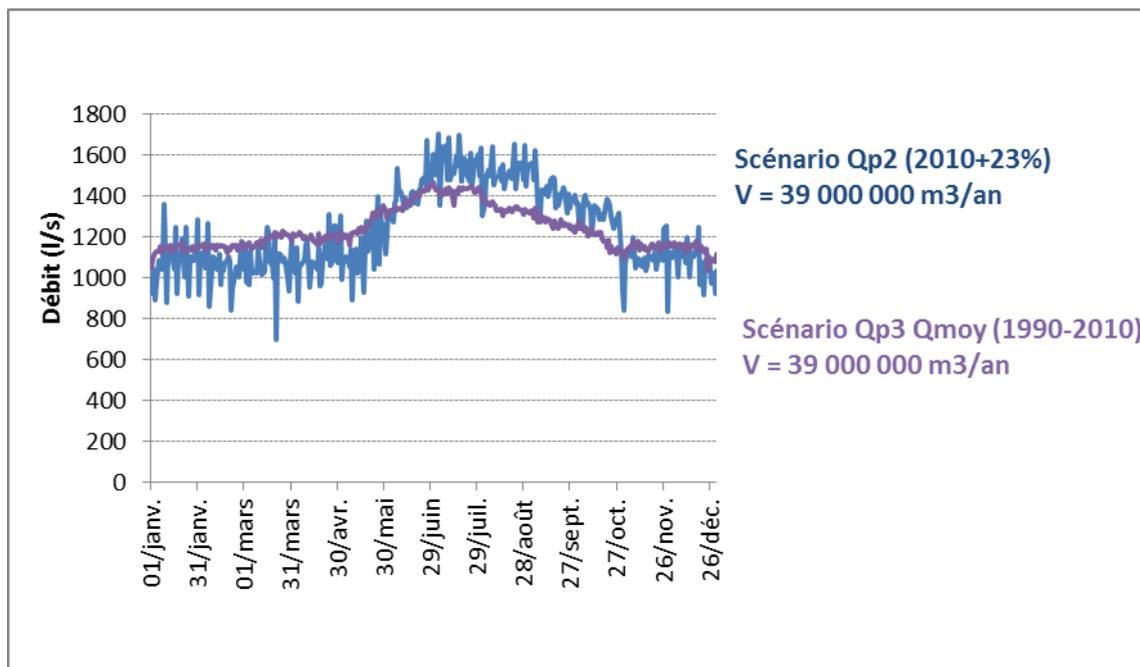


Illustration 43 : Comparaison des scénarios de pompage Qp2 et Qp3 (39 Mm³/an)

Positionnement des scénarios de prélèvement par rapport au Schéma Directeur d’Alimentation en Eau Potable (SDAEP)

La Communauté d’Agglomération de Montpellier élabore actuellement son Schéma Directeur d’Alimentation en Eau Potable (SDAEP). Elle étudie les besoins à satisfaire en eau potable à l’horizon 2030 en se basant sur le scénario 5 des prospectives INSEE 2030 qui retient un taux d’évolution de 0.9 % par an. Ce taux conduit à une population sur le territoire de la Communauté d’Agglomération de Montpellier de 466 000 habitants en 2020 et de 510 000 en 2030.

Les besoins en eau sont estimés en formulant deux hypothèses de consommation : (i) une hypothèse haute correspondant au maintien des consommations et ratios actuellement observés et (ii) une hypothèse basse basée sur une baisse de 10% des consommations actuelles et l’application d’un ratio de consommation dit "maîtrisé" pour les consommations "nouvelles".

La source du Lez occupe une place prépondérante parmi les ressources pouvant concourir à la satisfaction future des usages en eau et l’étude SDAEP en cours cherche à savoir (i) si les besoins établis pour 2030 (incluant les obligations contractuelles liées aux ventes d’eau en gros et à la DUP) pourront être satisfaits par la seule source du Lez et si (ii) le périmètre actuel desservi par la source du Lez pourrait être élargi pour englober de nouvelles communes notamment au sud de l’Agglomération.

Les premiers résultats sont récapitulés dans le tableau suivant, avec les scénarii de pompages simulés les plus proches :

	Hypothèse	Max l/s	Moy l/s	Prélèvement (Mm ³)	Scénario simulé correspondant
périmètre actuel	Basse	1 613	1 193	37,6	Qp2 (39 Mm ³)
	Haute	1 803	1 342	42,3	Qp5 (40,3 Mm ³)
périmètre élargi	Basse	1 790	1 323	41,7	Qp5 (40,3 Mm ³)
	Haute	2 028	1 495	47,1	Qp1 (47,7 Mm ³)

Tableau 2 : Hypothèses de prélèvements futurs à la source du Lez selon le SDAEP 2030 et scénarios simulés correspondants

Une réflexion plus détaillée sur l'utilisation de la source du Lez dans le cadre du SDAEP 2030 pourra être proposée dans le rapport de synthèse L5 de ce projet de recherche.

3.2.3. Résultats des simulations avec le climat observé (1962-2010) pour différents scénarios de pompages

Au préalable à l'étude sur l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau, nous avons réalisé différents tests pour évaluer le comportement du modèle à une modification des pompages. Pour ces tests, les chroniques d'entrées climatiques (pluie, température) sont celles observées sur la période 1962-2010 (données observées)¹.

Focus sur la période 1980-1983, « années déficitaires en précipitation »

Le premier test a consisté à évaluer le modèle pour une succession d'années déficitaires en pluie telles que observées sur la période 1980-1983 en considérant les différents scénarios de pompage précédemment définis.

L'illustration 44 représente l'évolution de la pluviométrie mesurée (1980-1984) et des niveaux piézométriques (calculés par les modules du modèle de transfert) en considérant la chronique de pompage de référence (Qp0). L'illustration 45 représente l'évolution de la piézométrie simulée pour le drain du Lez en considérant les différentes chroniques de pompage (Qp0 à Qp6).

¹ Chronique de pluie (cf. rapport BRGM/RP60222-FR) : $Pluie_{BV} = 0.32 \cdot St\text{-Martin-de-Londres} + 0.56 \cdot Valfaunes + 0.13 \cdot Montpellier$; chronique de température moyenne de l'air de St-Martin-de-Londres

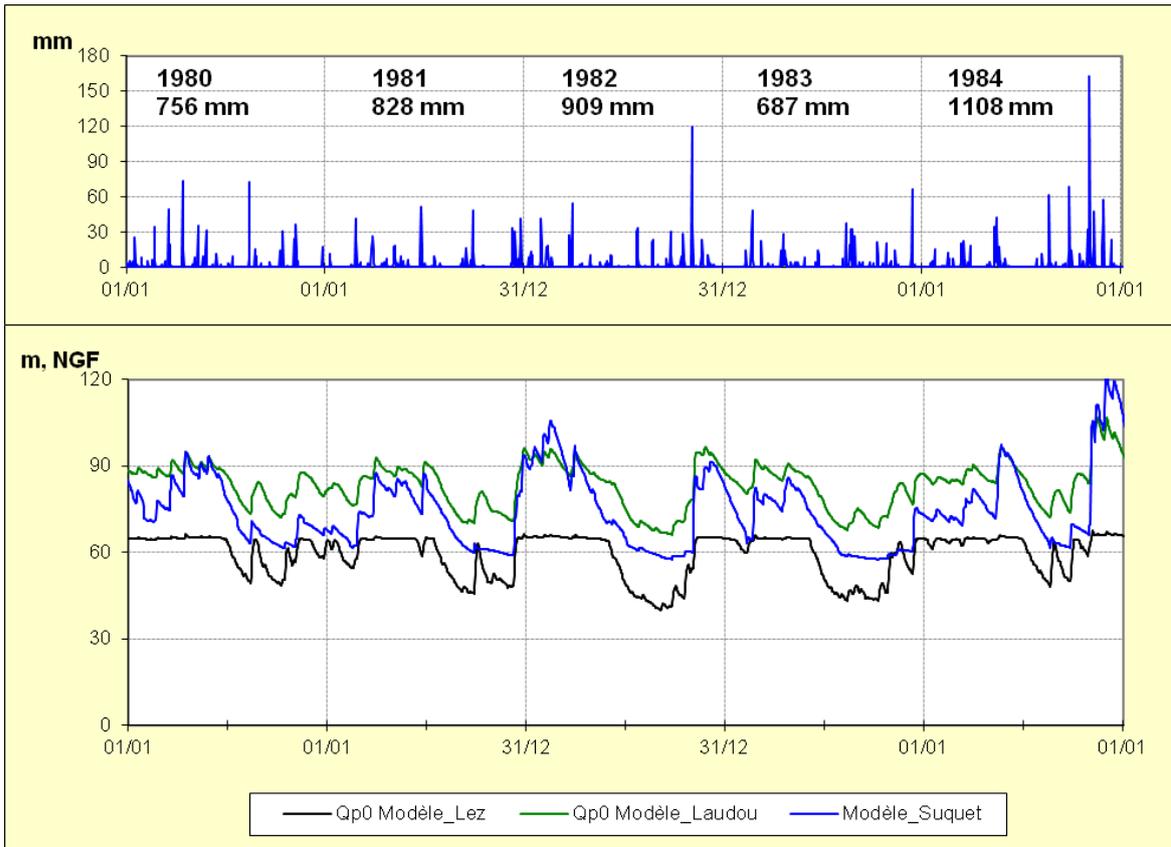


Illustration 44 : Evolution de la piézométrie calculée par le modèle en considérant les chroniques climatiques mesurées (pluie/Température) et le débit de pompage Q_{p0} ($33 \text{ Mm}^3/\text{an}$). Le focus porte sur la période 1980-1984 globalement déficitaire en précipitation par rapport à la moyenne

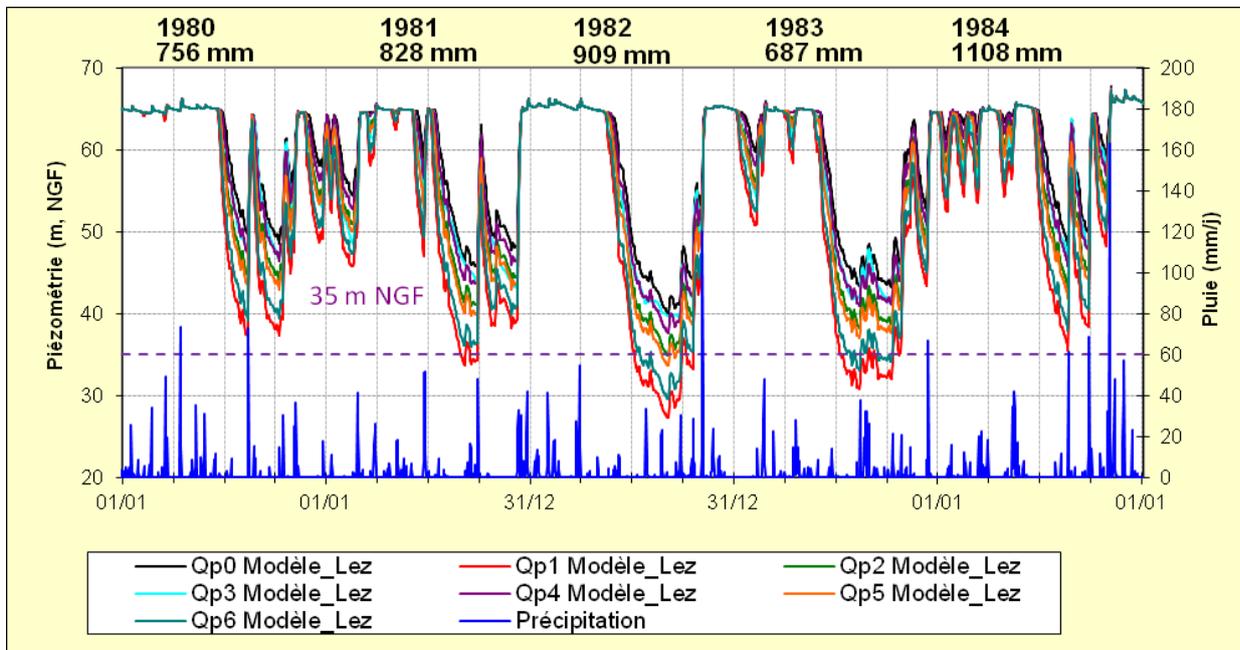


Illustration 45 : Evolution de la piézométrie calculée par le modèle en considérant les chroniques climatiques mesurées (pluie/Température) et les différentes chroniques de débit de pompage Q_{p0} à Q_{p6} . Le focus porte sur la période 1980-1984 globalement déficitaire en précipitation par rapport à la moyenne

En contexte déficitaire en précipitation, les résultats indiquent que les scénarios de pompage ($Qp1$ [$47,5 \text{ Mm}^3/a$] et $Qp6$ [$45 \text{ Mm}^3/a$]) provoquent des baisses importantes du niveau piézométrique en étiage, le niveau passe fréquemment en dessous de la cote de 35 m NGF (cote minimale fixée par la DUP). L'effet est particulièrement marqué pour le cycle « 1982 » pour lequel la chute des niveaux piézométriques (et donc du tarissement de la source) se produit à partir de la fin du mois d'avril. Les niveaux piézométriques restent toutefois supérieurs à la limite technique actuelle de fonctionnement des pompes en place (20 m NGF). Les résultats pour les scénarios $Qp5$ [$40,4 \text{ Mm}^3/a$] et $Qp2$ [$39 \text{ Mm}^3/a$] indiquent également que les niveaux sont proches voire franchissent temporairement la cote limite des 35 m NGF. Les résultats pour les scénarios $Qp0$ [$33 \text{ Mm}^3/a$], $Qp3$ [$39 \text{ Mm}^3/a$] et $Qp4$ [$35,7 \text{ Mm}^3/a$] indiquent que les niveaux piézométriques atteints en période estivale se situent au-dessus de la cote limite des 35 m NGF.

Les résultats différents obtenus pour les deux scénarios de pompage à $39 \text{ Mm}^3/a$ ($Qp2$ et $Qp3$) illustrent le rôle que peut jouer la stratégie de pompage sur l'évolution de la piézométrie du drain karstique en étiage. Le scénario $Qp2$, caractérisé par un ratio de débit de pompage de 1,33 entre les mois d'été et d'hiver (Illustration 42), provoque d'avantage de rabattement au sein du karst que le scénario $Qp3$, caractérisé par un ratio de pompage plus faible (1,13).

Simulations pour une succession d'années du type « 1995 »

L'année 1995, pour l'ensemble de la période historique, constitue une année singulière car les niveaux d'eau ont atteint le niveau minimal fixé par la DUP. Dans ce test, nous avons cherché à étudier la réponse du karst pour une succession d'années hydrologiques du type de celle de 1995. Les chroniques de pompages considérées sont $Qp0$; $Qp2$ et $Qp3$.

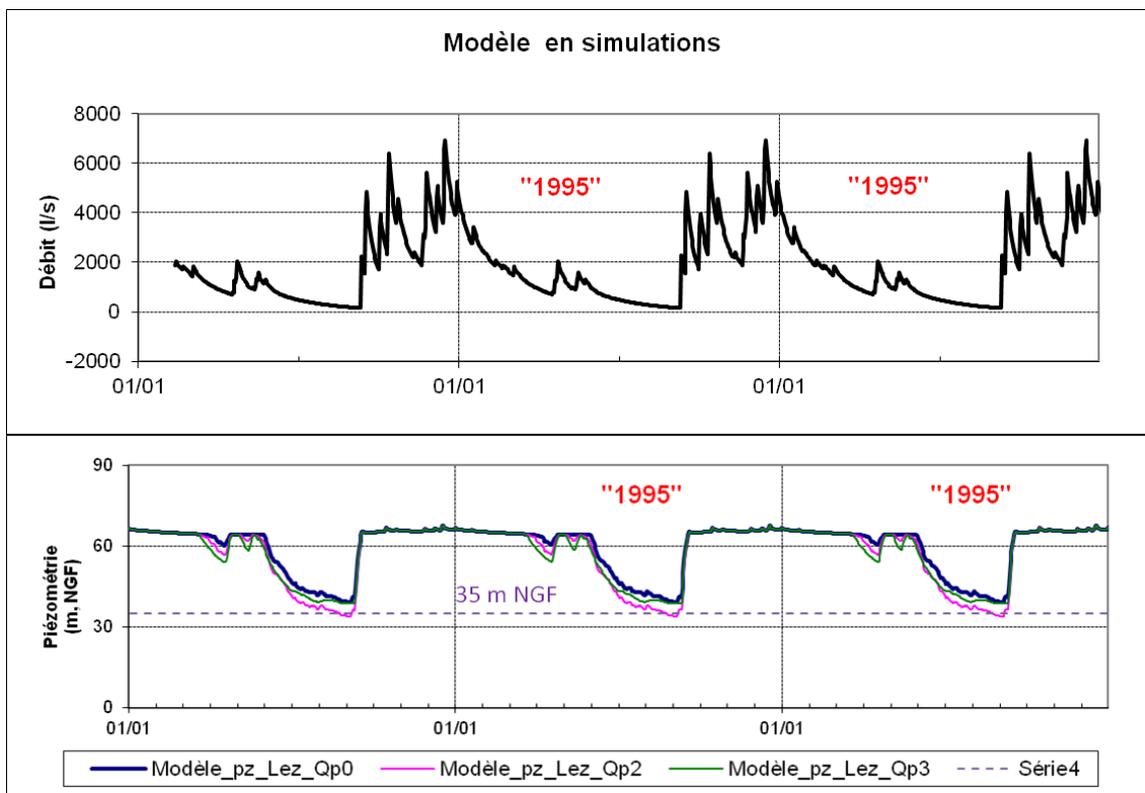


Illustration 46. : Evolution de la piézométrie calculée par le modèle en considérant une succession d'année identique (année 1995) et les débits de pompage $Qp0$ ($33 \text{ Mm}^3/an$) ; $Qp2$ ($39 \text{ Mm}^3/an$) et $Qp3$ ($39 \text{ Mm}^3/an$)

L'illustration 46 présente l'évolution de la piézométrie simulée pour le drain du Lez en considérant les différentes chroniques de pompage ($Qp0$, $Qp2$ et $Qp3$). Les résultats obtenus pour les deux scénarios de pompage à 39 Mm³/a ($Qp2$ et $Qp3$) illustrent de nouveau le rôle que peut jouer la stratégie de pompage sur l'évolution de la piézométrie du drain karstique en étiage. Avec le scénario $Qp2$, le niveau simulé devient inférieur à 35 m NGF en été, contrairement au scénario $Qp3$. On montre également que la stratégie de pompage du scénario $Qp3$ permet en fin d'étiage d'obtenir des niveaux piézométriques comparables à ceux atteints par le scénario de référence $Qp0$. A l'échelle annuelle, la différence de volume pompé entre les deux scénarios est de 6 Mm³. Ce résultat peut ouvrir de nouvelles perspectives quant à la modalité de gestion de la ressource en eau de ce système karstique.

Une succession d'années hydrologiques du type de celle de 1995 n'a pas d'influence sur l'évolution à moyen terme de la piézométrie. Les niveaux piézométriques simulés sont identiques d'un cycle à l'autre. Ceci est dû au fait que les épisodes de recharge des périodes automnales reconstituent rapidement les réserves mobilisées par les pompages lors des périodes de basses eaux, ce qui conduit à « réinitialiser » le système karstique avant la période de basses eaux suivante.

Synthèse

Le comportement du système karstique a été évalué pour différentes sollicitations de pompage. Les résultats obtenus pour deux scénarios de pompage correspondants à un volume total pompé de 39 Mm³/a ($Qp2$ et $Qp3$) illustrent le rôle que peut jouer la stratégie de pompage sur l'évolution de la piézométrie du drain karstique en étiage. Le scénario $Qp2$, caractérisé par un ratio de débit de pompage de 1.33 entre les mois d'été et d'hiver, provoque d'avantage de rabattement au sein du karst que le scénario $Qp3$, caractérisé par un ratio de pompage plus faible (1.13). On montre également que la stratégie de pompage du scénario $Qp3$ permet en fin d'étiage d'obtenir des niveaux piézométriques comparables à ceux atteints par le scénario de référence $Qp0$. Or, à l'échelle annuelle, la différence de volume pompé entre les deux scénarios est de +6 Mm³. Ce résultat pourrait donc ouvrir de nouvelles perspectives quant aux modalités de gestion de la ressource en eau de ce système karstique. D'une manière générale, l'importance du débit de pompage, notamment lors des périodes d'étiage, conditionne l'évolution des rabattements du niveau piézométrique.

3.2.4. Evaluation de l'impact du changement global (climatique et prélèvement) sur les ressources en eau du système karstique du Lez

Définition des scénarios étudiés

Dans le but d'évaluer l'impact du changement global (changement climatique et augmentation des prélèvements) sur les ressources en eaux du système karstique du Lez, nous avons au préalable défini des scénarios d'analyses (Tableau 3). Ces scénarios sont construits sur la base des chroniques de prélèvements définies précédemment ($Qp0$ à $Qp6$) et des résultats des 9 modèles climatiques pour le temps présent [1971-2000] et futur [2046-2065]. Ci-après, nous commenterons de manière détaillée les résultats des 3 premiers scénarios et du scénario de référence, les résultats des autres scénarios testés sont reportés en annexe 1.

Le scénario de référence est construit à l'aide des résultats obtenus pour le temps présent [1971-2000] et la chronique des prélèvements médians de la période récente [2000-2010] correspondant à la chronique $Qp0$. Les évolutions relatives de l'impact du changement climatique et/ou du prélèvement seront définies par rapport à ce scénario de référence.

Le scénario 1 permet d'examiner seulement l'impact d'une augmentation du prélèvement sur les ressources en eau du système karstique, le climat considéré est identique au climat présent [1971-2000].

Le scénario 2 permet d'examiner seulement l'impact du changement climatique [2046-2065] sur les ressources en eau du système karstique, le prélèvement considéré est identique au prélèvement médian de la période actuelle (chronique de pompage $Qp0$).

Le scénario 3 permet d'examiner l'impact global (changement climatique et prélèvement) sur les ressources en eau du système karstique, le prélèvement considéré est élevé, il correspond à celui de la chronique $Qp1$ ($47,5 \text{ Mm}^3/\text{a}$).

Les **scénarios 4, 5 et 6** permettent également d'examiner l'impact global (changement climatique et prélèvement) sur les ressources en eau du système karstique, les prélèvements considérés ($Qp4$, $Qp5$ et $Qp6$) étant inférieurs à celui de la chronique $Qp1$.

Les **scénarios $Qp2$ et $Qp3$** permettent également d'examiner l'impact global dans le cas de 2 stratégies de pompage différentes mais à volume identique ($39 \text{ Mm}^3/\text{a}$). Les différents résultats de ces scénarios sont présentés en annexe 1.

Nom du Scénario	Scénario climatique	Scénario de prélèvement
Scénario de Référence	Climat présent [1971-2000]	Prélèvement médian présent [$33 \text{ Mm}^3 = Qp0^*$]
Scénario 1 (Impact d'une augmentation du prélèvement Qp)	Climat présent [1971-2000]	Prélèvement augmenté à $47,5 \text{ Mm}^3/\text{a} = Qp1^*$ (+ 44%)
Scénario 2 (Impact du changement climatique)	Climat futur [2046-2065]	Prélèvement médian présent [$33 \text{ Mm}^3 = Qp0^*$]
Scénario 3 (Impact du changement global)	Climat futur [2046-2065]	Prélèvement augmenté à $47,5 \text{ Mm}^3/\text{a} = Qp1^*$ (+ 44%)
Scénario 4 (Impact du changement global)	Climat futur [2046-2065]	Prélèvement augmenté à $35,7 \text{ Mm}^3/\text{a} = Qp4^*$ (+ 8%)
Scénario 5 (Impact du changement global)	Climat futur [2046-2065]	Prélèvement augmenté à $40,4 \text{ Mm}^3/\text{a} = Qp5^*$ (+ 22,5%)
Scénario 6 (Impact du changement global)	Climat futur [2046-2065]	Prélèvement augmenté à $45 \text{ Mm}^3/\text{a} = Qp6^*$ (+ 36%)

Nom du Scénario	Scénario climatique	Scénario de prélèvement
Scénario Qp2 (Impact du changement global)	Climat futur [2046-2065]	Prélèvement augmenté à 39 Mm ³ /a = Qp2*
Scénario Qp3 (Impact du changement global)	Climat futur [2046-2065]	Prélèvement augmenté à 39 Mm ³ /a = Qp3**

Tableau 3 : Définition des scénarios étudiés (* ratio de pompage de 1,33 entre les mois d'été de d'hiver ; **ratio de pompage de 1,13 entre les mois d'été de d'hiver)

Définition des indicateurs et critères d'analyses

Dans cette étude, le modèle hydrogéologique Tempo calibré sur la base des données observées (pluviométrie, débit de débordement de la source, débit de pompage et piézométries du karst, cf. schéma de principe de l'illustration 37) a été utilisé. Nous avons utilisé les sorties des modèles climatiques pour la période présente (1971-2000) et les sorties des mêmes modèles climatiques pour le futur (2040-2065) afin d'établir des comparaisons et évaluer les impacts. Dans le but de pouvoir discuter les résultats, nous avons défini un certain nombre d'indicateurs et critères d'analyse pour décrire l'impact sur les ressources en eau du système karstique.

Pour le niveau piézométrique nous avons considéré :

- moyennes et anomalies mensuelles interannuelles par scénario ;
- fréquence d'occurrence² des classes [45m, 35m] et <35m NGF par scénario ;
- minimum mensuel (multi-modèles et tout scénario).

Les moyennes mensuelles interannuelles sont calculées à partir de valeurs journalières de piézométrie fournies par les modèles hydro-climatiques. Les évolutions relatives par rapport au scénario de référence permettent de caractériser les impacts des scénarios vis-à-vis de la ressource en eau du système karstique du Lez.

La cote des 45 m NGF pour la piézométrie constitue un niveau important pour le gestionnaire de la ressource en eau du Lez. Actuellement, lorsque le niveau d'eau passe sous ce seuil, les débits de pompage sont légèrement réduits et le complément de ressource est assuré par un achat d'eau brute à la société du Bas Rhône Languedoc (BRL), qui est ensuite traitée par la station de Portaly. La cote des 35 m NGF pour la piézométrie constitue également un seuil important car elle constitue la limite inférieure d'exploitation fixée par la DUP du Lez. Ces éléments nous ont amené à définir plusieurs classes de niveau piézométriques, dont la classe [45m, 35m].

² Les fréquences d'occurrences sont calculées à partir des résultats des modélisations au pas de temps journalier en considérant le nombre total d'événements (occurrences) qui satisfont le critère d'analyse choisi (<35 m NGF par exemple). Les calculs sont réalisés pour l'ensemble des périodes considérées (30 ans pour le climat présent [1971-2000] et 20 ans pour le climat futur [2045-2065]).

Plusieurs niveaux limites ont été également définis sous celui fixé par la DUP (35 m NGF), soient les seuils 30 m NGF, 20 m NGF et 10 m NGF. Le seuil 20 m NGF représente le seuil limite actuel à ne pas dépasser pour les pompes (sommet des pompes à 17 m NGF + 3 m de sécurité). Le seuil à 10 m NGF correspondrait à un nouveau seuil limite, suite à un approfondissement des pompes de 10 m par rapport à la situation actuelle. Les fréquences d'occurrence des classes piézométriques et des seuils inférieurs sont calculées à partir de valeurs journalières fournies par les modèles hydro-climatiques, soit à partir de 10950 valeurs pour le scénario climatique de référence 1971-2010 (365 j * 30 années) et à partir de 7300 valeurs pour le scénario climatique futur 2046-2065 (365 j * 20 années). Les fréquences d'occurrence sont calculées en comptant le nombre total d'occurrences dans la classe considérée ou le seuil considéré.

La valeur minimum de la piézométrie est définie sur la base des valeurs journalières calculées par les modèles hydroclimatiques sur les différentes périodes considérées (présent [1971-2000] ou futur [2046-2065]) des scénarios.

Le débit de débordement (Q_d) à la vasque constitue également l'un des indicateurs pertinents d'analyse du changement global. Rappelons qu'un débit de débordement est observé à la vasque uniquement pour les périodes où le débit de pompage Q_p est inférieur au débit naturel (Q_n), qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage. Le débit Q_n est calculé au pas de temps journalier par les modèles hydro-climatique, le débit de pompage (Q_p) est défini au pas de temps journalier, ce qui permet le calcul du Q_d journalier. Pour le débit de débordement (Q_d), nous avons considéré :

- moyennes et anomalies mensuelles interannuelles par scénario ;
- nombre de jours moyen³ où $Q_d < 160$ l/s à l'échelle annuelle ;
- nombre de jours moyen où $Q_d > 160$ l/s à l'échelle annuelle ;
- nombre de jours moyen où $Q_d = 0$ l/s à l'échelle annuelle ;
- QJXA empirique : débit journalier maximal de période de retour 10 ans calculé à partir des fonctions de répartition empirique.

Résultats pour le scénario 1 : climat référence [1971-2000] et prélèvement augmenté [47,5 Mm³/an = Qp1]

Ce scénario n°1 permet d'examiner uniquement l'impact d'une forte augmentation des débits de pompage (+44 % par rapport au volume médian (33 Mm³/a) de la période récente [2000-2010]) sur les ressources en eau du Lez. Ce prélèvement correspond par ailleurs au scénario de prélèvement le plus élevé du SDAEP et ce, pour un périmètre d'AEP élargi (Tableau 2). Dans ce scénario, le climat n'est pas modifié par rapport au scénario de référence (Climat = climat présent de référence [1971-2000]).

Les évolutions relatives par rapport au scénario de référence sont présentées dans les illustrations suivantes (Illustration 47 et Illustration 48). L'augmentation des prélèvements induit une importante baisse des niveaux piézométriques par rapport à la situation de référence. Entre les mois de juillet et septembre, l'augmentation des pompages provoque entre 15 et 20 m de rabattement supplémentaire par rapport au scénario de référence (Illustration 47). La dispersion entre les scénarios (traduisant leur capacité différente à reproduire le climat présent) est

³ Le nombre moyen de jour est estimé à partir des fréquences d'occurrences (nombre moyen de jour = moyenne inter-annuelle)

globalement faible (4 mètres au maximum). Dans le scénario 1, la piézométrie moyenne interannuelle serait comprise entre 28 m NGF et 20 m NGF (Illustration 49) entre les mois de juillet et septembre.

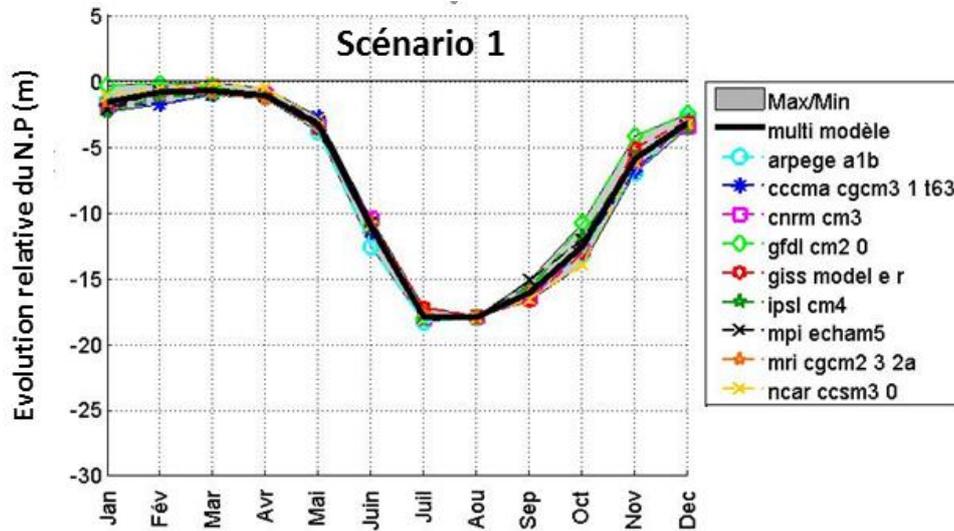


Illustration 47 : Evolution relative (en m) des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie du drain karstique du Lez par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 1 : climat présent 1971-2000 et prélèvement augmenté [$47,5 \text{ Mm}^3/\text{an} = Qp1$]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat 1971-2000 et prélèvement [$33 \text{ Mm}^3/\text{an} = Qp0$])

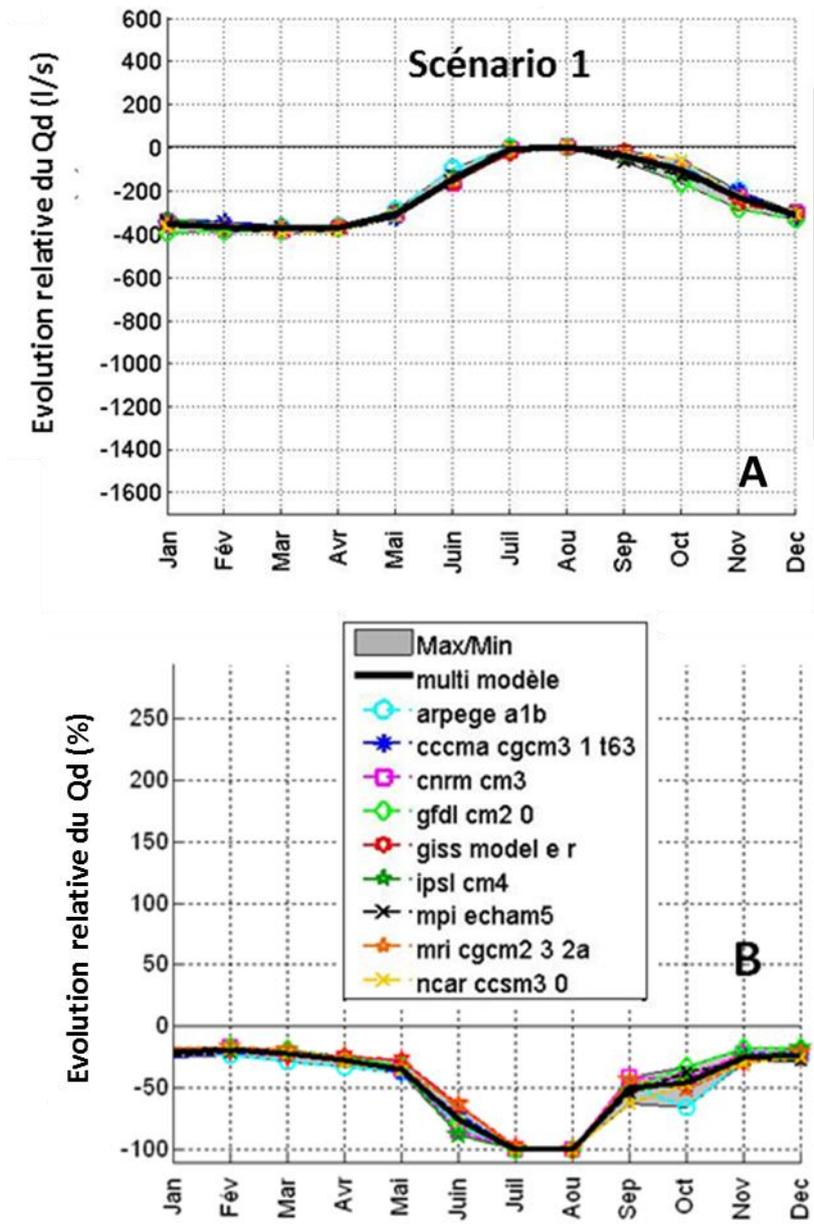


Illustration 48 : Evolution relative (A : en l/s ; B en %) des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement calculées par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 1 : climat présent 1971-2000 et prélèvement augmenté [47,5 M³/an = Qp1]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an = Qp0])

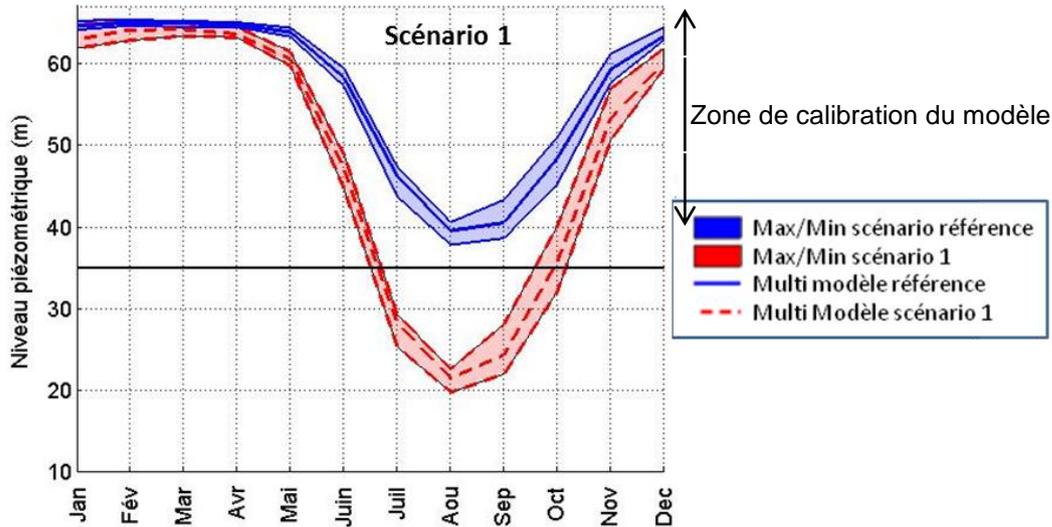


Illustration 49 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 1 climat 1971-2000 et prélèvement augmenté [2010 + 50%= 47,5 Mm³/an = Qp1] (traits pointillé rouges). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle.

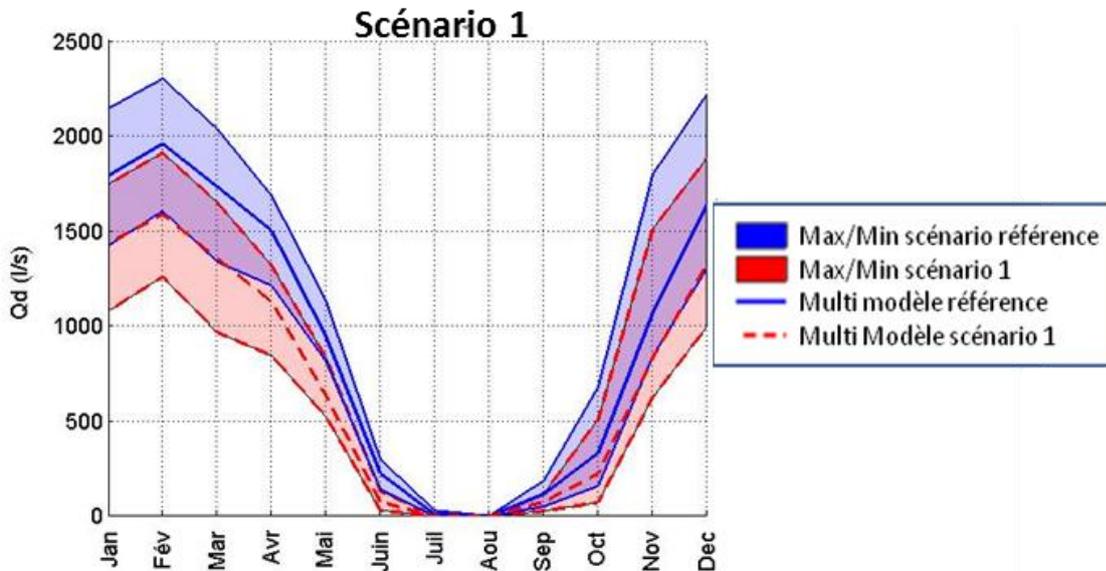


Illustration 50 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement (calculé au pas journalier). Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 1 : climat 1971-2000 et prélèvement augmenté [2010 + 50%= 47,5 Mm³/an = Qp1] (traits pointillé rouges). Les courbes enveloppes délimitent la gamme des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle

L'impact du scénario 1 sur les niveaux piézométriques est déjà perceptible dès le mois de mai et est particulièrement visible pour le mois de juin (Illustration 49) ; les niveaux en juin sont en moyenne situés dans la tranche d'eau 45 m - 35 m NGF alors qu'ils sont en moyenne situés dans la tranche d'eau 60 m - 55 m NGF dans le scénario de référence. De la même façon, les

niveaux moyens tardent à ré-augmenter à l’automne. Les résultats de ce scénario indiquent globalement que la période d’assec de la source est augmentée d’environ 1 à 2 mois et que les débits moyens de débordement sont réduits de 200 l/s à 400 l/s (moyenne multi-modèle) par rapport au scénario de référence (Illustration 48 et Illustration 50).

Résultats pour le scénario 2 : climat futur [2046-2065] et prélèvement médian actuel [33 Mm³/an = Qp0]

Ce scénario n°2 permet d’examiner uniquement l’impact du changement climatique (climat futur 2046-2065) sur les ressources en eau du Lez. Dans ce scénario, les prélèvements ne sont pas modifiés par rapport au scénario de référence (prélèvement = Qp0). Les évolutions relatives par rapport au scénario de référence sont présentées dans les illustrations suivantes (Illustration 51 et Illustration 52).

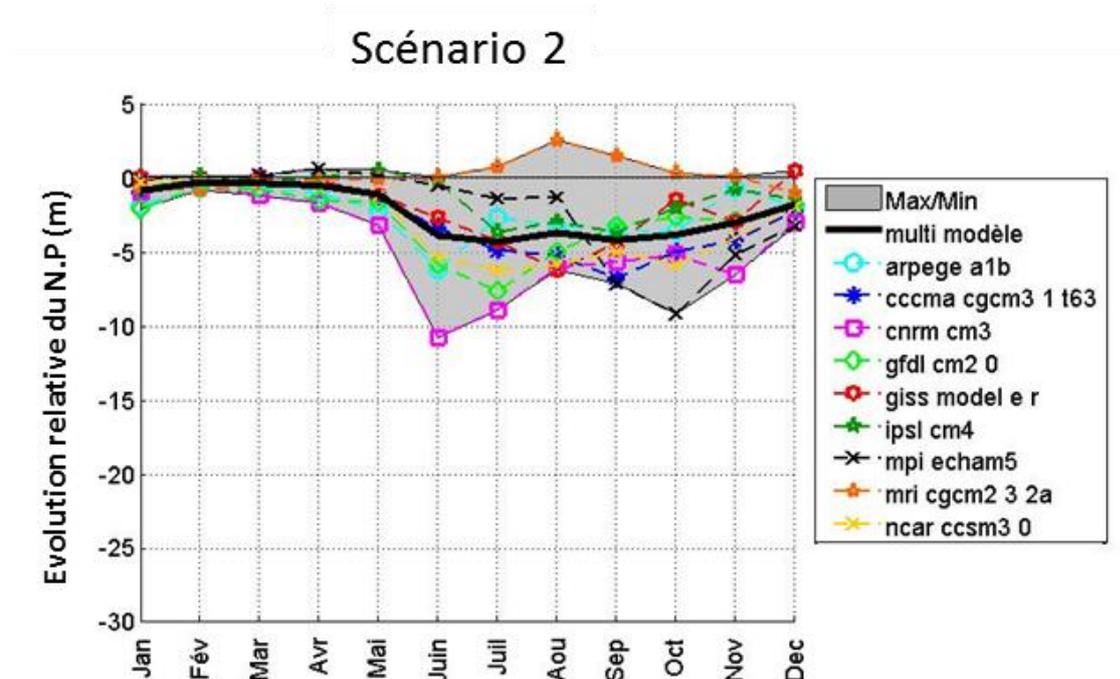


Illustration 51 : Evolution relative (en m) des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie du drain karstique du Lez par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 2 : climat futur [2046-2065] et prélèvement médian actuel [33 Mm³/an = Qp0]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an = Qp0])

A l’exception du modèle mri cgcm 2 3 2a, les scénarios climatiques à l’horizon 2046-2065 induiraient globalement une baisse des niveaux piézométriques par rapport à la situation de référence. La dispersion des modèles apparaît faible entre les mois de janvier et avril et la diminution du niveau moyen mensuel serait inférieure à -1m (moyenne multi-modèle) par rapport au scénario de référence suite à l’effet de seuil lorsque la source déborde. Pour les autres mois de l’année, la dispersion des modèles devient importante (jusqu’à près de 8 m) et les niveaux simulés seraient en moyenne (multi-modèle) inférieurs (entre 2 et 4 m) à ceux de la période de référence. Ces résultats témoignent globalement d’une diminution de la pluie efficace et donc de la recharge pour la période future. La recharge principale du système qui se produit généralement au cours des périodes automnales (septembre à novembre) apparaît globalement plus faible au futur (2046-2065) par rapport à celle de la période de référence (1971-2000). Ceci se traduit par des niveaux piézométriques situés entre 4 et 6 m plus bas que

les niveaux de référence pour pratiquement tous les scénarios (Illustration 53). Les résultats semblent également indiquer une moins bonne recharge au printemps qui se traduit par un avancement de la date à partir de laquelle les niveaux passent sous les 65 m NGF. L'ensemble de ces éléments permet d'indiquer qu'au futur, la période de sollicitation des réserves (niveau piézométrique situé sous 65 m NGF) sera globalement augmentée d'environ d'un mois par rapport au scénario de référence.

Il convient de remarquer que le modèle *mri cgcm2 3 2a* présente un comportement singulier qui se traduit par des augmentations des niveaux piézométriques moyens par rapport au scénario de référence, notamment en période estivale. Les pluies et donc les pluies efficaces calculées par ce modèle sont supérieures au futur (2046-2065) par rapport au présent (1971-2000). La discussion sur la recharge par les pluies efficaces sera abordée dans le paragraphe de synthèse et de conclusions.

Les débits de débordement futurs calculés par les modèles pour le scénario 2 présentent d'importantes dispersions par rapport au temps présent (Illustration 52). Là encore, les résultats du modèle *mri cgcm2 3 2a* sont singuliers car les débits de débordement apparaissent globalement supérieurs à ceux de la période de référence. Pour les autres modèles, on observe globalement une diminution du débit moyen de débordement (Illustration 54) pour la période future (2046-2065) par rapport à la situation actuelle (1971-2000). Ainsi, le débit moyen multi-modèles diminuerait d'une valeur comprise entre 200 à 400 l/s par rapport à celui de la période de référence pour les mois d'automne, d'hiver et du printemps (jusqu'à mai inclus). Ce résultat est une conséquence de la diminution de la pluie efficace.

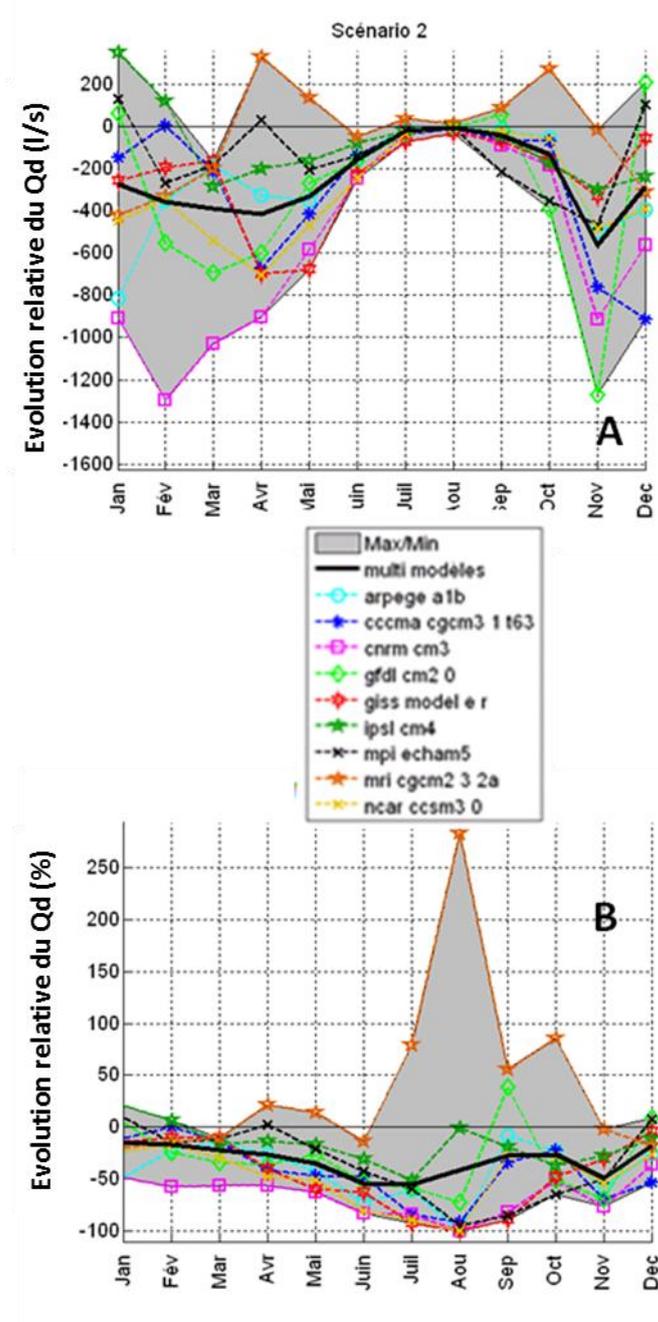


Illustration 52 : Evolution relative (A : en l/s ; B en %) des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement calculés par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 2 : climat futur [2046-2065] et prélèvement médian actuel [33 Mm³/an = Qp0]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an = Qp0])

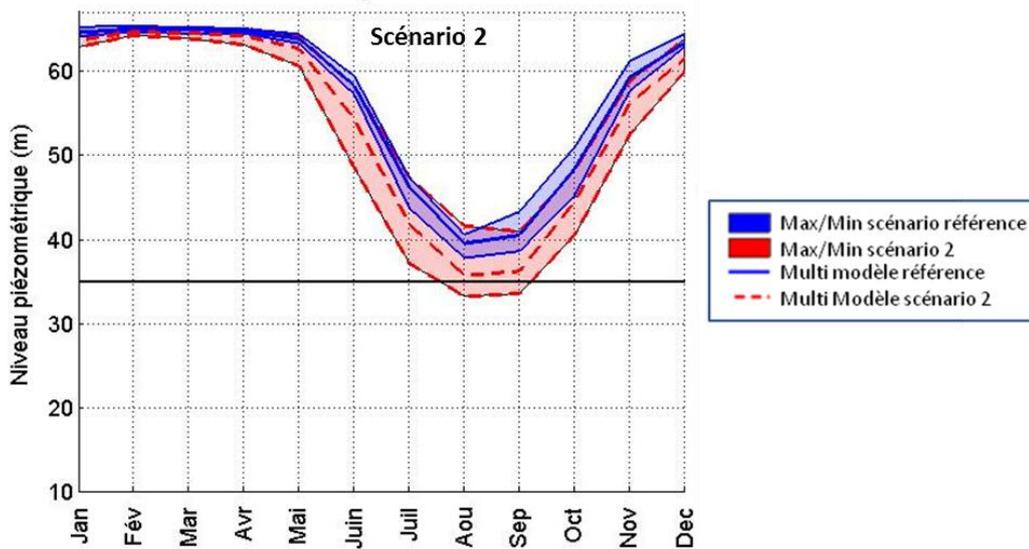


Illustration 53 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 2 [climat futur 2046-2065] et prélèvement médian actuel [$33 \text{ Mm}^3/\text{an} = Qp0$] (traits pointillé rouges). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle

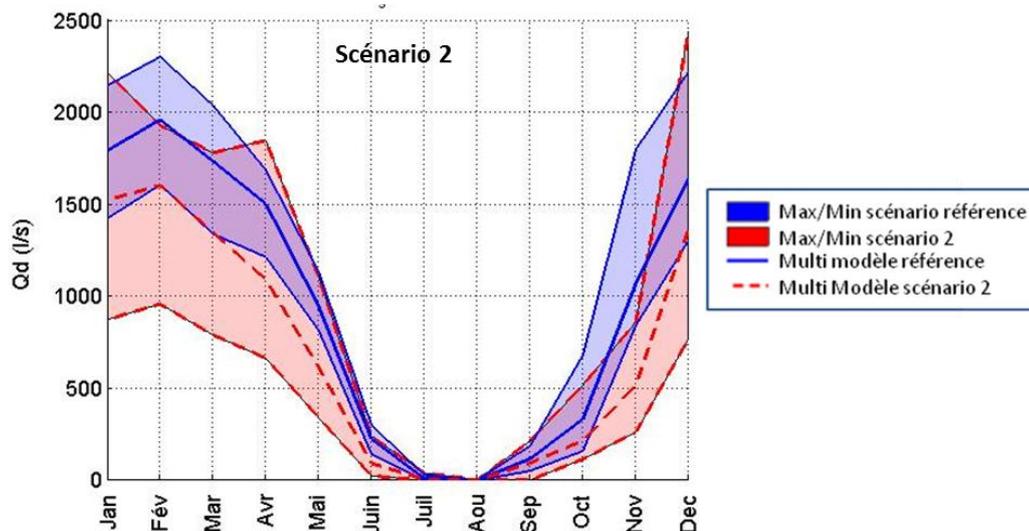


Illustration 54 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement (calculé au pas journalier). Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 2 [climat futur 2046-2065] et prélèvement médian actuel [$33 \text{ Mm}^3/\text{an} = Qp0$] (traits pointillé rouges). Les courbes enveloppes délimitent la gamme des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle.

Résultats pour le scénario 3 (impact du changement global): climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [$2010 + 50\% = 47,5 \text{ Mm}^3/\text{an} = Qp1$]

Le scénario 3 permet d'examiner l'impact cumulé du changement climatique (climat futur 2046-2065) et d'une augmentation des prélèvements sur les ressources en eau du Lez. Les résultats

des autres scénarios globaux (scénarios 4, 5 et 6 et scénarios Qp2 et Qp3) sont présentés en annexe 1.

Les évolutions relatives par rapport au scénario de référence sont présentées dans les illustrations suivantes (Illustration 55 et Illustration 56).

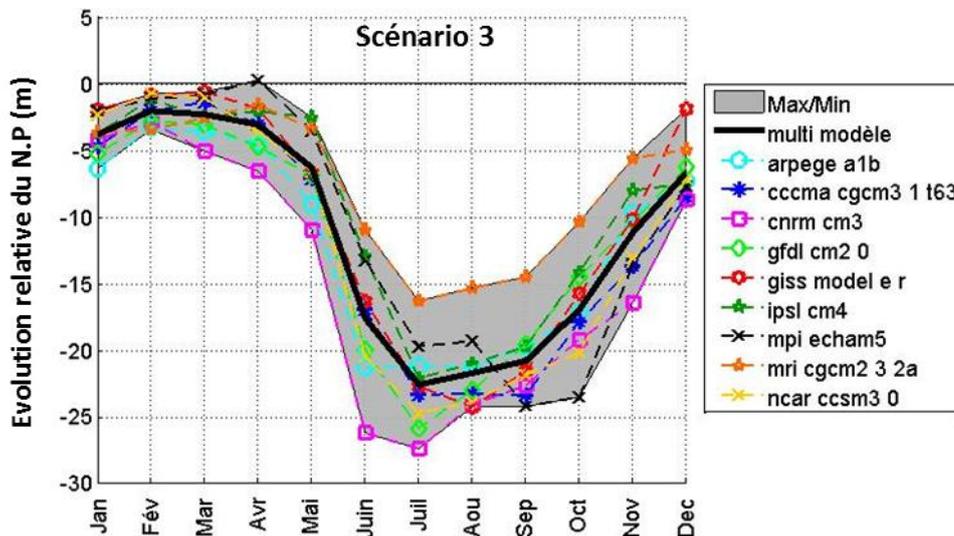


Illustration 55 : Evolutions relatives (en m) des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie du drain karstique du Lez calculées par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 3 : [climat futur 2046-2065] et prélèvement augmenté [2010+50% = 47,5 Mm³/an = Qp1]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat référence [1971-2000] et prélèvement de référence [33 Mm³/an = Qp0]).

La dispersion des résultats pour chaque modèle apparaît importante quel que soit le mois considéré. Le modèle *mri cgcm 2 3 2a* est globalement le plus optimiste, le modèle *cnrm cm3* est le plus pessimiste. La moyenne multi-modèle indique une baisse générale du niveau piézométrique par rapport au scénario de référence. Entre les mois de janvier et avril, la diminution du niveau moyen mensuel est comprise entre 3 et 4 m (moyenne multi modèle) par rapport au scénario de référence, la dispersion des résultats des modèles est inférieure à 6 m.

Pour les autres mois de l'année la dispersion des résultats pour chaque modèle augmente (jusqu'à près de 15 m). Entre les mois de juillet et septembre, l'augmentation des pompages et l'impact du changement climatique provoqueraient un rabattement supplémentaire compris entre 21 et 22 m en moyenne multi-modèle, par rapport au scénario de référence (Illustration 55). La dispersion des résultats des modèles est maximale pour les mois de juin et juillet.

Dans le scénario 3, la piézométrie moyenne interannuelle serait comprise entre 24 et 18 m NGF pour la moyenne multi-modèles entre les mois de juillet et septembre (Illustration 57). Les résultats indiquent également que les niveaux piézométriques tardent à remonter malgré la recharge automnale puisque le niveau piézométrique demeurerait globalement inférieur à la cote de 50 m NGF jusqu'au mois de novembre.

Les résultats des autres scénarios globaux (4 à 6, cf. annexe 1) indiquent que les niveaux piézométriques moyens atteints par les modèles en été (juillet et septembre) sont compris (moyenne multi modèle) :

- entre 38 m et 32 m NGF, pour le scénario 4 (Qp4 de 35,7 Mm³/a) ;

- entre 34 m et 27 m NGF, pour le scénario 5 ($Qp5$ de 40,4 Mm³/a - prélèvement médian par rapport aux scénarios du SDAEP, Tableau 2) ;
- entre 28 m et 22 m NGF, pour le scénario 6 ($Qp6$ de 45 Mm³/a).

Les niveaux piézométriques des autres scénarios de changement globaux (scénarios 4, 5, 6, $Qp2$ et $Qp3$) apparaissent globalement supérieurs à ceux du scénario 3 car les débits de prélèvement sont moins importants.

Les débits de débordement (Qd) calculés par les modèles pour le scénario 3 présentent d'importantes dispersions par rapport au scénario de référence (Illustration 56), notamment pour les mois d'automne, d'hiver et printemps. Là encore, le modèle *mri cgcm2 3 2a* apparaît globalement le plus optimiste, le modèle *cnrm cm3* est le plus pessimiste. La moyenne multi-modèle permet de souligner la baisse générale du débit moyen de débordement par rapport au scénario de référence (Illustration 56). Le débit (Qd) moyen multi-modèle diminue par rapport à celui de la période de référence, d'une valeur comprise entre 600 à 800 l/s pour les mois d'automne, d'hiver et du printemps (jusqu'à mai inclus). Ce résultat est à mettre en relation avec la diminution de la pluie efficace et l'augmentation des prélèvements (47,5 Mm³/a pour ce scénario).

Les résultats du scénario 3 indiquent également que la période d'assec de la source est augmentée de 2 mois environ (Illustration 58). Ces résultats sont à mettre en relation avec la diminution de la pluie efficace et surtout l'importance des débits de prélèvements de ce scénario (47,5 Mm³/a). En effet, pour les autres scénarios globaux (4 à 6, cf. annexe 1), la diminution des débits moyens de débordement par rapport au scénario de référence apparaît plus faible et les périodes d'assec globalement plus courtes que celles du scénario 3.

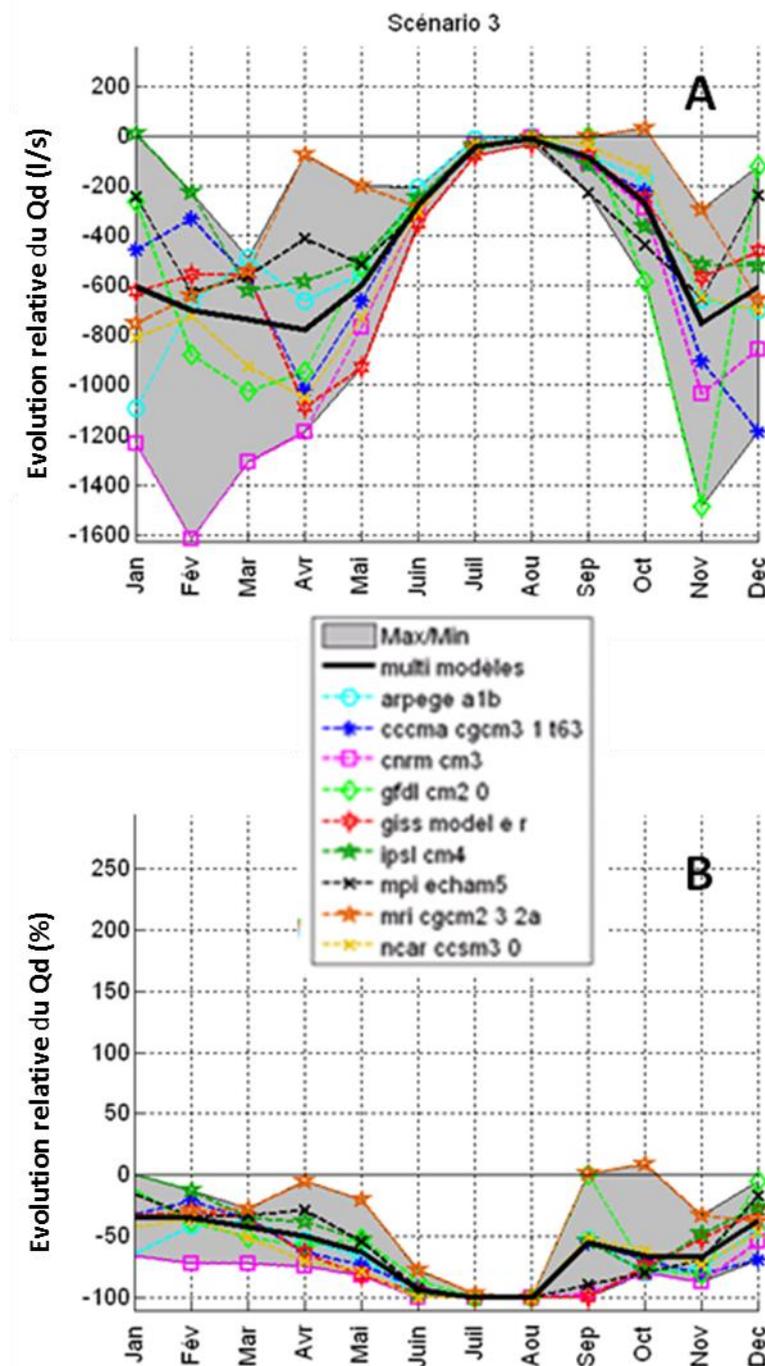


Illustration 56 : Evolution relative (A en l/s ; B en %) des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement calculés par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 3 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [2010 + 50% = 47,5 Mm³/an = Qp1]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an = Qp0])

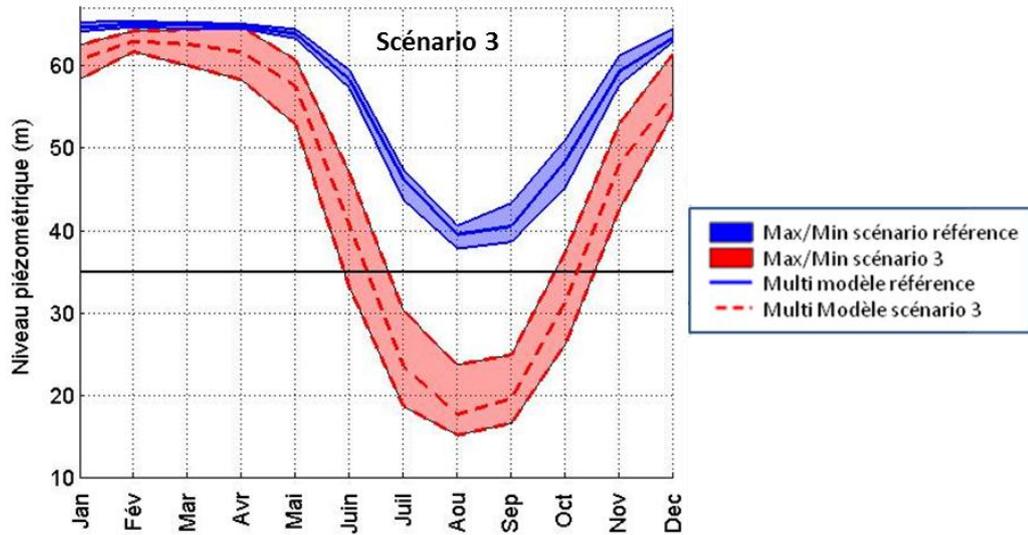


Illustration 57 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 3 climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [47,5 Mm³/an = Qp1] (traits pointillé rouges). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle

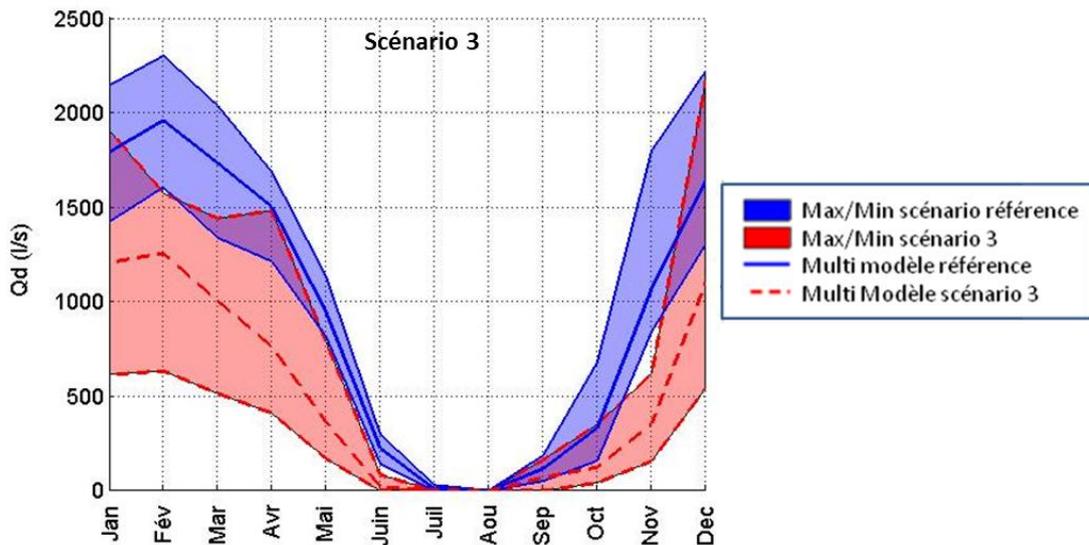


Illustration 58 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement (calculé au pas journalier). Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 3 [climat futur 2046-2065] et prélèvement augmenté [2010 + 50%= 47,5 Mm³/an = Qp1] (traits pointillé rouges). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle

Synthèse et discussion des résultats (scénarios 1, 2, 3 versus référence)

Impact sur la pluie efficace (recharge de l'aquifère)

L'illustration 34 permet de synthétiser les résultats du changement climatique en termes d'anomalie de température et de précipitation. A l'horizon 2046-2065, les températures moyennes annuelles et saisonnières augmenteront de 1,7 °C à 2,7 °C par rapport à la période de référence (1971-2000). Pour la pluie, une très légère tendance à la diminution des cumuls de pluie semblerait se dessiner à l'horizon 2046-2065 par rapport à la situation de référence (1971-2000), de l'ordre de 10 % (médiane multi-modèle) à l'échelle annuelle. Les cumuls moyens de pluie des périodes hivernale (DJF) et estivale (JJA) apparaissent comparables à ceux de la période de référence. Les différences se manifestent globalement au printemps (MAM) et à l'automne (SON) avec une diminution du cumul de pluie respectivement, de 13% et 10% (médiane multi-modèle).

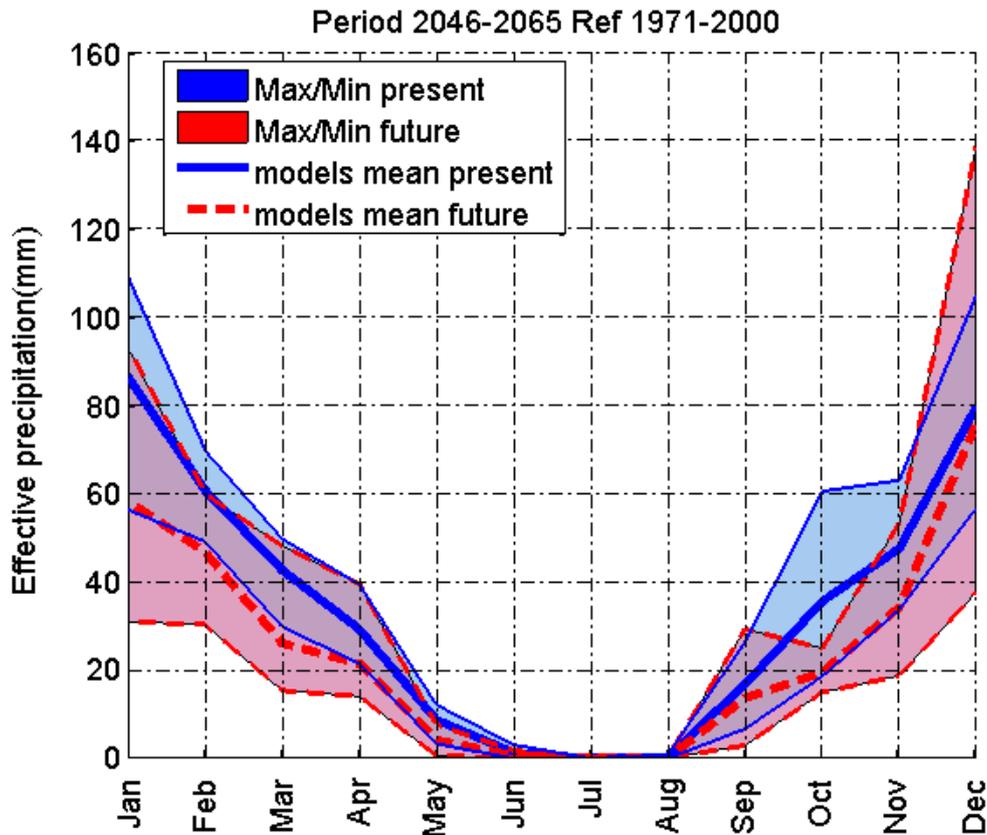


Illustration 59 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles des cumuls de pluie efficace. Scénario climatique de référence [1970-2000] et scénario climatique futur [2046-2065] des 9 modèles de climat

En termes de pluie efficace, ces évolutions se traduiraient, pour la période de référence (1971-2000), par un cumul moyen des pluies efficaces des mois d'été (juin, juillet et août) égal à 0. Pour le futur (2046-2065), la situation serait similaire. Pour les autres mois de l'année, les pluies efficaces devraient diminuer (Illustration 59). La dispersion des résultats apparaît plus grande pour la période future que pour le présent, mis à part au mois d'octobre, où l'écart entre la valeur maximale et minimale simulée pour les différents modèles est de l'ordre de 40 mm au présent contre 10 mm au futur.

La recharge par les pluies efficaces serait donc fortement diminuée au futur, avec une baisse de -30% du cumul annuel moyen de pluie efficace en moyenne multi-modèles. Les deux saisons les plus touchées seraient le printemps et l'automne pour lesquelles, la moyenne multi-

modèles des cumuls de pluie efficace diminuerait le plus en comparaison des précipitations (-35% au printemps et -30% en automne, contre -10% et -7% pour les cumuls de précipitations). En hiver, la diminution serait moindre, avec une baisse de -20% de la pluie efficace, alors que le cumul de précipitations pour la même saison est stable en moyenne multi-modèles.

Les incertitudes liées à la dispersion des modèles sont plus élevées pour la pluie efficace que pour les précipitations, principalement au printemps et en automne (Illustration 59). Le modèle *mri_cgcm2_3_2a* présente un comportement singulier puisqu'il est le seul modèle pour lequel on observe une augmentation de la pluie efficace en été (figure non présentée).

Impact sur le niveau piézométrique

La comparaison des résultats des différents scénarios étudiés permet de mettre en avant que l'impact du changement climatique (scénario 2) apparaît comparativement plus faible que l'impact d'une augmentation des prélèvements (scénario 1) par rapport au scénario de référence. Dans le scénario 2 (impact du climat uniquement⁴), le niveau piézométrique baisserait de -3 à -4 m (juillet-septembre) par rapport au scénario de référence, alors que la baisse atteindrait -18 à -20 m (moyenne multi-modèle) pour le scénario 1 (impact du prélèvement uniquement). Le scénario n°3 qui traduit un changement global (climatique et prélèvements) provoquerait logiquement des baisses plus importantes que les deux précédents, du niveau piézométrique en été (juillet-septembre), comprises entre -21 à -22 m (moyenne multi-modèles) par rapport au scénario de référence. Dans ce scénario n°3, l'effet du changement climatique se surimpose à celui de l'augmentation des prélèvements ce qui conduirait à une amplification du rabattement. Les autres scénarios globaux testés (4, 5, 6, Qp2 et Qp3, annexe 1) induiraient des rabattements moins importants que ceux du scénario n°3 car les débits de pompage testés sont plus faibles. Une synthèse des principaux résultats des différents scénarios testés est reportée dans le Tableau 5.

L'impact des différents scénarios testés peut être également décrit statistiquement à l'aide des fréquences d'occurrence et des graphiques « boîtes à moustaches » (Illustration 60).

⁴ Les résultats obtenus traduisent exclusivement l'impact du changement climatique, le débit de pompage étant identique sur les deux périodes (Qp0).

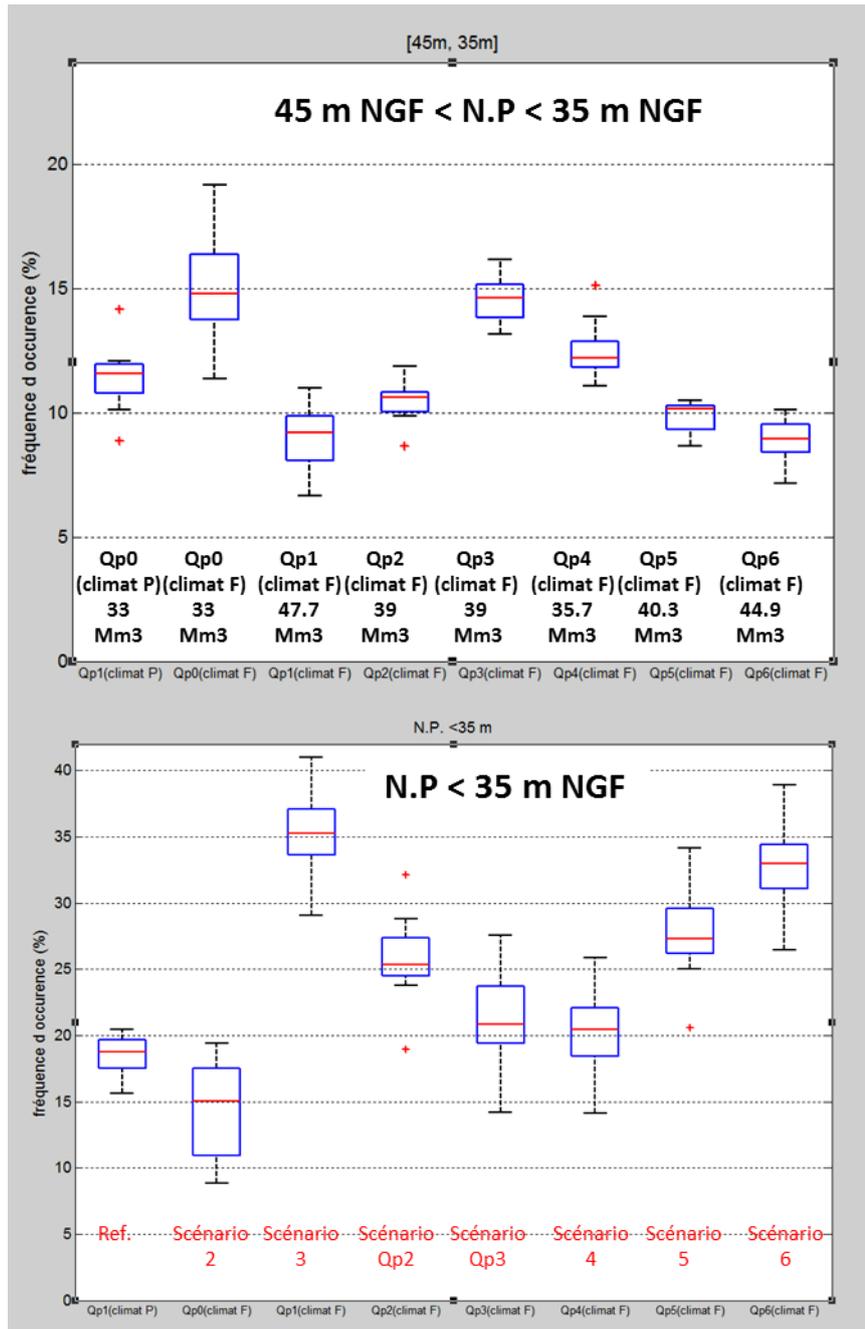


Illustration 60 : Dispersion des fréquences d'occurrences du niveau piézométrique calculées à l'aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de changement globaux (Climatique + Prélèvement augmenté) et le scénario de référence (représentation en diagramme « Boîtes à moustaches »), pour deux intervalles de niveau piézométrique distincts». Les fréquences d'occurrence sont calculées en considérant le nombre total d'occurrences des différents scénarios qui satisfont le critère d'analyse.

Les 5 critères d'analyse calculés (45 m < N.P. (m NGF) < 35 m ; N.P. < 35 m ; N.P. < 30 m ; N.P. < 20 m NGF et N.P. < 10 m NGF) permettent de décrire la situation dans chaque scénario du point de vue de la piézométrie de l'aquifère. En annexe 1, une comparaison avec les autres scénarios considérés est également présentée.

Pour le scénario de référence, la valeur médiane multi-modèle de la fréquence d'occurrence correspondante à un niveau piézométrique situé dans la classe [45-35 m NGF], est de l'ordre de 9% (Illustration 60). Ceci signifie que la piézométrie est située dans cette tranche d'eau environ 985 jours sur les 30 années ($985/(365*30)=9\%$) de la période de référence [1971-2000]. Ensuite, il apparaît que le niveau piézométrique ne franchirait pas ou très peu (<1%) le seuil des 35 m NGF et, logiquement, pas du tout les seuils situés plus bas.

Pour le scénario 2 (impact du changement climatique uniquement⁵), on constate que la valeur médiane multi-modèle de la fréquence d'occurrence correspondante à un niveau piézométrique situé dans la classe [45-35 m NGF], augmente pour atteindre près de 15%. Ceci signifie que la piézométrie est située dans cette tranche d'eau environ 1095 jours sur les 20 années ($1095/(20*365)=15\%$) simulées par les scénarios climatiques [2046-2065]. La situation vis-à-vis du seuil à 35 m NGF indique un dépassement de l'ordre de 15 % également, soit 1095 jours sur les 20 années considérées au futur (37 jours par an en moyenne interannuelle). La situation vis-à-vis du seuil à 30 m NGF (Illustration 150 en annexe 1) indique un dépassement de l'ordre de 4%, soit 292 jours sur les 20 années considérées au futur (10 jours par an en moyenne interannuelle).

Pour le scénario 1 (impact d'une augmentation du prélèvement uniquement), la valeur médiane « multi-modèles » de la fréquence d'occurrence correspondante à un niveau piézométrique situé dans la classe [45-35 m NGF] est de 12% environ (Illustration 150 en annexe 1). Ceci signifie que la piézométrie serait située dans cette tranche d'eau environ 1314 jours sur les 30 années ($1314/(365*30)=12\%$) de la période de référence (1971-2000). Pour ce scénario 1, les niveaux piézométriques seraient globalement plus bas en étiage, comme l'atteste la situation vis-à-vis du seuil de 35 m NGF, qui serait dépassé 18% du temps en valeur médiane multi-modèle (Illustration 150 en annexe 1), soit 1971 jours ($1971/365*30=18\%$) sur les 30 années de la période de référence [1971-2000]. De même, les seuils à 30 m NGF, 20 m NGF et à 10 m NGF seraient dépassés respectivement 17%, 13 % et 0,5% du temps en valeur médiane multi-modèles, soit respectivement 1861 jours, 1423 et 55 jours sur les 30 ans de la période de référence (Illustration 150 en annexe 1). Il convient de remarquer que le modèle pessimiste (*giss model e r*) présente une fréquence de dépassement du seuil à 10 m NGF légèrement supérieure à 1%.

Pour le scénario 3 (impact du changement climatique et augmentation importante du prélèvement), on constate (Illustration 60) que la fréquence d'occurrence dans la classe 45-35 m NGF] de la médiane multi-modèles est de 8 % (584 jours pour la période des 20 ans étudiés par les scénarios climatiques [2046-2065]). Comme dans le cas du scénario 1, ce résultat s'explique par le fait que les niveaux piézométriques, seraient dans ce scénario, globalement plus bas, puisque le seuil à 35 m NGF serait dépassé 35% en valeur médiane multi-modèles (Illustration 60), soit 2555 jours ($2555/7300=35\%$) sur les 20 années étudiées par les scénarios climatiques [2046-2065]. Les seuils à 30 m NGF, 20 m NGF et à 10 m NGF seraient dépassés respectivement 32%, 19 % et 1,4% du temps en valeur médiane multi-modèle, soit respectivement 2336 jours, 1387 jours et 109 jours sur les 20 années étudiées par les scénarios climatiques [2046-2065] (Illustration 150 en annexe 1). Il convient de noter que le modèle optimiste (*mri cgcm2 3 2a*) ne passe jamais sous le seuil à 10 m NGF, tandis que le modèle pessimiste (*cnrm cm3*) le franchit près de 15% du temps sur la période considérée. Les résultats des autres scénarios testés sont reportés dans le tableau de synthèse (Tableau 5).

⁵ Les résultats obtenus traduisent exclusivement l'impact du changement climatique, le débit de pompage étant identique sur les deux périodes.

Pour l'ensemble des scénarios, la valeur moyenne « multi-modèles » des niveaux minimum journaliers atteints, ainsi que la valeur minimale tous modèles confondus, sont présentées dans le Tableau 4. Les valeurs minimales atteintes pour les scénarios 1 et 3 sont proches de 7 m NGF et sont liées à l'importance des débits de pompage (47,5 Mm³, débit de pompage estivaux de l'ordre de 1900 l/s, cf. Illustration 42).

Lez Multi usages	NP minimum multi modèles (m NGF)	NP minimum (m NGF)
Référence	36	33
Scénario 1	7,5	7
Scénario 2	34,2	33
Scénario 3	7,7	7

Tableau 4 : Niveau minimum de la piézométrie journalière calculée par les modèles hydroclimatiques selon les scénarios considérés (NP : niveau piézométrique)

Impact sur le débit de débordement

Dans l'analyse, nous avons cherché à caractériser les assecs de la source du Lez (période correspondant à un débit de débordement nul, $Qd = 0$ l/s). De manière à utiliser un deuxième critère, il est apparu intéressant de connaître la fréquence d'occurrence annuelle du critère $Qd < 160$ l/s (débit de restitution fixé par la DUP pour la source du Lez), afin que le gestionnaire puisse connaître le nombre de jours moyen annuel où il sera nécessaire d'assurer la condition de débit réservé fixé par la DUP. Les résultats sont décrits à l'aide des graphiques «boîtes à moustaches» (Illustration 61). Les résultats complémentaires relatifs aux autres scénarios sont présentés en annexe 1 et dans le tableau de synthèse (Tableau 5).

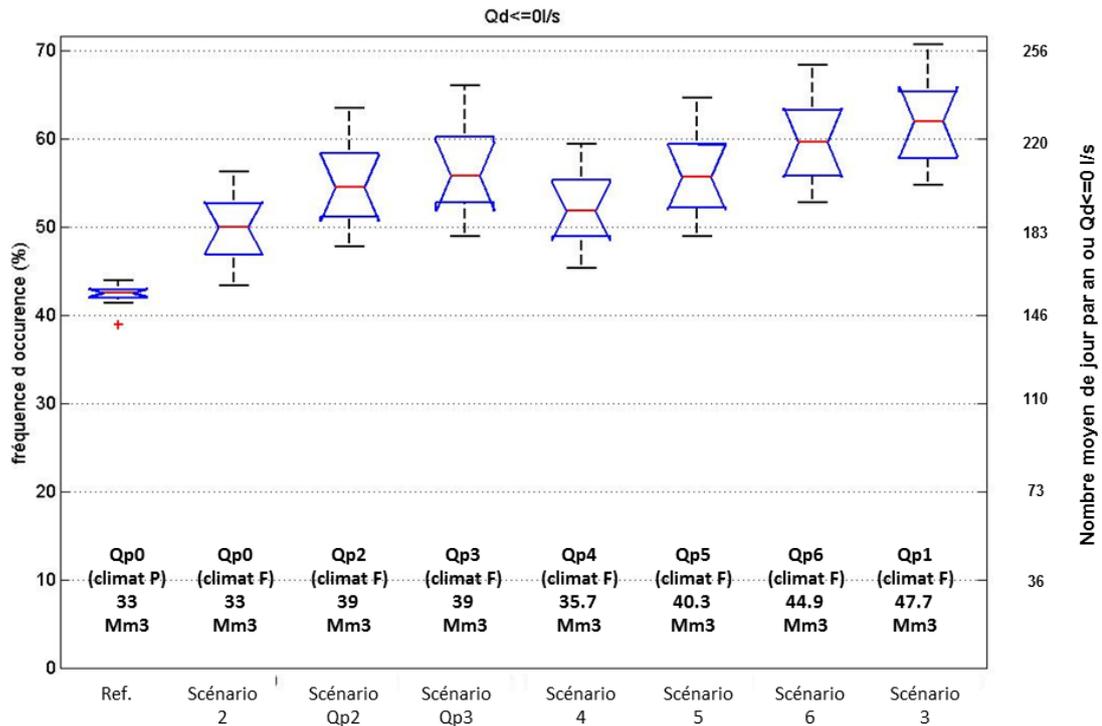


Illustration 61 : Dispersion de la fréquence d’occurrence pour lequel le débit de débordement à la vasque est nul ($Q_d = 0$ l/s) calculée à l’aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les principaux scénarios de changements globaux (Climatique + Prélèvement augmenté) et le scénario de référence (représentation en diagramme « Box-Plot »). La même information statistique exprimée en nombre de jours moyen (moyenne interannuelle) où $Q_d = 0$ l/s est également reportée

Pour le scénario de référence, le nombre de jours moyen annuel pour lequel le débit de débordement est nul ($Q_d = 0$ l/s) est de 153 jours (valeur médiane multi-modèles). Le nombre de jours moyen annuel où $Q_d < 160$ l/s est de 168 jours, soit 46 % (Tableau 5). La dispersion des résultats pour les différents modèles (mesurée comme l’écart interquartile – différence entre le 1^{er} et le 3^{ème} quartile, barres supérieure et inférieure de la boîte à moustache) apparaît globalement faible (~ 5 jours).

Pour le scénario 2 (impact du changement climatique, uniquement), bien que l’incertitude soit plus importante au futur (écart interquartile plus élevé), on constate néanmoins une augmentation de la durée des assecs de la source par rapport au scénario de référence (183 jours contre 153 jours, en valeur médiane multi-modèles). De même, le nombre de jours moyen annuel où $Q_d < 160$ l/s passe de 168 à 197 jours par rapport au scénario de référence, soit 54 % du temps (Tableau 5). La dispersion des résultats pour les différents modèles apparaît importante (60 jours), l’écart interquartile apparaît élevé de l’ordre de 25 jours. Le nombre de jours moyen annuel pour lequel $Q_d = 0$ l/s varie entre 160 jours pour le modèle optimiste (*mri cgm2 3 2a*) et 210 jours pour le modèle pessimiste (*cnrm cm3*).

Pour le scénario 1 (impact d’une augmentation importante du prélèvement, uniquement), on constate une importante augmentation de la durée des assecs de la source par rapport au scénario de référence (197 jours contre 153 jours, en valeur médiane multi-modèles). De même, le nombre de jours moyen annuel où $Q_d < 160$ l/s évolue de 168 à 241 jours par rapport au scénario de référence, soit 66 % du temps (Tableau 5). La dispersion des résultats pour les différents modèles apparaît globalement faible (25 jours).

Pour le scénario 3 (impact du changement climatique et d'une augmentation importante du prélèvement), on constate une importante augmentation de la durée des assecs de la source par rapport au scénario de référence (226 jours contre 153 jours, médiane). La dispersion des résultats pour les différents modèles apparaît importante (60 jours). De même, le nombre de jours moyen annuel où $Qd < 160$ l/s passe de 168 à 245 jours par rapport au scénario de référence, soit 67% du temps (Tableau 5). La dispersion des résultats pour les différents modèles apparaît importante (60 jours environ), le nombre de jours moyen annuel où $Qd < 160$ l/s varie entre 201 jours pour le modèle optimiste (*mri cgcm2 3 2a*) et 256 jours pour le modèle pessimiste (*cnrm cm3*).

Le dernier critère d'analyse concerne les débits de crue, et notamment le QJAX, qui correspond au débit maximal journalier de période de retour 10 ans calculé à partir des fonctions de répartition empirique. Cette analyse a été réalisée sur les débits de débordement journalier calculés par chacun des modèles hydroclimatiques. Pour chaque modèle, nous avons extrait les débits maximum journaliers calculés pour chacune des années des périodes considérées (30 valeurs pour la période de référence 1971-2000 et 20 valeurs pour la période futur 2046-2065). Les fonctions de répartition empiriques calculées pour ces deux populations ont été soumises au test de Kolmogorov-Smirnov avec l'hypothèse que les fonctions de distribution suivent la loi log-normale. Au seuil de signification de 5%, les fonctions de répartition déterminées pour les différents modèles suivent des lois log-normales. Sur la base de ces résultats, le débit maximal de période de retour 10 ans a été calculé. Les résultats sont présentés de manière synthétique à l'aide des boîtes à moustaches (Illustration 62).

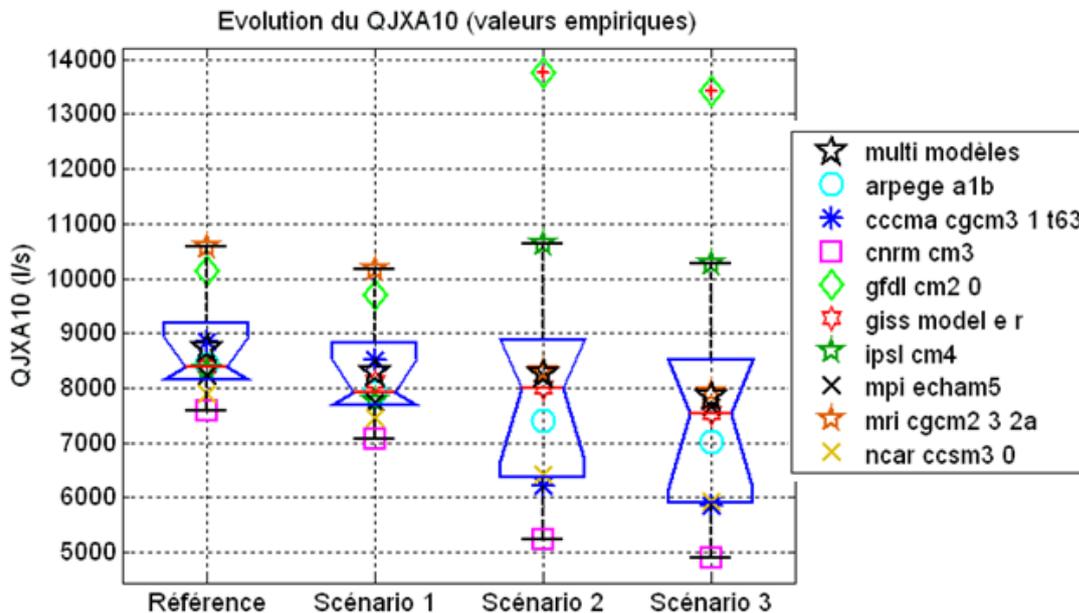


Illustration 62 : Dispersion du débit journalier maximal de période de retour 10 ans calculée à l'aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les scénarios 1, 2 et 3 et le scénario de référence. Les valeurs sont calculées à partir des fonctions de répartition théoriques (log-normal) qui ont été soumises au test de Kolmogorov Smirnov, avec un niveau de signification $\alpha=5\%$

Pour le scénario de référence, le débit maximal journalier de période de retour 10 ans (QJAX) calculé par les différents modèles présente une dispersion significative (3000 l/s). Le débit

(QJAX) apparaît compris entre 7500 l/s (*cnrm cm3*) et 10500 l/s (*mri cgm2 3 2a*). La valeur médiane multi-modèles est de 8200 l/s.

L'impact du changement climatique (scénario 2) semble se traduire par une légère diminution du QJAX médian par rapport au scénario de référence (de 8200 l/s à 8000 l/s). Néanmoins, ces résultats sont à pondérer car la dispersion entre les modèles est très importante (comprise entre 5000 l/s (*cnrm cm3*) et 13800 l/s (*mri cgm2 3 2a*)). Pour le modèle pessimiste (*cnrm cm3*), les crues de fréquence décennale seront d'intensité moindre à l'horizon 2046-2065. A l'inverse, pour le modèle optimiste (*mri cgm2 3 2a*) les crues de fréquence décennale seront de plus forte intensité. Ces résultats sont à mettre en relation avec la quantité de pluie journalière des différents scénarios et de manière plus globale avec les anomalies de précipitation saisonnière telles que décrites dans l'illustration 33 (anomalie positive de précipitation pour le modèle *mri cgm2 3 2a*, anomalie négative de précipitation pour le modèle *cnrm cm3*).

L'impact d'une augmentation des prélèvements (scénario 1) se traduit par une dispersion similaire à celle observée pour le scénario de référence). Par contre, on observe globalement une diminution du QJAX, en valeur médiane multi-modèles, qui est de 8000 l/s contre 8200 l/s pour le scénario de référence. Si cette différence est jugée significative, ce résultat illustre le rôle de « modérateur de crue » que peut jouer un système karstique soumis à une gestion active. En effet, lors des premières crues automnales (qui sont généralement les plus fortes), une partie des flux d'eau contribue à recharger les réserves sollicitées par les pompages estivaux (plus importants dans ce scénario), ce qui limite ou réduit l'importance des crues de reprise de cycle hydrologique.

L'impact du changement global (climatique et prélèvement, scénario 3) se traduit par une amplification des tendances à la diminution de l'intensité des crues de fréquence décennale. Ainsi, la valeur médiane multi-modèles du QJAX est de 7500 l/s pour ce scénario contre 8200 l/s pour le scénario de référence, soit une différence de 700 l/s environ. Là encore, cette différence traduit de manière globale, le phénomène de reconstitution des réserves suite aux périodes de sollicitation des réserves du karst par les pompages plus importants dans ce scénario. Ces résultats sont également à mettre en perspective avec ceux obtenus précédemment (illustration 57) où il apparaît que les débits moyens mensuels de débordement sont réduits par rapport à ceux du scénario de référence.

3.2.5. Conclusion

Les scénarios de changement climatique semblent avoir un impact plus marqué sur la recharge par les pluies efficaces (quantité d'eau qui contribue à recharger les aquifères) que sur la pluviométrie elle-même. La recharge par les pluies efficaces serait ainsi fortement diminuée au futur, se traduisant par une baisse de -30% du cumul annuel moyen de pluie efficace en valeur moyenne multi-modèles. Cette réduction s'observerait surtout sur les périodes automnales et printanières, et dans une moindre mesure en hiver. Le cumul moyen des pluies efficaces des mois d'été (juin, juillet et août), qui est nul pour la période présente (1971-2000), le demeurerait logiquement au futur (2046-2065). Ainsi, c'est au printemps et en automne que les cumuls de pluie efficace diminueraient le plus en comparaison des cumuls de précipitations, avec -35% au printemps et -30% en automne (contre -10% et -7% pour les cumuls de précipitations), en valeur moyenne multi-modèle. En hiver, une baisse de -20% de la pluie efficace serait observée alors que le cumul de précipitations pour la même saison serait stable en moyenne multi-modèles.

Cette diminution significative de la recharge induirait un impact vis-à-vis des ressources en eau contenues dans les systèmes karstiques. L'impact du changement climatique se manifesterait alors par une diminution de la piézométrie notamment lors des périodes estivales, pendant lesquelles les niveaux piézométriques seraient plus fréquemment situés dans la tranche d'eau 45-35 m NGF (fréquence d'occurrence de 15% au futur contre 9% pour la période de référence⁶). L'impact du changement climatique se traduirait aussi par une légère augmentation de la durée des assecs de la source du Lez (+30 jours en moyenne par rapport à la période de référence), ainsi que par une légère diminution du débit moyen de débordement de la source lors des périodes de hautes eaux (-200 l/s à -400 l/s). Enfin, il provoquerait une légère réduction des débits de crues décennaux.

L'impact d'un prélèvement fort a été évalué à l'aide d'une chronique de pompage ($Qp1$), définie par un ratio de pompage de 1,33 entre les mois d'été et d'hiver [(1763 l/s)/(1122 l/s)] et un volume annuel de 47,5 millions de m³. Ce scénario 1 permet donc d'examiner l'impact d'une forte augmentation des débits de pompage (+44 % par rapport au volume médian (33 Mm³/a) de la période récente [2000-2010]) sur les ressources en eau du Lez avec un scénario proche du scénario de prélèvement le plus élevé du SDAEP. Dans ce scénario 1, le climat n'est pas modifié par rapport au scénario de référence (climat de la situation de la période 1971-2000 de référence). Dans ce scénario, l'impact d'une forte augmentation des pompages se traduirait par une importante baisse des niveaux piézométriques par rapport à la situation de référence. Entre les mois de juillet et septembre, l'augmentation des pompages provoquerait entre -18 et 20 m de rabattement supplémentaires (moyenne « multi-modèles ») par rapport au scénario de référence et la piézométrie moyenne interannuelle serait comprise entre 25 m NGF et 20 m NGF. La fréquence d'occurrence de dépassement du seuil à 35 m NGF serait d'environ 18 % (en valeur médiane multi-modèle), ce qui signifie que ce seuil serait franchi près de 18 % du temps, soit environ 66 jours par an en moyenne interannuelle. La fréquence d'occurrence du passage sous le seuil à 20 m NGF, serait de 13 % en valeur médiane multi-modèle (près de 47 jours par an en moyenne interannuelle). Le niveau minimum moyen mensuel atteint tous modèles confondus serait de 7 m NGF. Ce scénario aurait aussi comme impact une importante augmentation de la durée des assecs de la source du Lez par rapport au scénario de référence (197 jours contre 153 jours, en valeur médiane multi-modèle). De même, le nombre de jours moyen annuel où $Qd < 160$ l/s (débit réservé de la DUP) évoluerait de 168 à 241 jours par rapport au scénario de référence. L'impact de ce scénario d'augmentation des pompages se traduirait également par une diminution du débit moyen de débordement de la source lors des périodes de hautes eaux (réduction de 200 l/s à 400 l/s des débits moyens mensuels, en valeur médiane multi-modèle) par rapport au scénario de référence. Un effet sur l'intensité des débits de crues décennaux (QJAX) pourrait également se faire sentir (légère diminution de la valeur du QJAX en valeur médiane multi-modèle).

L'impact du changement global (combinaison du changement climatique à l'horizon 2046/2065 et d'une augmentation des prélèvements sur les ressources en eau du Lez) a été évalué à l'aide des scénarios 3, 4, 5, 6, Qp2 et Qp3. Ces cinq derniers scénarios sont caractérisés par des débits de pompage plus faibles que celui du scénario 3 (47,5 millions de m³/a). Ainsi, l'impact du changement global se traduirait par une baisse générale du niveau piézométrique par rapport au scénario de référence. Pour le scénario 3, **l'augmentation des pompages et l'impact du changement climatique provoqueraient plus de 22 m de rabattement supplémentaires par rapport au scénario de référence** entre les mois de juillet et septembre, **la piézométrie moyenne mensuelle interannuelle serait comprise entre 25 m NGF et 15 m**

⁶ Dans ce scénario (scénario 2 dans le texte), le débit de pompage (Qp) est identique sur les deux périodes (présent et futur) => chronique de pompage $Qp0$

NGF en période d'étiage (le rabattement serait moindre pour les autres scénarios globaux testés, cf. Tableau 5). Dans ce scénario 3, les résultats indiquent également que les niveaux piézométriques tarderaient à remonter puisqu'ils demeureraient globalement inférieurs à la cote 50 m NGF jusqu'au mois de novembre. Dans ce même scénario, **la fréquence d'occurrence de dépassement du seuil à 35 m NGF serait d'environ 35 % (en valeur médiane multi-modèle), ce qui signifie que les niveaux piézométriques moyens mensuels seraient situés sous ce seuil près de 35 % du temps sur la période des 20 années considérées [2046-2065], soit près de 85 jours par an en moyenne interannuelle.** Dans cette situation, les niveaux piézométriques seraient situés près de 19% du temps dans la tranche d'eau inférieure à 20 m NGF (Tableau 5). Pour les autres scénarios globaux testés, la fréquence d'occurrence de dépassement du seuil à 20 m NGF serait plus faible (< 3%), soit moins de 7 jours par an en moyenne interannuelle, y compris pour le scénario 5 dont le prélèvement est médian par rapport aux prévisions du SDAEP.

Climat	Prélèvement	Nom Scénario (cf texte)	(*) Baisse été/ Référence (en moy. mensuelle)	Fréquences d'occurrences (médiane Multi-Modèle)					Fréquences d'occurrences Médiane Multi-Modèle			(**) Baisse Qd moy/ Référence (en moy. mensuelle)
				[45 à 35 mNGF]	[< 35 m NGF]	[< 30 m NGF]	[<20 m NGF]	[<10 m NGF]	Qd= 0 l/s (Qd= débit de débordement)	Qd<160 l/s	Qd>160 l/s	
Présent	33 Mm3	référence		9%	0%	0%	0%	0%	42%	46%	54%	
Present	39 Mm3	Qp2	-6 m à -11 m	13%	5%	n.d.	0,5%	0%	47%	50%	50%	-250 à -400 l/s
Present	40,4 Mm3	Qp5	-6 m à -12 m	14%	7%	n.d.	1,5%	0%	48%	52%	48%	-250 à -400 l/s
Présent	47,5 Mm3	1	-18 m à -20m	12%	18%	17%	13%	0,5%	54%	66%	34%	-200 à -400 l/s
Futur	33 Mm3	2	-4 m à -5m	15%	15%	4%	0%	0%	50%	54%	46%	-250 à -400 l/s
Futur	47,5 Mm3	3	-21 m à -22m	8%	35%	32%	19%	1,5%	62%	67%	33%	-600 à -750 l/s
Futur	35.7 Mm3	4	-7 m à -8 m	13%	21%	12%	0%	0%	52%	56%	44%	-300 à -600 l/s
Futur	40,4 Mm3	5	-12 m à -13m	10%	27%	21%	3%	0%	55%	61%	39%	-400 à -600 l/s
Futur	45 Mm3	6	-17 m à -19 m	8%	33%	28%	13%	0%	60%	64%	36%	-500 à -700 l/s
Futur	39 Mm3	Qp2	-10 m à -15 m	11%	25%	18%	1,5%	0%	54%	59%	41%	-400 à -600 l/s
Futur	39 Mm3	Qp3	-5 m à -6 m	14%	22%	10%	0%	0%	55%	62%	38%	-400 à -600 l/s

(*) mois de juillet à septembre

(**) mois de novembre à mai inclus

En grisé: scénario de pompage Qp5 correspondant à un scénario méian du SDAEP

Les fréquences d'occurrences sont calculées en considérant le nombre total d'occurrence des différents scénarios sur les périodes considérées (30 et 20 ans respectivement, pour le climat présent et le futur)

Exemple de lecture :

Pour le climat présent, le scénario de référence présente un niveau piézométrique compris dans la tranche d'eau [45m-35m, NGF] environ 9% du temps, soit près de 33 jours par an en moyenne interannuelle

Pour le scénario de référence, la fréquence d'occurrence d'un débit de débordement nul (Qd<=0 l/s) s'observe près de 42% du temps, soit environ 153 jours par an en moyenne interannuelle

Tableau 5 : Synthèse des principaux résultats de l'évaluation de l'impact de changement global (climatique et prélèvement)

Pour le critère de débit de débordement, l'impact du changement global se traduirait par une amplification des tendances à la diminution de l'intensité des crues de fréquence décennale. Ce résultat permet d'illustrer le rôle de « modérateur de crue » que peut jouer un système karstique soumis à une gestion active par pompage. En effet, lors des premières crues

automnales (qui sont généralement les plus fortes), une partie des flux d'eau contribue à recharger les réserves sollicitées par les pompes estivales (plus importants qu'au présent dans le cas des scénarios globaux testés), ce qui limiterait ou réduirait l'importance des crues de reprise de cycle hydrologique. Ce phénomène traduit de manière globale, la reconstitution des réserves qui a lieu suite à la période de sollicitation des réserves du karst par les pompes. Ces résultats sont également à mettre à mettre en perspective avec les valeurs des débits moyens mensuels de débordement de la source du Lez. **Les débits de débordement (Q_d) en contexte de changement global seraient réduits par rapport à ceux du scénario de référence, avec une diminution comprise entre -600 et -800 l/s pour les mois d'automne, d'hiver et de printemps (jusqu'à mai inclus) pour le scénario 3.** Ce résultat est à mettre en relation avec la diminution de la pluie efficace et l'augmentation des prélèvements (47,5 millions de m^3/a) pour ce scénario. **L'impact du changement global se traduirait également par une importante augmentation de la durée des assecs de la source par rapport au scénario de référence** (226 jours contre 153 jours, en valeur médiane multi-modèle). De même, le nombre de jours moyen annuel où $Q_d < 160$ l/s passe de 168 à 245 jours par rapport au scénario de référence.

3.3. IMPACT DU CHANGEMENT DE POMPAGE PAR L'APPROCHE POKA

3.3.1. Introduction

Le modèle POKA prend en compte de façon explicite les échanges entre matrice et drain au moyen d'une solution analytique appliquant la loi de Darcy. Il repose sur un certain nombre d'hypothèses de travail énoncées dans le rapport BRGM/RP-60222-FR (Borrell-Estupina et al. 2012). On se référera au chapitre 4 de ce dernier rapport pour une description détaillée du modèle.

L'objectif de l'application du modèle POKA au pas de temps horaire est de tester des scénarios de pompage en période sèche, en l'absence d'apports d'eau par la recharge.

3.3.2. Résultats d'une simulation de longue durée – comparaison avec Tempo

Le modèle POKA, initialement développé dans le cadre d'une étude précédente (Ladouche et al. 2005) pour la simulation d'un pompage d'essai d'une durée d'un mois, a été testé sur le Lez en simulation sur une période de durée plus longue. Les conditions de simulation sont celles d'une année moyenne : le débit naturalisé médian de la source du Lez simulé par Tempo a été utilisé pour alimenter le modèle POKA. La sollicitation simulée est forte ; elle correspond au maximum prélevable par les pompes immergées à la source du Lez, c'est-à-dire 2200 l/s. Les simulations POKA débutent au moment où le débit naturel Q_n est égal au débit de pompage maximum, soit 2200 l/s avec un niveau initial dans le drain égal à 65,2 m NGF, soit le point de débordement de la vasque. Les résultats de la simulation POKA sont comparés à ceux de la simulation Tempo à l'illustration 63. On y observe un bon accord entre les résultats des simulations des deux modèles durant les deux à trois premières semaines, ensuite une sous-estimation des rabattements simulés par le modèle POKA est observée; en d'autres termes, ce modèle se montre plus optimiste que Tempo.

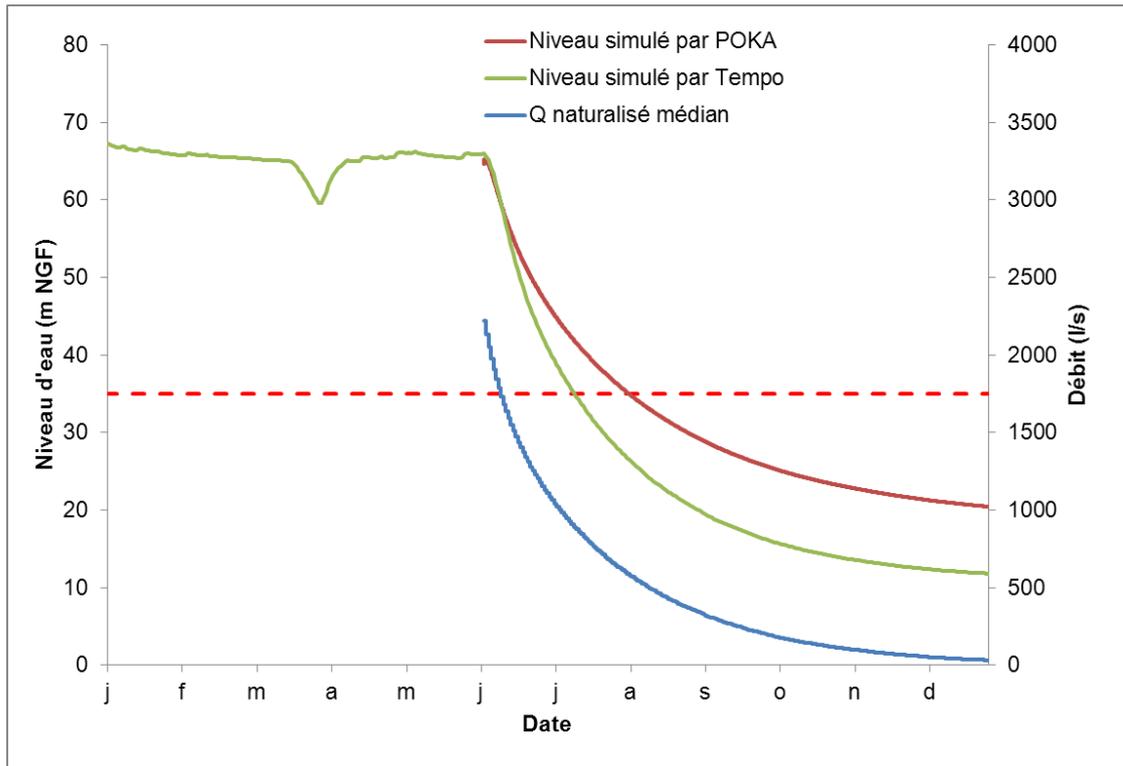


Illustration 63 : Comparaison des résultats des simulations au moyen des modèles POKA et TEMPO sur une longue période

Une analyse détaillée des hypothèses formulées pour la mise en œuvre de ce modèle a été effectuée, notamment sur les hypothèses géométriques. Considérons l'étendue de la zone affectée au sein de la matrice calcaire par les rabattements induits par le pompage au sein du réseau de drains karstiques. Le rayon d'action est défini comme la distance à l'ouvrage (ou au réseau de drains qui le prolongent dans notre cas) au-delà de laquelle l'aquifère n'est pas influencé. Le rayon d'action d'un ouvrage agissant en conditions radiales (telles que celles existant au sein de l'aquifère du Lez) évolue selon la relation suivante :

$$R(t) = 1,5 \sqrt{\frac{Tt}{S}}$$

Où $R(t)$ désigne le rayon d'action autour du réseau de drains karstiques à l'instant t , T la transmissivité de la matrice, S son coefficient d'emmagasinement et t le temps.

L'évolution du rayon d'action au cours du temps selon l'équation ci-dessus avec les paramètres de calage obtenus précédemment pour la matrice calcaire, à savoir $T = 0,075 \text{ m}^2/\text{s}$ et $S = 0,01$ (Borrell-Estupina et al. 2012) est représentée à l'illustration 64. On constate, même dans le cas d'une nappe réagissant de façon libre à l'échelle d'un test de plusieurs mois, une forte diffusivité au sein de la matrice calcaire ($T/S = 7,5 \text{ m}^2/\text{s}$) et une propagation très rapide et lointaine du rabattement au sein du milieu assimilé à un équivalent poreux. Ainsi, après 20 jours seulement, le rabattement s'est en théorie propagé à plus de 5 km autour du réseau de drains (Illustration 64). Il en résulte que l'hypothèse d'un aquifère infini dont des limites imperméables ne seraient pas atteintes en cours de pompage n'est pas remplie. Au-delà de 20 à 30 jours de pompage, il est évident que le rabattement s'est propagé suffisamment loin pour atteindre les limites du système karstique. L'hypothèse sous-tendant le modèle POKA induit donc une sous-estimation

des rabattements pour les durées longues. Nous considérons donc que le modèle POKA ne peut être utilisé pour des périodes de pompage supérieures à 30 jours sans induire une incertitude trop élevée.

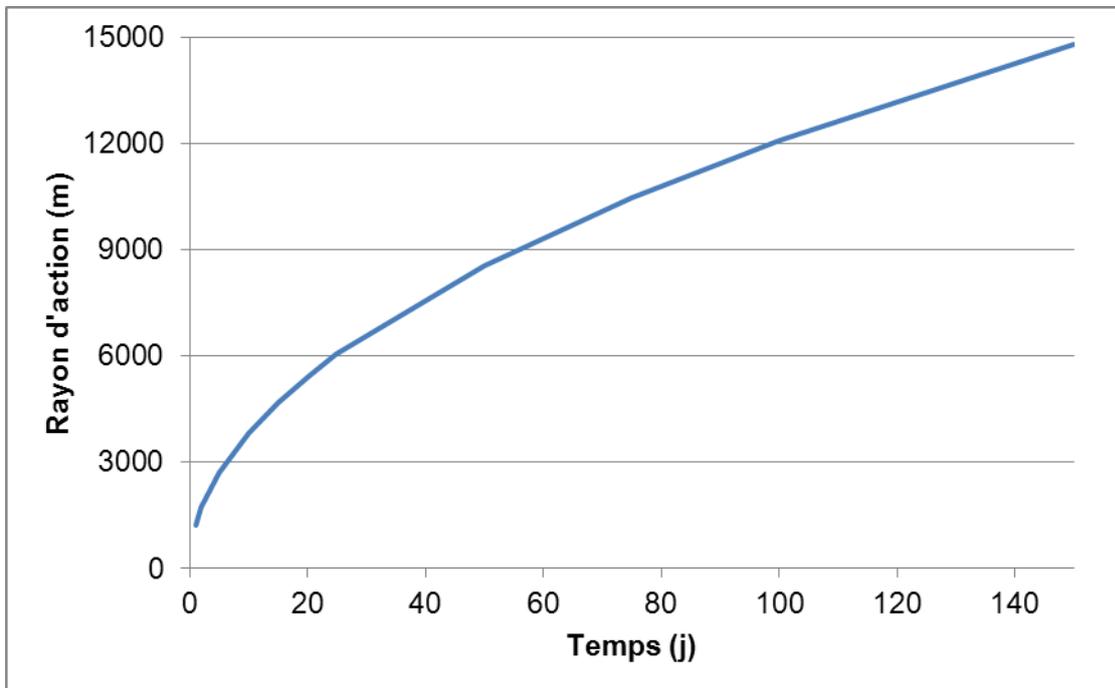


Illustration 64 : Evolution du rayon d'action du rabattement autour du réseau de drains karstiques au sein de la matrice calcaire

Ce résultat implique que le rendement du pompage à la vasque peut sensiblement se réduire au cours du temps, plusieurs semaines après la baisse des niveaux d'eau sous le niveau 65 m NGF, du fait non seulement d'une diminution de la connexion entre la matrice et le réseau de drains en profondeur mais aussi du fait de la propagation du rabattement latéralement au sein de la matrice.

3.3.3. Résultats de simulations de courte durée

Le modèle POKA a été appliqué à des simulations de scénarios de gestion des pompages de courte durée (< 30 jours) pour tester différents scénarios de gestion des prélèvements. Les hypothèses de travail sont les suivantes :

- le débit naturel correspond au débit médian simulé par Tempo ;
- le débit naturel initial en début de modélisation est de 2220 l/s ;
- le niveau initial dans le drain karstique est de 65,2 m NGF soit à peu près l'altitude du déversoir de la vasque ;
- la durée des simulations est de 30 jours.

Les simulations correspondent à un débit total pompé de 4,7 millions de m³ pendant 30 jours (débit moyen de 1800 l/s) selon les quatre scénarios suivants :

- scénario a : pompage pendant 15 jours à débit constant de 2200 l/s puis pendant les 15 jours suivants à 1400 l/s ;

- scénario b (référence) : pompage pendant 30 jours à débit constant de 1800 l/s ;
- scénario c : pompage pendant 30 jours à 2200 l/s pendant 12 heures par jour et à 1400 l/s pendant le reste de la journée ;
- scénario d : pompage pendant 7 jours à débit constant de 1800 l/s puis pendant 8 jours à 2200 l/s puis pendant 15 jours à 1587 l/s.

Ces quatre scénarios permettent d’explorer si, à volume constant prélevé, le mode de gestion des pompages peut modifier ou non le rabattement induit dans le drain karstique du Lez ainsi que la provenance des volumes pompés (débit naturalisé, débit de sollicitation du drain ou débit de sollicitation de la matrice calcaire). Les résultats des simulations en termes d’évolution du niveau d’eau dans le drain karstique sont présentés à l’Illustration 65. Les rabattements finaux calculés ainsi que les volumes de sollicitation de l’aquifère karstique sont donnés au Tableau 6.

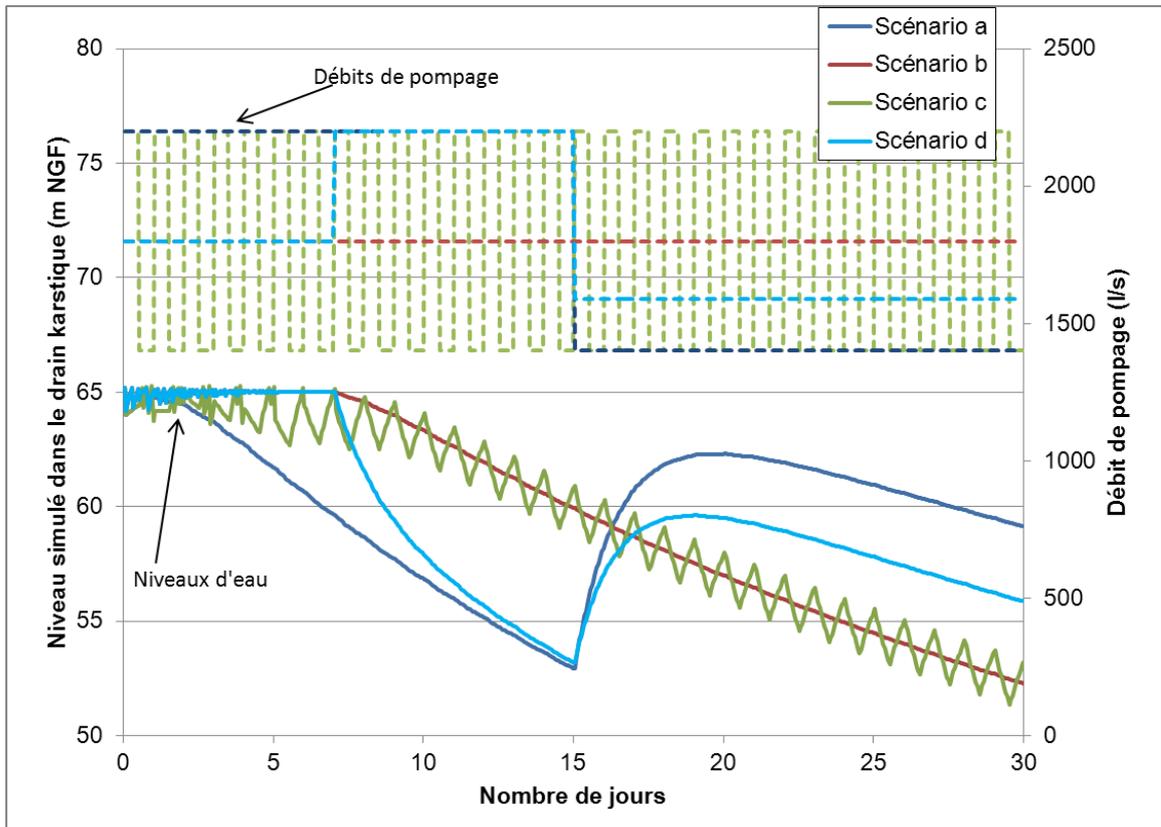


Illustration 65 : Evolution temporelle des niveaux d’eau simulés dans le drain karstique et des débits de pompages correspondant aux scénarios a, b, c et d

On observe que le rabattement le plus élevé (12,9 m en fin de simulation, Tableau 6) est obtenu avec le scénario à débit constant de 1800 l/s (scénario b). C’est le scénario de référence. Toute autre gestion simulée des prélèvements (scénarios a, c et d) permet de réduire le rabattement final.

Le scénario c consistant à prélever le même débit journalier mais en deux cycles de 12 heures à débits variables (correspondant approximativement à la gestion actuelle) n’induit pas d’augmentation du rabattement ; au contraire il permet de légèrement réduire le rabattement final (rabattement : 12,0 m).

Le scénario a est le plus favorable avec un rabattement final de 6,1 m, réduit de 50 % par rapport au scénario de référence. Le fait de pomper le débit maximum de 2200 l/s dès le départ permet de capter la totalité du débit naturalisé et réduit ainsi la sollicitation totale (réseau de drains + matrice calcaire) de l'aquifère karstique. Ainsi, ce scénario a conduit à une sollicitation de l'aquifère karstique significativement moins élevée (810 000 m³). Ce résultat est logique et attendu puisque cette gestion du prélèvement consiste à optimiser le prélèvement du débit naturalisé.

Nous avons dès lors testé un quatrième scénario (d) dont le résultat était moins évident. Ce scénario consiste à augmenter le débit de pompage au moment où le niveau dans le drain décroche suite au pompage initial de 1800 l/s. Il ne consiste donc pas à optimiser le prélèvement de débit naturalisé mais à gérer différemment la sollicitation de l'aquifère karstique. Cette gestion permet, pour une sollicitation totale de l'aquifère comparable à celle du scénario de référence, de réduire le rabattement final de 25 % par rapport à ce scénario (9,3 au lieu de 12,9 m). Les plus forts rabattements induits par l'augmentation des débits entre les 7^{ème} et 15^{ème} jours de pompage a permis de mobiliser plus rapidement la matrice calcaire et ainsi réduire le rabattement au sein du réseau de drains karstiques et de la vasque.

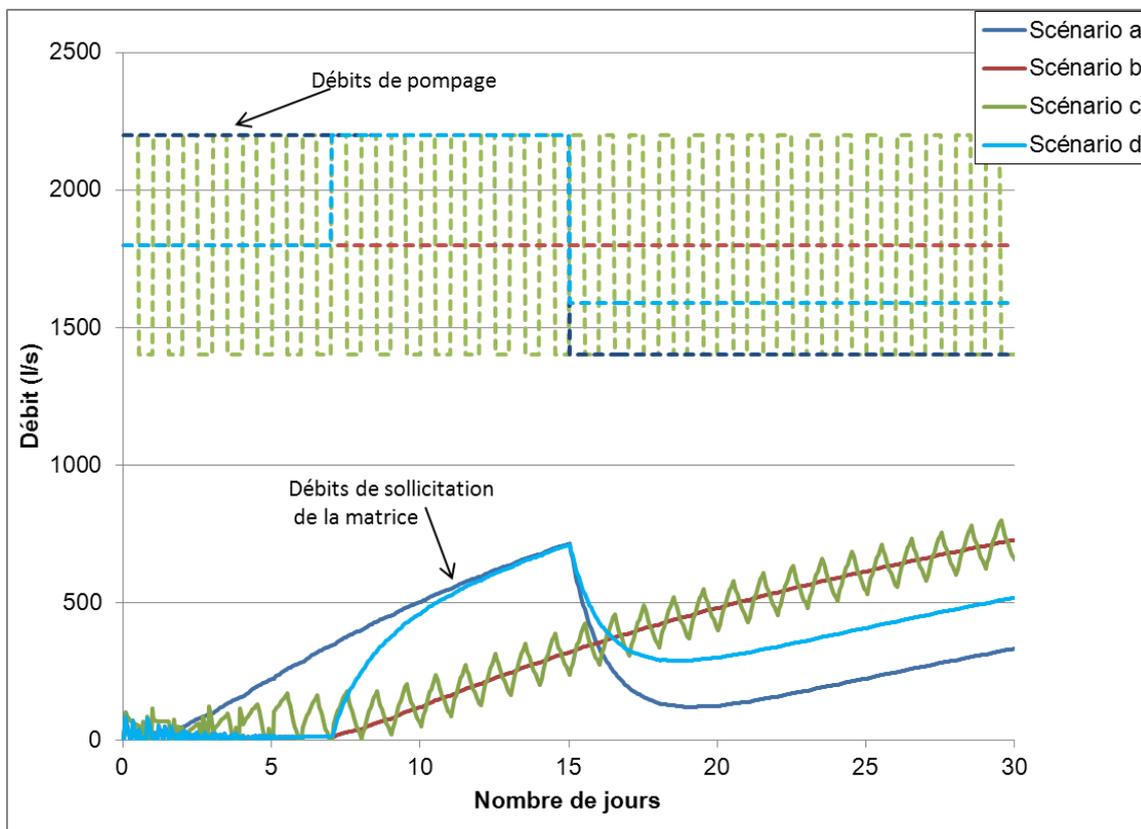


Illustration 66 : Evolution temporelle des débits de sollicitation de la matrice calcaire simulés et des débits de pompes correspondant aux scénarios a, b et c

Les évolutions des débits de sollicitation de la matrice calcaire sont données à l'illustration 66. On constate que pour les scénarios b et d, cette sollicitation est nulle durant les 7 premiers jours puisque le débit de pompage de 1800 l/s est inférieur au débit naturalisé évoluant de 2200 à 1800 l/s durant cette période. Dans le scénario c, une (faible) sollicitation cyclique est induite par les cycles journaliers de pompage. Seul le scénario a dont le débit initial de pompage (2200 l/s) est significativement supérieur au débit naturalisé induit une sollicitation marquée de la

matrice. Dans les scénarios b, c et d, une fois que le débit naturalisé devient inférieur au débit de pompage, la sollicitation de l'aquifère (et de la matrice) devient significative avec une sollicitation de la matrice plus importante dans le scénario d.

Cette différence de sollicitation de la matrice calcaire est schématisée à l'illustration 67. Les forts rabattements induits en début de pompage par les hauts débits du scénario d induisent une propagation plus lointaine des rabattements. Les différences entre les niveaux piézométriques en fin de scénarios b et d sont schématisées en couleurs à l'illustration 67. Le scénario d permet de solliciter la matrice à plus grande distance (volume supplémentaire du scénario d en jaune) contrairement au scénario b qui la sollicite à plus courte distance (volume supplémentaire du scénario b en rouge).

	Scénario a	Scénario b	Scénario c	Scénario d
Rabattement (m)	6,1	12,9	12,0	9,3
Volume de sollicitation de la matrice (m ³)	762000	823000	865000	853000
Volume de sollicitation des drains (m ³)	48000	103000	96000	75000
Volume de sollicitation totale de l'aquifère (m ³)	810000	926000	961000	928000

Tableau 6 : tableau de synthèse des rabattements simulés et des volumes de sollicitation calculés en fin de simulation des scénarios a, b, c et d.

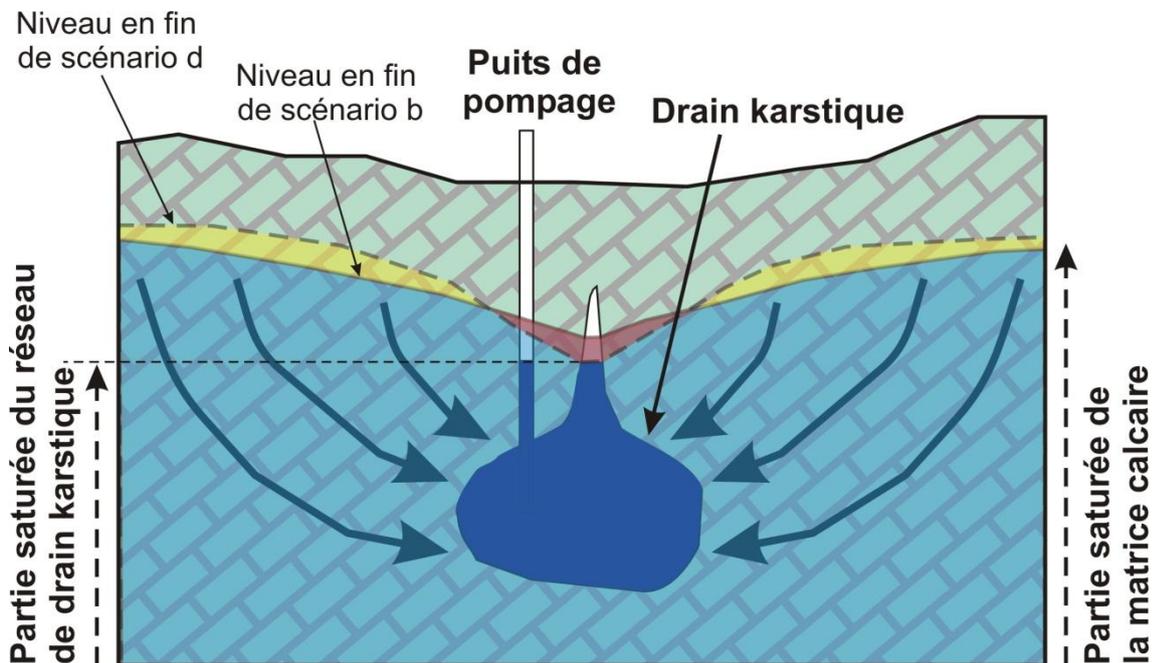


Illustration 67 : Coupe hydrogéologique schématisique du drain karstique pompé à la vasque du Lez – les niveaux d'eau en fin de scénarios b (référence) et d sont schématisés

3.3.4. Résultats de simulations de remontée

Dans la perspective de futurs pompages d'essais à réaliser sur la source du Lez, nous avons testé différents scénarios de pompage d'essai à fort débit suivis d'une réduction du débit de pompage pour observer la remontée induite. Les hypothèses de travail sont les suivantes :

- le débit naturalisé correspond au débit médian simulé par Tempo ;
- le débit naturalisé initial en début de modélisation est de 1064 l/s ;
- le niveau initial dans le drain karstique est de 65,2 m NGF soit à peu près l'altitude du déversoir de la vasque ;
- la durée des simulations est de 30 jours.

Les scénarios de pompages sont les suivants :

- scénario a : pompage à fort débit (2200 l/s) pendant 7 jours puis pompage à 1050 l/s pendant 23 jours ;
- scénario b : pompage à fort débit (2200 l/s) pendant 10 jours puis pompage à 1050 l/s pendant 20 jours ;
- scénario c : pompage à fort débit (2200 l/s) pendant 14 jours puis pompage à 1050 l/s pendant 16 jours ;
- scénario b : pompage à fort débit (2200 l/s) pendant 21 jours puis pompage à 1050 l/s pendant 9 jours.

Les résultats des simulations en termes d'évolution du rabattement dans le drain karstique sont donnés à l'illustration 68. On constate que les durées de scénarios simulées (< 21 jours) n'engendrent pas un rabattement tel que le niveau d'eau atteint la limite actuelle de niveau fixée par la DUP (35 m NGF). Pour rappel, le modèle POKA perd de la précision au-delà de 20 à 30 jours de simulation : il n'est donc pas raisonnable de proposer une durée précise de pompage à fort débit (2200 l/s) nécessaire pour atteindre cette cote. Toutefois, on peut affirmer grossièrement que la durée nécessaire est de l'ordre du mois aux incertitudes et hypothèses (débit médian naturalisé, homogénéité de la réponse en-dessous de 40 m NGF) près inhérentes à ces modélisations. Quelle que soit la durée du pompage à fort débit (7, 10, 14, ou 21 jours), le niveau dans le drain remonte rapidement en 5 à 7 jours de 15 à 17 mètres suite à la réduction du débit de pompage. Plus la durée de pompage fort est élevée, plus élevée et plus lente est la remontée. Les rabattements finaux simulés après 30 jours sont compris entre 7,9 et 9,5 mètres (Tableau 7), soit des écarts relativement faibles.

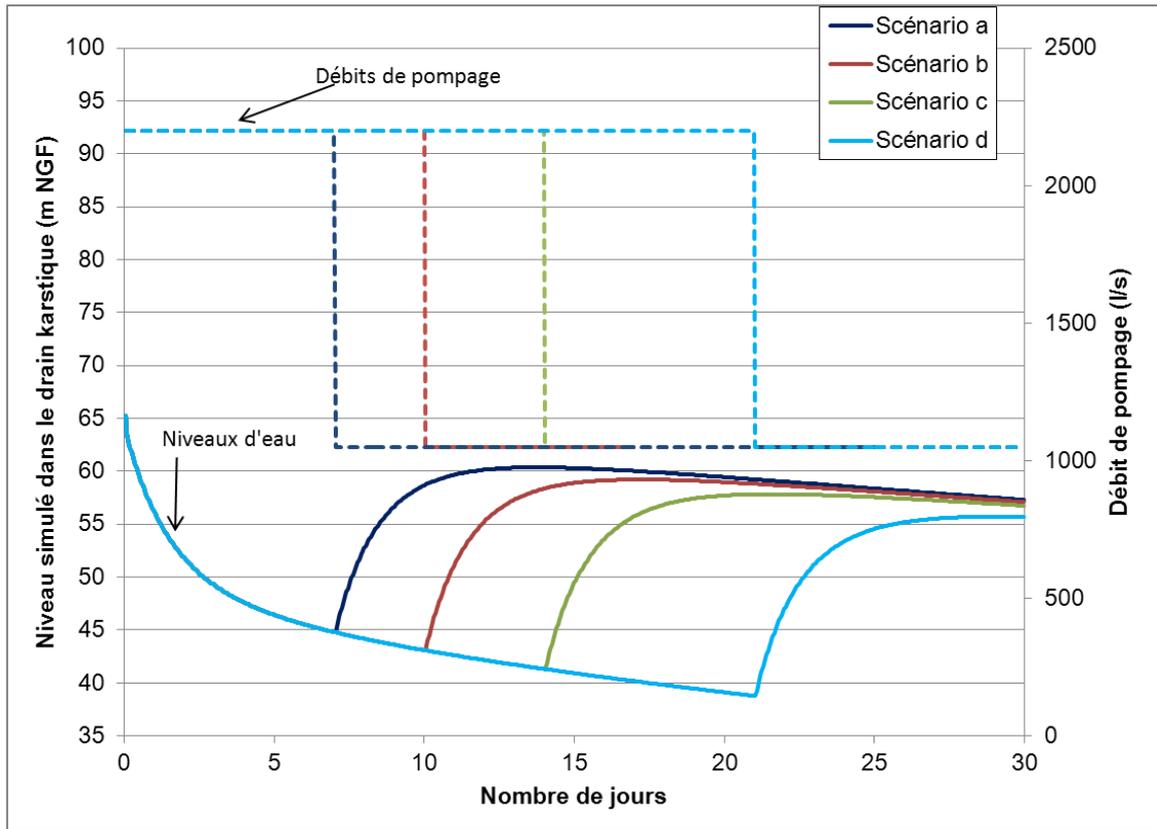


Illustration 68 : évolution temporelle des niveaux d'eau simulés dans le drain karstique et des débits de pompages correspondant aux scénarios a, b, c et d

L'augmentation de la durée du pompage à haut débit (du scénario a au scénario d) induit un accroissement de la sollicitation de la matrice calcaire (Tableau 7).

	Scénario a	Scénario b	Scénario c	Scénario d
Durée pompage à haut débit (j)	7	10	14	21
Rabattement (m)	7,9	8,1	8,5	9,5
Volume de sollicitation matrice (m3)	1245000	1542000	1937000	2624000
Volume de sollicitation drains (m3)	63000	65000	68000	76000
Volume de sollicitation de l'aquifère (m3)	1308000	1607000	2005000	2700000

Tableau 7 : synthèse des rabattements simulés et des volumes de sollicitation calculés en fin de simulation des scénarios de remontée a, b, c et d.

3.3.5. Conclusion

En complément de l'approche de modélisation Tempo menée sur le long terme à un pas de temps journalier, l'approche POKA a permis de tester des scénarios de gestion des pompages plus fins à un pas de temps horaire. La comparaison entre les deux modèles montre que le modèle POKA perd de la précision pour des durées de simulations au-delà de 20 à 30 jours. C'est donc en complémentarité que les deux modèles doivent être utilisés.

Les simulations de courte durée effectuées montrent qu'à volume constant prélevé sur 30 jours, le mode de prélèvement (chronique du débit de pompage) impacte significativement les rabattements induits à la source du Lez, notamment autour de l'instant charnière où la vasque se dénoie (niveau à 65 m NGF). Le scénario de pompage le plus favorable est d'anticiper l'étiage de la source en prélevant fort au début de façon à capter l'ensemble du débit naturel à l'exutoire, puis réduire les prélèvements après un certain temps. Le deuxième scénario le plus favorable consiste à pomper à un débit moyen dans un premier temps, puis augmenter le débit dès que la vasque se dénoie et ensuite réduire le débit plus tard. Ceci permet d'étendre le rayon d'action du pompage au sein de la matrice carbonatée en réduisant les rabattements au sein du conduit karstique et de la vasque.

Des simulations de pompages à fort débit (2200 l/s en continu) suivies d'une remontée ont été effectuées. Elles montrent qu'aux incertitudes et hypothèses inhérentes au modèle près, il faudrait compter de l'ordre de un mois en année médiane pour atteindre la limite de 35 m NGF. Les simulations de remontée indiquent que la réduction du débit de pompage à 1050 l/s en continu, induirait une remontée de 15 à 17 mètres en 5 à 7 jours.

4. Fonctionnement du système karstique et du bassin versant : outil d'aide à la vigilance des crues du Lez

4.1. INTRODUCTION

L'objet de cette partie de l'étude est de proposer un outil de vigilance des crues de surface en amont de la ville de Montpellier. La mise en place d'un tel outil a nécessité :

- i) d'analyser, puis de quantifier, le rôle de l'état initial de remplissage de l'aquifère karstique, celui des autres états initiaux du bassin (antécédent pluvieux, humidité des sols, débit de base...) ainsi que celui des caractéristiques de l'averse (cumul, durée, intensité) dans la genèse des crues historiques de surface,
- ii) de conceptualiser la relation "pluie - état initial - remplissage du sol et du karst" à travers un schéma de fonctionnement simplifié et de la typologie des crues pré-établies,
- iii) de modéliser le fonctionnement de l'hydrosystème sous différents scénarios de forçage pluvieux et de remplissage du karst, iv) de synthétiser la relation obtenue entre "pluie - karst - crue" sous la forme d'un abaque de vigilance des crues.

Cette tâche a donc nécessité la mobilisation des connaissances acquises sur le fonctionnement du système karstique (hydrogéologie) et sur celui du bassin versant (hydrologie) acquises lors de l'AT1 et de l'AT4 de ce projet. Le modèle hydrologique, implémenté sous ATHYS et décrit dans le L4-1, a été utilisé afin d'alimenter, par des points de fonctionnements, l'abaque de vigilance des crues du Lez ainsi élaboré. La compréhension du rôle du karst dans la genèse des crues du Lez obtenue dans le cadre de cette étude a aussi été alimentée par les développements méthodologiques réalisés lors de deux études antérieures portant sur la mise en place d'un indicateur "Karst" dans l'analyse des crues du karst nîmois, dans le cadre de conventions SCHAPI-BRGM (2009-2010).

Par ailleurs, cette présente étude, portant sur le développement d'un abaque de vigilance sur le Lez, a été menée en collaboration avec le SCHAPI, le SPC Méditerranée-Ouest et les partenaires et laboratoires de recherche impliqués dans le présent projet. Une convention entre le BRGM et le Schapi a d'ailleurs été signée dans ce cadre en 2011.

4.2. DONNEES HYDROMETEOROLOGIQUES

Les précipitations journalières pour le bassin d'alimentation de la source du Lez seront caractérisées par les données Météo France journalières aux stations de Prades, Saint Martin et Valflaunes selon la pondération suivante :

Précipitations BA(*) Lez = $0,2 * P \text{ Prades} + 0,4 * P \text{ St Martin} + 0,4 * P \text{ Valflaunes}$.

(*) : *Bassin d'Alimentation*

Cette pondération est définie à partir de l'outil de traitement du signal Tempo (rapport BRGM RP-60222-FR ; Borrel-Estupina et al. 2012). Les données horaires seront également utilisées pour l'étude spécifique d'épisodes majeurs, cette fois-ci non pas au niveau du bassin d'alimentation, mais pour le bassin versant de la station de Lavalette. Il s'agira ainsi soit d'une moyenne pondérée par la surface de représentation de chacun des postes de Prades, Mauguio, Saint Martin et Montpellier-Ensam (de type Thiessen), soit de la lame d'eau radar moyenne sur le bassin topographique. Le choix de l'une ou l'autre des données de pluie se fait en fonction de la qualité et de la disponibilité des images (cf. L4-1).

L'incertitude sur les précipitations est évaluée, à dire d'experts, entre 10 et 20 %. Du fait de la présence de cellules orageuses hétérogènes localisées, ces valeurs sont communément admises dans le domaine de l'hydrologie. La description de l'humidité initiale du sol sera assurée par l'indicateur SIM de Météo France (rapport BRGM RP-60222-FR ; Borrel et al. 2012) présentant une résolution spatiale de 64 km² et une résolution temporelle d'un jour. Les relevés piézométriques utilisés pour rendre compte de l'état de remplissage de l'aquifère karstique du Lez seront ceux issus du poste piézométrique de la source. Les débits du Lez utilisés seront ceux mesurés à la source et sur le fleuve à la station de Lavalette, en amont de Montpellier avec un échantillonnage temporel horaire.

4.3. DUALITE DU FONCTIONNEMENT EN PERIODE DE CRUE

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

Les précédentes études réalisées dans le cadre de la présente convention, mais aussi les travaux de recherche antérieurs (Roesch et Jourde, 2006 ; Jourde et al. 2007 ; Borrell et al., 2008, Fleury et al. 2009, Coustau et al., 2011), ont permis d'élaborer un modèle conceptuel de fonctionnement de ce système. Il révèle que la réponse de l'hydrosystème dépend directement du degré de remplissage de l'aquifère karstique avant l'averse. En effet, l'analyse de la réponse du Lez aux épisodes de pluie montre une dualité de fonctionnement du système :

- lorsque le karst est saturé, le système se comporte comme un bassin hydrologique classique avec une forte contribution des pluies au ruissellement ;
- lorsque le karst est sous saturé, les pluies contribuent dans un premier temps à la recharge du système ; c'est seulement lorsque ce dernier est rechargé que le ruissellement observé sur les bassins versants se met en place.

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

Pour illustrer la fonction d'écrêtage des crues par le karst, nous proposons de comparer les deux épisodes du 09/10/2001 et du 24/08/2002, caractérisés par des hauteurs de pluie journalières significatives et comparables de l'ordre de 120 mm (Illustration 69). Pour ces deux épisodes, les niveaux d'eau dans le karst avant les précipitations étaient différents : le karst était plein pour le premier épisode et fortement déprimé pour le second. Les réponses en termes de débit et de variation piézométrique sont présentées dans le tableau ci-après.

L'épisode d'octobre 2001, caractérisé par un karst saturé et une forte intensité de pluie, produit une crue avec un débit à Lavalette supérieur à 200 m³/s, alors que l'épisode d'août 2008 ne donne pas de crue, les précipitations contribuant uniquement à recharger le karst.

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

Illustration 69 : Débits et variations piézométriques en condition de karst saturé et sous saturé consécutifs à un épisode de pluie d'environ 120 - 130 mm.

4.4. ETUDE DES EPISODES PRINCIPAUX POUR LA CARACTERISATION DE LA RELATION "PLUIE - KARST - CRUE"

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

- le karst est initialement sous-saturé, les précipitations contribuent à sa recharge, les débits à la source et dans le fleuve sont faibles. Ce type d'épisode se produit à la fin des périodes estivales ;
- le karst est déjà saturé en début d'épisode (cote proche ou supérieure à 65 m NGF), les précipitations sont responsables d'une crue sur le Lez ;
- le karst sous saturé initialement se remplit dans un premier temps, il atteint sa cote de saturation (65 m NGF) au cours de l'épisode pluvieux. Les pluies se poursuivent ensuite et entraînent une augmentation des débits à la source et dans le fleuve.

Par ailleurs l'état de saturation du sol va également être caractérisé d'un point de vue qualitatif. En effet, l'analyse des chroniques montre que le système du Lez possède une capacité de rétention de l'ordre de 20 à 30 mm de précipitation selon les périodes de l'année. Ainsi en approchant les hauteurs des précipitations les jours qui ont précédé l'épisode de pluie, on peut évaluer si le sol est globalement saturé ou non et si de ce fait il peut retenir les premiers mm de pluie.

4.4.1. Situation 1 : recharge du sol et de l'aquifère karstique et absence de crue

L'analyse qualitative présentée ci-après (Illustration 70) permet d'évaluer l'impact des précipitations sur le remplissage du karst. On vérifie ainsi que pour l'ensemble des épisodes présentés, les précipitations significatives (supérieures à 45 mm), n'engendrent pas de crue. Les précipitations sont issues des données journalières. Le débit de pointe horaire est fourni pour caractériser les écoulements dans le fleuve.

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

Illustration 70 : Réponses aux pluies significatives en contexte de karst sous saturé.

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

Pour l'ensemble de ces épisodes les précipitations contribuent à la recharge du karst, mais n'impactent pas ou sinon très peu les débits du Lez. La source ne s'écoule pas et les débits du fleuve sont limités (débit inférieur à 40 m³/s à Garigliano). A partir des variations piézométriques calculées et des précipitations associées, il est possible d'évaluer la hauteur de précipitations nécessaire à la recharge de l'aquifère. Pour les épisodes étudiés il faut entre 3,6 et 6,5 mm de pluie pour faire remonter de 1 m le niveau d'eau dans le karst (Illustration 71). La moyenne calculée sur les 9 épisodes est ainsi égale à 5,3 mm de pluie pour une remontée de 1 m.

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

Illustration 71 : Impact des précipitations sur la remontée du niveau piézométrique.

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

Ainsi, lorsque le karst est à son niveau minimum statistiquement observé actuellement (40 m NGF, soit - 25 m sous le niveau de la vasque), il possède une capacité d'écrêtage correspondant à environ 125 mm de pluie.

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

Dans le tableau de l'illustration 72, sont présentés les épisodes caractérisés par un karst rechargé ou proche de sa saturation (niveaux piézométriques supérieurs à 60 m NGF). Les épisodes caractérisés par des cumuls de pluie journalière supérieurs à 40 mm sont présentés. Les débits de pointe horaires sont fournis pour les différents épisodes.

Les épisodes surlignés en grisé dans le tableau ont été étudiés plus spécifiquement par Mathieu Coustau lors de sa thèse. La donnée horaire est ainsi disponible pour ces épisodes. La distinction entre la nature de la donnée de pluie utilisée, données radar ou au sol, sera précisée dans la légende des graphiques présentés (PSol pour la pondération des stations au sol et Pradar pour la donnée radar). Il faut noter que pour certains épisodes il existe une différence par rapport aux données journalières, ces dernières ayant été calculées sur le bassin d'alimentation de la source du Lez et non pas sur le bassin versant à la station de Lavalette. Ainsi, les données selon les sources peuvent être différentes. Nous avons toutefois vérifié qu'à l'exception de quelques cas présentés dans la suite de l'étude les différences sont globalement faibles, de l'ordre de l'incertitude associée à ces données (10 à 20 %).

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

Illustration 72 : Episodes de crue en condition de karst rechargé.

Le débit de pointe horaire à Lavalette en fonction du cumul journalier des précipitations est exprimé dans le graphique ci-dessous (Illustration 73).

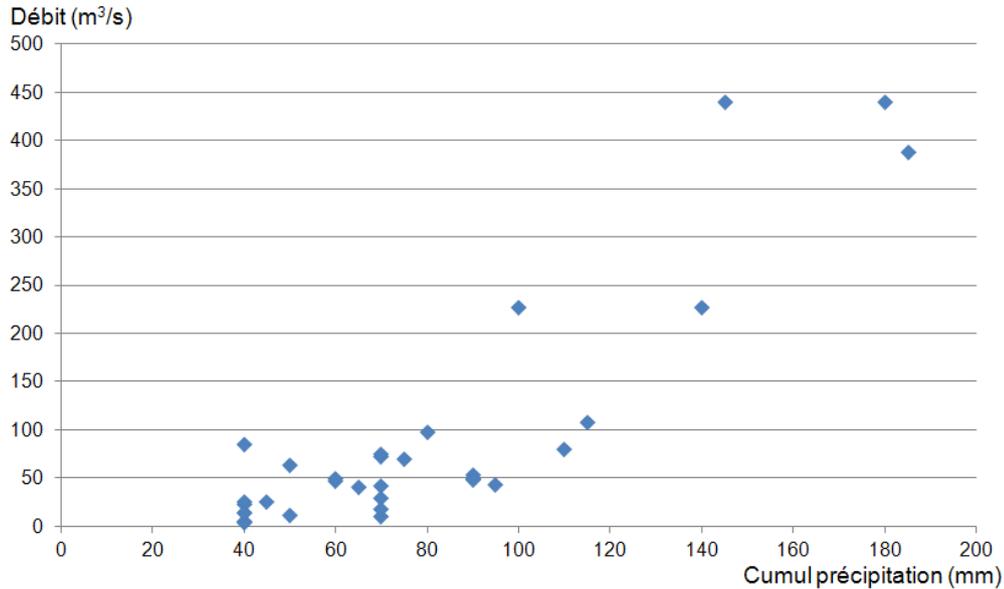


Illustration 73 : Débits maximaux à Lavalette en fonction des cumuls de précipitation journalière en condition de karst rechargé

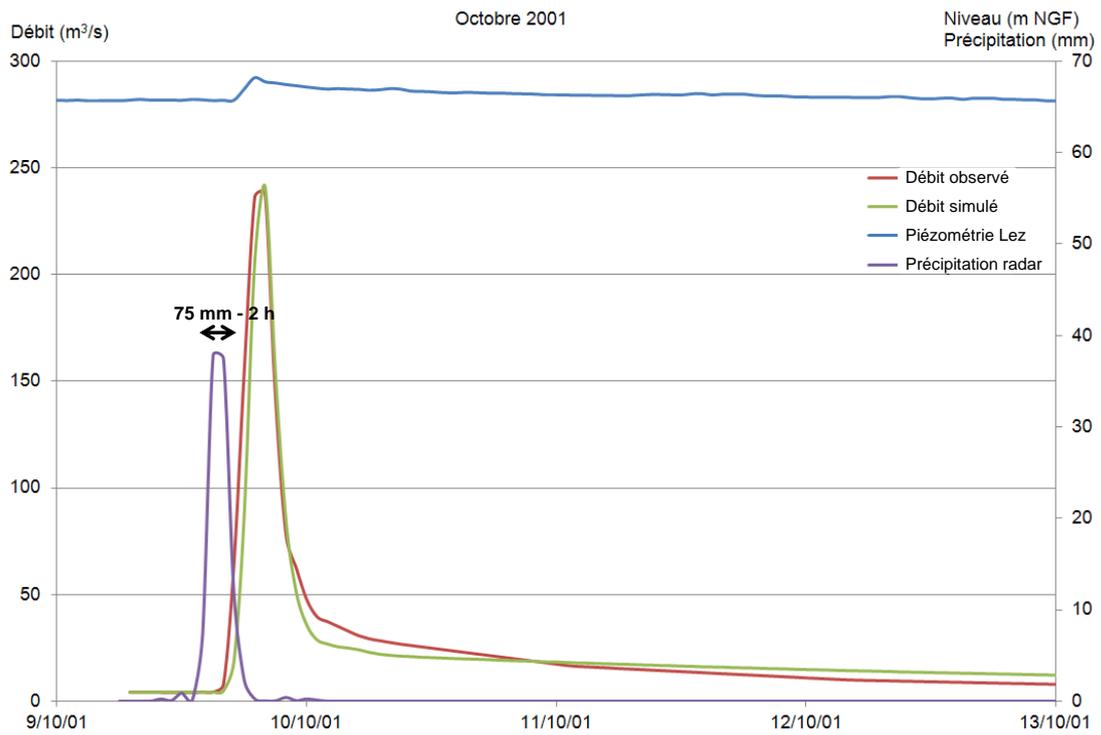
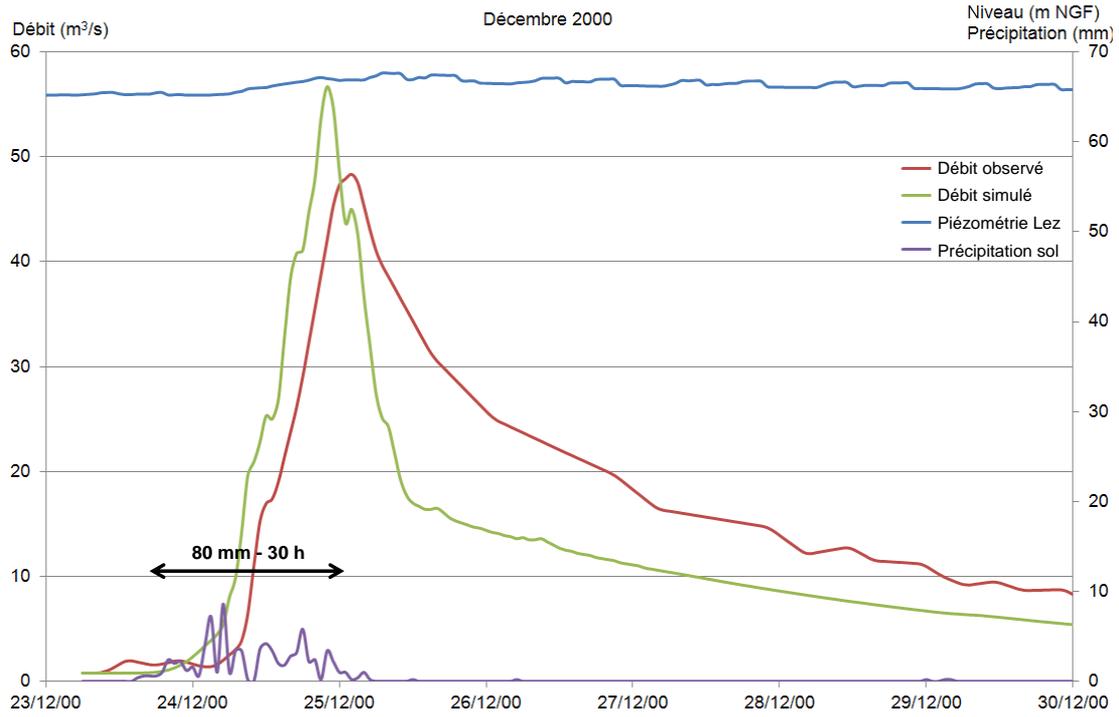
Ce graphique montre que pour des cumuls journaliers comparables, la réponse en termes de débit maximal varie grandement. Par exemple, pour un cumul journalier compris entre 90 et 100 mm le pic de crue varie entre 43 et 238 m³/s.

Les 4 épisodes associés à ces précipitations ont ainsi été étudiés plus spécifiquement à partir des données horaires. Ils sont datés du 24/12/00, 09/10/01, 09/10/02 et 28/01/06. Pour ces épisodes, la pluie horaire, les cumuls et la durée des pluies sont présentés (

Illustration 74). Les épisodes de décembre 2000 et janvier 2006 sont assez proches : ils sont tous deux caractérisés par des cumuls de l'ordre de 70 à 80 mm sur une durée de 24 h avec une intensité moyenne faible, proche de 3 mm/h et un maximum d'intensité inférieur à 9 mm/h. Ces épisodes caractérisés par une pluie de faible intensité, mais de cumul significatif du fait de leur durée, produisent des crues dont le débit est d'environ 50 m³/s à la station de Lavalette.

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

Enfin, l'épisode du 9 octobre 2001 est caractérisé par une pluie courte et intense avec 76 mm de précipitation en seulement 2 h, soit une intensité horaire égale à 38 mm. Cette pluie a engendré un pic de crue proche de 240 m³/s.



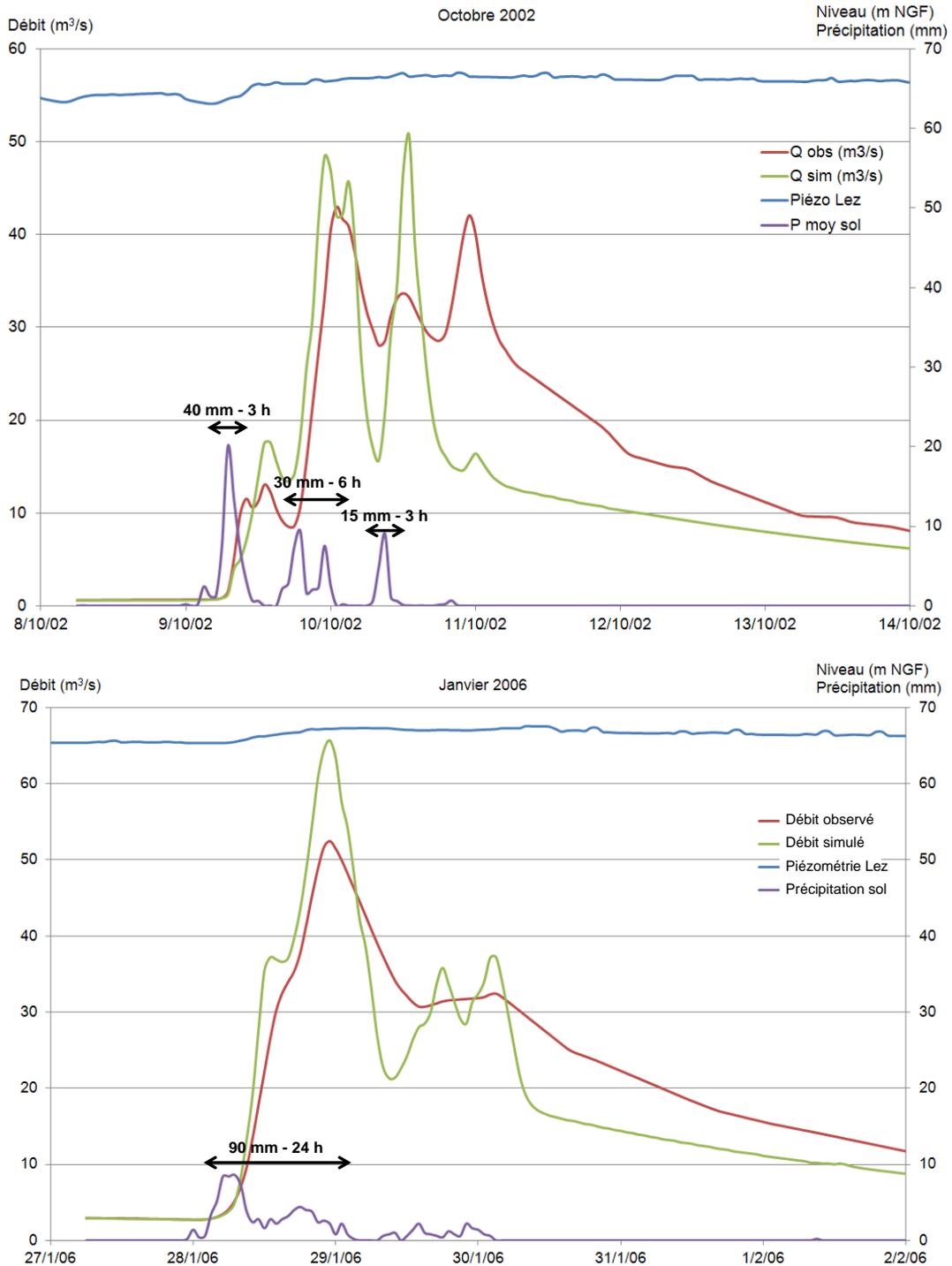


Illustration 74 : Débits à Lavalette associés à des précipitations journalières comprises entre 70 et 90 mm (épisodes de décembre 2000, octobre 2001, octobre 2002, janvier 2006)

A l'issue de l'analyse de ces épisodes, il apparaît que pour caractériser les débits il est logiquement nécessaire de prendre en considération la structure horaire de la pluie (cumul, durée, intensité, interruption...). L'étude va ainsi se poursuivre à partir de l'analyse des épisodes présentant de la donnée de pluie horaire (épisodes grisés dans l'illustration 72).

La description des épisodes en contexte d'aquifère rechargé et la réponse en termes de débit sont fournies dans l'illustration 75. Pour les deux épisodes présentés en bleu, la donnée horaire pondérée présentait une aberration par rapport aux chroniques mesurées ; la donnée est alors corrigée. Pour le 08/09/2002, la précipitation journalière à Prades est égale à 116 mm, ce qui correspond à la valeur fournie dans le tableau ci-dessous. Or, les stations de Saint Martin et Montpellier - Ensam ont reçu lors de cette journée des hauteurs d'eau de 42 et 51 mm. C'est pourquoi une valeur corrective d'environ 70 mm est proposée. Concernant l'épisode du 11/12/2002, selon les postes utilisés, l'épisode de pluie présente un cumul comparable, mais sur une durée beaucoup plus courte, de l'ordre de 3 h.

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

Illustration 75 : Caractéristiques des épisodes de crue en contexte de karst rechargé (débit à Lavalette)

Le pic de crue est également corrigé pour les épisodes multiples, afin de prendre en compte uniquement les variations de débit engendrées par l'épisode de pluie. C'est pourquoi pour les épisodes multiples, le débit initial est déduit (voir colonne « débit pic de crue corrigé » (Illustration 75), on considère alors la variation de débit engendrée.

A partir de cette analyse, les épisodes sont replacés dans un graphique « cumul des précipitations – Pic de crue » (Illustration 76). Deux grandes tendances sont définies à ce stade de façon encore approximative. La droite rouge permet d'approcher les réponses du système aux épisodes de forte intensité tandis que la droite verte correspond aux épisodes de faible intensité lorsque le karst est rechargé.

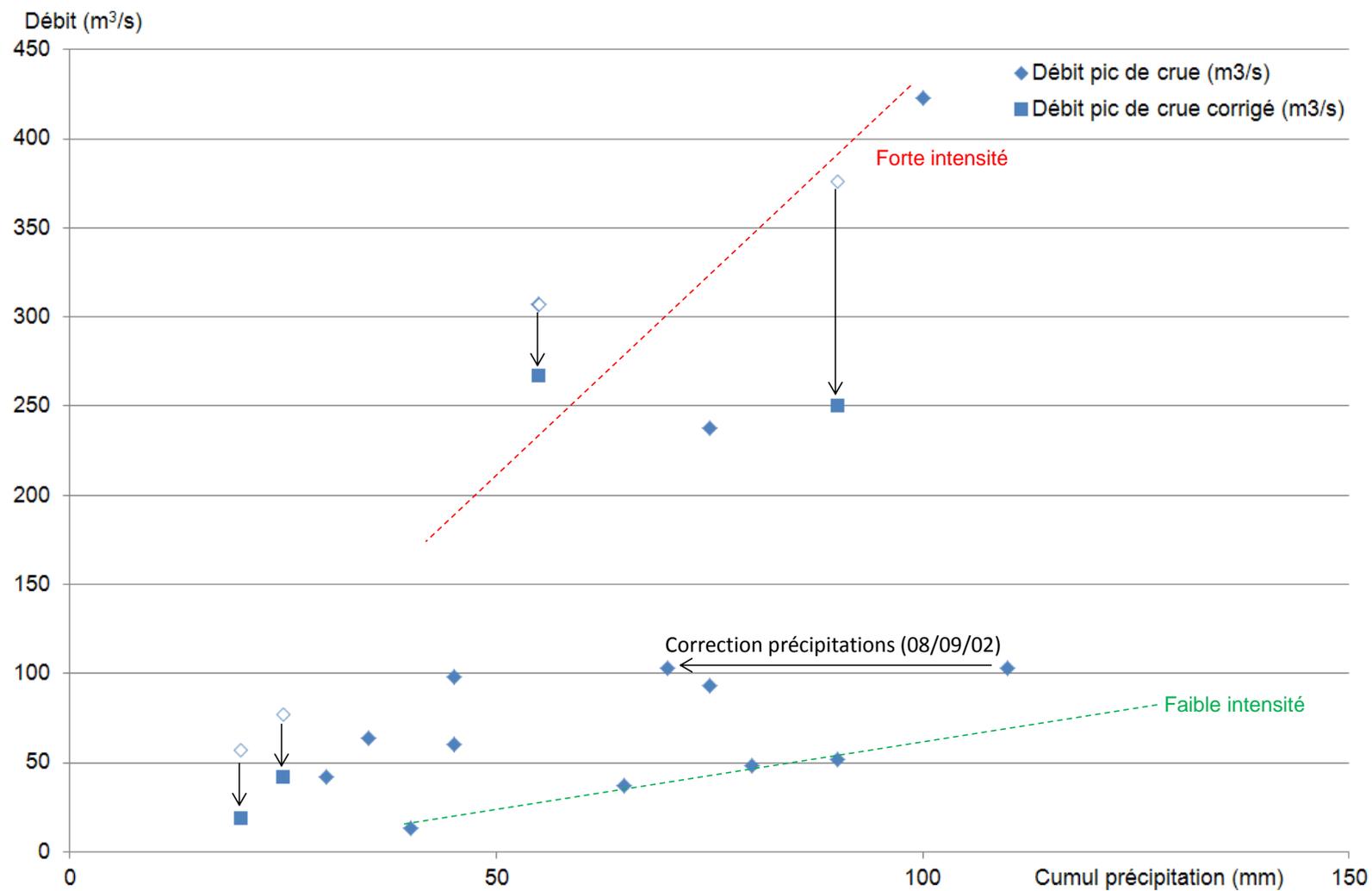


Illustration 76 : Débit au pic de crue en fonction du cumul de précipitation pour les épisodes en condition de karst rechargé

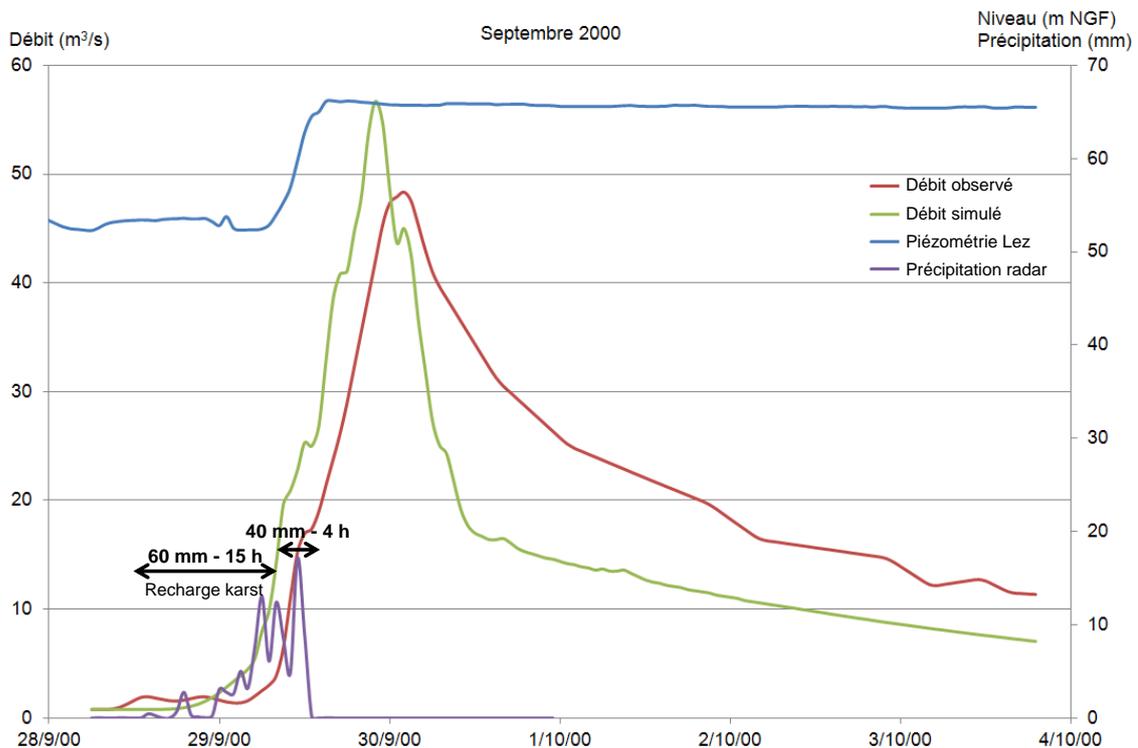
4.4.3. Situation 3 : recharge de l'aquifère karstique puis genèse de la crue

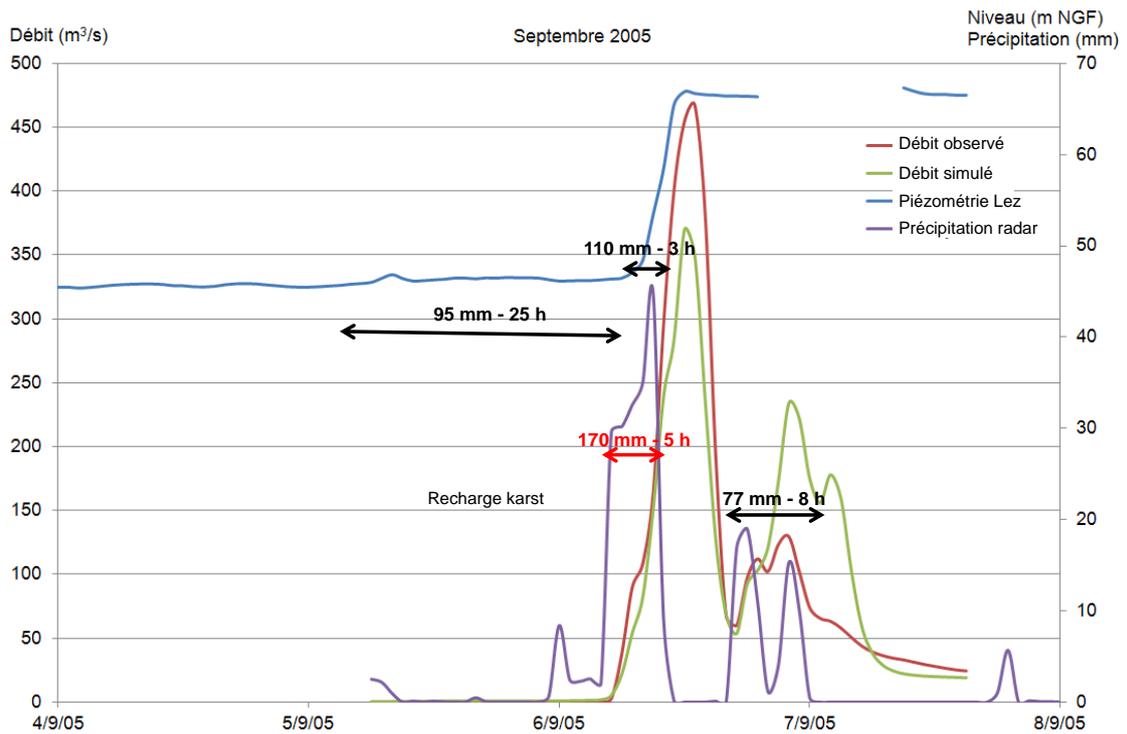
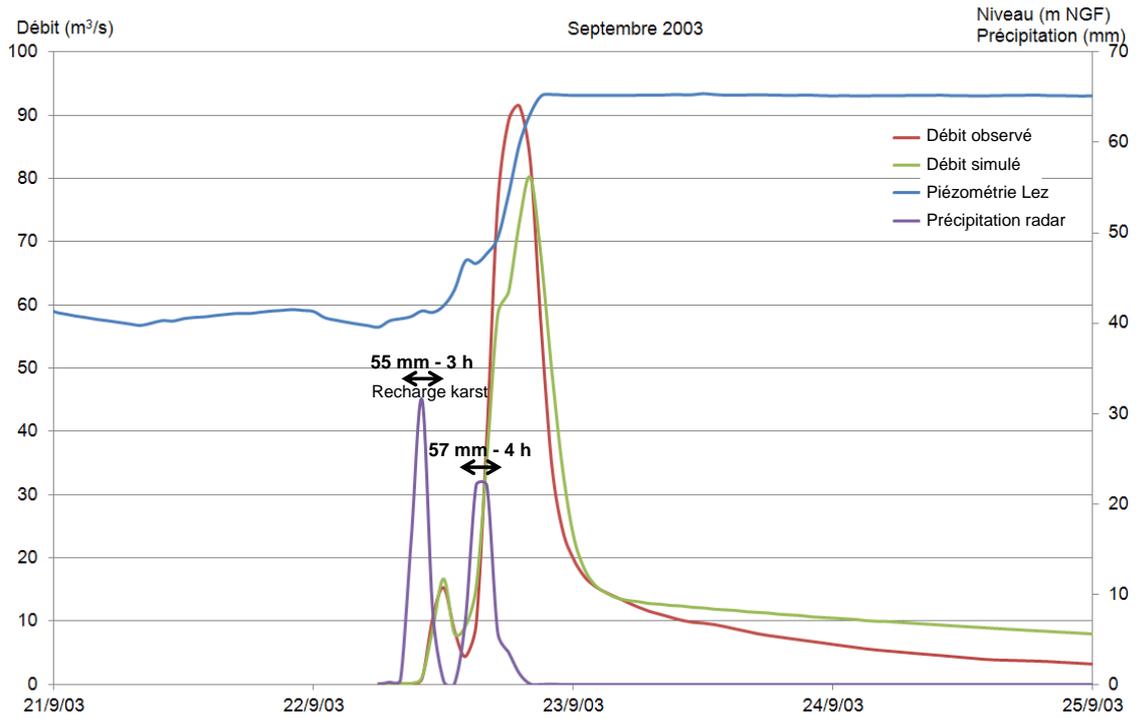
Quatre épisodes associés à des précipitations significatives (supérieures à 50 mm), sont concernés sur la période étudiée. Les caractéristiques de ces épisodes sont présentées (Illustration 77 et Illustration 78). A partir du calcul de l'impact des précipitations sur la remontée de la piézométrie, à savoir 5 mm pour + 1 m NGF jusqu'à 65 m (voir § 4.4.1), la quantité de pluie rechargeant le karst est approchée. Par soustraction on en déduit la quantité de pluie participant à la crue.

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

Illustration 77 : Réponse aux pluies significatives en contexte de karst saturé en cours de recharge

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





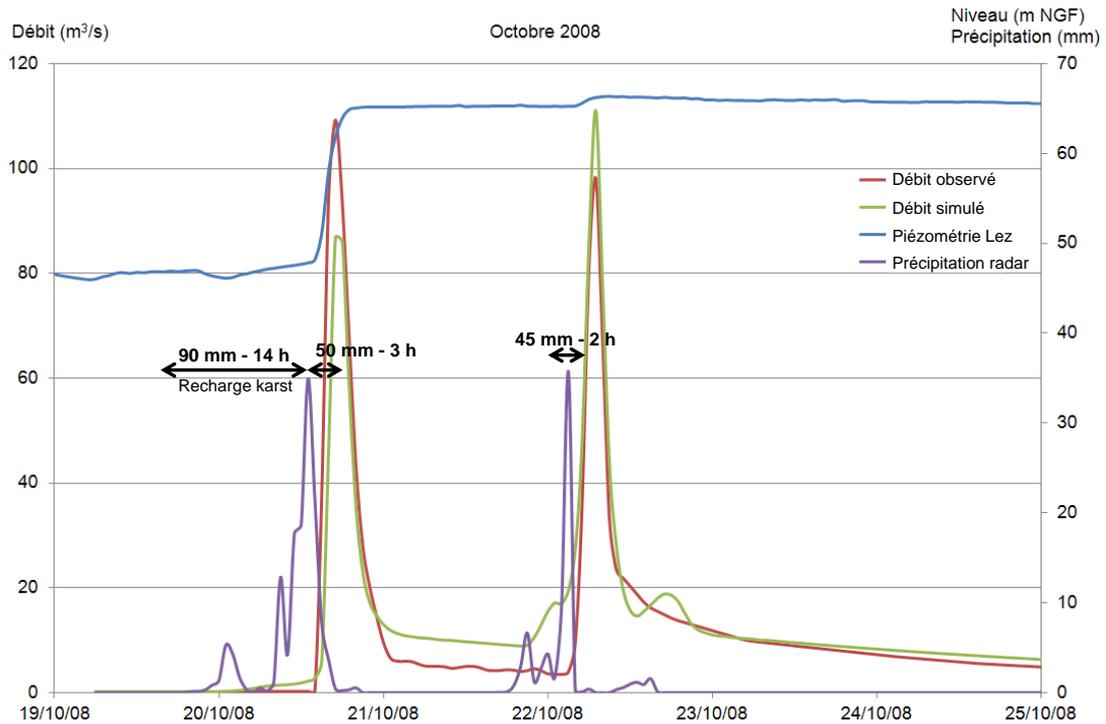


Illustration 78 : Episodes avec recharge du karst puis crue (septembre 2000, septembre 2003, septembre 2005, octobre 2008)

Pour ces quatre épisodes, le débit associé aux précipitations ayant contribué à la crue sont présentés à l'illustration 79. Ces épisodes sont caractérisés par des intensités relativement fortes, comprises entre 11 et 37 mm/h.

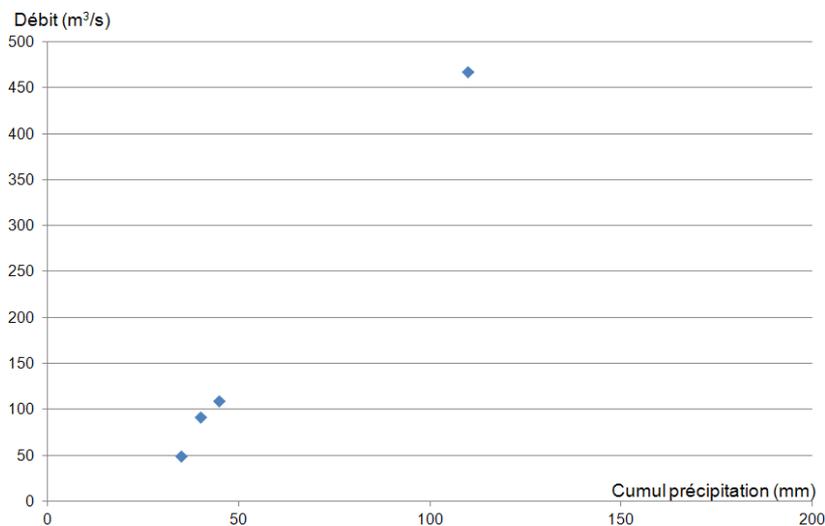


Illustration 79 : Débit en fonction des précipitations participant aux crues après la recharge du karst

L'épisode du 6 septembre 2005 caractérisé par une crue importante (débit de pointe supérieur à 450 m³/s à Lavalette) a eu une partie des précipitations écrêtées, le karst étant initialement sous saturé. On évalue la contribution de la pluie à la crue (après recharge du karst) à 110 mm pendant 3 h (Illustration 77). Si le karst avait été rempli la contribution à la crue aurait alors approché 170 mm en 5 h (intensité de 30 à 45 mm/h pendant 5 h). Des débits bien supérieurs auraient pu se propager. Une estimation de ce débit sera effectuée ultérieurement (§ 4.5.3).

4.4.4. Conclusion sur la relation "pluie - karst - débit"

Sur un même graphique (Illustration 80) sont présentés les cumuls de précipitations participant à la crue, à la fois pour les épisodes en condition de karst rechargé et les épisodes où le karst est initialement sous-saturé. Pour ces derniers épisodes, la part des précipitations participant à la recharge du karst est retranchée, si bien que dans le graphique, le débit présenté est associé seulement à une partie de l'épisode de pluie réellement observé. Dans le cas d'épisodes multiples, le débit de pointe fourni correspond à la variation de débit associée à l'épisode (le débit initial avant le second épisode est retranché). Sur ce graphique sont également approchées qualitativement les différentes intensités des précipitations.

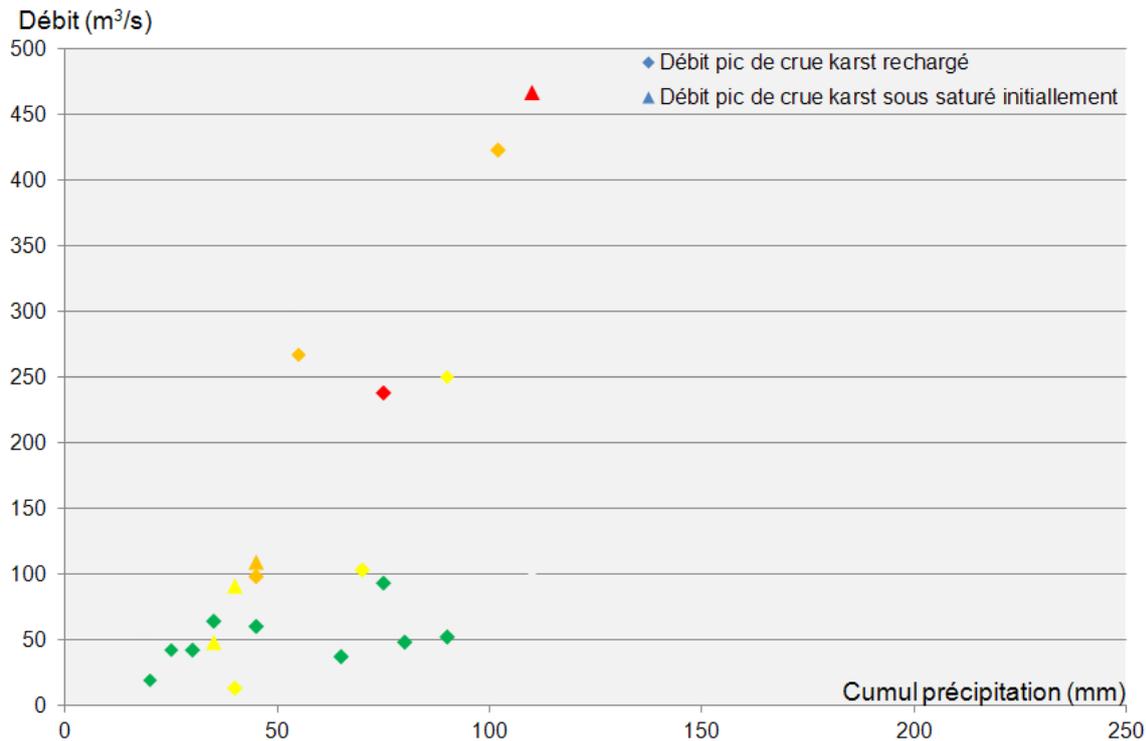


Illustration 80 : Débit du pic de crue en fonction des précipitations et intensité en mm/h (rouge : $I > 30$, orange $15 < I < 30$, jaune : $10 < I < 15$ et vert < 10)

Ce graphique met en évidence le fait que plus les intensités sont fortes, plus le pic de crue est important. Lorsque le karst est saturé, les précipitations engendrent un pic de crue qui est fonction du cumul mais surtout de l'intensité de l'épisode.

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

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

4.5.1. Conceptualisation de la relation pluie - état initial - niveau dans le karst

La recharge maximale du sol a été fixée à 20 mm (taille de la RFU⁷), la recharge minimale pour un sol humide en début d'évènement a été fixée à 0 mm. Le cumul de pluie de l'évènement à étudier doit donc, avant toute chose, être amputé de cette valeur maximale de 20 mm. La recharge du karst par les précipitations a été précédemment conceptualisée par la relation suivante :

5 mm de pluie → remontée de 1 m NGF

Un premier abaque est ainsi défini à partir de cette loi (Illustration 81). Il permet d'approcher en fonction du niveau initial et du cumul de pluie le niveau final de remplissage du karst.

⁷ RFU : dans le sol, réserve facilement utilisable

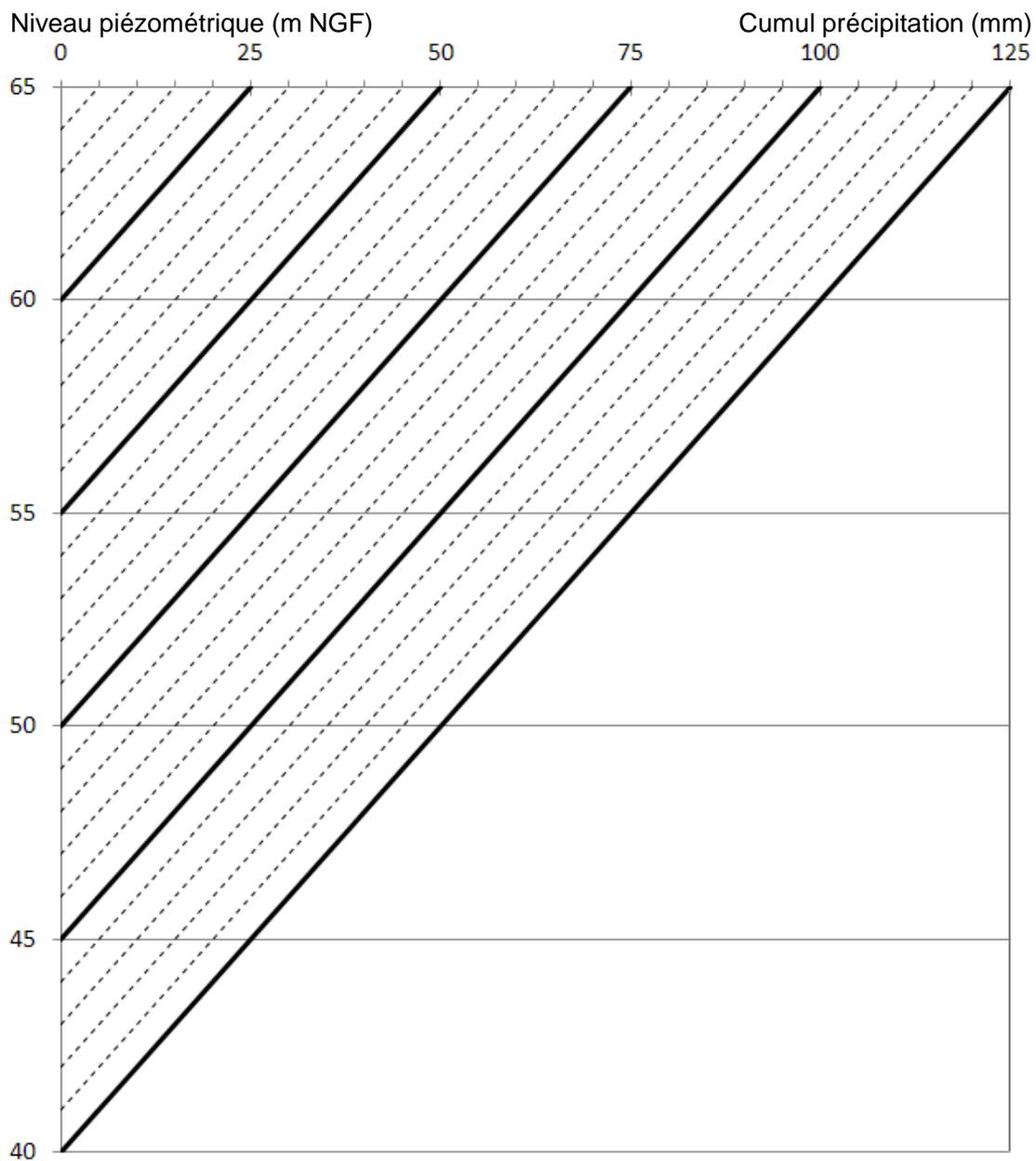


Illustration 81 : Abaque n° 1 : « Pluie - niveau du karst »

Deux exemples d'utilisation pour un niveau initial du karst à 40 m NGF sont fournis (Illustration 82) :

- précipitation 1 = 50 mm, alors niveau karst final = 50 m ;
- précipitation 2 = 125 mm, alors niveau karst final = 65 m.

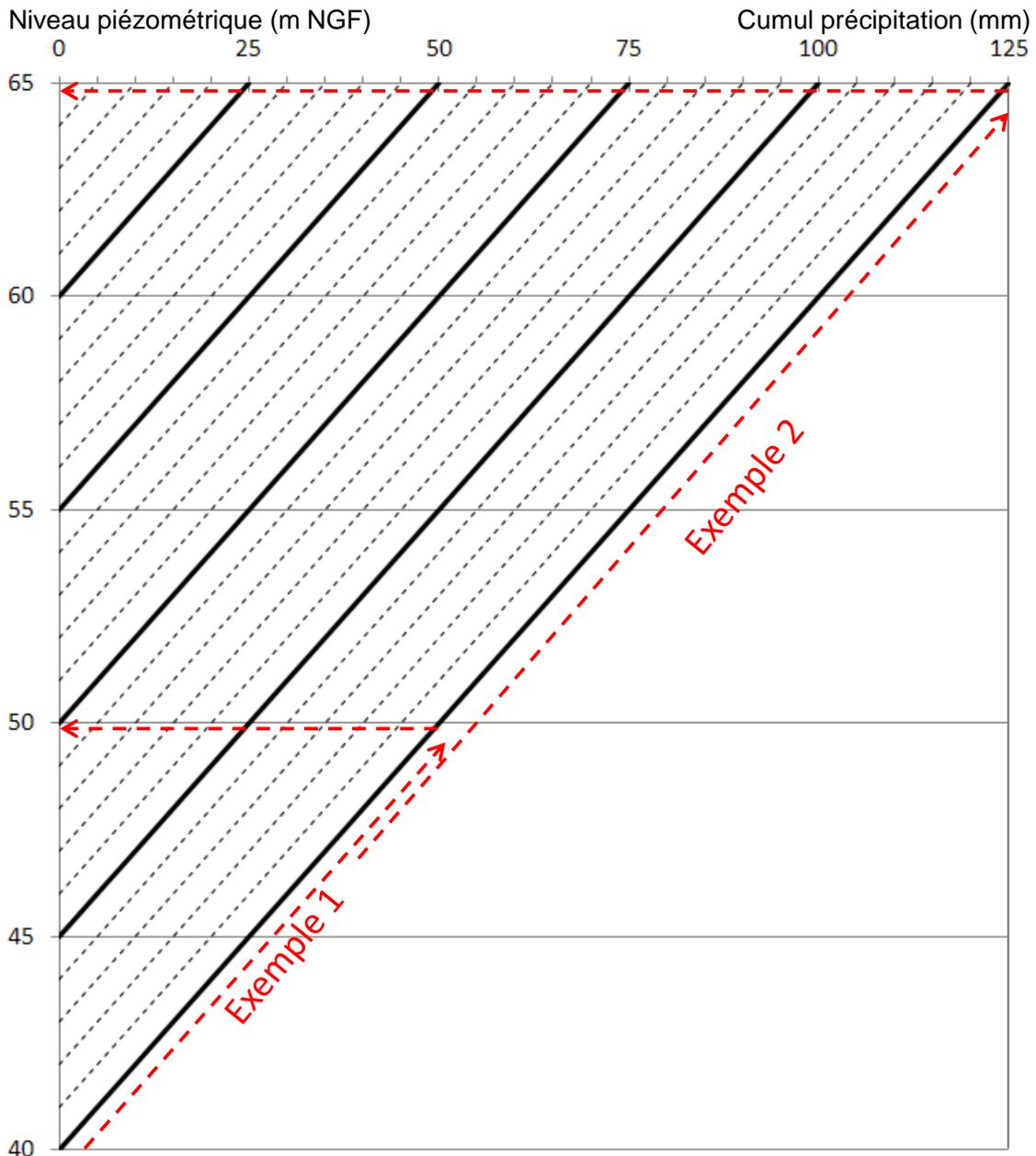


Illustration 82 : Exemple d'utilisation de l'abaque « Pluie – niveau du karst »

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

4.5.2. Conceptualisation de la relation "pluie - débit"

Le modèle hydrologique de simulation des crues de surface du Lez à la station de Lavalette utilisé ici a été développé dans le cadre de cette étude et de la thèse de M. Coustau (2011) et est présenté dans le L4-1 du projet Lez – GMU (Rapport BRGM/RP-60222-FR, Borrell-Estupina et al. 2012). En plus de son architecture et de son fonctionnement, son calage et une analyse de sensibilité poussée y ont également été présentés.

Compte tenu de l'objectif visé (la prévision des crues importantes pour des temps de réponse inférieurs à 6 heures) et des fortes variabilités spatio-temporelles des pluies méditerranéennes, ce modèle est de type pluie-débit, à réservoir, événementiel, distribué, parcimonieux et fonctionne à pas de temps horaire. Il a été implémenté dans la plateforme ATHYS⁸.

Le rapport L4-1 a montré que ce modèle fournit des simulations de crue satisfaisantes avec des pics de crue relativement bien reproduits. L'erreur moyenne sur le débit maximum est inférieure à 20 %, ce qui est un résultat acceptable au vu de l'incertitude sur les données de précipitations.

Nous venons de voir comment, suite à une pluie incidente, l'état initial de remplissage du sol et du karst évoluait vers un nouvel état. La crue de surface ne sera générée que si ce nouvel état est dit "saturé". Ainsi, le modèle pluie - débit sera mis en œuvre, pour les pluies ayant saturé l'hydrosystème du Lez. La condition initiale du modèle pluie- débit sera alors : S (déficit hydrique du sol) = 0.

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

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

Au vu des précipitations observées le 6 septembre 2005 à Nîmes mais aussi dans la région montpelliéraine, il a été décidé d'élaborer un outil de vigilance allant jusqu'à des intensités de 50 mm/h pendant au maximum 6 heures. Ainsi, les intensités de 5 à 50 mm/h par pas de 5 mm/h vont être testées, sur des durées allant de 1 à 6 heures par pas de 1 h puis de 12, 18 et 24 h. Les résultats sont fournis Illustration 83.

⁸ A noter que le modèle événementiel pluie-débit présenté ici a fait l'objet du travail de thèse de Mathieu Coustau. Cette thèse a été financée par une bourse ministérielle et son environnement a été assuré par le projet Lez Gestion Multi-usages ainsi que par des financements internes à HydroSciences Montpellier. Pour plus de précisions ou d'informations, le lecteur pourra se référer à son manuscrit de thèse, à ses publications, ou au L4-1

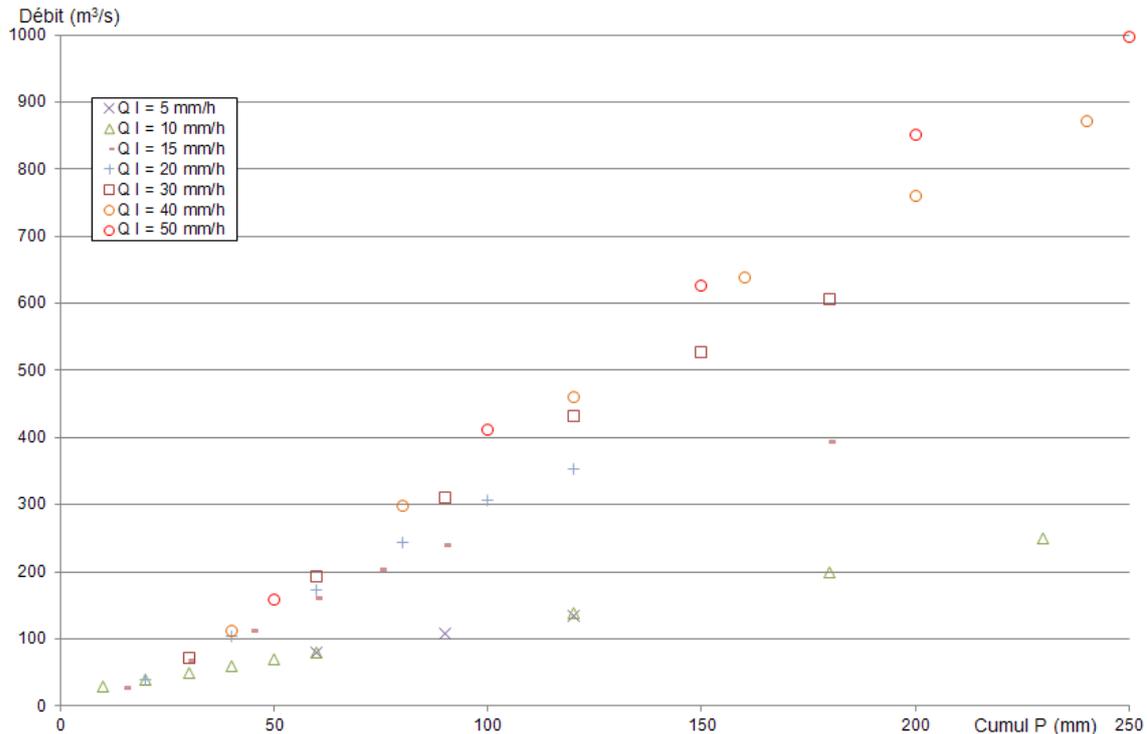


Illustration 83 : Débit du pic de crue horaire simulé par le modèle pluie - débit en fonction du cumul de précipitation efficace pour différentes intensités et un état hydrique initial nul

Pour des cumuls faibles inférieurs à 70 mm, et une intensité forte comprise entre 15 et 50 mm/h, le pic de crue est compris entre 200 et 250 m³/s. Par contre les débits sont significativement plus faibles pour les intensités inférieures ou égales à 10mm/h, ils ne dépassent pas 100 m³/s.

Pour des cumuls forts et des intensités supérieures à 15 mm/h, les débits sont importants. Par contre, pour des intensités inférieures ou égales à 10 mm/h, le débit reste limité. Il est par exemple inférieur à 250 m³/s pour un cumul de 230 mm. Il apparaît ainsi que l'intensité 15 mm/h représente une transition entre un impact fort et un impact faible. Cette valeur « charnière » d'intensité sera conservée par la suite.

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

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

Nous proposons d'adapter les résultats du modèle à cette grille. Il nous faut dans un premier temps transformer les niveaux définis à Garigliano au site de Lavalette. En effet, le modèle Athys (Coustau, 2011) a été développé à l'exutoire de Lavalette, qui représente la station immédiatement amont à Montpellier. Au-delà de cette station, nous considérerons que

l'écoulement du Lez est très fortement conditionné par son lit et que la mise en œuvre d'un modèle hydraulique s'impose. Ainsi, l'outil développé pour reproduire les débits amont sera basé sur les travaux réalisés à Lavalette. Les niveaux de vigilance à Garigliano devront être convertis en débits à Lavalette selon les résultats de l'étude hydraulique qui fait l'objet du chapitre suivant. Le lecteur s'y référera pour l'étude complète, nous retiendrons ici que :

- les apports des affluents entre Lavalette et Garigliano sont négligeables (hypothèse hautement contestable, nous envisageons donc un cas "optimiste")
- le fonctionnement hydraulique du Lez à Garigliano se traduit par la courbe suivante :

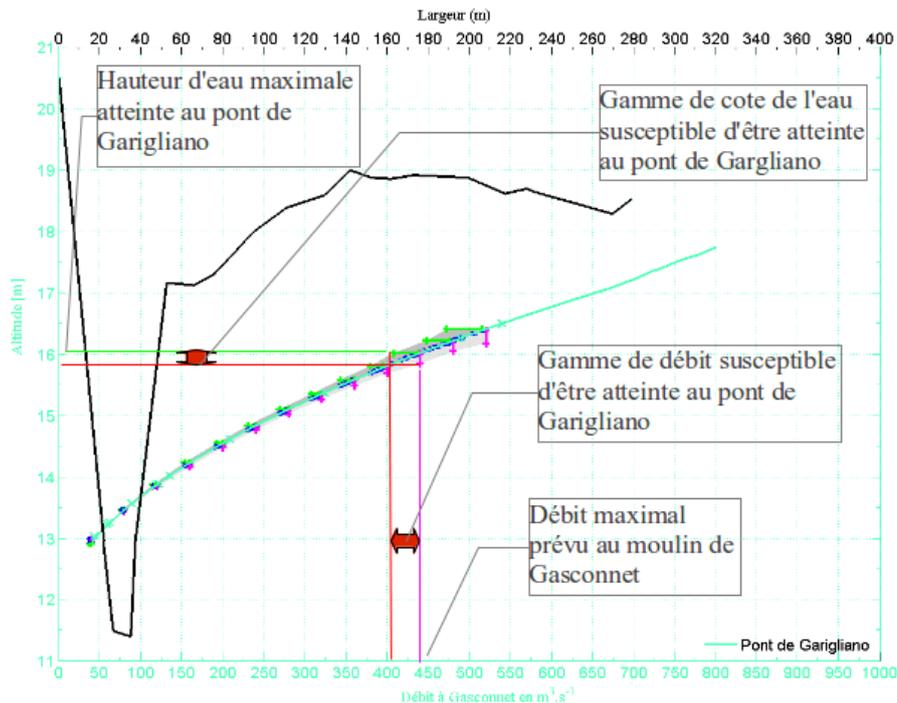


Illustration 84 : Abaque au pont de Garigliano (se référer à l'illustration 134)

Ainsi la grille de Vigilance à Garigliano en niveaux d'eau atteints dans le Lez peut être traduite en débits à la station limnimétrique de Lavalette de la façon suivante :

- vigilance jaune : $H_{\text{Garigliano}} = 1,75 \text{ m}$; $Q_{\text{Garigliano}} \approx 75 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{Lavalette}} \approx 70 \text{ m}^3/\text{s}$.
- vigilance orange : $H_{\text{Garigliano}} = 3,25 \text{ m}$; $Q_{\text{Garigliano}} \approx 400 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{Lavalette}} \approx 350 \text{ m}^3/\text{s}$.
- vigilance rouge : $H_{\text{Garigliano}} = 4,25 \text{ m}$; $Q_{\text{Garigliano}} \approx 600 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{Lavalette}} \approx 500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Du fait de la différence d'écoulement entre les états permanent et transitoire, la relation reliant le débit à la hauteur n'est pas univoque. C'est pourquoi une "fourchette" de débits a été précisée ci-dessus. Nous avons choisi de ne retenir qu'une seule valeur de débit représentatif, ce sera le centre de cet intervalle de variation (dernière colonne).

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

Ensuite, trois courbes, « débit en fonction des précipitations » selon différentes intensités, sont ajoutées à partir des résultats de l'analyse sur le rôle de l'intensité des précipitations présentés

précédemment. La courbe d'intensité 10 mm/h (courbe en vert pointillé) fournira la limite avec les épisodes de faible intensité. La courbe d'intensité 15 mm/h (en pointillés orange) permettra d'approcher les épisodes d'intensité significative mais non extrême. Enfin la courbe d'intensité égale à 50 mm/h (pointillés rouges), permettra d'approcher les épisodes extrêmes. Les épisodes étudiés (voir Illustration 80) sont replacés dans l'abaque (Illustration 85).

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

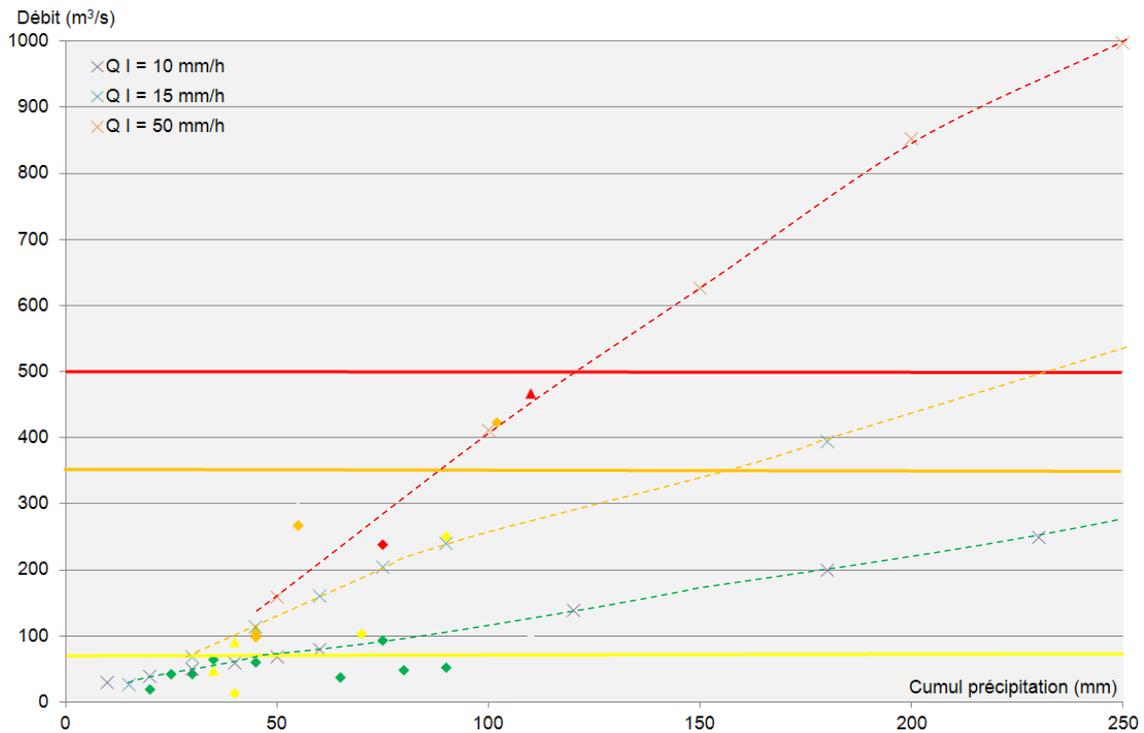


Illustration 85 : Abaque « Débit à Lavalette en fonction du cumul des précipitations efficaces » et épisodes mesurés

La version finale de l'abaque est représentée sur l'illustration 86.

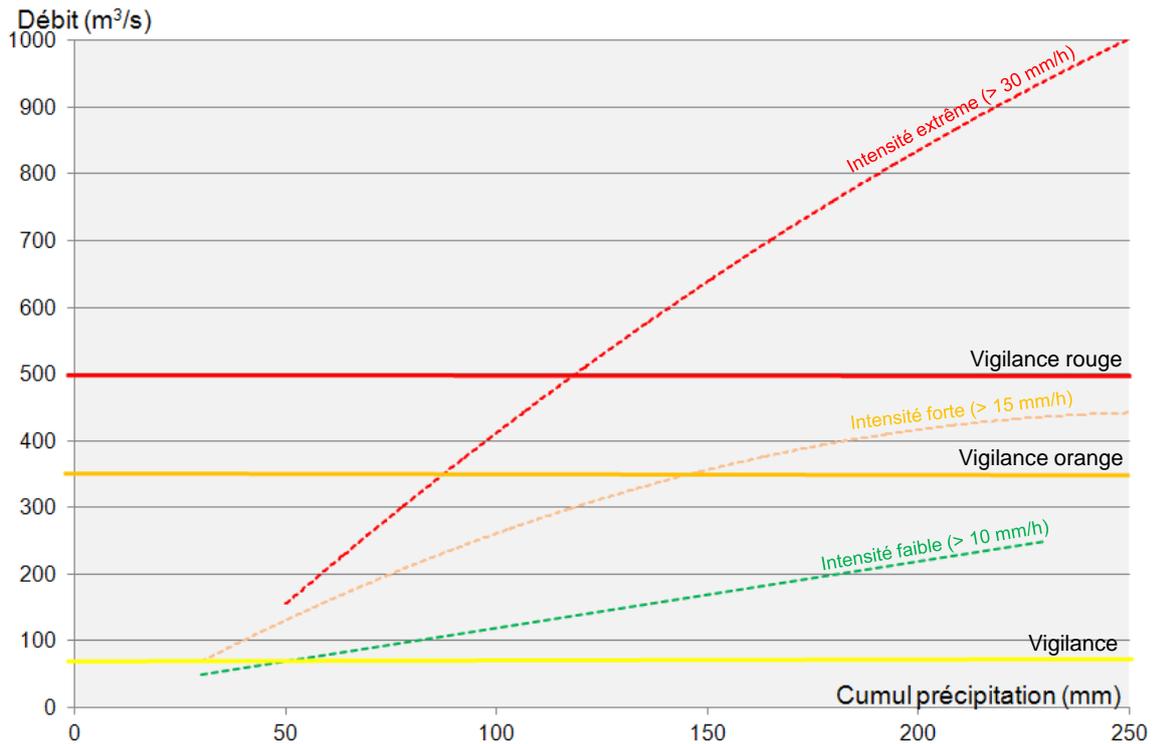


Illustration 86 : Abaque « Débit à Lavalette en fonction du cumul des précipitations efficaces pour différentes intensités »

4.5.3. Utilisation des abaques

Les deux abaques doivent s'utiliser conjointement et ne former qu'un. Nous proposons ainsi d'utiliser en partie inférieure celui correspondant au karst et dans la partie supérieure celui affecté au ruissellement (Illustration 87). L'abaque fourni en pièce jointe à ce rapport est constitué des deux parties pouvant coulisser l'une par rapport à l'autre (représenté par la flèche Illustration 87) afin de pouvoir être utilisé pour l'ensemble des états de saturation du karst.

Lors de la réalisation de ces abaques, ce sont les pluies moyennes pondérées sur le bassin hydrogéologique qui ont été utilisées. L'abaque sera utilisé en temps réel à partir de l'évaluation d'une pluie moyenne sur le bassin. Si l'essentiel des précipitations se concentrent sur la partie sud du bassin versant du Lez, à savoir la partie non carbonatée à l'aval du karst, alors cet épisode conduira à un ruissellement plus important que celui prévu par l'abaque.

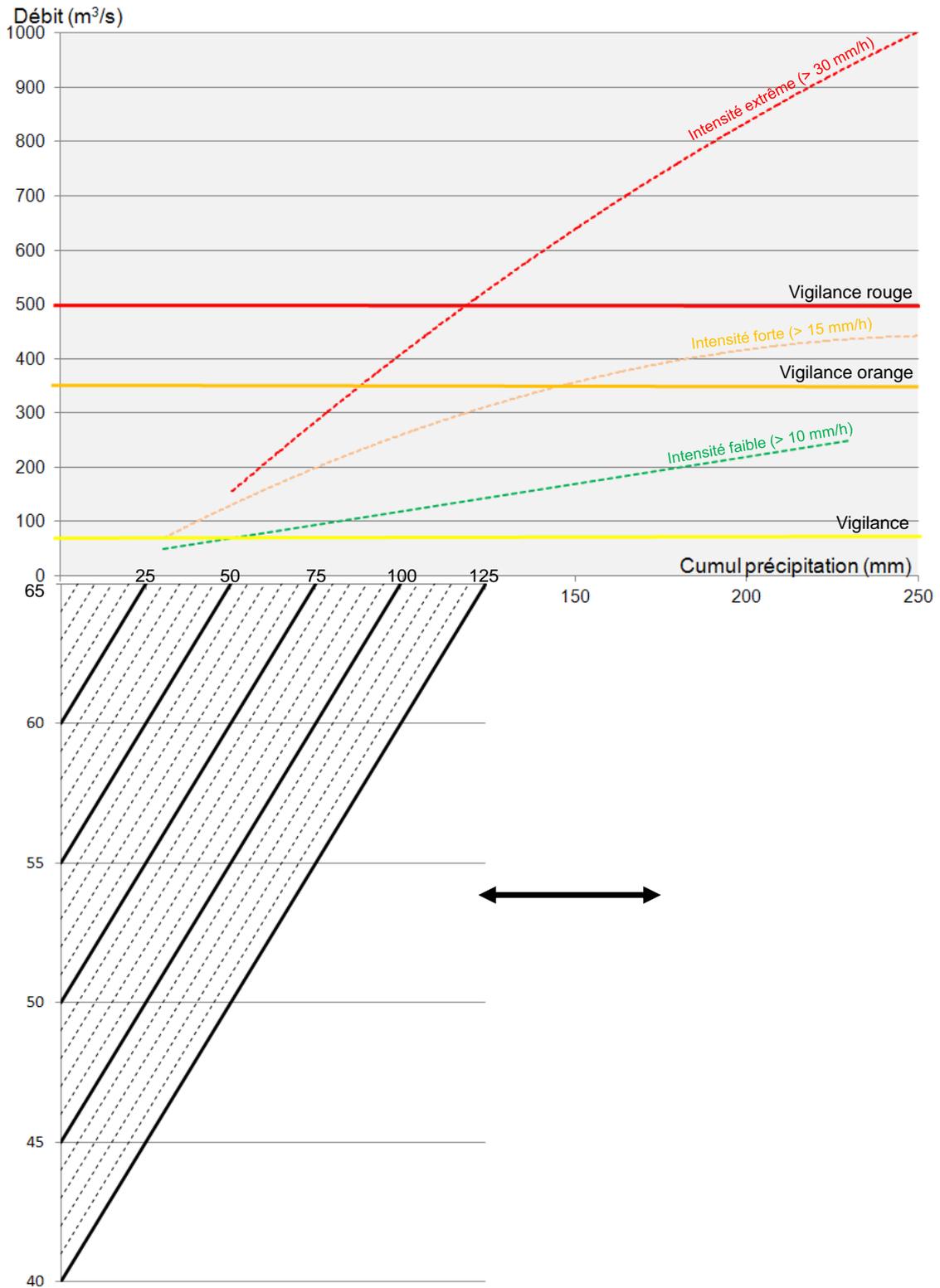


Illustration 87 : Abaque à double entrée : « niveau karst et débit en fonction des pluies ».

L'abaque a été testé sur l'épisode de septembre 2005 dont les caractéristiques sont présentées à l'illustration 88.

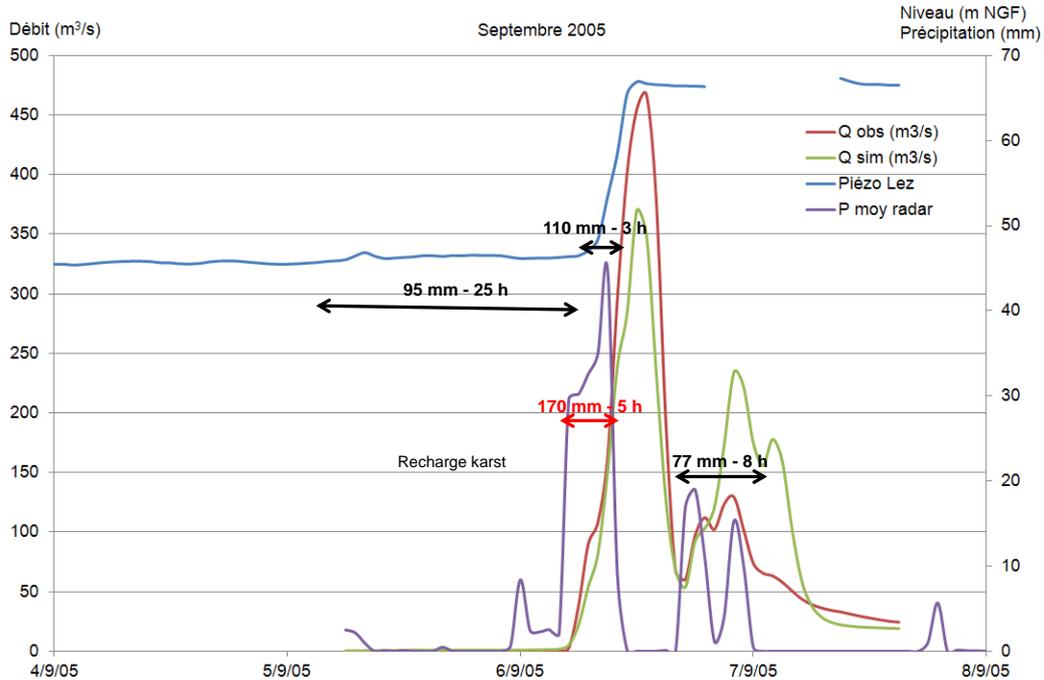


Illustration 88 : Episode de septembre 2005

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

Les premières précipitations (cumul de 95 mm) permettent de saturer le karst. Le niveau passe ainsi de 46 m NGF (point A sur l'abaque, Illustration 89) à 65 m NGF (point B). Les précipitations sur le système sont ensuite de 110 mm en 3 h. Compte tenu de l'intensité moyenne horaire de 37 mm l'épisode est considéré comme extrême. Le point C est obtenu pour un cumul de 110 mm et une intensité extrême. Le système passe en vigilance orange et est proche de la vigilance rouge. Le débit associé ainsi défini à partir de l'abaque est égal à 460 m³/s, ce qui est très proche du débit mesuré (467 m³/s).

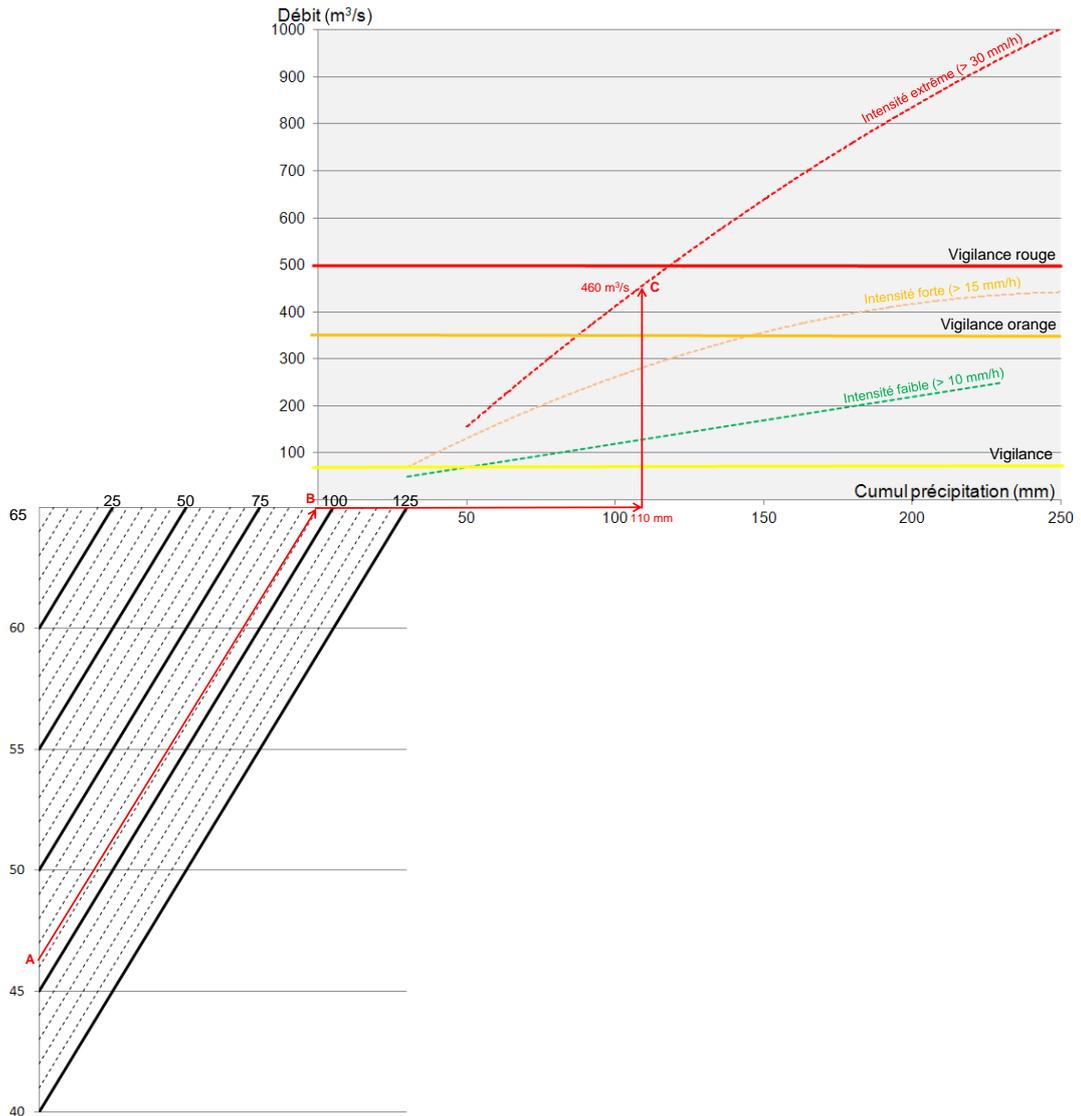


Illustration 89 : Exemple d'utilisation de l'abaque – épisode de septembre 2005, karst sous saturé.

On se propose de reprendre l'exercice mais cette fois-ci en faisant l'hypothèse que le karst était initialement saturé. L'épisode contribuant à la crue est désormais caractérisé par un cumul supérieur à 170 mm en 5 h soit une intensité moyenne proche de 35 mm/h. A partir de ces informations l'abaque nous permet d'évaluer le débit qui aurait pu être atteint si le karst avait été saturé. On obtient un débit d'environ 720 m³/s (vigilance rouge).

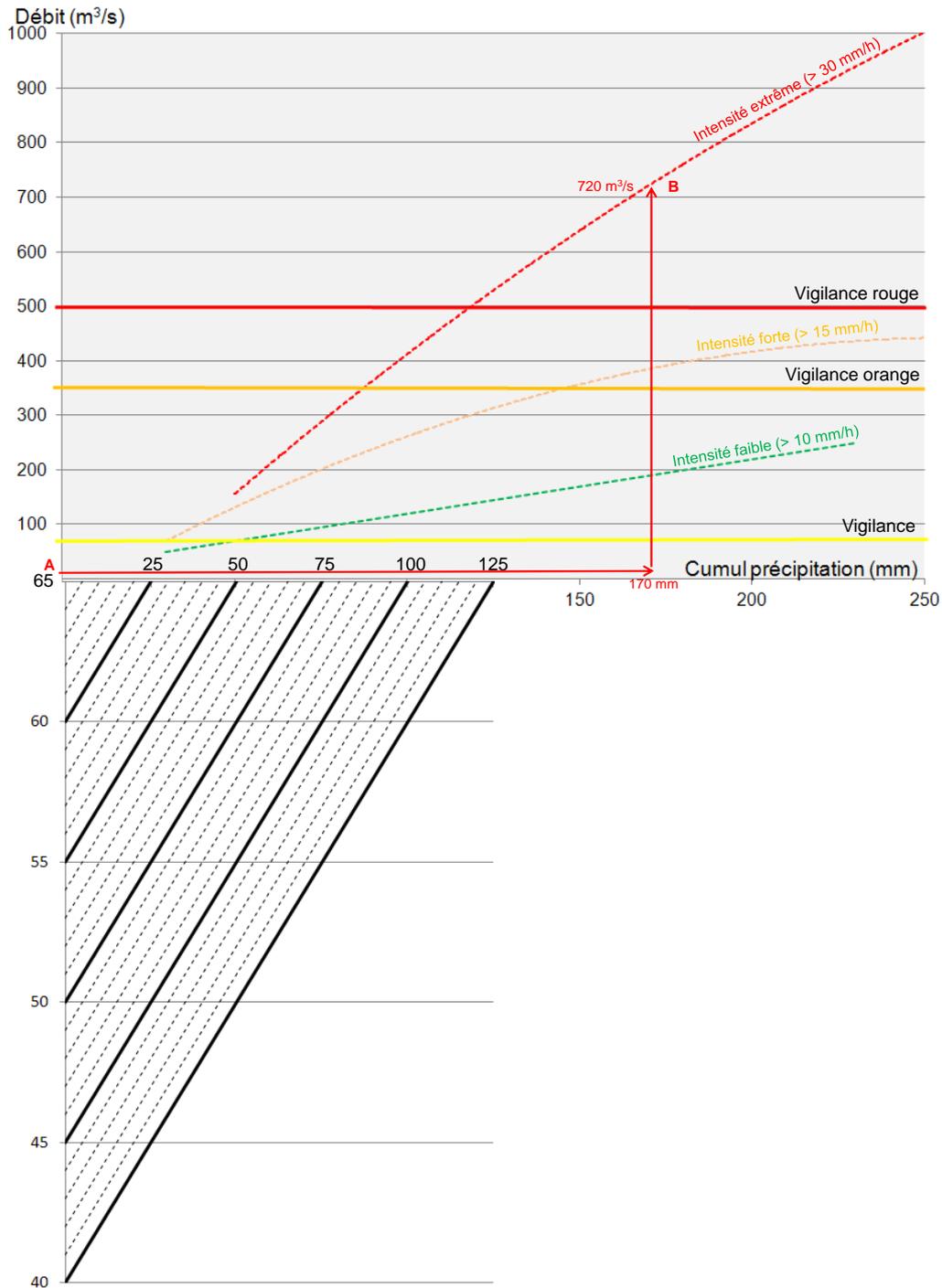


Illustration 90 : Exemple d'utilisation de l'abaque – épisode de pluie de septembre 2005 en condition de karst saturé

4.6. EVALUATION DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS GLOBAUX SUR LES CRUES DU LEZ

Comme l'analyse précédente des projections de précipitations à moyen et long termes le montre, il est difficile d'anticiper aujourd'hui les évolutions futures d'une part de la lame d'eau précipitée au cours d'un orage, et d'autre part de l'intensité maximale que la pluie atteindra dans

la région Montpellieraine. En effet, les modèles de climat actuellement opérationnels ne permettent pas une reproductibilité des épisodes cévenols (relief du secteur non pris en compte à une échelle suffisamment fine, pas de temps infra journalier non simulé). Or, comme le présent chapitre le montre, les crues de surface du Lez sont très fortement contraintes par le cumul et l'intensité de l'épisode de pluie. Ainsi, nous proposons dans ce paragraphe de mettre en évidence l'impact que pourrait avoir une modification de l'état de remplissage du karst sur les crues, pour différentes gammes de précipitations. Aucune caractéristique fréquentielle de la rareté de la précipitation ne sera considérée.

Ainsi, dans le cadre de la prévision des crues, nous avons souhaité rendre compte de l'impact qu'aurait une évolution des niveaux de remplissage du karst avant la survenue d'une pluie. Cette caractérisation est présentée pour différentes gammes de précipitations incidentes.

Actuellement, rappelons que le niveau piézométrique minimum autorisé est égal à 35 m NGF, soit 30 m sous le niveau de la vasque. Afin d'illustrer le cas où l'aquifère serait exploité jusqu'à des niveaux inférieurs à l'actuel, nous avons supposé comme niveau piézométrique minimum, un niveau de 20 m NGF soit un rabattement de 15 m supplémentaires par rapport à l'actuel. L'outil de prévision des crues a ainsi été actualisé sur cette base.

Il n'existe pas aujourd'hui d'information sur le comportement de l'aquifère pour des niveaux inférieurs à 35 m NGF, ces hauteurs d'eau n'ayant jamais été atteintes par le passé. En l'absence de nouvelles données, nous ferons l'hypothèse que le comportement et la structure de l'aquifère (« porosité équivalente » au sein des zones vadose et noyée du karst) sont comparables entre 20 et 35 m NGF à ceux observés précédemment entre 35 et 65 m NGF. Sans cette hypothèse forte, il est impossible d'extrapoler le fonctionnement de l'hydrosystème et donc les impacts sur les crues. Si, dans le futur, cette hypothèse devait être invalidée par des observations in situ, alors l'extrapolation proposée dans cette partie devrait être revue.

La relation suivante précédemment définie est donc utilisée pour la gamme de hauteur 20 à 35 m NGF :

5 mm de pluie → remontée de 1 m NGF

La relation de mise en saturation du sol reste inchangée, tout comme le modèle hydrologique de genèse et propagation des crues de surface, une fois le karst saturé.

4.6.1. Actualisation de l'outil de prévision des crues

L'abaque relatif à la saturation du karst peut être complété (Illustration 91). Ce dernier permet d'appréhender visuellement les capacités d'écrêtage lorsque le système est au plus bas. La nouvelle capacité de stockage passe à 225 mm, alors qu'elle était de 150 mm pour un karst à 35 m NGF. La capacité d'écrêtage est augmentée de 75 mm.

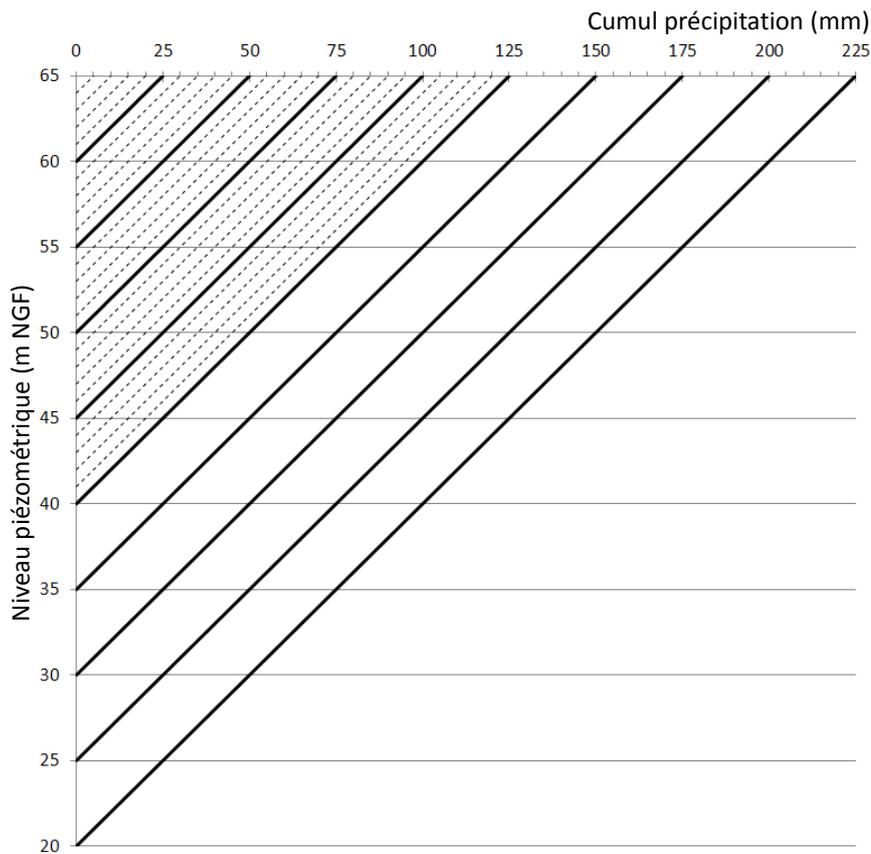


Illustration 91 : Abaque : « Pluie - niveau du karst » pour un niveau minimum dans le karst à 20 m NGF.

On se propose de reprendre la prévision associée à l'épisode de pluie de septembre 2005, mais cette fois-ci en faisant l'hypothèse que le karst était initialement à 20 m NGF. L'épisode contribuant à la crue est caractérisé par un cumul de 205 mm en 33 h les 5 et 6 septembre (voir Illustration 88). Ce cumul est insuffisant pour assurer la saturation du karst. Il n'y aurait donc pas eu de crue de surface associée à ce premier épisode de pluie caractérisé par une forte intensité. Le second épisode de 77 mm en 8 heures, aurait conduit dans un premier temps à la saturation du karst (les 20 premiers mm) puis à la genèse d'une crue de surface (57 mm restant). Cette pluie de 57 mm de faible intensité aurait, d'après l'abaque, conduit à une petite crue de l'ordre de 80 m³/s mettant le système au seuil de vigilance (Illustration 92).

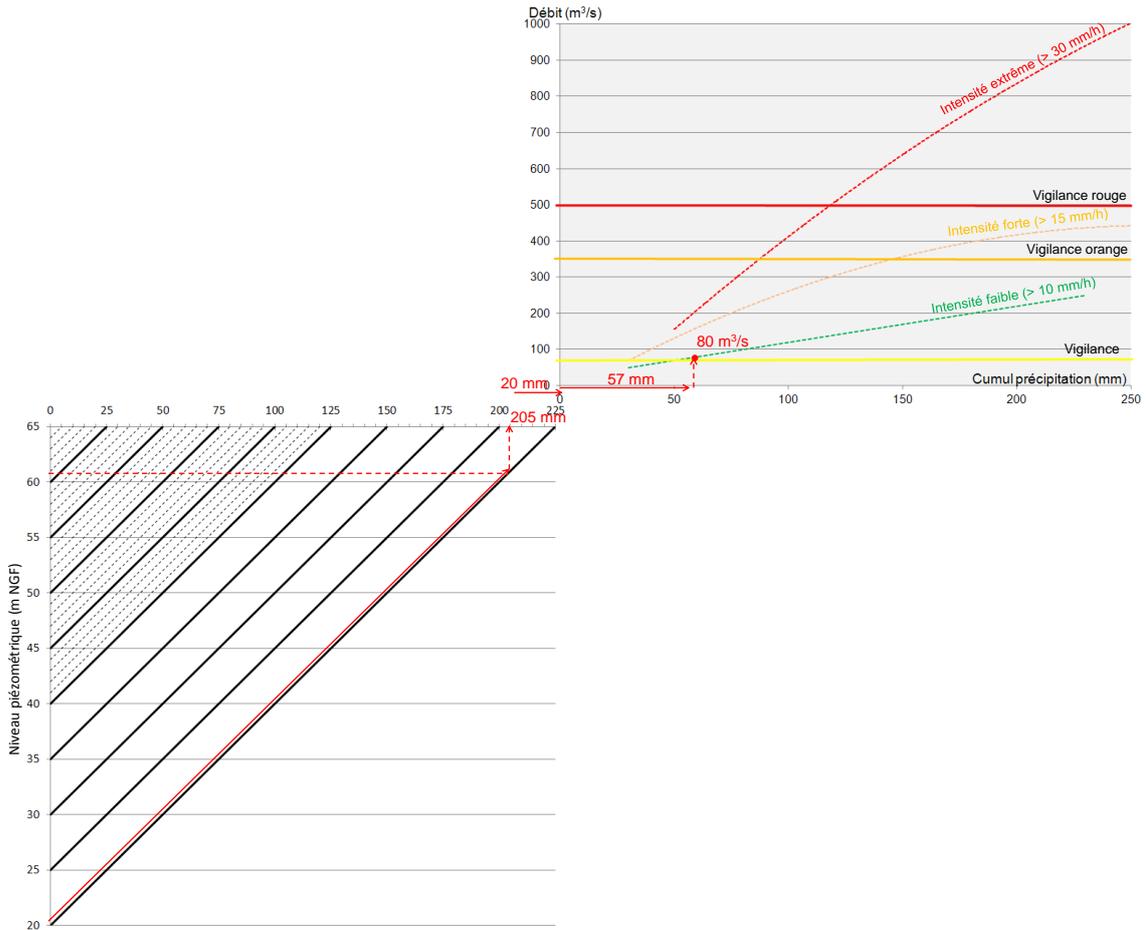


Illustration 92 : Exemple d'utilisation de l'abaque – épisode de pluie de septembre 2005 avec en condition initial le karst à 20 m NGF.

Ainsi cette abaque prenant en compte un état de remplissage du karst à un niveau 15 m inférieur à ce qui est autorisé à l'actuel permet d'approcher l'impact de l'épisode de pluie de septembre 2005. Pour mémoire, le débit mesuré était de 460 m³/s le 6 septembre alors que le niveau initial était de 46 m NGF. Si le niveau initial avait été à 20 m NGF le débit maximum aurait été d'environ 80 m³/s. Rappelons que si cette analyse avait été conduite avec l'hypothèse selon laquelle le karst était plein, le débit aurait été supérieur à 700 m³/s (Illustration 90). Ces résultats sont précisés dans le tableau ci-après (Illustration 93).

épisode	niveau initial du karst (m NGF)	débit du pic de crue (m3/s)	niveau de vigilance
cas réel	46	460	rouge
simulation : karst saturé	65	720	rouge
simulation : karst déprimé	20	80	jaune

Illustration 93 : Synthèse des résultats de la crue de septembre 2005 en fonction de l'état initial de remplissage du karst

Il convient de rappeler que la simulation de type « karst déprimé » n'a été possible que moyennant une hypothèse d'homogénéité de comportement du karst pour des niveaux en-dessous de 35 m NGF. Cette hypothèse est relativement forte et nécessite d'être confirmée par des observations si de tels niveaux venaient à être atteints dans le futur.

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

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

Les données d'entrée sont (Illustration 94 - colonnes en rouge) : (1) le cumul de précipitation, (2) l'interception par le sol et (3) le niveau de l'aquifère karstique du Lez.

Les données en sortie sont alors les 3 débits calculés à Lavalette. Ils sont fournis selon l'intensité des pluies (extrême, forte, faible). L'épisode de septembre 2005 est traité à titre d'exemple, en condition de karst sous saturé (situation réelle, ligne 1), saturé (scénario testé, ligne 2), sous saturé à 20 m NGF (scénario testé, ligne 3). Cet épisode de pluie étant caractérisé par une première phase d'intensité extrême, le débit de crue se lit dans la colonne « Débit associé à Intensité extrême » pour les deux premiers cas. Pour le dernier cas l'intensité en fin d'épisode était faible, il faut donc lire le résultat dans la colonne « Débit associé à Intensité faible ».

Pluie (mm)	interception sol mm (0 si sol saturé, 20 sinon)	Niveau initial Lez (m NGF)	Niveau final Lez (m NGF)	Pluie nécessaire pour recharger le karst (mm)	Pluie contribuant crue (mm)	Débit associé à Intensité extrême (m ³ /s)	Débit associé à Intensité forte (m ³ /s)	Débit associé à Intensité faible (m ³ /s)
205	0	46	65	95	110	459	281	129
170	0	65	65	0	170	720	382	189
282	0	20	65	225	57	193	152	76

Illustration 94 : Feuille de calcul Excel pour approcher les débits à Lavalette

4.6.3. Synthèse graphique de l'impact des changements globaux sur les crues

Le tableau suivant (Tableau 8) a été réalisé à titre indicatif afin de visualiser rapidement l'impact d'un changement global, qu'il s'agisse d'un rabattement du niveau piézométrique plus important du fait d'une augmentation des prélèvements ou d'une modification des cumuls ou intensités des pluies futures, sur le débit de pointe de la crue du Lez en amont de Montpellier (noté Q Lavalette en m³/s). Le code couleur adopté est celui correspondant aux règles de vigilance et traduit en débit à Lavalette. L'effet de la traversée de Montpellier sur la propagation de la crue est aussi représenté à travers le niveau d'eau à Garigliano (H Garigliano en m NGF). Le passage débit - niveau d'eau est réalisé grâce à la modélisation hydraulique présentée dans le rapport précédent (L-4.1.) et aux abaques hydrauliques présentées dans le chapitre suivant (pour une lecture rapide, se référer simplement au graphe de l'Illustration 134). Deux hypothèses fortes ont été faites pour l'élaboration de ce tableau synthétique : le sol est initialement saturé quel que soit l'état de remplissage initial du karst (cas défavorable), les apports latéraux entre Lavalette et Garigliano (affluent : la Lironde) sont nuls (cas favorable).

HGarigliano \ Qlavellette		Pluie																	
		Cumul Intensité 100 10		Cumul Intensité 100 15		Cumul Intensité 100 30		Cumul Intensité 150 10		Cumul Intensité 150 15		Cumul Intensité 150 30		Cumul Intensité 200 10		Cumul Intensité 200 15		Cumul Intensité 200 30	
		100	10	100	15	100	30	150	10	150	15	150	30	200	10	200	15	200	30
Niveau Piézométrique initial	65	13.9	117	15	264	15.9	414	14.25	164	15.5	350	16.95	642	14.7	221	15.95	421	17.9	834
	50	<13.25	<70	<13.25	<70	<13.25	<70	13.8	100	14.5	200	15.1	285	14.1	142	15.4	314	16.5	535
	35	<13.25	<70	<13.25	<70	<13.25	<70	<13.25	<70	<13.25	<70	<13.25	<70	13.25	70	13.95	128	14.25	164
	20	<13.25	<70	<13.25	<70	<13.25	<70	<13.25	<70	<13.25	<70	<13.25	<70	<13.25	<70	<13.25	<70	<13.25	<70

Hypothèse d'un sol initialement saturé (pour un sol sec, retrancher 20 mm au cumul de pluie incidente)

Valeurs issues de lecture graphique arrondies

Q = Débits en m³/s, H = Niveau d'eau en m NGF, P = Niveau piézométrique en m NGF, Cumul de Pluie en mm, Intensité de Pluie en mm/h

seuils utilisés	jaune	orange	rouge
Q Lavalette	70	230	400
tirant d'eau	1.75	3.25	4.25
H Garigliano	13.25	14.75	15.75

Tableau 8 : Tableau synthétique d'estimation de l'impact des changements globaux sur les crues du Lez

On constate que:

- l'effet d'une diminution du niveau de remplissage du karst sur les crues de surface est fort pour les 9 pluies testées. Les débits de pointe des crues de surface diminuent très rapidement si le karst est déprimé. Pour un karst saturé (65m NGF), un niveau de vigilance au minimum jaune doit être émis pour une pluie incidente prévue de 100 mm ou plus et quelle que soit son intensité (la plus faible testée étant de 10 mm/h). Alors que si la même gamme de pluie survient sur un karst dont le niveau piézométrique à la source est de 20 m NGF, aucune crue de surface significative ne se serait produite (sous réserve de la validité de l'hypothèse de l'extrapolation du fonctionnement du karst sous les 35 m NGF) ;
- plus le niveau initial du karst est élevé et plus l'influence de l'intensité de pluie à venir sur le débit de pointe généré est forte. Or aujourd'hui, cette intensité de pluie est une des grandeurs parmi les plus difficiles à prévoir en temps réel. Un niveau de remplissage du karst initialement plus bas permet de rendre la prévision de la valeur du débit de pointe plus fiable en temps réel (car moins influencée par l'intensité).

4.7. CONCLUSION

L'étude du fonctionnement de recharge de l'aquifère karstique et du fonctionnement hydrologique du bassin versant a permis dans un premier temps la modélisation des principales crues du Lez et dans un second temps la compréhension de la survenue des crues de surface en amont de Montpellier. Cette avancée a été traduite par la mise en place d'un outil d'aide à l'élaboration de la couleur de vigilance à 24 heures du tronçon amont du Lez. Réalisé sous la forme d'un abaque triple entrée, il permet, à partir de i) l'état de remplissage du karst initial, ii) des cumuls de pluie précédents ou estimation de l'état hydrique du sol initial, iii) des prévisions de pluie à venir (cumul et intensité maximale) de prévoir la réponse du système en terme de débit et ainsi définir l'état de ce dernier vis-à-vis de l'alerte à la station de Lavalette.

Cet outil devra être testé dans le futur par le SPC Méditerranée-Ouest durant plusieurs épisodes de crue afin d'en valider définitivement la pertinence. **De plus, l'utilisation de cet abaque en dehors de son domaine de validité (niveaux piézométriques de la vasque sous 35 m NGF et gamme de crue représentée par l'échantillon collecté) ne peut être garantie.** Lorsque des observations de l'hydrosystème pour d'autres crues que celles collectées et pour des niveaux piézométriques suffisamment bas auront été recueillies, les hypothèses sur

lesquelles reposent l'extrapolation du domaine actuel de validité pourront être revues et le cas échéant corrigées.

Une fois le débit en amont de Montpellier (à Lavalette) prévu, il convient de propager la crue du Lez à travers la ville. Cette étape fait l'objet du chapitre suivant. Le débit prévu en amont y sera traduit en termes de débit et de niveaux d'eau dans le Lez à la traversée de Montpellier.

Toutefois, au cours du trajet aval, les apports des affluents au niveau du tissu urbain viennent s'ajouter aux écoulements du bassin amont du Lez et collectés à Lavalette. L'étude et la modélisation de ces apports complémentaires ne font pas l'objet de la présente étude. Toutefois, une étude de faisabilité de la prise en compte d'un de ces apports pourra faire l'objet d'une note supplémentaire.

5. Simulation hydraulique du fleuve Lez : propagation des crues

Dans le précédent rapport L4.1 (Borrell-Estupina et al. 2012, Rapport BRGM RP-60222-FR), les données géométriques et hydrauliques utilisées ainsi que le fonctionnement global du logiciel SIC ont été présentés. Les coefficients de débits aux seuils du moulin de Gasconnet, de Garigliano et à la 3^{ème} écluse de Lattes avaient été calés en utilisant la méthode du simplexe et des premiers résultats de simulation avaient été exposés. Depuis lors, le modèle a considérablement évolué :

- les données géométriques du lit du Lez relevées par BRL (BRL Ingénierie, 2009) ont complété l'ancienne géométrie utilisée (DDE Hérault, BCEOM, 1996). Un travail d'identification des lits moyens et majeurs a été effectué ;
- les travaux des digues du Lez à l'aval de l'autoroute ont été pris en compte. Nous avons ajusté la géométrie des digues à l'aide des plans de recollement (BEC topographie, 2011) ;
- la géométrie des ouvrages en travers a été revue afin d'intégrer les formes trapézoïdales ;
- le modèle intègre désormais une règle permettant une gestion automatisée en temps réel du seuil mobile du Pont du Moulin de l'Évêque ;
- la modélisation du déversoir latéral de sécurité de Lattes a été ajustée pour fonctionner selon ce qui a été prévu lors de sa construction ;
- les apports des principaux affluents (Lironde et Verdanson) ont été reconstitués.

Dans ce rapport, nous ne présenterons pas les évolutions de la géométrie du modèle. Nous nous contenterons d'exposer et de commenter les principaux résultats des simulations des crues dans le Lez qui ont conduit à la construction d'abaques. Celles-ci permettent d'obtenir la cote de l'eau atteinte à certaines sections le long du Lez, en fonction du débit de crue à la station de Lavalette.

5.1. MODELE HYDRAULIQUE

Dans cette partie, nous donnons les détails des simulations hydrauliques effectuées pour caler le modèle. Nous expliquons comment les observations ont été utilisées pour ajuster celui-ci. Ces ajustements concernent les paramètres hydrauliques du modèle (c'est-à-dire les coefficients de Strickler et les coefficients de débit au seuil), la reconstitution des apports de la Lironde et du Verdanson mais aussi le fonctionnement du seuil mobile du Pont du Moulin de l'Évêque. Nous exposerons ensuite les résultats obtenus après ce calage et comparerons nos résultats aux modélisations réalisées par BRL (2009).

5.1.1. Crues choisies pour le calage du modèle

Afin de caler, valider et coupler le modèle hydraulique SIC avec le modèle hydrologique Athys-Mercedes, des données hydrauliques sont nécessaires. Nous avons choisi 12 crues dont les enregistrements sont disponibles aux stations de Lavalette et de Garigliano (enregistrements disponible à la 3^{ème} écluse de Lattes uniquement pour la crue de 2008) et qui respectent les critères suivant (Tableau 9):

- un cumul de pluie sur l'épisode supérieur à 90 mm ;

- un débit de pointe au niveau de Lavalette supérieur à 40 m³/s.

Début de la crue	Fin de la crue	Données disponibles aux stations Lavalette (L), Garigliano (G) et 3 ^{ème} écluse (E)
11/11/1999 00:00	23/11/1999 00:00	L, G
28/09/2000 07:31	03/10/2000 19:00	L, G
16/01/2001 07:30	24/01/2001 14:00	L, G
09/10/2001 06:00	14/10/2001 14:00	L, G
08/09/2002 13:05	12/09/2002 10:00	L, G
08/10/2002 06:00	14/10/2002 17:00	L, G
09/12/2002 07:13	21/12/2002 01:00	L, G
22/09/2003 10:58	25/09/2003 15:00	L, G
15/11/2003 00:00	20/11/2003 04:00	L, G
29/11/2003 07:01	10/12/2003 04:00	L, G
05/09/2005 05:45	07/09/2005 15:00	L, G
19/10/2008 14:04	25/10/2008 06:00	L, G, E

Tableau 9 : Synthèse des hydrogrammes de crue sélectionnés et lieu des enregistrements (L = Lavalette ; G = Garigliano ; E = 3^{ème} écluse)

Pour les scénarios transitoires, ces hydrogrammes de crues sont injectés au premier nœud de notre modèle (95 m en amont du seuil de Lavalette). Ces simulations transitoires sont précédées d'une initialisation du modèle en régime permanent correspondant au débit initial de chaque hydrogramme.

5.1.2. Calage des coefficients (seuils du moulin de Gasconnet, de Garigliano et de la 3^{ème} écluse)

Les données issues de la banque hydrologique des stations situées aux seuils de Lavalette, Garigliano et de la troisième écluse sont constituées des hauteurs d'eau et des débits instantanés calculés à partir d'une courbe de tarage. Les coefficients de débits aux 3 seuils ont donc pu être ajustés pour que les simulations reproduisent ces observations. Ces calages ont été réalisés en considérant les seuils dénoyés, à l'aide d'un programme MatLab (basé sur la fonction fminsearch, algorithme de type Simplex Nelder Mead) et un critère quadratique sur l'écart entre les débits mesurés et simulés.

Les valeurs des coefficients des autres seuils sont laissées par défaut faute de données spécifiques pour ce calage. Les valeurs suivantes sont couramment admises :

- pour les seuils rectangulaires : $C_d = 0,4$
- pour les seuils trapézoïdaux : $C_d = 1,12$
- pour les orifices : $C_d = 0,6$

5.1.3. Déversoir latéral de sécurité de Lattes

Ce déversoir a été dimensionné pour fonctionner à des débits du Lez supérieurs à $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Son débit maximum dérivé du Lez serait de $170 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un débit dans le Lez de $750 \text{ m}^3/\text{s}$ au droit de l'A9 (Quévremont P., 2006). Les coefficients de Strickler à l'aval du déversoir ainsi que son coefficient de débit ont été ajustés pour qu'il fonctionne comme prévu. Les coefficients de Strickler aval nécessaires sont de 20,1 et son coefficient de débit doit être de 0,23.

5.1.4. Cas particulier du seuil mobile du Pont du Moulin de l'Évêque

Le Pont du Moulin de l'Évêque est situé dans la ville de Montpellier au niveau de l'Hôtel de Région. Il est composé de trois seuils mobiles gérés par la Mairie de Montpellier (Illustration 95 et Illustration 96). Le but de cet ouvrage est de conserver une hauteur constante à l'amont de ce dernier.

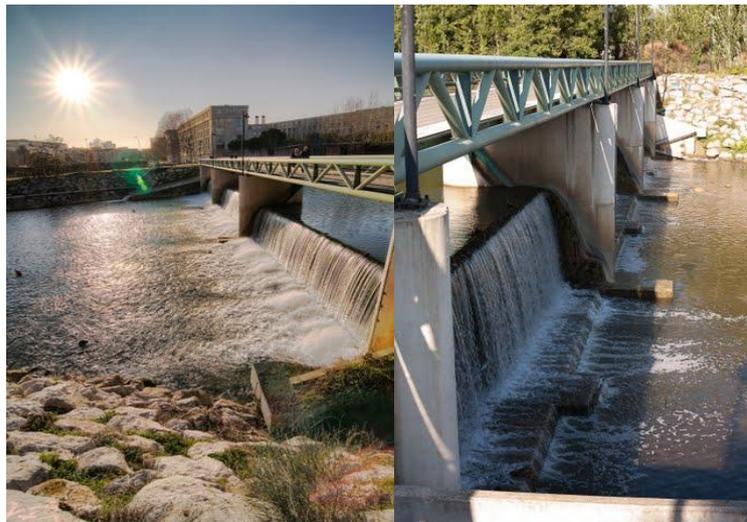


Illustration 95 : Photos du pont de l'Évêque

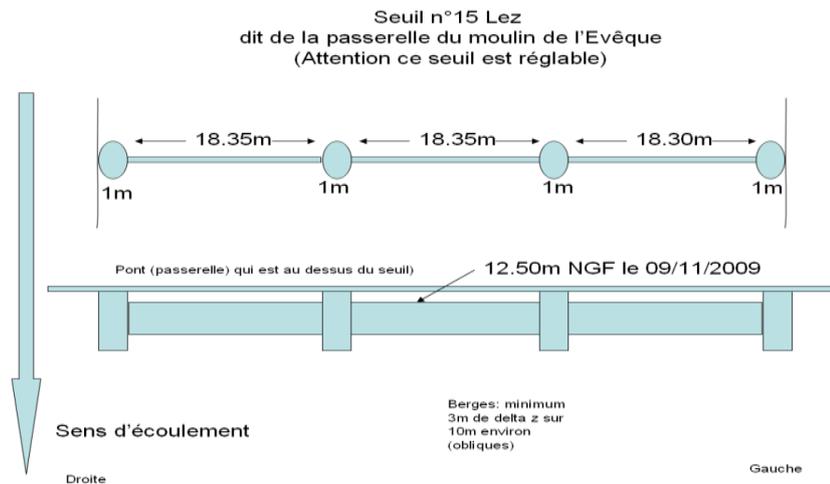


Illustration 96 : Schéma du Pont de l'Évêque

Les données hydrologiques que nous possédons sur cet ouvrage nous proviennent de la Mairie de Montpellier (Service des eaux, Mairie de Montpellier). Nous possédons les enregistrements des débits, des cotes et du mouvement de seuils sur la période 2000-2011. En analysant les données, nous vérifions que le but de cet ouvrage est d'imposer une hauteur d'eau constante à l'amont de l'ouvrage. Les seuils sont baissés en période de crue et levés en période d'étiage.

Nous avons reproduit le mouvement de ce seuil à l'aide d'un contrôleur PI. La variable contrôlée est la cote de l'eau à l'amont y_{obs} par rapport à sa valeur de consigne y^* (12,5m NGF) et la variable à ajuster est l'écart u par rapport à la cote du seuil initial (12,5m NGF).

$$u = c_1(y_{obs} - y^*) + c_2 \sum (y_{obs} - y^*)$$

Les coefficients c_1 et c_2 sont optimisés par la méthode ATV (Auto Tuning Variation) programmée dans SIC (Dorchies D., février 2011). Les coefficients obtenus sont $c_1 = 1,75$ et $c_2 = 480$.

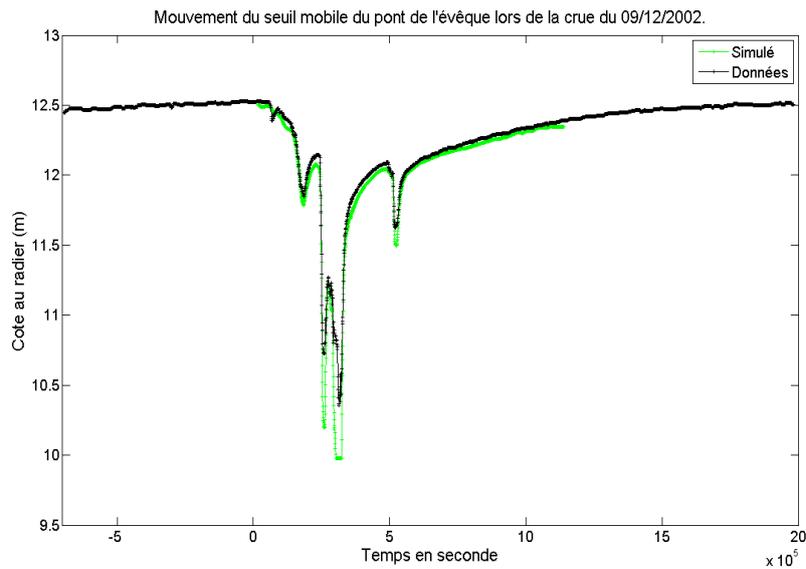


Illustration 97 : comparaison du mouvement du seuil simulé et observé lors de la crue du 09/12/2002. La courbe noire représente les données tandis que le courbe verte représente son mouvement simulé par SIC

Le mouvement du seuil est globalement très bien reproduit (Illustration 97). Nous constatons que le seuil modélisé s'abaisse plus lors du passage des pics de crue et tend à ne pas revenir exactement à sa valeur d'origine lors de la décrue.

Au niveau de la cote de l'eau simulée et observée en amont du seuil (Illustration 98), nous observons un écart constant d'une dizaine de centimètres. Cependant nous remarquons aussi que la cote de l'eau mesurée lors des faibles débits est quasiment égale à la cote du seuil observée. Cela nous amène à penser que le zéro-échelle a été pris égal à la cote du seuil. De plus, cet écart peut aussi être lié aux approximations de la géométrie du seuil modélisé. L'essentiel est que la cote de l'eau amont est maintenue relativement constante pendant la crue. L'objectif de ce seuil est donc bien reproduit.

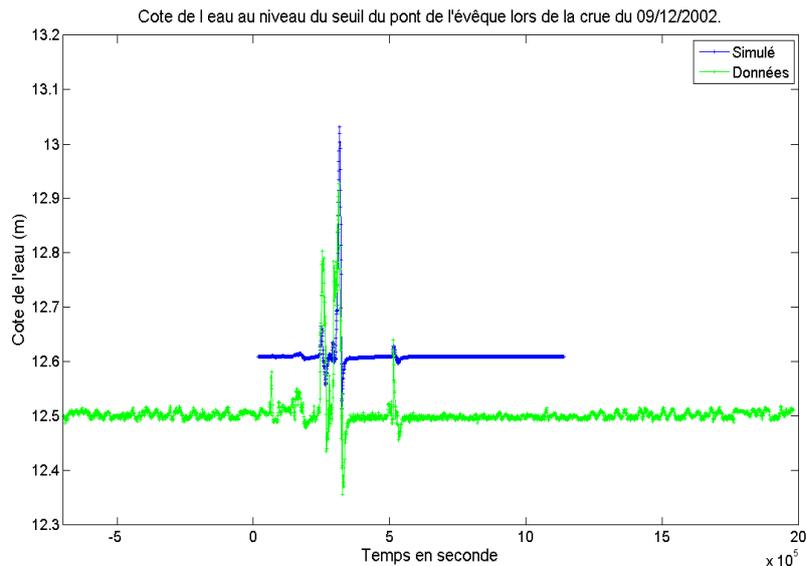


Illustration 98 : Evolution de la cote de l'eau au niveau du seuil du moulin de l'évêque durant la crue du 09/12/2002

5.1.5. Reconstitution des apports aux nœuds de la Lironde et du Verdanson

La Lironde et le Verdanson sont deux affluents du Lez apportant des quantités d'eau importantes en période de crue. La Lironde se jette dans le Lez en amont du seuil de Lavalette tandis que le Verdanson se jette en amont du seuil mobile du Pont du Moulin de l'Evêque. Ces deux cours d'eau traversent une zone urbaine et sont donc très sensibles aux ruissellements. Les apports de ces deux cours d'eau sont reconstitués par simple différence entre les résultats des simulations et les données. Cela permet de tenir compte de tous les autres apports (par ruissellement) sur le tronçon étudié.

Pour l'ensemble des crues, les apports de la Lironde sont reconstitués par comparaison des hydrogrammes obtenus au seuil de Garigliano (station de mesures). En revanche pour les apports du Verdanson seules les données de la crue du 19/10/2008 qui présentent des enregistrements à la 3^{ème} écluse de Lattes permettent cette reconstitution.

On procède à la reconstitution des apports de la manière suivante :

- simulation sans les apports en injectant l'hydrogramme de crue en amont du tronçon d'étude ;
- construction des hydrogrammes des données Q_{obs} et des résultats des simulations Q_{sim} pour des pas de temps égaux : les résultats des simulations sont interpolés au pas de temps des données afin d'obtenir une valeur de débit modélisé pour chaque valeur de débit mesuré.
- calcul de la différence entre ces deux hydrogrammes et obtention d'un hydrogramme représentant l'écart entre les débits instantanés à la Lironde $\Delta Q(t)$:

$$\Delta Q(t) = Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)$$

Les écarts entre les débits observés et simulés peuvent être positifs (apports) ou négatifs (prélèvements). Mais ce n'est physiquement pas réaliste de prélever de l'eau au niveau de la Lironde ou du Verdanson. Il est donc plus réaliste d'injecter la quantité d'eau manquante V_{total} :

$$V_{total} = \Sigma(Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)) = V_{positif} + V_{négatif}$$

$$\text{avec } V_{positif} = \Sigma \Delta Q(t) \text{ pour } \Delta Q(t) > 0$$

$$\text{et } V_{négatif} = \Sigma \Delta Q(t) \text{ pour } \Delta Q(t) < 0$$

- Construction de l'hydrogramme à injecter : afin de conserver une forme d'hydrogramme cohérente avec la crue modélisée, nous le construisons de la manière suivante :

Soit Q_{apport} le débit à injecter à la Lironde,

$$Q_{apport}(t) = \Delta Q(t) + (V_{négatif}/V_{positif})\Delta Q(t) \quad \text{si } \Delta Q(t) > 0$$

$$Q_{apport}(t) = 0 \quad \text{si } \Delta Q(t) < 0$$

Nous obtenons un hydrogramme $Q_{apport}(t)$ dont la somme des débits instantanés est égale à la quantité d'eau manquante V_{total} entre l'hydrogramme amont et aval.

- Nous simulons la crue en injectant les apports au niveau de l'affluent de la Lironde avec un retard de 1200 secondes (temps pour que la crue parcourt la distance entre le nœud Lironde et le seuil Garigliano). Pour la crue du 19/10/2008, nous calculons les apports du Verdanson en utilisant la même méthode. Le retard est alors de 1500 secondes.

5.1.6. Calage des coefficients de frottement et d'infiltration

Les coefficients de Strickler ont été les derniers paramètres qui ont été ajustés pour approcher au mieux les observations aux stations de Lavalette et de Garigliano. Les Strickler dépendent des caractéristiques du lit du fleuve. Voici quelques ordres de grandeur du Strickler :

Nature des parois	Valeur de K en $m^{1/3} / s$
Béton lisse	75-90
Canal en terre, non enherbé	60
Canal en terre, enherbé	50
Rivière de plaine, sans végétation arbustive	35-40
Rivière de plaine, large, végétation peu dense	30
Rivière à berges étroites très végétalisées	10-15
Lit majeur en prairie	20-30
Lit majeur en vigne ou taillis	10-15
Lit majeur urbanisé	10-15
Lit majeur en forêt	<10

Illustration 99 : Valeurs du Strickler ([5] Degoutte G, Aide mémoire d'hydraulique à surface libre)

À partir d'observations de terrain, de photographies aériennes Google-Earth et des résultats des simulations nous avons choisi les coefficients de Strickler (Illustration 99). Dans la majorité des tronçons, les coefficients de Strickler du lit mineur sont compris entre 20 et 30. Ces valeurs paraissent raisonnables. En effet, le lit du Lez est généralement relativement large (entre 20 m et 30 m) et les berges sont végétalisées. En revanche, nous avons choisi des coefficients plus élevés à l'aval du seuil de Garigliano. Dans cette portion la rivière est pourtant plus étroite (15-20 m) mais relativement canalisée. Ce choix a permis de réduire significativement l'écart entre les observations et le modèle au niveau du seuil de Garigliano.

Des coefficients de Strickler plus élevés au niveau des zones bétonnées (les berges du lez au niveau de l'Hôtel de Région) conduisent à des écoulements torrentiels que le logiciel ne permet pas de gérer numériquement. Des valeurs de 30 ont donc été conservées dans cette portion.

A l'aval du déversoir de Lattes, les coefficients de Strickler sont de 20,1. Ils ont été ajustés pour le bon fonctionnement de cet ouvrage.

Dans notre modèle, nous avons considéré que les infiltrations étaient négligeables. En effet, le Lez prend sa source au pied d'une zone karstique et s'écoule ensuite sur un substrat beaucoup moins perméable (BRGM, Carte géologique de la France).

5.1.7. Utilisation des laisses de crue observées lors de la crue de septembre 2005

Les laisses de crues sont les traces laissées par le passage des crues. Il peut s'agir de débris de végétaux déposés dans les arbres ou de marques sur les murs. Lors de la crue de septembre 2005, ces marques ont été relevées à l'aval du seuil de Lavalette, au niveau du pont de l'avenue de la Justice de Castelnau et à l'aval du seuil de Garigliano.

Pour la crue de septembre 2005, les hauteurs d'eau simulées dans notre modèle sont en accord avec les relevés des laisses de crues au moulin de Gasconnet, à Lavalette et au niveau du pont de l'avenue de la justice de Castelnau (Tableau 10). Par contre, à l'aval du seuil de Garigliano, notre modèle sous-estime nettement la cote d'eau maximale atteinte par rapport aux relevés. En effet, nous avons choisi de caler notre modèle à partir de la courbe de tarage

établie en amont du seuil. Ce calage a nécessité des coefficients de Strickler élevés à l'aval ainsi qu'un élargissement de la section afin d'éviter un ennoisement trop précoce du seuil. **Il faut donc rester très prudent quant aux résultats des simulations numériques dans ce secteur.**

Lieu	Aval du Moulin de Gasconnet	Aval du seuil de Lavalette	Pont de l'avenue de la justice de Castelnau	Aval du seuil de Garigliano
Relevés de laisses de crues (m NGF)	37,6	35,9	20,8	17,1
	38,4	36,6	20,2	17,7
	38,4	36,3	20,0	17,8
	38,4	35,6	19,9	16,5
	38,5	35,5	19,9	16,9
	38,4	35,9	19,8	
	38,3	35,9	19,9	
	38,7	35,6	19,5	
	37,9	35,0	19,7	
	37,9	35,8	19,5	
	37,7	36,0		
	37,7	35,8		
	38,7			
Moyenne (m NGF)	38,2	35,8	19,9	17,2
Hauteur d'eau simulée par SIC lors de la crue de septembre 2005 (m NGF)	38,2	35,9	19,7	16,3

Tableau 10 : Comparaison entre les observations des laisses de crues et des hauteurs d'eau maximales atteintes issues de la simulation numérique lors de la crue de septembre 2005

5.1.8. Résultats aux stations hydrauliques de Lavalette et de Garigliano

Critère de Nash

Pour exprimer la corrélation entre les débits et les hauteurs d'eau observées et simulés, nous utilisons le critère de Nash (écrit ici pour les débits Q). Ce critère est compris entre $-\infty$ et 1 pour une corrélation parfaite entre les valeurs observées et simulées.

$$Nash = 1 - \frac{\sum(Q_{simulé} - Q_{observé})^2}{\sum(Q_{simulé} - \bar{Q}_{simulé})^2}$$

Exemple de la crue du 29/11/2003

La crue du 29/11/2003 atteint un débit de 440 m³/s à la station de mesure du moulin de Gasconnet et un débit de 539 m³/s au niveau du seuil de Garigliano. Elle permet donc de caler le modèle pour une large gamme de débits. Les résultats des simulations sont présentés aux figures suivantes : Illustration 100, Illustration 101, Illustration 102, Illustration 103, Illustration 104, Illustration 105 et Illustration 106.

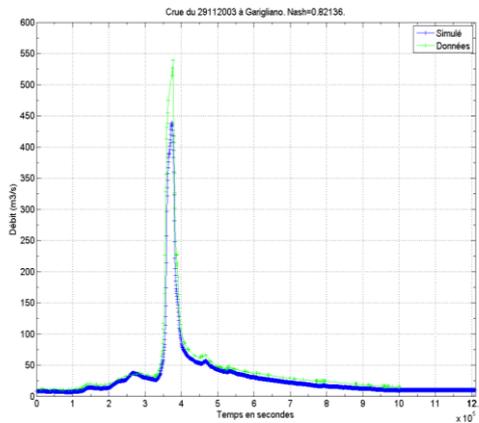


Illustration 100 : Evolution des débits à Garigliano sans apport au niveau de la Lironde (simulés en bleu et observés en vert)

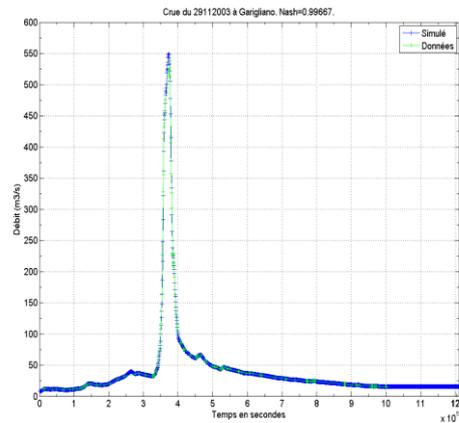


Illustration 101 : Evolution de la hauteur d'eau à Garigliano sans apport au niveau de la Lironde (simulées en bleu et observées en vert)

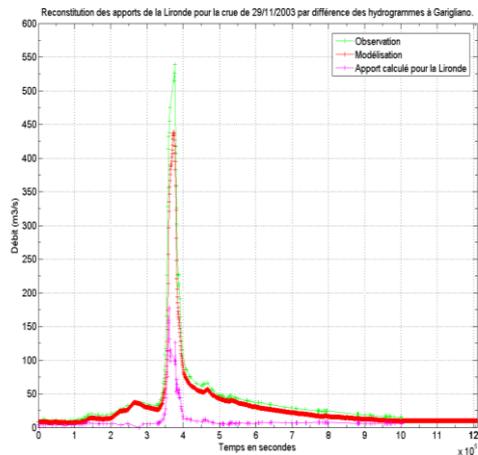


Illustration 102 : Reconstitution des apports de la Lironde par différence entre les hydrogrammes observés et modélisés à la station de Garigliano pour la crue du 27/11/2003

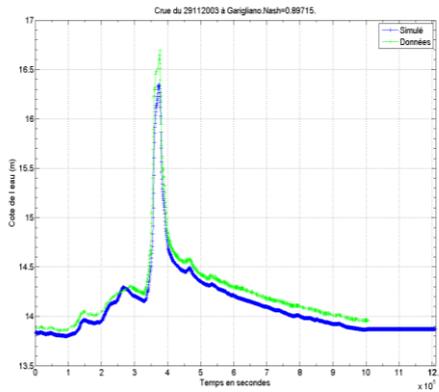


Illustration 103 : Evolution des débits à Garigliano avec apport au niveau de la Lironde (simulés en bleu et observés en vert)

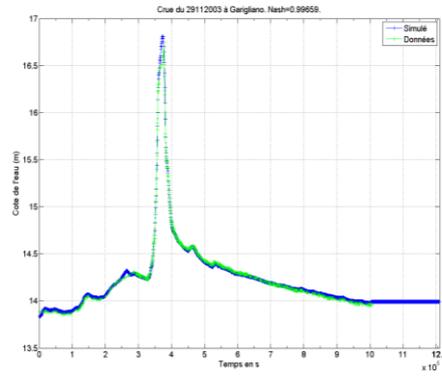


Illustration 104 : Evolution de la hauteur d'eau à Garigliano avec apport au niveau de la Lironde (simulées en bleu et observées en vert)

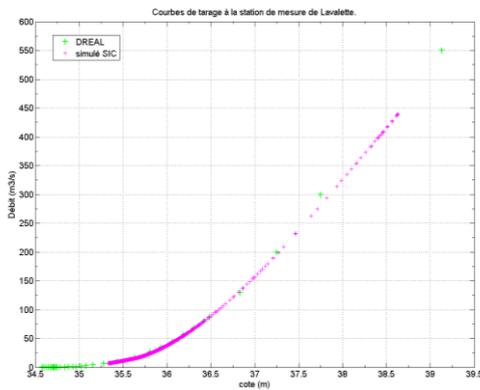


Illustration 105 : Courbe de Tarage à la station de Lavalette

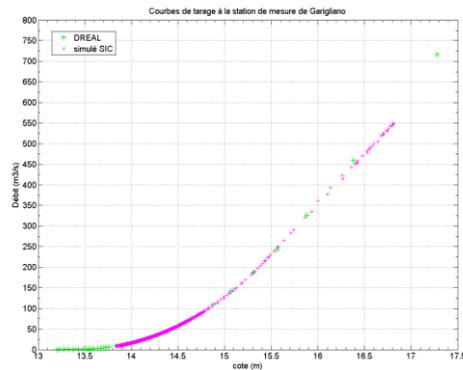


Illustration 106 : Courbe de Tarage à la station de Garigliano

Le tableau suivant (Tableau 11) donne un ordre de grandeur des débits pour lesquels l'écoulement des différents seuils du Lez devient noyé lors de la crue du 23/11/2003. Dans le cas des écoulements noyés, la hauteur d'eau amont est influencée par l'écoulement à l'aval du seuil.

Nom du seuil	Débit minimum pour lequel le seuil est noyé
Moulin de Gasconnet	232 m ³ /s
Lavalette	325 m ³ /s
Moulin de Martinet	297 m ³ /s
Moulin de Navitau	Jamais
Moulin des Guilhems	Jamais
Moulin de la Poudrière	185 m ³ /s
Moulin du Bez	363 m ³ /s
Moulin du Sauret	Jamais
Garigliano	264 m ³ /s
Pont de l'évêque	Jamais
Seuil amont Richter	55 m ³ /s
Seuil Richter	31 m ³ /s
Seuil aval Richter	8 m ³ /s
Première écluse	404 m ³ /s
Deuxième écluse	495 m ³ /s

Tableau 11 : Débit minimum pour lequel l'écoulement au passage des seuils est dit noyé lors de la crue du 23/11/2003

Cas particulier de la crue du 19/10/2008

Pour cet épisode, le modèle SIC ne donne pas des résultats satisfaisants. Cette crue, dont les enregistrements sont disponibles à la troisième écluse, se décompose en deux pics très distincts dont les temps de bases sont très courts (Illustration 107). Le temps de descente de chaque pic est très bref. Cet hydrogramme a probablement été provoqué par deux orages violents et très brefs sur un sol déjà saturé ce qui a provoqué un ruissellement très important (pas de courbe de tarissement). La simulation semble donner de bons résultats pendant la phase de montée alors qu'ils sont mauvais pendant la phase de descente (temps de base simulé trop grand). Il en résulte des apports calculés à la Lironde nuls sur l'ensemble de l'épisode. Un écart au niveau des cotes est aussi visible pour les faibles débits. Cet écart n'est pas visible pour les crues antérieures, ce qui nous laisse supposer que le capteur a pu être remplacé ou de nouveau étalonné. Afin d'affiner la simulation, nous avons choisi de traiter séparément les deux pics de crue.

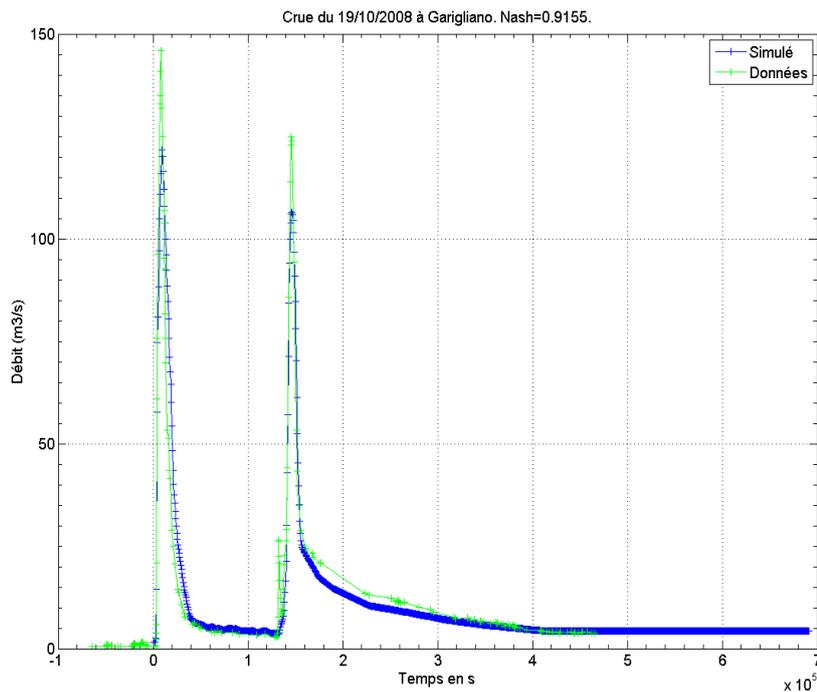


Illustration 107 : Hydrogrammes de crue du 19/10/2008 simulés et observés à la station de Garigliano

Pour le premier pic de crue, les résultats de la simulation ne sont pas améliorés. En effet, les apports à la Lironde semblent nuls et ne permettent pas de corriger les écarts aux observations. En revanche, pour le second pic de crue, les résultats sont nettement améliorés. En effet, des apports calculés à la Lironde et au Verdanson ont permis d'améliorer les coefficients de Nash (Illustration 108). On retrouve alors des coefficients de Nash satisfaisants à Garigliano, respectivement de 0,96135 et 0,95734 pour les débits et les cotes.

Au niveau de la troisième écluse (Illustration 110 et Illustration 111), la première observation marquante est que le débit observé est nettement inférieur à celui mesuré à Garigliano (Illustration 108 et Illustration 109) et celui calculé par le modèle. Cette constatation nous permet de douter sur la validité de la courbe de tarage calculée à la troisième écluse. De plus, les cotes d'eau observées en amont de la troisième écluse sont souvent supérieures à celles modélisées (10 cm). Dans notre modèle, le seuil de la troisième écluse de Lattes est constamment dénoyé à cause de la condition limite à l'aval (cote de l'eau constante). Cela peut conduire à des erreurs de modélisation de la cote d'eau amont pour les forts débits ce qui n'a pas l'air d'être le cas ici. L'écart est plutôt visible pour les faibles débits. Nous privilégions la piste d'une mauvaise topographie du seuil utilisée dans notre modèle.

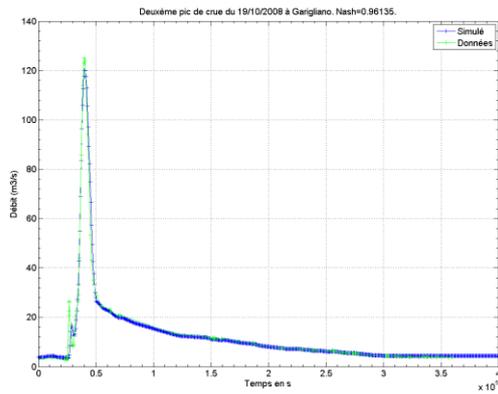


Illustration 108 : Hydrogrammes obtenus pour le deuxième pic de crue à Garigliano

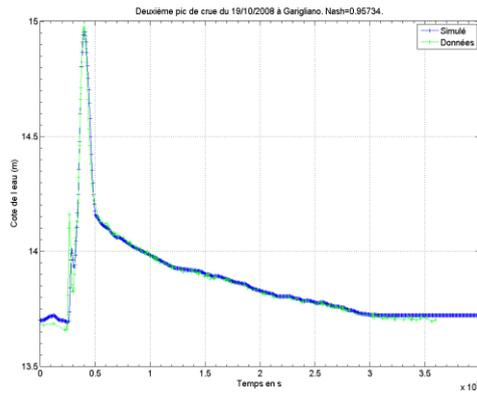


Illustration 109 : Limnigrammes obtenus pour le deuxième pic de crue à Garigliano

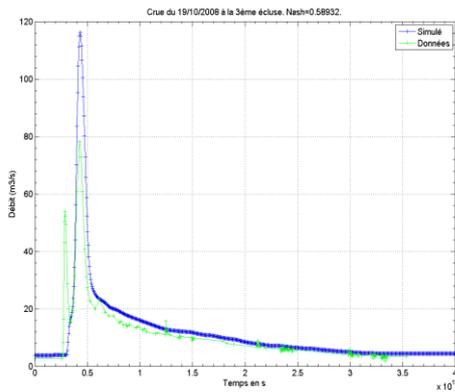


Illustration 110 : Hydrogrammes obtenus pour le deuxième pic de crue à la 3^{ème} écluse.

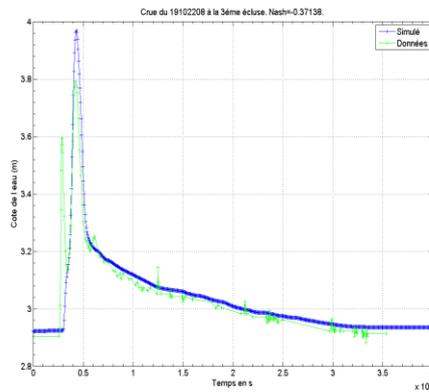


Illustration 111 : Limnigrammes obtenus pour le deuxième pic de crue à la 3^{ème} écluse.

Résultats globaux

Les résultats des simulations des 12 crues choisies pour le calage sont répertoriés dans les deux tableaux suivant (Tableau 12 et Tableau 13). Nous observons que la prise en compte des apports de la Lironde améliore significativement les résultats du modèle. Nous obtenons un excellent coefficient de Nash (supérieur à 0,9) pour toutes les crues sauf pour celle de 2008 que nous avons traitée séparément au paragraphe précédent.

Stations	Date de la crue	Critère de Nash (sans reconstitution des apports de la Lironde et du Verdanson)	Critère de Nash (après reconstitution des apports de la Lironde et du Verdanson)
Garigliano	11/11/1999	0,99	1,00
	28/09/2000	0,91	0,99
	16/01/2001	0,86	1,00
	09/10/2001	0,76	1,00
	08/09/2002	0,79	0,96
	08/10/2002	0,56	0,93
	09/12/2002	0,98	0,99
	22/09/2003	-1,69	0,98
	17/11/2003	0,53	0,99
	29/11/2003	0,82	1,00
	05/09/2005	0,91	1,00
Garigliano	19/10/2008	0,87	0,87
3 ^{ème} écluse		0,80	0,84
Moyenne		0,62	0,97

Tableau 12 : Critère de Nash calculé entre les hydrogrammes observés et les hydrogrammes calculés par le modèle aux stations de Garigliano et de Lattes 3^{ème} écluse avec et sans les apports reconstitués aux affluents de la Lironde et du Verdanson

Date de la crue	Station	Critère de Nash calculé pour les hauteurs d'eau sans reconstitution des apports de la Lironde et du Verdanson	Critère de Nash calculé pour les hauteurs d'eau après reconstitution des apports de la Lironde et du Verdanson
11/11/1999	L	1,00	1,00
	G	0,99	0,99
28/09/2000	L	1,00	1,00
	G	0,91	1,00
16/01/2001	L	0,99	0,99
	G	0,94	1,00
09/10/2001	L	1,00	1,00
	G	0,76	1,00
08/09/2002	L	0,97	0,97
	G	0,79	0,96
08/10/2002	L	0,98	0,98

Date de la crue	Station	Critère de Nash calculé pour les hauteurs d'eau sans reconstitution des apports de la Lironde et du Verdanson	Critère de Nash calculé pour les hauteurs d'eau après reconstitution des apports de la Lironde et du Verdanson
	G	0,50	0,91
09/12/2002	L	1,00	1,00
	G	0,99	1,00
22/09/2003	L	0,99	0,99
	G	-0,07	0,98
17/11/2003	L	0,99	0,99
	G	0,73	0,99
29/11/2003	L	1,00	1,00
	G	0,90	1,00
05/09/2005	L	1,00	1,00
	G	0,92	0,99
19/10/2008	L	0,99	0,99
	G	0,91	0,91
	E	-0,26	-0,25
Moyenne		0,84	0,94

Tableau 13 : Critère de Nash calculé entre les limnigrammes observés et les limnigrammes calculés par le modèle aux stations de Lavalette, de Garigliano et de Lattes 3^{ème} écluse avec et sans les apports reconstitués aux affluents de la Lironde et du Verdanson.

Les simulations avec ou sans lit majeur n'ont pas montré de différences significatives. Cela confirme notre point de vue sur le rôle négligeable du lit majeur du Lez. En effet, le volume d'eau stocké est négligeable devant ce qui s'écoule dans le lit mineur-moyen.

5.1.9. Comparaison des résultats obtenu entre SIC et ISIS (étude BRLi 2010)

En 2010, une étude hydraulique du Lez dans le cadre du plan de prévention du risque de crue a été conduite par le bureau d'étude BRLi (BRL Ingénierie, 2009). Il nous paraît donc pertinent de comparer nos résultats avec cette étude afin de détecter d'éventuelles faiblesses dans ces deux modèles hydrauliques réalisés sur le Lez. La comparaison est réalisée entre les hauteurs d'eau calculées par les modèles. Nous nous sommes donc basés sur les résultats de l'étude BRLi, qui fournissent un tableau lieux-débit-cotes pour les périodes de retour de 5 ans, 10 ans, 50 ans et 100 ans. Pour chaque période de retour simulée par BRLi, le débit simulé évolue de l'amont vers l'aval (apports latéraux). Nous avons, à notre tour, injecté ces mêmes débits dans notre modèle. Les lignes d'eau obtenues par BRLi et par notre modèle SIC sont tracées aux Illustration 112, Illustration 113, Illustration 115 et Illustration 115 pour chaque période de retour (5, 10, 50 et 100 ans).

Nous observons que le positionnement des sections n'est pas identique dans les deux modèles (on observe environ 250 m de décalage à partir du moulin des Guilhem). Cela rend la lecture

des graphiques difficiles. Les conséquences hydrauliques sont a priori peu importantes (perte de charge relativement faible sur 250 m de linéaire).

Les Illustration 112, Illustration 113 et Illustration 115 montrent une bonne adéquation entre les deux modèles jusqu'au moulin du Sauret pour les débits d'occurrence 5, 10, 50 ans. Cependant une différence importante est visible entre les seuils du moulin de Gasconnet et celui de Lavalette. En effet les simulations ISIS simulent un plan d'eau plus haut en amont du seuil de Lavalette que le montre nos simulations. Cet écart provient probablement d'une cote du seuil de Lavalette différente dans les deux simulations. De plus, nous avons intégré un lit majeur rive gauche pour simuler les débordements. Nous n'avons pas d'autre information quant au modèle de BRLi. L'illustration 115 montre que les simulations faites à l'aide de SIC sous-estiment la ligne d'eau entre le seuil du moulin des Guilhem et celui du Sauret par rapport aux résultats BRL. En effet, le modèle de BRLi laisse apparaître des pertes de charges importantes entre les abscisses 4500 et 5000 m. La ligne d'eau en amont est alors rehaussée. Il s'agit de ponts qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle fait sous SIC.

De grosses différences apparaissent autour du seuil de Garigliano. La ligne d'eau calculée par ISIS est environ 1 m au-dessus de celle calculée par SIC. Cette différence résulte probablement de différences entre le calage des deux modèles. Nous avons choisi de caler notre modèle à partir de la courbe de tarage du seuil de Garigliano. Ce calage a nécessité la suppression d'une section (étroite) à l'aval de ce même seuil et des coefficients de Strickler élevés (peu de frottement). Nous sommes conscients de ces ajustements et bien que le modèle soit calé sur la courbe de tarage de Garigliano, les résultats ne sont pas en accord avec les laisses de crue de 2005. Des biais importants existent donc au niveau du seuil de Garigliano et des observations terrains seront nécessaires pour affiner la modélisation.

Plus à l'aval, les deux modèles semblent assez proches. Notre modélisation a tendance à surestimer la ligne d'eau par rapport à l'étude de BRLi. Nous avons calé les coefficients de Strickler aval par rapport au fonctionnement prévu du déversoir latéral de sécurité de Latte. Nous n'avons pas d'indication sur le calage du modèle de BRLi.

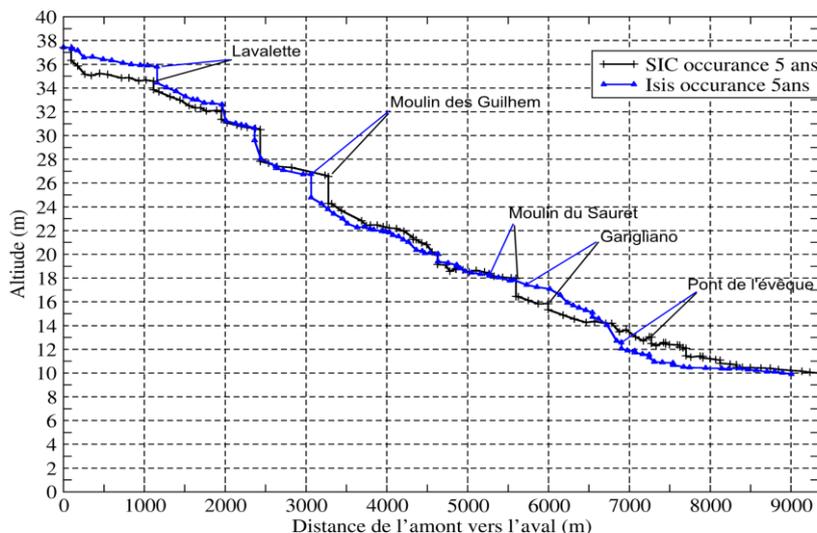


Illustration 112 : Ligne d'eau du Lez obtenue par les simulations avec SIC et ISIS pour un débit de période de retour 5 ans

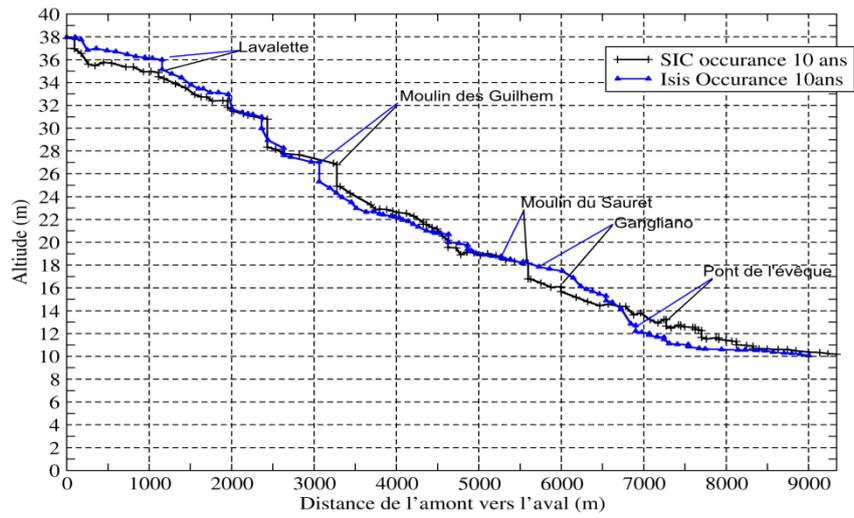


Illustration 113 : Ligne d'eau du Lez obtenue par les simulations avec SIC et ISIS pour un débit de période de retour 10 ans

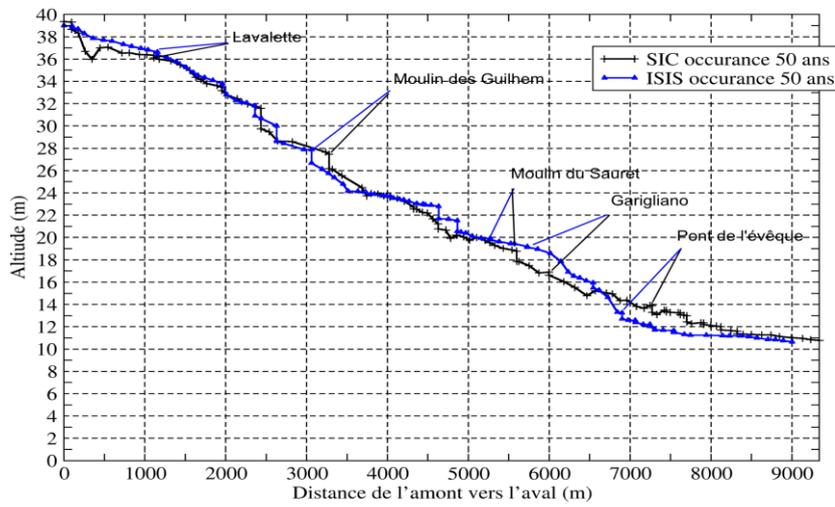


Illustration 114 : Ligne d'eau du Lez obtenue par les simulations avec SIC et ISIS pour un débit de période de retour 50 ans

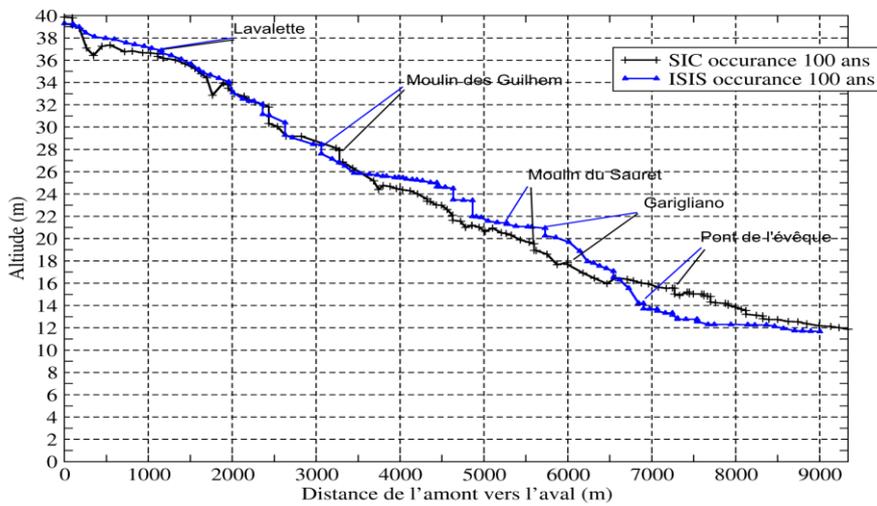


Illustration 115 : Ligne d'eau du Lez obtenue par les simulations avec SIC et ISIS pour un débit de période de retour 100 ans

5.2. UTILISATION DU MODELE POUR L'AIDE A LA VIGILANCE DES CRUES DU LEZ

D'éventuels pompages plus importants dans le karst de la source du Lez ainsi que l'évolution du climat prévue pour les prochaines décennies peuvent potentiellement impacter les crues futures du Lez. Les modèles climatiques ne peuvent prédire que des événements pluvieux dont le cumul de pluie est journalier. Un pas de temps plus fin n'est pas envisagé actuellement. Il sera donc impossible de générer des hydrogrammes de crue (d'une durée de quelques heures à quelques jours) à l'aide des modèles hydrologiques ainsi que de propager ces crues dans le Lez grâce au modèle hydraulique SIC. Par contre, les modèles hydrologiques sont capables de fournir des débits de pointe à l'exutoire du bassin versant du Lez. Ces débits seront donc interprétés par des simulations en régime permanent en termes de hauteur d'eau pour diverses sections du Lez.

5.2.1. Comparaison entre les simulations en régime transitoire et celles en régime permanent pour les débits de pointes

La ligne d'eau issue de la propagation d'une crue dans un cours d'eau peut être sensiblement influencée par les effets d'inertie (propagation d'onde, influence de l'aval). La ligne d'eau de cote maximale qui en résulte sera alors différente de celle qui peut être calculée par un régime permanent au débit maximal. Nous avons calculé la différence entre les lignes d'eau. Cet écart est noté :

$$\text{Écart} = \text{Ligne d'eau en régime transitoire} - \text{Ligne d'eau en régime permanent}$$

Nous avons donc comparé la cote maximale de l'eau atteinte lors des 12 crues utilisées pour le calage du modèle avec la ligne d'eau obtenue pour les débits de pointe respectifs en régime permanent (Illustration 119). La ligne d'eau calculée en régime permanent devrait être supérieure à celle du régime transitoire. En effet, en régime permanent, le Lez est plein et l'écoulement est influencé par l'aval (seuils noyés). En régime transitoire, la crue pourra s'évacuer plus rapidement vers l'aval et minimisera ainsi l'ennoisement des ouvrages en travers.

- des écarts importants sont observés dans la partie amont du Lez. Ils atteignent 80 cm pour les débits les plus forts. Au niveau du seuil de Gasconnet, les lignes d'eau issues des régimes transitoires sont très inférieures à celles des régimes permanents pour tous les débits. En effet, à l'amont de l'affluent de la Lironde, les débits simulés en régime permanent correspondent aux débits maximaux atteints à la station de mesure de Garigliano (bien plus à l'aval) ;
- plus à l'aval, un écart positif jusqu'à 60 cm est observé pour un débit de 540 m³/s. Les lignes d'eau des régimes permanents sont largement en dessous. Le lit mineur de 2 sections consécutives se rétrécit et une contre-pente importante est visible. Cela entraîne des vitesses importantes et des nombres de Froude proches de 1 dans cette zone. Cet écart est probablement lié à des erreurs numériques générées par le modèle à cause des nombres de Froude élevés et du nombre de courant éloigné de 1. Ce cas précis (contre pente) est observé à plusieurs endroits le long du Lez (Illustration 116, Illustration 117 et Illustration 118) ;
- l'écart est légèrement positif le long du Lez pour plusieurs crues. Les lignes d'eau les plus hautes obtenues par une simulation transitoire est comparée à la ligne d'eau obtenue par le permanent au débit de pointe observé à Garigliano. Dans certains cas, ce débit de pointe est dépassé de plusieurs m³/s comme c'est le cas pour la crue du 09/10/2001 (325 au lieu de 314). L'hydrogramme de crue est légèrement contracté par rapport à la réalité ;

- au passage du Pont du Moulin de l'Evêque, l'abaissement plus ou moins brutal de celui-ci peut provoquer une augmentation brutale du débit du Lez. Le débit étant plus important, la ligne d'eau la plus haute se retrouvera au-dessus de celle atteinte en régime permanent. Cette augmentation du débit se propage vers l'aval générant un petit écart positif au niveau des lignes d'eau.

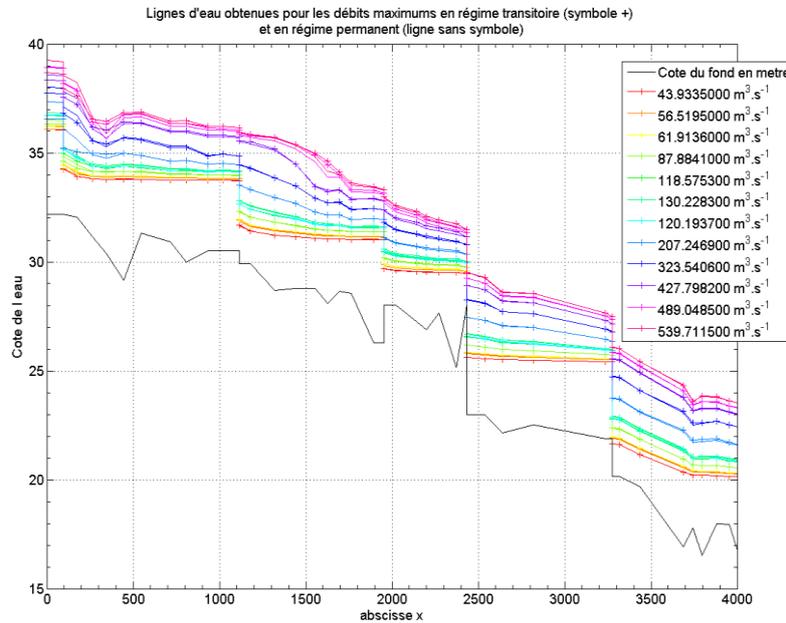


Illustration 116 : Ligne d'eau obtenue en régime transitoire (symbole +) et en régime permanent (ligne continue) pour les débits de pointe issus des 12 crues de référence. Partie amont

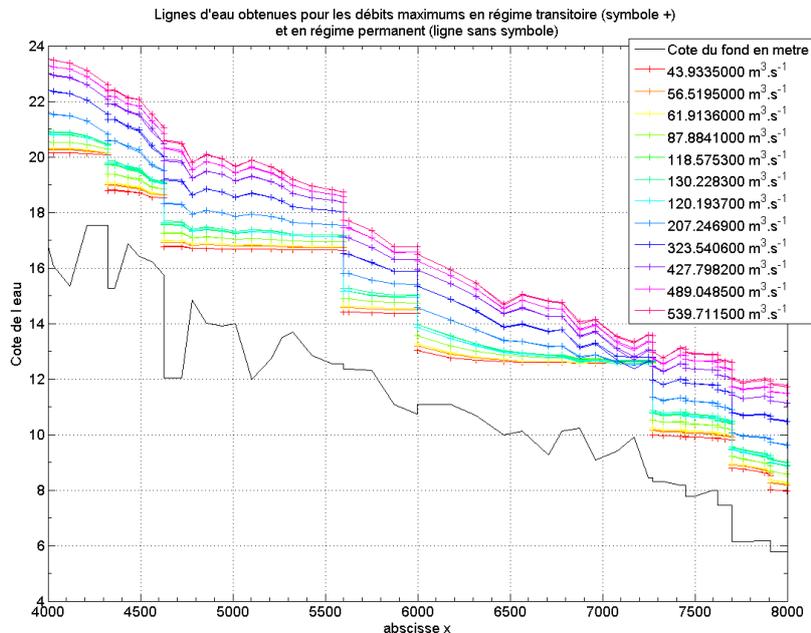


Illustration 117 : Ligne d'eau obtenue en régime transitoire (symbole +) et en régime permanent (ligne continue) pour les débits de pointe issus des 12 crues de référence. Partie centrale.

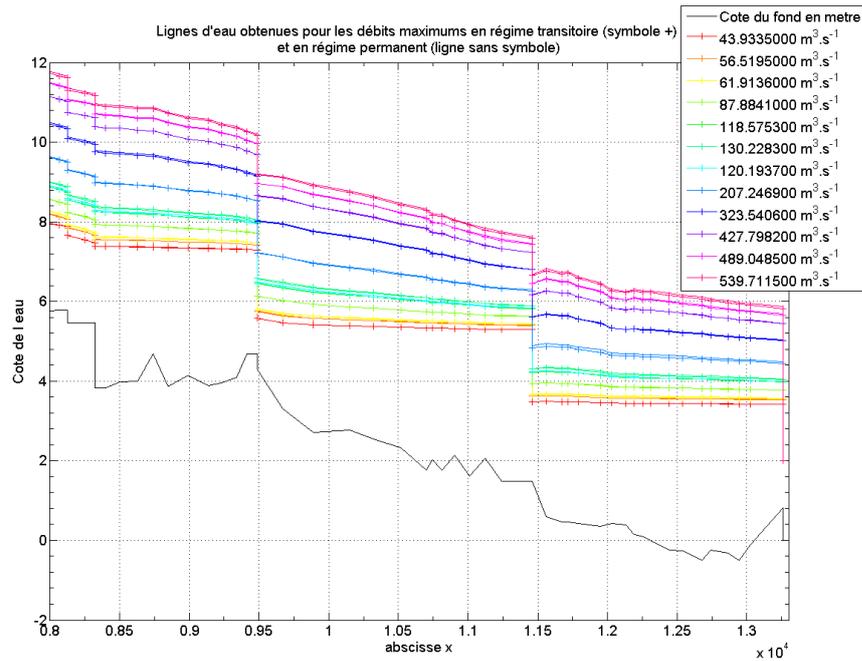


Illustration 118 : Ligne d'eau obtenue en régime transitoire (symbole +) et en régime permanent (ligne continue) pour les débits de pointe issus des 12 crues de référence. Partie aval

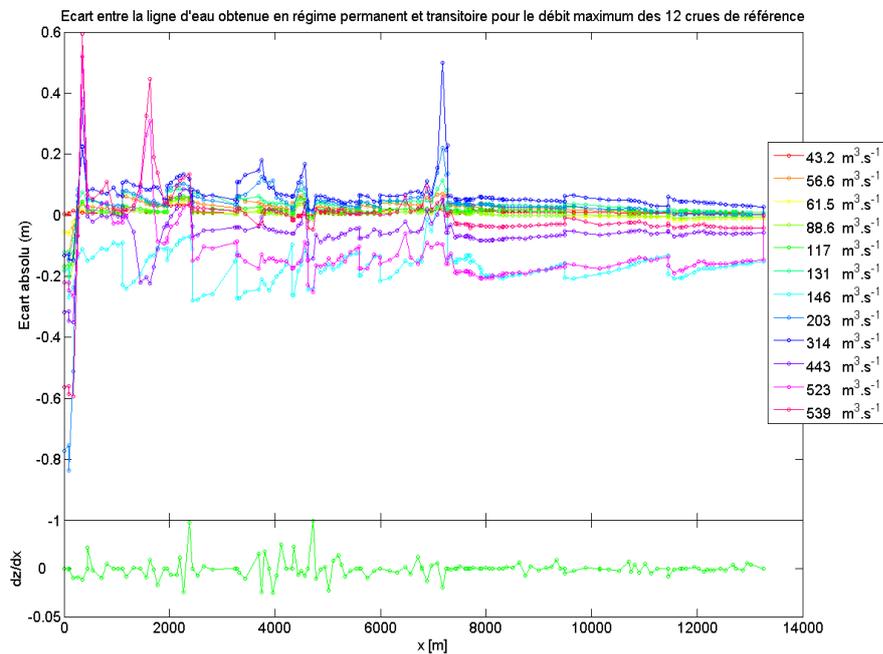


Illustration 119 : Ecart entre la ligne d'eau en régimes transitoire et permanent pour les 12 débits de pointes

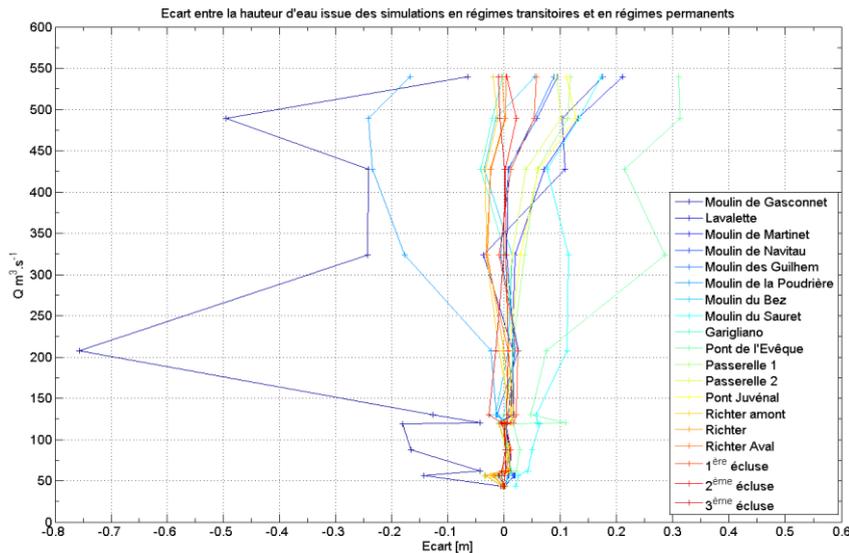


Illustration 120 : Relation entre le débit et l'écart transitoire-permanent au niveau des seuils

L'écart entre le régime permanent et le régime transitoire a été tracé pour les 12 crues aux 19 seuils recensés à l'illustration 120. Cette figure montre qu'il est difficile d'établir une relation entre l'écart transitoire-permanent et le débit de pointe simulé pour chacune des sections étudiées. L'écart est souvent compris entre 0 et 20 cm sauf pour les sections situées au niveau du Pont du Moulin de l'Évêque et du Moulin de Gasconnet. Pour le seuil Gasconnet, la Lironde étant située plus à l'aval, le débit en régime permanent est supérieur à celui de l'hydrogramme de crue injecté en amont. Cela explique ces écarts importants qui dépendent aussi de la quantité d'eau apportée par la Lironde. Pour le seuil mobile du Pont du Moulin de l'Évêque, cet écart dépend du niveau maximum d'abaissement du Pont du Moulin de l'Évêque pendant la crue. Nous observons aussi que l'écart n'est pas linéaire en fonction du débit. Cette non linéarité montre les effets importants de la forme de l'hydrogramme de crue. Pour un même débit de pointe, une crue brève « coulera mieux » qu'une crue s'étalant sur une longue période. En effet dans le premier cas la crue ne sera pas gênée par l'aval (peu d'eau dans le lit de la rivière).

5.2.2. Construction d'un abaque

Nous proposons de construire un abaque $Q(z)$ à partir de simulations en régime permanent pour une gamme de débits du Lez de 40 m³/s à 900 m³/s. Ces résultats seront complétés par une étude de sensibilité liée à la forme de la crue, en intégrant une marge d'erreur autour de $Q(z)$ ainsi qu'en ajoutant des observations.

Évaluation de la côte du seuil du pont de l'évêque pour la construction des courbes $Q(z)$ en régime permanent

La côte au radier du pont de l'évêque nécessite d'être connue pour chaque simulation d'un débit du Lez en régime permanent. Il n'est pas possible d'utiliser le contrôleur PID (§ 5.1.4) dans ce cas-là. À partir des données recueillies du mouvement du pont de l'Évêque (service des eaux, mairie de Montpellier), nous avons construit une loi, à partir d'une interpolation polynomiale du 8^{ème} degré, permettant de déterminer la cote du seuil en fonction du débit simulé (Illustration 121). Cette fonction polynomiale reproduit bien le mouvement du seuil ne

dépassant pas les débits de $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Ensuite, cette fonction stagne puis remonte en s'écartant du nuage de points. Nous avons donc choisi d'abaisser le seuil linéairement entre 350 et $500 \text{ m}^3/\text{s}$ (abaissement maximum à 10 m NGF). En utilisant cette loi pour évaluer la cote du seuil du pont de l'évêque, nous avons simulé des régimes permanents pour des débits du Lez allant de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ à $900 \text{ m}^3/\text{s}$ à intervalle régulier de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

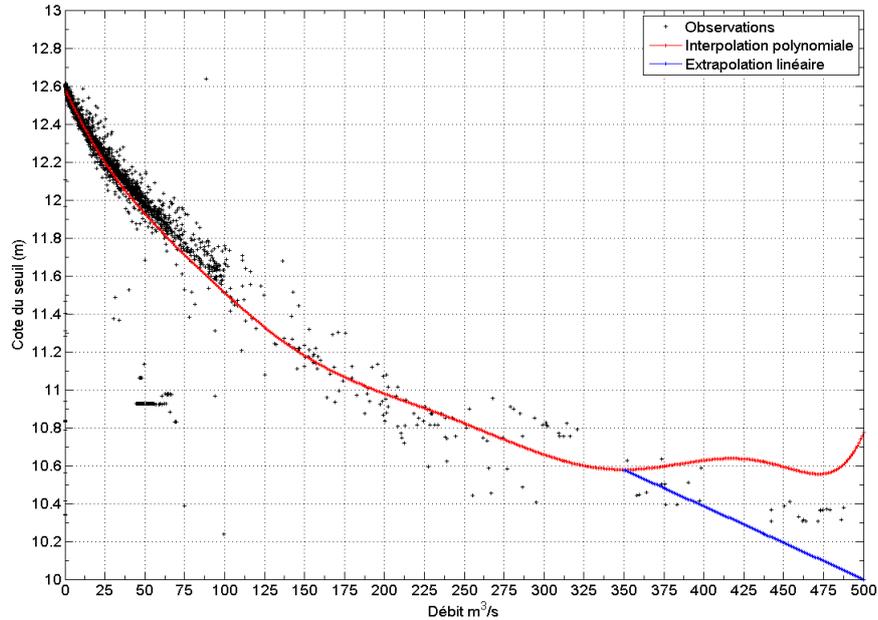


Illustration 121 : Mouvement du seuil du pont de l'évêque en fonction du débit observé. Les croix noires représentent les observations. La courbe rouge est issue d'une interpolation polynomiale du 8^{ème} degré à travers le nuage de points. La droite bleu est le choix que nous avons fait afin d'extrapoler le mouvement suite au décrochage du polynôme. Pour les débits supérieurs $500 \text{ m}^3/\text{s}$, la cote du seuil du pont de l'évêque est maintenue à 10 m NGF

Influence des affluents de la Lironde et du Verdanson sur la ligne d'eau à l'amont des confluences

Les apports de la Lironde et du Verdanson peuvent être conséquents et peuvent influencer l'écoulement du Lez à l'amont de chaque confluence. En effet, l'injection d'un débit au Verdanson va engendrer un rehaussement de la ligne d'eau en amont (en régime fluvial). Il en est de même pour la Lironde. Afin de mesurer sur quelle distance cette influence va être ressentie, nous avons simulé un régime permanent pour un débit de $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Nous avons ensuite comparé cette même simulation avec injection de 20% de ce débit (soit $80 \text{ m}^3/\text{s}$) à la Lironde puis au Verdanson (Illustration 122). La ligne d'eau est rehaussée au plus d'une quinzaine de centimètres à l'amont des injections et cela jusqu'au premier seuil rencontré. Il n'y a pas de répercussion plus à l'amont. Nous considérons que l'effet de ces apports est négligeable sur la ligne d'eau à l'amont. Cet écart ne figurera pas dans les abaques.

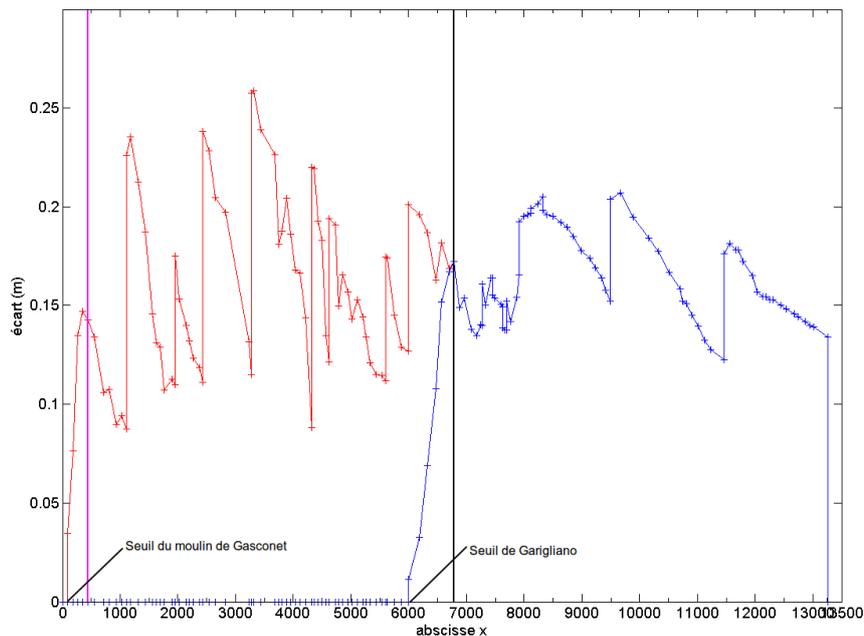


Illustration 122 : Écart entre la ligne d'eau avec et sans apports aux affluents (en rouge pour un apport à la Lironde et en bleu pour un apport au Verdanson). Le débit du Lez est de 400 m³/s. 80 m³/s sont ajoutés dans un premier cas à La Lironde (localisé par le trait violet) et dans un second cas au Verdanson (localisé par le trait noir)

Évaluation de l'erreur autour du régime permanent

6 ponts et 19 ouvrages en travers (seuils et passerelles) ont été recensés sur le Lez et intégrés dans la modélisation. Nous avons choisi ces sections pour tracer le débit en fonction de la hauteur d'eau. Nous avons ensuite cherché à évaluer l'erreur systématique commise par les simulations en régime permanent (amortissement de la crue, ennoisement minimisé).

Afin de mesurer l'influence de l'hydrogramme sur la propagation de la crue et sur les côtes maximales atteintes, nous avons procédé à une homothétie de chaque crue vers 20 débits maximaux compris entre 40 m³/s et 920 m³/s et espacés de 40 m³/s. Nous possédons alors 12 formes d'hydrogramme de crue pour chacun des 20 débits de pointes (Illustration 123). Nous avons procédé aux 276 simulations transitoires et ainsi que les 276 permanents qui en découlent. À chaque transitoire, la cote minimale du seuil du pont de l'évêque est relevée et utilisée pour simuler un régime permanent.

Choix des hydrogrammes de crue observés :

- le plus simple et ce qui a été retenu est de travailler avec les enregistrements des crues au niveau du seuil de Gasconnet et de ne pas tenir compte des apports de la Lironde et du Verdanson. Ces mesures sont considérées comme fiables. Il n'en est pas de même à la station de mesure de la 3^{ème} écluse ou nous possédons seulement un hydrogramme qui indique des débits de pointe bien plus faibles que celui de Garigliano alors que le Verdanson se jette entre ces deux stations. Les débits de pointe simulés en régime permanent correspondent au maximum de chaque hydrogramme.

- un deuxième choix aurait été de travailler avec les hydrogrammes mesurés à Gasconnet et de tenir compte des hydrogrammes de crue de la Lironde préalablement reconstitués (par homothétie). Cette reconstitution étant incertaine, nous aurions sûrement reproduit des hydrogrammes de forme trop irréaliste (crue trop brève et trop forte). Les débits de pointes utilisés pour les permanents auraient été la somme du débit de pointe mesuré à la station de Lavalette et calculé à la Lironde.
- une troisième possibilité aurait été de travailler avec les hydrogrammes mesurés à Gasconnet et les hydrogrammes de la Lironde reconstitués. Les débits de pointe utilisés pour les permanents auraient pu directement être mesurés par une sortie du modèle tout juste à l'aval du nœud de la Lironde.

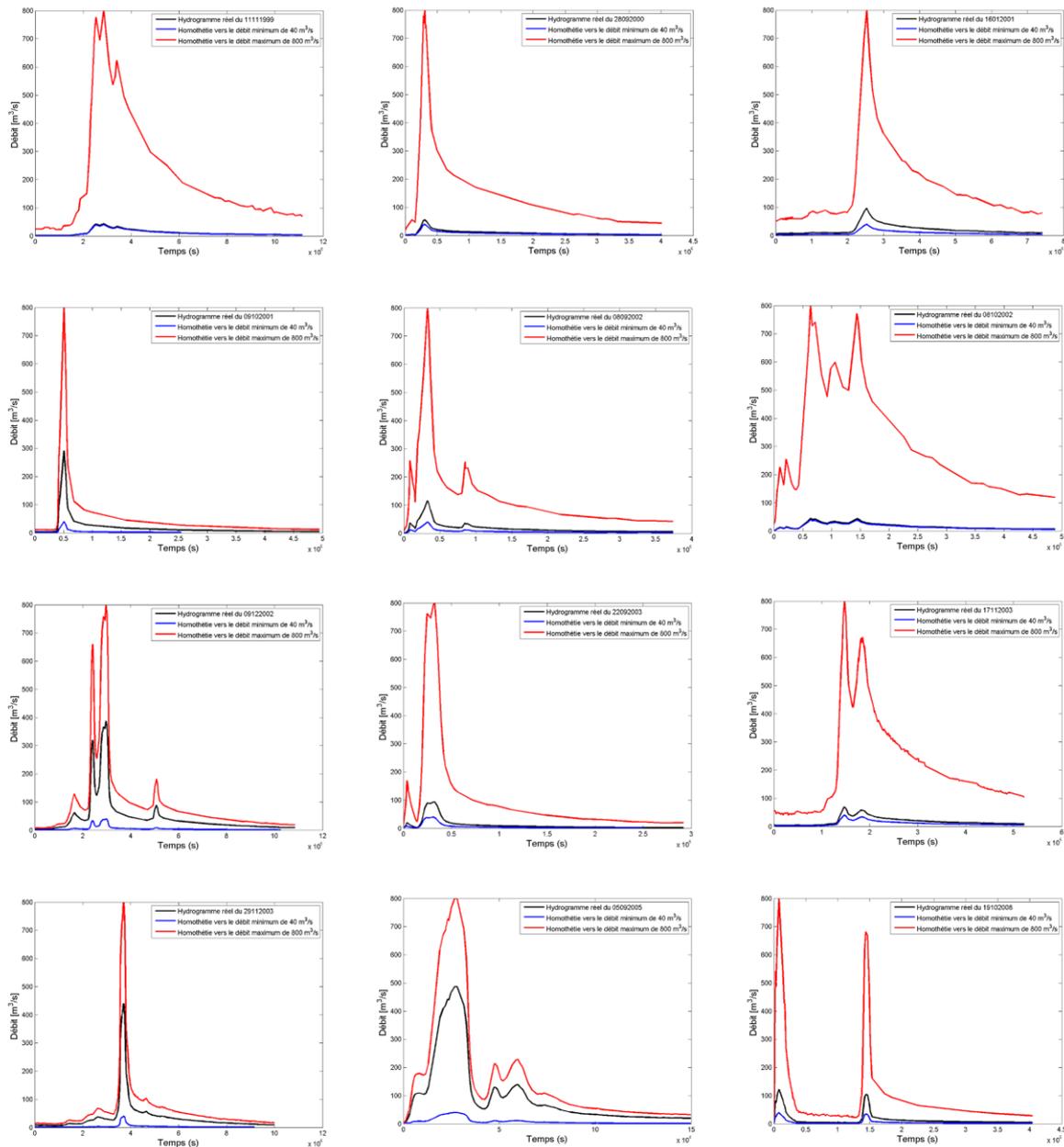
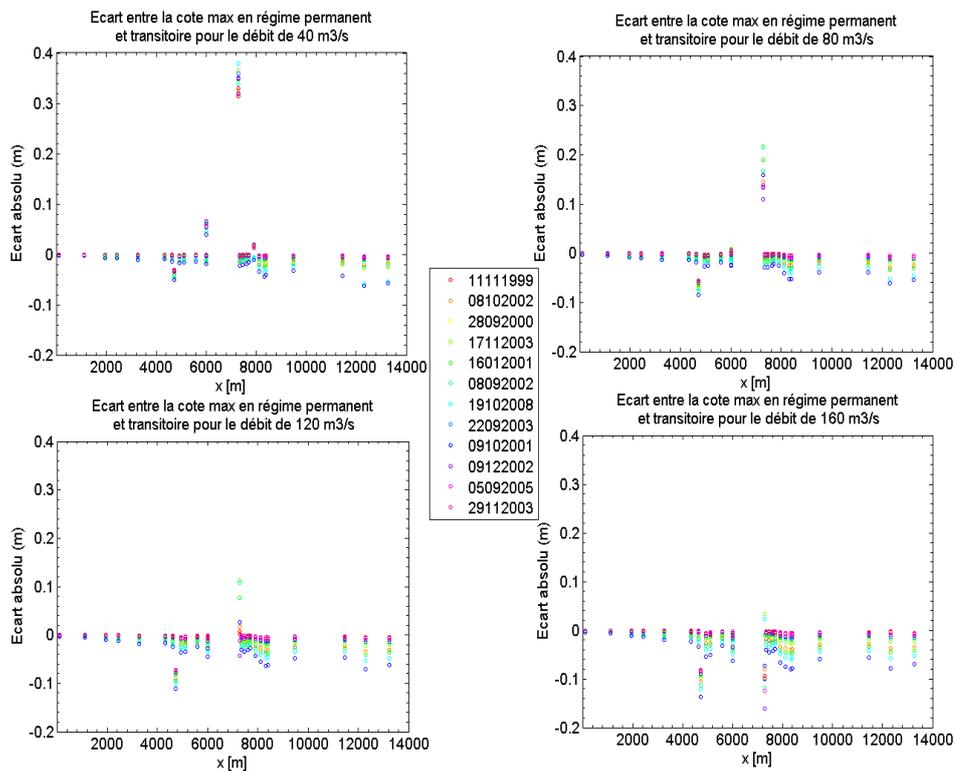


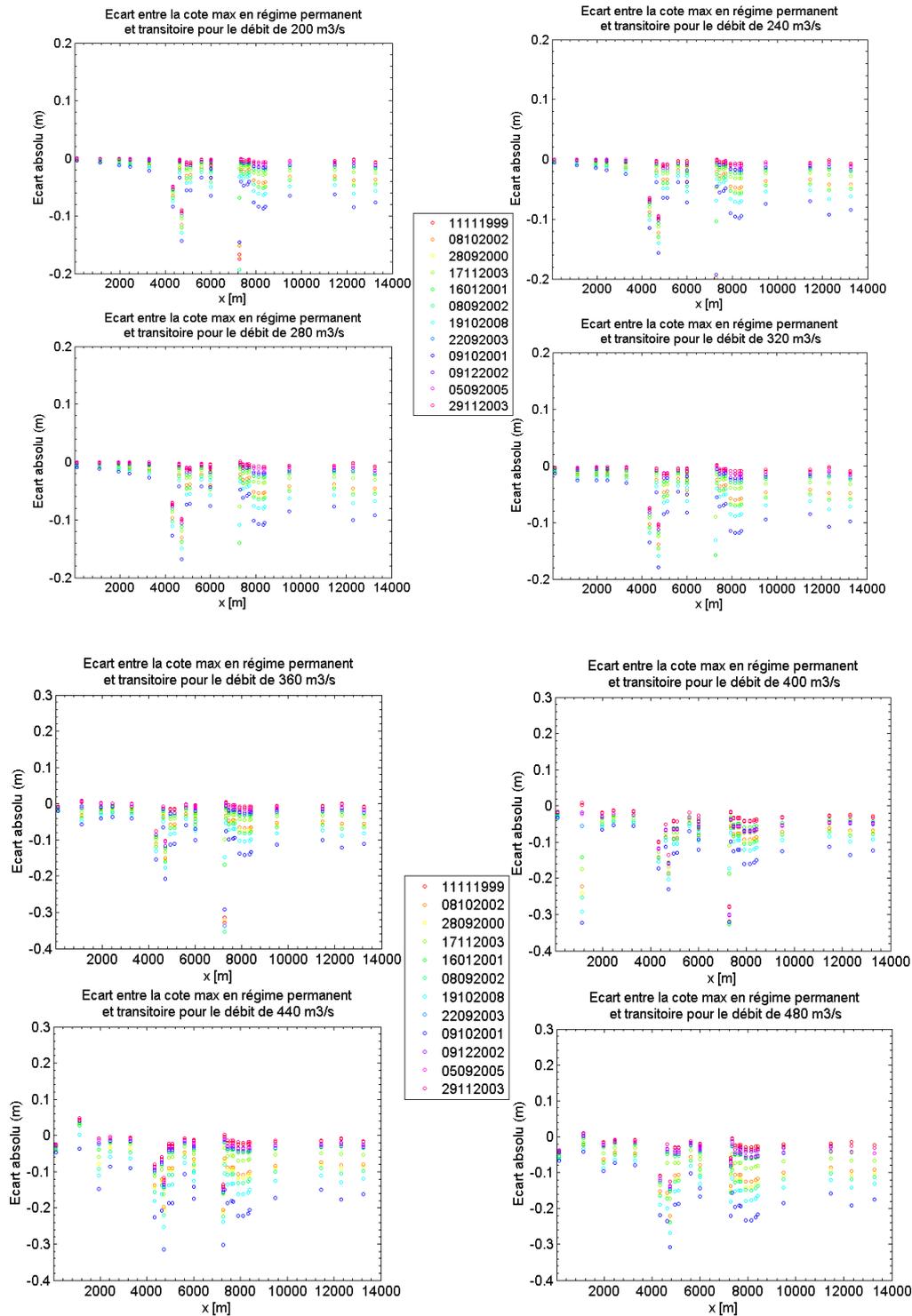
Illustration 123 : Homothétie des 12 hydrogrammes (noir) vers le débit de pointe maximal (rouge) et le débit de pointe minimal (bleu)

Pour des débits dépassant les 540 m³/s, il est nécessaire d'activer l'option "torrentiel local" de SIC afin d'éviter un plantage du calcul dû à un écoulement torrentiel. Cette option génère des biais importants lors du calcul de la ligne d'eau et des débits. Nous choisissons donc de ne pas tenir compte de ces simulations.

A chaque section étudiée nous pouvons comparer les cotes de l'eau atteintes pour un même débit de pointe pour 12 hydrogrammes de formes différentes (Illustration 124). Les cotes minimales et maximales atteintes à chaque section et pour chaque débit constituent alors la barre d'erreur résultant des simulations en régime permanent.

En analysant l'illustration 124, nous remarquons que l'écart augmente significativement pour les débits de pointe les plus forts (443 m³/s, 523 m³/s, 539 m³/s) et cela pour toutes les formes d'hydrogramme. La dispersion de cet écart augmente aussi. Ces écarts ont l'air d'être corrélés à la forme de l'hydrogramme puisque l'on retrouve une répartition similaire pour les 12 débits de pointes. Certaines formes d'hydrogramme génèrent toujours des écarts plus importants que d'autres. C'est le cas des crues des 11/10/2008 et 28/09/2000. Pour la section située à l'abscisse x=7273 m, nous remarquons des écarts positifs et souvent opposés aux autres sections. Il s'agit du seuil mobile du pont de l'évêque. La ligne d'eau du transitoire est alors supérieure à celle du permanent. En fonction de la forme de l'hydrogramme de crue, le seuil se baissera de manière différente. Pour une crue brutale, une variation forte du niveau de l'eau va engendrer une réponse rapide du seuil qui se baissera brutalement. Par contre, pour une crue lente, la variation du niveau de l'eau sera faible et le seuil se baissera progressivement. Pour ces deux exemples, si les débits de pointe sont similaires, on peut s'attendre à un abaissement plus important dans le cas d'une crue brutale.





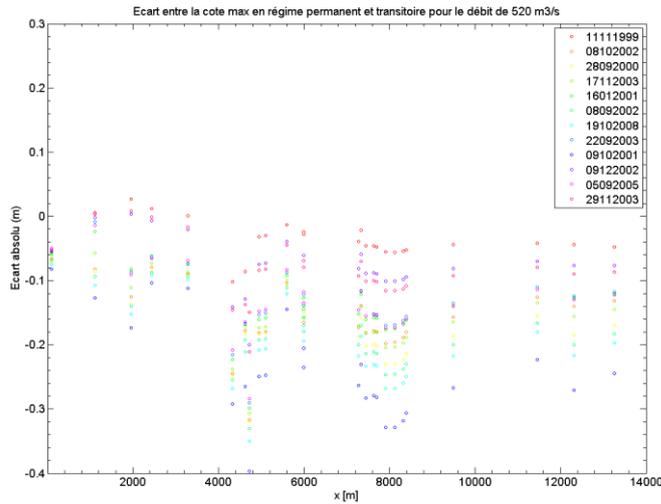


Illustration 124 : Écart entre le régime transitoire et permanent aux 19 sections étudiées et pour les 12 débits de pointe. En couleur est représentée les 12 différentes formes d'hydrogrammes correspondant aux dates des crues (légende)

À partir des sorties modèles, nous traçons pour chaque simulation, les couples de points [Q;Z] ainsi que la courbe Q(Z) réalisée à partir de la succession de régimes permanents (Illustration 125). Nous observons que les couples de points [Q;Z] sont quasiment superposés sur la Q(Z). Cela montre que l'écart entre le régime permanent et le transitoire pour un même débit de pointe est essentiellement lié au laminage de la crue (diminution du débit de pointe et augmentation du temps de base). Les effets qui pourraient être liés à un écoulement perturbé par les conditions aval ou encore à un ennoiment des ouvrages plus important en régime permanent qu'en régime transitoire sont en fait négligeables sur le Lez.

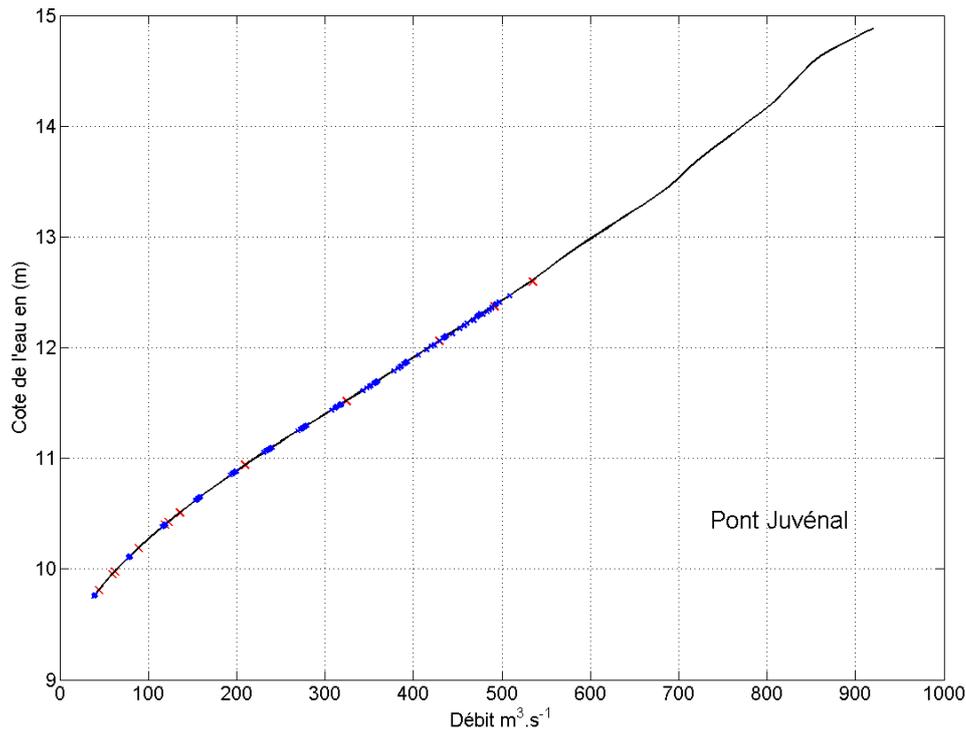


Illustration 125 : Courbe de tarage tracée à partir de simulation en régime permanent (courbe noire). En bleu, les couples de points [Q ;Z] issus des simulations transitoires pour 20 débits de pointes et 12 hydrogrammes de formes différentes. En rouge, les couples de points [Q ;Z] issus des simulations transitoires des hydrogrammes observés au moulin de Gasconnet avec les apports de la Lironde et du Verdanson reconstitués.

Évaluation du temps de propagation des crues dans le Lez

On propose ici d'évaluer le temps d'arrivée d'une crue lorsque débute un épisode pluvieux. Le but est d'évaluer l'heure de franchissement d'un seuil d'alerte (en termes de débit) à différents lieux sur le Lez lorsqu'un épisode pluvieux intense est prévu par Météo-France. À partir de l'intensité de pluie ainsi que de la durée d'un événement pluvieux prévue par Météo-France, le modèle hydrologique est capable de calculer le temps de réponse du bassin versant et donc la durée que le débit mettra pour franchir un seuil d'alerte à l'exutoire du bassin versant. Avec le modèle hydraulique, nous sommes capable d'évaluer le temps de propagation d'une crue le long du Lez. Ce temps est calculé à partir d'une moyenne résultant de la propagation des 240 hydrogrammes qui ont été générés artificiellement.

Ces temps sont tracés aux Illustration 126, Illustration 127, Illustration 128, Illustration 129 et Illustration 130 pour les dépassements de 100 m³/s, 200 m³/s, 300 m³/s et 400 m³/s. Ces temps sont relativement identiques pour le dépassement des seuils de 200 m³/s et 300 m³/s (Illustration 128 et Illustration 129). Pour le seuil de 100 m³/s, des temps de dépassement anormalement long ont été observés (Illustration 126). Il s'agit d'hydrogramme à deux pics de crue et dont le premier pic dépasse légèrement ce seuil en amont du Lez. Plus à l'aval, le laminage de ce même hydrogramme, provoque l'atténuation de ce premier pic dont le débit ne dépasse plus les 100 m³/s. Le temps de dépassement est donc fortement augmenté car il faut attendre l'arrivée du deuxième pic de crue, plus important (Illustration 131). La moyenne calculée (trait noir) est donc « tirée vers le haut » pour le dépassement du seuil 100 m³/s

(Illustration 126). Pour le dépassement du seuil $400 \text{ m}^3/\text{s}$, les temps moyens de propagation sont augmentés d'une vingtaine de minutes environ (45 minutes pour Garigliano au lieu de 30, 100 minutes pour la 3^{ème} écluse au lieu de 75). Cependant, selon la forme de l'hydrogramme, ces temps peuvent varier énormément (de plusieurs dizaines de minutes).

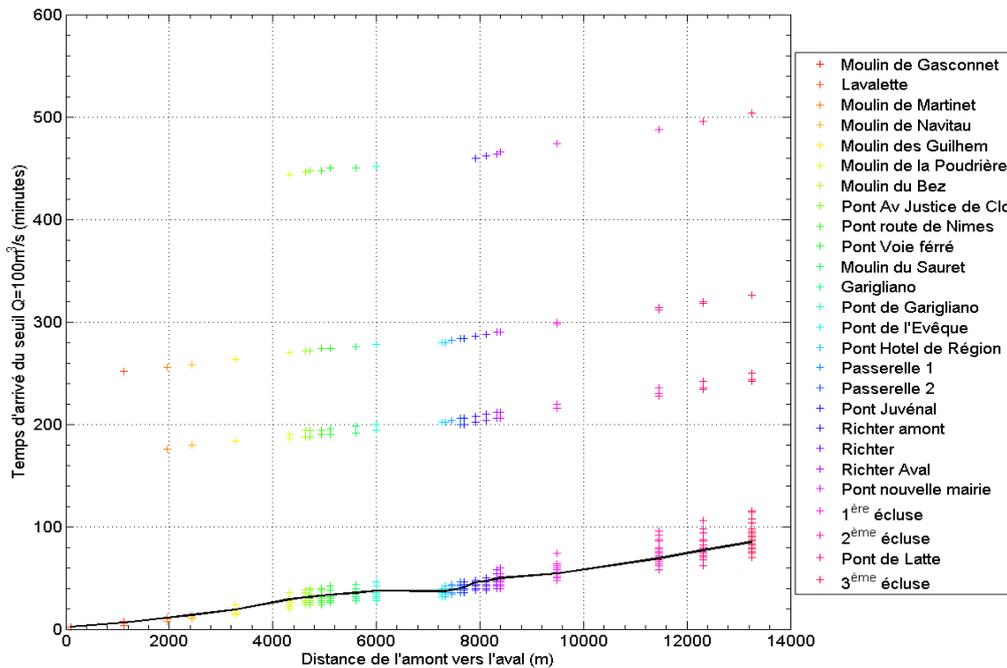


Illustration 126 : Temps d'arrivée moyen des crues dépassant le seuil des $100 \text{ m}^3/\text{s}$ au niveau des 26 ouvrages en travers répertoriés sur le Lez

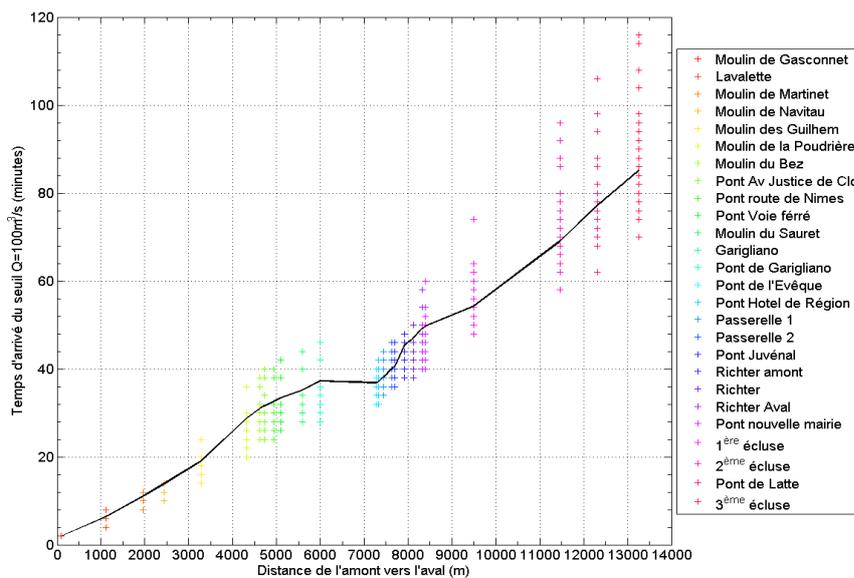


Illustration 127 : Temps d'arrivée moyen des crues dépassant le seuil des $100 \text{ m}^3/\text{s}$ au niveau des 26 ouvrages en travers répertoriés sur le Lez (zoom de la figure précédente).

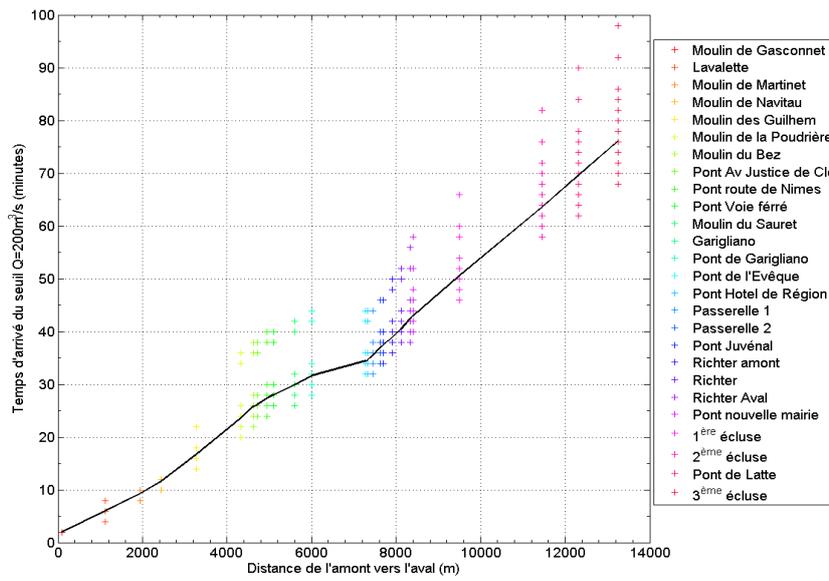


Illustration 128 : Temps d'arrivée moyen des crues dépassant le seuil des $200\text{ m}^3/\text{s}$ au niveau des 26 ouvrages en travers répertoriés sur le Lez

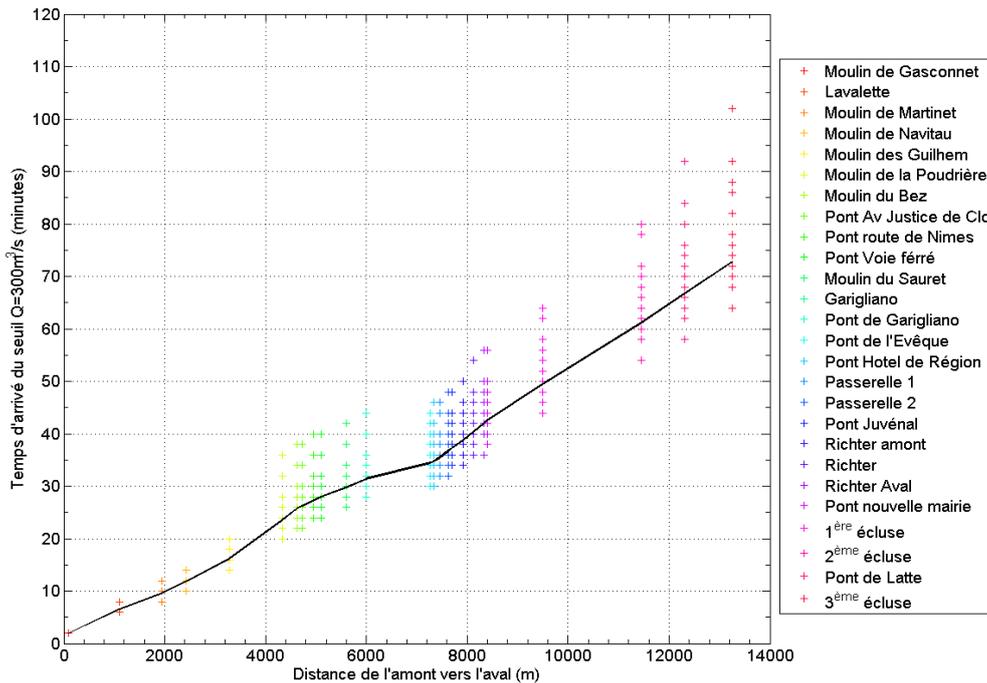


Illustration 129 : Temps d'arrivée moyen des crues dépassant le seuil des $300\text{ m}^3/\text{s}$ au niveau des 26 ouvrages en travers répertoriés sur le Lez

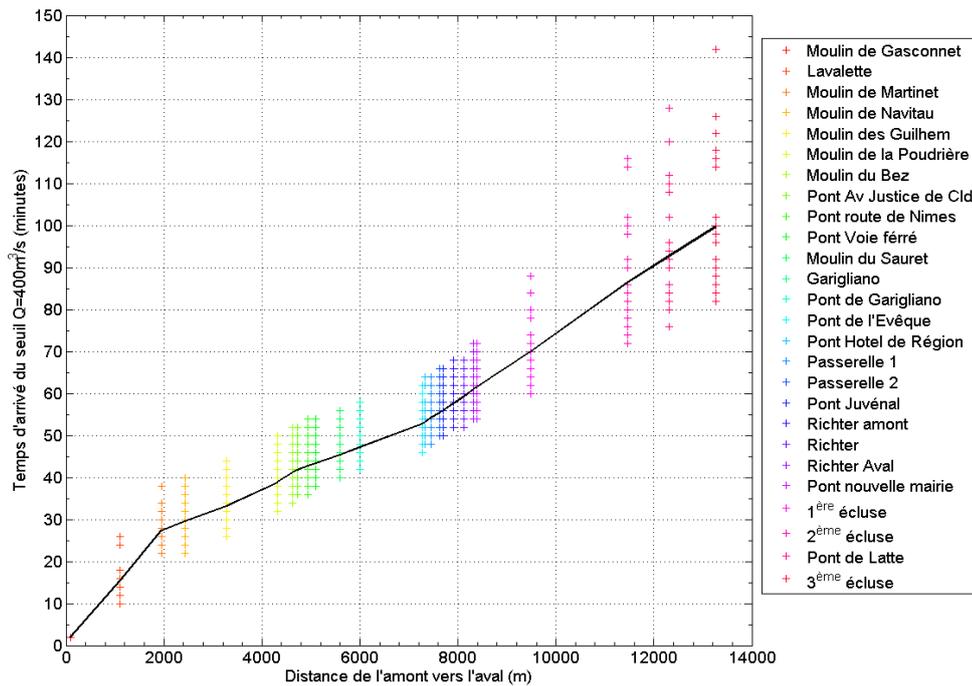


Illustration 130 : Temps d'arrivée moyen des crues dépassant le seuil des 400 m³/s au niveau des 26 ouvrages en travers répertoriés sur le Lez

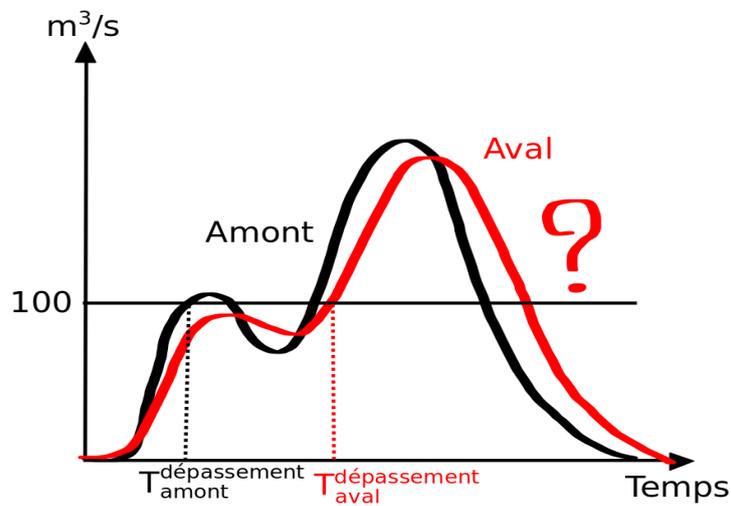


Illustration 131 : Exemple de l'effet du laminage d'un hydrogramme sur le dépassement d'un seuil de débit

Construction graphique des abaques et explications

On propose de construire un abaque représentant le débit injecté au seuil du moulin de Gasconnet en fonction de la cote de l'eau à la section étudiée. A partir des résultats précédents, les bornes [Zmin ; Zmax] pour chaque débit à chaque section constituent une marge d'erreur autour des régimes permanents calculés pour les débits de pointes. De même les bornes

[Q_{min} ; Q_{max}] correspondantes sont tracées. La $Q(z)$ est tracée (trait plein) à partir de régimes permanents simulés pour des débits compris entre $40 \text{ m}^3/\text{s}$ et $800 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour chaque débit, la côte du seuil du Pont du Moulin de l'Evêque est ajustée grâce à la fonction polynomiale (Illustration 121).

Les sections retenues pour tracer les abaques sont les dix-neuf seuils en travers et les ponts (Illustration 132):

- Moulin de Gasconnet,
- Lavalette,
- Moulin de Martinet,
- Moulin de Navitau,
- Moulin des Guilhem,
- Moulin de la Poudrière,
- Moulin du Bez,
- Pont Avenue de la Justice de Castelnaud,
- Pont route de Nîmes,
- Pont Voie ferré,
- Moulin du Sauret,
- Garigliano,
- Pont de Garigliano,
- Pont du Moulin de l'Evêque,
- Pont Hôtel de Région,
- Passerelle 1,
- Passerelle 2,
- Pont Juvénal,
- Richter amont,
- Richter,
- Richter Aval,
- Pont nouvelle mairie,
- 1ère écluse,
- 2ème écluse,
- Pont de Latte,
- 3ème écluse.

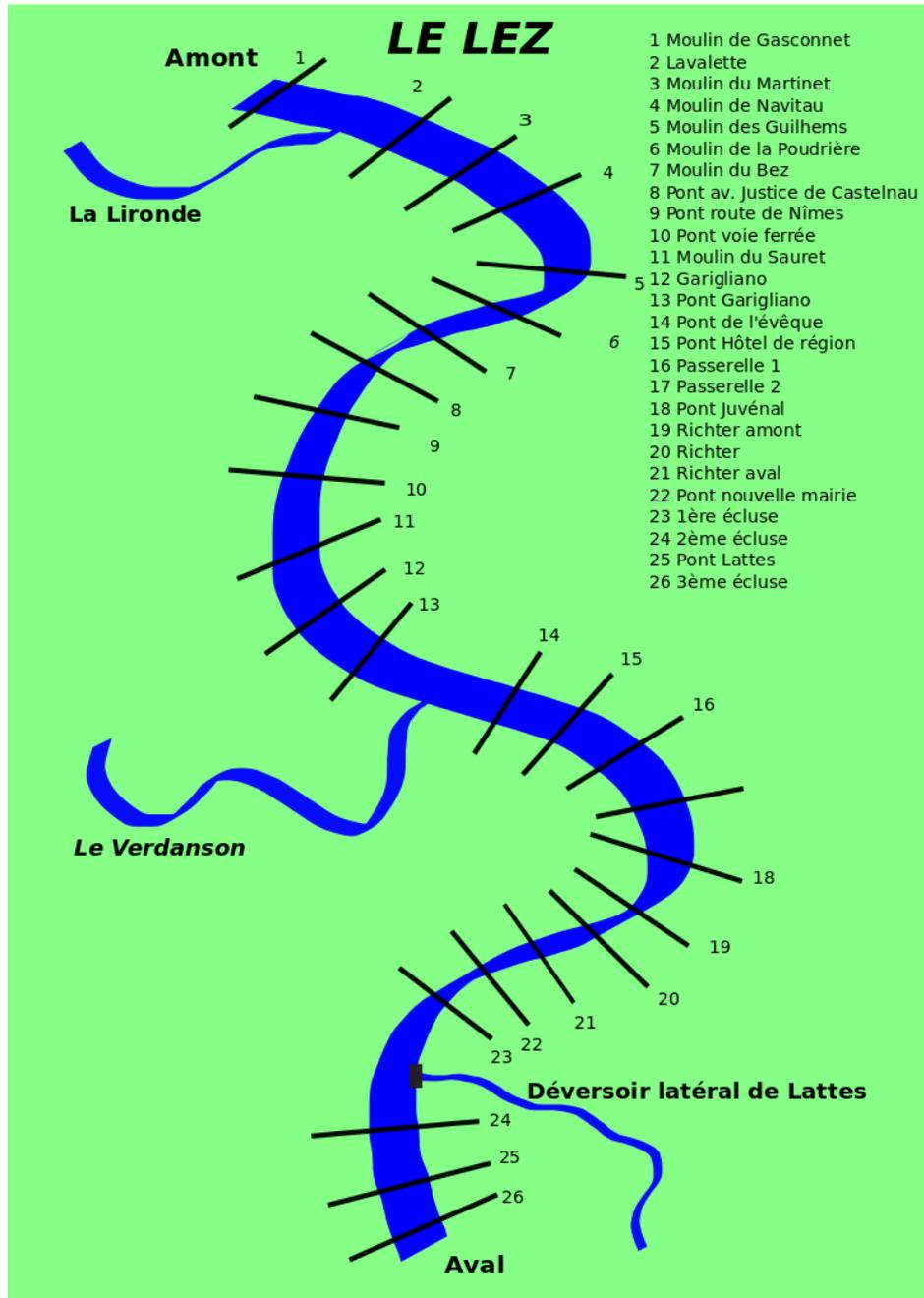


Illustration 132 : Schéma du Lez et disposition des sections étudiées

L'illustration 133 décrit l'abaque de la 1^{ère} écluse. Les croix rouges correspondent aux couples de points $[Q_{\max} ; Z_{\max}]$ atteints par les simulations des hydrogrammes observés au moulin de Gasconnet avec les apports de la Lironde et du Verdanson reconstitués. Les couples de points $[Z ; Q]$ atteints à un lieu précis pour 12 crues de débits de pointes identiques (croix bleues) sont projetés sur la droite horizontale égale à Q_{\max} et sur la droite verticale égale Z_{\max} . La courbe en pointillé représente la hauteur d'eau atteinte dans le cas où le déversoir latéral de sécurité de Lattes ne fonctionnerait pas (pas d'écoulement). Ce déversoir est modélisé par un seuil rectangulaire avec un coefficient de débit standard égal à 0,4.

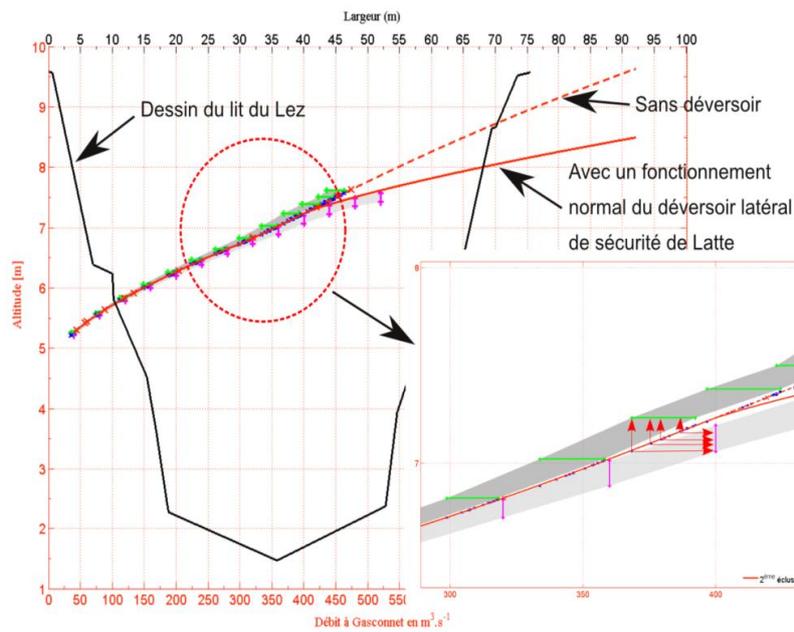


Illustration 133 : Construction de l'abaque, exemple au niveau de la 1ère écluse de Lattes.

L'illustration 134 et l'illustration 135 présentent les principales indications qu'il est possible de lire sur chaque abaque référencé dans l'Annexe 2.

Le lieu de la section est indiqué en bas à droite du graphique. En ordonnée, vous lisez la cote de l'eau relative au niveau de la mer. En abscisse, il s'agit du débit du Lez au niveau du seuil du moulin de Gasconnet (amont). La courbe colorée permet de faire le lien entre le débit à l'amont du Lez et la cote de l'eau atteinte localement. La courbe noire représente le profil en travers de la section considérée.

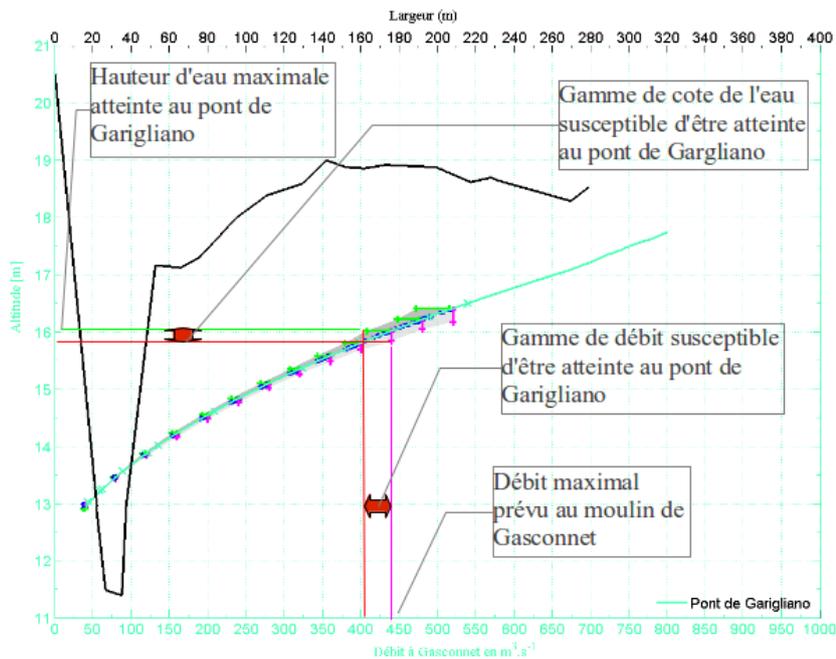


Illustration 134 : Abaque au pont de Garigliano

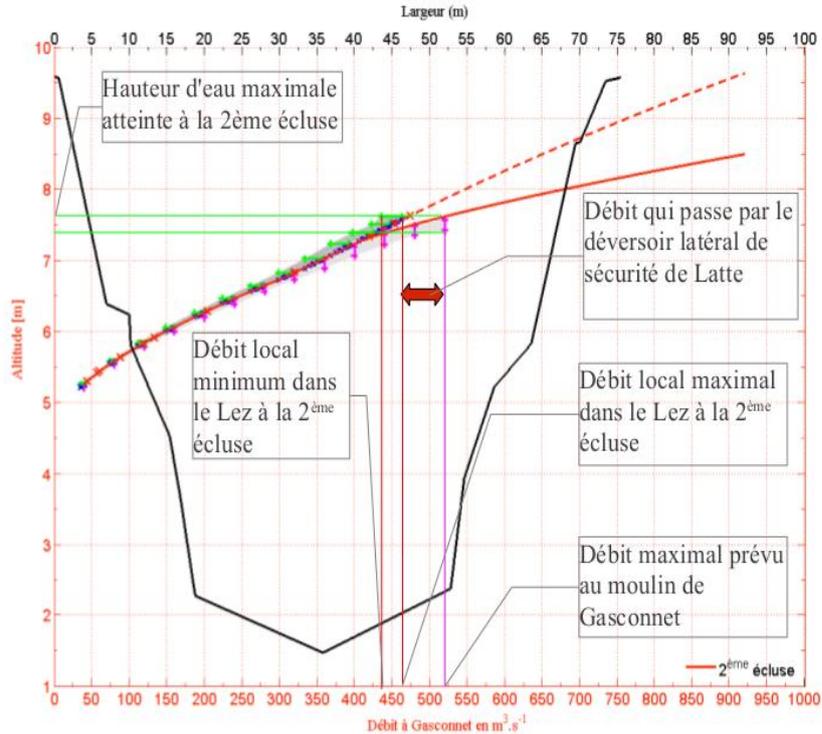


Illustration 135 : Abaque à la 2^{ème} écluse de Lattes

5.3. CONCLUSION

Cette étude a permis de réaliser un modèle hydraulique du Lez. Les résultats des simulations peuvent aider à prévoir la ligne d'eau atteinte lors des crues. Les abaques qui en découlent peuvent être facilement couplés avec les sorties du modèle hydrologique. La comparaison entre les observations terrains (laisses de crues, hydrogrammes), l'étude menée par BRL et les résultats de nos simulations montrent que le modèle est fiable. Il existe cependant des zones où d'importantes incertitudes existent. C'est le cas, par exemple, des alentours du seuil de Garigliano où des différences significatives existent entre le modèle de BRLi et le modèle SIC. Cette année, les événements pluvieux n'ont pas été assez importants pour générer des crues sur le Lez permettant de comprendre ces incohérences. Il faudra donc envisager de nouvelles mesures de terrain lors de futures crues (jaugeage, hauteur d'eau) afin d'ajuster et vérifier les abaques qui découlent du modèle. A l'heure actuelle, les deux modèles (SIC et BRLi) nous paraissent aussi fiables l'un que l'autre.

6. Conclusions

L'analyse des données disponibles au niveau des cinq stations météorologiques à proximité du bassin d'alimentation du Lez montre un comportement typiquement méditerranéen des précipitations avec les cumuls les plus importants observés en octobre-novembre (épisodes cévenols) et sur les reliefs plutôt que sur le littoral. L'analyse statistique montre une tendance à la hausse des précipitations d'automne sur les trente dernières années, qui entraîne, pour la plupart des stations, une hausse des cumuls annuels. Les données de température disponibles traduisent les positions géographiques des stations météorologiques, avec des températures plus douces et une amplitude thermique plus grande en bordure littorale que dans le massif des Cévennes. L'analyse statistique conduit à mettre en évidence une tendance significative à la hausse des températures moyennes annuelles sur toutes les stations, essentiellement reliée à une hausse des températures printanières et estivales. La hausse observée n'apparaît par contre pas systématiquement sur les séries de températures maximales et minimales (pour les stations qui enregistrent ce type de données) et lorsqu'on l'observe, c'est essentiellement au printemps et, dans une moindre mesure, en été.

Pour explorer le climat futur, neuf scénarios climatiques ont été obtenus à partir des simulations des modèles de climat désagrégés disponibles dans le cadre du projet SCRATCH 2010 du CERFACS, à l'horizon 2045-65, pour le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B. Ces scénarios, traduits en termes d'anomalies moyennes mensuelles, indiquent une augmentation de la température moyenne mensuelle comprise entre +1,5°C et +2,3°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) suivant la période de l'année, en moyenne multi-modèle. Pour les précipitations, les scénarios prévoient une diminution des précipitations mensuelles de l'ordre de -5 à -10% en moyenne multi-modèle. Le modèle numérique Tempo au pas de temps journalier montre que les scénarios de changement climatique semblent avoir un impact plus marqué sur la recharge par les pluies efficaces (quantité d'eau qui contribue à recharger les aquifères) que sur la pluviométrie elle-même. La recharge par les pluies efficaces serait ainsi fortement diminuée dans le futur, se traduisant par une baisse de -30% du cumul annuel moyen de pluie efficace en valeur moyenne multi-modèles. Cette réduction s'observerait surtout sur les périodes automnales et printanières, et dans une moindre mesure en hiver. Cette diminution significative de la recharge induirait un impact vis-à-vis des ressources en eau contenues dans les systèmes karstiques. L'impact du changement climatique se manifesterait alors par une diminution de la piézométrie notamment lors des périodes estivales, pendant lesquelles les niveaux piézométriques seraient plus fréquemment situés dans la tranche d'eau 45-35 m NGF (fréquence d'occurrence de 15% au futur contre 9% pour la période de référence⁹). Il se traduirait aussi par une légère augmentation de la durée des assecs de la source du Lez (+30 jours en moyenne par rapport à la période de référence), ainsi que par une légère diminution du débit moyen de débordement de la source lors des périodes de hautes eaux. Enfin, il provoquerait une légère réduction des débits de crues décennaux.

Le comportement du système karstique a aussi été évalué pour différentes sollicitations de pompage (sans prendre en compte le changement climatique dans un premier temps). Les résultats obtenus pour deux scénarios de pompage correspondant à un volume total pompé de 39 Mm³/a (*Qp2* et *Qp3*) illustrent le rôle que peut jouer la stratégie de pompage sur l'évolution de la piézométrie du drain karstique en étiage. Le scénario *Qp2*, caractérisé par un

⁹ Dans ce scénario (scénario 2 dans le texte), le débit de pompage (*Qp*) est identique sur les deux périodes (présent et futur) => chronique de pompage *Qp0*

fort ratio de débit de pompage (1,33) entre les mois d'été et d'hiver, provoque d'avantage de rabattement au sein du karst que le scénario $Qp3$, caractérisé par un ratio de pompage plus faible (1,13). On montre également que la stratégie de pompage du scénario $Qp3$ permet en fin d'étiage d'obtenir des niveaux piézométriques comparables à ceux atteints par le scénario de référence $Qp0$. Or, à l'échelle annuelle, la différence de volume pompé entre les deux scénarios est de $+6 \text{ Mm}^3$. Ce résultat peut donc ouvrir de nouvelles perspectives quant aux modalités de gestion de la ressource en eau de ce système karstique. D'une manière générale, l'importance du débit de pompage, notamment lors des périodes d'étiage, conditionne l'évolution des rabattements du niveau piézométrique.

L'impact d'un prélèvement extrême a été évalué à l'aide d'une chronique de pompage ($Qp1$), définie par un ratio de pompage de 1.33 entre les mois d'été et d'hiver $[(1763 \text{ l/s})/(1122 \text{ l/s})]$ et un volume annuel de $47,5 \text{ Mm}^3$. Ce scénario (scénario 1) permet donc d'examiner l'impact d'une forte augmentation des débits de pompage (+44 % par rapport au volume médian ($33 \text{ Mm}^3/\text{a}$) de la période récente [2000-2010]) sur les ressources en eau du Lez, à climat équivalent au scénario de référence (situation de la période 1970-2000). L'impact simulé d'une forte augmentation des pompages se traduirait par une importante baisse des niveaux piézométriques par rapport à la situation de référence.

L'impact global du changement global (combinaison du changement climatique à l'horizon 2046/2065 et d'une augmentation des prélèvements sur les ressources en eau du Lez) a été évalué à l'aide des scénarios 3, 4, 5 et 6. Ces trois derniers scénarios sont caractérisés par des débits de pompage plus faibles que celui du scénario 3 ($47,5 \text{ M}^3/\text{a}$). Ainsi, l'impact du changement global se traduirait par une baisse générale du niveau piézométrique par rapport au scénario de référence. Entre les mois de juillet et septembre, l'augmentation des pompages (scénario 3, + 44 %) et l'impact du changement climatique provoqueraient plus de 35 m de rabattement supplémentaires par rapport au scénario de référence, la piézométrie moyenne mensuelle interannuelle serait comprise entre 25 m NGF et 15 m NGF en période d'étiage (le rabattement serait moindre pour les autres scénarios testés). Les résultats indiquent également que les niveaux piézométriques tarderaient à remonter et qu'ils demeureraient globalement inférieurs à la cote 50 m NGF jusqu'au mois de novembre. La fréquence d'occurrence de dépassement du seuil à 35 m NGF serait d'environ 35 % (en valeur médiane multi-modèle), ce qui signifie que les niveaux piézométriques moyens mensuels seraient situés sous ce seuil près de 35 % du temps sur la période des 20 années considérées [2046-2065]. Dans cette situation, les niveaux piézométriques seraient situés près de 17% du temps dans la tranche d'eau 20-10 m NGF. D'autres scénarios de pompages permettent de solliciter davantage l'hydrosystème par rapport aux prélèvements actuels, tout en réduisant la baisse de niveau par rapport au scénario 3. Ainsi, les scénarios 4 et 5 (ce dernier étant médian par rapport aux prévisions du SDAEP) permettent d'augmenter le volume prélevé de respectivement 8 et 22,5 % tout en maintenant un niveau piézométrique supérieur à 20 m NGF en moyenne mensuelle. Cependant, une telle exploitation nécessiterait de réviser la DUP actuelle.

Pour le critère de débit de débordement, l'impact du changement global se traduirait par une diminution de l'intensité des crues de fréquence décennale. Ce résultat permet d'illustrer le rôle de « modérateur de crue » que peut jouer un système karstique soumis à une gestion active par pompage. En effet, lors des premières crues automnales (qui sont généralement les plus fortes), une partie des flux d'eau contribue à recharger les réserves sollicitées par les pompages estivaux (plus importants qu'au présent dans le cas de ce scénario), ce qui limiterait ou réduirait l'importance des crues de reprise de cycle hydrologique. Ce phénomène traduit de manière globale, la reconstitution des réserves qui a lieu suite au période de sollicitation des réserves du karst par les pompages.

En complément de l'approche de modélisation Tempo menée sur le long terme à un pas de temps journalier, l'approche POKA a permis de tester des scénarios de gestion des pompages plus fins à un pas de temps horaire. La comparaison entre les deux modèles et l'étude de la propagation du rabattement montrent que le modèle POKA perd de la précision pour des durées de simulations au-delà de 20 à 30 jours. C'est donc en complémentarité que les deux modèles doivent être utilisés.

Les simulations de courte durée effectuées montrent qu'à volume constant prélevé sur 30 jours, le mode de prélèvement (chronique du débit de pompage) impacte significativement les rabattements induits à la source du Lez, notamment autour de l'instant charnière où la vasque se dénoie (niveau à 65 m NGF). Le scénario de pompage le plus favorable est d'anticiper l'étiage de la source en prélevant fort au début de façon à capter l'ensemble du débit naturel à l'exutoire, puis réduire les prélèvements après un certain temps. Le deuxième scénario le plus favorable consiste à pomper à un débit moyen dans un premier temps, puis augmenter le débit dès que la vasque se dénoie et ensuite réduire le débit plus tard. Ceci permet d'étendre le rayon d'action du pompage au sein de la matrice carbonatée en réduisant les rabattements au sein du conduit karstique et de la vasque.

Des simulations de pompages à fort débit (2200 l/s en continu) suivies d'une remontée ont été effectuées. Elles montrent qu'aux incertitudes et hypothèses inhérentes au modèle près, il faudrait compter de l'ordre d'un mois en année hydrologique médiane pour atteindre la limite de 35 m NGF lors d'un pompage d'essai. Les simulations de remontée indiquent que la réduction du débit de pompage à 1050 l/s en continu, induirait une remontée de 15 à 17 mètres en 5 à 7 jours.

L'analyse détaillée d'un certain nombre de crues sur le fleuve Lez a montré l'importance de l'état de saturation initiale du karst dans la genèse des crues éclair de surface. Il est démontré que, lors d'un épisode pluvieux, les premières précipitations contribuent au remplissage du karst et c'est seulement une fois celui-ci saturé que les ruissellements deviennent prépondérants et génèrent une crue. De plus, cette analyse a permis de mettre en évidence le rôle fort de l'intensité de l'événement pluvieux dans la genèse de la crue. Pour un même cumul de pluie, un événement présentant une intensité de pluie 2 fois supérieure à un autre événement, présentera en conséquence un débit à peu près 2 fois plus important pour des gammes de crues situées en vigilance orange ou rouge.

Une approche couplant la prise en compte du karst dans le modèle hydrologique ATHYS a permis de développer un abaque de vigilance des crues au niveau de la station de Lavalette. Cette prévision de débit doit être établie à partir du niveau piézométrique initial de la vasque et d'une prévision du cumul de précipitations d'une part et d'un ordre de grandeur de l'intensité pluvieuse de ce futur événement. La crue à venir est caractérisée en termes de débit de pointe.

Afin de traduire ces débits de pointe en amont de Montpellier, en niveaux d'eau à la traversée de Montpellier, une étude hydraulique a été réalisée. Elle a permis la mise en place d'un abaque représentant le débit injecté au seuil du moulin de Gasconnet en fonction de la cote de l'eau à la section aval étudiée. La marge d'incertitude dans la définition de ces différentes relations hauteur-débit a été prise en compte (écart entre régime permanent et transitoire par exemple).

Au total, ce sont dix-neuf seuils en travers et ponts qui ont été étudiés et dont le fonctionnement a été reproduit par une série d'abaques opérationnels.

La mise en cascade entre l'abaque de débit à Lavalette et les abaques hydrauliques à la traversée de Montpellier permet d'anticiper les niveaux d'eau atteints le long du Lez et en

particulier au droit des différents ouvrages de régulation, de protection, de contrôle. Cet abaque couplé "hydrogéologie - hydrologie - hydraulique" a été appliqué avec succès à la crue de septembre 2005. Il convient de le valider aux cours de crues futures par les services adéquats.

D'autres applications de cet abaque peuvent être envisagées, comme par exemple l'impact d'un changement global sur la crue produite. Comme les modèles climatiques actuels ne permettent pas de prédire le devenir des orages cévenols en terme d'intensité pluvieuse horaire, une étude plus qualitative a été réalisée afin de caractériser l'impact de différentes gammes de pluie sur les débits de pointe à Lavalette et niveaux d'eau à Garigliano. L'impact d'une modification de l'état de remplissage du karst antérieur à l'orage a aussi été caractérisé. Il en ressort qu'un fort pouvoir écrêteur du karst permettrait de fortement mitiger les crues tout en rendant la prévision des débits moins incertaines (car le débit de pointe est d'autant moins sensible à l'intensité de la pluie que le karst est initialement déprimé).

Cependant, plusieurs hypothèses ont dû être avancées pour mener cette étude: i) le fonctionnement du karst pour des niveaux piézométriques inférieurs à 35 m NGF a dû être extrapolé à partir du fonctionnement actuel en exploitation, ii) l'échantillon de fortes crues disponible pour cette étude est représentatif, iii) les apports de la Lironde sont négligeables. Ces 3 hypothèses ont dû être faites faute d'observations, mais il conviendra à l'avenir de mettre en place le dispositif de mesure adéquat afin de revenir sur ces hypothèses.

7. Bibliographie

C. Batiot-Guilhe, J.L. Seidel, B. Ladouche, V. Prié, F. Cernesson, N. Dorfliger, M. Blanc, J.C. Maréchal, V. Léonardi, P.Y. Vion. Avec la collaboration de C. Bancon, H. Fenet, C. Gonzalez, S. Spinelli, S. Van-Exter. (2012) - Projet de gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez – Caractérisation hydrochimique ; qualité chimique, vulnérabilité de l'hydrosystème et de l'écosystème associé. Rapport RP-61013-FR, 294 pages, 17 annexes.

Berard, P., (1983) - Alimentation en eau de la ville de Montpellier. Captage de la source du lez. Etudes des relations entre la source et son réservoir aquifère, Rapport n.2. Définition des unités hydrogéologiques. BRGM/83-SGN-325-LRO.

Boé J, Terray L, Habets F, Martin E. (2006) - A simple statistical dynamical scheme based on weather types and conditional resampling. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 111, D23106, doi: 10.1029/2005JD006889.

Boé, J., L. Terray, F. Habets, and E. Martin (2007) - Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies, *Int. J. Clim.*, 27(12), 643– 1655, doi:10.1002/joc.1602.

Borrell Estupina V., Maréchal J.-C., Coustau M., Fleury P., Jourde H., Kong A Siou L., Ladouche B., Malaterre P.-O., Mazzilli N., Ricci S. (2012) - Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez - Modèles numériques de fonctionnement de l'hydrosystème, Rapport RP-60222-FR, 253 pp., 113 fig., 32 tab., 2 ann.

Chaouche, K., L. Neppel, C. Dieulin, N. Pujol, B. Ladouche, E. Martin, D. Salas y Melia and Y. Caballero (2010) - Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change, *Comptes Rendus Geosciences*, 342(3), 234-243, doi:10.1016/j.crte.2010.02.001

Conroux Y., (2007) - Caractérisation du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère karstique du Lez à l'état naturel. Mémoire Master 2, Univ. Avignon 2, 151 p.

Coustau M. (2011) - Contribution à la prévision des crues sur le bassin du Lez : modélisation de la relation pluie-débit en zone karstique et impact de l'assimilation de débits. Thèse de doctorat UM2 - HSM - CERFACS.

Dorchies D., Documentation du Logiciel SIC, février 2011

Dörfliger.N., Pinault.J.L., Petit.V., Jauffret.D., Ladouche.B., Bakalowicz.M., De.La.Vaissere.R. (2004) - Systèmes karstiques et crues du Doubs. Méthodologie de détermination de la contribution des systèmes karstiques aux écoulements de surface, hors crues et des étiages. BRGM/RP-53063-FR, 182 p, 68 illustrations, 11 annexes.

Drogue, C. & Grillot, J.C. (1976) - Structure géologique et premières observations piézométriques a la limite du sous-système karstique de Terrieu (Périmètre expérimental). *Ann. Sc. Univ. Besancon*, 25, 195-210.

Fleury, P., Ladouche, B., Conroux, Y., Jourde, H., Dörfliger, N. (2009) - Modelling the hydrologic functions of a karst aquifer under active water management – the Lez spring. *Journal of Hydrology*. 365, 235-243, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.11.037.

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

Jay-Allemand M. et Malaterre P.O. (2012) - Abaques d'aide à la prévention des crues sur la rivière du Lez (Hérault), IRSTEA, 2012

Jourde H., N. Dörfliger, C. Batiot-Guilhe, C. Bouvier, JF. Desprats, B. Ladouche, V. Leonardi, PO. Malaterre, JC. Maréchal, V. Prié (2011) - L'hydrosystème du Lez - Synthèse des connaissances récentes et passées. Rapport BRGM/RP-60041-FR.

Karam, Y. (1989). Essai de modélisation des écoulements dans un aquifère karstique. Exemple de la source du Lez (Hérault, France). Thèse Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, 210 p.

Kendall, M.G., (1975) - Rank Correlation Methods. 4th ed. Charles Griffin. London.

Lacas, J.L. & Avias, J., (1976) - Introduction à la méthodologie d'étude et d'utilisation des champs hydrothermiques des aquifères karstiques: d'après l'exemple du site de l'exurgence de la source du Lez (Hérault, France), Université des sciences et techniques du Languedoc (Montpellier), CERGA.

Ladouche B., J.-Ch. Maréchal, N.Dörfliger, P. Lachassagne (2006) - Système karstique des Cent Fonts. Simulation de Scénarios d'exploitation et de gestion de la ressource, BRGM/RP-54865-FR, 275 p., 59 ill., 32 tab., 8 ann.

Lespinas, F., W. Ludwig and S. Heussner (2010) - Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France, *Clim.Change*, 99, 425-456, doi:DOI 10.1007/s10584-009-9668-1

Mann, H. B., (1945) - Non-parametric Tests against Trend. *Econometrica*, 13, 245-259.

Maréchal, J.C., Ladouche, B., Dörfliger, N., Lachassagne, P. (2008) - Interpretation of pumping tests in a mixed flow karst system, *Water Resources Research*, 2008, 44, W05401, doi:10.1029/2007WR006288, 2008.

Moisselin, J.-M, M. Schneider, C. Canellas and O. Mestre. (2002) - Les changements climatiques en France au XX^e siècle en France, *La Météorologie*, (38), 45-56

Nakicenovic N. and R. Swart (2000) - Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. pp. 570., www.ipcc.ch.

Pagé, C., L. Terrayet J. Boé, (2009) - Dsclim: A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology. Technical Report TR/CMGC/09/21, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS No1875, Toulouse, France

Pagé, C. et L. Terray, (2011) - Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21^{ème} siècle : les scénarii SCRATCH2010. Technical Report TR/CMGC/10/58, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS No1875CS, Toulouse, France.

Quévremont P., Expertise des projets d'action de prévention des inondations sur le bassin du Lez, 2006

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

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.

Vidal J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Habets F., Soubeyroux J.-M., Blanchard M., Baillon M, (2010) - Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 459-478

Annexe 1

Éléments complémentaires des simulations hydroclimatiques et tests réalisés à l'aide du modèle Tempo

Résultats pour le scénario 4 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [35,7 Mm³/an =Qp4]

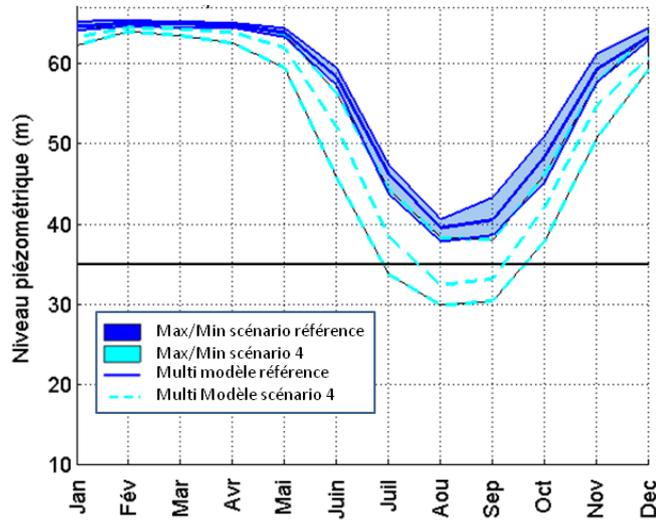


Illustration 136.: Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 4 climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [35,7 Mm³/an =Qp4] (traits pointillé bleus clairs). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle

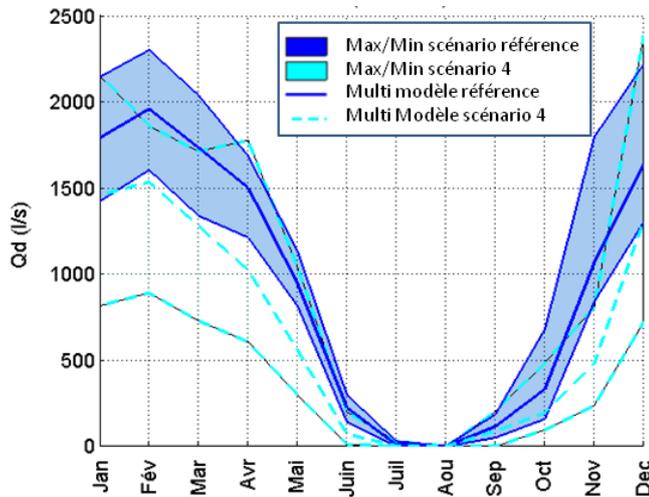


Illustration 137.: Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement (calculé au pas journalier). Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 4 [climat futur 2046-2065] et prélèvement augmenté [35,7 Mm³/an =Qp4] (traits bleus clairs). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les 9 modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle

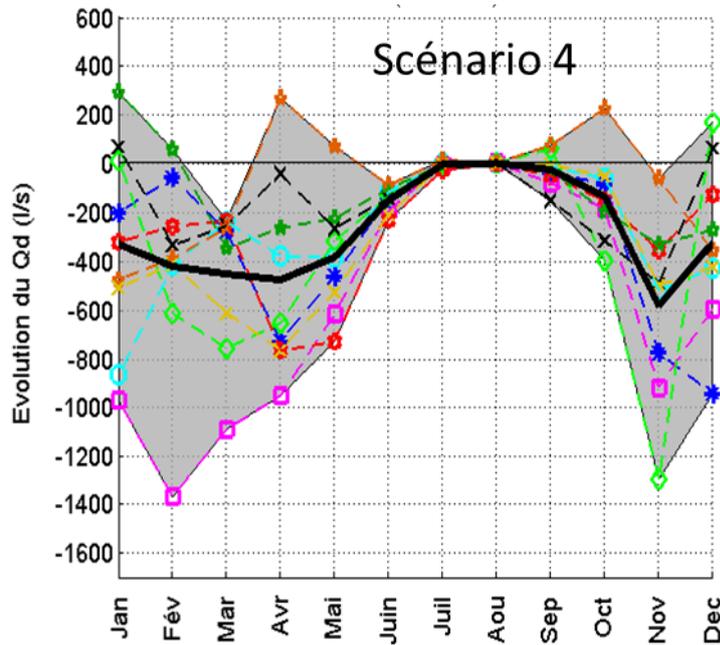


Illustration 138.: Evolution relative (en l/s) des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement calculées par les neuf modèles hydroclimatiques (scénario 4 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [$35,7 \text{ Mm}^3/\text{an} = \text{Qp4}$]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [$33 \text{ Mm}^3/\text{an} = \text{Qp0}$])

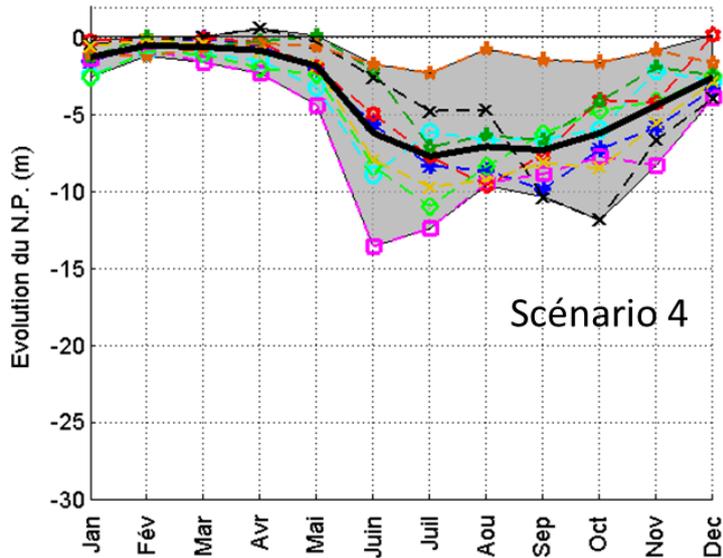


Illustration 139.: Evolution relative (en m) des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie débit calculés par les neuf modèles hydroclimatiques (scénario 4 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [$35,7 \text{ Mm}^3/\text{an} = \text{Qp4}$]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [$33 \text{ Mm}^3/\text{an} = \text{Qp0}$])

Résultats pour le scénario 5 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [40,4 Mm³/an =Qp5]

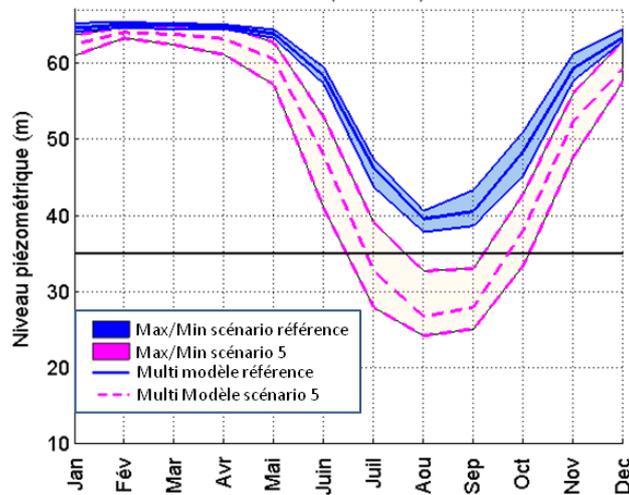


Illustration 140.: Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 5 climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [40,4 Mm³/an =Qp5] (traits pointillés roses). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les neuf modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle

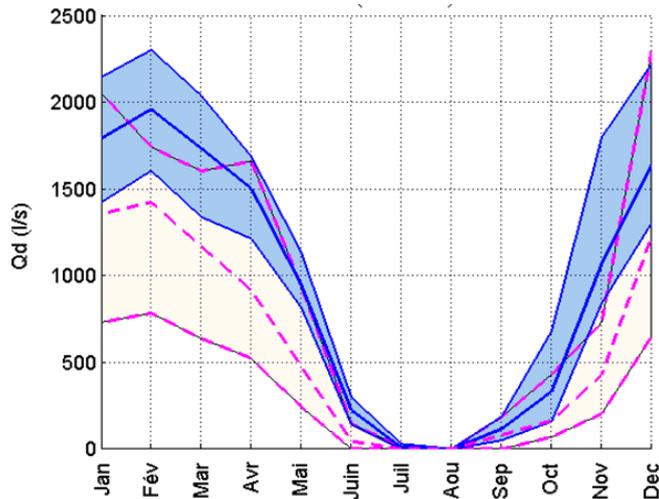


Illustration 141.: Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement (calculé au pas de temps journalier). Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 5 climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [40,4 M m³/an =Qp5] (traits pointillés roses). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les neuf modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle

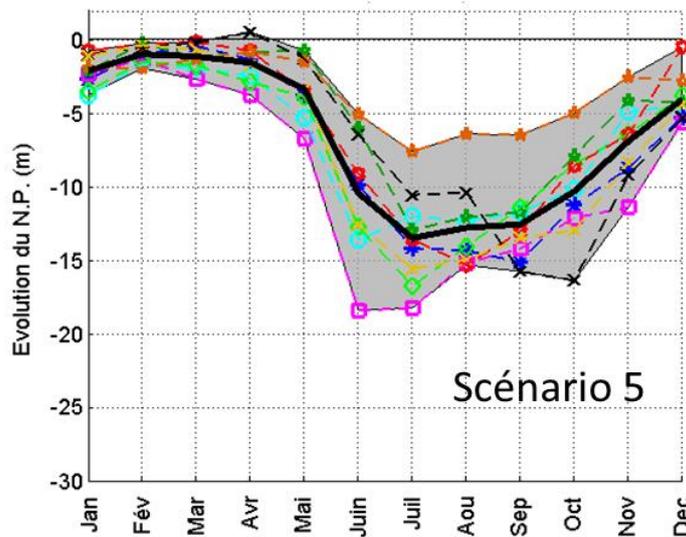


Illustration 142 : Evolution relative (en m) des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie calculées par les neuf modèles hydroclimatiques (scénario 5 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [40,4 Mm³/an = Qp4]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an = Qp0])

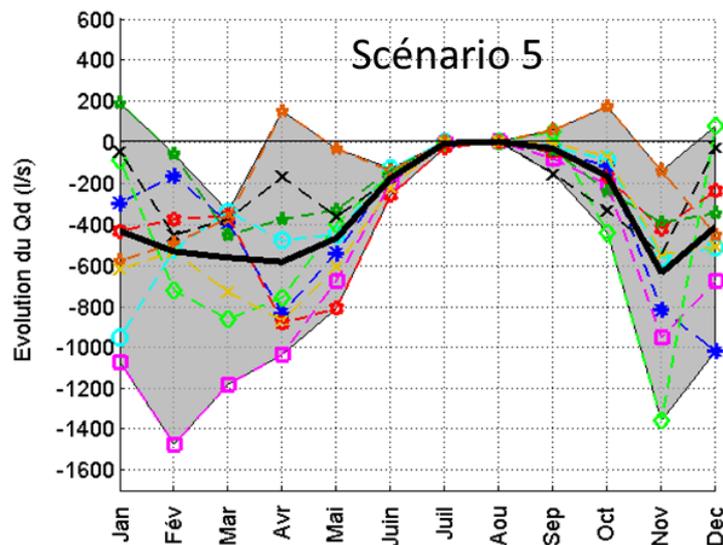


Illustration 143.: Evolution relative (en l/s) des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement calculées par les neuf modèles hydroclimatiques (scénario 4 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [35,7 Mm³/an = Qp4]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an = Qp0])

Résultats pour le scénario 6 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [45 Mm³/an = Qp6]

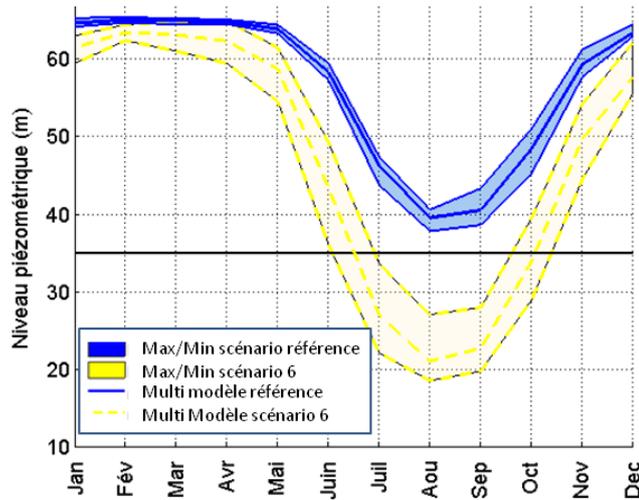


Illustration 144 : Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie journalière. Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 6 climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [$45 \text{ Mm}^3/\text{an} = \text{Qp6}$] (traits pointillé jaunes). Les courbes enveloppes délimitent la gamme des moyennes interannuelles obtenues en considérant les neuf modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle

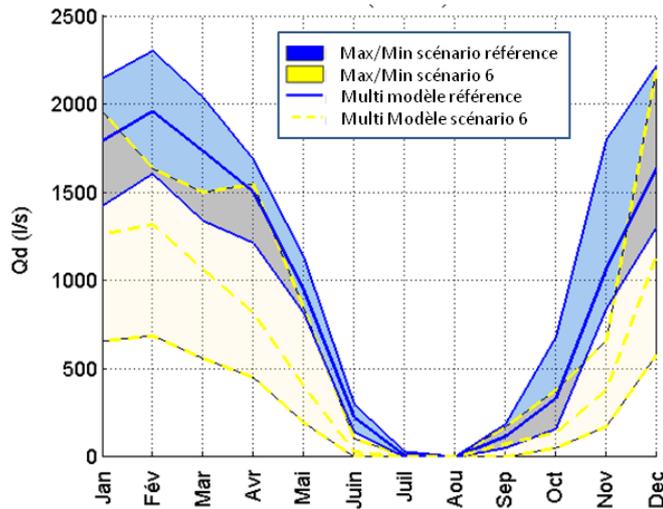


Illustration 145.: Comparaison des évolutions des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement (calculé au pas de temps journalier). Scénario de référence (traits pleins bleus) et scénario 6 climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [$45 \text{ Mm}^3/\text{an} = \text{Qp6}$] (traits pointillé jaunes). Les courbes enveloppes délimitent la gammes des moyennes interannuelles obtenues en considérant les neuf modèles climatiques. Les courbes au centre des courbes enveloppes caractérisent la moyenne multi-modèle

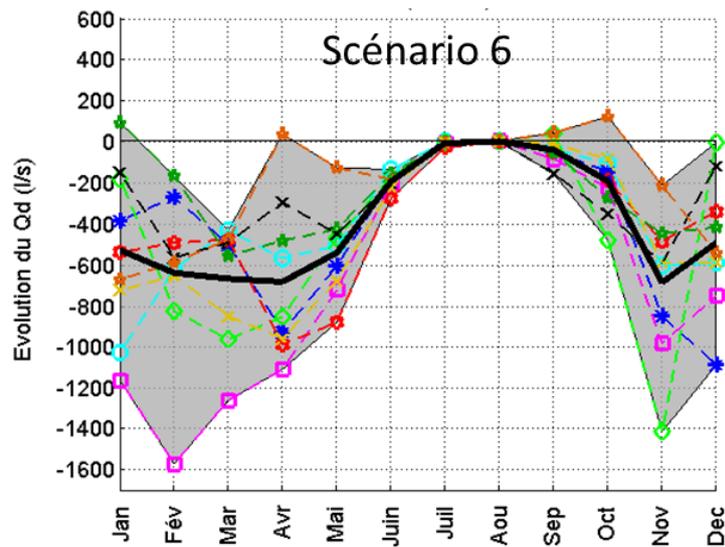


Illustration 146.: Evolution relative (en l/s) des moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement calculés par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario 6 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [45 Mm³/an = Qp6]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an = Qp0])

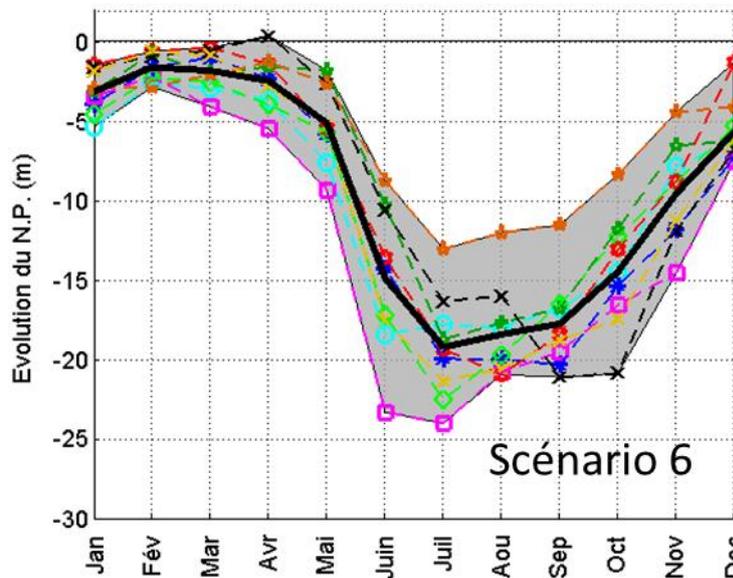


Illustration 147.: Evolution relative (en m) des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie calculés par les neuf modèles hydroclimatiques (scénario 6 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [45 Mm³/an =Qp6]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an =Qp0])

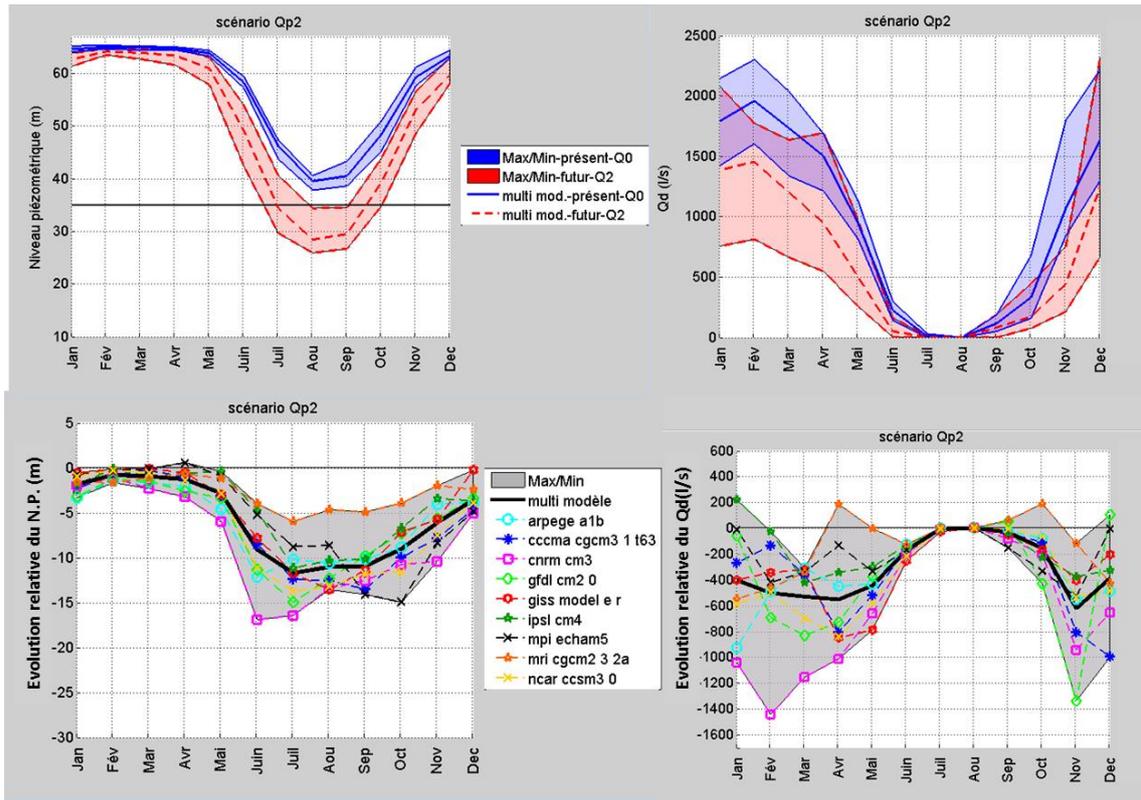


Illustration 148 : Evolution des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie et des débits de débordement calculés par les 9 modèles hydroclimatiques (scénario Qp2 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [39 Mm³/an =Qp3]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [33 Mm³/an =Qp0])

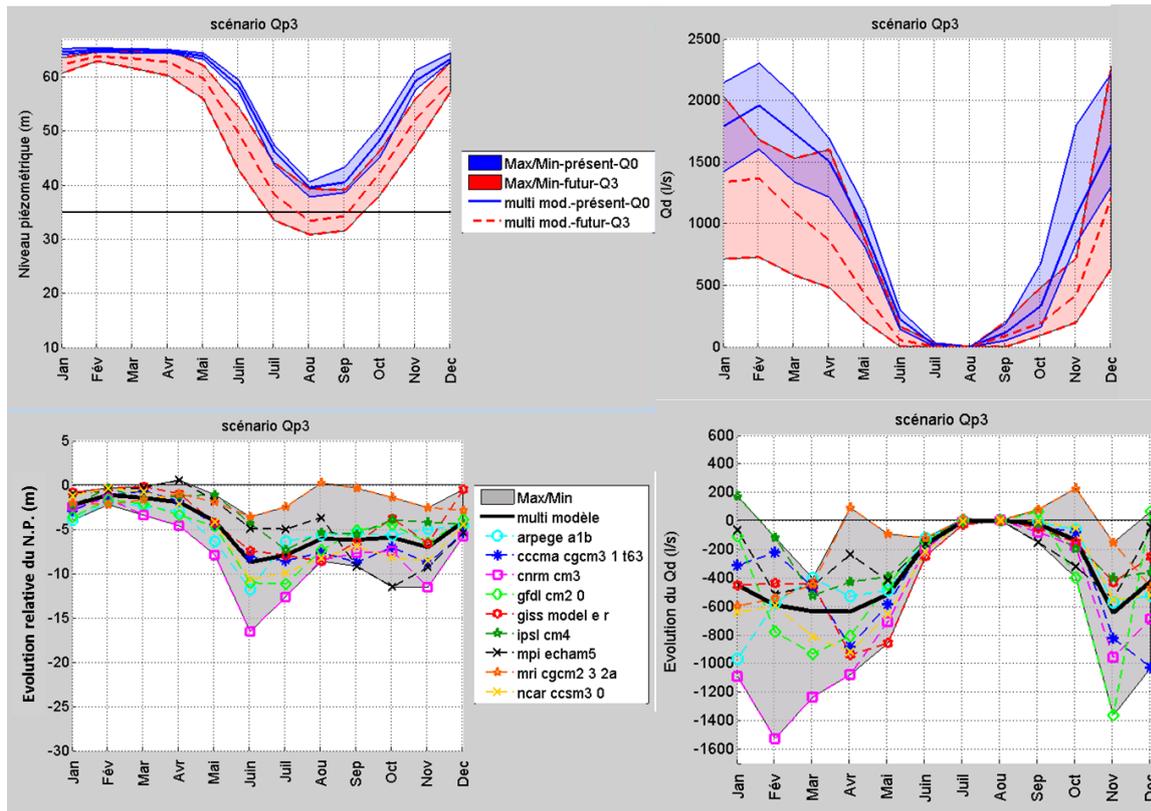


Illustration 149 : Evolution des moyennes mensuelles interannuelles de la piézométrie et du débit de débordement calculée par les neuf modèles hydroclimatiques (scénario Qp3 : climat futur [2046-2065] et prélèvement augmenté [$39 \text{ Mm}^3/\text{an} = \text{Qp3}$]). La comparaison (évolution relative) est effectuée par rapport au scénario de référence (climat présent 1971-2000 et prélèvement [$33 \text{ Mm}^3/\text{an} = \text{Qp0}$])

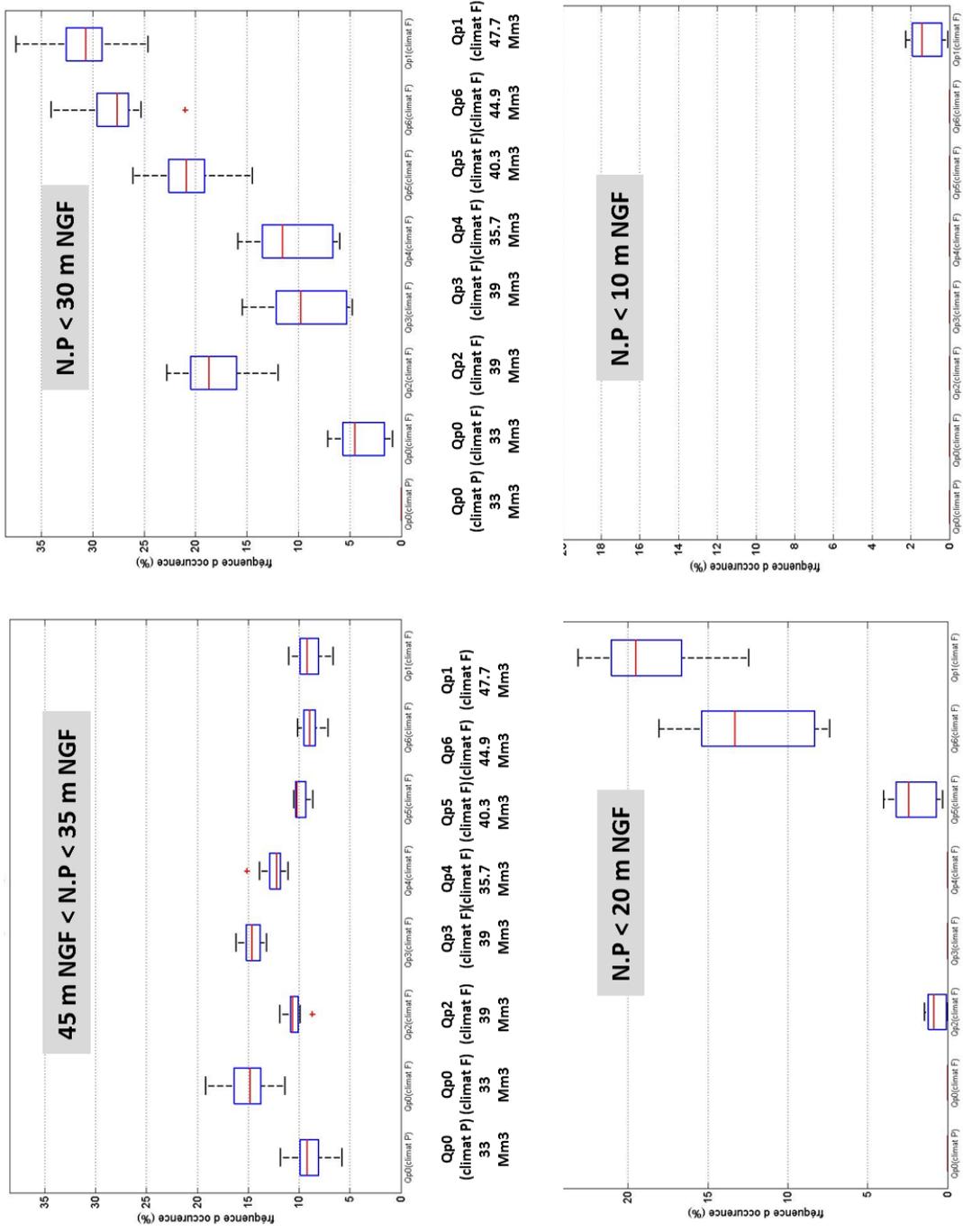


Illustration 150 : Dispersion des fréquences d’occurrences du niveau piézométrique calculées à l’aide des neuf modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : Climat Présent) , pour quatre intervalles de niveaux piézométriques distincts». Les fréquences d’occurrence sont calculées en considérant le nombre total d’occurrences des différents scénarios (**deux premières colonnes : scénario Qp0**).

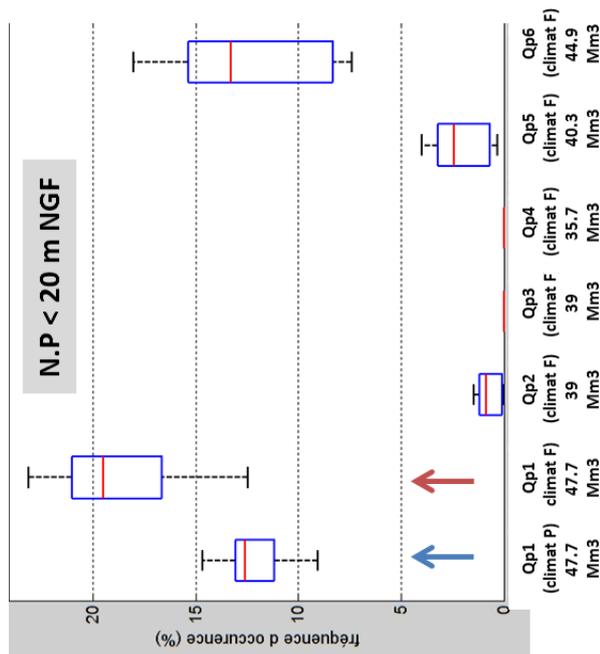
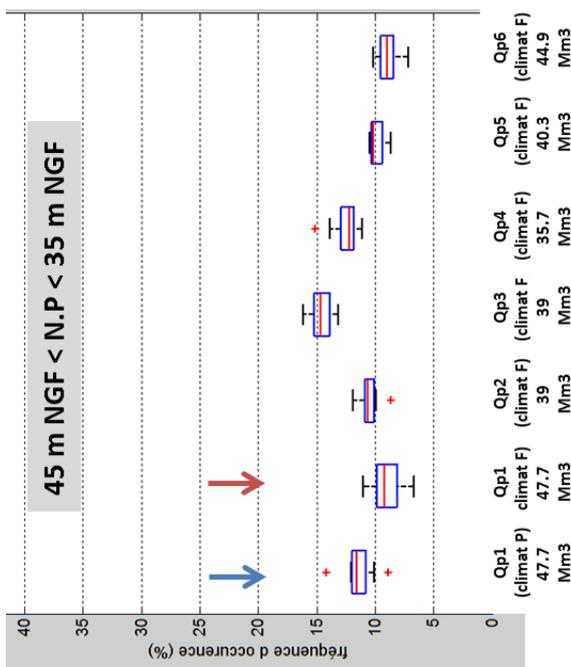
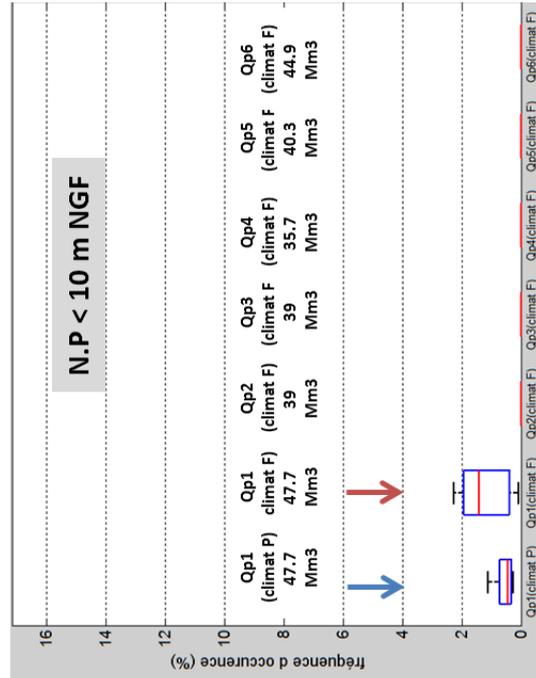
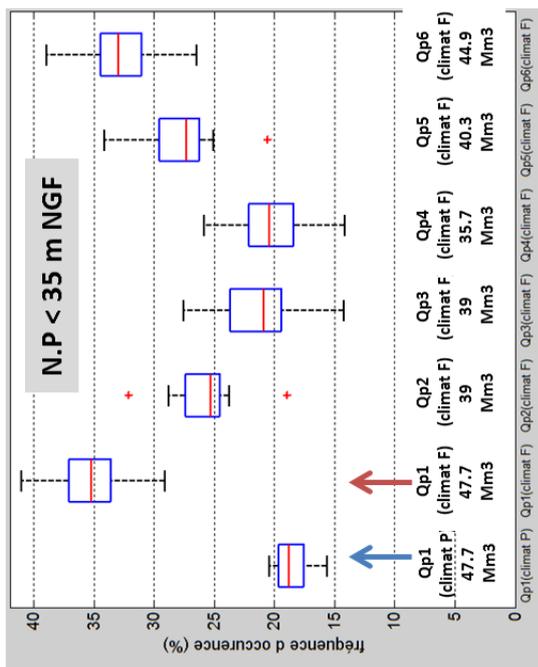


Illustration 151 : Dispersion des fréquences d'occurrences du niveau piézométrique calculées à l'aide des neuf modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : Climat Présent) , pour quatre intervalles de niveaux piézométriques distincts. Les fréquences d'occurrence sont calculées en considérant le nombre total d'occurrences des différents scénarios (deux premières colonnes : scénario Qp1).

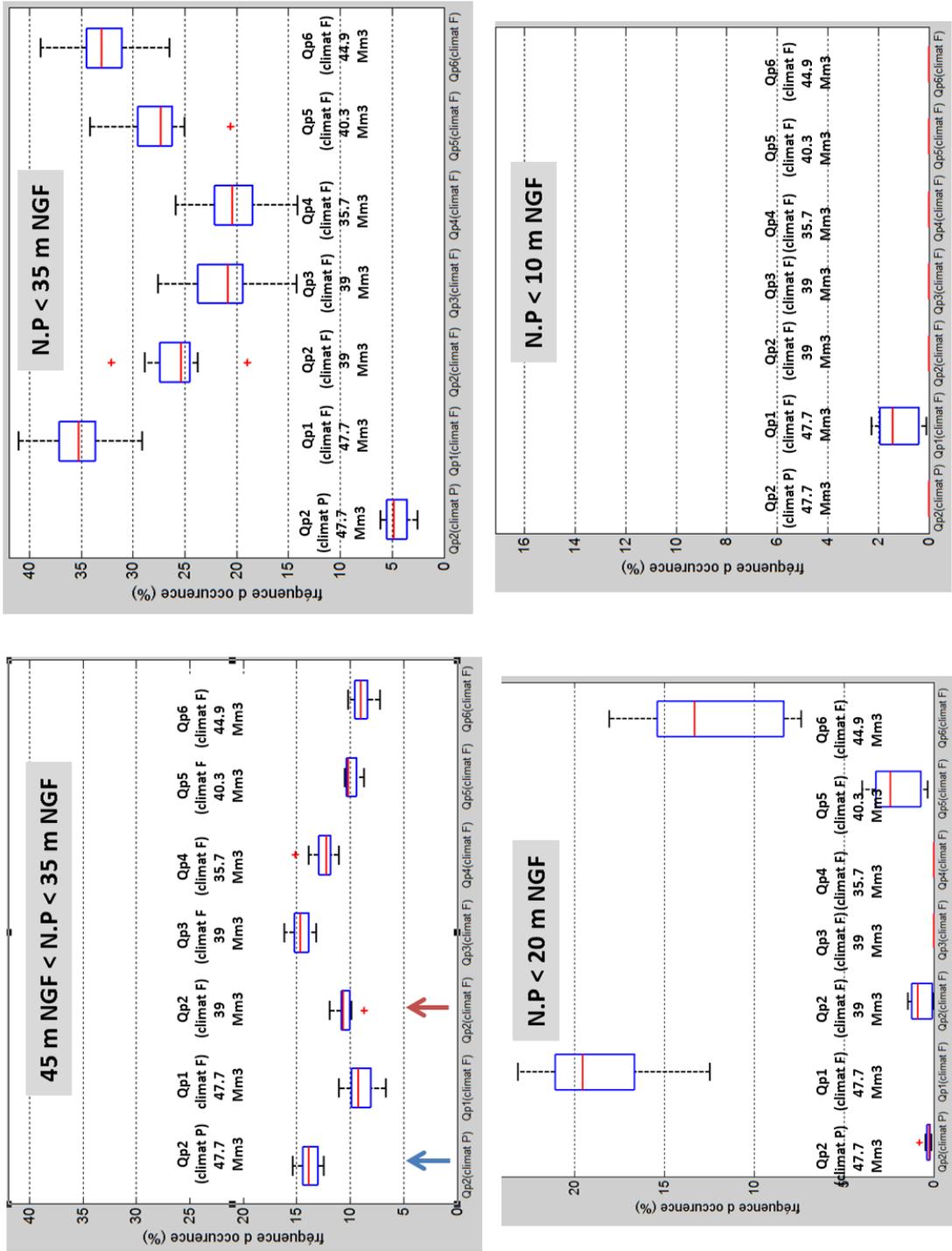


Illustration 152 : Dispersion des fréquences d’occurrences du niveau piézométrique calculées à l’aide des neuf modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : Climat Présent) , pour quatre intervalles de niveaux piézométriques distincts». Les fréquences d’occurrences sont calculées en considérant le nombre total d’occurrence des différents scénarios (première colonne : scénario Qp2).

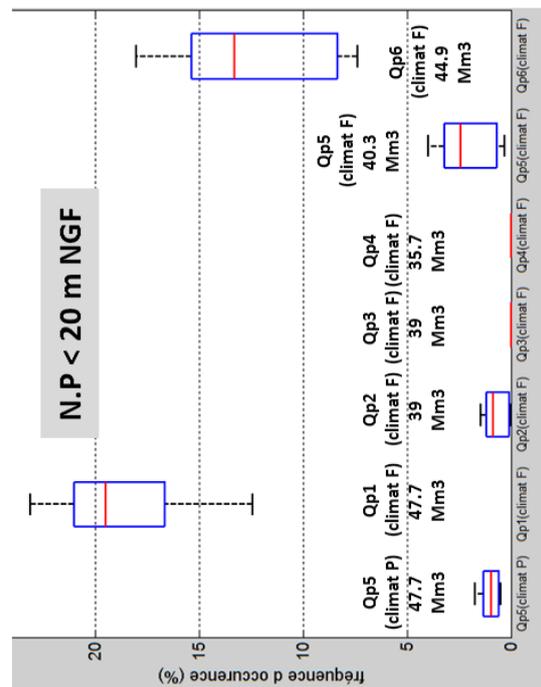
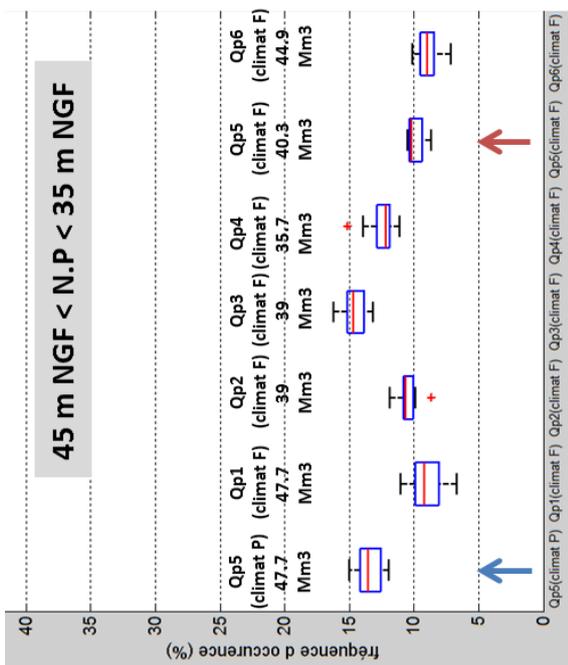
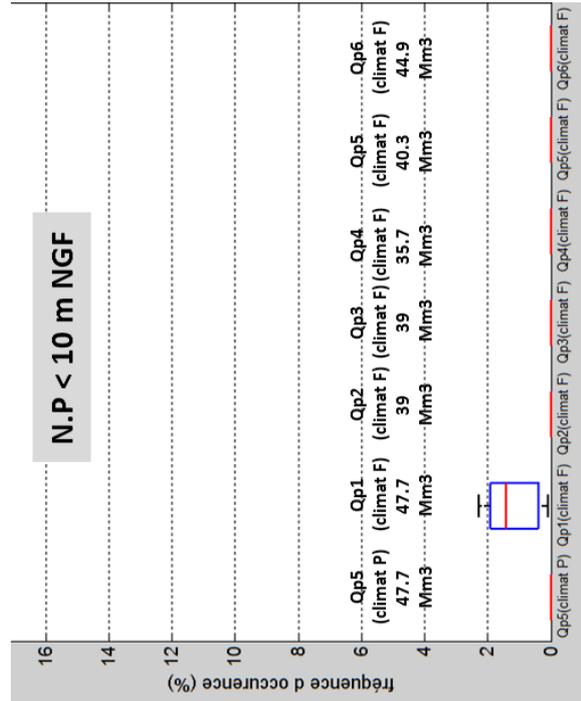
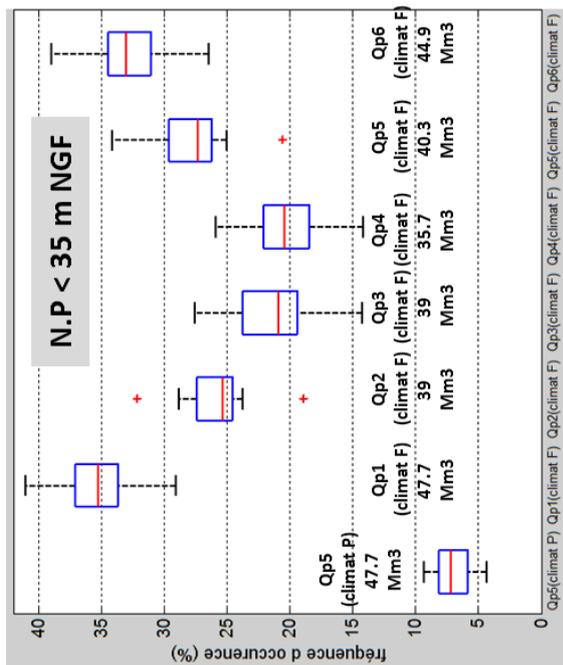


Illustration 153 : Dispersion des fréquences d’occurrences du niveau piézométrique calculées à l’aide des neuf modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : Climat Présent) , pour quatre intervalles de niveaux piézométriques distincts». Les fréquences d’occurrences sont calculées en considérant le nombre total d’occurrences des différents scénarios (première colonne : scénario Qp5).

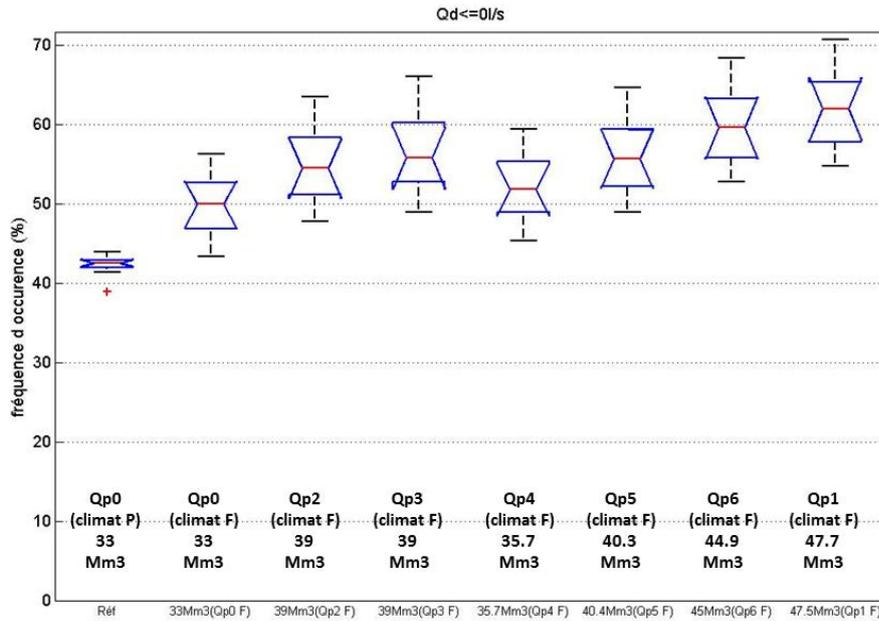


Illustration 154 : Dispersion des fréquences d’occurrences pour lesquelles le débit de débordement à la vasque est nul ($Q_d = 0$ l/s) calculées à l’aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : climat Présent). Les fréquences d’occurrences sont calculées en considérant le nombre total d’occurrences des différents scénarios. Le col resserré des boîtes à moustache signifie que les médianes sont représentatives au niveau de signification $\alpha = 5\%$ (première colonne : scénario Qp0)

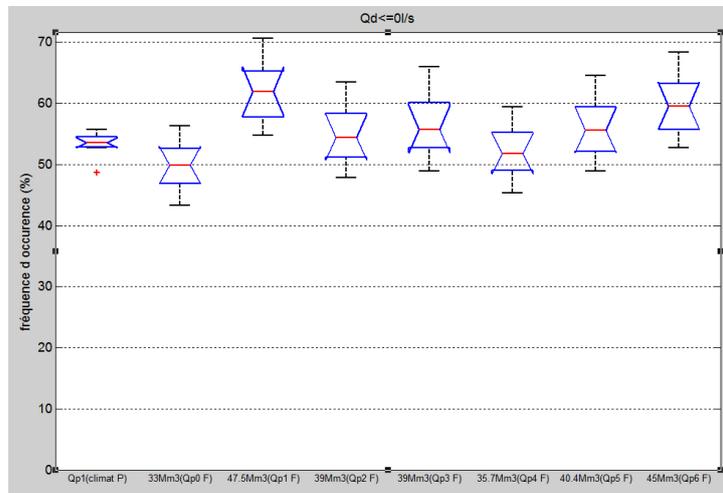


Illustration 155 : Dispersion des fréquences d’occurrences pour lesquelles le débit de débordement à la vasque est nul ($Q_d = 0$ l/s) calculées à l’aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F: climat Futur; P: climat Présent). Les fréquences d’occurrences sont calculées en considérant le nombre total d’occurrences des différents scénarios. Le col resserré des boîtes à moustache signifie que les médianes sont représentatives au niveau de signification $\alpha = 5\%$ (première colonne : scénario Qp1)

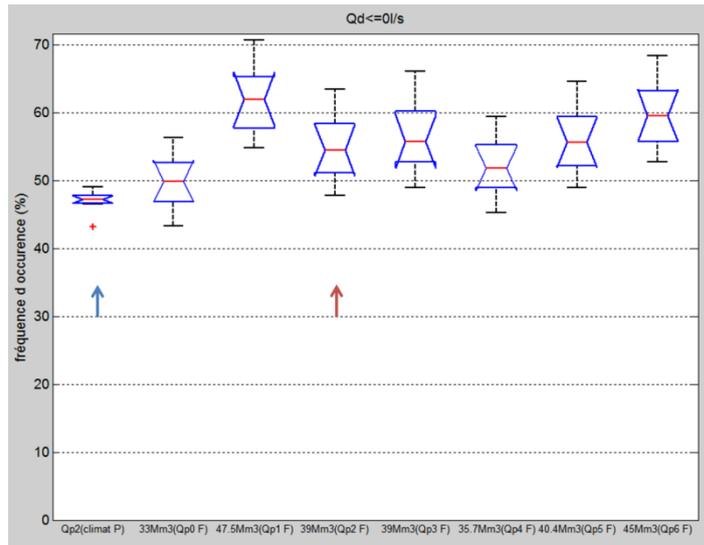


Illustration 156 : Dispersion des fréquences d’occurrences pour lesquelles le débit de débordement à la vasque est nul ($Q_d = 0$ l/s) calculées à l’aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : climat Présent). Les fréquences d’occurrences sont calculées en considérant le nombre total d’occurrence des différents scénarios. Le col resserré des boîtes à moustache signifie que les médianes sont représentatives au niveau de signification $\alpha = 5\%$ (première colonne : scénario Qp2)

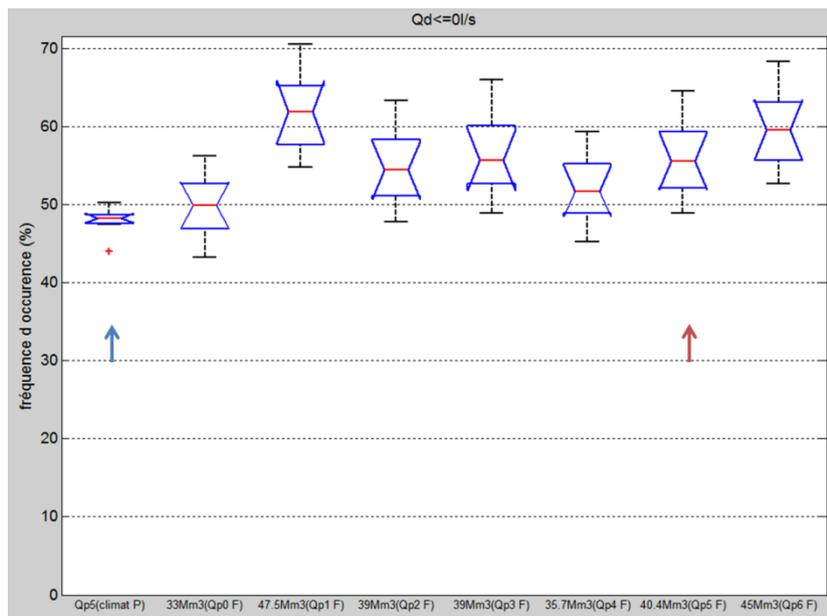


Illustration 157 : Dispersion des fréquences d’occurrences pour lesquelles le débit de débordement à la vasque est nul ($Q_d = 0$ l/s) calculées à l’aide des 9 modèles hydroclimatiques en considérant les différents scénarios de pompage (F : climat Futur ; P : climat Présent). Les fréquences d’occurrences sont calculées en considérant le nombre total d’occurrences des différents scénarios. Le col resserré des boîtes à moustache signifie que les médianes sont représentatives au niveau de signification $\alpha = 5\%$ (première colonne : scénario Qp5)

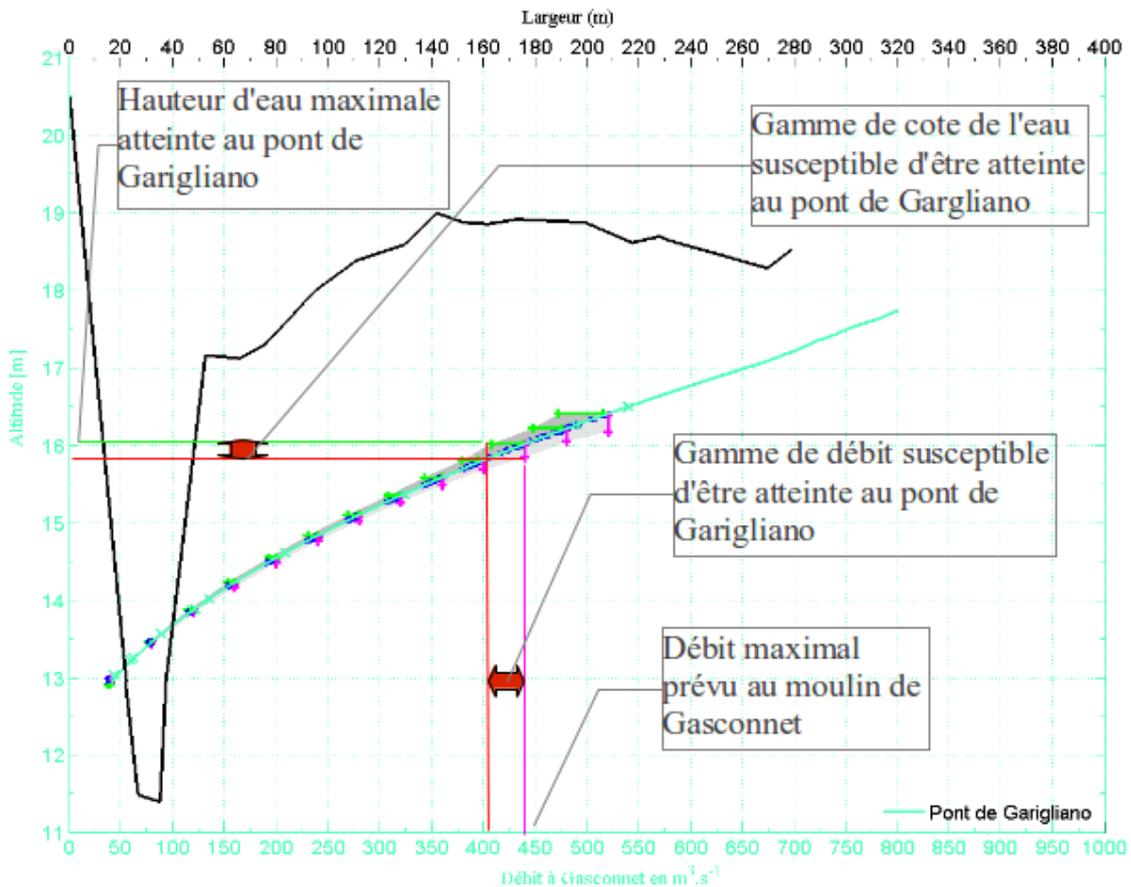
Annexe 2

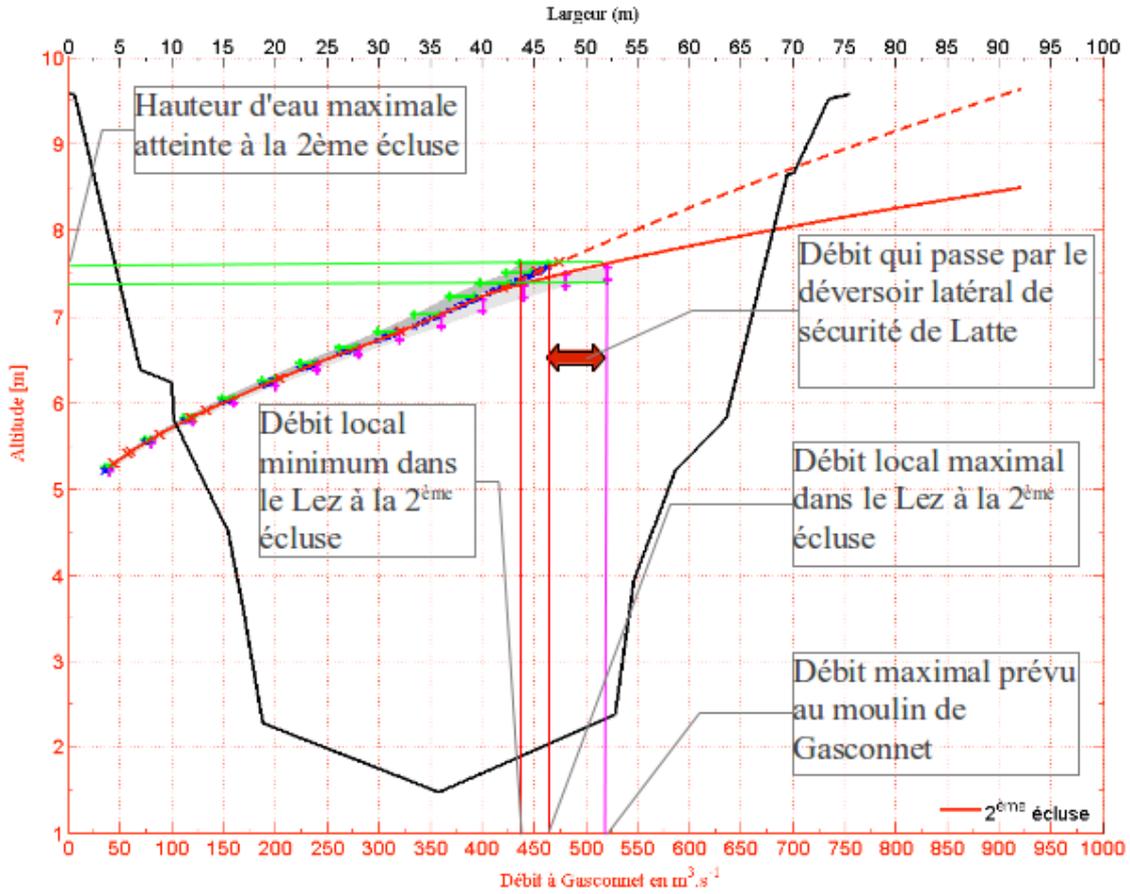
Abaques hydrauliques du Lez

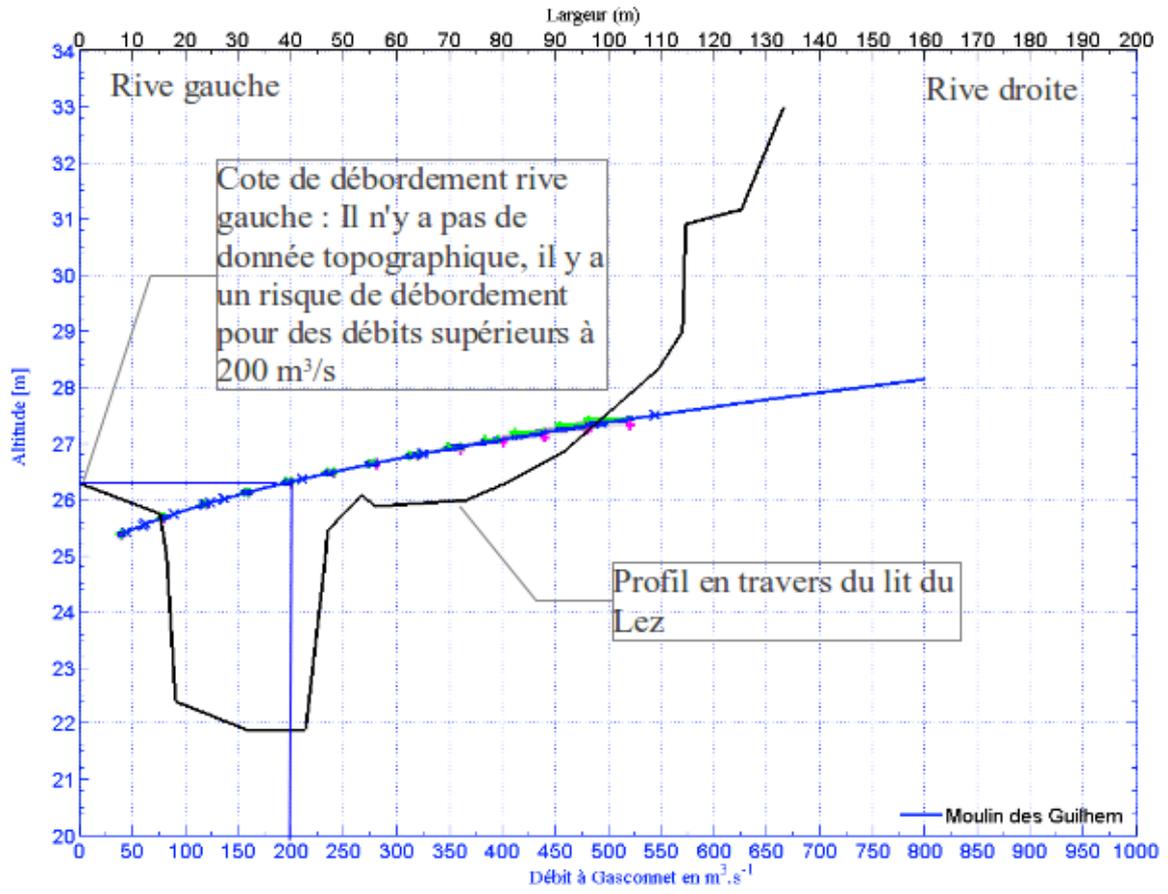
Ces abaques ont été construites grâce à une modélisation par ordinateur du Lez. Il ne s'agit pas d'observations terrains des hauteurs d'eau ni de mesures des débits. Ces abaques devront être ajustées et validées à partir d'observations du Lez en crue pour la gamme de débit étudié.

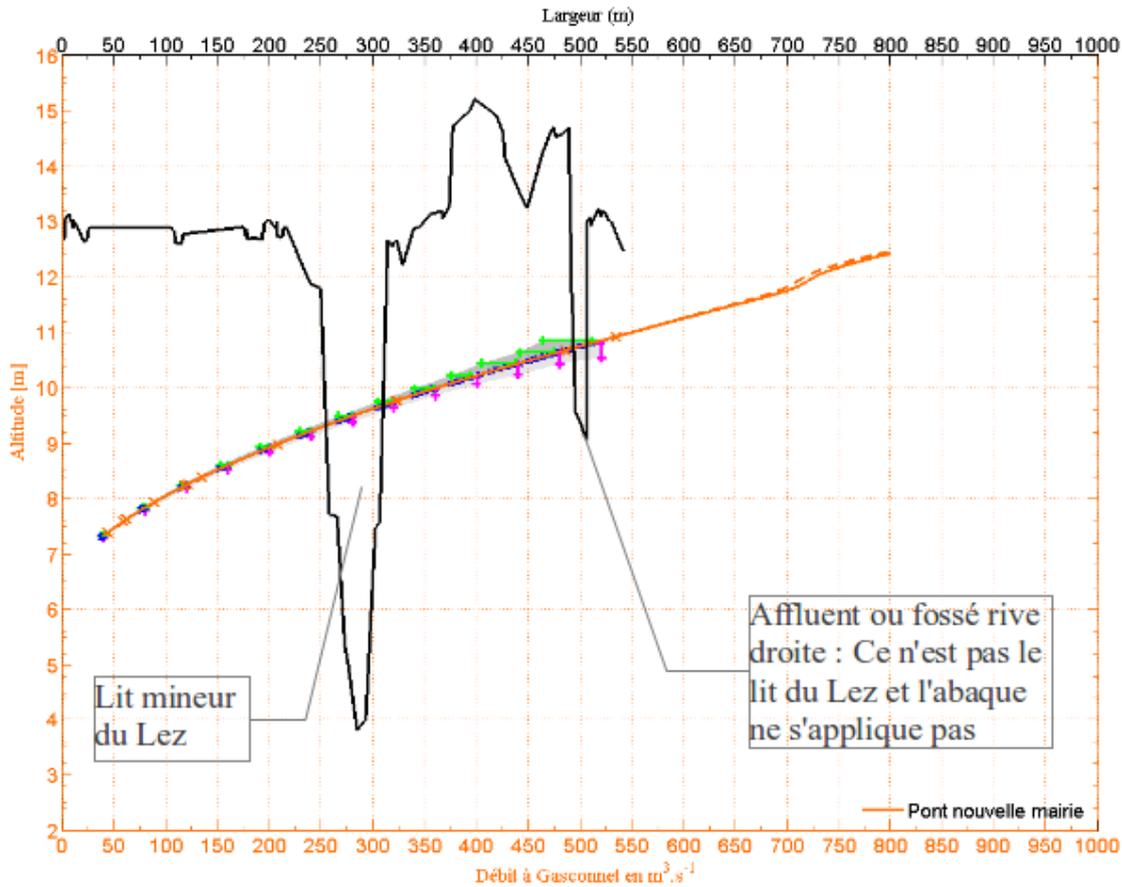
Exemples de lecture des abaques

Le lieu de la section est indiqué en bas à droite du graphique. En ordonnée, vous lisez la cote de l'eau relative au niveau de la mer. En abscisse, il s'agit du débit du Lez au niveau du seuil du moulin de Gasconnet (amont). La courbe colorée permet de faire le lien entre le débit à l'amont du Lez et la cote de l'eau atteinte localement. La courbe noire représente le profil en travers de la section considérée.









Quelques questions/réponses

L'abaque du pont de l'évêque est étrange. Que faut-il lire, que peut-on en conclure ?

Le pont de l'évêque est un seuil mobile qui s'abaisse en fonction du débit. Son but est de maintenir la cote de l'eau constante à l'amont à 12,5 m NGF. Son mouvement n'est pas régulier et n'est pas identique pour toutes les crues. Cela explique une marge d'erreur importante en terme de niveau d'eau (zone grisée). La courbe verte est issue de simulations dans lesquelles le seuil ne respecte pas son mouvement normale. Néanmoins, la cote de l'eau est maintenu relativement constante et proche de 12.5 m NGF jusqu'à des débits supérieur à 400 m³/s. Au delà, le seuil est abaissé au maximum et ne joue plus aucun rôle.

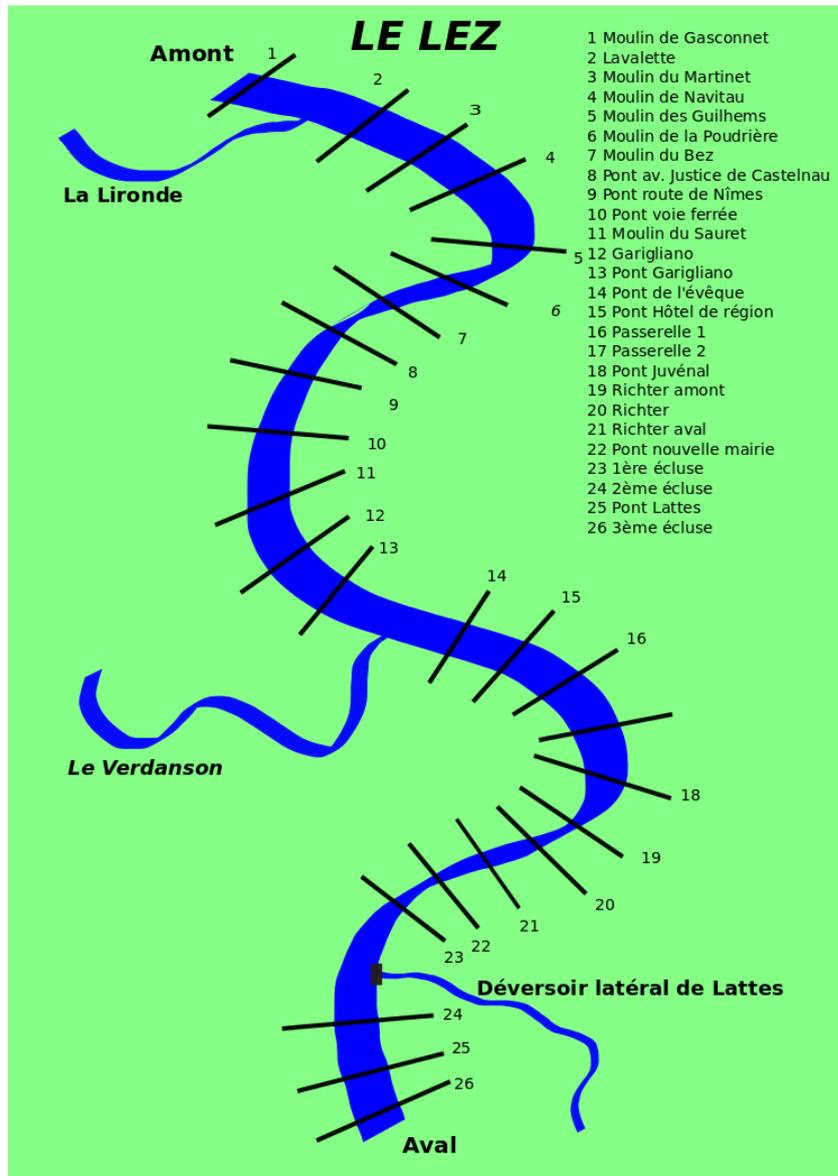
Que craindre en cas de dysfonctionnement du pont de l'évêque ? Les abaqués sont-elles toujours valide ailleurs ?

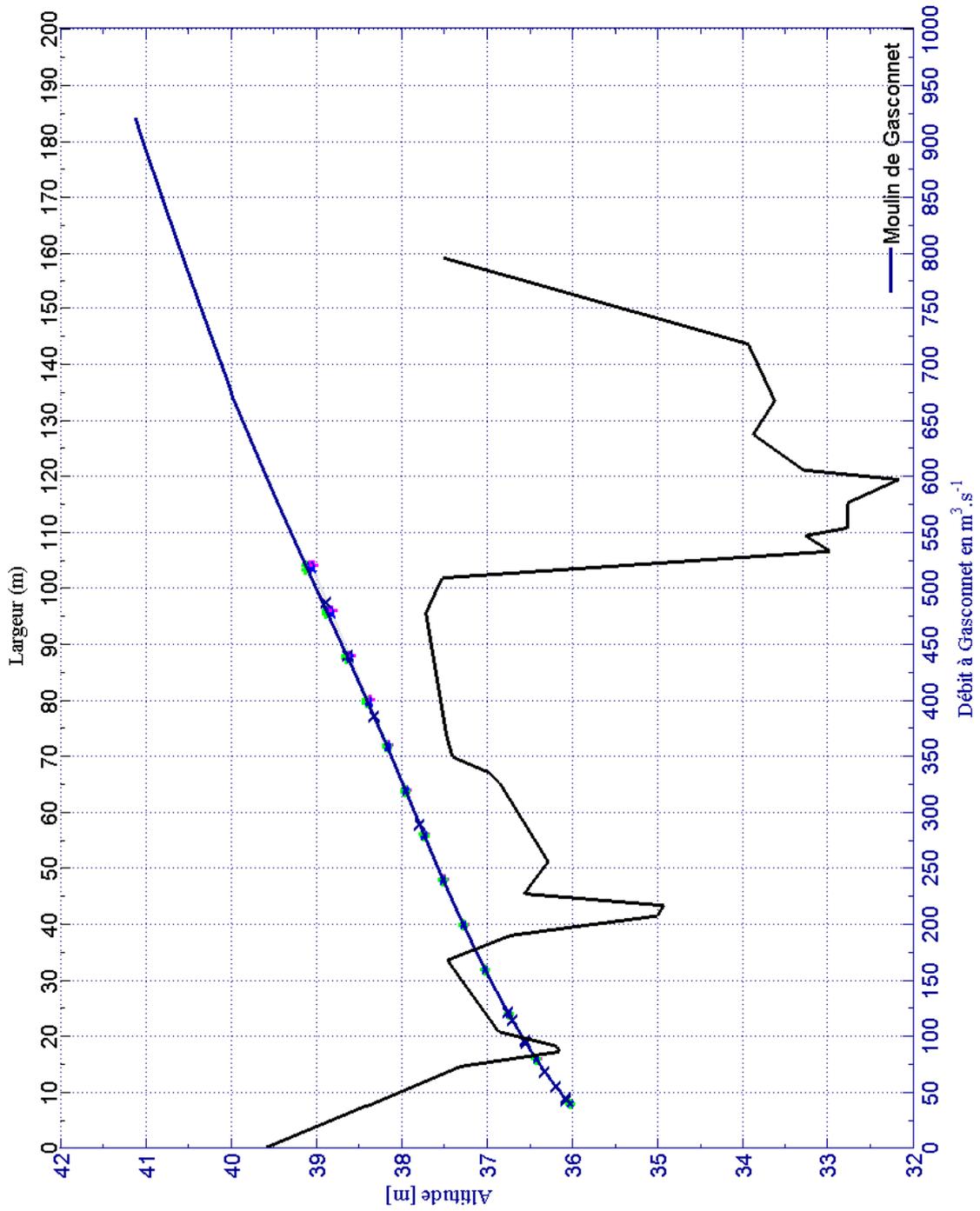
Le pont de l'évêque influe fortement la hauteur d'eau à l'amont. Son dysfonctionnement pourrait se répercuter au moins jusqu'au seuil du moulin du Sauret. À l'aval l'impact serai peu visible.

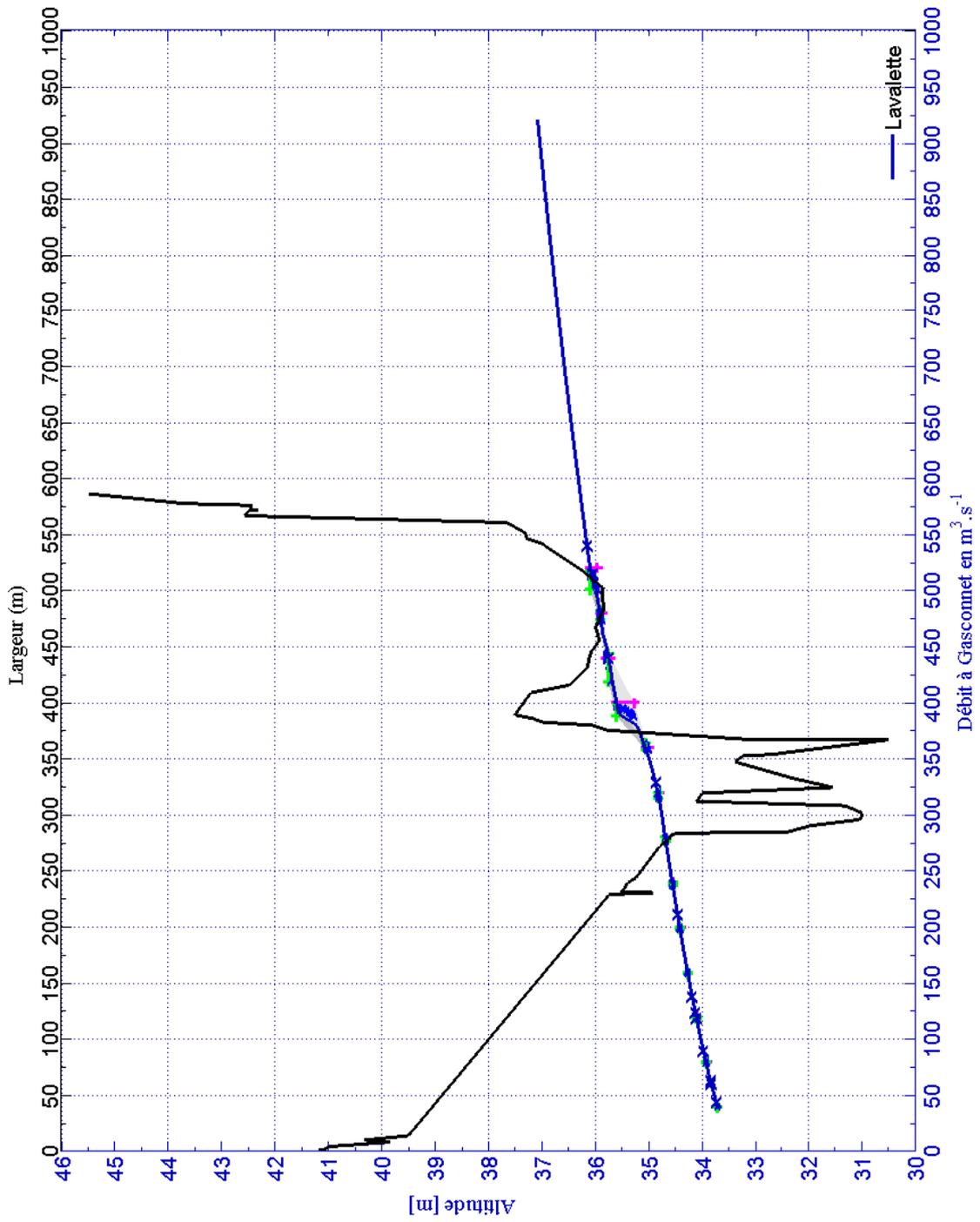
J'ai une information locale en terme de cote en eau, est-ce que je peux en déduire le débit du Lez ?

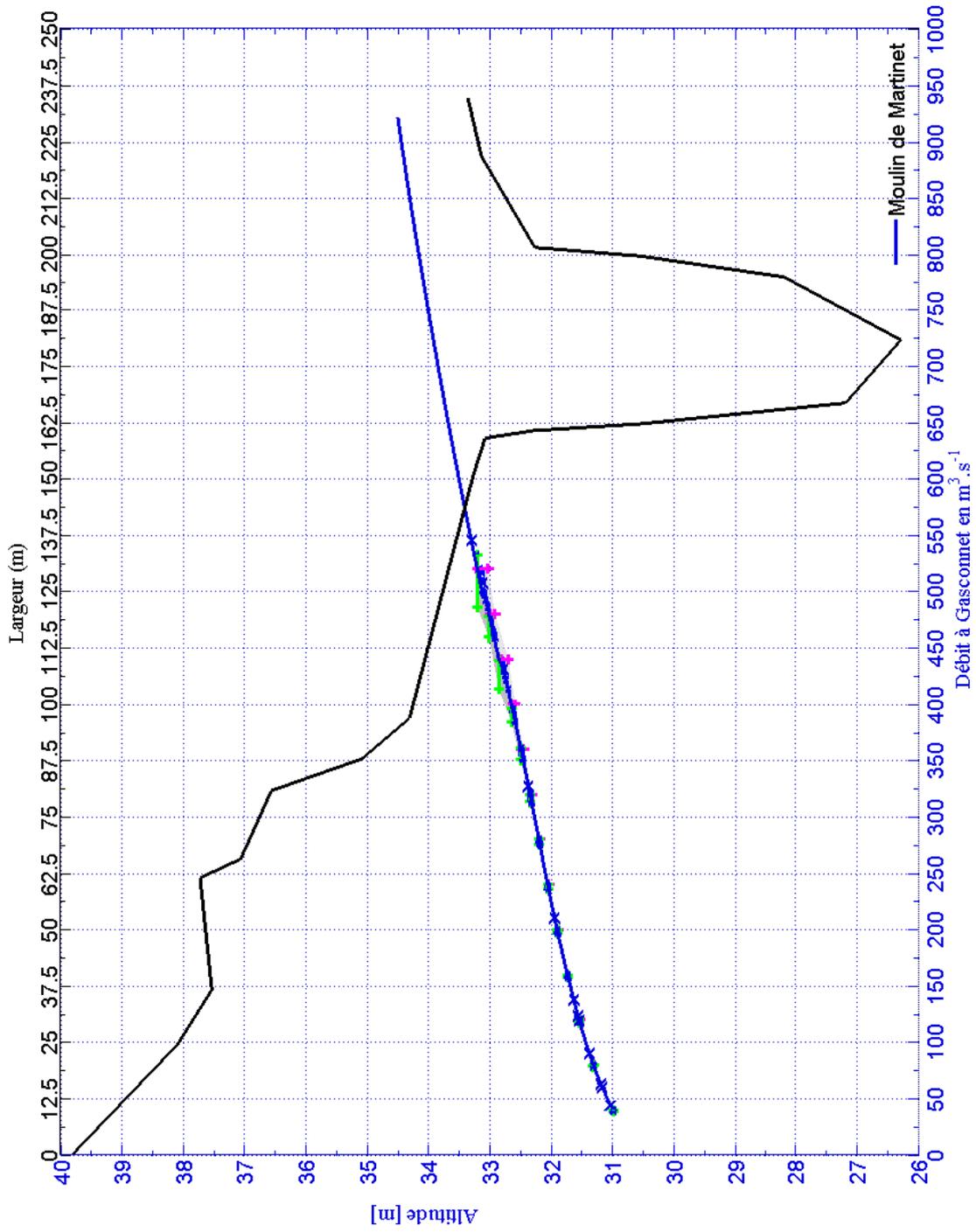
Oui, il faut, à partir de la courbe pleine (qui correspond aux simulations en régime permanent), lire le débit correspondant (en abscisse). Aussi, il est possible de déduire le débit maximal qui a pu être atteint au moulin de Gasconnet.

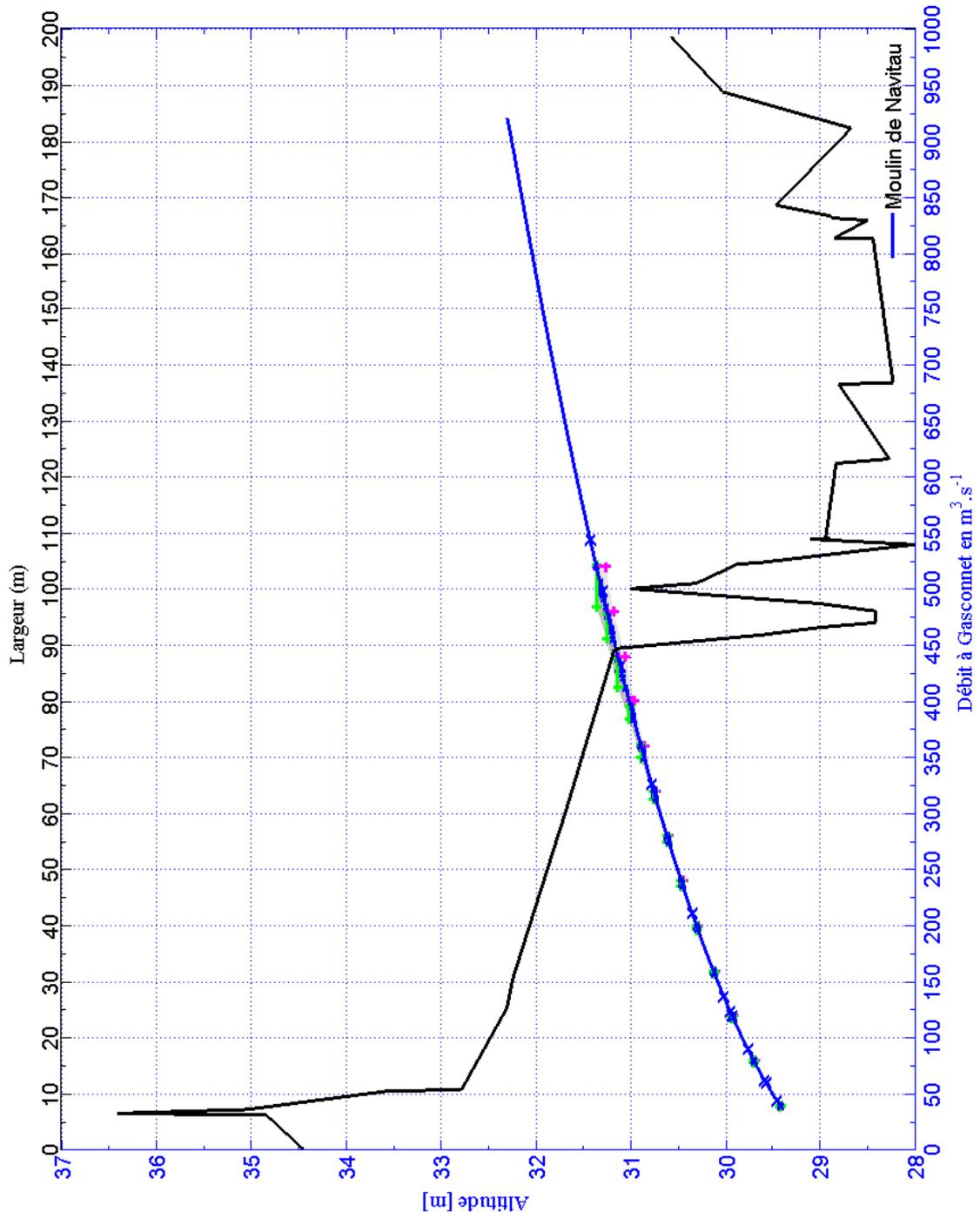
Plan général

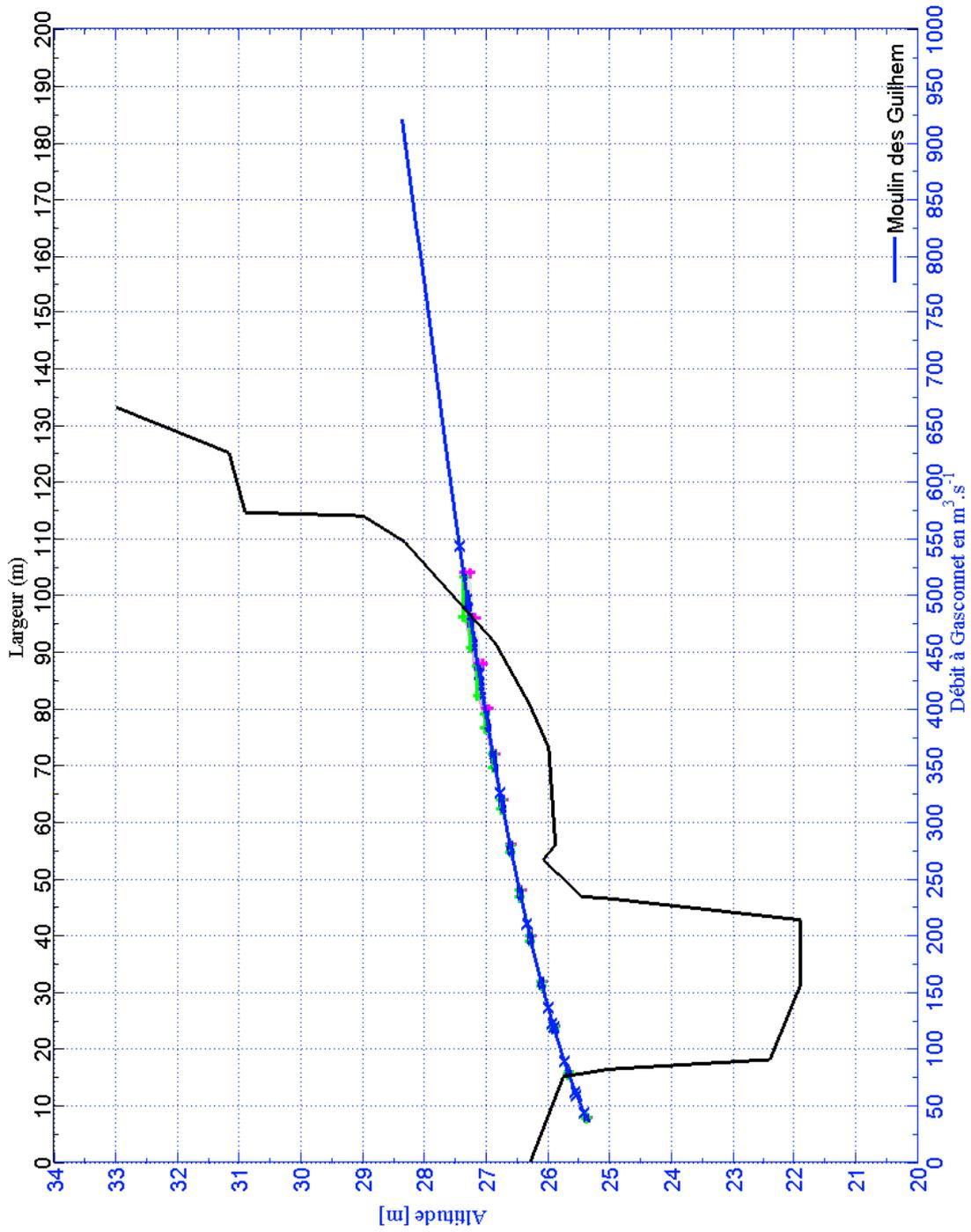


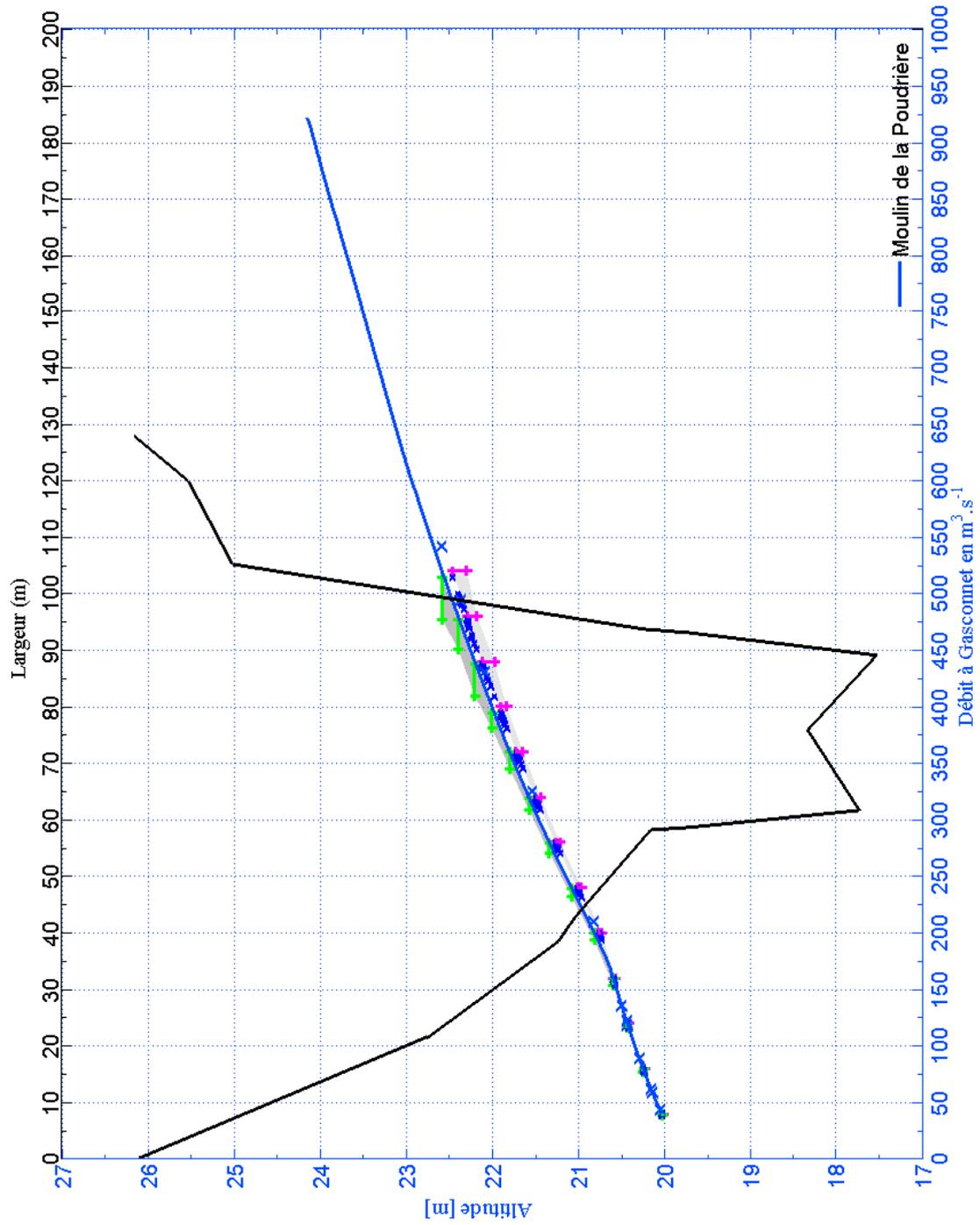


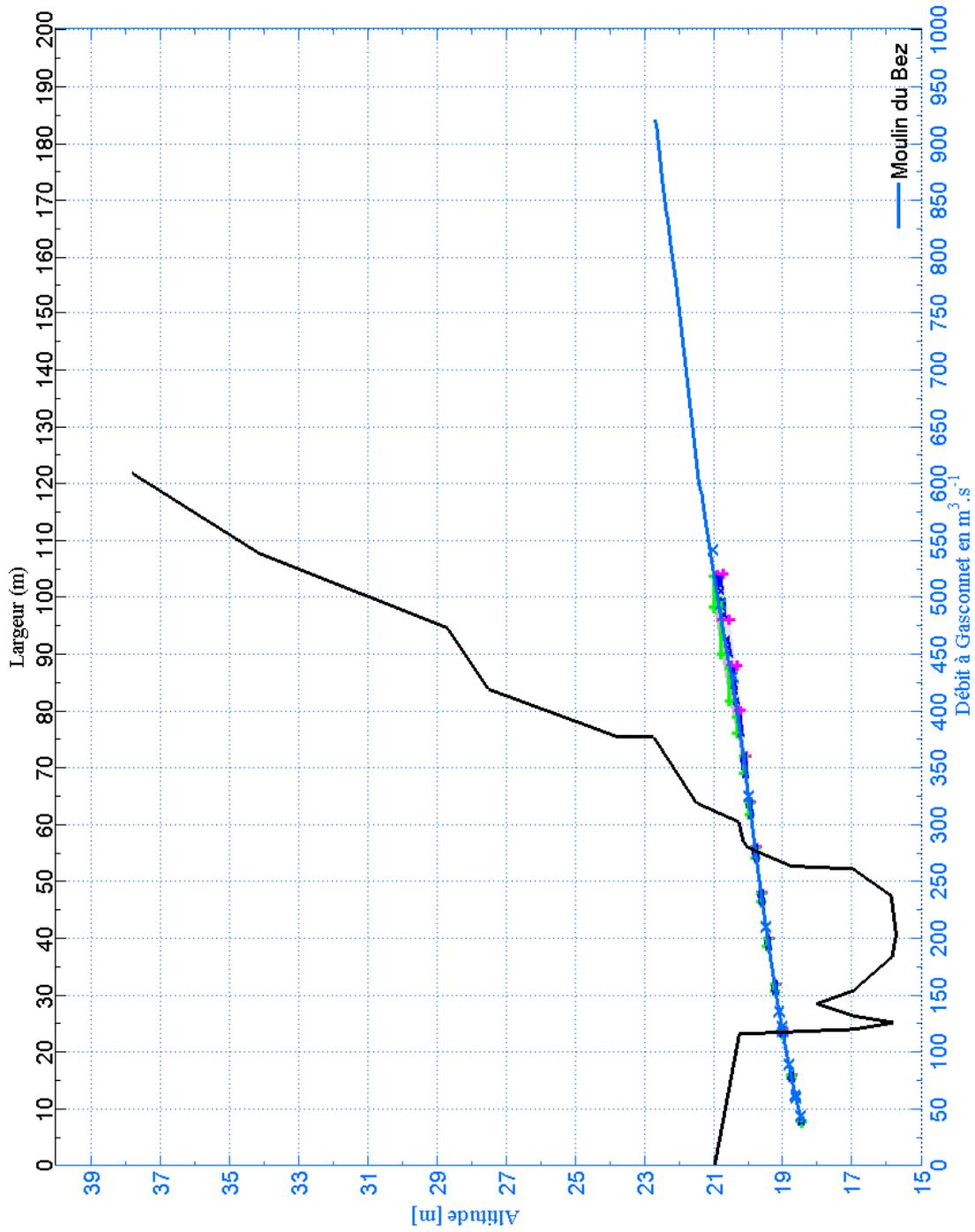


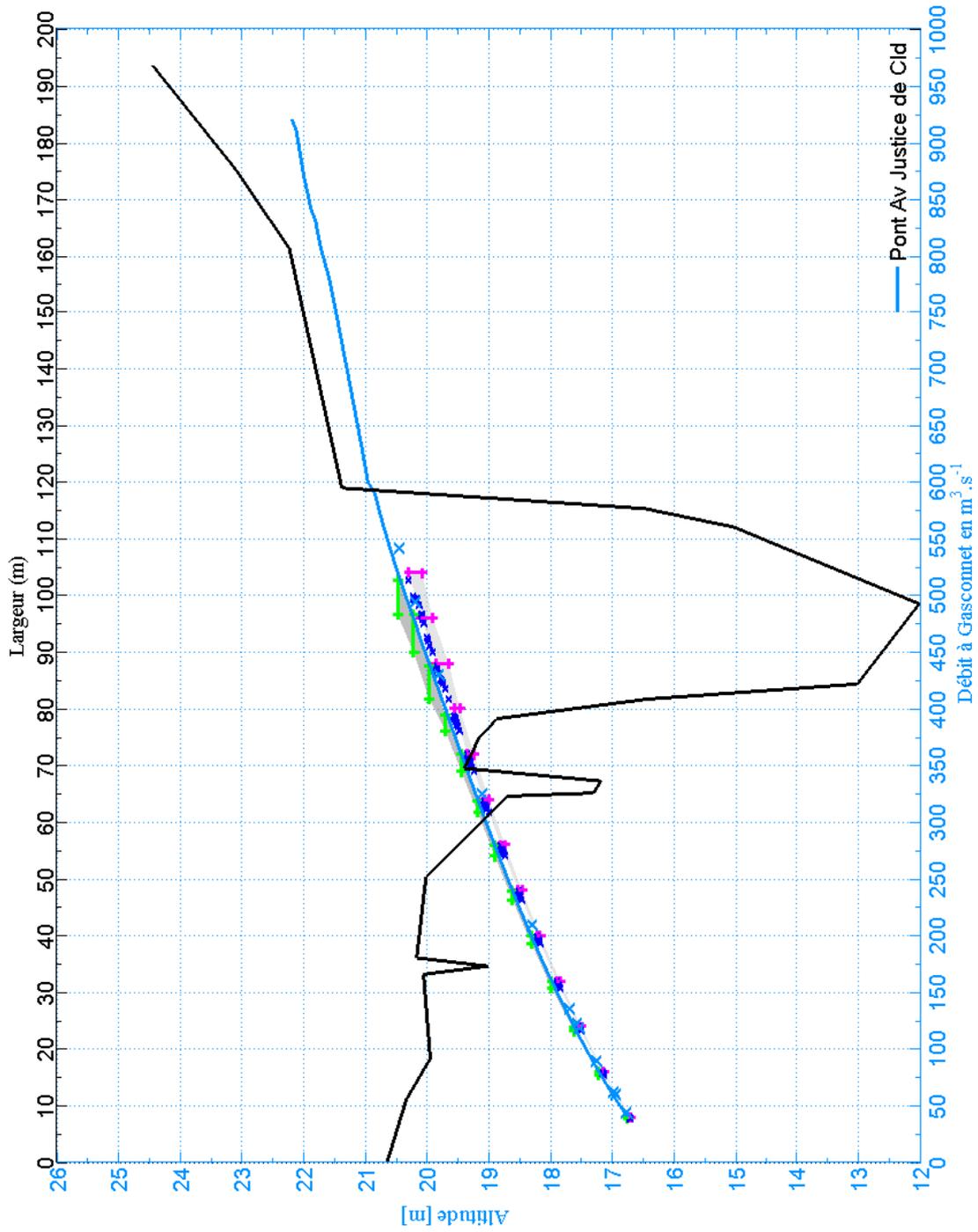


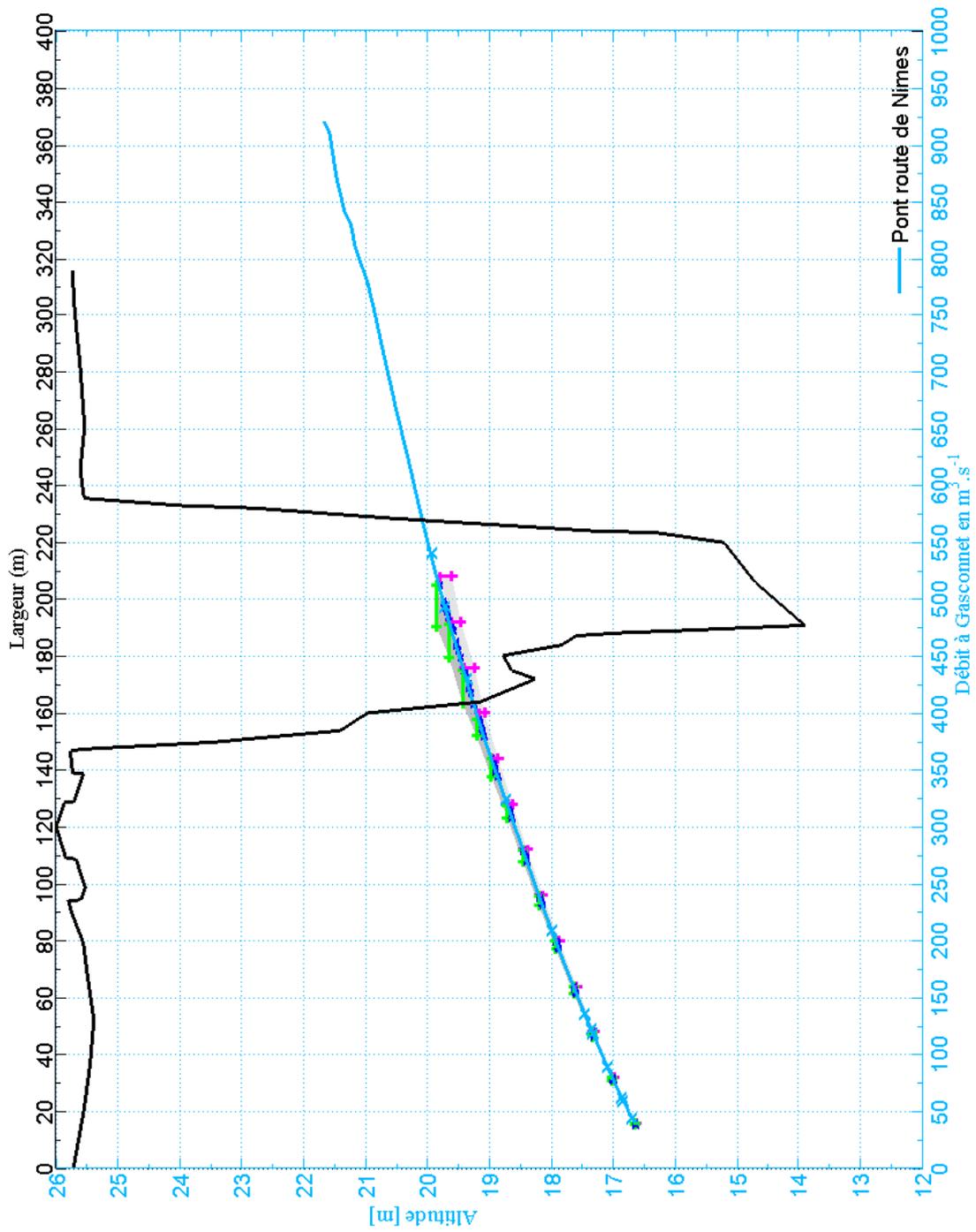


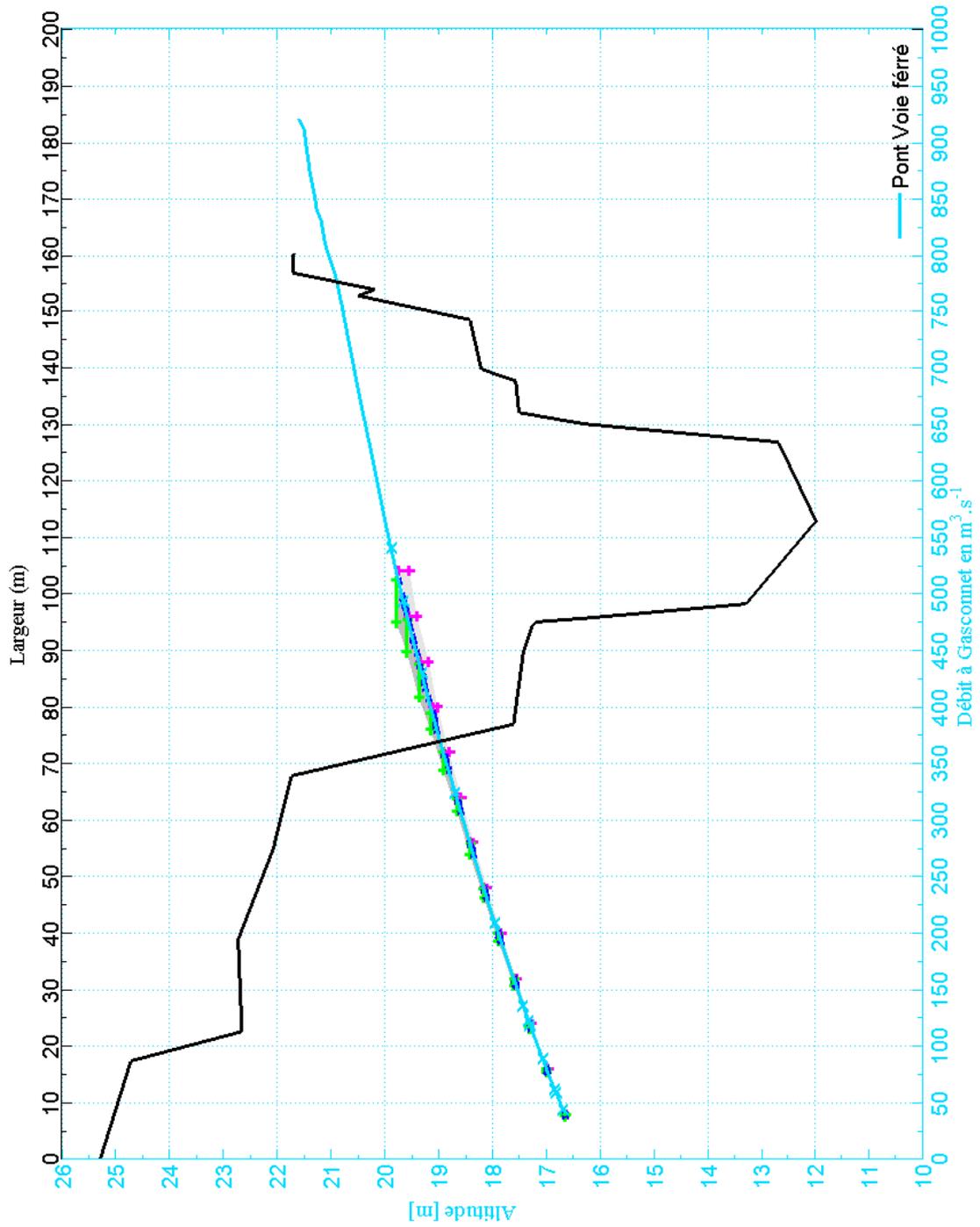


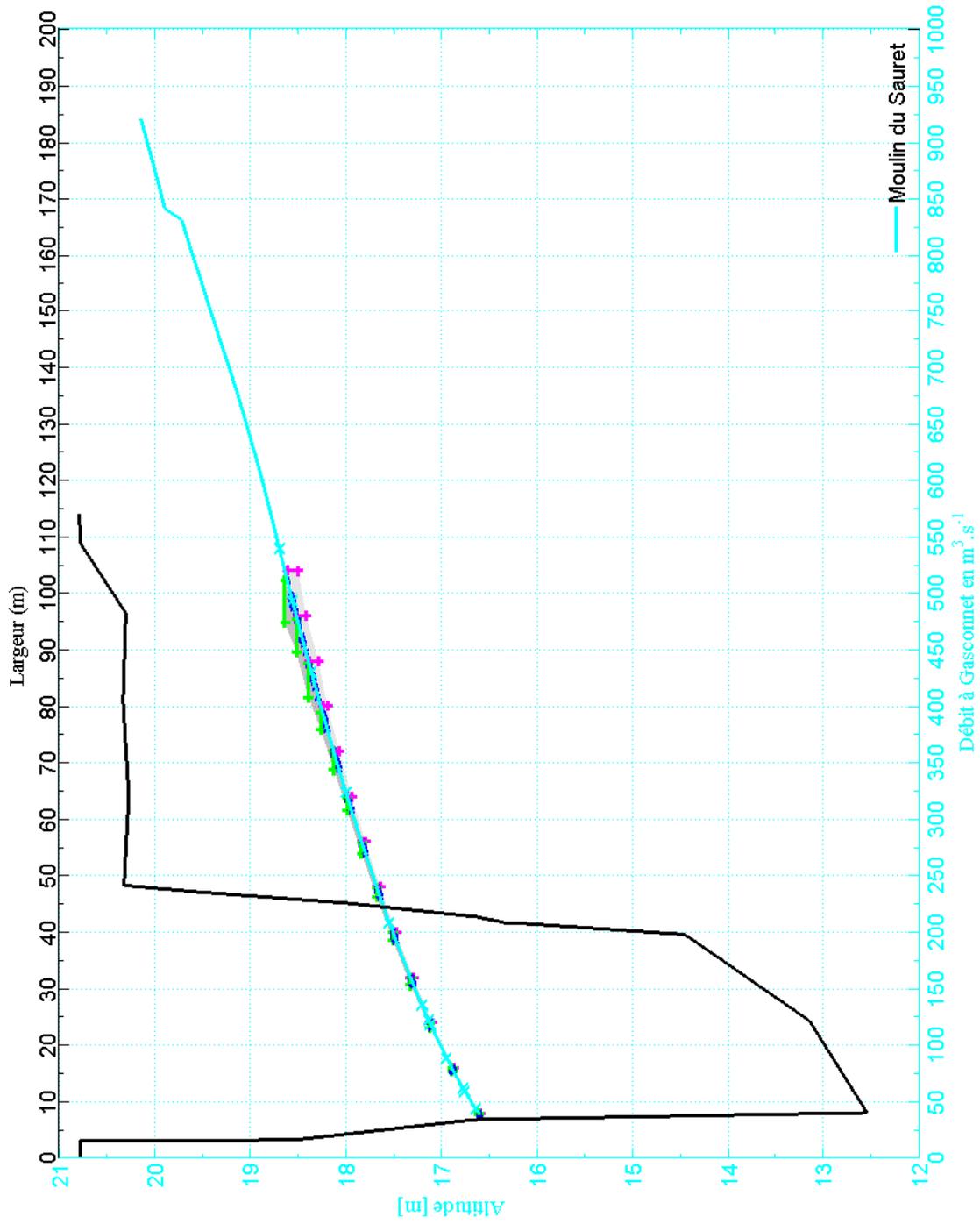


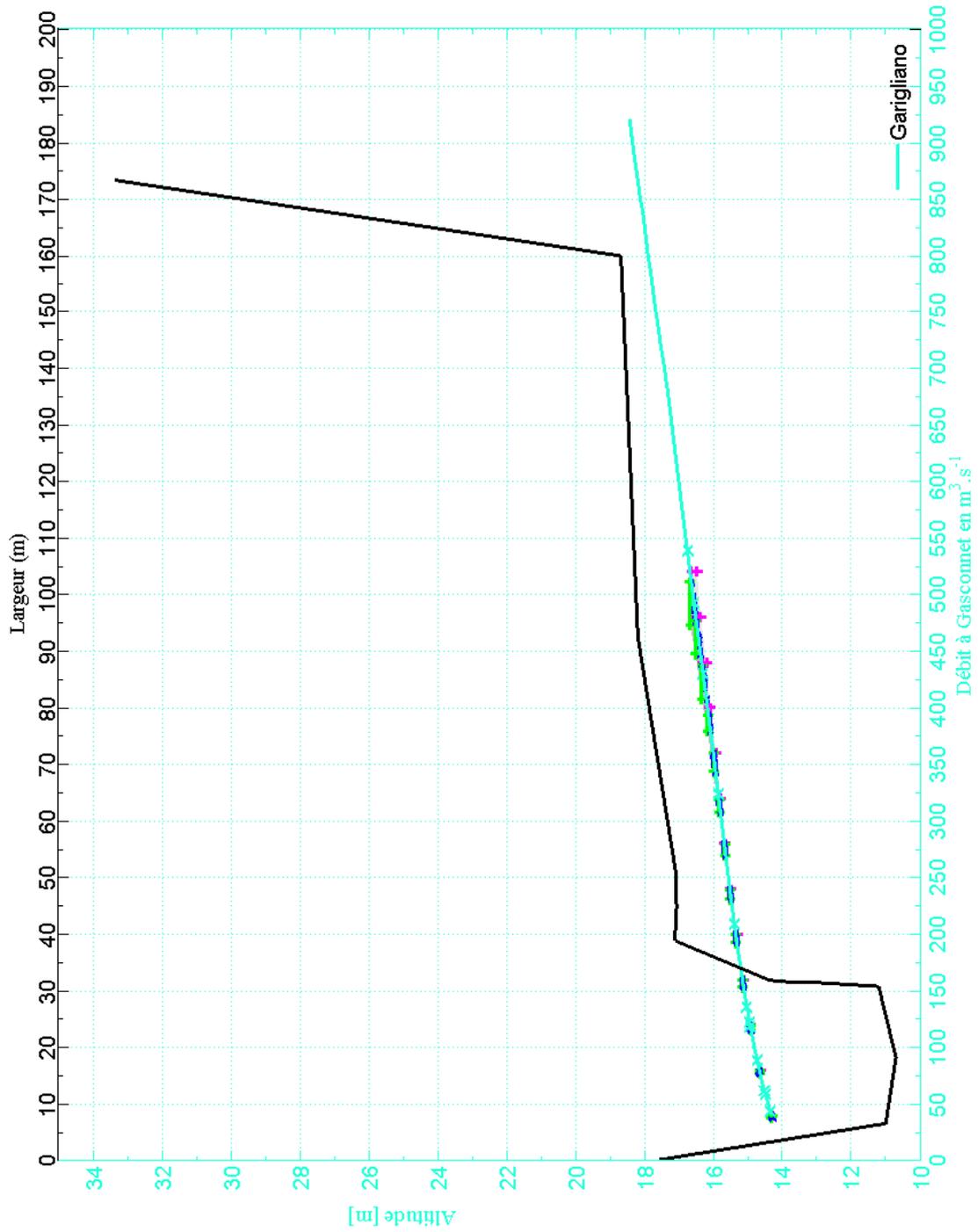


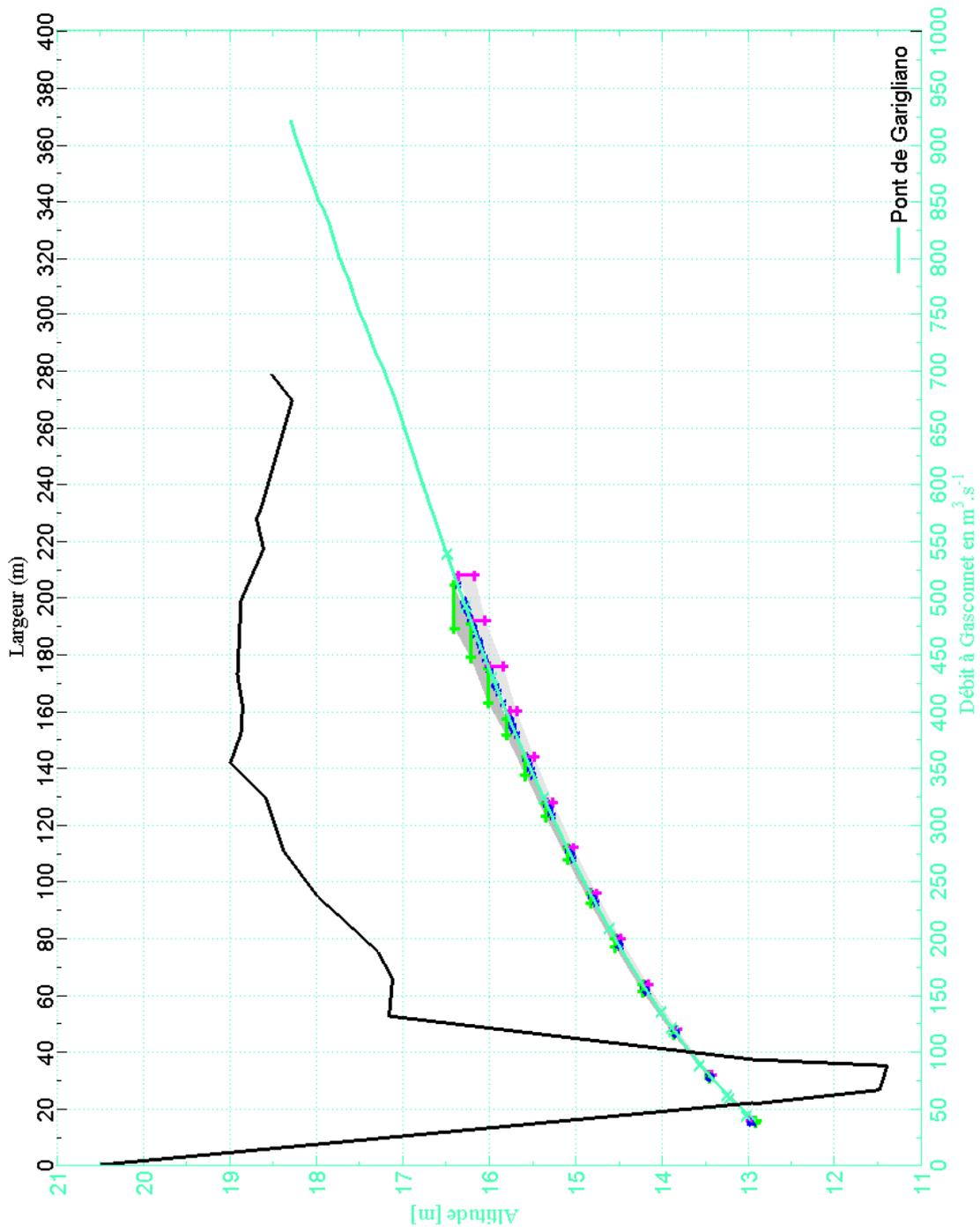


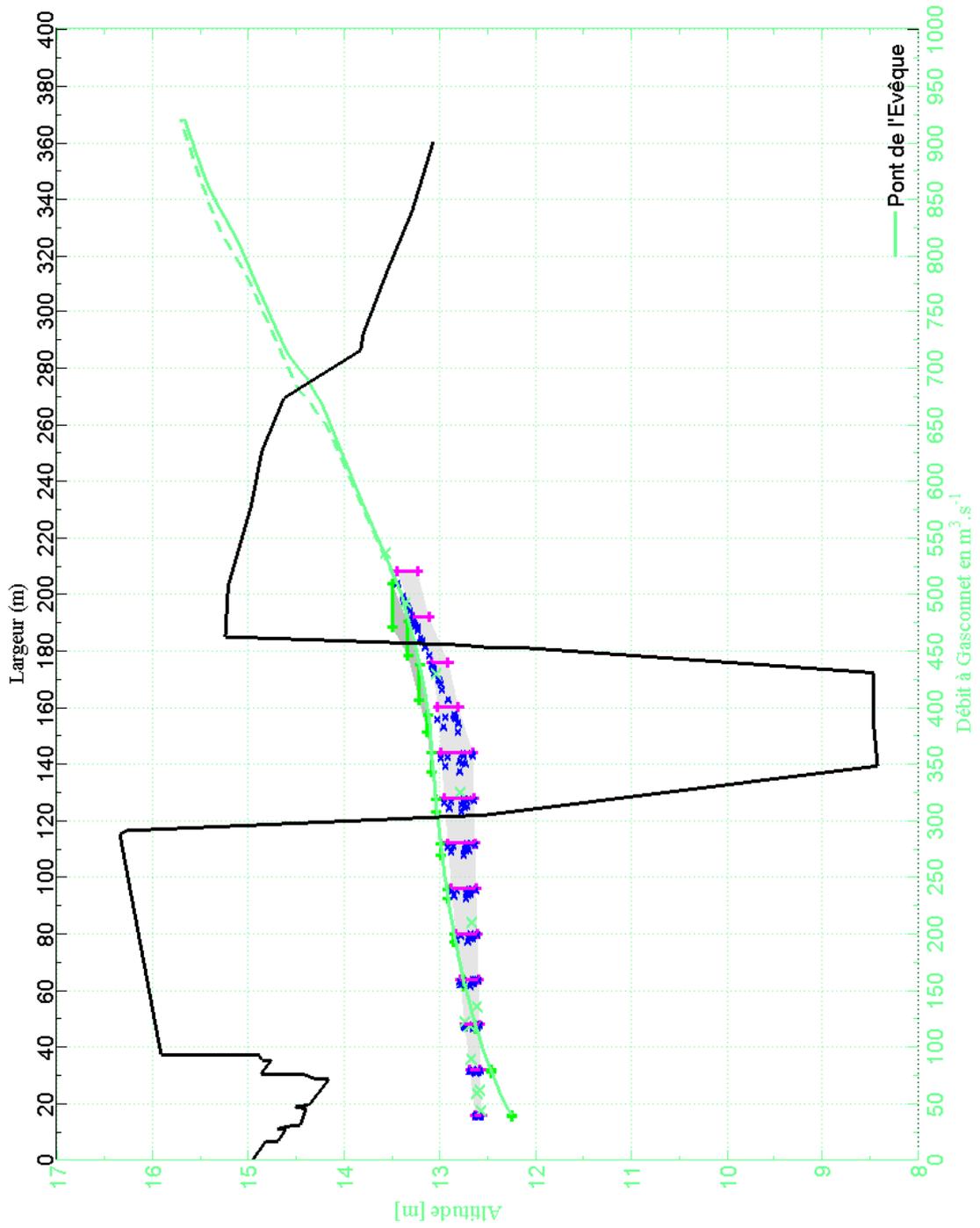


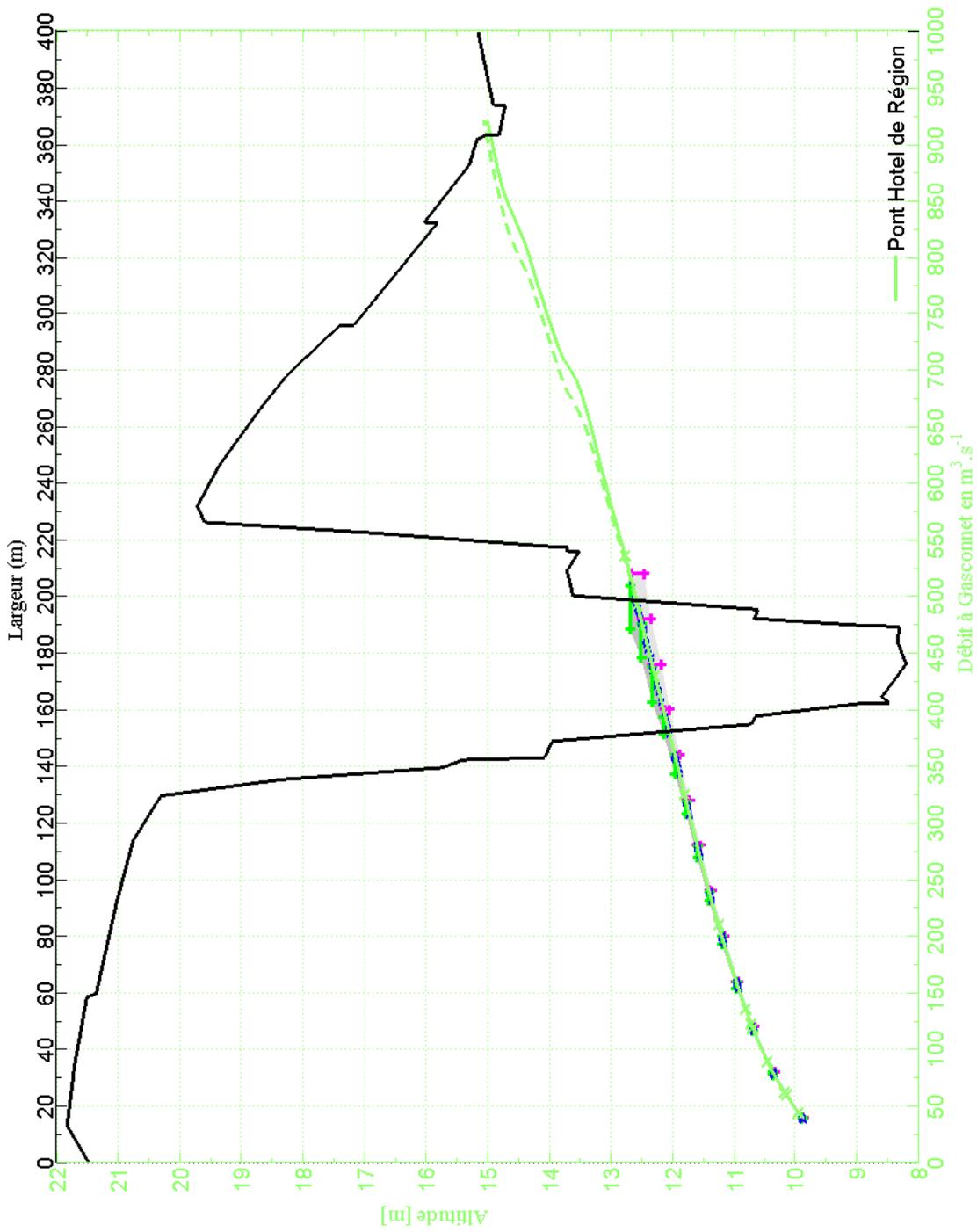


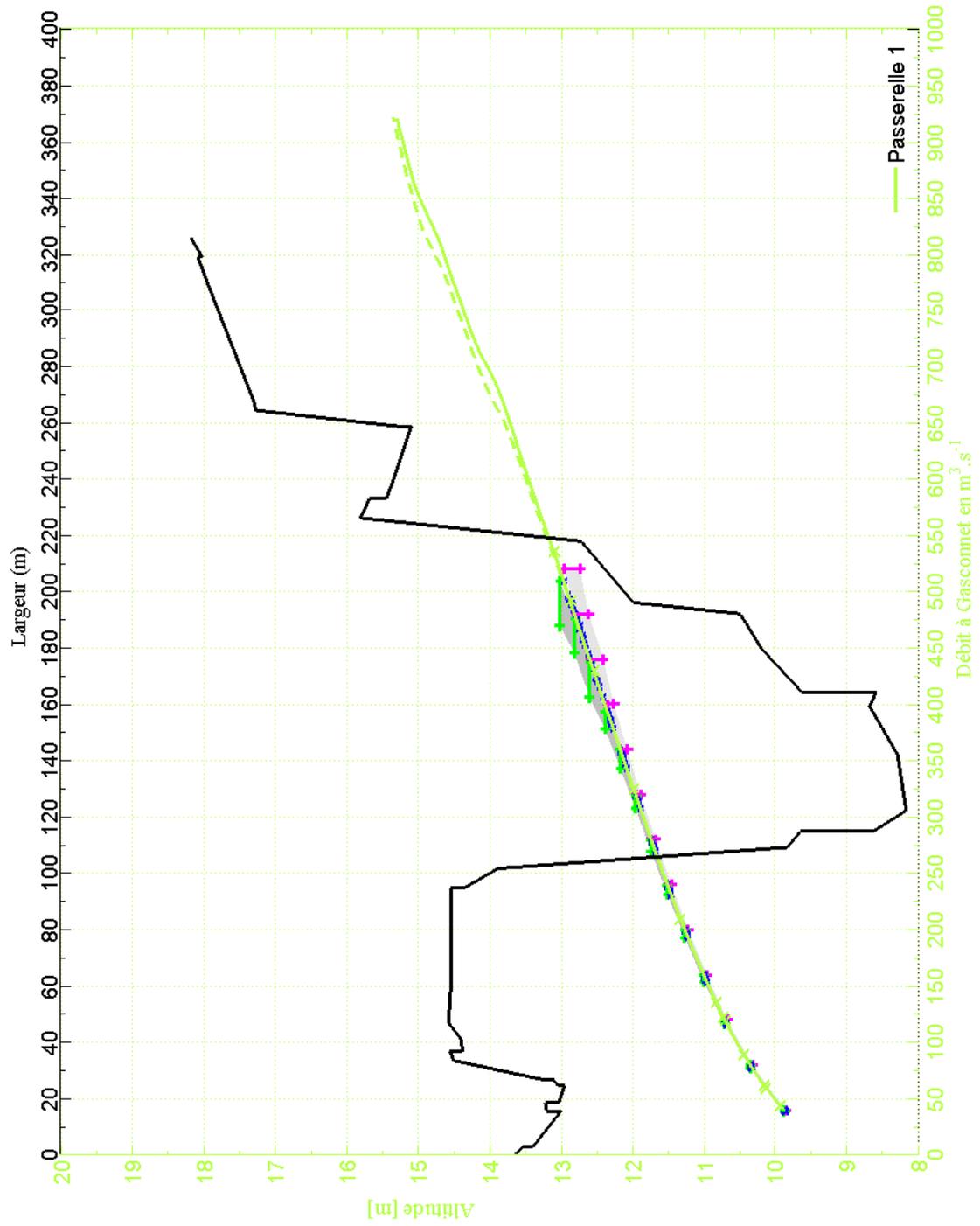


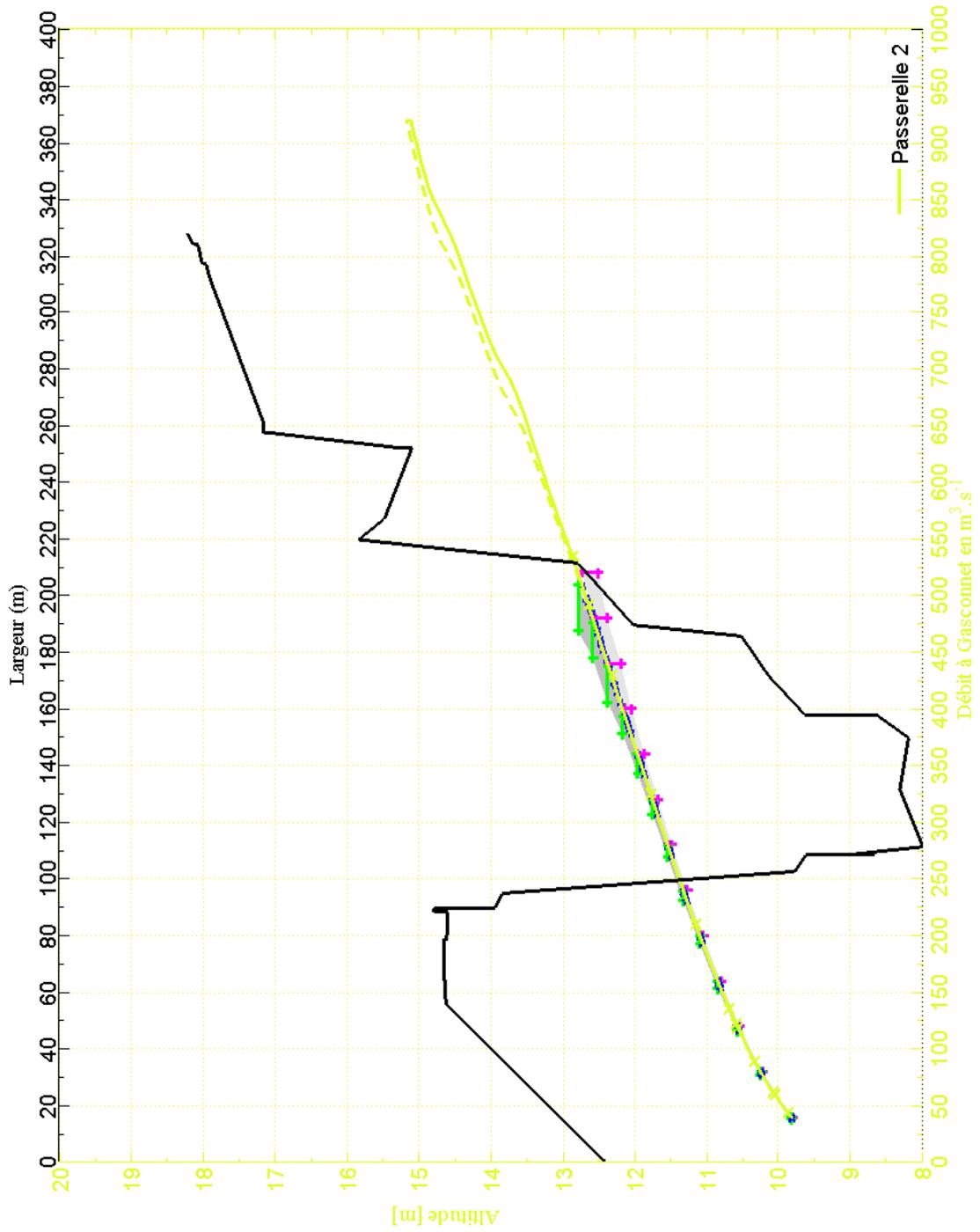


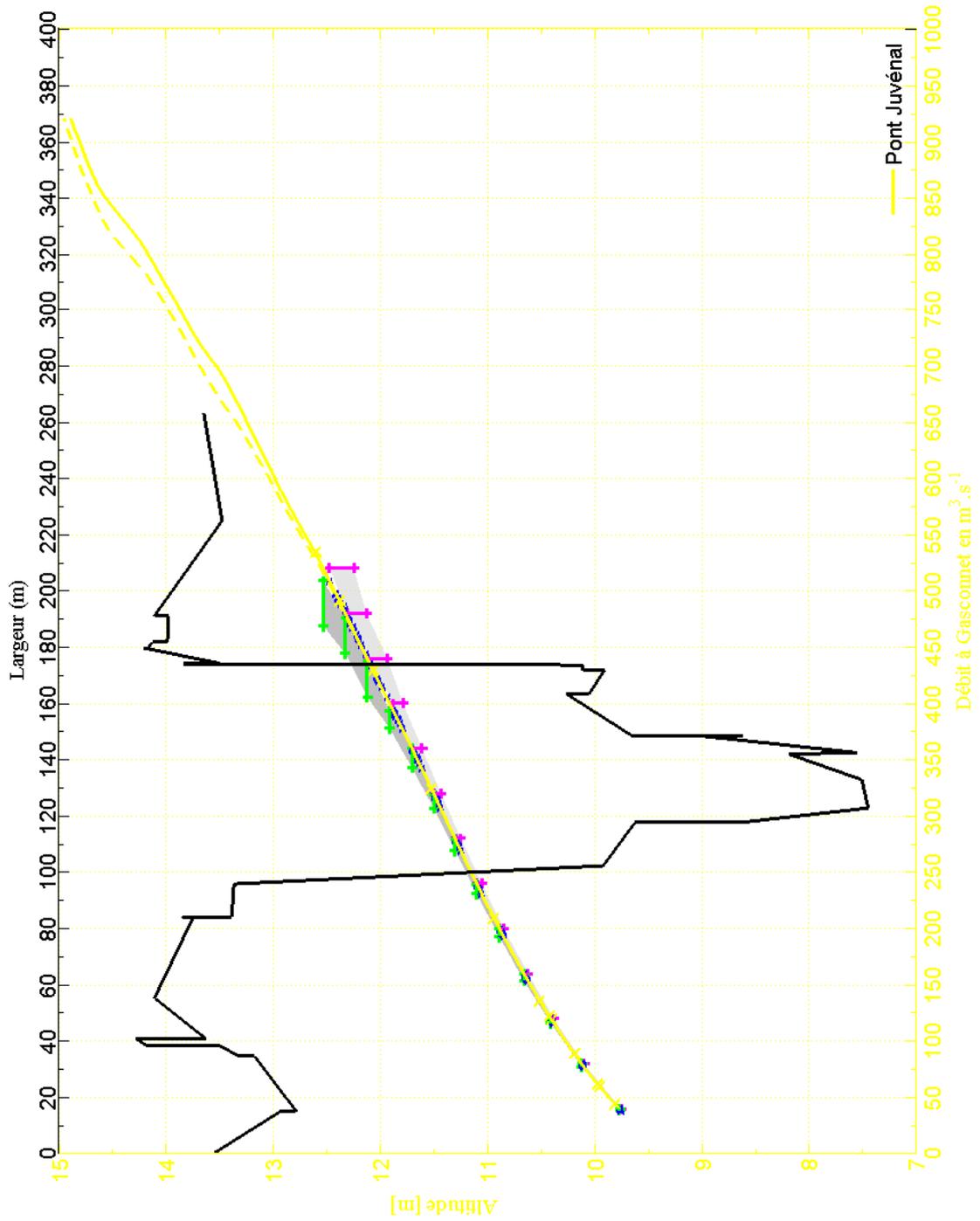


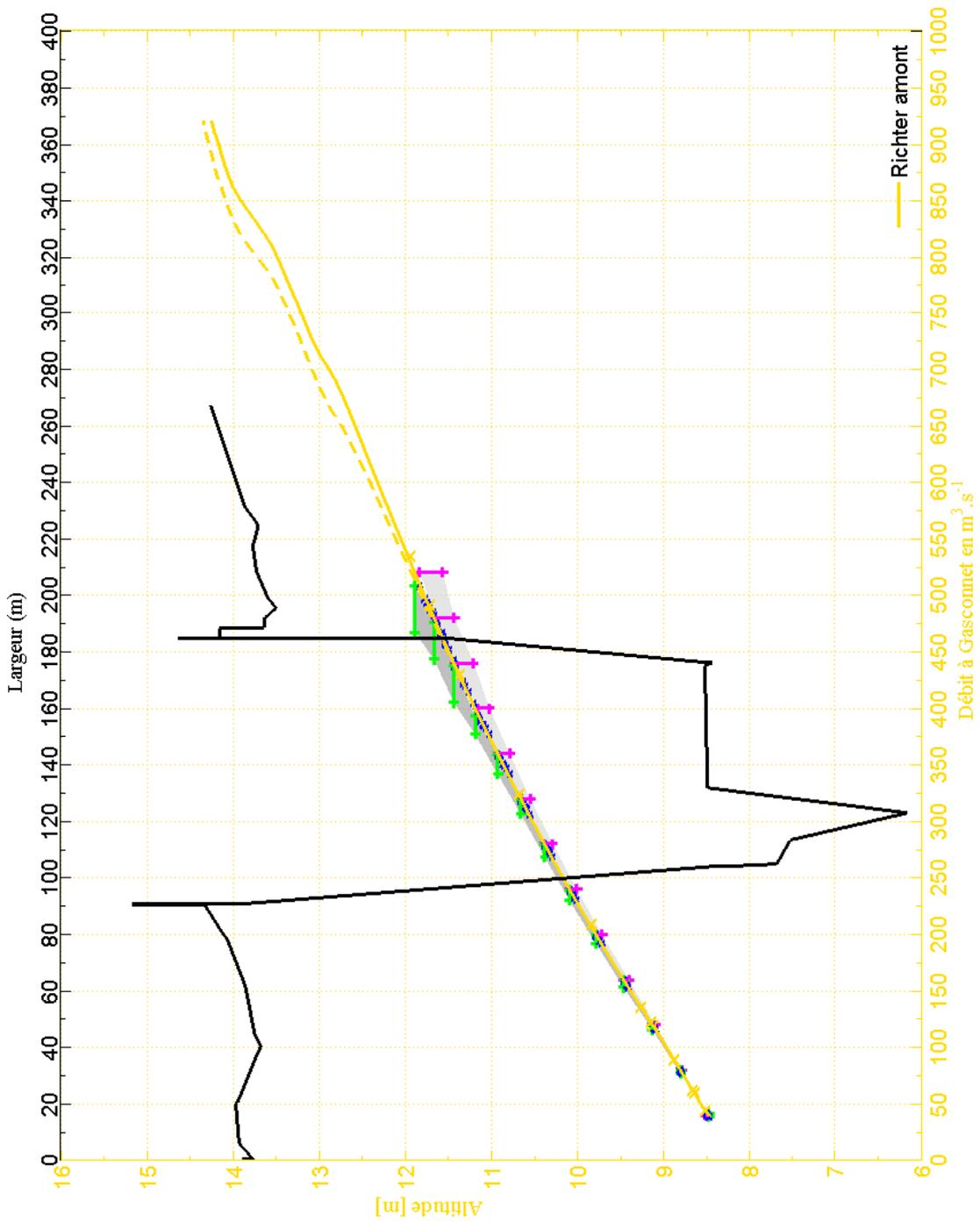


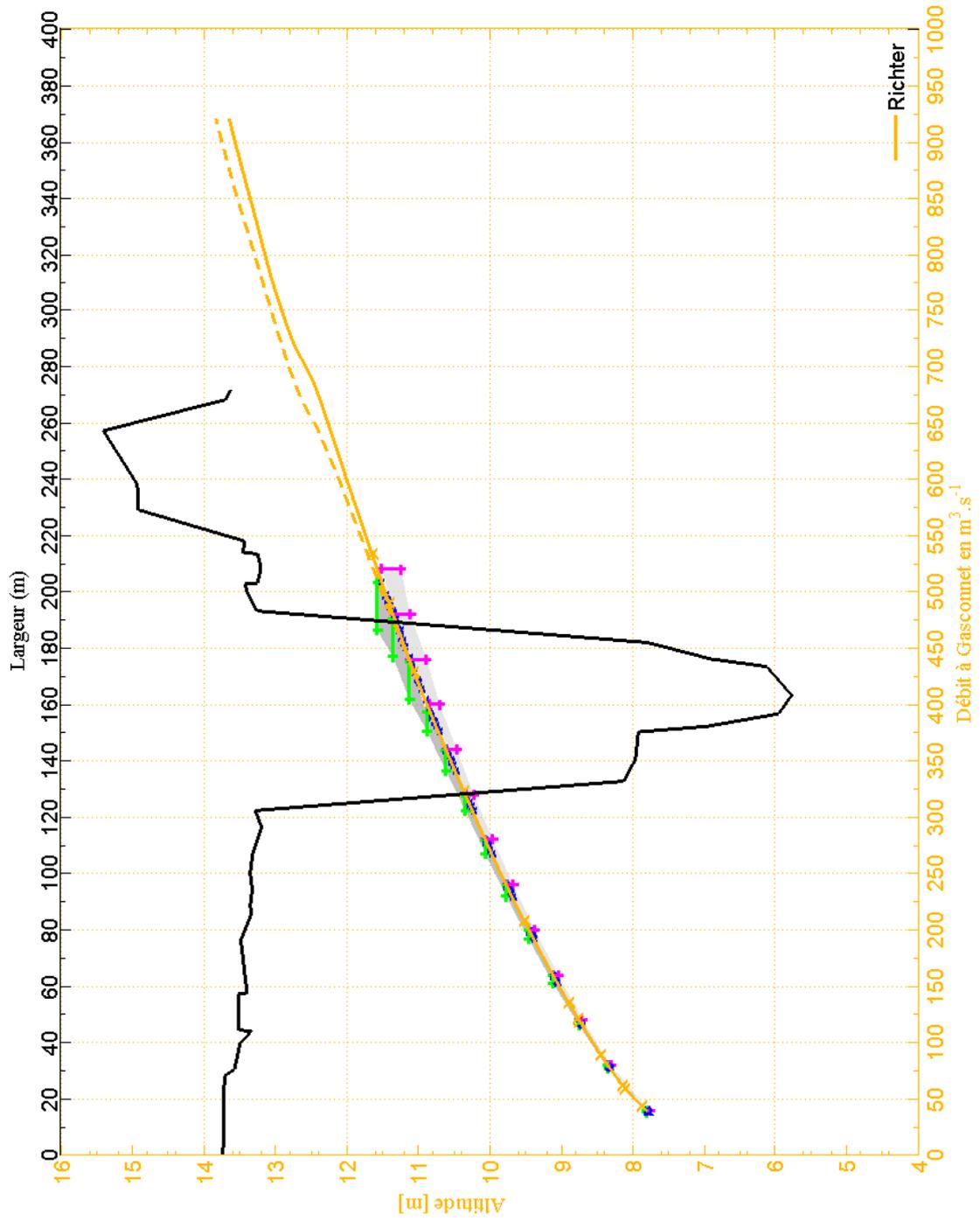


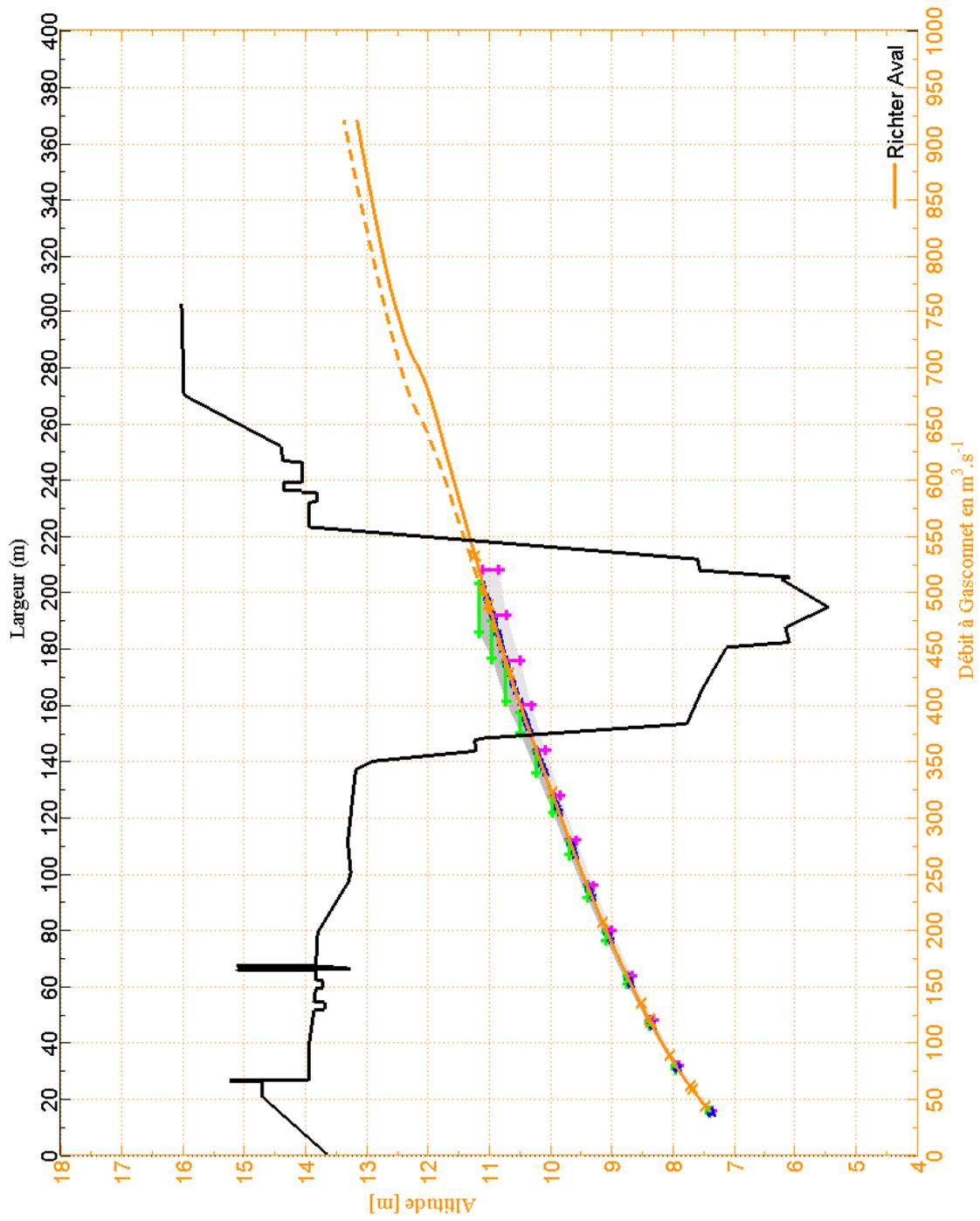


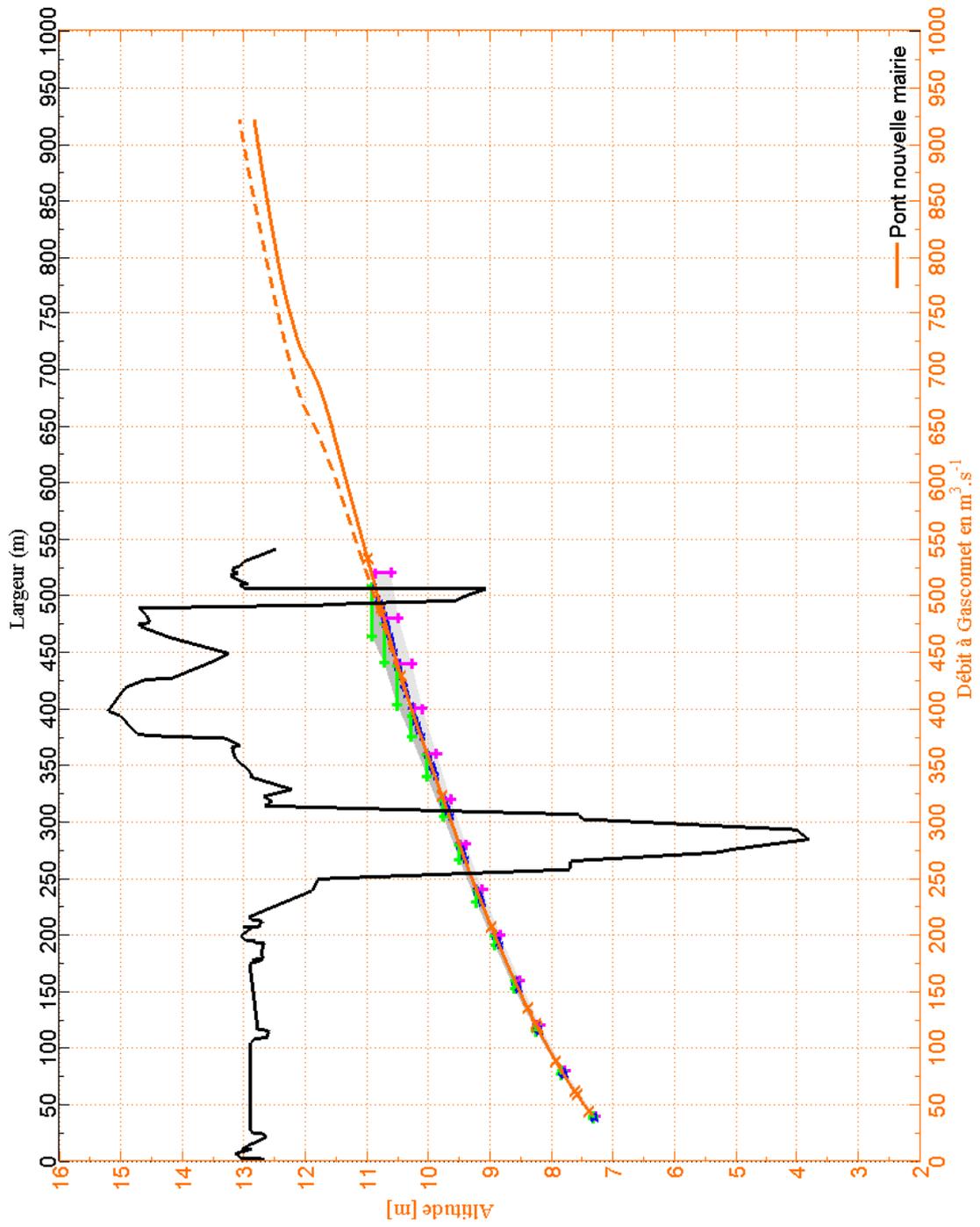


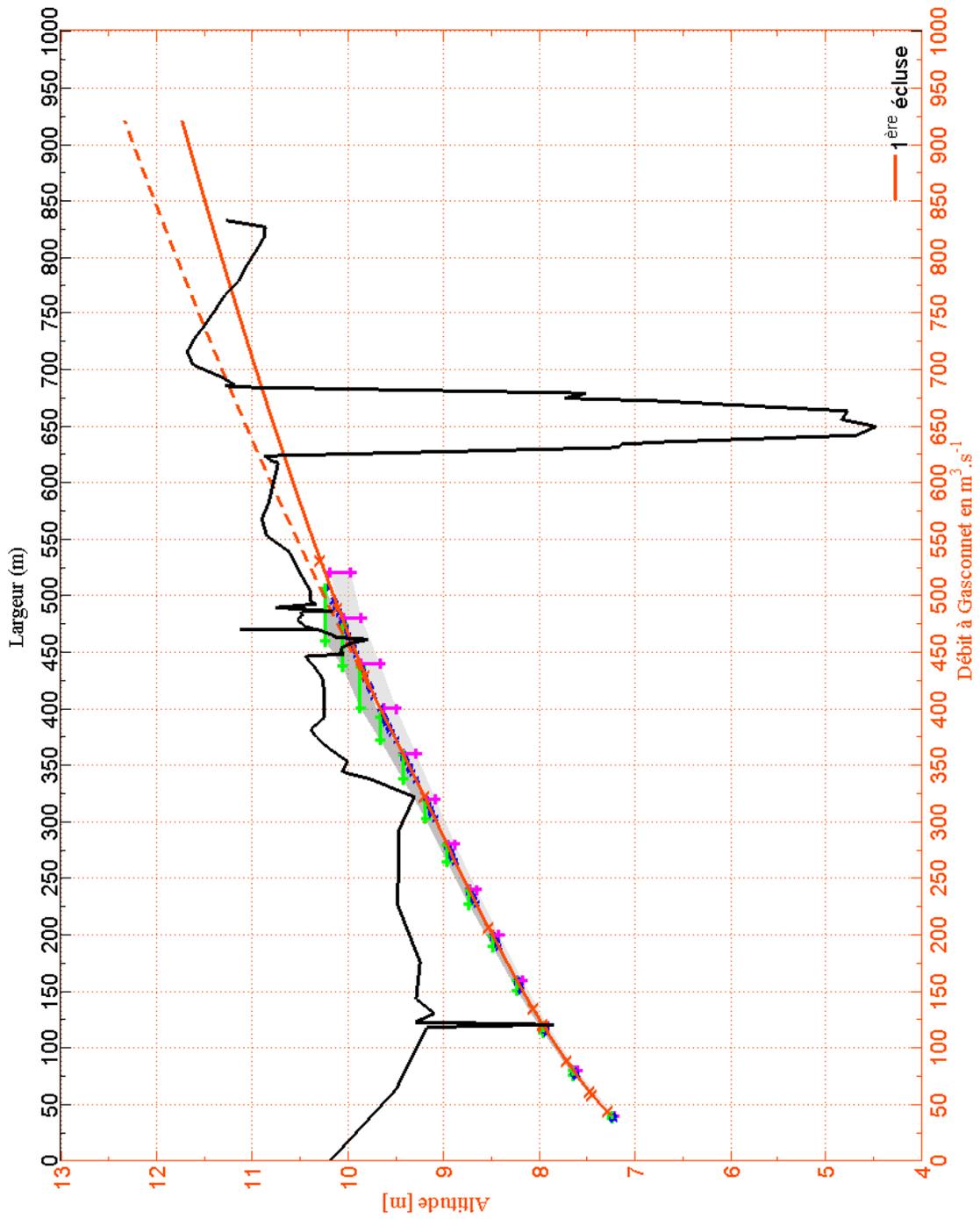


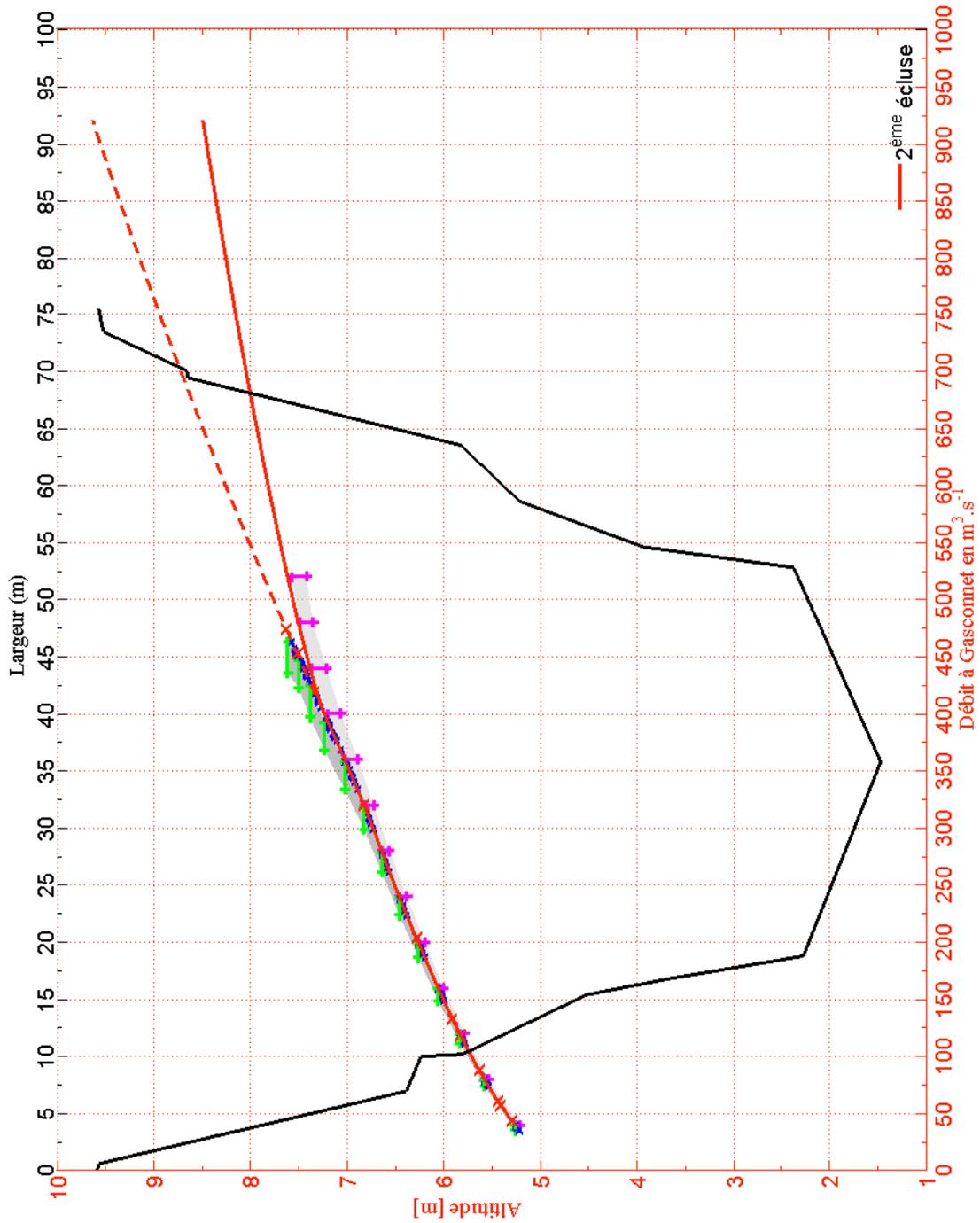


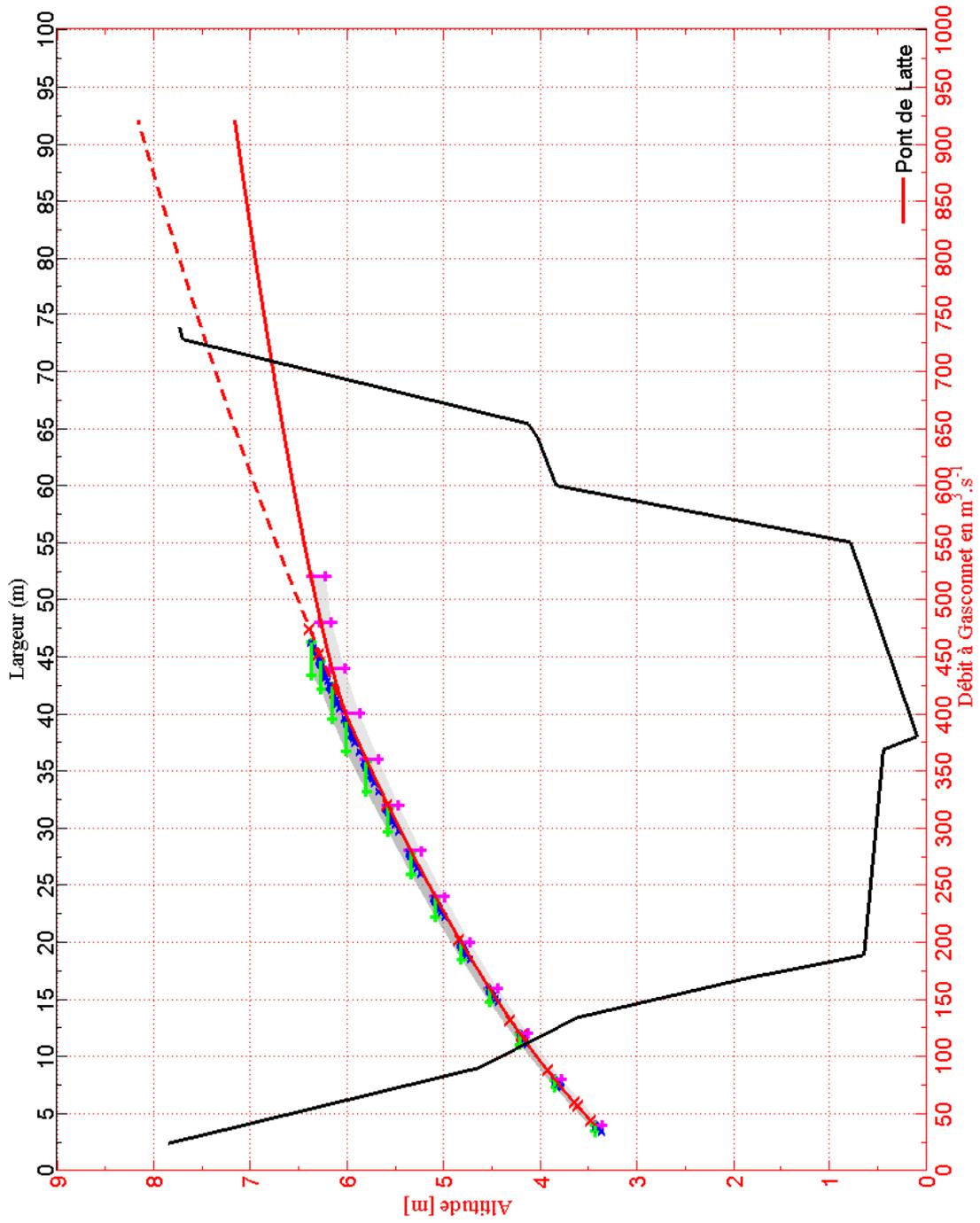


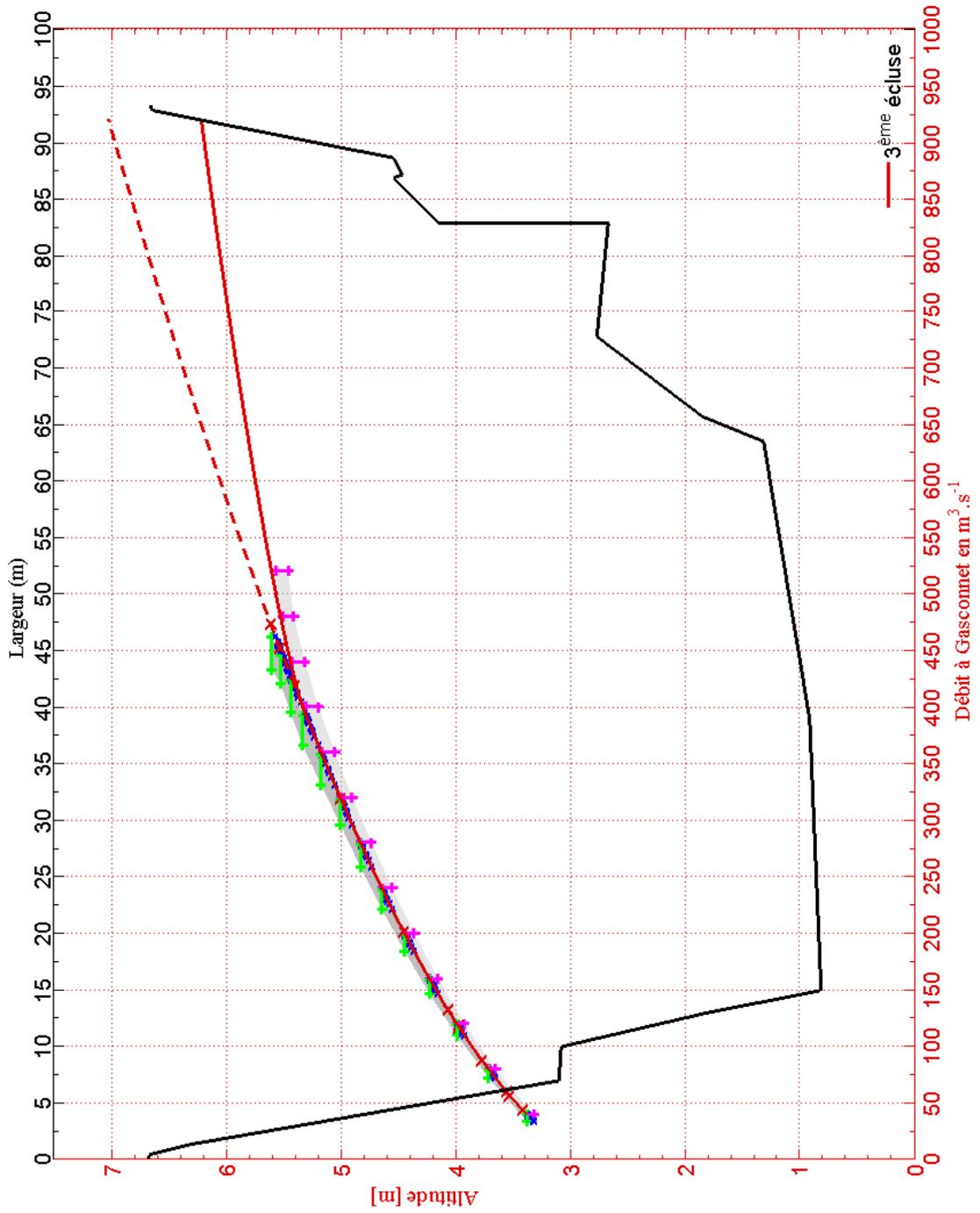














Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Unité Nouvelles Ressources en Eau et Economie
EAU/NRE
1039 rue de Pinville
34000 – Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 80