

Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine

Gestion intégrée des nappes alluviales

Module 5 - Année 4

Etude des nappes alluviales de la Garonne,
de la Dordogne et du Gave de Pau

Rapport final

BRGM/RP-56523-FR

Septembre 2008



Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine

Gestion intégrée des nappes alluviales

Module 5 - Année 4

Etude des nappes alluviales de la Garonne, de
la Dordogne et du Gave de Pau

Rapport final

BRGM/RP-56523-FR

Septembre 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 06EAUC18

Corbier P. et Ladouche B.

avec la collaboration de Capéran F., Grabenstaetter Loïc et Fondin A.



Vérificateurs :

N. Pédrón et J.J. Seguin

Approbateur :

Philippe Dutartre

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 AF AQ ISO 9001:2000



Mots-clés : Dordogne, Garonne, Gave de Pau, hydrogéologie, Lot-et-Garonne, modèle, nappe alluviale, outil de gestion, piézométrie, prototype, qualité, prélèvements, Pyrénées-Atlantiques, TEMPO.

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

Corbier P. et Ladouche B. avec la collaboration de Capéran F., Granbenstaetter L. et Fondin A. (2008) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine. Gestion intégrée des nappes alluviales - Etude des nappes alluviales de la Garonne, de la Dordogne et du Gave de Pau - Module 5 - Année 4 - BRGM/RP-56523-FR, 127 pages, 82 illustrations, 7 tableaux, 1 annexe.

© BRGM, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la convention "Gestion des Eaux Souterraines en Région Aquitaine" signée entre l'État, la Région Aquitaine et le BRGM pour la période 2002-2006 avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Elle correspond au **module 5** de la convention dont l'objectif est de mettre en place des outils de gestion sur les principales nappes alluviales de la région.

Les travaux menés au cours de la **quatrième année** du programme ont consisté à :

- poursuivre le suivi des puits implantés dans la nappe alluviale de la Garonne de façon à disposer de chroniques plus étoffées ; ces dernières pouvant servir à actualiser l'outil de gestion mis en place en année 3,
- à caractériser le fonctionnement hydrogéologique de la nappe alluviale de la Dordogne. Pour ce faire, une approche fonctionnelle ainsi qu'une analyse des débits et des hauteurs classés ont été mises en oeuvre. Le travail a été complété par une « approche TEMPO » qui a permis de modéliser les phénomènes de transfert et de déterminer des débits et des niveaux piézométriques correspondants à différentes périodes de retour,
- à poursuivre le suivi des puits implantés dans la nappe alluviale du Gave de Pau de façon à disposer de chroniques suffisantes pour entreprendre un travail de modélisation en année 1 de la nouvelle convention mais aussi à préciser l'extension et la géométrie du réservoir alluvial, à identifier son mode de recharge et à évaluer sa qualité.

Au terme de ces investigations, la nappe alluviale de la Dordogne est apparue comme un secteur où il n'existe pas de réel problème quantitatif. Dans ces conditions, il n'a pas été jugé nécessaire d'émettre des recommandations quant à une restriction des prélèvements. On peut par contre souhaiter que des efforts soient menés pour mieux les connaître.

En ce qui concerne la nappe alluviale du Gave de Pau, il apparaît nécessaire de procéder à un recensement plus précis des prélèvements et à une étude détaillée des relations qui existent entre la nappe alluviale et le cours d'eau.

De nouveaux contacts seront donc pris auprès des organismes en charge de la gestion de l'eau et une approche du même type de celle qui a été menée pour la Dordogne pourra être mise en oeuvre.

Le programme de la prochaine année d'étude prévoit aussi l'instrumentation d'une nouvelle nappe alluviale : celle du Dropt.

Sommaire

1. Introduction.....	13
2. Nappe alluviale de la Garonne.....	15
3. Nappe alluviale de la Dordogne.....	19
3.1. RAPPELS SUR LA ZONE D'ETUDE ET OBJECTIF DE LA DEMARCHE.....	19
3.2. CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE LA NAPPE ALLUVIALE	22
3.2.1. Généralités sur l'étude fonctionnelle des aquifères par les analyses corrélatoires et spectrales	22
3.2.2. Données utilisées.....	23
3.2.3. Analyses corrélatoires simples et croisées sur la pluie, la piézométrie et les débits de la Dordogne.....	24
3.2.4. Analyses spectrales simples et croisées sur la pluie, la piézométrie et les débits de la Dordogne.....	34
3.2.5. Bilan de l'approche fonctionnelle.....	34
3.3. ANALYSE DES DEBITS CLASSES DE LA DORDOGNE ET DES HAUTEURS CLASSEES DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES.....	35
3.3.1. Principe	35
3.3.2. Analyse des débits classés	35
3.3.3. Analyse des hauteurs classées.....	37
3.3.4. Bilan de l'analyse des débits et des hauteurs classés	41
3.4. ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DES AQUIFERES PAR L'APPROCHE DE MODELISATION TEMPO.....	41
3.4.1. Principe général de TEMPO.....	41
3.4.2. Application à la zone d'étude	42

3.4.3. Présentation du modèle de transfert établi pour l'ouvrage d'Allès (hydrauliquement bien connecté à la Dordogne).....	42
3.4.4. Présentation du modèle de transfert établi pour l'ouvrage de Siorac (hydrauliquement connecté à la Dordogne).....	46
3.4.5. Présentation du modèle de transfert établi pour l'ouvrage de La Force (hydrauliquement non ou très peu connecté à la Dordogne).....	48
3.4.6. Présentation du modèle de transfert établi pour la Dordogne	49
3.4.7. Bilan.....	53
3.5. SIMULATION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES ET DES DEBITS DE LA DORDOGNE EN MODE PREVISIONNEL	53
3.5.1. Préambule	53
3.5.2. Le générateur de pluie de Tempo.....	54
3.5.3. Le générateur d'ETP de Tempo	57
3.5.4. Représentation des résultats	57
3.5.5. Prévision des niveaux pour le piézomètre de La Force	62
3.5.6. Prévision des niveaux pour les ouvrages d'Allès et de Siorac et des débits de la Dordogne.....	62
3.5.7. Bilan.....	62
3.6. CONCLUSION	67
4. Nappe alluviale du Gave de Pau.....	69
4.1. EXTENSION DE LA ZONE D'ETUDE.....	69
4.2. GEOLOGIE	70
4.2.1. Contexte régional.....	70
4.2.2. Les formations tertiaires et secondaires de la vallée du Gave de Pau..	70
4.2.3. Les formations alluviales de la vallée du Gave de Pau	72
4.3. HYDROGEOLOGIE	79

4.3.1. Documents consultés	79
4.3.2. Définition des limites de l'aquifère alluvial	79
4.3.3. Géométrie de l'aquifère alluvial	80
4.3.4. Caractéristiques hydrodynamiques	82
4.3.5. Productivité	86
4.3.6. Recharge	87
4.3.7. Piézométrie	89
4.3.8. Qualité des eaux de la nappe alluviale	93
4.3.9. Prélèvements	107
4.4. CONCLUSION	108
5. Conclusion	111

Liste des illustrations

<i>Illustration 1 : Extension des 9 zones homogènes retenues pour le calcul des Volumes Prélevables Admissibles (VPA)</i>	<i>16</i>
<i>Illustration 2 : Répartition des Volumes Prélevables Admissibles (m³) par zones homogènes en fonction des scénarios climatiques.....</i>	<i>16</i>
<i>Illustration 3 : Carte de disponibilité de la ressource en eau au sein de chaque zone</i>	<i>17</i>
<i>Illustration 4 : Chroniques piézométriques enregistrées sur la zone d'étude entre le 01/01/04 et le 30/06/08.....</i>	<i>18</i>
<i>Illustration 5 : Présentation de la zone d'étude (d'après rapport BRGM/RP-53631-FR)</i>	<i>20</i>
<i>Illustration 6 : Evolution de la pluviométrie (Bergerac) et des niveaux d'eau sur les points équipés par le BRGM.....</i>	<i>25</i>
<i>Illustration 7 : Evolution de la pluviométrie (Bergerac) et des niveaux d'eau sur les points complémentaires.....</i>	<i>26</i>
<i>Illustration 8 : Evolution des débits de la Dordogne aux stations hydrométriques de Cénac, Siorac, Bergerac et Gardonne (les débits de la Vézère sont également reportés)</i>	<i>27</i>
<i>Illustration 9 : Evolution des niveaux d'eau de la Dordogne aux stations hydrométriques de Cénac et Gardonne</i>	<i>27</i>
<i>Illustration 10 : Corrélogrammes simples des chroniques piézométriques</i>	<i>28</i>
<i>Illustration 11 : Corrélogramme simple de la pluviométrie à Bergerac (Météo France).....</i>	<i>29</i>
<i>Illustration 12 : Corrélogrammes croisés "pluie-piézométrie" des ouvrages suivis en continu (données journalières)</i>	<i>30</i>
<i>Illustration 13 : Corrélogrammes croisés "pluie-débit" de la Dordogne aux stations de Cénac et Gardonne</i>	<i>32</i>
<i>Illustration 14 : Corrélogrammes croisés "débits de la Dordogne-piézométrie".....</i>	<i>32</i>
<i>Illustration 15 : Evolution de l'amplitude piézométrique et du rapport Distance à la Dordogne sur Amplitude piézométrique en fonction du coefficient de corrélation croisée r(Q-P).....</i>	<i>33</i>
<i>Illustration 16 : Débits classés de la Dordogne à Cénac et à Gardonne.....</i>	<i>36</i>
<i>Illustration 17 : Evolution des hauteurs classées des sites d'Allès-sur-Dordogne, Bergerac, Siorac et St-Germain</i>	<i>37</i>
<i>Illustration 18 : Evolution des hauteurs classées des sites de Vézac et La Force.....</i>	<i>38</i>
<i>Illustration 19 : Evolution temporelle, pour chaque ouvrage, de la partie de la chronique piézométrique inférieure à la hauteur critique caractérisée à l'aide de l'analyse des hauteurs classées.....</i>	<i>39</i>
<i>Illustration 20 : Réponses impulsionnelles du modèle de transfert «Allès »</i>	<i>43</i>
<i>Illustration 21 : Evolution du seuil Oméga du modèle de transfert « Allès ».....</i>	<i>43</i>
<i>Illustration 22 : Comparaison du modèle aux observations (modèle de transfert « Allès »).....</i>	<i>44</i>

<i>Illustration 23 : Réponses impulsionnelles des chroniques d'entrée (pluie et ETP) permettant le calcul de la fonction seuil Oméga</i>	<i>44</i>
<i>Illustration 24 : Evolution relative des différentes composantes du modèle de transfert « Allès ».....</i>	<i>45</i>
<i>Illustration 25 : Reconstitution de la piézométrie de l'ouvrage Allès sur la période 2000-2007 à l'aide du modèle de transfert « Allès ».....</i>	<i>45</i>
<i>Illustration 26 : Comparaison du modèle aux observations (modèle de transfert « Siorac ») et reconstitution de la piézométrie de l'ouvrage sur la période 2000-2004.....</i>	<i>46</i>
<i>Illustration 27 : Réponses impulsionnelles du modèle de transfert «Siorac »</i>	<i>47</i>
<i>Illustration 28 : Evolution relative des différentes composantes du modèle de transfert « Siorac »</i>	<i>47</i>
<i>Illustration 29 : Comparaison du modèle aux observations (modèle de transfert « La Force ») et reconstitution de la piézométrie de l'ouvrage sur la période 2000-2003.....</i>	<i>48</i>
<i>Illustration 30 : Réponses impulsionnelles du modèle de transfert «La Force »</i>	<i>49</i>
<i>Illustration 31 : Modèle de transfert « Gardonne» : comparaison du modèle aux observations sur la période août 2003-août 2006 et reconstitution des débits sur la période 2000-2008</i>	<i>50</i>
<i>Illustration 32 : Réponses impulsionnelles du modèle de transfert «Gardonne »</i>	<i>50</i>
<i>Illustration 33 : Réponses impulsionnelles du modèle de transfert «Cénac »</i>	<i>52</i>
<i>Illustration 34 : Modèle de transfert « Cénac» : comparaison du modèle aux observations sur la période août 2003-août 2006 et reconstitution des débits sur la période 2000-2008</i>	<i>52</i>
<i>Illustration 35 : Générateur de pluie du modèle La Force_5 j : représentation de la loi de probabilité marginale (loi empirique) de la chronique de pluies de Bergerac.....</i>	<i>55</i>
<i>Illustration 36 : Générateur de pluie du modèle La Force : histogramme de la distribution mensuelle de la pluie déduit des observations et de la simulation</i>	<i>55</i>
<i>Illustration 37 : Générateur de pluies du modèle La Force : représentation des moments en fonction de l'ordre obtenus à partir des observations et des simulations</i>	<i>56</i>
<i>Illustration 38 : Générateur de pluies du modèle La Force : exemple de résultat d'une simulation d'une séquence de pluie (au pas de temps décadaire) ayant les caractéristiques de la série observée</i>	<i>57</i>
<i>Illustration 39 : Générateur d'ETP du modèle La Force : représentation de l'ETP décadaire (Données Météo France, station Bergerac Tabac), de l'ETP moyenne mensuelle, de l'écart-type et du bruit (fonction aléatoire).....</i>	<i>58</i>
<i>Illustration 40 : Générateur d'ETP du modèle La Force : corrélogramme de l'ETP déduit des observations et des simulations et corrélogramme croisé ETP – Pluie déduit des observations et des simulations.....</i>	<i>59</i>
<i>Illustration 41 : Générateur d'ETP du modèle La Force : écart-type mensuel du bruit de l'ETP déduit des observations et des simulations</i>	<i>59</i>
<i>Illustration 42 : Générateur d'ETP du modèle La Force : représentation des moments en fonction de l'ordre obtenus à partir des observations et des simulations</i>	<i>60</i>
<i>Illustration 43 : Générateur d'ETP du modèle La Force : représentation de la loi de probabilité marginale (loi empirique)</i>	<i>60</i>

<i>Illustration 44 : Générateur d'ETP et de pluie du modèle La Force : exemple de résultat d'une simulation d'une séquence d'ETP et de pluie (au pas de temps décadaire) ayant les caractéristiques des séries observées.....</i>	<i>61</i>
<i>Illustration 45 : Modèle de transfert de La Force en mode prévisionnel : représentation des niveaux piézométriques de l'aquifère pour différentes probabilités d'occurrence.....</i>	<i>63</i>
<i>Illustration 46 : Modèle de transfert « Allès » en mode prévisionnel : représentation des niveaux piézométriques de l'aquifère pour différentes probabilités d'occurrence.....</i>	<i>64</i>
<i>Illustration 47 : Modèle de transfert « Siorac » en mode prévisionnel : représentation des niveaux piézométriques de l'aquifère pour différentes probabilités d'occurrence.....</i>	<i>64</i>
<i>Illustration 48 : Modèle de transfert « Débit de la Dordogne à Cénac » en mode prévisionnel : représentation des débits de la Dordogne à Cénac pour différentes probabilités d'occurrence (échelle semi- logarithmique).....</i>	<i>65</i>
<i>Illustration 49 : Modèle de transfert « Débit de la Dordogne à Gardonne » en mode prévisionnel : représentation des débits de la Dordogne à Gardonne pour différentes probabilités d'occurrence (échelle semi- logarithmique).....</i>	<i>65</i>
<i>Illustration 50 : Localisation de la zone d'étude.....</i>	<i>69</i>
<i>Illustration 51 : Histoire du Quaternaire (extrait de "Histoire géologique de l'Aquitaine" Publication ANDRA-BRGM)</i>	<i>73</i>
<i>Illustration 52 : Position des 5 cartes géologiques utilisées pour l'identification des terrasses.....</i>	<i>75</i>
<i>Illustration 53 : Tableau d'équivalence des formations alluviales</i>	<i>75</i>
<i>Illustration 54 : Extension des terrasses alluviales du Gave de Pau.....</i>	<i>76</i>
<i>Illustration 55 : Localisation et exemples de coupes.....</i>	<i>78</i>
<i>Illustration 56 : Emprise des études consultées et localisation des piézomètres, des forages ou des puits créés ou surveillés dans le cadre de ces investigations.....</i>	<i>79</i>
<i>Illustration 57 : Extension des alluvions au niveau de St Cricq du Gave et limites retenues pour le système aquifère</i>	<i>81</i>
<i>Illustration 58 : Extension de la nappe alluviale et localisation des 87 ouvrages dont les logs ont servi à la cartographie de l'aquifère.....</i>	<i>81</i>
<i>Illustration 59 : Cotes du substratum des alluvions (parties amont et médiane).....</i>	<i>83</i>
<i>Illustration 60 : Epaisseur des alluvions (parties amont et médiane).....</i>	<i>83</i>
<i>Illustration 61 : Estimation des épaisseurs des formations alluviales pour la partie située entre Orthez et Saint-Cricq-du-Gave.....</i>	<i>84</i>
<i>Illustration 62 : Répartition des valeurs de perméabilité.....</i>	<i>85</i>
<i>Illustration 63 : Répartition des valeurs de transmissivité</i>	<i>85</i>
<i>Illustration 64 : Pluies efficaces annuelles sur les 3 stations METEO France retenues</i>	<i>88</i>
<i>Illustration 65 : Pluies efficaces mensuelles moyennes sur les 3 stations METEO France retenues.....</i>	<i>88</i>
<i>Illustration 66 : Localisation des ouvrages de suivi piézométrique implantés dans les alluvions du Gave de Pau.....</i>	<i>91</i>
<i>Illustration 67 : Chroniques enregistrées sur les points suivis par le BRGM.....</i>	<i>91</i>

<i>Illustration 68 : Chroniques enregistrées sur les points suivis par le Conseil Général 64</i>	92
<i>Illustration 69 : Localisation des points de contrôle de la qualité</i>	93
<i>Illustration 70 : Valeurs moyennes de conductivité</i>	94
<i>Illustration 71 : Diagramme de Schoëller représentant les teneurs moyennes en éléments majeurs des 39 points de contrôle</i>	95
<i>Illustration 72 : Teneurs moyennes en bicarbonates</i>	97
<i>Illustration 73 : Teneurs moyennes en calcium</i>	97
<i>Illustration 74 : Teneurs moyennes en magnésium</i>	98
<i>Illustration 75 : Teneurs moyennes en sodium</i>	100
<i>Illustration 76 : Teneurs moyennes en chlorures</i>	100
<i>Illustration 77 : Teneurs moyennes en potassium</i>	102
<i>Illustration 78 : Teneurs moyennes en sulfates</i>	102
<i>Illustration 79 : Teneurs moyennes en nitrates</i>	103
<i>Illustration 80 : Teneurs moyennes en silice</i>	105
<i>Illustration 81 : Teneurs moyennes en fer</i>	105
<i>Illustration 82 : Teneurs moyennes en manganèse</i>	106

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Distance à la rivière, coefficient de corrélation croisée « Débit/Piézométrie », retard des ouvrages piézométriques et amplitudes piézométriques pour les ouvrages suivis en continu</i>	33
<i>Tableau 2 : Synthèse des paramètres déduits de l'analyse des hauteurs piézométriques classées</i>	38
<i>Tableau 3 : Débit moyen de la Dordogne (Cénac et Gardonne) et de la Vézère au cours des périodes estivales (du 1^{er} juin au 30 septembre) et évaluation du débit d'apport de la nappe à la rivière</i>	40
<i>Tableau 4 : Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées pour le modèle de transfert « Dordogne à Cénac »</i>	51
<i>Tableau 5 : Synthèse des résultats des modèles prévisionnels pour certaines dates des mois d'été en fonction de la probabilité d'occurrence</i>	66
<i>Tableau 6 : Récapitulatif des résultats obtenus pour les différents piézomètres du secteur étudié</i>	68
<i>Tableau 7 : Volumes prélevés et nombre d'ouvrages sollicitant la nappe alluviale du Gave de Pau</i>	107

Liste des annexes

<i>Annexe 1 : Coupes géologiques relatives à la nappe alluviale du Gave de Pau</i>	115
--	-----

1. Introduction

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la convention "Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine" signée entre l'État, la Région Aquitaine et le BRGM pour la période 2002-2006 avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.

Elle correspond au module 5 de la convention dont l'objectif est de mettre en place des outils de gestion sur les principales nappes alluviales de la région.

En année 1, la priorité a été donnée à la nappe alluviale de **la Garonne** en Lot-et-Garonne. A l'issue de 3 années d'études, un outil de gestion permettant de calculer des volumes prélevables admissibles (VPA) sur des secteurs hydrogéologiques homogènes et en fonction de scénarios climatiques a été fourni aux services en charge de la gestion des prélèvements (DDAF 47).

En année 4, les enregistrements effectués sur les puits alluviaux ont été poursuivis de façon à disposer de chroniques plus étoffées qui pourront servir à actualiser l'outil de gestion.

Parallèlement à l'étude de la nappe alluviale de la Garonne, l'étude de la nappe alluviale de **la Dordogne** a été lancée en année 1. Dans la mesure où les prélèvements effectués dans cette nappe étaient mal connus, il a été décidé d'utiliser un modèle global pour appréhender le fonctionnement de l'aquifère.

Basé sur les chroniques de pluies efficaces et de débit disponibles ainsi que sur 3 années d'enregistrement des niveaux piézométriques, le modèle établi en année 4 a permis de mieux cerner les relations entre les précipitations, le débit de la Dordogne et le niveau de l'aquifère alluvial.

Il permet aussi de prévoir les niveaux piézométriques qui seront atteints en fonction des précipitations qui affecteront le système.

Conformément au cahier des charges de l'étude, une troisième nappe alluviale a été instrumentée en année 3. Il s'agit de celle **du Gave de Pau** qui est le siège de conflits d'usage entre l'AEP (la nappe permet l'alimentation en eau potable de 30 % de la population) et les activités agricoles.

La quatrième année d'étude a permis de réaliser une synthèse des données disponibles sur cette nappe.

Le présent rapport expose le travail mené au cours de la quatrième année d'étude sur les 3 nappes précédemment mentionnées.

2. Nappe alluviale de la Garonne

L'outil de gestion mis en place en année 3 et son fonctionnement ont été décrits dans le rapport BRGM-RP-55243-FR.

Pour mémoire, on rappelle que ce dernier permet de calculer des volumes prélevables admissibles (VPA) sur des secteurs hydrogéologiques homogènes et en fonction de scénarios climatiques (cf. Illustrations 1 et 2).

Sur la zone d'étude considérée, il est apparu que la recharge printanière jouait un rôle primordial dans la disponibilité des ressources prélevables et qu'une recharge printanière importante (correspondant à une année quinquennale humide) était suffisante pour satisfaire tous les besoins (estimés à 5,5 millions de m³).

Dans le détail, il est aussi apparu qu'à surface égale, la disponibilité en eau était plus importante au niveau des zones 1, 2, 3 et 8 (basses terrasses et partie nord de la commune de Fauillet) et qu'elle pouvait varier au sein de chaque zone. Une cartographie représentant les parties à forte et à faible disponibilité complète donc les estimations de volumes prélevables (cf. Illustration 3).

Il convient enfin de noter que les VPA calculés restent entachés d'un certain degré d'incertitude. Ceci est lié au fait que les volumes prélevés par les particuliers n'ont pas été pris en compte, que les volumes agricoles retenus correspondaient à des volumes déclarés et non à des volumes réellement prélevés, que les flux en provenance des coteaux n'étaient pas connus et que les chroniques piézométriques prises en compte pour le calage du modèle étaient relativement courtes.

Malgré ces limites, l'outil de gestion constitue une aide précieuse lors de la phase d'autorisation des prélèvements puisqu'il propose un coefficient modulateur si la demande est plus forte que la ressource disponible.

En année 4, l'outil a été utilisé par la DDAF 47 pour instruire les dossiers d'autorisation.

Les enregistrements effectués sur les puits alluviaux ont aussi été poursuivis de façon à disposer de chroniques plus étoffées qui pourront servir à actualiser l'outil de gestion (cf. Illustration 4).

Il apparaît que les niveaux enregistrés entre juillet 2007 et juin 2008 sont relativement semblables à ceux enregistrés entre juillet 2004 et juin 2005. Ils sont aussi globalement plus hauts que ceux enregistrés entre juillet 2005 et juin 2006 et entre juillet 2006 et juin 2007.

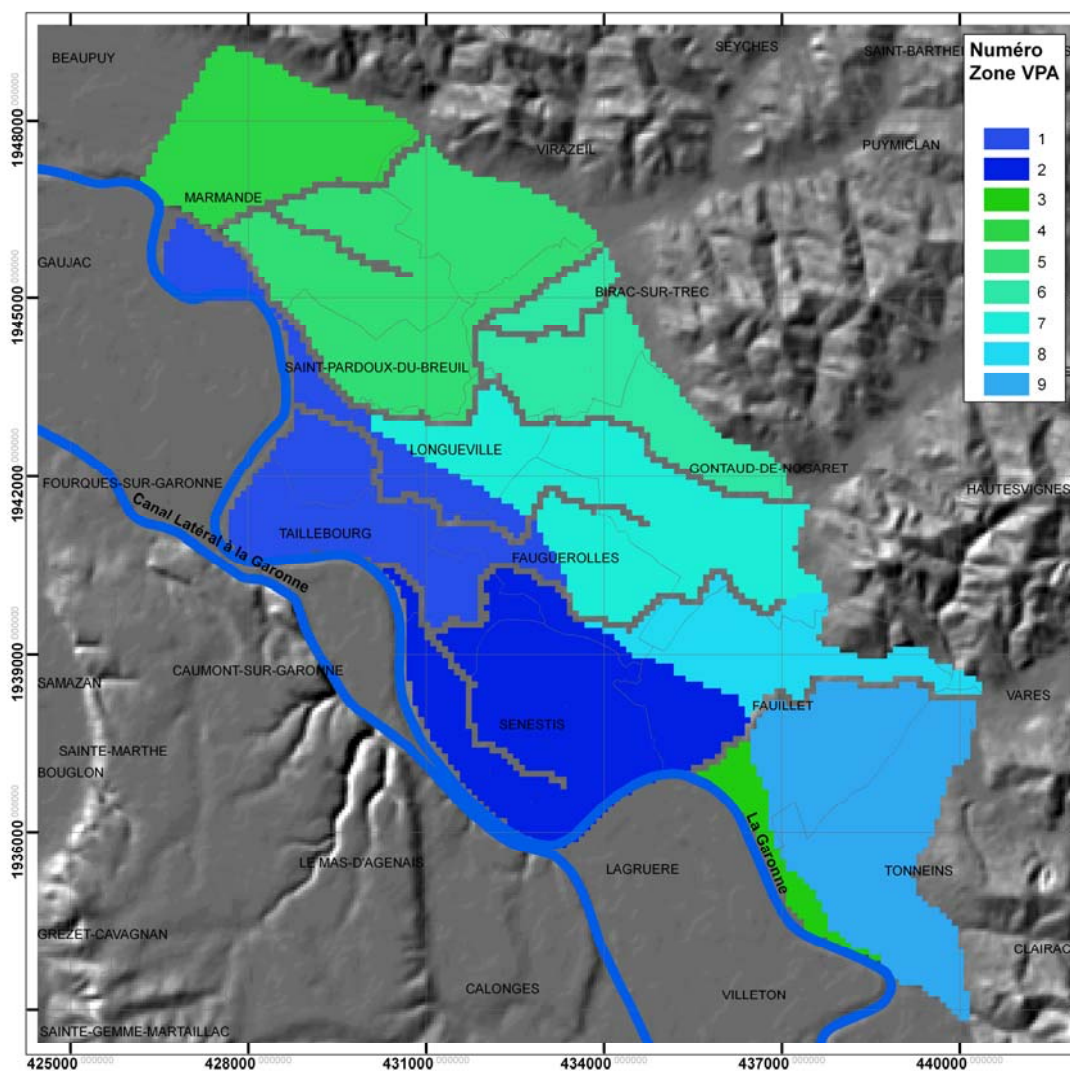


Illustration 1 : Extension des 9 zones homogènes retenues pour le calcul des Volumes Prélevables Admissibles (VPA)

Zone			1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
Surface (km ²)			11.80	14.55	1.68	8.05	15.17	7.46	12.38	5.76	13.04	89.89
Saison	Type climatique	Pluie eff. (mm)										
Hiver	Quinquennal sec	98	701 911	1 751 748	242 248	296 354	507 828	301 112	481 212	424 991	510 375	5 217 779
Printemps	Moy. et quinq. sec	0										
Hiver	Quinquennal sec	98	769 224	1 784 195	243 462	334 719	603 055	323 378	537 028	432 410	544 114	5 571 584
Printemps	Quinquennal humide	16.2										
Hiver	Moyen	178	703 508	1 751 852	242 314	297 055	515 164	301 608	482 740	424 998	517 341	5 236 581
Printemps	Moy. et quinq. sec	0										
Hiver	Moyen	178	770 443	1 784 300	243 537	336 632	610 676	323 880	538 507	432 426	550 784	5 591 186
Printemps	Quinquennal humide	16.2										
Hiver	Quinquennal humide	247	705 919	1 752 101	242 399	295 432	523 408	302 404	485 155	425 037	524 818	5 256 673
Printemps	Moy. et quinq. sec	0										
Hiver	Quinquennal humide	247	772 379	1 784 547	243 620	334 858	618 078	324 656	540 830	432 464	558 418	5 609 851
Printemps	Quinquennal humide	16.2										

Illustration 2 : Répartition des Volumes Prélevables Admissibles (m³) par zones homogènes en fonction des scénarios climatiques

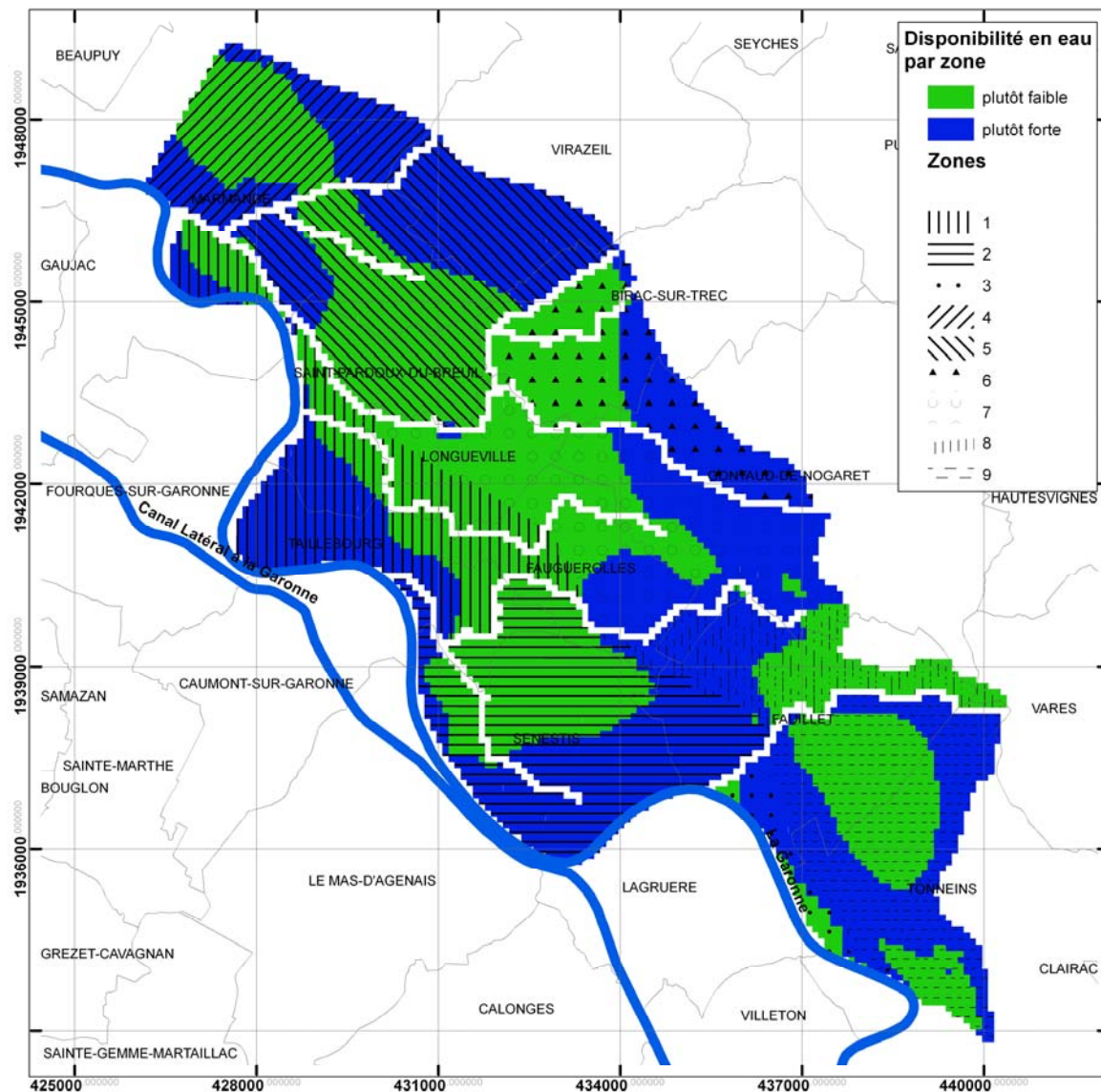


Illustration 3 : Carte de disponibilité de la ressource en eau au sein de chaque zone

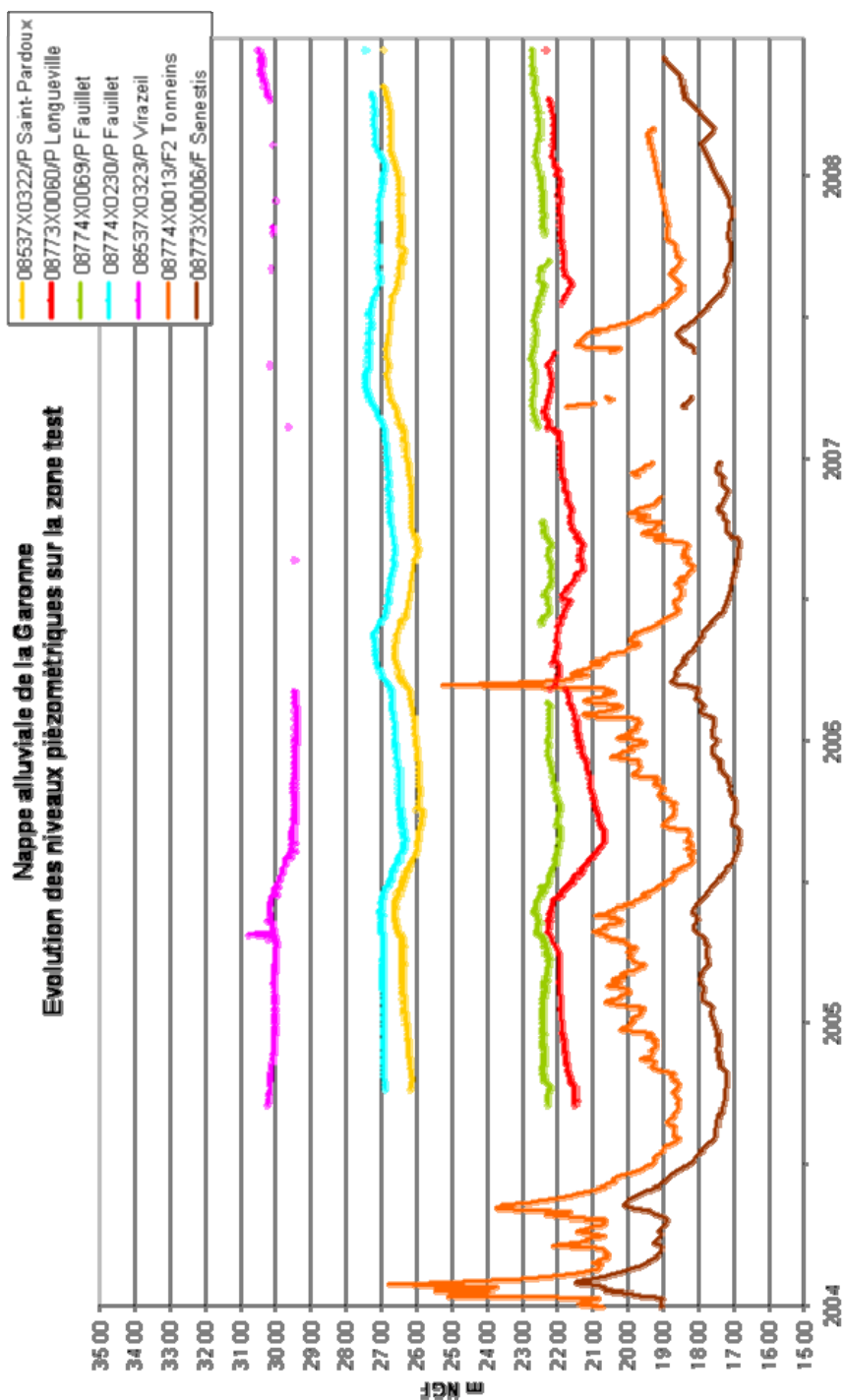


Illustration 4 : Chroniques piézométriques enregistrées sur la zone d'étude entre le 01/01/04 et le 30/06/08

3. Nappe alluviale de la Dordogne

3.1. RAPPELS SUR LA ZONE D'ETUDE ET OBJECTIF DE LA DEMARCHE

Le secteur d'étude correspond au domaine alluvial de la rivière Dordogne dans le département de la Dordogne, depuis la commune de Vélignes jusqu'à celle de Cazoulès. Il s'étend sur 115 km de long et sur un à sept kilomètres de large pour une superficie totale d'environ 300 km² (cf. Illustration 5) et concerne 68 communes dont celle de Bergerac.

La deuxième année du programme d'étude a été consacrée au recueil et à la synthèse bibliographique des études existantes, à la définition de la géométrie du réservoir alluvial, à la connaissance du fonctionnement hydraulique de la nappe alluviale ainsi qu'à l'estimation de la qualité globale des eaux de la nappe et à l'évaluation du nombre d'ouvrages captant la nappe alluviale et des prélèvements (cf. rapport BRGM-RP-53631-FR).

L'approche géologique a permis de caractériser et de cartographier les différentes terrasses fluviatiles quaternaires ainsi que les terrains sur lesquels elles reposent qui vont du Jurassique moyen (Callovien) à l'Eocène supérieur.

D'un point de vue hydrogéologique, la délimitation de l'aquifère alluvial de la Dordogne tient compte de l'ensemble des basses terrasses würmiennes et d'une partie des terrasses datées du Riss et du Mindel lorsque des connexions hydrauliques semblent exister.

Latéralement, les limites du système aquifère alluvial ont été définies selon les contours des talus mollassiques (à dominante argileuse) de l'Eocène moyen à supérieur qui forment des limites imperméables, ceux des formations sableuses de l'Eocène inférieur à moyen et ceux des calcaires du Crétacé supérieur (Campanien à Cénomani) et du Jurassique supérieur et moyen. Ces derniers représentent des réservoirs aquifères susceptibles d'être en relation hydraulique avec la nappe alluviale en fonction de leurs lithologies et de leurs perméabilités.

Les perméabilités des terrasses alluviales sont généralement élevées mais hétérogènes du fait de la nature plus ou moins argileuse des alluvions. Les potentialités de la nappe sont, quant à elles, très disparates et fonction de l'épaisseur de la zone aquifère. D'une manière générale, elles sont moyennes, voire faibles dans sa partie amont et fortes dans certains secteurs situés en aval.

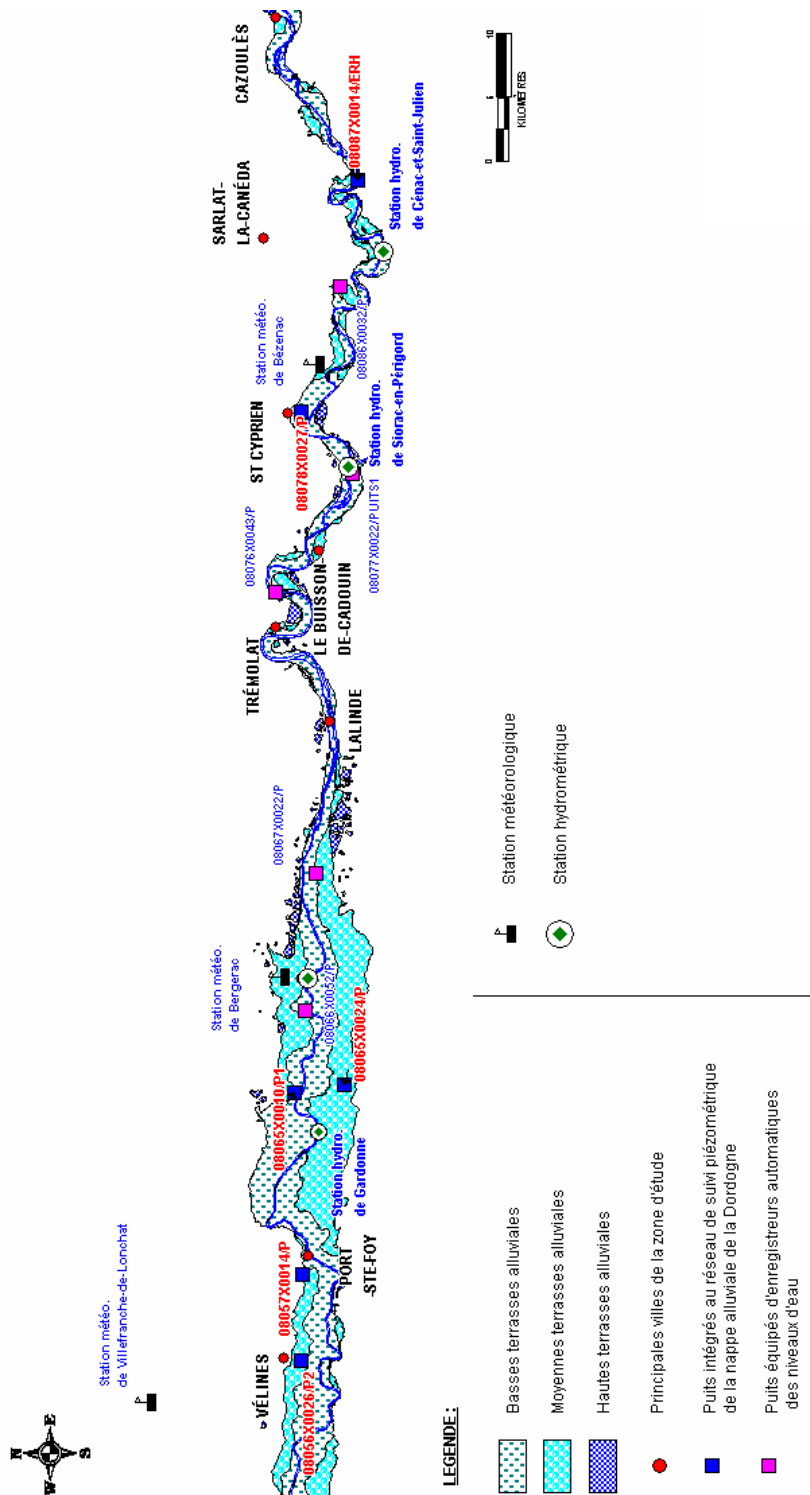


Illustration 5 : Présentation de la zone d'étude (d'après rapport BRGM/RP-53631-FR)

La nappe alluviale de la Dordogne, circonscrite au département de la Dordogne, est considérée comme libre. Son alimentation est principalement assurée par l'infiltration directe des eaux de pluie au travers des différentes terrasses. Elle se recharge donc normalement d'une année sur l'autre. L'écoulement se fait des coteaux vers la rivière.

L'aquifère présente des battements annuels faibles (70 cm pour les moyennes terrasses et 2 m environ pour les basses terrasses) en raison des circulations d'eau assez rapides et des perméabilités élevées. Les hautes eaux s'observent généralement de décembre à mai-juin et les basses eaux, en été, à l'automne, voire au début de l'hiver.

Les relations entre la nappe alluviale et la rivière sont variables. La Dordogne draine la nappe en période d'étiage alors qu'en période de crue, c'est le phénomène inverse qui s'opère. Des phénomènes de drainance ascendante ou descendante peuvent aussi avoir lieu avec les aquifères sous-jacents.

Au plan de l'hydrochimie, les eaux se caractérisent par des faciès bicarbonatés calciques et peuvent être légèrement magnésiennes.

Les fortes concentrations en magnésium, sodium, chlorures, sulfates et nitrates observées à l'ouest de Bergerac laissent supposer des contaminations anthropiques d'origine agricole et/ou urbaine.

Les terrasses alluviales situées dans les environs d'Allès-sur-Dordogne, de Siorac-en-Périgord ou d'Allas-les-Mines sont également exposées à d'éventuelles contaminations d'origine agricole.

L'origine de certains éléments a pu être précisée par l'interprétation des diagrammes de corrélation. Ainsi, le calcium et les bicarbonates seraient issus pour partie ou en totalité de la dissolution des roches carbonatées. Le magnésium peut provenir de la dissolution de calcaires légèrement magnésiens. Le sodium et les chlorures seraient, quant à eux, issus de la dissolution de sel d'origine anthropique ; les roches ne contenant pas de halite à l'état naturel.

En 1994, un travail mené par le BRGM avait attribué les variations chimiques entre les pôles sulfaté-chloruré, carbonaté et potassique des eaux de la nappe alluviale à l'influence de nappes plus profondes, telles que celle du Jurassique dans la région de Sarlat, celle du Crétacé supérieur à proximité du Buisson-de-Cadouin ou celle de l'Eocène à l'ouest de Bergerac.

Pour terminer, l'inventaire des ouvrages a permis de recenser 234 puits et forages et d'estimer les volumes prélevés à environ 3 millions de m³. La zone d'étude n'étant pas classée en Zone de Répartition des Eaux (ZRE), l'incertitude sur le nombre d'ouvrages agricoles et les prélèvements est importante.

Dans ces conditions, il est apparu qu'une modélisation de la nappe alluviale à l'aide d'un modèle maillé ne serait pas réaliste. Il a donc été décidé d'utiliser un modèle global pour appréhender le fonctionnement de l'aquifère.

Ce type de modèle nécessite de disposer de chroniques climatiques et piézométriques relativement longues pour pouvoir être utilisé.

Le modèle construit et utilisé en année 4 avec le logiciel **TEMPO** du BRGM est basé sur les chroniques de pluies efficaces et de débit disponibles sur le secteur d'étude ainsi que sur 3 années d'enregistrement des niveaux piézométriques.

3.2. CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE LA NAPPE ALLUVIALE

3.2.1. Généralités sur l'étude fonctionnelle des aquifères par les analyses corrélatoires et spectrales

Les analyses corrélatoires et spectrales sont des méthodes d'analyse statistique des séries chronologiques et s'utilisent dans le cadre de l'approche dite fonctionnelle des hydrosystèmes (Jenkins and Watts, 1968 ; Box and Jenkins, 1970 ; Mangin 1981).

Le principe de base de ces méthodes est d'assimiler l'hydrosystème étudié à un filtre (ou boîte noire) qui laisse plus ou moins passer l'information contenue dans un signal d'entrée.

Ces dernières consistent à analyser et à comparer des signaux d'entrées (précipitations, niveaux d'eau ou débits d'une rivière par exemples) et de sortie (piézométrie). Les chroniques des signaux d'entrée et de sortie peuvent être traitées séparément dans le domaine temporel (analyses corrélatoires simples) ou dans le domaine fréquentiel (analyses spectrales simples) ou bien les unes par rapport aux autres (analyses corrélatoires et spectrales croisées).

Les analyses corrélatoires simples permettent de mettre en évidence dans une série de mesures s'échelonnant dans le temps, le degré de corrélation existant entre les valeurs successives de la série pour des intervalles de temps croissants. Ce degré de corrélation est mis en évidence par un corrélogramme représentant graphiquement la corrélation (on parle d'auto-corrélation) qui existe entre les valeurs de la série lorsqu'elles sont décalées de 1 pas de temps, puis de 2 pas de temps, puis de 3....

Sur les chroniques de piézométrie par exemple, cette analyse permet de caractériser « *l'effet mémoire* » de l'aquifère qui traduit la dépendance dans le temps des valeurs piézométriques et qui présente une décroissance plus ou moins rapide.

En d'autres termes, « *l'effet mémoire* » est directement lié à l'inertie du système : il est d'autant plus grand que le filtrage introduit par le système est important. Dans le cas des systèmes karstiques par exemple, *l'effet mémoire* est défini comme le nombre de jours nécessaires pour que la fonction d'autocorrélation (r_k) atteigne la valeur de 0.2 (Mangin 1981).

Les analyses spectrales simples permettent d'identifier les différentes composantes de la variance totale de la série en fonction de la fréquence d'apparition : la variance totale du « signal » est partitionnée suivant un certain nombre de « bandes » de

fréquence et la « quantité » de variance dans chaque intervalle de fréquence est évaluée à l'aide d'une grandeur appelée « densité spectrale de puissance DSP ».

La densité spectrale de puissance qui correspond d'un point de vue mathématique à la transformée de Fourier du corrélogramme simple (Box and Jenkins, 1970) permet d'identifier (1) la tendance du système à long terme, (2) les phénomènes périodiques saisonniers et (3) les phénomènes purement aléatoires assimilables au bruit de fond.

Les analyses corrélatoires croisées permettent d'étudier la relation entre l'entrée et la sortie et de mettre en évidence les phénomènes structurés influençant l'évolution temporelle des chroniques de piézométrie. Réalisées sur la pluie et le niveau piézométrique, elles peuvent fournir une image approchée de la réponse impulsionnelle du système (= réponse du système à une impulsion brève).

3.2.2. Données utilisées

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont les suivantes :

- **pluies décennales** sur la période 1972-2007 sur le poste de Bergerac Tabac,
- **pluies journalières** sur la période 2000-2007 sur le poste de Bergerac Tabac,
- **ETP décennales** sur la période 1972-2007 sur le poste de Bergerac Tabac,
- **chroniques journalières de niveaux d'eau** sur les 5 points d'eau équipés par le BRGM (cf. illustration 6) pour les besoins de l'étude sur la période été 2004-2008 (3 cycles hydrologiques) :
 - o Bergerac (08066X0052/P) et Allès-sur-Dordogne (08076X0043/P) implantés dans les basses terrasses,
 - o Saint-Germain-et-Mons (08067X0022/P), Siorac (08077X0022/P1) et Vézac (08086X0032/P) implantés dans les moyennes terrasses.
- **chroniques journalières de niveaux d'eau** sur les 6 points d'eau complémentaires suivis par le BRGM pour le compte du Conseil Général de la Dordogne (cf. illustration 7) sur la période été 1998-2008 :
 - o Groléjac (08087X0014/ERH) implanté dans la basse terrasse,
 - o Vélines (08056X0026/P2), Port-Sainte-Foy (08057X0014/P), La Force (seul point suivi en continu, 08065X0010/P1), Lamonzie (08065X0024/P) et Saint-Cyprien (08078X0027/P) implantés dans les moyennes terrasses.
- **chroniques de débits journaliers de la Dordogne** disponibles pour les stations de **Cénac** (contrôle amont de la zone d'étude), de **Siorac** (position intermédiaire) et de **Gardonne** (contrôle aval de la zone d'étude) (données Banque Hydro, cf. Illustration 8),

- **chroniques de débits journaliers** disponibles pour la station **d'annonce de crue** située juste à l'aval du barrage de Bergerac (données banque Hydro, cf. Illustration 9),
- **chroniques de débits journaliers de la Vézère** disponibles pour la station de **Campagne** (station supposée représentative du débit de la Vézère à la confluence avec la Dordogne) (données banque Hydro, cf. Illustration 9),
- **chroniques de hauteurs d'eau journalières de la Dordogne** pour les stations de **Cénac** (période 2001-2007) et de **Gardonne** (période 2006-2007) (données banque Hydro, cf. Illustration 9),
- **évaluation des volumes prélevés** : 3 millions de m³ tous usages confondus en 2002 (Rapport BRGM/RP-53631-FR).

3.2.3. Analyses corrélatoires simples et croisées sur la pluie, la piézométrie et les débits de la Dordogne

Les analyses ont été menées dans l'objectif de caractériser la nature inertielle des aquifères (analyse simple) et d'étudier la réponse des aquifères à la recharge par les précipitations tout en qualifiant la dynamique de transfert au sein des systèmes (analyse croisée).

Elles ont été réalisées sur les chroniques piézométriques de Bergerac (08066X0052/P), Allès-sur-Dordogne (08076X0043/P), Saint-Germain-et-Mons (08067X0022/P), Siorac (08077X0022/P1), Vézac (08086X0032/P) et La Force (08065X0010/P1) ainsi que sur la chronique de pluies journalières enregistrées à Bergerac.

Les corrélogrammes simples des niveaux piézométriques présentent des courbes de décroissance caractéristiques des processus auto-corrélés, c'est-à-dire qu'au temps "t", la valeur mesurée dépend de la valeur mesurée au temps "t-1".

La courbe décroît faiblement lorsque l'inertie est importante (cas du piézomètre de St-Germain par exemple, cf. Illustration 10) ou plus rapidement lorsque l'effet mémoire est plus faible (cas du piézomètre de Vézac par exemple, cf. Illustration 10).

Dans cette étude, l'effet mémoire a été défini lorsque l'auto-corrélation atteint une valeur de 0.5 [r(t)]. Il convient de noter qu'une autre valeur aurait pu être fixée. Dans ce cas, les effets mémoire auraient été différents mais auraient tout aussi bien permis de comparer les systèmes entre eux (allure des courbes non modifiée).

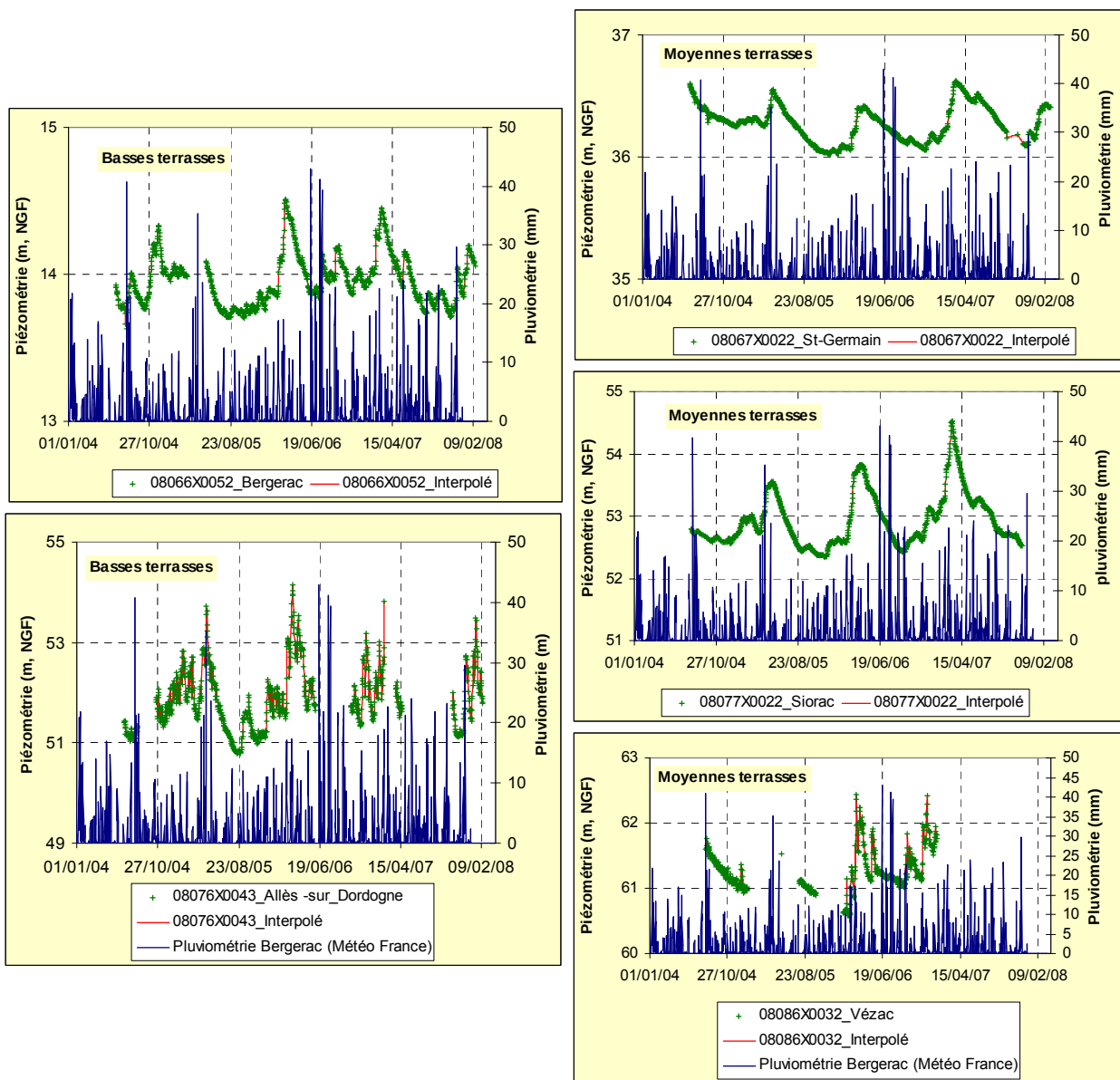


Illustration 6 : Evolution de la pluviométrie (Bergerac) et des niveaux d'eau sur les points équipés par le BRGM

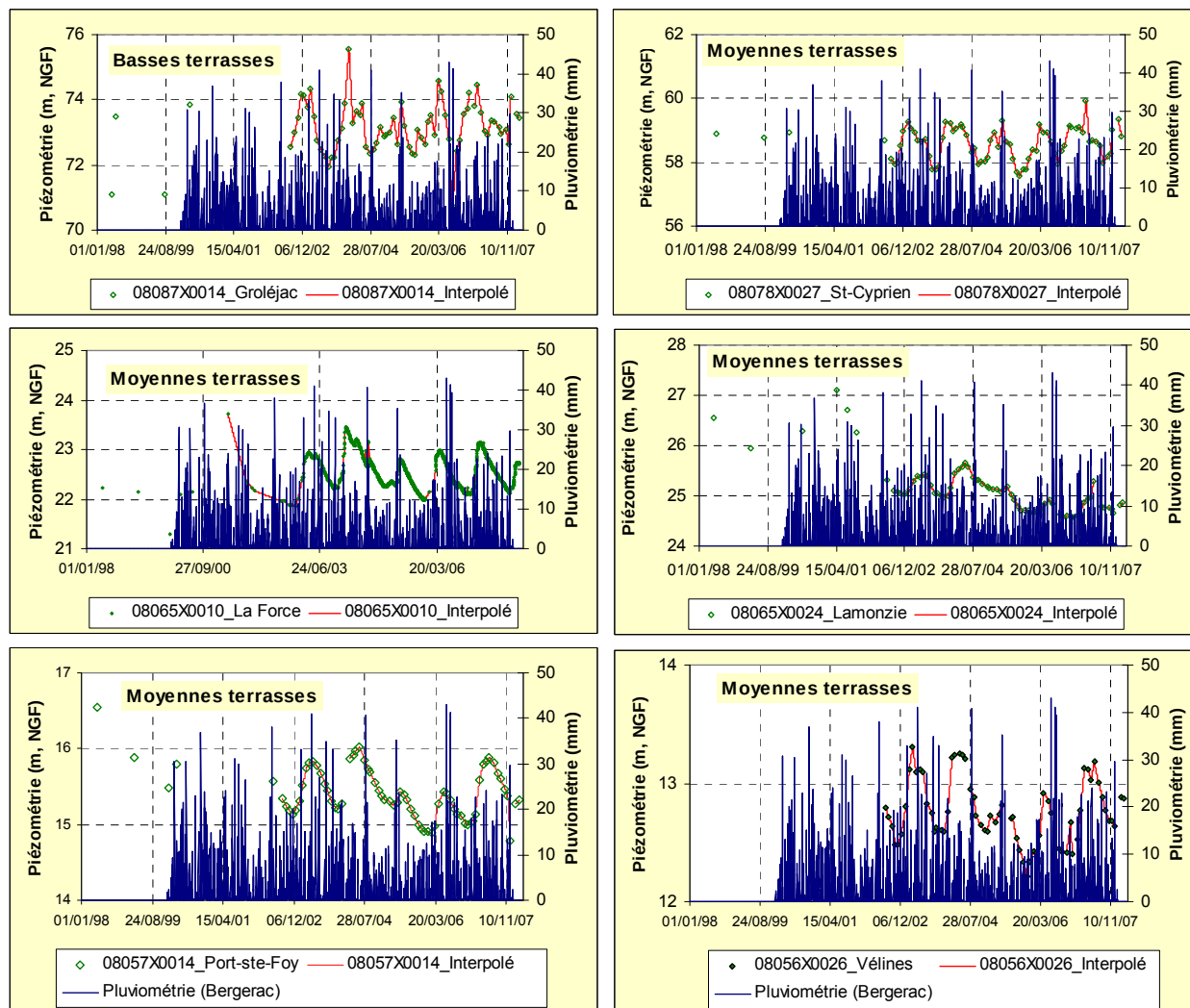


Illustration 7 : Evolution de la pluviométrie (Bergerac) et des niveaux d'eau sur les points complémentaires

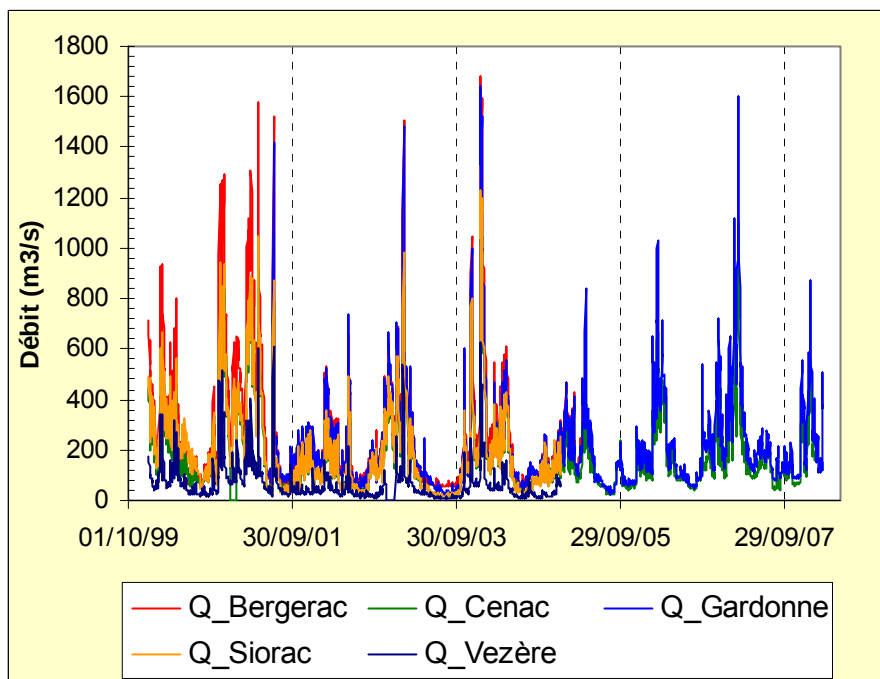


Illustration 8 : Evolution des débits de la Dordogne aux stations hydrométriques de Cénac, Siorac, Bergerac et Gardonne (les débits de la Vézère sont également reportés)

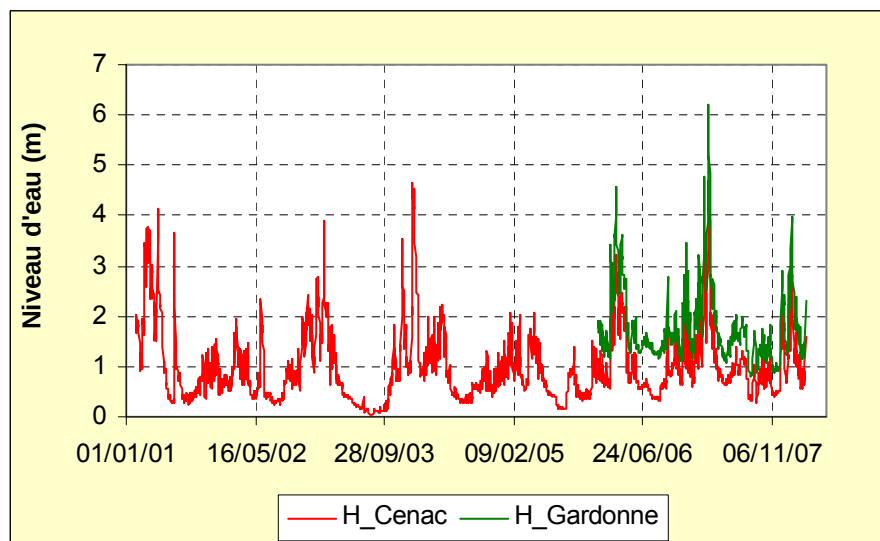


Illustration 9 : Evolution des niveaux d'eau de la Dordogne aux stations hydrométriques de Cénac et Gardonne

L'examen de l'illustration 10 permet de distinguer 3 groupes d'ouvrages :

- un premier constitué par les piézomètres Siorac, Saint-Germain-et-Mons et La Force qui présentent des effets mémoires importants compris entre 50 et 60 jours;
- un second groupe ne comprenant qu'un seul piézomètre (celui de Bergerac) présentant un effet mémoire moyen de 35 jours;
- un troisième groupe constitué par les piézomètres de Vézac et d'Allès qui présentent peu d'inertie (autour de 20 jours).

Il convient de noter que les effets mémoire déterminés pour les derniers ouvrages sont comparables à celui obtenu pour le débit de la Dordogne à Cénac.

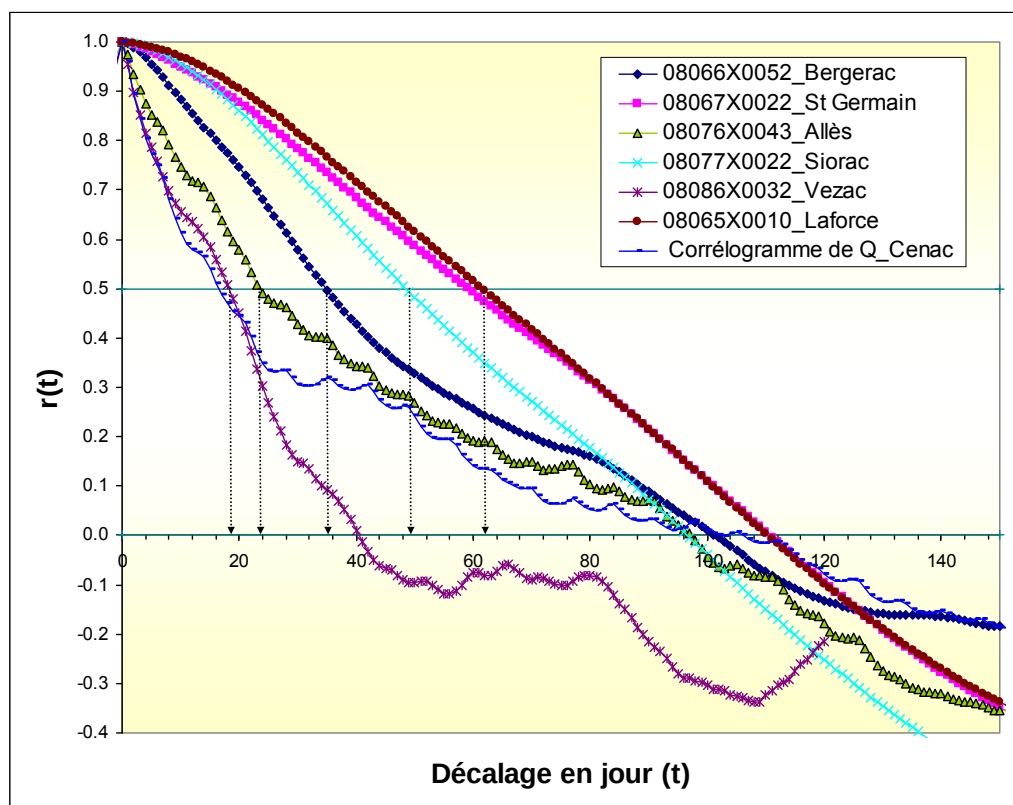


Illustration 10 : Corrélogrammes simples des chroniques piézométriques (à titre de comparaison, le corrélogramme simple du débit de la Dordogne à Cénac a aussi été représenté)

Après avoir établi le corrélogramme de la pluie (cf. Illustration 11), les corrélogrammes croisés pluies-piézométrie ont été calculés afin d'obtenir une image approchée de la réponse impulsionnelle des hydrosystèmes. (cf. Illustration 12).

Pour **les ouvrages à comportement inertiel** (Siorac, Saint-Germain-et-Mons et La Force), la réponse de la piézométrie aux précipitations est de type bimodal (Illustration 12, schéma du bas).

Le premier mode s'exprime plus ou moins nettement pour un décalage de l'ordre de 10 jours, le second, plus clairement, pour un décalage de 27 jours environ.

Le fait que la corrélation maximale soit observée 27 jours après un épisode de pluie efficace et la faiblesse des coefficients de corrélation croisée (< 0.10) indiquent que l'aquifère filtre de manière très importante le signal de la pluie.

Le premier pic que l'on observe entre 9 jours et 13 jours après une pluie efficace pourrait, quant à lui, témoigner d'une recharge plus rapide au travers de chemins préférentiels d'écoulement (chenaux correspondants à d'anciennes divagations du lit de la rivière par exemple).

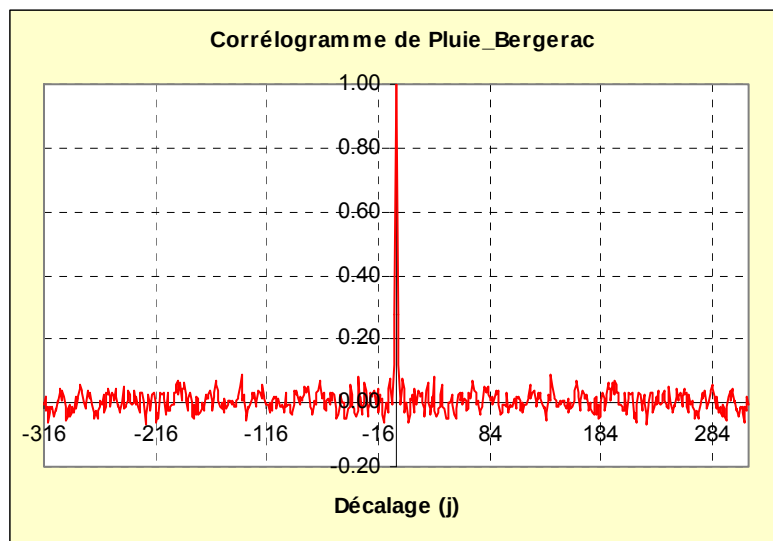


Illustration 11 : Corrélogramme simple de la pluviométrie à Bergerac (Météo France)

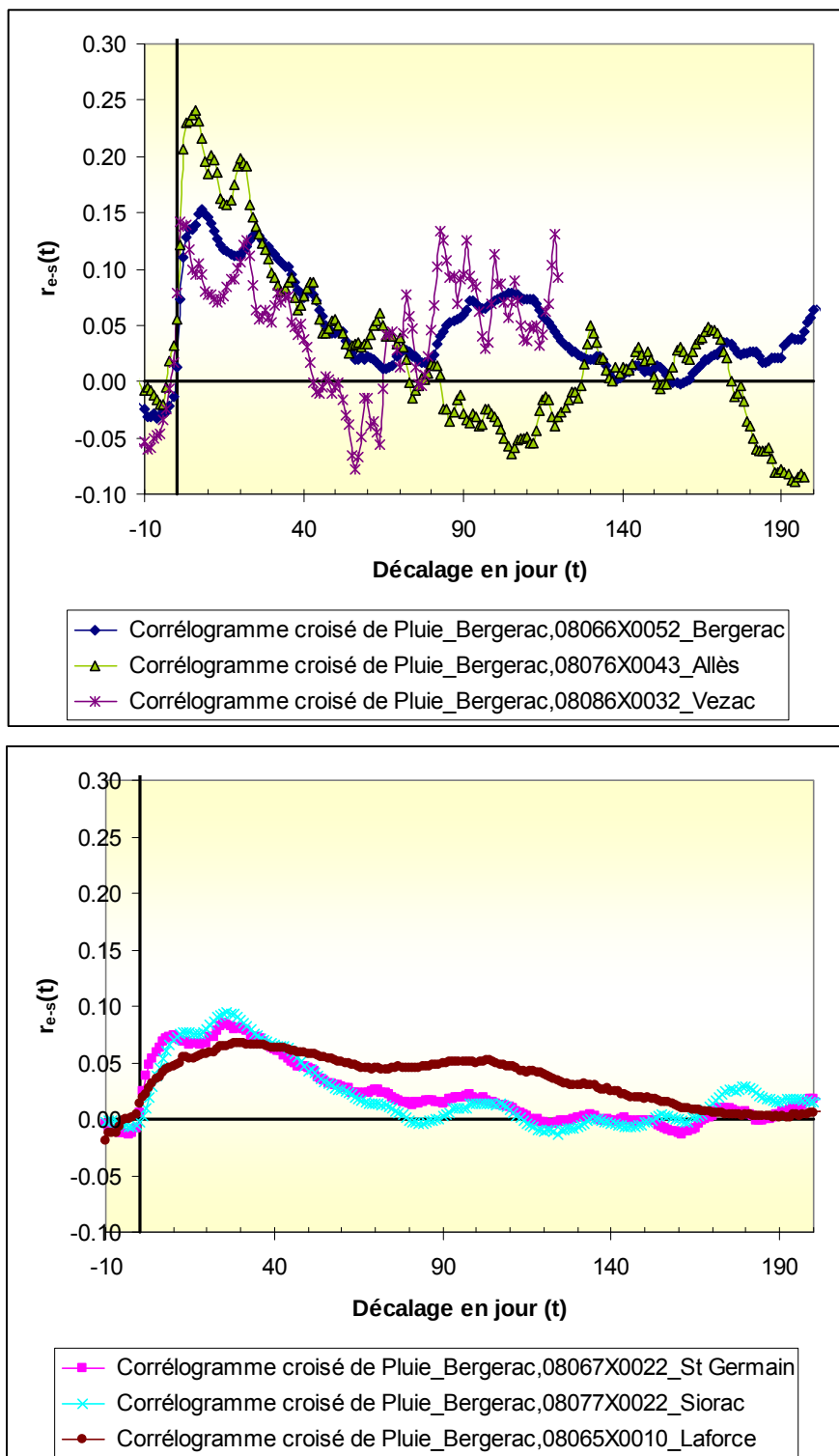


Illustration 12 : Corrélogrammes croisés "pluie-piézométrie" des ouvrages suivis en continu (données journalières)

Il est toutefois plus probable que le premier pic soit lié à une connexion hydraulique privilégiée entre la nappe et la Dordogne.

Le corrélogramme croisé entre la pluie et le débit de la Dordogne (cf. Illustration 13) montre en effet que la réponse de la Dordogne à la pluie est de l'ordre de 2 à 3 jours et que le débit de la Dordogne demeure important jusqu'à 10 jours après un épisode de pluie efficace.

Pour les ouvrages à moyenne inertie (Bergerac) et à faible inertie (Allès, Vézac) (cf. Illustration 12, schéma du haut); les coefficients de corrélation croisée restent faibles (< 0.25 pour Allès et < 0.15 pour Bergerac et Vézac) et indiquent que l'hydrosystème filtre, dans ce cas aussi, le signal de la pluie de manière importante.

Les réponses sont bi-modales mais contrairement au groupe des ouvrages inertiels, les valeurs des coefficients de corrélation croisée des premiers modes sont comparables à celle des seconds pics (à l'exception d'Allès qui présente un premier pic nettement plus important).

Le second pic est observé pour des décalages compris entre 22 et 26 jours, valeurs comparables à celles qui ont été déterminées pour les ouvrages au comportement inertiel. Ces résultats suggèrent que le second mode correspond à la réponse du système à l'infiltration de la pluie efficace sur l'impluvium des terrasses. Le premier pic, observé pour des décalages compris entre 3 et 9 jours, pourrait ici aussi, s'expliquer par la connexion hydraulique entre la nappe et la Dordogne.

L'illustration 14 représente les corrélogrammes croisés entre le débit de la Dordogne et la piézométrie mesurée au sein de la nappe alluviale. Dans ce cas, l'allure du corrélogramme croisé « débit/piézométrie » ne permet pas d'accéder à la réponse impulsionnelle de l'hydrosystème, le signal d'entrée ne pouvant être considéré comme aléatoire. Cette analyse permet néanmoins d'évaluer la corrélation entre les débits et la piézométrie et d'évaluer le retard entre ces deux variables.

Il apparaît ainsi que la piézométrie de l'ouvrage d'Allès est très influencée par les débits de la Dordogne (coefficient de corrélation croisée proche de 0.9 et retard inférieur à 1 jour). Ces résultats ne sont pas surprenants dans la mesure où l'ouvrage est situé à environ 100 m de la Dordogne.

Les coefficients de corrélation croisée « débit-piézométrie » relatifs aux ouvrages de Siorac, Bergerac et Vézac sont aussi relativement élevés (compris entre 0.55 et 0.75), ce qui suggère que les aquifères présentent une bonne connexion hydraulique avec la Dordogne dans ces secteurs.

Les niveaux d'eau mesurés sur les forages de Saint-Germain-et-Mons et de La Force semblent, quant à eux, peu ou pas influencés par la Dordogne.

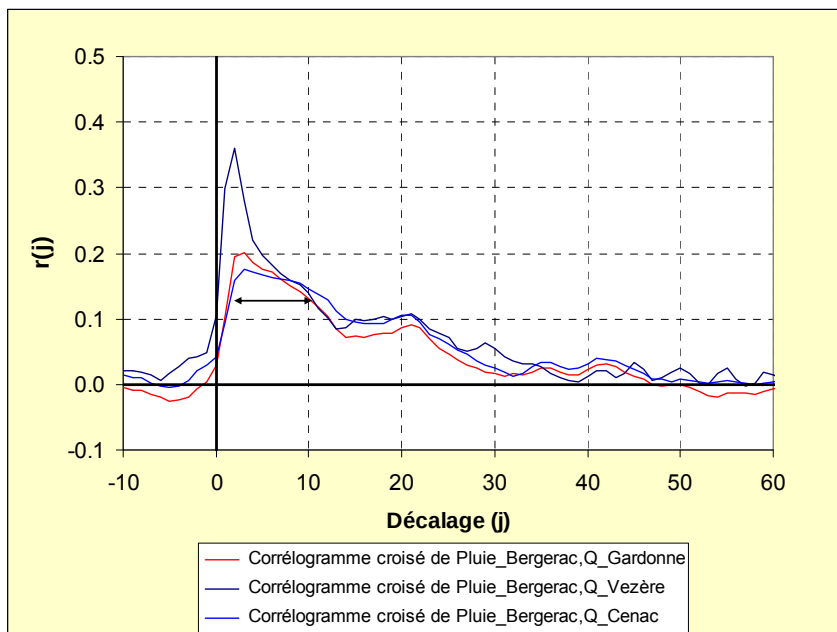


Illustration 13 : Corrélogrammes croisés "pluie-débit" de la Dordogne aux stations de Cenac et Gardonne (à titre de comparaison, le corrélogramme croisé "pluie-débit" de la Vezère est également représenté)

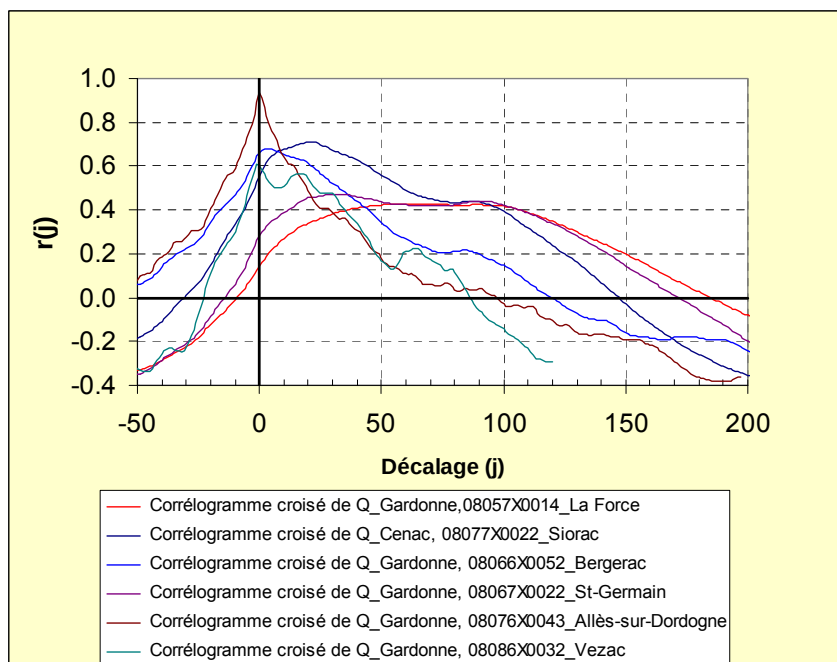


Illustration 14 : Corrélogrammes croisés "débits de la Dordogne-piézométrie"

Les valeurs issues de l'analyse corrélatrice précédente (coefficients de corrélation, retards), les distances des ouvrages par rapport à la Dordogne ainsi que les amplitudes des variations piézométriques observées sur chaque ouvrage ont été reportées dans le tableau 1 puis représentées sur les graphiques de l'illustration 15.

Il apparaît que l'amplitude des variations piézométriques est significativement corrélée au coefficient de corrélation croisée $r(Q,P)$. La relation qui lie le rapport « distance de l'ouvrage à la Dordogne sur l'amplitude piézométrique » au coefficient de corrélation croisée $r(Q,P)$ est, quant à elle, non linéaire (exponentielle) mais très significative ($R^2 = 0.90$).

Bien que située dans la moyenne terrasse, la nappe sollicitée par le piézomètre de Siorac apparaît comme bien connectée à la nappe des basses terrasses qui est elle-même en relation hydraulique avec la Dordogne.

Nom du Site	Distance à la rivière (km)	Coef corrélation $r(Q,P)$ Débit Dordogne/Piézomètre	Retard (j) Débit Dordogne/Piézomètre	Amplitude Piézométrique (m)
08066X0052_Bergerac (BT)	0.35	0.67	5	0.88
08076X0043_Allès-sur-Dordogne (BT)	0.1	0.91	1	3.35
08077X0022_Siorac (MT)	0.3	0.71	22	2.18
08057X0014_La Force (MT)	0.5	0.42	51	0.5
08067X0022_St-Germain (MT)	1	0.47	35	0.59
08086X0032_Vezac (MT)	1.2	0.56	19	1.85

Tableau 1 : Distance à la rivière, coefficient de corrélation croisée « Débit/Piézométrie », retard des ouvrages piézométriques et amplitudes piézométriques pour les ouvrages suivis en continu

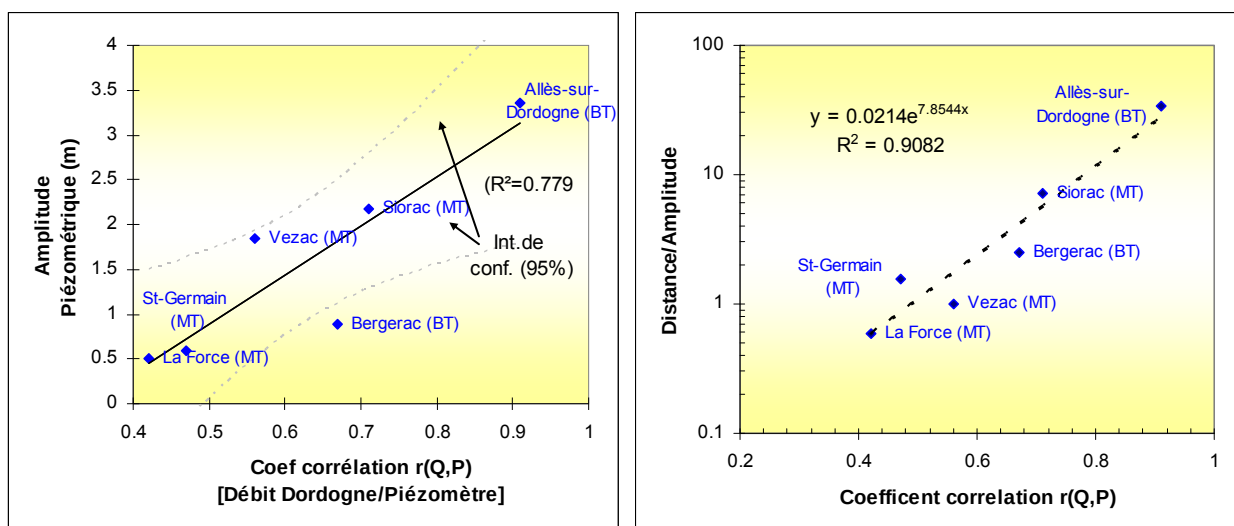


Illustration 15 : Evolution de l'amplitude piézométrique et du rapport Distance à la Dordogne sur Amplitude piézométrique en fonction du coefficient de corrélation croisée $r(Q-P)$

3.2.4. Analyses spectrales simples et croisées sur la pluie, la piézométrie et les débits de la Dordogne

Les analyses spectrales simples réalisées sur les chroniques piézométriques n'ont pas permis de mettre en évidence de phénomène périodique comme les pompages agricoles saisonniers. Elles n'ont pas été représentées.

Il en va de même pour les analyses spectrales réalisées sur les chroniques de débit de la Dordogne (Gardonne et Cénac) dans l'objectif de mettre en évidence l'influence de ces mêmes pompages sur le débit de la rivière.

3.2.5. Bilan de l'approche fonctionnelle

L'étude des chroniques piézométriques des ouvrages suivis en continu par une approche fonctionnelle reposant sur les techniques du traitement du signal a apporté des éléments de connaissance nouveaux à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de l'hydrosystème de la nappe alluviale de la Dordogne.

La réponse des hydrosystèmes à la pluie efficace est complexe et retardée. Elle se caractérise par deux pics plus ou moins bien exprimés selon la localisation de l'ouvrage (basses ou moyennes terrasses) :

Pour le groupe des ouvrages présentant une inertie importante (Siorac, St Germain et La Force), le maximum de réponse (deuxième pic) se produit une trentaine de jours environ après un épisode de précipitations efficaces.

La réponse des aquifères à la pluie apparaît très atténuée (coefficient de corrélation croisée « Pluie-Piézométrie » de l'ordre de 0.1), ce qui suggère que les formations sont faiblement diffusives (rapport transmissivité/emmagasinement faible).

Les résultats des analyses croisées « Débit – Pluviométrie » permettent, quant à eux, de supposer que les pics observés pour un décalage de l'ordre de 10 jours ont pour origine une connexion hydraulique entre la nappe et la Dordogne.

Dans le secteur de Siorac, la nappe des moyennes terrasses présenterait une bonne connexion hydraulique avec la nappe des basses terrasses, elle-même en connexion hydraulique directe avec la Dordogne.

Pour les ouvrages de Saint-Germain-et-Mons et La Force, les nappes des moyennes terrasses apparaissent globalement peu ou mal connectées avec la nappe des basses terrasses.

Pour le groupe des ouvrages présentant une inertie moyenne (Bergerac) ou une inertie faible (Allès et Vézac), le deuxième pic est observé entre 22 et 26 jours après un épisode de précipitations efficaces.

La réponse des aquifères à la pluie apparaît, là aussi, atténuée (coefficient de corrélation croisée « Pluie-Piézométrie » compris entre 0.15 et 0.25), ce qui indique que l'hydrosystème filtre de manière importante le signal de la pluie.

Les analyses croisées « Débit – Pluviométrie » permettent de montrer que le premier pic observé pour des décalages compris entre 3 et 9 jours est lié à la connexion hydraulique directe des nappes avec la Dordogne (coefficient de corrélation croisé compris entre 0.56 et 0.91).

Pour l'ensemble des ouvrages, on montre qu'il existe une relation linéaire entre l'amplitude des variations piézométriques et le coefficient de corrélation croisée Débit/Piézométrie et que ce dernier est relié de manière exponentielle au paramètre Distance/Amplitude.

Enfin, il convient de noter que les analyses spectrales réalisées sur les chroniques piézométriques et les chroniques de débit de la Dordogne (Gardonne et Cénac) n'ont pas mis en évidence l'influence des pompages agricoles menés en période estivale sur le niveau des nappes ou le débit de la rivière.

3.3. ANALYSE DES DEBITS CLASSES DE LA DORDOGNE ET DES HAUTEURS CLASSEES DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES.

3.3.1. Principe

La méthode d'analyse des débits classés, initialement proposée par Mangin (1971) pour l'étude des systèmes karstiques, a été testée dans le cadre de cette étude afin d'identifier l'influence des pompages sur les chroniques de débit (Dordogne à Cénac et Gardonne) et les chroniques piézométriques des ouvrages suivis en continu.

La méthode consiste à classer les débits par « classes de débit », à calculer la fonction de répartition empirique de la série, à reporter les résultats sur un graphique présentant une échelle de probabilité de type Log-Normal et enfin à repérer les ruptures de pente traduisant des modifications du comportement hydrodynamique.

Pour le karst, cette méthode est utilisée pour caractériser les différents régimes d'écoulement observables au niveau d'un exutoire et identifier des événements particuliers de type mise en fonctionnement d'un trop plein ou fuites vers un autre système à partir d'une analyse des modifications qu'ils induisent sur les hydrogrammes (Marsaud, 1997).

Dans le cas de la nappe alluviale de la Dordogne, la méthode a été appliquée pour identifier d'éventuels seuils de débits ou de hauteurs piézométriques liés à l'influence des prélèvements agricoles.

3.3.2. Analyse des débits classés

L'illustration 16 représente les résultats obtenus pour les débits de la Dordogne à Cénac et à Gardonne. Des ruptures de pente sont mises en évidence pour les forts pourcentages de probabilités cumulées, ce qui correspond aux périodes de hautes eaux et plus précisément aux périodes de crue de la Dordogne. Elles correspondent à

des débits caractéristiques de l'ordre de 800 m³/s pour la station de Cénac et de 1400 m³/s pour la station de Gardonne.

Les pentes (α_2) des droites définies pour les débits supérieurs à 800 et 1400 m³/s apparaissent supérieures aux pentes (α_1) des droites définies pour les débits inférieurs aux débits caractéristiques. Ce type de comportement s'interprète généralement comme une « fuite » ou un débordement de la station de jaugeage. Dans ces conditions, on peut imaginer que les débits de crue sont sous-estimés.

Dans la mesure où les courbes des débits classés ne présentent pas de ruptures de pente pour les faibles pourcentages de probabilité cumulés, on peut émettre l'hypothèse que les prélèvements d'eau souterraine effectués dans la nappe d'accompagnement de la Dordogne n'engendrent pas une modification importante de l'hydrodynamique du cours d'eau.

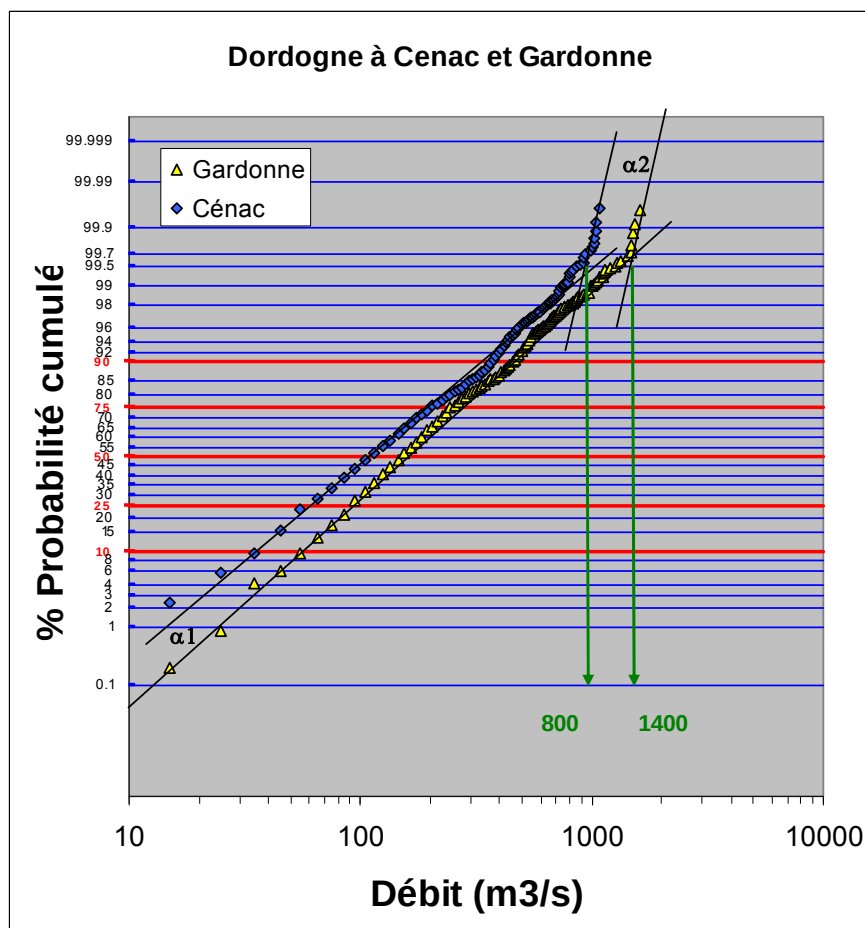


Illustration 16 : Débits classés de la Dordogne à Cénac et à Gardonne

3.3.3. Analyse des hauteurs classées

L'interprétation des graphiques représentant les hauteurs classées des piézomètres suivis en continu repose, de la même façon que pour les débits classés, sur l'identification d'anomalies (ruptures de pente) affectant la droite représentative.

Les illustrations 17 et 18 mettent en évidence des ruptures de pente systématiques pour des pourcentages de probabilité cumulés compris entre 15 et 50%, ce qui correspond globalement aux périodes de basses et de moyennes eaux.

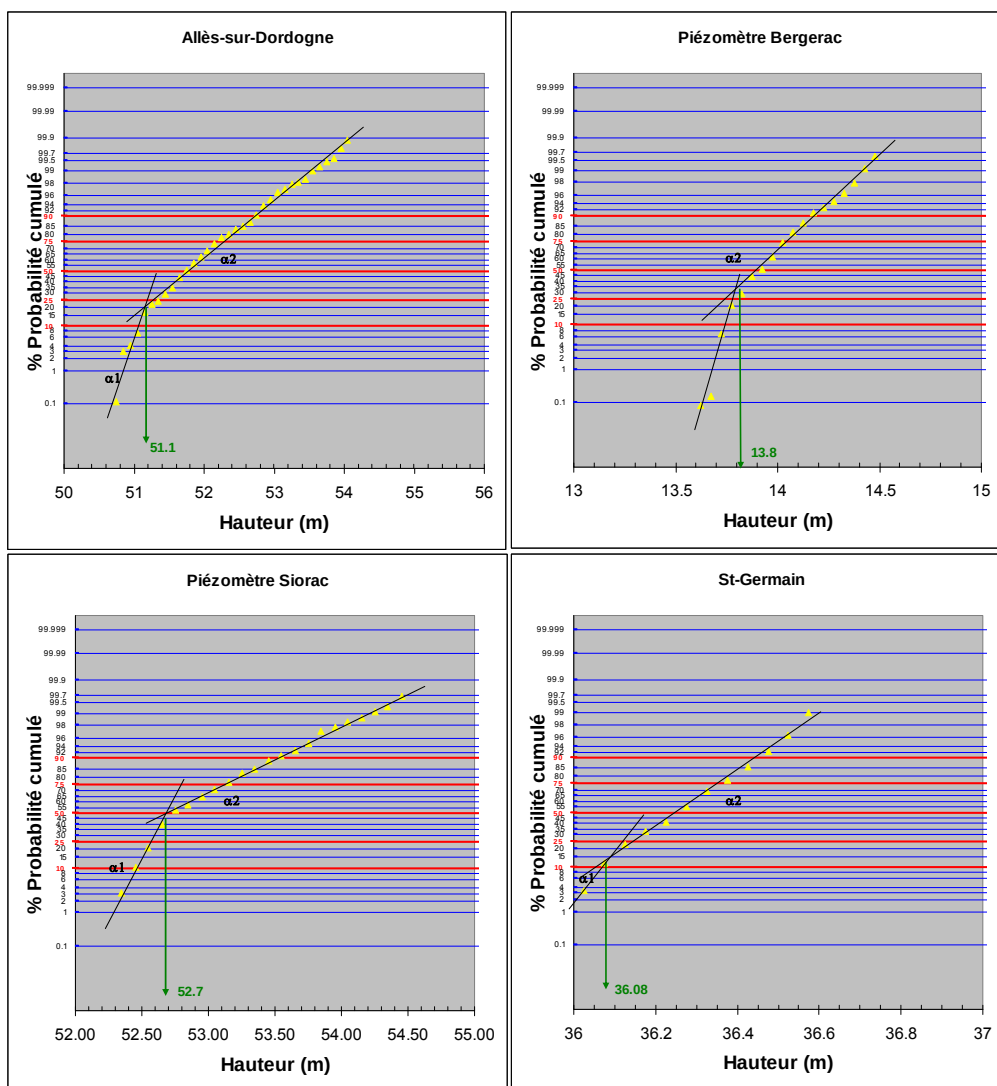


Illustration 17 : Evolution des hauteurs classées des sites d'Allès-sur-Dordogne, Bergerac, Siorac et St-Germain

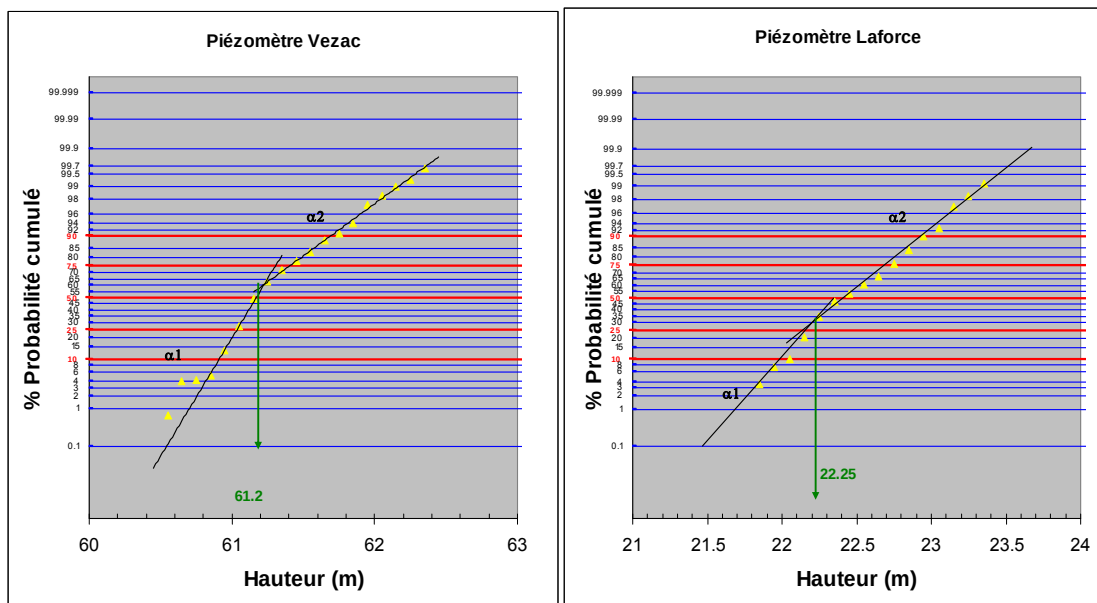


Illustration 18 : Evolution des hauteurs classées des sites de Vézac et La Force

Nom du Site	Hauteur piézométrique associée à la rupture des hauteurs classées (m)	% Probabilité cumulée associée à la rupture des hauteurs classées
08077X0022 Siorac	52.7	50
08066X0052 Bergerac	13.8	25
08067X0022 St-Germain	36.08	15
08076X0043 Allès-sur-Dordogne	51.1	20
08086X0032 Vézac	61.2	50
08057X0014 La Force	22.25	30

Tableau 2 : Synthèse des paramètres déduits de l'analyse des hauteurs piézométriques classées

Il apparaît que les pentes α_2 des droites définies pour les hauteurs piézométriques supérieures aux points de rupture sont inférieures aux pentes α_1 . Ce comportement évoque le piégeage d'une réserve lors des périodes de hautes eaux et la restitution au cours du tarissement mais les prélèvements agricoles pourraient aussi être à l'origine de telles ruptures.

Pour tester cette dernière hypothèse, une nouvelle variable exprimant la hauteur d'eau située sous la valeur de la hauteur piézométrique associée à la rupture des hauteurs classées en fonction du temps a été calculée pour chaque piézomètre (exemple : H Allès bis = H Allès – 51.1).

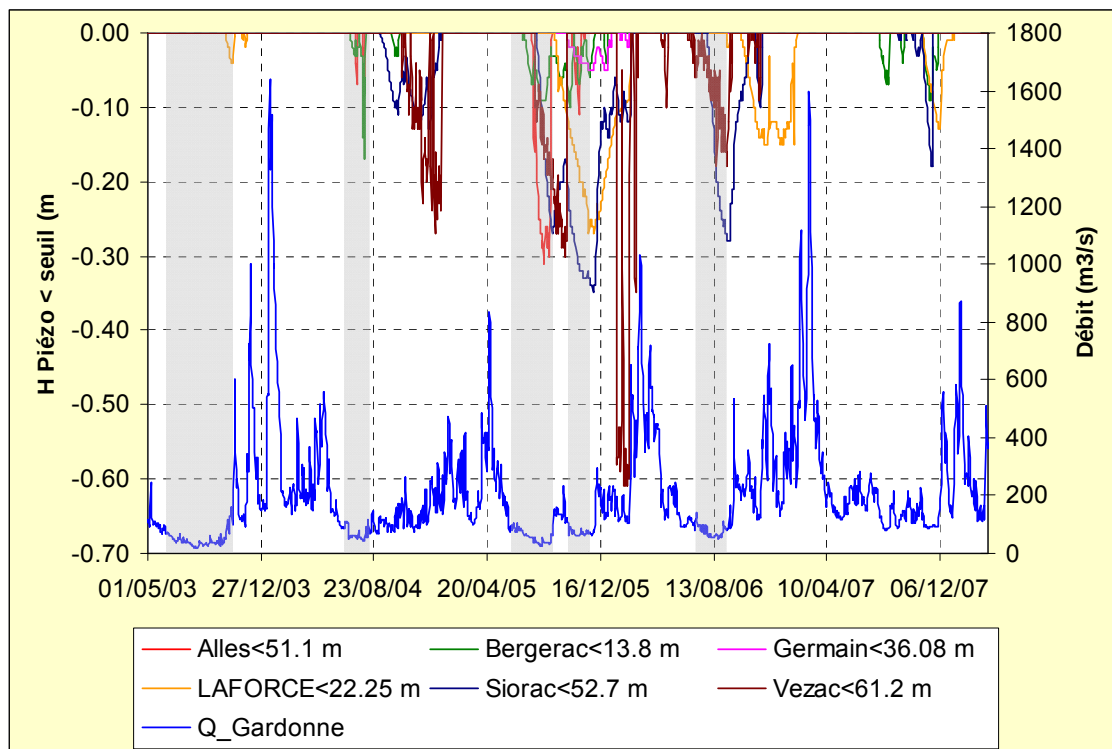


Illustration 19 : Evolution temporelle, pour chaque ouvrage, de la partie de la chronique piézométrique inférieure à la hauteur critique caractérisée à l'aide de l'analyse des hauteurs classées. Les débits de la Garonne sont également reportés. Les zones grisées correspondent aux périodes durant lesquelles le débit de la Dordogne à Gardonne est inférieur à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (= 1^{er} Quartile)

Seules les valeurs inférieures ou égales à zéro ont été représentées sur l'illustration 19. En confrontant l'évolution de ces nouvelles variables (exemple : H Allès < 51.1 m) à celle du débit de la Dordogne, on cherche à voir s'il existe une correspondance entre les faibles débits de la Dordogne et les faibles niveaux piézométriques.

Dans la mesure où sur la période 2003-2007, les minimums des niveaux piézométriques ne coïncident pas ou peu avec les périodes durant lesquelles le débit de la Dordogne à Gardonne est inférieur à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (périodes estivales), il n'est pas possible d'attribuer les ruptures de pente mises en évidence sur les illustrations 17 et 18 aux effets des pompes agricoles.

Les chroniques débitométriques et piézométriques disponibles et analysées semblent donc montrer que les faibles débits de la Dordogne à la station de Gardonne ne sont pas contrôlés par l'état de la nappe entre Cénac et Gardonne.

Compte tenu de cette conclusion, on a cherché à évaluer ce que représentaient les pompes par rapport aux débits écoulés dans la Dordogne.

Le débit moyen journalier (QMJ) à la station de Cénac (amont de la zone d'étude) correspond à 179 m³/s, celui de la station de Gardonne (aval de la zone d'étude), à 257 m³/s.

Entre 2002 et 2007, les débits moyens, calculés sur la période 1^{er} juin/ 30 septembre, ont été entre 1.5 et 6 fois plus faibles que le débit moyen (QMJ) interannuel (cf. Tableau 3).

Pour ces périodes estivales, le débit « d'apport » de la nappe alluviale (ΔQ) entre Cénac et Gardonne a pu être évalué en considérant qu'il correspondait à la différence entre le débit mesuré à la station de Gardonne et la somme des débits de la Dordogne à Cénac et de la Vézère. Il est compris entre 12 et 50 m³/s.

Les prélèvements effectués dans la nappe ont été estimés à 3 millions de m³ en 2002. Si l'on considère qu'ils ont augmenté de 50 % ou qu'ils sont connus à 50 % près, on peut retenir la valeur de 4.5 millions de m³ pour ces exhaures.

Dans ces conditions, les prélèvements sur la période estivale (du 1^{er} juin au 30 septembre) représenteraient entre 2 % ($\pm 1\%$) et 23 % ($\pm 7\%$) des apports globaux de la nappe au débit de la Dordogne entre Cénac et Gardonne.

Exprimés par rapport au volume d'eau total transitant par le cours d'eau durant la période estivale, les volumes prélevés dans la nappe ne représenteraient en moyenne que 1.7 % des volumes d'eau qui s'écoulent dans la Dordogne (entre 0.9% ($\pm 0.2\%$) et 3.5% ($\pm 0.7\%$), selon les cycles hydrologiques).

Date	Q moy Gardonne m3/s	Q moy Cenac m3/s	Q moy Vézère m3/s	ΔQ = Apport "Nappes" m3/s
2002	141	95	28	46
2003	44	22	11	22
2004	88	64	21	24
2005	81	69	11	12
2006	103	68	21	35
2007	165	115	40	50

Tableau 3 : Débit moyen de la Dordogne (Cénac et Gardonne) et de la Vézère au cours des périodes estivales (du 1^{er} juin au 30 septembre) et évaluation du débit d'apport de la nappe à la rivière

3.3.4. Bilan de l'analyse des débits et des hauteurs classés

Les courbes représentant les débits classés ont mis en évidence des ruptures de pente pour des débits respectifs de 800 m³/s à Cénac et 1400 m³/s à Gardonne.

Dans la mesure où ces débits correspondent à des périodes de hautes eaux, il est possible d'écarter l'hypothèse selon laquelle les pompages effectués lors de la période estivale seraient à l'origine d'une modification du comportement hydrodynamique du cours d'eau. Il est en fait plus probable que les ruptures de pente soient liées à un dysfonctionnement des stations de jaugeage.

L'analyse menée sur les hauteurs classées a aussi montré que les minimums des niveaux piézométriques ne coïncidaient pas ou peu avec les périodes durant lesquelles le débit de la Dordogne à Gardonne est inférieur à 100 m³/s.

Il en a été conclu que les ruptures de pente observées sur les courbes représentant les hauteurs classées ne pouvaient pas être liées aux effets des pompages agricoles et que les faibles débits de la Dordogne à la station de Gardonne n'étaient pas contrôlés par l'état de la nappe entre Cénac et Gardonne.

Un rapide calcul a enfin montré que les prélèvements effectués lors de la période estivale (du 1^{er} juin au 30 septembre) représentaient entre 2 % ($\pm 1\%$) et 23 % ($\pm 7\%$) des apports globaux de la nappe au débit de la Dordogne entre Cénac et Gardonne et entre 0.9% ($\pm 0.2\%$) et 3.5% ($\pm 0.7\%$) des volumes d'eau transitant par le cours d'eau.

3.4. ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DES AQUIFERES PAR L'APPROCHE DE MODELISATION TEMPO

Les approches mises en œuvre précédemment ont permis d'apporter des éléments d'information sur le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère alluvial (inertie, typologie de réponse des aquifères aux précipitations, importance ou non de la relation hydraulique avec le cours d'eau de la Dordogne...).

L'utilisation du logiciel TEMPO va permettre de préciser ces résultats préliminaires.

3.4.1. Principe général de TEMPO

Les modélisations faites à l'aide du logiciel TEMPO apportent, à partir du suivi en continu d'un niveau piézométrique ou d'un débit, des renseignements sur les processus de transfert responsables des variations observées et, ce faisant, sur les mécanismes régissant le fonctionnement de l'hydrosystème.

Contrairement à la modélisation directe qui consiste à simuler le fonctionnement d'un hydrosystème à partir des équations générales de l'hydrodynamique souterraine, **la modélisation inverse**, concept sur lequel le logiciel TEMPO est basé, permet de simuler le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de fonctions de transfert reliant

une « variable d'entrée » (par exemple, la pluie efficace) à une « variable de sortie » (par exemple, le niveau de la nappe ou bien le débit à l'exutoire du bassin étudié).

Ces fonctions de transfert sont aussi appelées « réponses impulsionnelles » ou « hydrogrammes unitaires ». Elles peuvent avoir une forme mathématique (ex : une fonction exponentielle) ou bien être directement représentées par une série continue de valeurs. Dans ce cas, ces dernières sont calculées de façon à minimiser les écarts entre les observations et les simulations (techniques d'inversion).

3.4.2. Application à la zone d'étude

Dans le cadre de cette d'étude, une modélisation a été mise en œuvre pour les ouvrages d'Allès, La Force et Siorac, leurs chroniques pouvant illustrer les typologies de fonctionnement des aquifères de la zone d'étude.

3.4.3. Présentation du modèle de transfert établi pour l'ouvrage d'Allès (hydrauliquement bien connecté à la Dordogne)

La technique d'inversion du logiciel TEMPO consiste à calculer le ou les hydrogrammes unitaires (cf. Illustration 20) et le seuil Oméga de pluie efficace (cf. Illustration 21) de telle sorte que le niveau d'eau simulé par le modèle soit le plus proche possible des observations (cf. Illustration 22).

Ce seuil Oméga est estimé à partir de la pluie et de l'ETP (ou ETR) de telle façon que seule la hauteur de pluie située au-dessus de ce seuil génère une réponse du système (les précipitations situées en deçà sont évapotranspirées et ne participent donc pas au fonctionnement de l'hydrosystème). Il est calculé à partir de la réponse impulsionnelle du système à la pluie et à l'ETP (cf. Illustration 23), également obtenues par inversion.

Compte tenu des résultats présentés précédemment, un modèle de transfert à 2 entrées (pluie et débit de la Dordogne) a été établi pour le piézomètre d'Allès (cf. Illustration 24). Il convient de souligner qu'en utilisant le débit de la Dordogne comme entrée, on privilégie le rôle alimentant de la Dordogne et que l'on occulte son éventuel rôle drainant.

Le modèle permet de reproduire de manière satisfaisante l'évolution observée. Le critère de Nash (qui est d'autant plus proche de 1 que la qualité de la simulation est bonne) est en effet élevé (0.89).

La réponse globale du système se caractérise par deux fonctions de transfert : l'une pour la pluie efficace (recharge), l'autre pour les débits de la Dordogne (cf. Illustration 230). Leurs variations relatives sont représentées sur l'illustration 24.

La réponse impulsionnelle du système à la recharge présente un maximum pour un décalage de 5 jours environ puis décroît lentement et de manière exponentielle jusqu'à un décalage de 140 jours environ (cf. illustration 22).

La réponse impulsionnelle du système au débit de la Dordogne présente, quant à elle, un pic maximum pour un décalage de 1 jour puis décroît très rapidement pour disparaître lorsque le décalage atteint 4 jours (cf. illustration 22).

En termes de fonctionnement, il apparaît que près de 61 % de la variance observée au piézomètre d'Allès est expliquée par le débit de la Dordogne.

Le modèle de transfert établi a ensuite été utilisé pour calculer les niveaux piézométriques sur la période 2000-2007 ; période où les données de pluie et de débit de la Dordogne étaient disponibles (cf. Illustration 25).

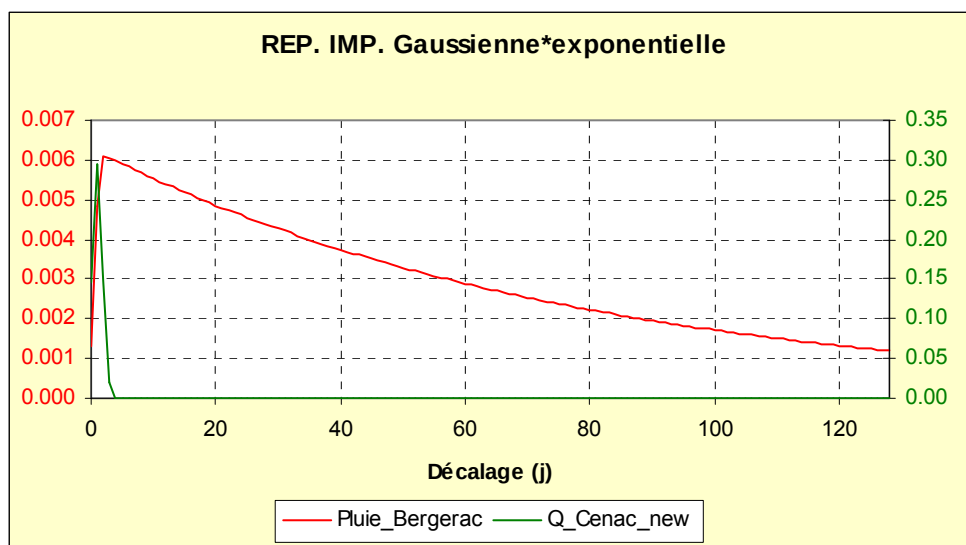


Illustration 20 : Réponses impulsionnelles du modèle de transfert «Allès »

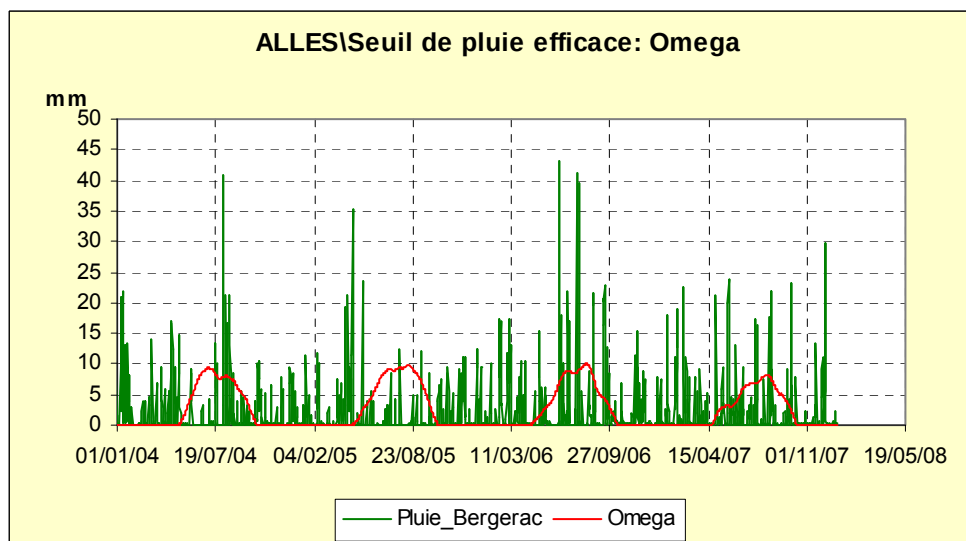


Illustration 21 : Evolution du seuil Oméga du modèle de transfert « Allès »

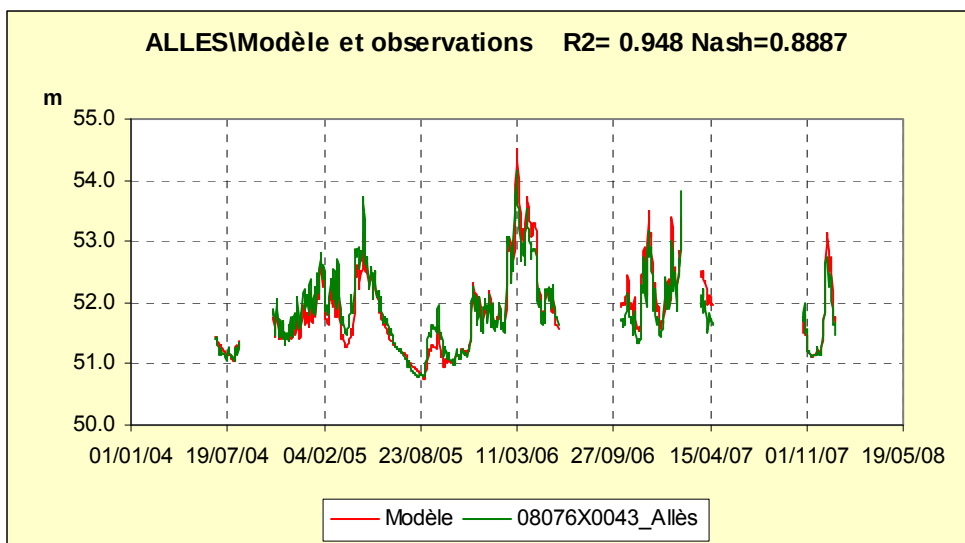


Illustration 22 : Comparaison du modèle aux observations (modèle de transfert « Allès »)

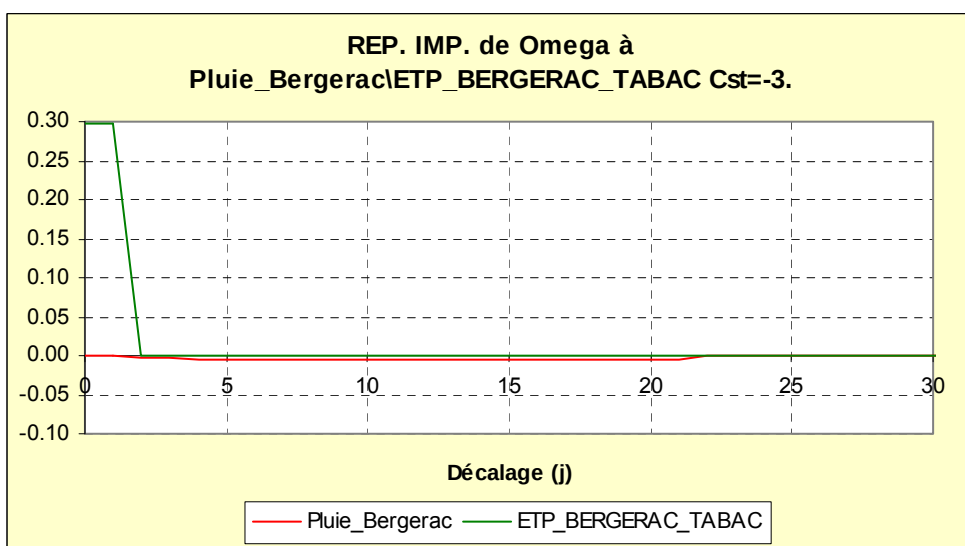


Illustration 23 : Réponses impulsionnelles des chroniques d'entrée (pluie et ETP) permettant le calcul de la fonction seuil Oméga

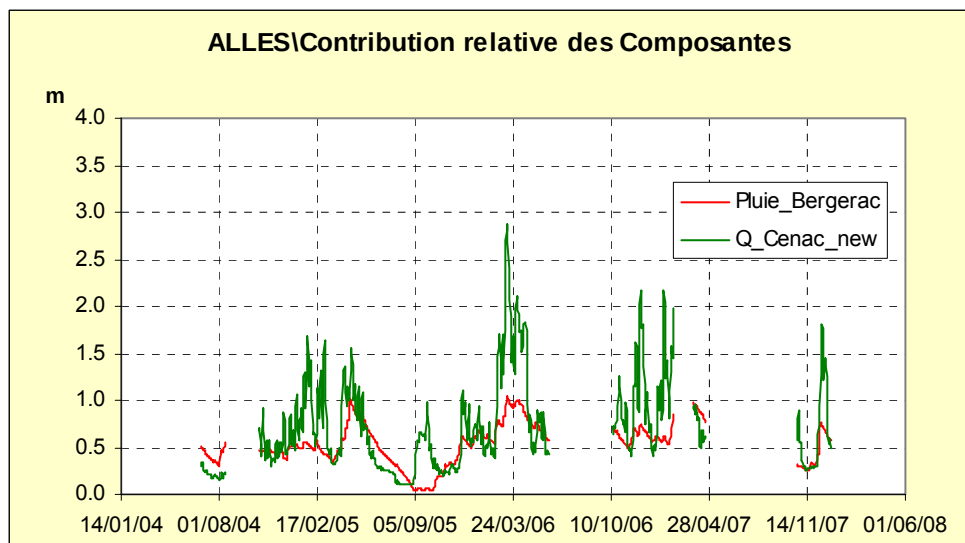


Illustration 24 : Evolution relative des différentes composantes du modèle de transfert « Allès »

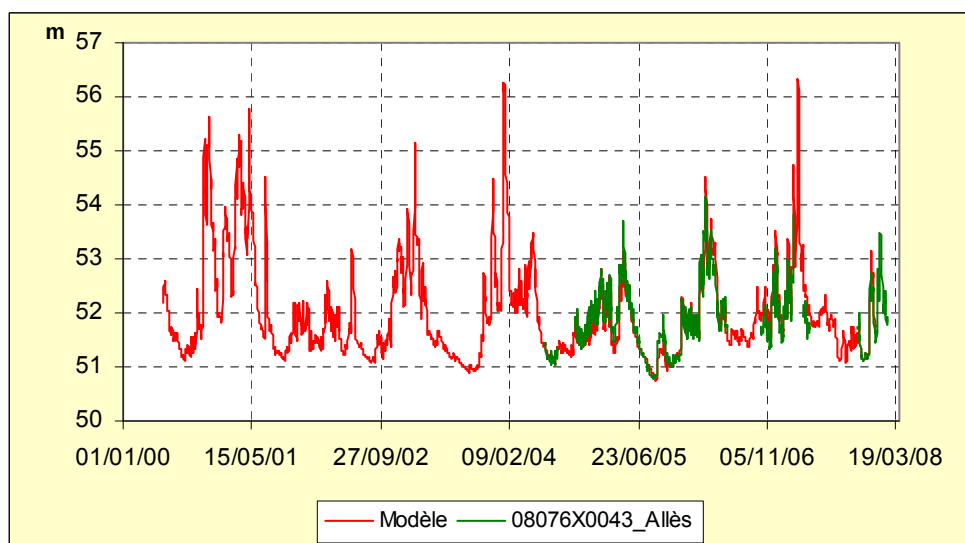


Illustration 25 : Reconstitution de la piézométrie de l'ouvrage Allès sur la période 2000-2007 à l'aide du modèle de transfert « Allès »

3.4.4. Présentation du modèle de transfert établi pour l'ouvrage de Siorac (hydrauliquement connecté à la Dordogne)

Les résultats de la modélisation obtenus par le modèle de transfert « Siorac » permettent de reproduire de manière satisfaisante l'évolution piézométrique observée (cf. Illustration 26). Le critère de Nash atteint en effet la valeur de 0.86.

Là encore, compte tenu des résultats présentés précédemment, un modèle de transfert à 2 entrées (pluie et débits de la Dordogne) a été mis en œuvre.

Comme pour Allès, la réponse globale du système est caractérisée par deux fonctions de transfert : l'une pour la pluie efficace, l'autre pour les débits de la Dordogne (cf. Illustration 28) dont les variations relatives sont représentées sur l'illustration 28.

La réponse rapide de l'aquifère au débit de la Dordogne présente un pic maximum pour un décalage de 13 jours environ et décroît rapidement pour disparaître lorsque le décalage atteint 50 jours environ. Cette réponse retardée est à mettre en relation avec le caractère très inertiel de l'hydrosystème (cf. analyses corrélatrices simples et croisées) et indique également que les temps de transfert de la pluie efficace à la nappe sont importants.

En termes d'influence, il apparaît que près de 45 % de la variance observée au piézomètre de Siorac est expliquée par le débit de la Dordogne.

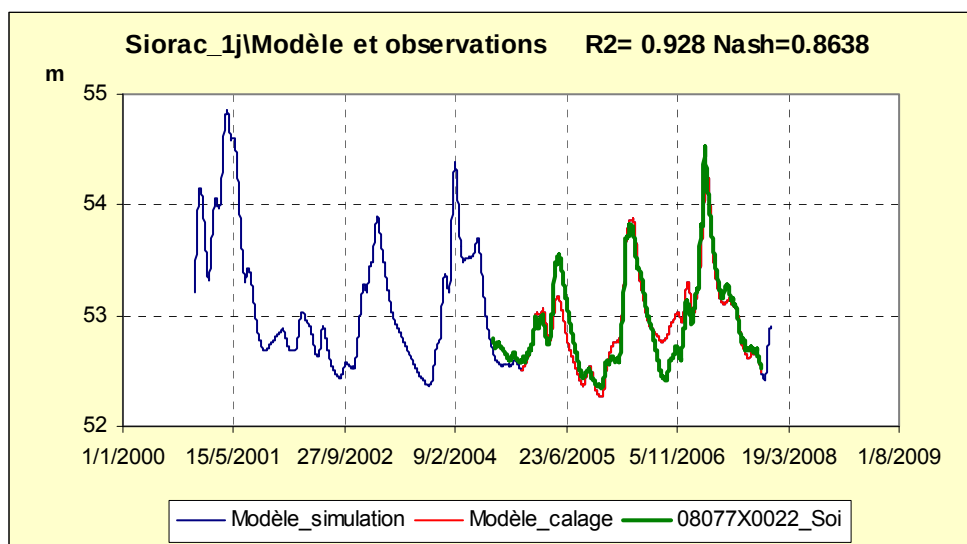


Illustration 26 : Comparaison du modèle aux observations (modèle de transfert « Siorac ») et reconstitution de la piézométrie de l'ouvrage sur la période 2000-2004

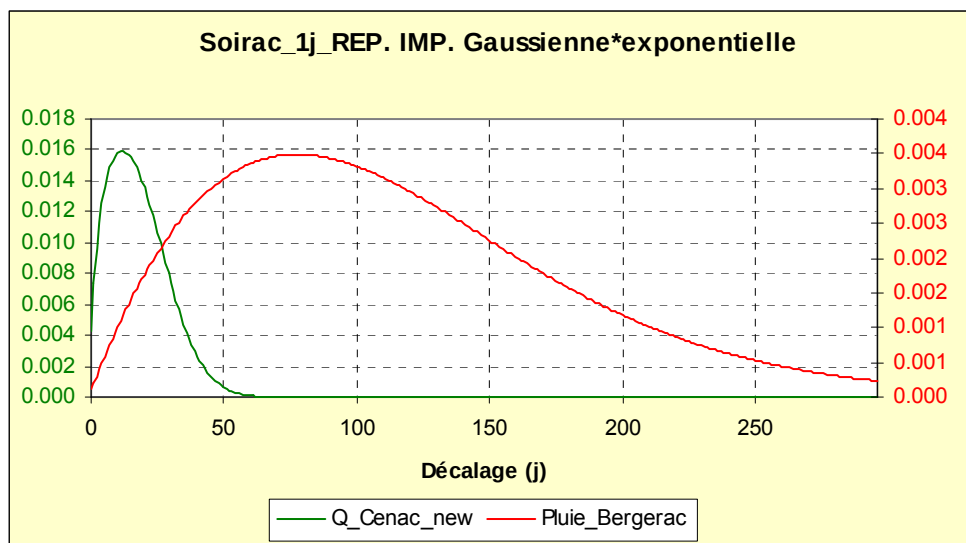


Illustration 27 : Réponses impulsionnelles du modèle de transfert «Siorac »

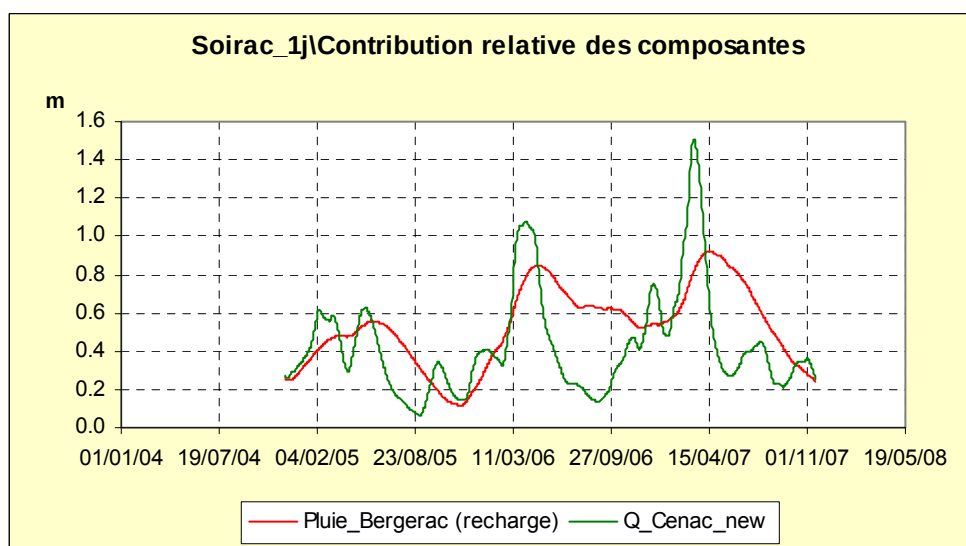


Illustration 28 : Evolution relative des différentes composantes du modèle de transfert
« Siorac »

3.4.5. Présentation du modèle de transfert établi pour l'ouvrage de La Force (hydrauliquement non ou très peu connecté à la Dordogne)

Le modèle de transfert établi permet de reproduire de manière acceptable l'évolution piézométrique observée (cf. Illustration 29). Le critère de Nash est moins élevé que pour les 2 premiers modèles. Il atteint néanmoins la valeur de 0.69.

Contrairement aux exemples traités précédemment, la prise en compte des débits de la Dordogne ne permet pas d'améliorer la qualité de la simulation. Cela confirme que la connexion hydraulique entre le piézomètre et la Dordogne est très faible, voire inexistante.

En termes de fonctionnement, on montre que la recharge par les pluies efficaces est complexe (cf. Illustration 30). La recharge présente en effet un maximum 40 à 60 jours après une pluie efficace puis décroît jusqu'à des décalages de l'ordre de 300 jours environ.

Cette réponse retardée est à mettre en relation directe avec le caractère très inertiel de l'hydrosystème et indique également que les temps de transfert de la pluie efficace vers la nappe sont importants.

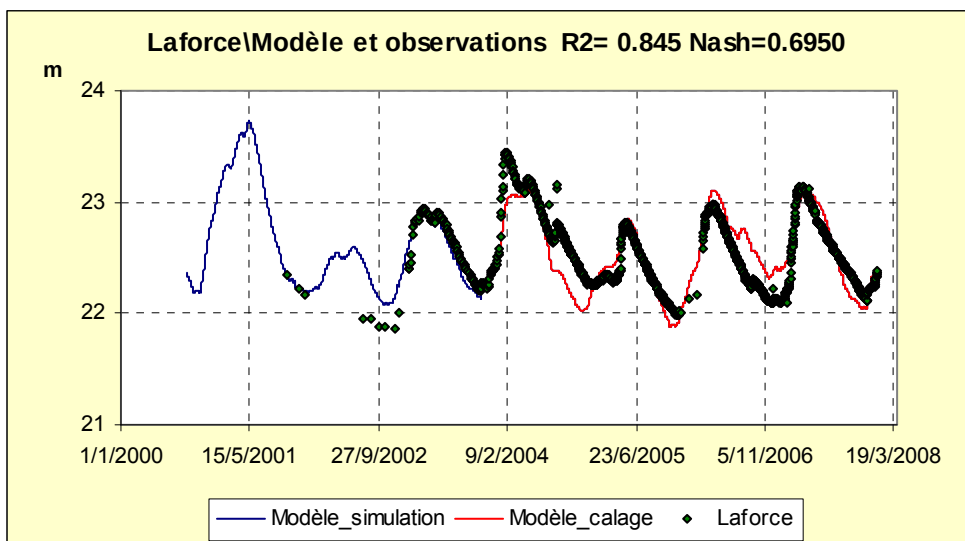


Illustration 29 : Comparaison du modèle aux observations (modèle de transfert « La Force ») et reconstitution de la piézométrie de l'ouvrage sur la période 2000-2003

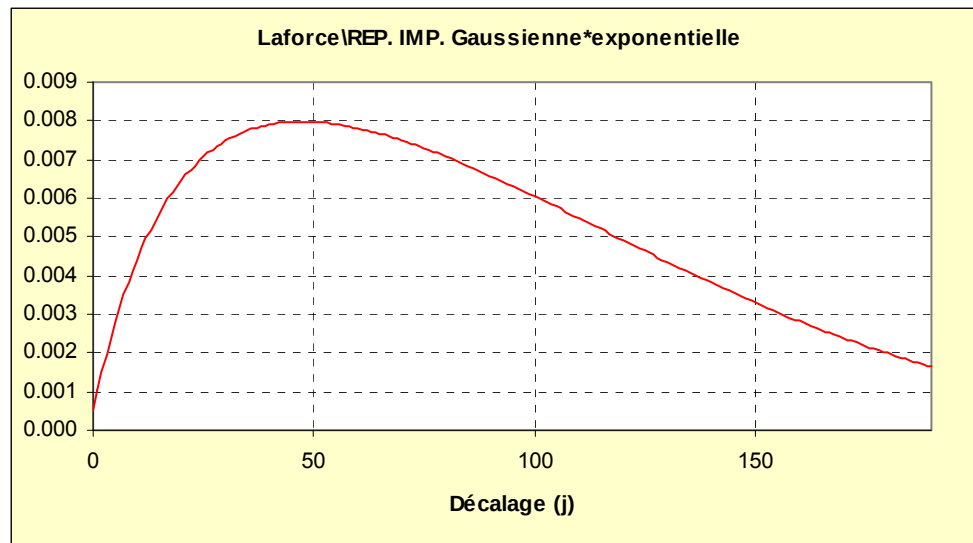


Illustration 30 : Réponses impulsionnelles du modèle de transfert «La Force »

3.4.6. Présentation du modèle de transfert établi pour la Dordogne

Il a été montré précédemment qu'il fallait prendre en compte de manière explicite les débits de la Dordogne pour expliquer les évolutions piézométriques de certains piézomètres, en particulier ceux d'Allès et de Siorac.

L'objectif du travail qui suit est d'établir un modèle de transfert pour les débits de la Dordogne afin de prévoir, dans un second temps, les débits de la Dordogne et les niveaux piézométriques de la nappe alluviale en fonction de la probabilité d'occurrence de contextes hydroclimatiques.

Le modèle de transfert pour la Dordogne à Gardonne est défini par deux entrées :

- le débit de la Dordogne à Cénac (contribution imposée de 59.6 % = pourcentage correspondant au rapport des surfaces des bassins versants respectifs (8705 km² et 14600 km²)),
- la contribution de la recharge par les pluies efficaces qui intègre, en fait, tous les apports d'eau à la Dordogne entre Cénac et Gardonne (Vézère, nappe alluviale, sources).

L'illustration 31 montre que le modèle créé permet de reproduire de manière satisfaisante les débits de la Dordogne à Gardonne. Les réponses impulsionnelles, représentées sur l'illustration 32 mettent, quant à elles, en évidence une composante rapide (composante probablement liée aux apports de la Vézère) et une composante lente permettant d'exprimer les apports d'eau souterraine (nappe alluviale et sources karstiques) qui contribuent à alimenter la Dordogne entre Cénac et Gardonne.

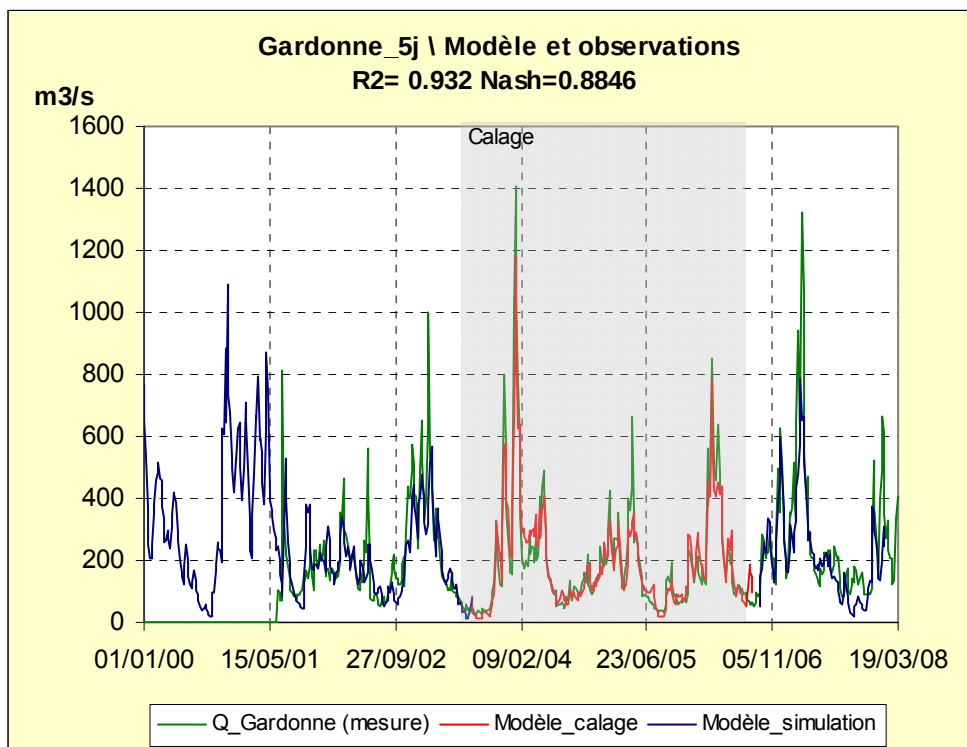


Illustration 31 : Modèle de transfert « Gardonne » : comparaison du modèle aux observations sur la période août 2003-août 2006 et reconstitution des débits sur la période 2000-2008

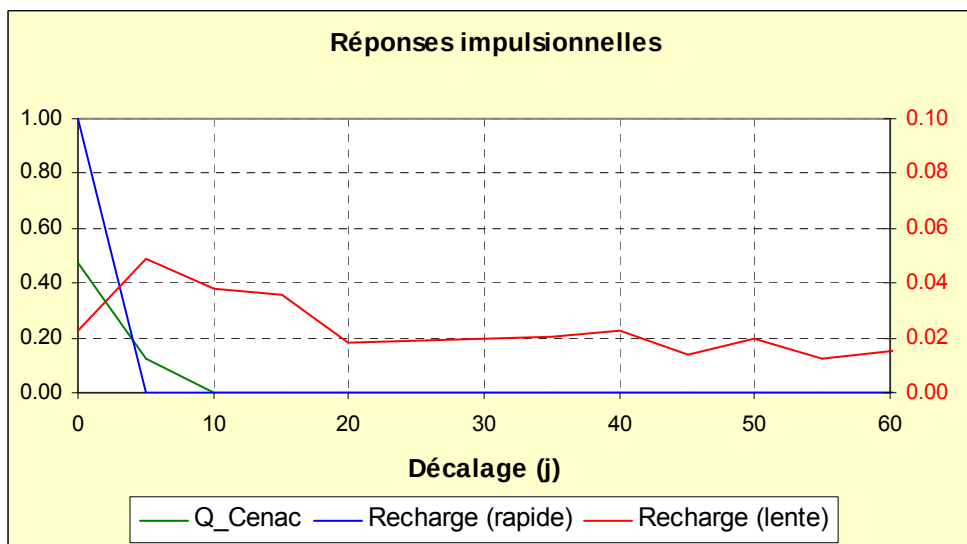


Illustration 32 : Réponses impulsionnelles du modèle de transfert «Gardonne »

Préalablement à l'utilisation du modèle « Gardonne » en mode prévisionnel, un modèle de transfert permettant de reproduire les débits de la Dordogne à Cénac a du être établi en tenant compte des précipitations affectant le bassin versant situé à l'amont de la station (8705 km²). Les données de 3 stations ont été récupérées sur la période 1998-2007 (cf. Tableau 4).

On a ensuite déterminé quelles étaient les stations qui permettaient d'expliquer au mieux la variance des débits mesurés à Cénac à l'aide de l'option de pondération des chroniques de pluie de Tempo.

Cette fonctionnalité consiste à établir le corrélogramme croisé « pluie-débit » à partir d'une combinaison linéaire des poids associés à chaque chronique de pluie.

Les meilleurs résultats ont été obtenus avec la combinaison suivante :

$$\text{Pluie optimum}_{BV} = 0 \cdot P_{15097001} + 0.45 \cdot P_{46128002} + 0.55 \cdot P_{15120005}$$

L'option « modèle paramétrique » de Tempo (où la recharge par les précipitations est décrite par une réponse impulsionnelle qui convolue une fonction analytique complexe constituée de deux réservoirs (Modèle de Samani et Ebrahimi, 1996) et où la vidange de la zone noyée est décrite par une fonction exponentielle décroissante) a ensuite été utilisée pour reproduire au mieux les débits d'étiage de la Dordogne à Cénac.

L'étape suivante a consisté à calculer les réponses impulsionnelles (Illustration 33) et le seuil Oméga de pluie efficace (non présenté) de telle sorte façon que le modèle soit le plus proche possible du débit de la Dordogne à Cénac (cf. Illustration 34).

Au final, les pics de crue et les périodes de tarissement sont globalement assez bien reproduits. Le critère de Nash atteint la valeur de 0.73.

Numéro	Nom	Lambert II étendu	Altitude	Producteurs
15097001	LASTIC	Lambert Y (hm) 20131 Lambert X (hm) 6690	1100 mètres	De 1998 a 2007 METEO-FRANCE
15120005	MAURIAC	Lambert Y (hm) 20246 Lambert X (hm) 5965	674 mètres	De 1998 a 2007 METEO-FRANCE
46128002	GRAMAT - PARC	Lambert Y (hm) 19734 Lambert X (hm) 5518	309 mètres	De 1998 a 2007 METEO-FRANCE

Tableau 4 : Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées pour le modèle de transfert « Dordogne à Cénac ».

Dans ce cas, la réponse impulsionnelle rapide de la recharge peut être interprétée comme une composante de ruissellement de surface et la réponse impulsionnelle lente, comme la réponse de la composante souterraine au fonctionnement du système.

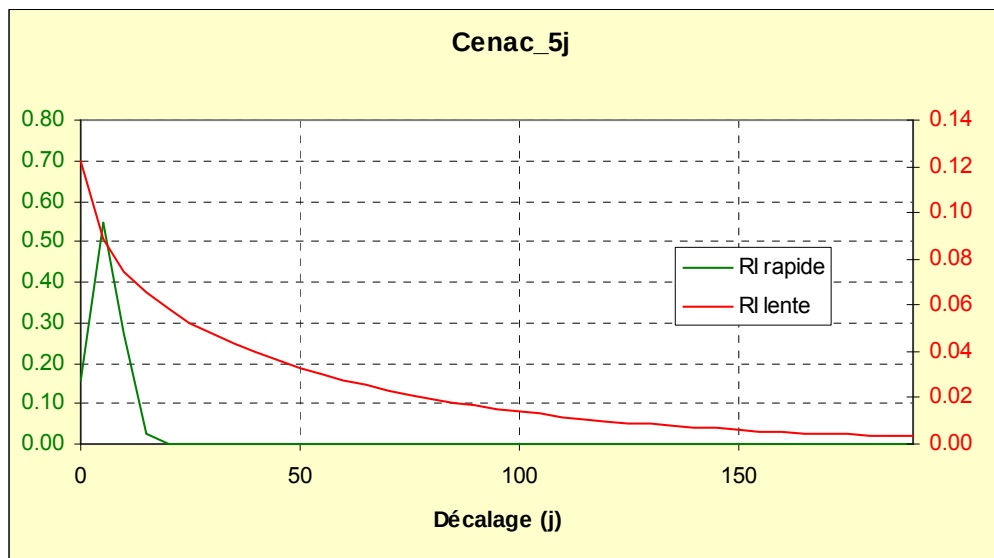


Illustration 33 : Réponses impulsionnelles du modèle de transfert «Cénac »

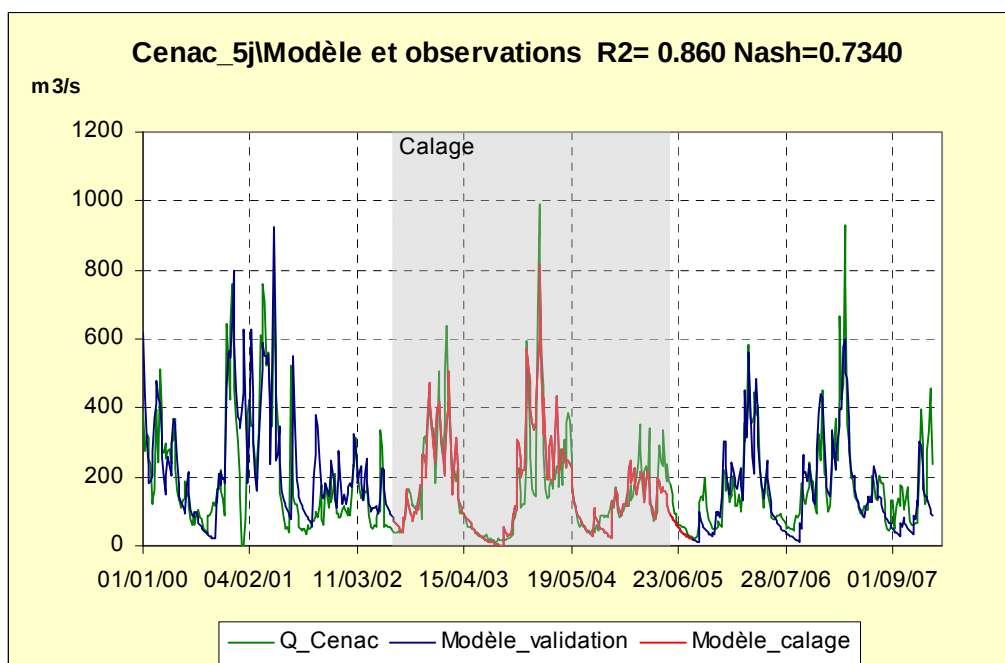


Illustration 34 : Modèle de transfert « Cénac» : comparaison du modèle aux observations sur la période août 2003-août 2006 et reconstitution des débits sur la période 2000-2008

3.4.7. Bilan

A l'issue de cette phase de travail, 5 modèles de transfert sont disponibles :

- un premier pour l'ouvrage d'Allès qui est représentatif des ouvrages bien connectés à la Dordogne,
- un second pour l'ouvrage de Siorac qui est représentatif des ouvrages dont la connexion avec la Dordogne est moins importante,
- un troisième pour l'ouvrage de La Force dont la connexion avec la Dordogne est très faible à nulle,
- un quatrième pour le débit de la Dordogne à Cénac (contrôle amont),
- un cinquième pour le débit de la Dordogne à Gardonne (contrôle aval).

Ils vont être utilisés en mode prévisionnel dans la partie suivante.

3.5. SIMULATION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES ET DES DEBITS DE LA DORDOGNE EN MODE PREVISIONNEL

3.5.1. Préambule

La génération de séries de pluies et d'ETP s'impose dès lors que l'on souhaite estimer la période de retour d'un niveau piézométrique avec précision. Ceci est particulièrement vrai lorsqu'on s'intéresse à des systèmes dont les temps de régulation sont supérieurs à une année (des événements exceptionnels dont la période de retour est élevée ne peuvent pas faire l'objet d'une simple analyse basée sur l'observation d'une succession de données annuelles indépendantes) ou lorsque la période d'observation est courte.

Les séries aléatoires de pluie et d'ETP qui sont utilisées à l'entrée des modèles de transfert peuvent être générées en très grand nombre, permettant ainsi une analyse statistique fiable des niveaux ou des débits simulés.

Pour utiliser un modèle de transfert en mode prévisionnel, il faut donc au préalable construire des « générateurs aléatoires » de pluie et d'ETP dont les caractéristiques satisfassent un certain nombre de conditions déduites de l'analyse des séries temporelles de pluie et d'ETP observées. La prévision d'une séquence de pluie faisant directement suite à une séquence observée est en effet relativement contrainte par le phénomène d'autocorrélation. Il en va de même pour l'ETP.

Les modèles précédemment établis ont permis de reproduire de manière satisfaisante les évolutions mesurées (piézométrie, débit de la Dordogne) et d'identifier les différentes réponses impulsionnelles. Ces dernières vont désormais permettre de simuler de manière prévisionnelle l'évolution des débits et des niveaux piézométriques en fonction des conditions hydroclimatiques.

Dans un premier temps, les différentes étapes qui aboutissent à la création des générateurs de pluie et d'ETP à partir de la détermination des fonctions caractéristiques seront décrites. Les résultats statistiques obtenus au moyen des modèles prévisionnels, à partir d'un grand nombre de relations pluie-débit ; pluie-piézométrie seront ensuite présentés.

Les valeurs de débit de la Dordogne (Cénac et Gadonne) et de hauteurs piézométriques pour différentes probabilités d'occurrence (contexte hydrologique très déficitaire, déficitaire, excédentaire, etc.) seront enfin déterminées.

3.5.2. Le générateur de pluie de Tempo

Le générateur de pluies du logiciel Tempo a été utilisé pour générer de manière stochastique des scénarios de pluie (qui ont les mêmes caractéristiques que la pluie observée). Les chroniques de pluie observées sont celles utilisées précédemment (pluies à Bergerac et pluies estimées à l'aide de l'option de pondération pour la méthode de transfert des débits de la Dordogne à Cénac).

• Conditions d'application

Le générateur de pluies de TEMPO permet de générer une ou des séquences de pluies à partir d'une série observée. La séquence générée prolonge la série observée si la date du début de la série simulée correspond à la fin de la série observée.

La simulation d'une séquence de pluies doit satisfaire plusieurs conditions, tant au niveau de la distribution des hauteurs de pluie que des propriétés temporelles des divers événements qui se succèdent.

Ces dernières (probabilité marginale, autocorrélation des événements observés et simulés, loi d'échelle...) ont été vérifiées au moyen des graphiques représentés sur les illustrations 35, 36 et 37.

• Principe de la simulation d'une chronique de pluies

Une période de temps T est définie.

Une hauteur de pluie tirée au hasard à partir de la distribution marginale empirique qui résulte des observations est ensuite affectée à chaque événement. On obtient ainsi une séquence de pluie dont les hauteurs sont distribuées à la manière de la série observée mais qui ne présente aucune structure temporelle (distribution marginale).

Les événements sont alors distribués suivant une loi uniforme sur la période T jusqu'à ce que la moyenne annuelle de la hauteur de pluie simulée soit égale à la moyenne annuelle de la hauteur de pluie observée sur cette même période.

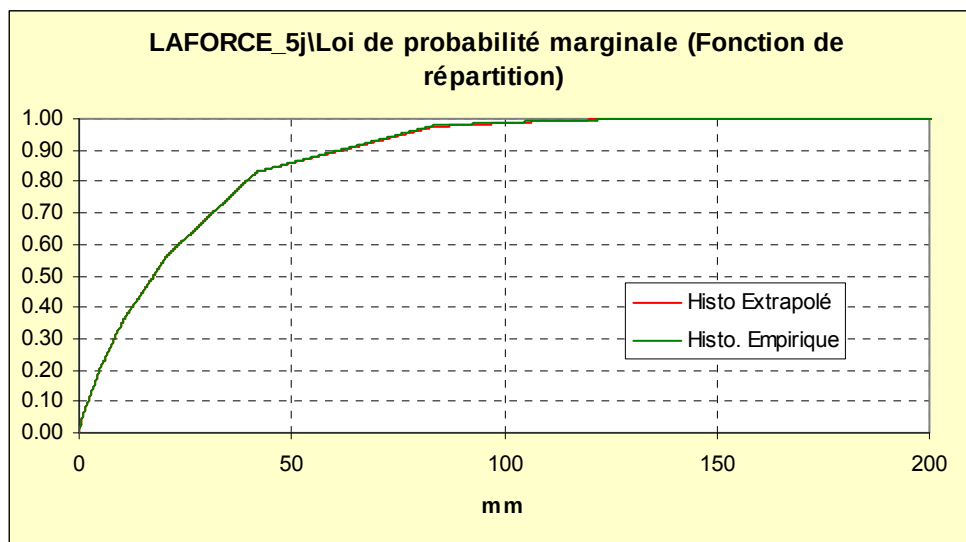


Illustration 35 : Générateur de pluie du modèle La Force_5 j : représentation de la loi de probabilité marginale (loi empirique) de la chronique de pluies de Bergerac

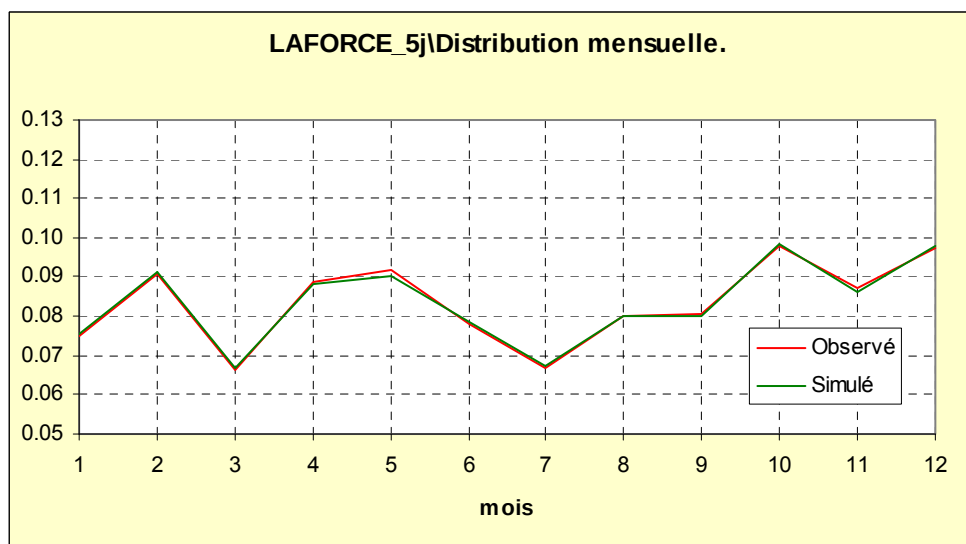


Illustration 36 : Générateur de pluie du modèle La Force : histogramme de la distribution mensuelle de la pluie déduit des observations et de la simulation

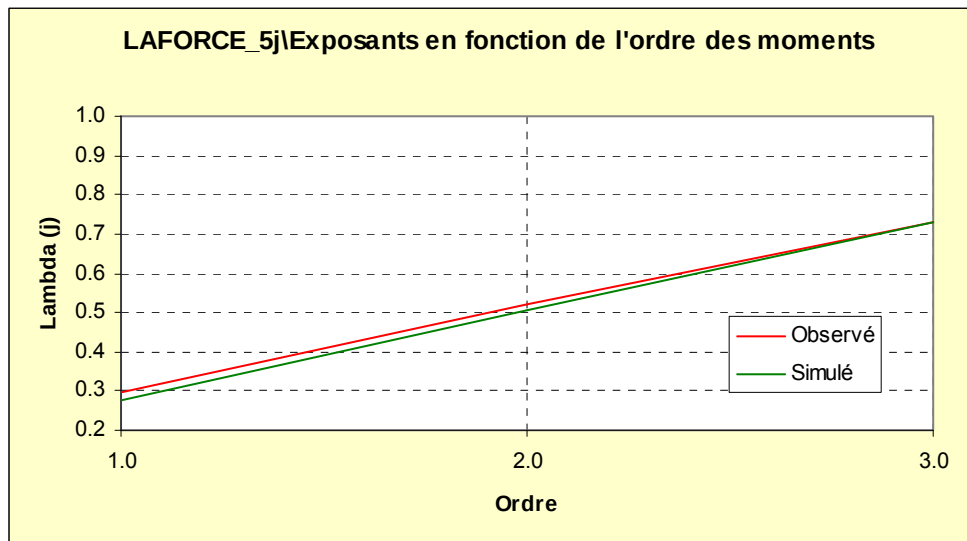


Illustration 37 : Générateur de pluies du modèle La Force : représentation des moments en fonction de l'ordre obtenus à partir des observations et des simulations

Ils sont enfin organisés en réalisant des permutations successives (ces permutations affectent de la même manière les « non événements » correspondant à l'absence de pluie) de façon à minimiser une fonction « objectif » choisie de telle sorte que les différents critères qui définissent la structuration temporelle de la série simulée se rapprochent de ceux qui caractérisent la série observée.

En règle générale, plusieurs centaines d'événements sont nécessaires pour obtenir un bon ajustement entre les propriétés temporelles des séries simulées et observées. La longueur de la série observée doit donc couvrir plusieurs années lorsqu'elle présente une saisonnalité marquée.

L'illustration 38 présente un résultat de simulation obtenu avec le générateur TEMPO. Il convient de mentionner que la compression de l'échelle des abscisses ne permet pas de visualiser les jours sans précipitations et que les chroniques de pluies générées ne peuvent en aucun cas être considérées comme des prévisions météorologiques pour la période 2008-2058.

Ces dernières sont seulement destinées à étudier le comportement de l'hydrosystème pour différents contextes hydroclimatiques qui pourraient se produire compte tenu des caractéristiques des pluies du secteur d'étude déduites des observations.

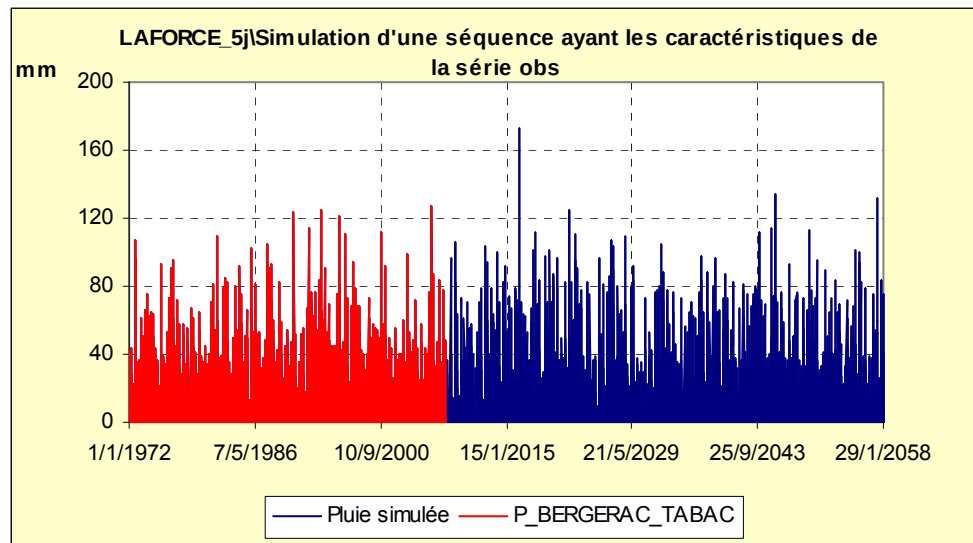


Illustration 38 : Générateur de pluies du modèle La Force : exemple de résultat d'une simulation d'une séquence de pluie (au pas de temps décadaire) ayant les caractéristiques de la série observée

3.5.3. Le générateur d'ETP de Tempo

Sur le même principe que le générateur de pluies, le générateur d'ETP de TEMPO permet de générer une séquence d'ETP à partir d'une série observée.

Le principe consiste à générer le « bruit » formé par les variations autour d'une valeur moyenne mensuelle (cf. Illustration 39) et à faire en sorte que les fonctions d'autocorrélation et de corrélation croisée « Variable climatique – Pluie » des séries observées et simulées soient les plus proches possibles l'une de l'autre (cf. Illustration 40). Il en va de même pour les variations mensuelles observées et simulées de l'écart-type du bruit (cf. Illustration 41).

Comme pour les pluies, la simulation de telles séquences doit satisfaire plusieurs conditions, tant au niveau de la distribution des valeurs d'ETP que des propriétés temporelles des divers événements qui se succèdent. Ces dernières ont été vérifiées au moyen des graphiques représentés sur les illustrations 42 et 43.

L'illustration 44 représente un exemple de simulation de pluies et d'ETP.

3.5.4. Représentation des résultats

Une manière de représenter la probabilité d'occurrence P d'un débit ou d'un niveau piézométrique modélisé consiste à faire une partition de la population statistique constituée par l'ensemble des valeurs prises par le débit au temps t.

Dans le cas où $P=0.5$, le quantile divise la distribution statistique en deux parties d'effectifs égaux : il s'agit dans ce cas de la médiane.

Lorsque la probabilité P est égale à 0.25 ou à 0.75, les quantiles divisent la population statistique en quatre parties d'effectifs égaux : ce sont les quartiles. Le 1^{er} quartile (0.25) correspond à une probabilité d'occurrence de 4 ans sec ; le 4^{ème} quartile (0.75) à une probabilité d'occurrence de 4 ans humide.

Pour représenter des événements exceptionnels, on choisira P proche de 0 ou de 1.

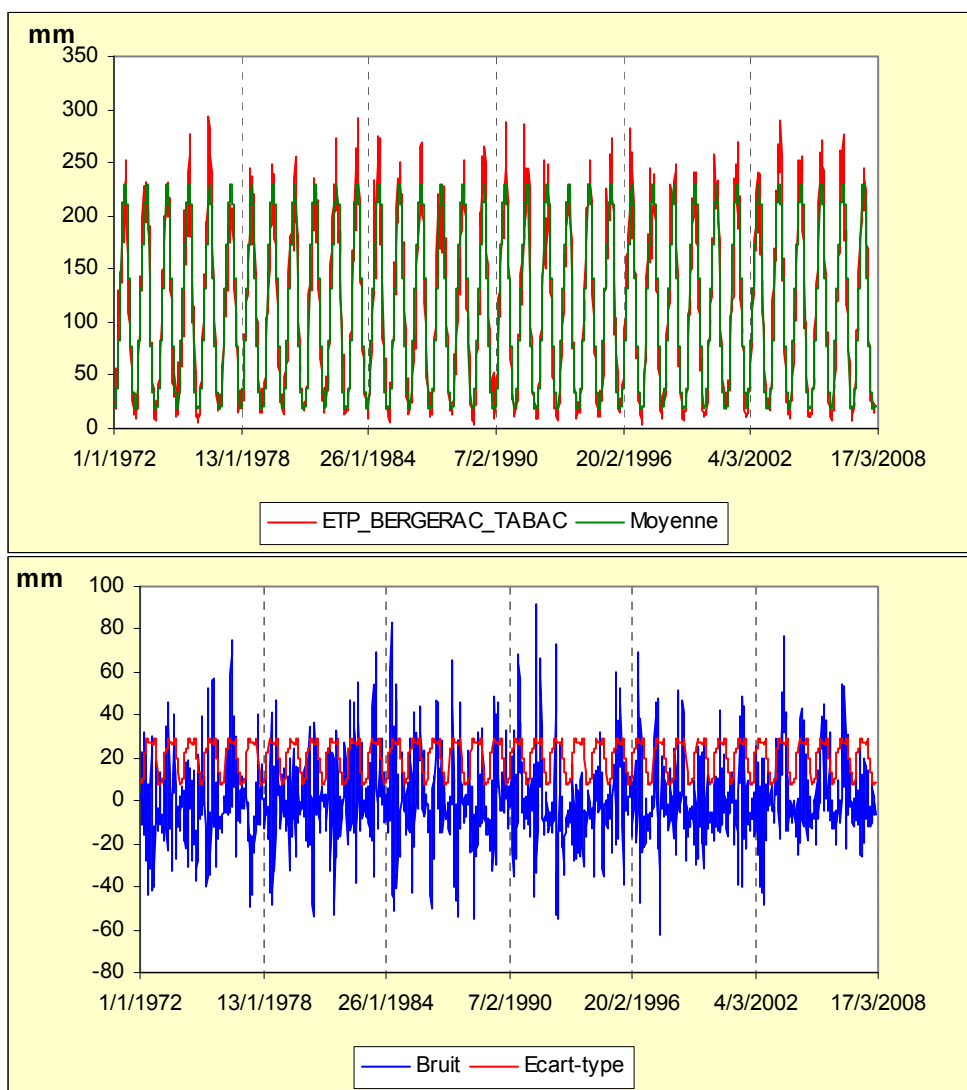


Illustration 39 : Générateur d'ETP du modèle La Force : représentation de l'ETP décadaire (Données Météo France, station Bergerac Tabac), de l'ETP moyenne mensuelle, de l'écart-type et du bruit (fonction aléatoire)

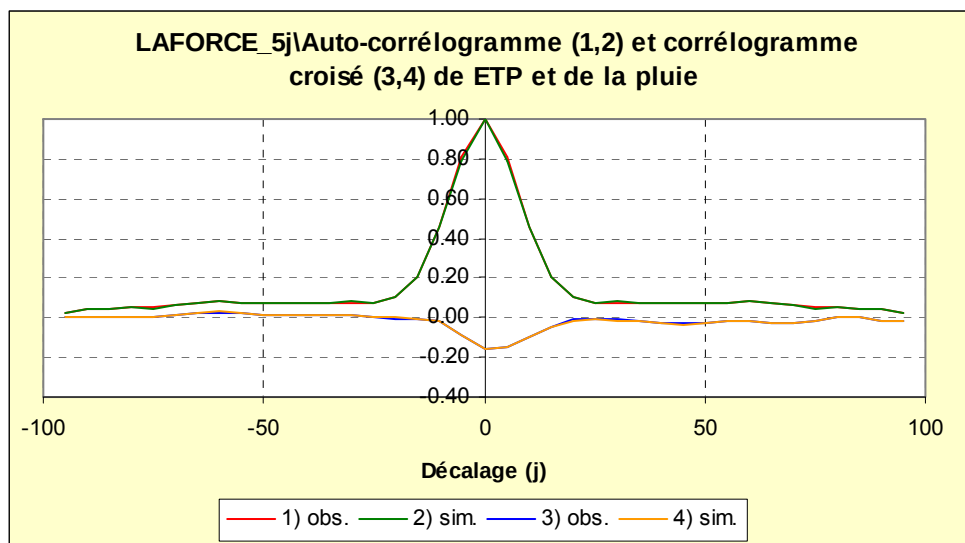


Illustration 40 : Générateur d'ETP du modèle La Force : corrélogramme de l'ETP déduit des observations et des simulations et corrélogramme croisé ETP – Pluie déduit des observations et des simulations

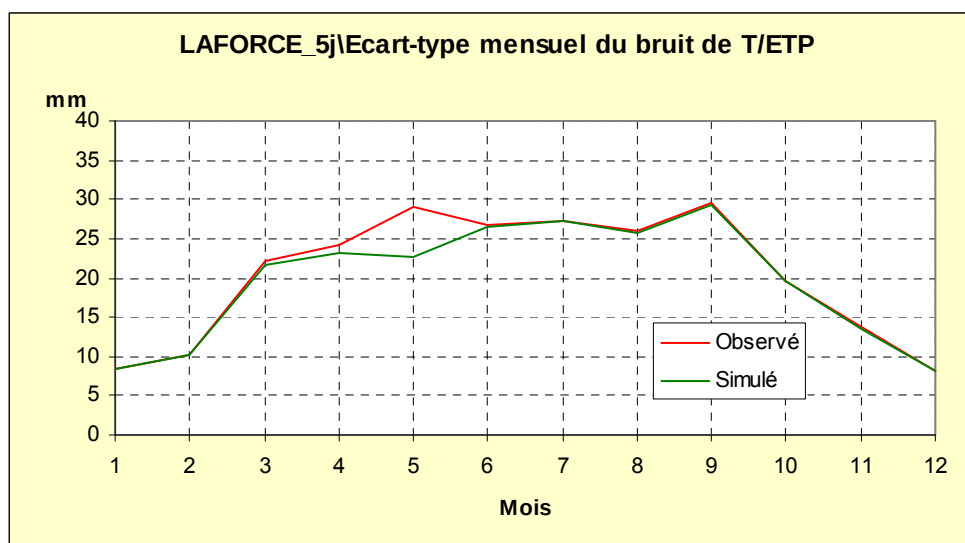


Illustration 41 : Générateur d'ETP du modèle La Force : écart-type mensuel du bruit de l'ETP déduit des observations et des simulations

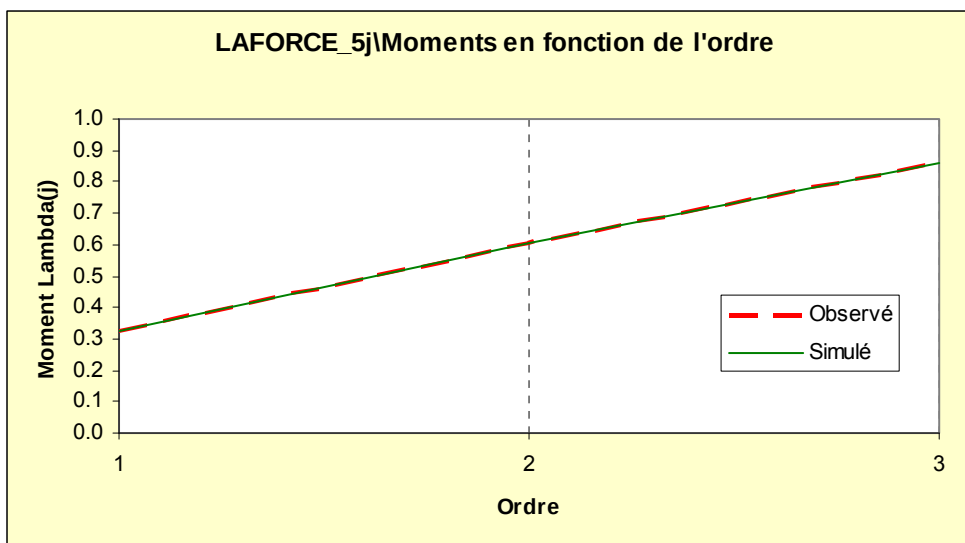


Illustration 42 : Générateur d'ETP du modèle La Force : représentation des moments en fonction de l'ordre obtenus à partir des observations et des simulations

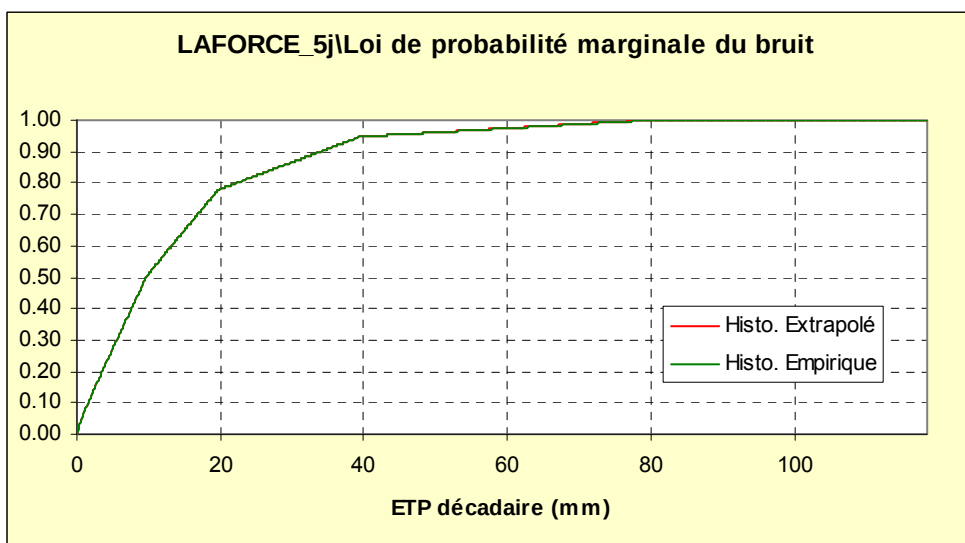


Illustration 43 : Générateur d'ETP du modèle La Force : représentation de la loi de probabilité marginale (loi empirique)

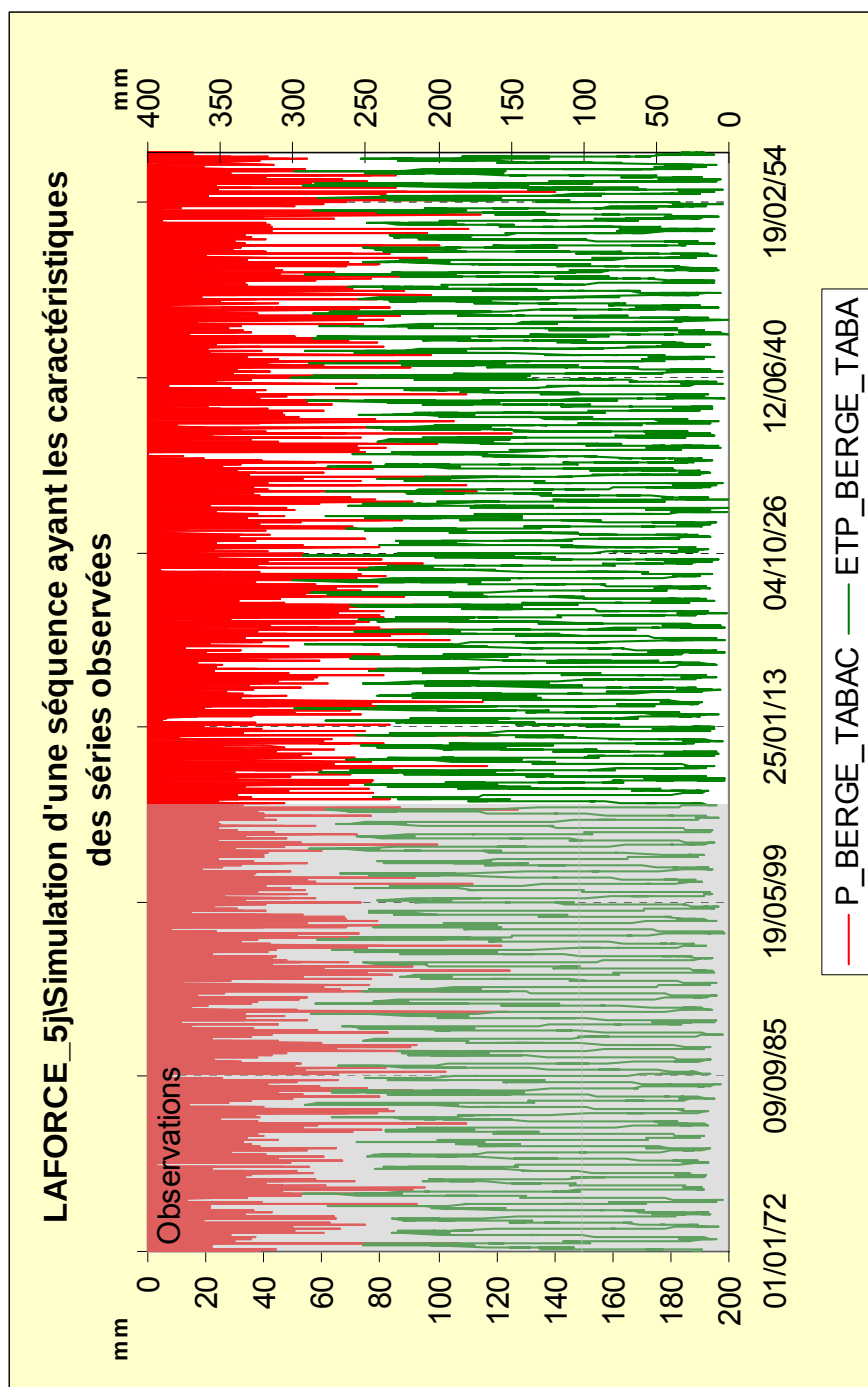


Illustration 44 : Générateur d'ETP et de pluie du modèle La Force : exemple de résultat d'une simulation d'une séquence d'ETP et de pluie (au pas de temps décadaire) ayant les caractéristiques des séries observées

3.5.5. Prévision des niveaux pour le piézomètre de La Force

Les niveaux piézométriques de l'ouvrage de La Force correspondant à différentes situations hydroclimatiques ont été calculés à partir de 200 séries de pluies et d'ETP générées par le logiciel TEMPO et représentés sur l'illustration 45 pour la période allant du 1^{er} février au 31/12/08.

Dans le futur, il sera donc possible de déterminer la période de retour d'un niveau piézométrique en le comparant aux courbes de référence.

3.5.6. Prévision des niveaux pour les ouvrages d'Allès et de Siorac et des débits de la Dordogne

Dans les paragraphes précédents, il a été démontré que le niveau piézométrique des nappes sollicitées par les puits d'Allès et de Siorac était influencé par la Dordogne.

Les méthodes de transfert qui tiennent compte de cette connexion privilégiée ont été utilisées pour déterminer les niveaux d'eau correspondant à différents scénarios hydroclimatiques (cf. illustrations 46 et 47).

Comme pour le puits de La Force, l'analyse statistique a été menée sur 200 chroniques de pluies efficaces et les prévisions, représentées du 1^{er} février au 31/12/08.

La même approche a été utilisée pour déterminer les niveaux de la Dordogne à Cénac et à Gardonne qui sont représentés sur les illustrations 48 et 49.

3.5.7. Bilan

Le tableau 5 précise les débits ou les niveaux d'eaux correspondants à différentes périodes de retour au 15 de chaque mois sur la période 15 juin-15 septembre pour les 3 piézomètres de référence (La Force, Siorac et Allès) et la Dordogne à Cénac et à Gardonne.

Il sera ainsi possible de déterminer la période de retour de n'importe quel débit ou niveau observé sur une des 2 stations hydrométriques ou un des 3 piézomètres de référence pour peu qu'il soit compris entre les limites inférieures et supérieures mentionnées dans le tableau.

On peut préciser que le DOE (débit d'objectif étiage) et le DCR (débit de crise) ont respectivement été fixés à 33 et 16 m³/s à Gardonne et que le minimum jaugé au niveau de cette station correspond à un débit de 38.8 m³/s mesuré en août 2005. La Dordogne ne semble donc jamais avoir atteint une situation sensible, voire de crise au droit de la nappe alluviale étudiée.

Au niveau des eaux souterraines, aucun seuil correspondant à une piézométrie objectif d'étiage (POE) ou à une piézométrie de crise (PCR) n'a été fixé sur la zone d'étude.

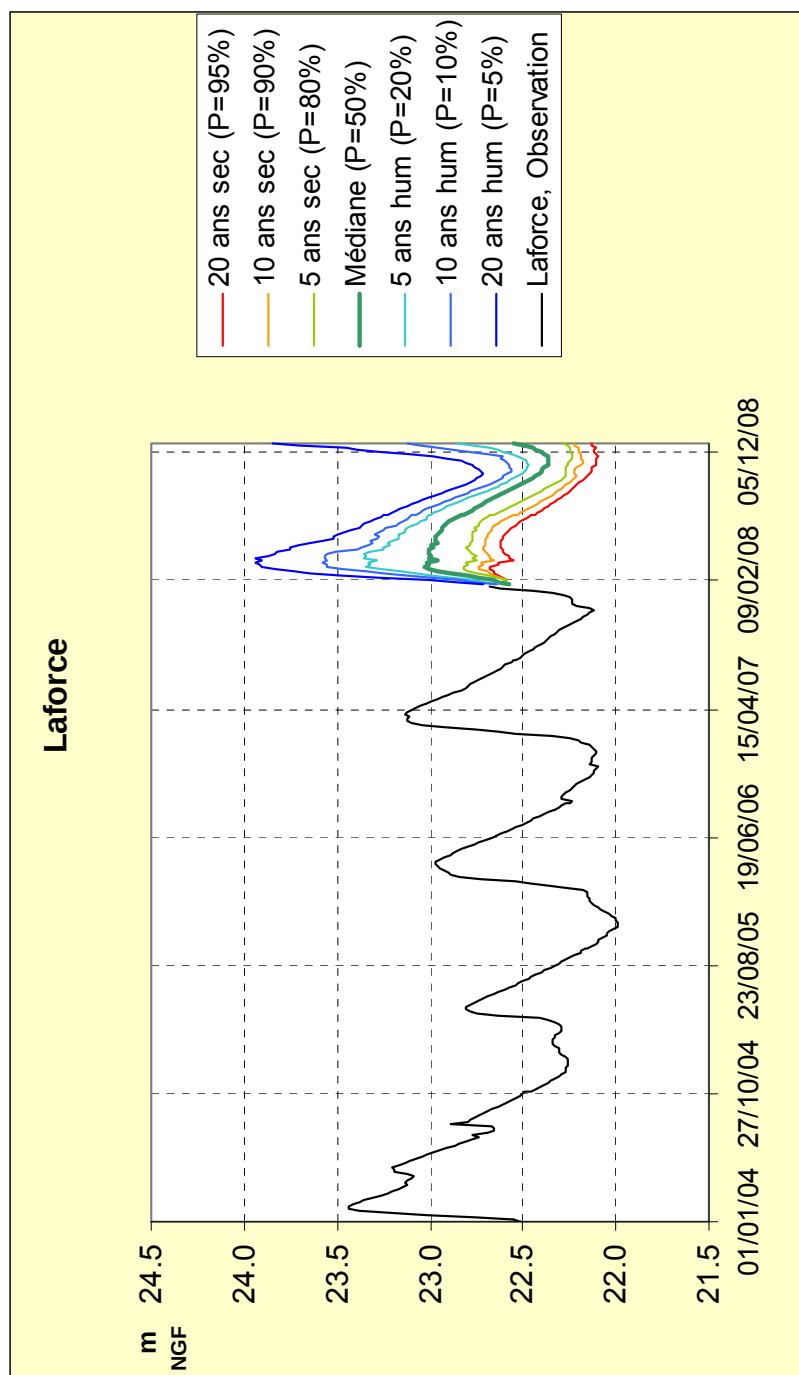


Illustration 45 : Modèle de transfert de La Force en mode prévisionnel : représentation des niveaux piézométriques de l'aquifère pour différentes probabilités d'occurrence

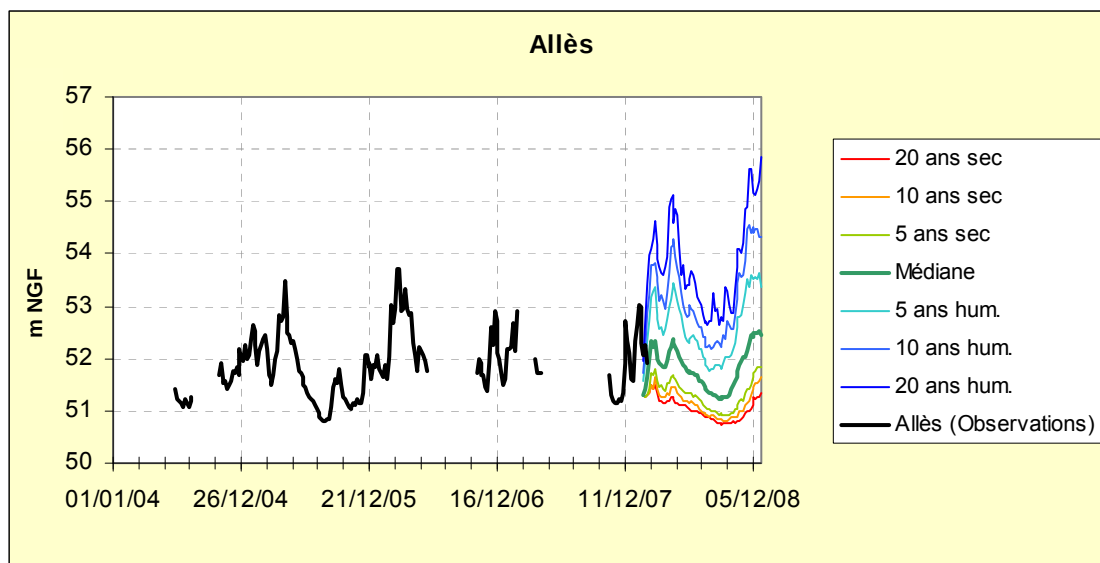


Illustration 46 : Modèle de transfert « Allès » en mode prévisionnel : représentation des niveaux piézométriques de l'aquifère pour différentes probabilités d'occurrence

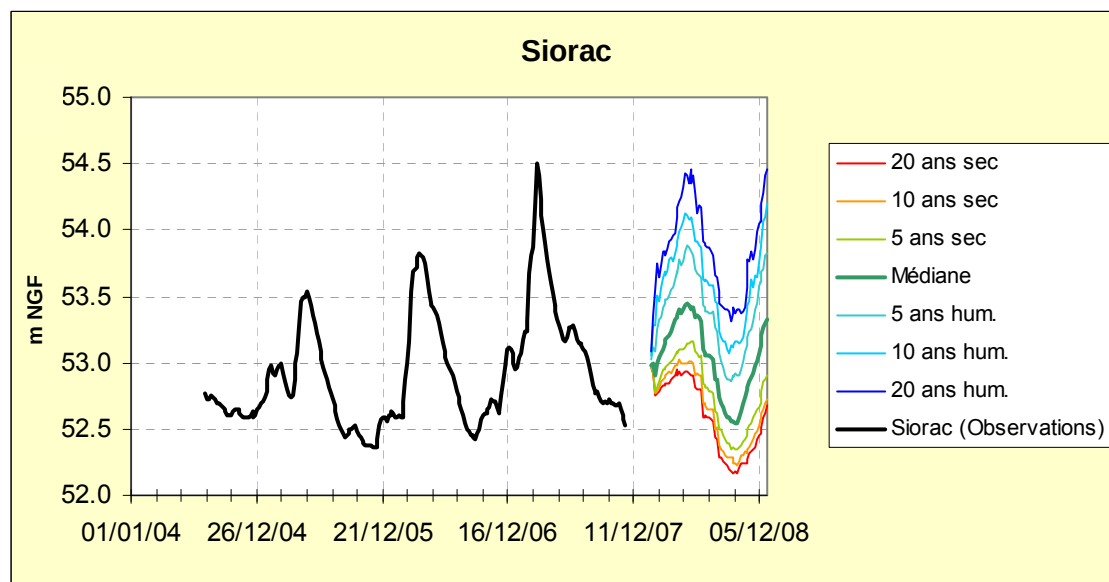


Illustration 47 : Modèle de transfert « Siorac » en mode prévisionnel : représentation des niveaux piézométriques de l'aquifère pour différentes probabilités d'occurrence

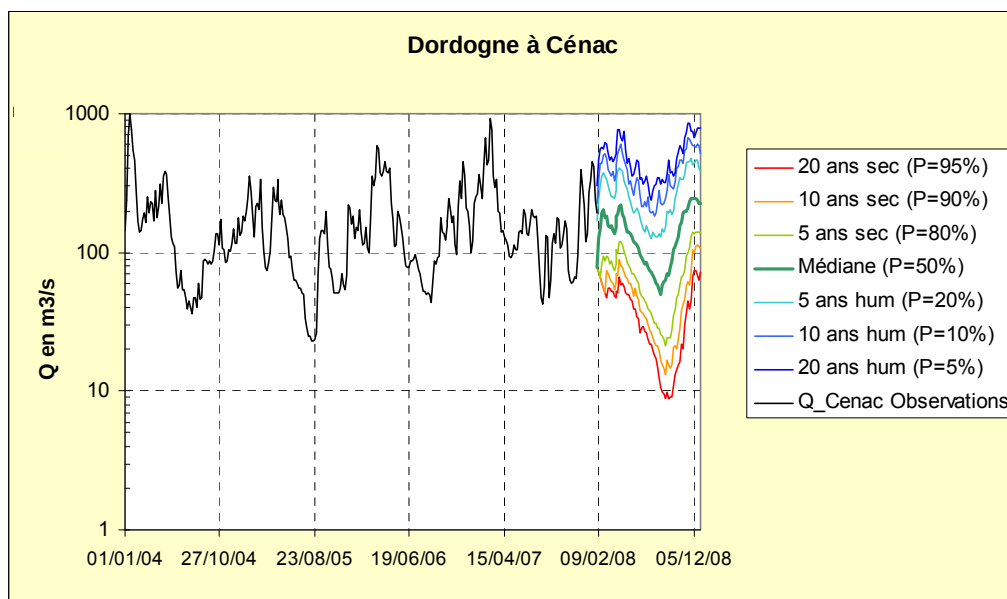


Illustration 48 : Modèle de transfert « Débit de la Dordogne à Cénac » en mode prévisionnel : représentation des débits de la Dordogne à Cénac pour différentes probabilités d'occurrence (échelle semi- logartmique)

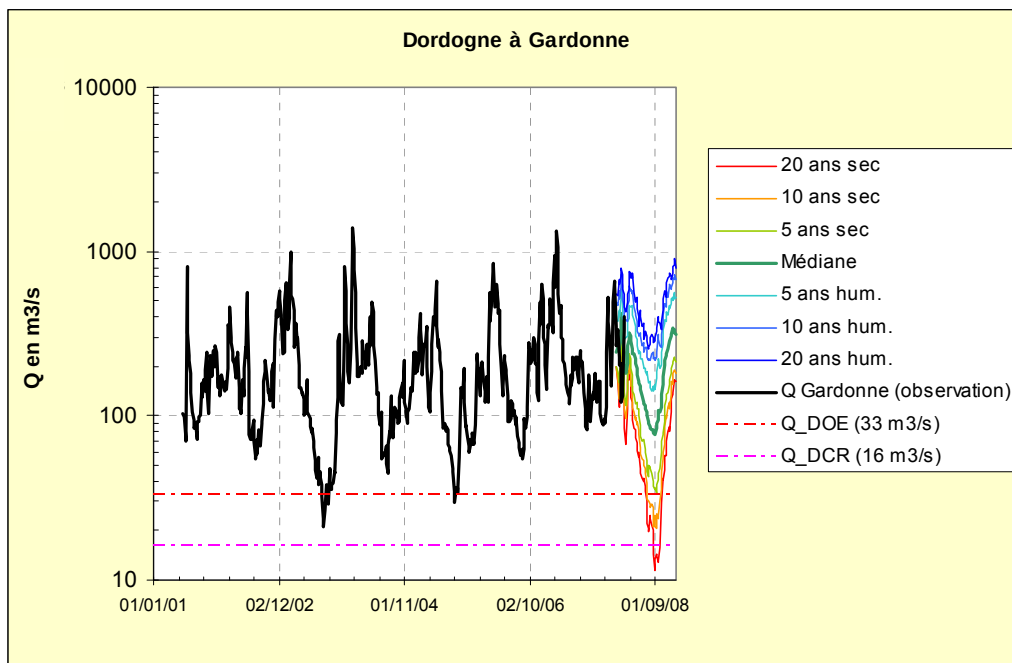


Illustration 49 : Modèle de transfert « Débit de la Dordogne à Gardonne » en mode prévisionnel : représentation des débits de la Dordogne à Gardonne pour différentes probabilités d'occurrence (échelle semi- logartmique)

Station piézométrique ou hydrométrique	Valeurs des décénaux Sec 15-juin 15-juil 15-aout 15-sept	Valeurs des quinquennaux Sec 15-juin 15-juil 15-aout 15-sept	Valeurs des Médians 15-juin 15-juil 15-aout 15-sept	Valeurs des quinquennaux Humide 15-juin 15-juil 15-aout 15-sept	Valeurs des décénaux Humide 15-juin 15-juil 15-aout 15-sept
Allès-sur-Dordogne 08076X0043/P (m)	51.2 51.0 50.9 50.8	51.3 51.1 51.0 50.9	51.7 51.5 51.3 51.3	52.4 52.0 51.8 51.9	53.7 52.8 53.3 52.7
Siorac (m) 08077X0022 (m)	52.9 52.7 52.4 52.3	53.0 52.8 52.5 52.4	53.4 53.1 52.7 52.6	53.7 53.4 53.1 52.9	53.9 53.6 53.2 53.1
Laforce (m) 08065X0010 (m)	22.7 22.5 22.4 22.3	22.7 22.7 22.5 22.4	22.9 22.8 22.7 22.6	23.1 23.0 22.9 22.7	23.2 23.1 22.9 22.8
Dordogne à Cénac (m ³ /s)	46 30 21 16	60 39 28 24	106 77 58 71	196 145 130 196	326 252 228 282
Dordogne à Gardonne (m ³ /s)	59 39 29 25	74 54 44 38	145 105 81 91	221 177 142 185	307 258 238 244

Tableau 5 : Synthèse des résultats des modèles prévisionnels pour certaines dates des mois d'été en fonction de la probabilité d'occurrence

D'après les calculs statistiques, il semblerait que la valeur de 33 m³/s puisse être atteinte lors d'une année sèche de période de retour égale à 10 ans (cf. Tableau 5). La valeur de 16 m³/s (débit de crise) ne correspond par contre à aucun débit calculé pour la station de Gardonne.

Même s'il a été montré que les faibles débits de la Dordogne n'étaient pas contrôlés par l'état de la nappe, on pourrait assimiler par analogie les cotes piézométriques calculées pour les 3 piézomètres de référence pour des périodes de retour égales à 10 ans à des piézométries objectif d'étiage et considérer que les risques d'atteindre un état de crise sont très faibles.

Il ne semble en tout cas pas nécessaire de prendre de mesures de restriction des prélèvements qui, au final, ne représentent que 2 % (± 1%) à 23 % (± 7%) des apports de la nappe au débit de la Dordogne et 0.9% (± 0.2%) à 3.5% (± 0.7%) des volumes d'eau transitant par le cours d'eau.

3.6. CONCLUSION

Au terme de l'analyse des données pluviométriques, piézométriques et débitométriques relatives au système Dordogne/nappe alluviale, un certain nombre de conclusions peuvent être formulées sur la base des résultats présentés dans les paragraphes précédents et récapitulés dans le tableau 6 :

- l'inertie des systèmes est variable : elle varie du simple au triple entre les puits d'Allès et de Vézac (effet mémoire de l'ordre de 20 jours) et ceux de Siorac, Saint-Germain-et-Mons et La Force (effet mémoire de l'ordre de 50 à 60 jours). Le puits de Bergerac se situe, quant à lui, dans une position intermédiaire avec un effet mémoire de 35 jours.
- la réponse à un épisode de pluies efficaces est complexe (car due aux effets de la Dordogne et de l'impluvium dans des proportions variables), retardée (jusqu'à une trentaine de jours après l'évènement pluvieux) et atténuée du fait de la probable faible diffusivité (rapport transmissivité/coefficient d'emmagasinement) des formations.
- les basses terrasses sont logiquement mieux connectées à la Dordogne que les moyennes terrasses. Ces dernières peuvent néanmoins présenter localement une bonne connexion avec le cours d'eau (ex : secteur de Siorac).
- les débits de la Dordogne et les niveaux piézométriques semblent très peu impactés par les prélèvements agricoles effectués durant la période estivale, probablement parce que ces derniers ne représentent que de faibles pourcentages des apports de la nappe au débit de la Dordogne ainsi que des volumes totaux transitant par le cours sur cette même période.
- en première approche, les cotes piézométriques calculées pour les 3 piézomètres de référence (Allès, Siorac et La Force) pour des périodes de retour égales à 10 ans peuvent être assimilées à des piézométries objectif d'étiage.

Au final, la nappe alluviale de la Dordogne apparaît comme un secteur où il n'existe pas de réel problème quantitatif, ce qui était supposé mais non démontré au moment du lancement de l'étude. Les gestionnaires disposent à présent des éléments techniques le prouvant.

Dans ces conditions, une restriction des prélèvements n'apparaît pas nécessaire. On peut par contre recommander que des efforts soient menés pour mieux les connaître.

Piézomètre	Siorac	St Germain	La Force	Bergerac	Vézac	Allès
Nature de la terrasse	Moyenne terrasse	Moyenne terrasse	Moyenne terrasse	Basse terrasse	Moyenne terrasse	Basse terrasse
Distance au cours d'eau	300 m	1000 m	500 m	350 m	1200 m	100 m
Battement de la nappe	2.18 m	0.59 m	0.5 m	0.88 m	1.85 m	3.35
Effet mémoire (inertie)	50-60 j important	50-60 j important	50-60 j important	35 j moyen	20 j faible	20 j faible
Réponse impulsionnelle pluie-niveaux	Bimodale 9-13j/27 j $r < 0.10$ signal très filtré	Bimodale 9-13j/27 j $r < 0.10$ signal très filtré	Bimodale 9-13j/27 j $r < 0.10$ signal très filtré	Bimodale 3-9j/22-26j $0.1 < r < 0.25$ signal filtré	Bimodale 3-9j/22-26j $0.1 < r < 0.25$ signal filtré	Bimodale 3-9j/22-26j $0.1 < r < 0.25$ signal filtré
Retard débits-niveaux	22 j $r = 0.71$ bonne connexion	35 j $r = 0.47$ faible connexion	51 j $r = 0.42$ faible connexion	5 j $r = 0.67$ bonne connexion	19 j $r = 0.56$ bonne connexion	1j $r = 0.91$ bonne connexion
Modèle de transfert	2 entrées (Pl. et Q)		1 entrée (P)			2 entrées (Pl. et Q)
Coeff. de Nash	0.86		0.69			0.89
Maximum de réponse impulsionnelle	75 j (pluie) 13 j (Dordogne)		40 à 60 j (pluie)			5 j (pluie) 1j (Dordogne)
% de variance du à la Dordogne	45 %		S.O.			61 %

Tableau 6 : Récapitulatif des résultats obtenus pour les différents piézomètres du secteur étudié

4. Nappe alluviale du Gave de Pau

La nappe alluviale du Gave de Pau représente le troisième système aquifère étudié dans le cadre du module 5 de la convention régionale « Eaux souterraines ».

L'année 3 a consisté à rassembler les données disponibles sur ce secteur et à mettre en place un suivi en continu sur 5 puits répartis sur l'ensemble du domaine alluvial (cf. rapport BRGM/RP-53814-FR).

En année 4, l'acquisition des données s'est poursuivie. Un travail de caractérisation géologique et hydrogéologique du domaine alluvial a aussi été entrepris. Il a permis de préciser les éléments présentés dans les paragraphes suivants.

4.1. EXTENSION DE LA ZONE D'ETUDE

Le Gave de Pau prend sa source dans le cirque de Gavarnie dans le département des Hautes-Pyrénées (65). Il porte ce nom à partir de Luz-Saint-Sauveur où le Gave de Gavarnie et le Bastan se rejoignent. Après sa confluence avec le Gave d'Oloron, il prend le nom de Gaves réunis et se jette dans l'Adour au niveau de Peyrehorade.

La zone d'étude correspond au domaine alluvial du Gave de Pau dans le département des Pyrénées Atlantiques (64) depuis Lestelle-Bétharram jusqu'à St Cricq-du-Gave (cf. Illustration 50). Elle s'étend sur une centaine de kilomètres de long et 4 à 5 kilomètres de large en moyenne, pour une superficie totale d'environ 500 km².

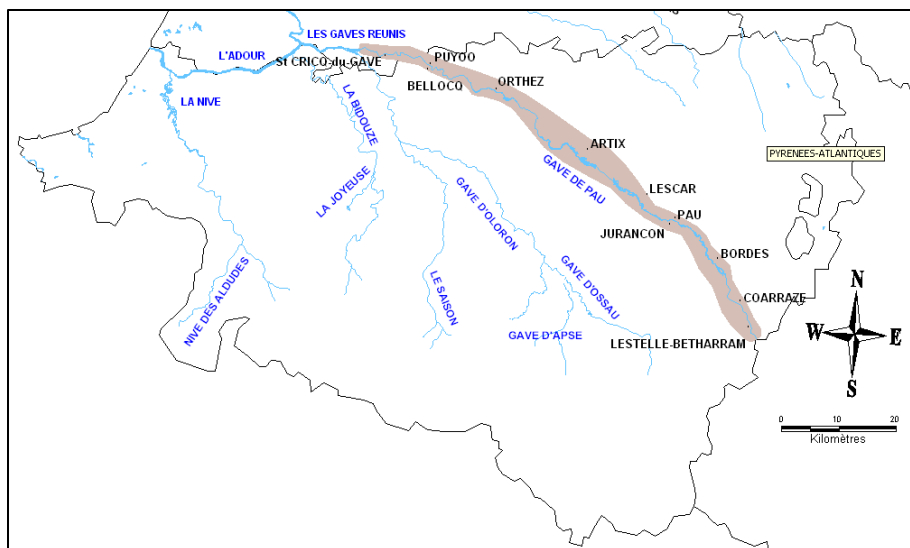


Illustration 50 : Localisation de la zone d'étude

4.2. GEOLOGIE

4.2.1. Contexte régional

Depuis l'amont de Lestelle-Bétharram jusqu'à sa confluence avec le Gave d'Oloron, le Gave de Pau traverse une plaine constituée de sédiments allant du Crétacé au Miocène.

Les séries anté-Oligocène sont plissées et formées par des dépôts marins de type Flysch. La phase du soulèvement pyrénéen (Eocène supérieur-Oligocène) a marqué l'arrêt de la sédimentation marine dans la région. Tous les terrains antérieurs à cette période sont ainsi recouverts en discordance par des dépôts détritiques d'âge Miocène et Pliocène appelés « molasses ».

D'un point de vue hydrographique, le Gave de Lourdes qui s'écoulait vers le Nord en direction de Morlaàs au Mindel (Pléistocène moyen ancien) puis de Pau au Riss (Pléistocène moyen récent) a engendré d'importants dépôts d'alluvions.

Après la fonte du glacier de Lourdes, les moraines du Riss ont définitivement dévié le lit du cours d'eau vers l'Ouest et sa vallée actuelle dont le creusement principal a pu se produire au cours de l'interglaciaire Riss – Würm.

4.2.2. Les formations tertiaires et secondaires de la vallée du Gave de Pau

Les formations secondaires et tertiaires susceptibles d'être rencontrées dans la vallée du Gave de Pau présentent les caractéristiques suivantes :

- **Formations secondaires**

Aptien supérieur (Crétacé inférieur) : il s'agit d'une formation très homogène constituée par une prolifération d'organismes calcaires pris dans un ciment relativement abondant de type micritique.

Albien (Crétacé inférieur) : l'Albien correspond à des niveaux carbonatés présentant des d'algues mélobésiées à leur base. Ces dernières sont particulièrement abondantes au niveau des affleurements de surface.

Cénomaniens (Crétacé supérieur) : dans le domaine méridional, le Flysch cénomaniens témoigne d'une sédimentation argilo-gréseuse. Il débute souvent par des brèches ayant remanié des éléments antérieurs, notamment du Paléozoïque en provenance de la cordillère du front nord-pyrénéen. Il se présente ensuite sous la forme d'une alternance de schistes noirs fissiles et de bancs de grès grossiers et micacés.

Campanien (Crétacé supérieur) : il correspond à une série grés-marneuse (à prédominance gréseuse) dont l'épaisseur peut atteindre 700 à 800 mètres d'épaisseur.

Maestrichtien supérieur (Crétacé supérieur) : les marnes de Nay sont gris verdâtre ou blanches et associées à des bancs calcaires marneux, esquilleux, gris à crème. Elles présentent une puissance de l'ordre de 300 m et constituent le sous-bassement des calcaires daniens (Paléocène) qui apparaissent depuis l'ouest de Nay jusqu'à l'est de Coarraze.

- **Formations tertiaires**

Dano-Montien (Paléocène) : il matérialise la transition entre le Crétacé supérieur et l'Eocène. La formation du « calcaire de Lasseube » est représentée de part et d'autre de la vallée du Gave de Pau par une barre calcaire de 80 à 100 mètres d'épaisseur. C'est un calcaire blanc dur, largement utilisé comme pierre de taille à l'époque romane.

Thanétien (Paléocène) : il affleure de part et d'autre de la vallée du Gave de Pau, au nord-ouest de Nay et à l'est de Coarraze. Il constitue sous l'Yprésien, un flysch marno-sableux d'une épaisseur de l'ordre de 700 mètres.

Yprésien (Eocène inférieur) : il est représenté sur la rive droite du Gave de Pau par les marnes de Bénéjacq, marnes gris-bleuté franches à leur base et sableuses ou gréseuses à leur sommet.

Lutétien supérieur (Eocène moyen) : il affleure de façon discontinue au front des unités de Ste-Suzanne et de Salies-de-Béarn. Au nord d'Orthez, il est constitué d'argiles sableuses riches en lamellibranches et gastéropodes. Dans la région de Puyoô, le Lutétien supérieur affleure sporadiquement sous la forme de calcaires blancs à grandes nummulites.

Eocène à Miocène : il s'agit de molasses argilo-sableuses, jaunes à vert-bleu. Près de Lagor, la série molassique est constituée par des séquences successives présentant des niveaux à gros galets à leurs bases.

Formation des poudingues du Jurançon (Miocène) : cette formation s'est mise en place lors du démantèlement de la chaîne pyrénéenne et couvre toutes les collines du secteur de Jurançon. C'est un ensemble détritique consolidé de piémont présentant une alternance de poudingues, de molasses et de marnes avec ou sans grumeaux calcaires.

Mio-Pliocène : les argiles bigarrées à galets ne forment que quelques placages à l'ouest de Nay. Ce sont là les affleurements les plus méridionaux et les plus occidentaux du grand cône de déjection torrentielle mio-pliocène du plateau du Ger.

4.2.3. Les formations alluviales de la vallée du Gave de Pau

- **Formation des terrasses**

C'est au Quaternaire que le Gave de Pau a creusé sa vallée alluviale et déposé des sédiments composés de granites et de schistes pris dans une matrice sableuse.

La formation des terrasses est en fait liée aux variations climatiques et en particulier aux phases froides du Riss et du Würm (cf. Illustration 51).

La période anaglaciale, marquée par l'expansion des glaciers, s'est accompagnée d'une régression marine généralisée. Une phase d'érosion correspondant au creusement du lit du Gave a alors été observée. A l'amont, les blocs de pierre détachés des parois ont formé des moraines.

Avec le réchauffement, la phase cataglaciale a vu la décroissance rapide des glaciers, entraînant un dépôt important des matériaux stockés dans les hautes vallées et la formation de terrasses alluviales.

En période interglaciaire, des transgressions marines se développent et des formations limoneuses plus fines, caractéristiques des milieux de faible énergie viennent recouvrir les alluvions grossières nouvellement déposées.

Une géomorphologie particulière résulte de cette histoire. Les terrasses les plus anciennes sont situées à une cote altimétrique plus élevée que les terrasses récentes et constituent les premiers reliefs de part et d'autre du cours d'eau.

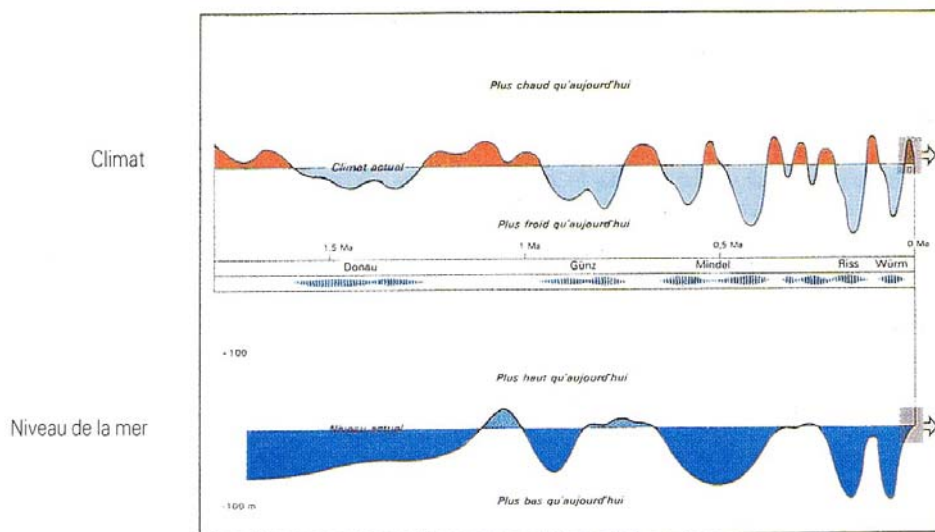
Dans les Pyrénées-Atlantiques, et en particulier dans l'environnement du Gave de Pau, les alluvions sont agencées de deux manières :

- en terrasses emboîtées, avec une connexion hydraulique entre elles,
- ou en terrasses étagées, séparées par des affleurements du substratum.

- **Identification des terrasses**

Le travail d'identification des terrasses a été réalisé à partir des 5 cartes géologiques concernant la zone d'étude (cf. Illustration 52) :

- Arthez-de-Béarn, (feuille 1004) par J.DUBREUILH et G.KARNAY, publiée en 1997,
- Lourdes, (feuille 1052) par M. CASTERAS, publiée en 1970,
- Morlaàs, (feuille 1030) par J. DELFAUD, P. PAILHE, G. THOMAS, publiée en 1982,
- Orthez, (feuille 1003) par G. LE POCHAT, publiée en 1987,
- Pau, (feuille 1029) par M.J. SCHOEFFLER, publiée en 1963.



Pendant le Quaternaire se succèdent des périodes froides (glaciaires) et chaudes (interglaciaires). L'Aquitaine n'a pas été directement touchée par les grandes glaciations connues en Europe du Nord. L'influence des glaces s'est cependant traduite directement sur le niveau de la mer qui baisse d'une centaine de mètres au cours des deux dernières glaciations du Riss et du Würm.

PERIODE POST-GLACIAIRE

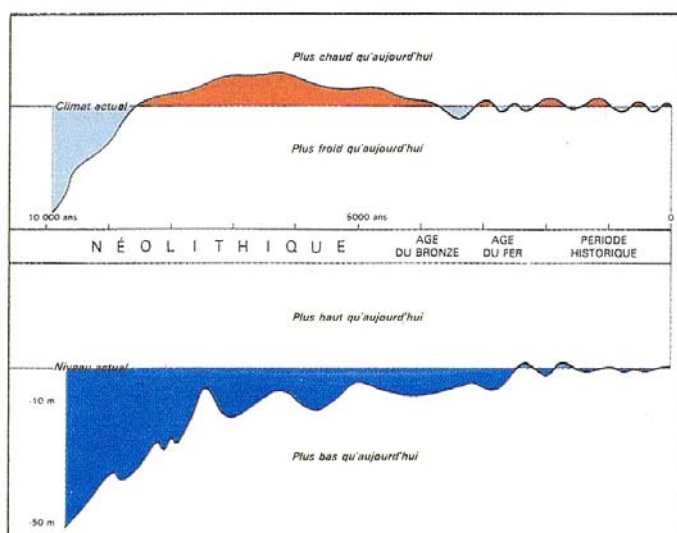


Illustration 51 : Histoire du Quaternaire (extrait de "Histoire géologique de l'Aquitaine"
Publication ANDRA-BRGM)

Il est apparu que ces cartes, réalisées à des époques différentes et par des auteurs différents, n'étaient pas homogènes quant à l'appellation des différentes formations quaternaires.

Dans ces conditions, il a été décidé de les regrouper en fonction de l'altitude de leur toit et non en fonction de leur appellation.

Pour ce faire, une coupe longitudinale du Gave de Pau, depuis Lestelle-Bétharram jusqu'à St-Cricq-du-Gave sur laquelle l'altitude maximale de chaque terrasse a été notée, a été réalisée. Trois niveaux de terrasse ont ainsi pu être identifiés :

- les basses terrasses de l'**Holocène** (actuel) ;
- les moyennes terrasses du **Würm** ;
- les hautes terrasses du **Riss**.

Le tableau de l'illustration 53 précise la façon dont les niveaux ont été regroupés. L'illustration 54 représente, quant à elle, l'extension des différentes terrasses.

Les basses terrasses sont présentes sur toute la longueur du Gave de Pau. Elles sont datées de l'Holocène et correspondent aux alluvions récentes et actuelles. Elles sont principalement constituées par des quartzites noyées dans une matrice sablo-limoneuse grisâtre à brun-jaune. Leur épaisseur varie entre 0.5 et 3 mètres.

Ces assises correspondent à la sédimentation actuelle et témoignent à la fois des produits d'érosion post-Würm et des processus d'altération. Elles constituent la plaine inondable du cours d'eau.

Les moyennes terrasses sont aussi présentes sur toute la longueur du Gave de Pau mais elles sont plus développées dans la partie amont (de Lestelle-Bétharram jusqu'à Pau). Elles sont datées du Würm (Pléistocène supérieur) et sont constituées d'éléments non altérés (quartzites, schistes ou granites) pris dans une gangue sableuse. Elles présentent une épaisseur comprise entre 5 et 20 mètres.

Les hautes terrasses ne sont présentes que dans les parties médiane et aval de la zone d'étude et sont bien plus étendues en rive droite qu'en rive gauche. Elles sont datées du Riss (Pléistocène moyen récent) et sont constituées de galets et de cailloutis pris dans une matrice argilo-sableuse plus ou moins rubéfiée (sur 10 mètres environ). Leur épaisseur peut atteindre une trentaine de mètres.

Près de Lacq, sur la route d'Arthez-de-Béarn, une gravière ouverte sur un front d'environ 5 mètres permet d'observer la présence de lentilles sablo-graveleuses et de macro-éléments rocheux dans ces formations.

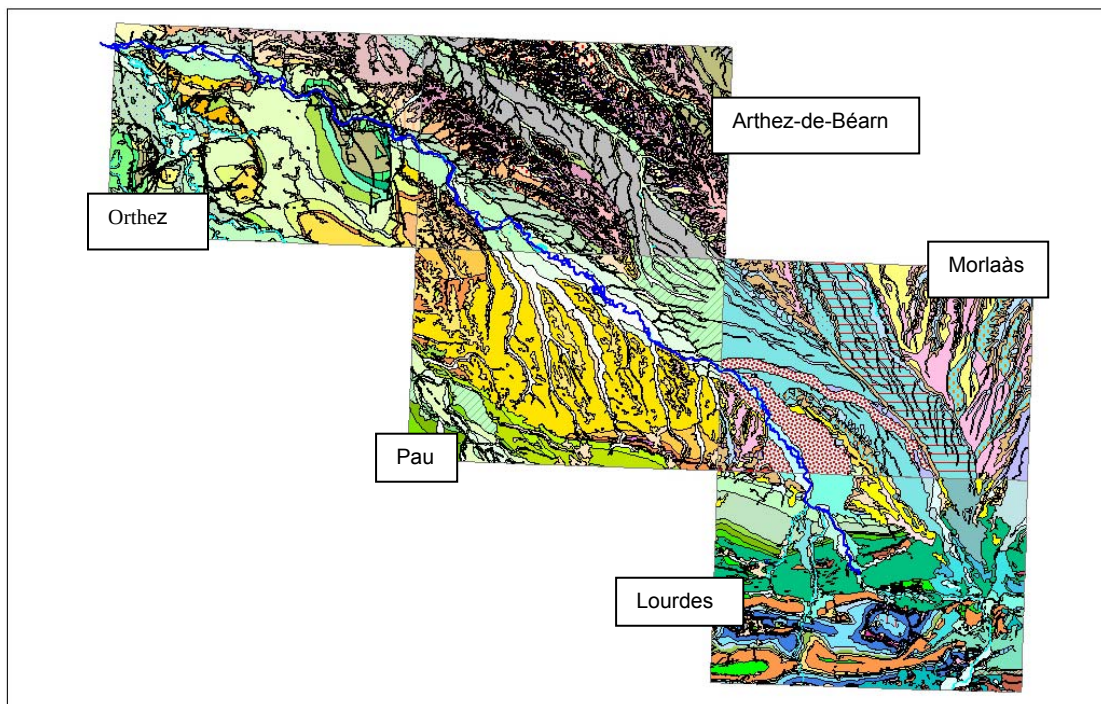


Illustration 52 : Position des 5 cartes géologiques utilisées pour l'identification des terrasses

	Carte géologique de Lourdes Feuille 1052	Carte géologique de Morlaàs Feuille 1030	Carte géologique de Pau Feuille 1029	Carte géologique d'Arthez- de-Béarn Feuille 1004	Carte géologique d'Orthez Feuille 1003
Basses terrasses (Holocène)	Fz	Fz	Fz	Fy, Fz	Fx3, Fx-y, Fx1-2
Moyennes terrasses (Würm)	Fya, Fyb	Fy	Fya, Fyb	Fx	Fx1, Fx2, Fx3, Fx1-2
Hautes terrasses (Riss)			Fx	Fw	Fw3, Fx1-2

Illustration 53 : Tableau d'équivalence des formations alluviales

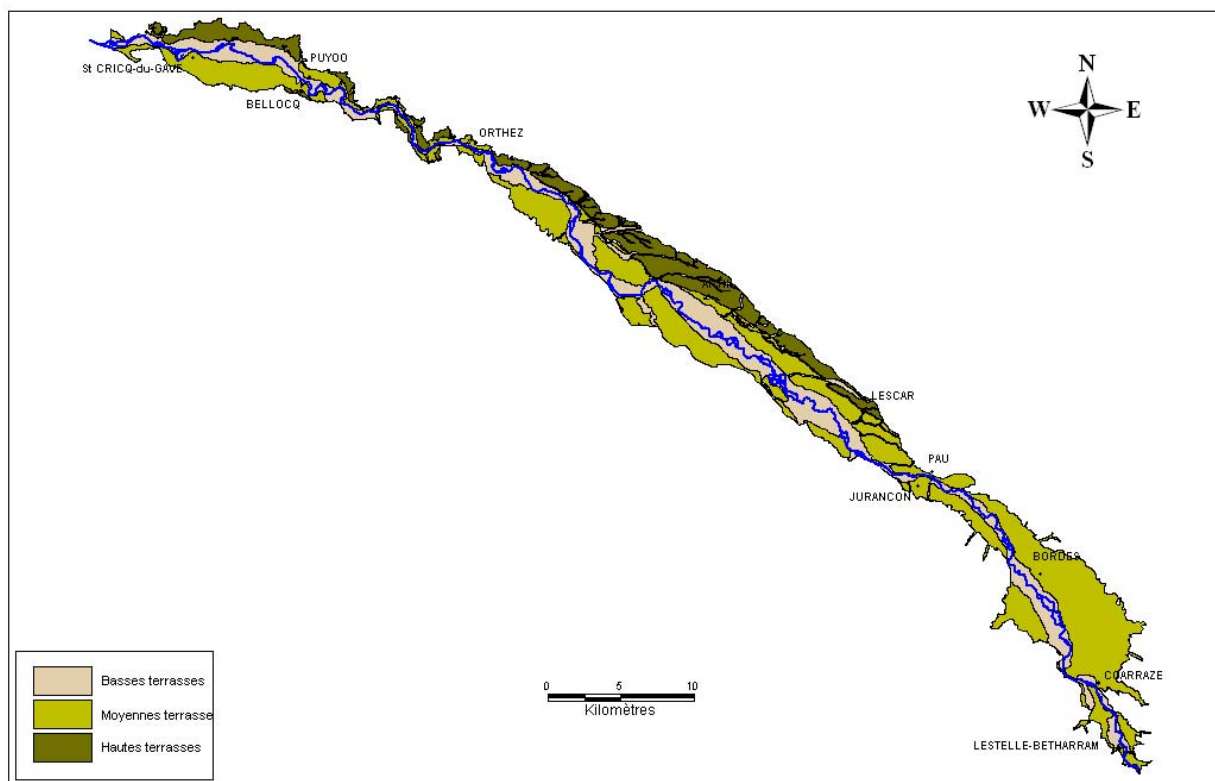


Illustration 54 : Extension des terrasses alluviales du Gave de Pau

• Agencement des formations

Afin d'étudier la géométrie des formations alluviales, douze coupes transversales à l'axe de la vallée du Gave de Pau ont été réalisées (cf. Illustration 55 et Annexe 1).

Elles ont été élaborées à partir des 450 logs disponibles en B.S.S. (Banque des données du Sous Sol) et des cartes géologiques au 1/50 000 mentionnées précédemment.

Elles passent aussi préférentiellement par les forages suivis par le Conseil Général 64 dont 5 ont été équipés par le B.R.G.M. de dispositifs d'enregistrement en continu du niveau de l'eau :

- Puits de Bordes (10306X0247/F)
- Forage de Pardies-Piétat (10305X0231/F)
- Puits de Siros (10293X0152/P)
- Puits de Labastide-Cézéracq (10292X0110/P)
- Forage de Bérenx (10033X0067/F)

La coupe n°1 passe au niveau de Lestelle-Bétharram et permet de distinguer deux niveaux de terrasse différents : une moyenne terrasse présentant une épaisseur moyenne de 15 mètres et une basse terrasse constituant le lit du Gave de Pau. Ces terrasses reposent directement sur le Flysch du Cénomaniens dont l'épaisseur peut atteindre 1000 à 1300 mètres dans ce secteur.

La coupe n°2 passe à l'aval de Lestelle-Bétharram et met également en évidence deux niveaux de terrasse qui s'appuient sur le Flysch du Campanien dont l'épaisseur varie localement entre 700 à 800 mètres. L'emprise de la moyenne terrasse est de l'ordre 2.5 km dans cette zone.

Les coupes n°3 et 4, passant respectivement par Mirepeix et Bordes, sont très représentatives quant à la largeur de la plaine alluviale. Dans ce secteur, la moyenne terrasse peut atteindre jusqu'à 9 km de large. La basse terrasse, appelée plus communément saligue est, quant à elle, généralement recouverte de végétation. On note aussi la présence de colluvions (coupe 4) qui peuvent masquer les formations en place.

Les coupes n°5, 6 situées de part et d'autre de Pau mettent en évidence un quatrième niveau de terrasse (non étudié dans le cadre de cette étude) correspondant aux formations du Mindel. D'une épaisseur moyenne de 25 à 30 mètres, cette haute terrasse est généralement séparée des terrasses plus récentes par un talus de poudingues du Jurançon. Elle n'est donc pas connectée.

Les coupes 7, 8 et 9 sont représentatives du secteur médian où les 3 niveaux de terrasse (basse terrasse, moyenne terrasse et haute terrasse du Riss) coexistent.

La coupe n°10 en aval d'Orthez, laisse apparaître la moyenne terrasse. Celle-ci repose directement sur les calcaires à Mélobesiées qui affleurent de part et d'autre du Gave. Plus à l'aval, l'extension des alluvions diminue fortement.

Les coupes n°11 et 12 représentent les trois niveaux de terrasse et distinguent deux basses terrasses : l'une datant de l'Holocène récent, l'autre de l'Holocène actuel. La coupe n°11 met en évidence l'emboîtement des terrasses. Sur la coupe n°12, la haute terrasse est séparée de la plus récente par un talus molassique recouvert de colluvions.

L'examen des coupes montre que les basses et les moyennes terrasses sont souvent en connexion du fait que les alluvions se trouvent en relais (toit de la terrasse inférieure plus haut que la base de remblaiement de la terrasse supérieure).

Il est par contre plus rare que les alluvions des basses et des moyennes terrasses soient en connexion avec celles des hautes terrasses. Ce type de connexion hydraulique n'est toutefois pas exclu dans les secteurs où des colluvions ou des éboulis de pente peuvent permettre une continuité des systèmes aquifères (cf. coupe 12).

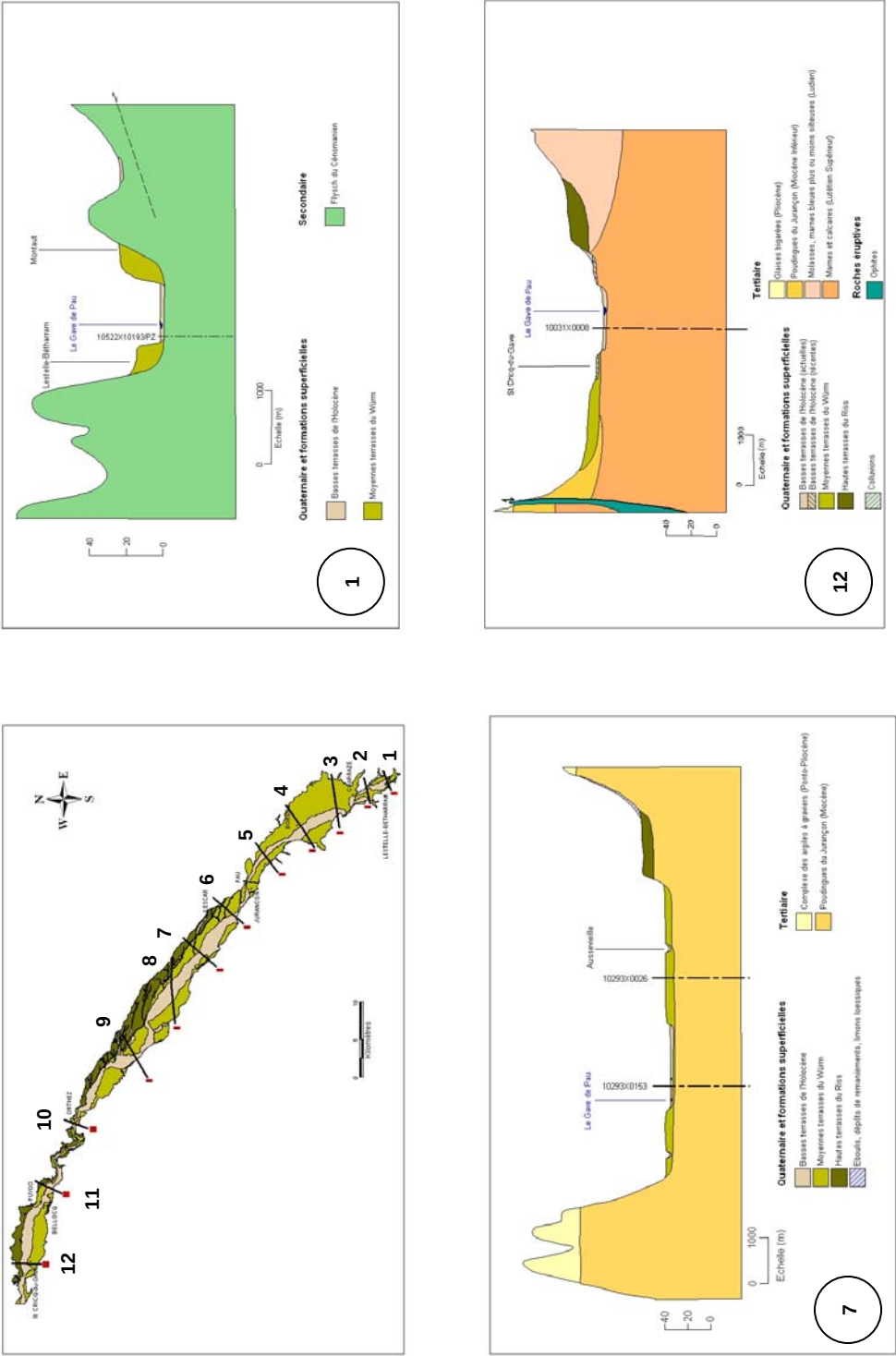


Illustration 55 : Localisation et exemples de coupes

4.3. HYDROGEOLOGIE

4.3.1. Documents consultés

Les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère alluvial ont pu en partie être précisées grâce à une synthèse bibliographique de plusieurs rapports collectés auprès du Conseil Général des Pyrénées Atlantiques.

Les territoires concernés par ces études ainsi que la position des piézomètres, des forages ou des puits créés ou surveillés dans le cadre de ces investigations ont été reportées sur l'illustration 56.

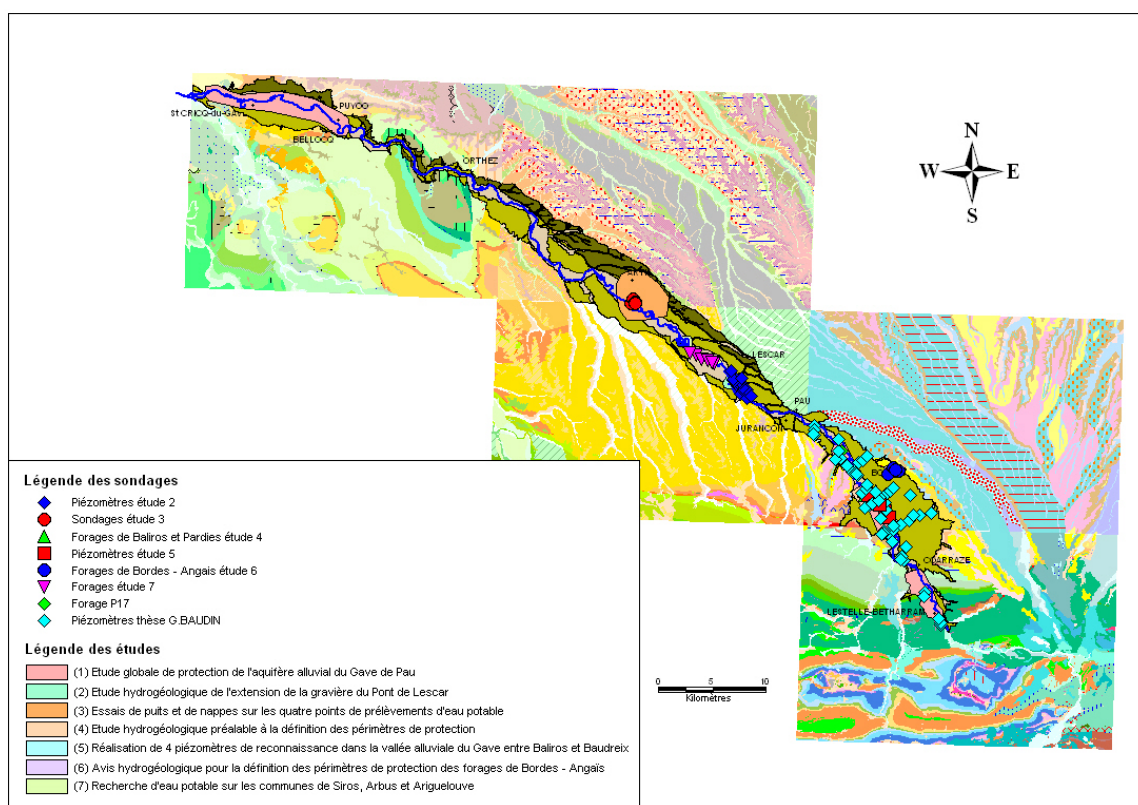


Illustration 56 : Emprise des études consultées et localisation des piézomètres, des forages ou des puits créés ou surveillés dans le cadre de ces investigations

4.3.2. Définition des limites de l'aquifère alluvial

Les limites de l'aquifère alluvial correspondent à celles des alluvions, exception faite des terrasses non connectées et de celles du Mindel qui ont été écartées (cf. Illustrations 57 et 58).

Au final, le système aquifère est donc constitué par :

- les alluvions des basses terrasses de l'Holocène qui contiennent une nappe libre en relation hydraulique directe avec le Gave de Pau. Leur épaisseur est faible (quelques mètres en règle générale) mais leurs caractéristiques hydrodynamiques sont généralement intéressantes (transmissivité élevée comprise entre 10^{-2} et $2 \cdot 10^{-1}$ m²/s).
- les alluvions des moyennes terrasses du Würm qui représentent un réservoir plus épais que le précédent (5 à 20 m d'épaisseur) et qui se caractérisent par des transmissivités intéressantes comprises entre 10^{-3} et 10^{-2} m²/s. C'est au niveau de cette terrasse que sont implantés la majorité des forages.
- les alluvions des hautes terrasses du Riss formées de galets et de cailloutis pris dans une matrice argilo-sableuse et dont l'épaisseur peut atteindre une trentaine de mètres. Ces dernières sont toutefois très peu exploitées et ne représentent pas de ce fait une ressource à enjeu.

Latéralement, les limites de l'aquifère alluvial correspondent aux limites des formations imperméables que l'on trouve dans la zone d'étude : poudingues du Jurançon (Miocène), molasses argilo-sableuses de l'Eocène, Flysch du Campanien...

En dernier lieu, il convient de noter que les alluvions des affluents du Gave de Pau n'ont pas été intégrées au système précédemment décrit.

4.3.3. Géométrie de l'aquifère alluvial

Sur les 450 logs disponibles en BSS et concernant la zone d'étude, seuls 87 correspondaient à des ouvrages ayant atteint le substratum (cf. Illustration 58).

Dans l'objectif de préciser la géométrie de l'aquifère, les informations relatives à ces ouvrages et en particulier l'épaisseur des formations fluviatiles traversées et la cote du substratum (calculée par différence entre l'altitude du point et l'épaisseur d'alluvions) ont été regroupées sous la forme d'une base de données.

La répartition spatiale des points n'étant pas homogène sur l'ensemble de la nappe alluviale, le travail d'interpolation des données n'a été mené que sur les parties où la densité d'information a été jugée satisfaisante, c'est-à-dire sur les zones amont et médiane (83 logs concernés).

Afin de contraindre le modèle, des valeurs de cotes du substratum à l'affleurement (relevées sur les cartes géologiques et la carte des isobathes du mur des alluvions provenant de l'étude de la nappe phréatique du Gave de Pau dans le secteur de Pau à Coarraze) ont été prises en compte.

Les calculs ont été menés avec le logiciel GDM (Geological Data Management) développé par le BRGM. L'interpolation a été réalisée par krigeage sur la base d'une analyse variographique effectuée sous Vario2D (composante d'interpolation du logiciel GDM).

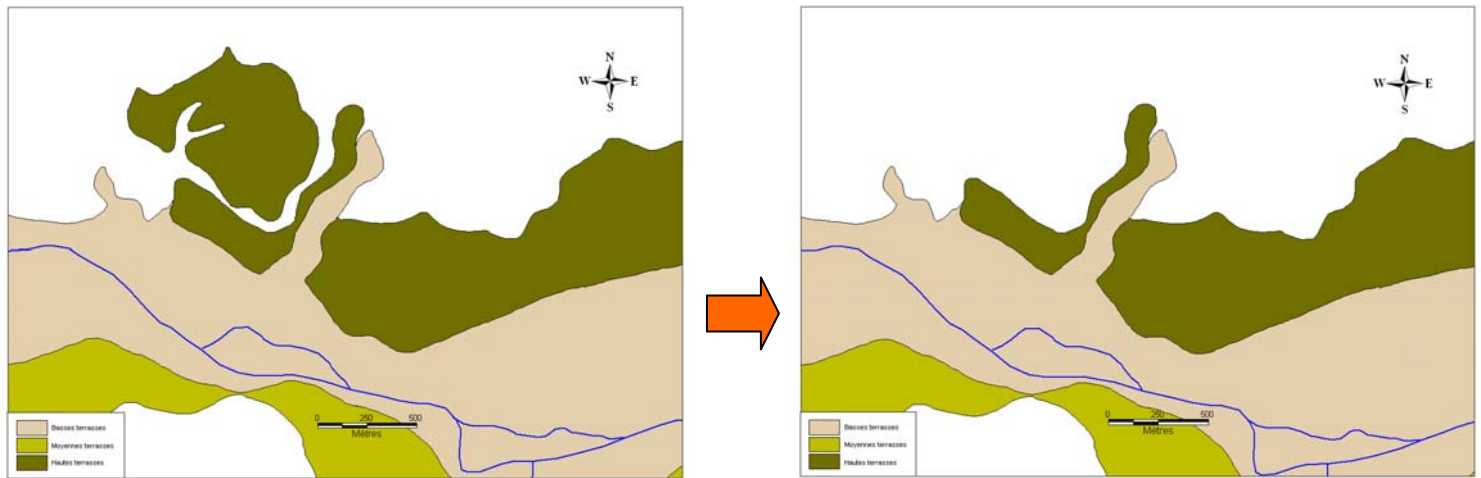


Illustration 57 : Extension des alluvions au niveau de St Cricq du Gave et limites retenues pour le système aquifère

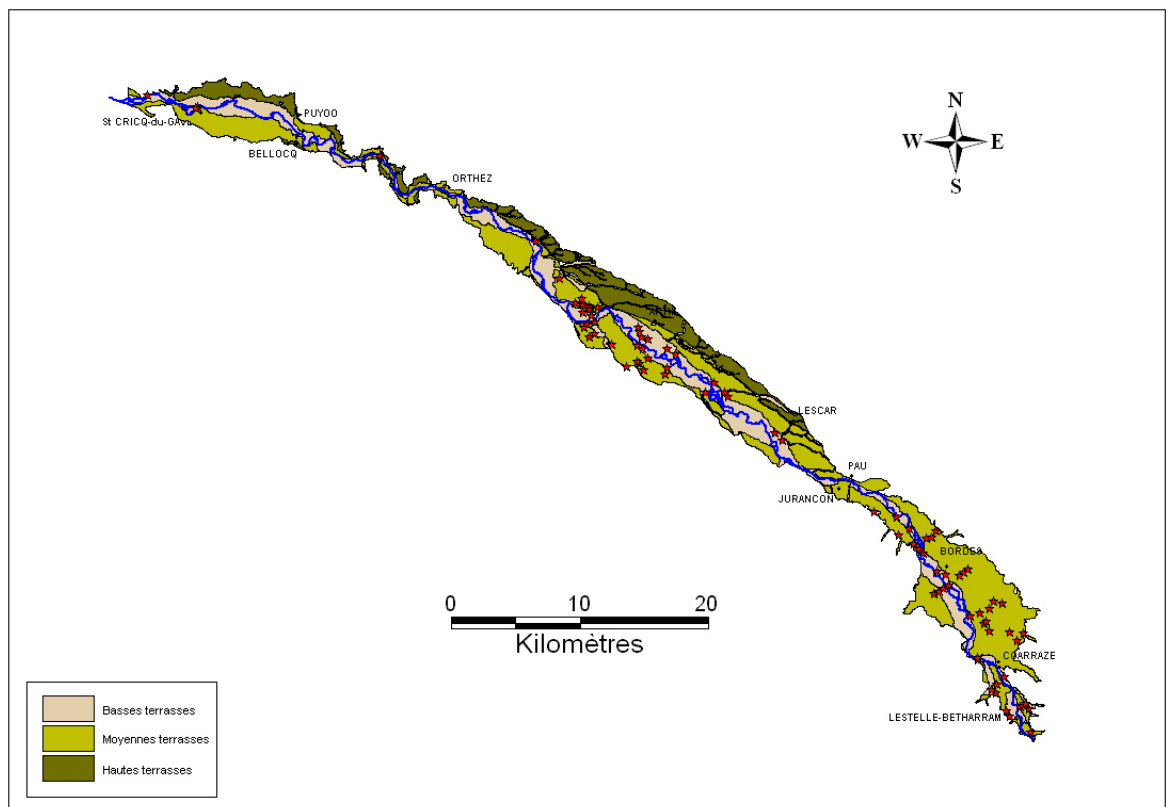


Illustration 58 : Extension de la nappe alluviale et localisation des 87 ouvrages dont les logs ont servi à la cartographie de l'aquifère

- **Toit du substratum de l'aquifère alluvial**

L'illustration 59 représente la cartographie en isohypses de la cote du substratum des formations alluviales sur la zone comprise entre Lestelle-Bétharram et Orthez.

Il apparaît que la cote diminue du sud-est vers le nord ouest, dans le sens d'écoulement du Gave de Pau. Elle passe de + 250 m à 0 m NGF sur une distance d'environ 90 km. Dans ces conditions, la pente a pu être évaluée à 0,3 %.

- **Epaisseur des formations fluviales quaternaires**

La cartographie en isopaches des formations fluviales quaternaires est représentée sur l'illustration 60.

La partie amont se caractérise par des épaisseurs souvent comprises entre 10 et 30 m avec un maximum observé au niveau de Bourdettes au sud-est de Pau.

A l'aval de Pau (secteur médian), les épaisseurs sont plus généralement comprises entre 0 et 10 mètres. On identifie toutefois des secteurs où les épaisseurs sont plus importantes, en particulier au niveau de la limite nord (secteur où les hautes terrasses sont bien développées).

A l'aval de la zone médiane (entre Orthez et Bérenx), la vallée se rétrécit et les épaisseurs sont encore plus faibles (< à 5 m).

Il convient de préciser que cette cartographie reste approximative dans la mesure où elle a été réalisée avec un nombre de points limité et où les différents niveaux de terrasse n'ont pas été individualisés. Elle ne permet pas par exemple de mettre en évidence l'amincissement des alluvions à l'approche des coteaux longeant la vallée.

Pour la partie située à l'aval d'Orthez (zone où les données étaient trop peu nombreuses pour être interpolées), une carte simplifiée a pu être établie à partir des logs disponibles et des références bibliographiques citées précédemment (cf. illustration 61). Il apparaît qu'une majeure partie de ce territoire présente des épaisseurs comprises entre 5 et 15 m.

4.3.4. Caractéristiques hydrodynamiques

Les valeurs de perméabilité et de transmissivité issues des documents bibliographiques ont fait l'objet d'une cartographie.

➤ *Perméabilité*

La composition lithologique des différentes terrasses alluviales du Gave de Pau (sables, galets, limons, argiles) induit généralement des perméabilités élevées. Ces perméabilités ne sont toutefois pas réparties de manière homogène. Elles dépendent notamment de la granulométrie des matériaux et de la nature de la matrice (plus ou moins argileuse) qui les entoure.

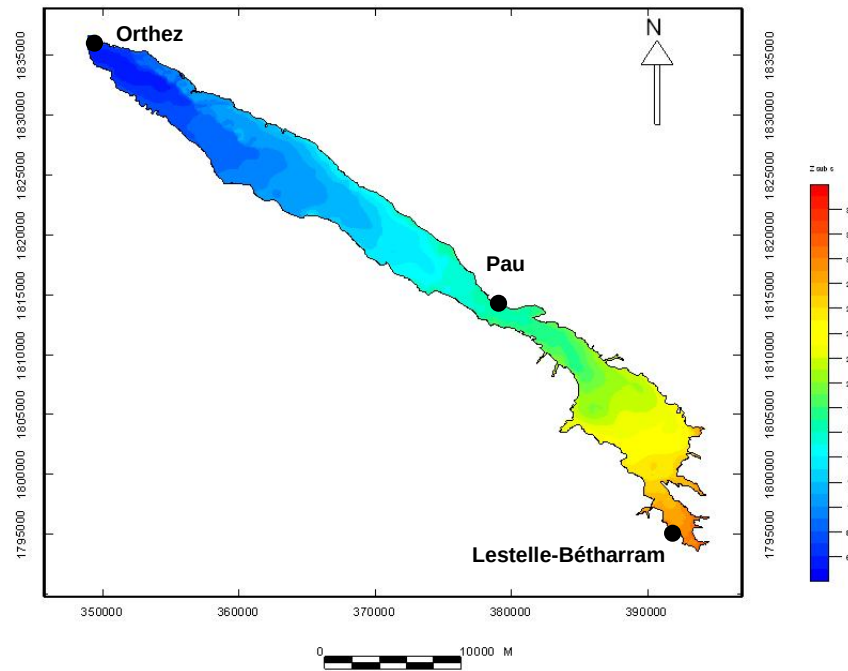


Illustration 59 : Cotes du substratum des alluvions (parties amont et médiane)

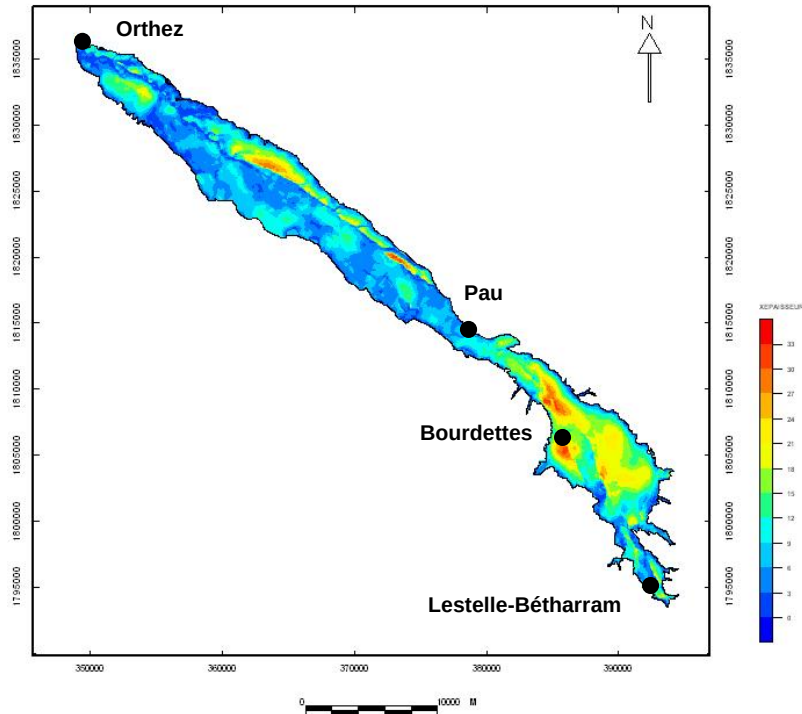


Illustration 60 : Epaisseur des alluvions (parties amont et médiane)

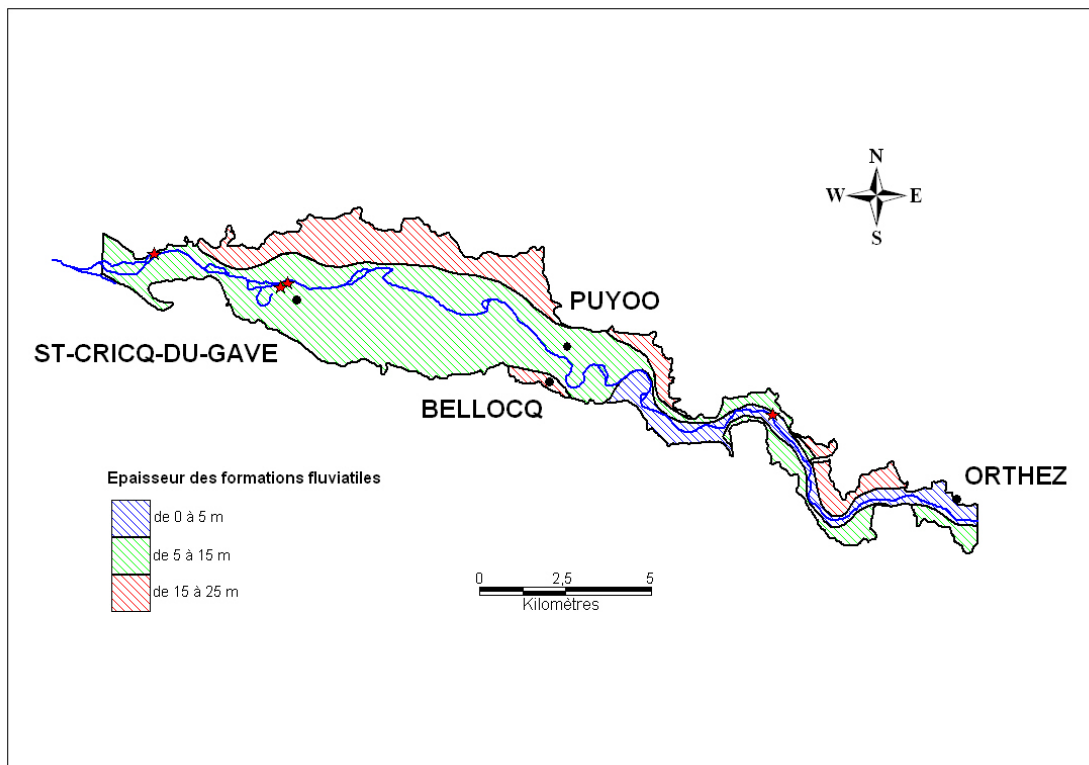


Illustration 61 : Estimation des épaisseurs des formations alluviales pour la partie située entre Orthez et Saint-Cricq-du-Gave

L'illustration 62 confirme l'hétérogénéité décrite précédemment. Le secteur de Bordes semble aussi se distinguer par de plus fortes perméabilités que les autres zones. Ce constat peut toutefois être lié à la plus forte densité de forages implantés dans ce territoire et ayant fait l'objet de tests.

➤ Transmissivité

L'illustration 63 représente les valeurs de transmissivité obtenues grâce aux pompages d'essai. Il s'avère que les données sont très peu nombreuses et dans ce cas aussi, relativement hétérogènes.

Dans le secteur de Pau, des essais de pompage réalisés en 1988 ont permis de calculer des valeurs comprises entre **2 et $5 \cdot 10^{-4}$ m²/s**. Ces faibles valeurs correspondent à des argiles plus ou moins graveleuses ou sableuses consistantes à très consistantes. Les coefficients d'emménagement calculés (entre 3 et 15 %) correspondent néanmoins à ceux d'une nappe libre.

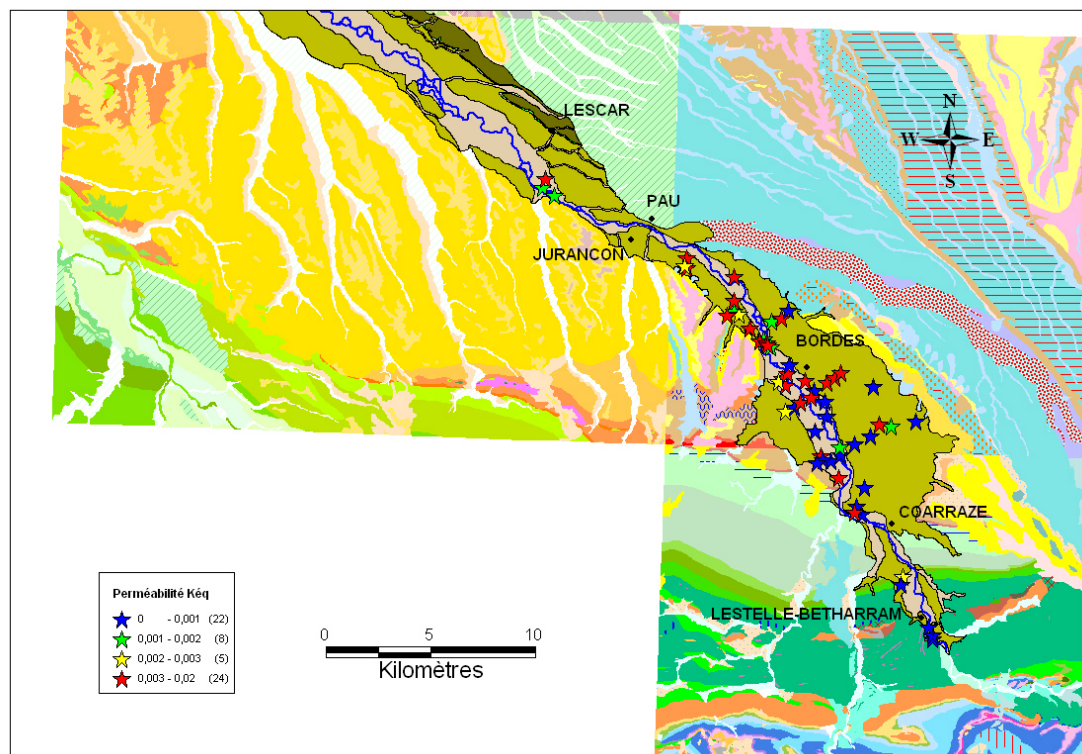


Illustration 62 : Répartition des valeurs de perméabilité

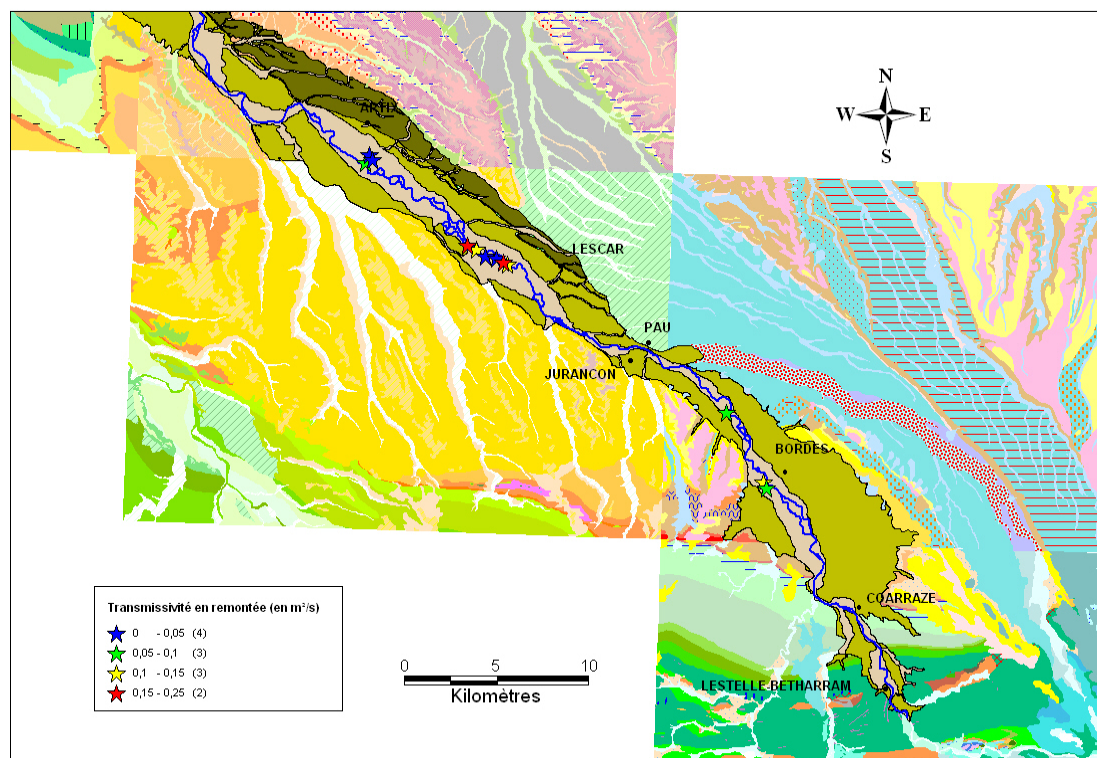


Illustration 63 : Répartition des valeurs de transmissivité

En aval de Pau, des essais de pompage réalisés en 1987 ont permis de calculer des transmissivités plus élevées :

- $T = 1 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ près du Gave
- $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} < T < 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ près des coteaux
- $2.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s} < T < 2.5 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ de part et d'autre de la N117 : (étude de la plaine alluviale du Gave entre Artix et Lescar)
- $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} < T < 1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ en rive gauche (étude rive gauche sur les communes d'Arbus et Tarsacq)
-

Les essais de pompage effectués dans le cadre de l'étude hydrogéologique des forages de Siros, Arbus et Artiguelouve ont donné d'autres valeurs :

- Forage F1 : $1.9 \times 10^{-1} < T < 2.2 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$
- Forage F2 : $7.1 \times 10^{-2} < T < 1.8 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$
- Forage F3 : $4 \times 10^{-2} < T < 2 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$
- Forage F4 : $2.4 \times 10^{-2} < T < 6.4 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- Forage F5 : $T = 2.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- Forage F6 : $T = 1.5 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$

Enfin, les essais de nappe menés sur 4 points de prélèvements d'eau potable situés à Artix, Labastide-Cézéracq et Bézingrand (secteur situé entre Pau et Orthez) ont permis de calculer des transmissivités comprises entre 1×10^{-2} et $1 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ et une valeur de coefficient d'emmagasinement de 0.1.

4.3.5. Productivité

L'aquifère alluvial du Gave de Pau est constitué de matériaux détritiques (sables, galets, limons, argiles) provenant de l'érosion du massif pyrénéen et disposés en terrasses étagées au-dessus du cours d'eau.

La nappe qu'il renferme repose sur un substratum imperméable essentiellement constitué de molasses ou de flysch. Elle est alimentée de trois manières différentes :

- par infiltration directe des pluies sur les terrasses,
- par ruissellement à partir des versants,
- par échanges avec le Gave.

La capacité de l'aquifère à couvrir les besoins dépend de plusieurs facteurs :

- de l'épaisseur mouillée de l'aquifère qui elle-même est fonction de l'épaisseur des alluvions et du niveau de l'eau,
- de la perméabilité des matériaux qui dépend de leur granulométrie et de leur nature plus ou moins argileuse.

Dans **le secteur amont**, de Coarraze à Pau, les zones les plus favorables sont situées près du lit majeur du Gave de Pau en saligue et en basse terrasse. Au niveau de Narcastet et de Bourdettes, des épaisseurs mouillées dépassant 20 m ont été rencontrées.

A l'aval, de Pau à Artix, les zones les plus favorables correspondent aussi à l'environnement proche du cours d'eau, à la saligue (zone d'expansion des crues) et à la basse terrasse.

Dans les autres secteurs, soit en amont de Coarraze, soit en aval, d'Artix à Orthez, les connaissances sont ponctuelles et souvent limitées aux seuls captages d'eau potable.

4.3.6. Recharge

Pour une configuration hydrogéologique donnée, l'évolution des niveaux d'eau de la nappe est fonction de l'importance relative des flux entrants et sortants.

La recharge du réservoir alluvial est principalement assurée par l'infiltration des pluies sur les zones d'alimentation. Elle est fonction de la quantité d'eau tombée, de sa répartition dans le temps et dans l'espace.

Dans le cas du Gave de Pau, la recharge a été étudiée à partir des pluies enregistrées sur les stations METEO France de Lestelle-Betharram (station bénévole manuelle située à l'amont de la zone d'étude), de Pau-Uzein (station professionnelle à observation humaine située dans la partie médiane) et d'Orthez (station automatique en temps réel située à l'aval) et de l'ETP mesurée à la station de Pau-Uzein sur la période 1995-2006.

Les pluies efficaces ont été calculées au pas de temps mensuel pour chaque secteur en considérant que la réserve utile des sols était de l'ordre de 150 mm (valeur utilisée par Météo France pour Pau-Uzein dans le bulletin AUTAN) et en faisant les hypothèses suivantes :

- si les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle (ETP) alors elles servent à combler le déficit en eau du sol puis, le cas échéant, à alimenter la nappe;
- si les précipitations sont inférieures à l'ETP, la différence ETP-P est prélevée sur la réserve en eau du sol jusqu'à l'épuisement de celle-ci.

Les cumuls annuels ont été représentés sur l'illustration 64. Il apparaît que les cumuls relatifs aux stations de Lestelle-Betharram et d'Orthez sont systématiquement supérieurs à celui de la station de Pau-Uzein. Sur la période 1995-2006, ces cumuls représentent en moyenne 484,8, 404,4 et 271,6 mm.

Outre la variabilité spatiale, on note aussi une grande variabilité temporelle. Les pluies efficaces calculées pour la station Lestelle-Betharram peuvent, par exemple, quasiment varier du simple au double sur la période considérée.

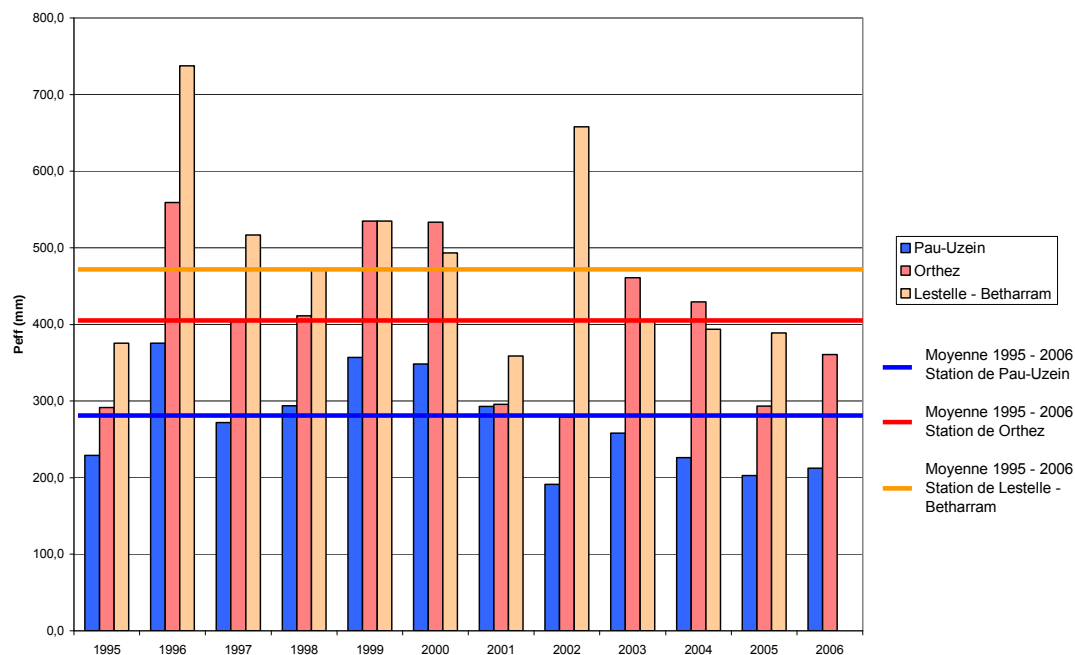


Illustration 64 : Pluies efficaces annuelles sur les 3 stations METEO France retenues

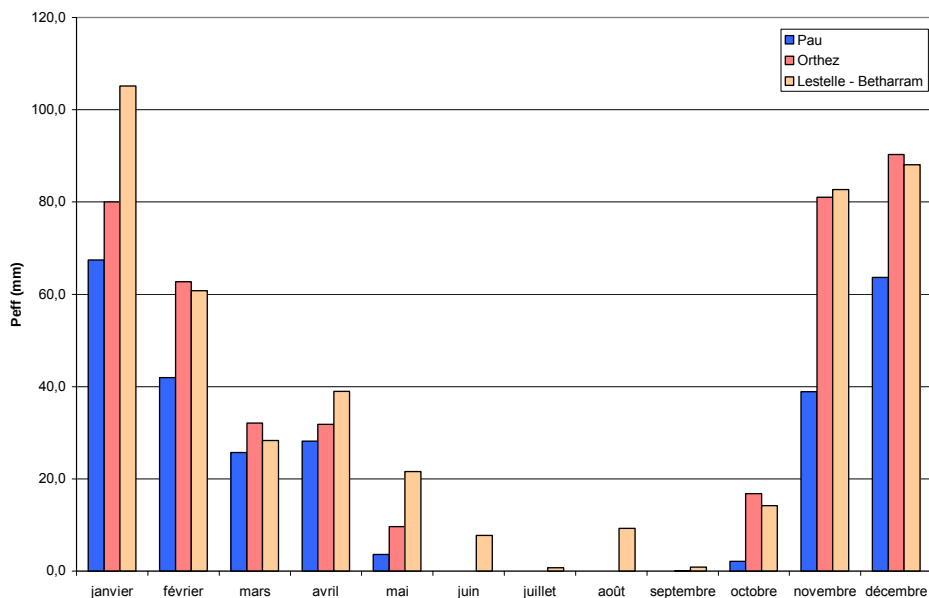


Illustration 65 : Pluies efficaces mensuelles moyennes sur les 3 stations METEO France retenues

Ces observations montrent l'intérêt de disposer de plusieurs stations de mesures lorsqu'on étudie un domaine de grande superficie (environ 500 km² dans le cas de la nappe alluviale du Gave de Pau).

Afin d'apprécier les périodes de recharge, les pluies efficaces mensuelles moyennes ont aussi été représentées (cf. Illustration 65).

Il apparaît que les épisodes d'apports d'eau à la nappe s'étendent d'octobre à mai pour les stations de Pau et Orthez et que les pluies restent efficaces toute l'année dans le secteur de Lestelle-Bétharram.

Les pointes de recharge sont enregistrées sur la période décembre-janvier au moment où les pluies sont les plus importantes, la température et l'évaporation faibles et la végétation peu active. Entre juin et septembre, la recharge est très faible, voire nulle.

4.3.7. Piézométrie

- **Apports des études anciennes**

Pour le secteur situé à l'amont de Pau :

Des cartes piézométriques ont été établies en juillet 1957 ainsi qu'en octobre 1980 (sources E.D.F. et D.D.A.S.S.). Les résultats ont montré un drainage de la nappe par le Gave entre Assat et Pau, des possibilités d'échange en amont, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, selon les secteurs et les saisons et des alimentations probables en provenance des coteaux.

Les variations saisonnières de la nappe semblent étroitement dépendantes des précipitations et de la position des ouvrages de contrôle par rapport au Gave. Le suivi effectué par la D.D.A.S.S. entre 1984 et 1990 sur trois piézomètres entre Mazères et Rontignon a mis en évidence :

- un niveau moyen à 4 mètres à Uzès (ouvrage proche du Gave) avec une variation de 1.60 m minimum,
- un niveau moyen à 5.50 m à Rontignon (ouvrage situé en milieu de terrasse) avec une variation de 2.20 m minimum,
- un niveau moyen à 7 m à Mazères (ouvrage situé à proximité des coteaux) avec une variation de 2.40 m.

Entre Baliros et Baudreix, les cotes maximales sont généralement observées fin février et les minimas, en fin de période estivale (septembre). Cette époque correspond aussi à la période où les niveaux du Gave sont les plus bas.

Il convient de noter que les cotes minimales de la nappe sont parfois observées un peu plus tôt (août), probablement en raison des prélèvements agricoles.

Pour le secteur situé à l'aval de Pau :

Dans la zone d'Artix, la piézométrie met en évidence l'alimentation de la nappe par le Gave de Pau, phénomène prépondérant en période d'étiage. Les battements de la nappe varient selon les zones :

- très faibles (de l'ordre de 1m) sur les plans d'eau et les retenues (lac d'Artix et seuil de Denguin). Ceci confirme le rôle stabilisateur du Gave de Pau.
- un peu plus élevés (de l'ordre de 2 m) au niveau de la plaine de Lons - Lescar compte tenu de conditions géométriques différentes
- importants (3 à 5 m) en pied de coteaux mais cette situation n'est pas généralisée.

• Données acquises dans le cadre du module 5

Au 30 juin 2008, le réseau du Conseil Général des Pyrénées Atlantiques comportait 20 ouvrages implantés dans les alluvions du Gave de Pau (masse d'eau 5030) (source ADES) (cf. Illustration 66).

Parmi ces 20 ouvrages, 15 sont suivis par le CG 64 (dont 7 en continu) et 5 par le BRGM au moyen de sondes installées en juin 2006. Les illustrations 67 et 68 représentent les différentes chroniques enregistrées.

Dans le cas des ouvrages suivis par le BRGM, les lacunes d'information sont essentiellement dues à la perte de données stockées sur un disque dur. Le matériel d'acquisition a aussi connu un certain nombre de dysfonctionnements dont certains ont conduit à l'abandon du matériel (capteurs initialement installés sur les points de Siros et de Bordes).

Les données piézométriques feront l'objet d'une analyse détaillée (du type de celle qui a été menée pour la nappe alluviale de la Dordogne) au cours de la prochaine année du programme d'étude.

Un premier examen de l'illustration 67 permet toutefois de noter :

- des variations quasi synchrones et des amplitudes de battement relativement similaires d'un ouvrage à l'autre,
- un léger amortissement des signaux relatifs aux piézomètres de Bordes et de Labastide qui pourrait s'expliquer par une distance au cours d'eau plus importante,
- des périodes de plus hautes eaux en mai/juin qui témoignent de relations privilégiées entre la nappe et le cours d'eau. Le Gave de Pau présente en effet à la même époque ses débits maximum du fait de la fonte des neiges (régime pluvio-nival),
- des périodes de plus basses eaux en août.

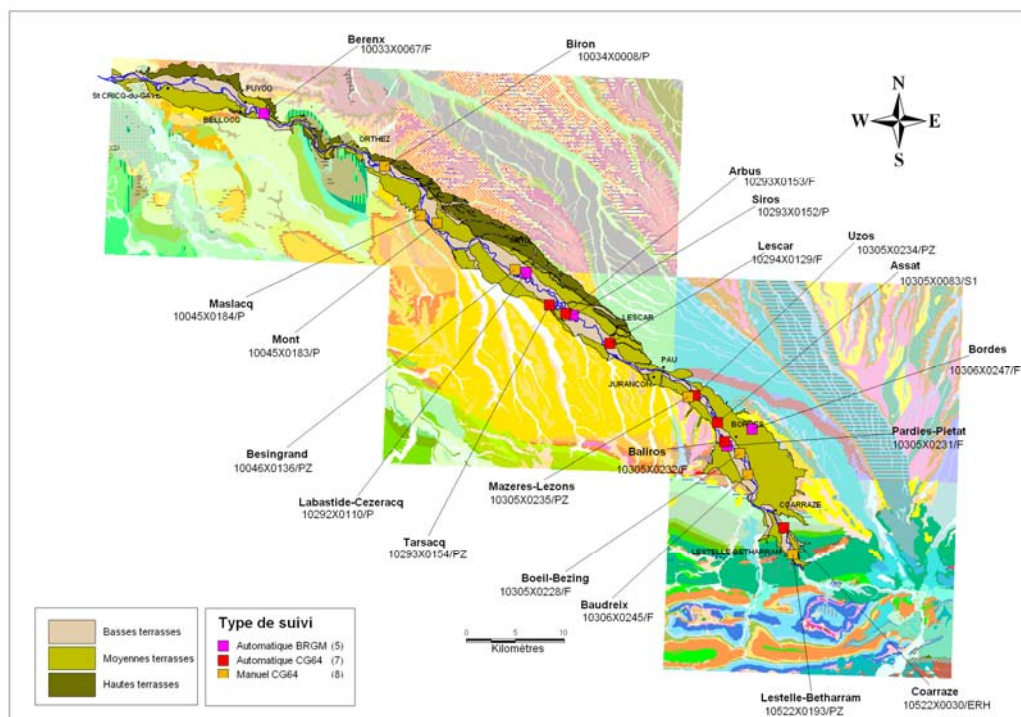


Illustration 66 : Localisation des ouvrages de suivi piézométrique implantés dans les alluvions du Gave de Pau

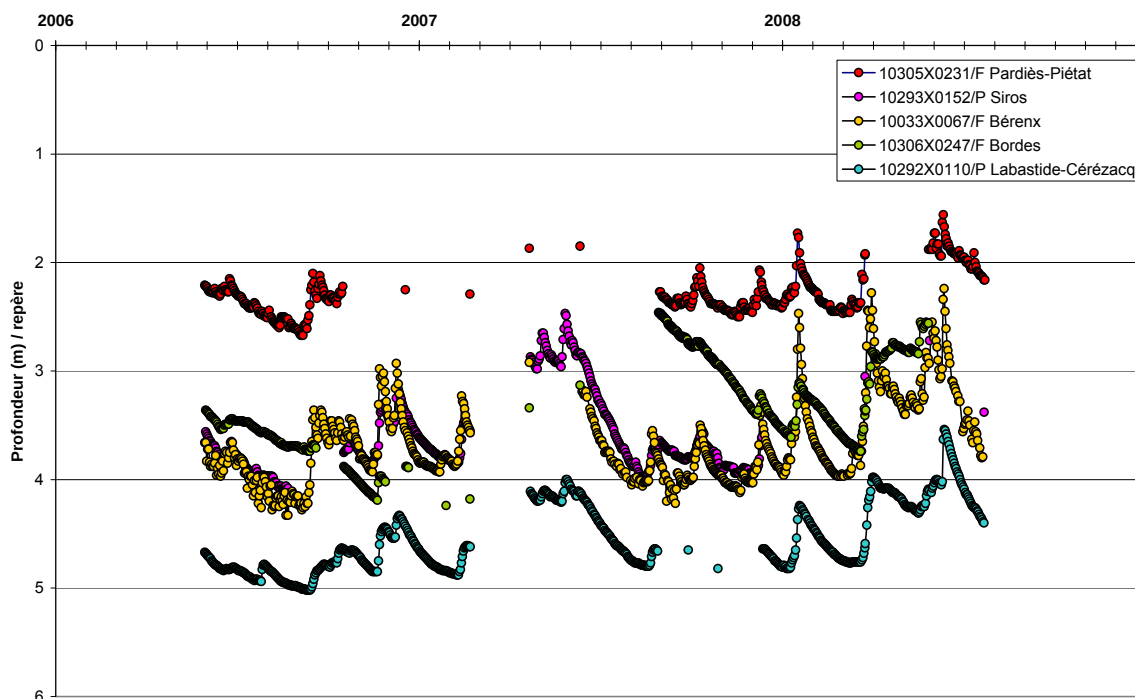


Illustration 67 : Chroniques enregistrées sur les points suivis par le BRGM



Illustration 68 : Chroniques enregistrées sur les points suivis par le Conseil Général 64

4.3.8. Qualité des eaux de la nappe alluviale

En l'absence d'étude de référence sur la qualité des eaux de la nappe alluviale du Gave de Pau, il a été décidé d'examiner les résultats des analyses menées par le Conseil Général des Pyrénées Atlantiques, la DDASS (dans le cadre du contrôle sanitaire) et l'Agence de l'Eau Adour-Garonne sur un total de 39 points de contrôle implantés le long de la vallée (cf. Illustration 69).

Dans la mesure où les données disponibles dans ADES étaient relativement disparates d'un point à l'autre et en fonction des années, seule la valeur ou la teneur moyenne de chaque paramètre ou élément a été représentée dans les illustrations suivantes.

L'examen a porté sur la conductivité et le pH, les éléments majeurs, la silice, le fer, le manganèse et les métaux lourds.

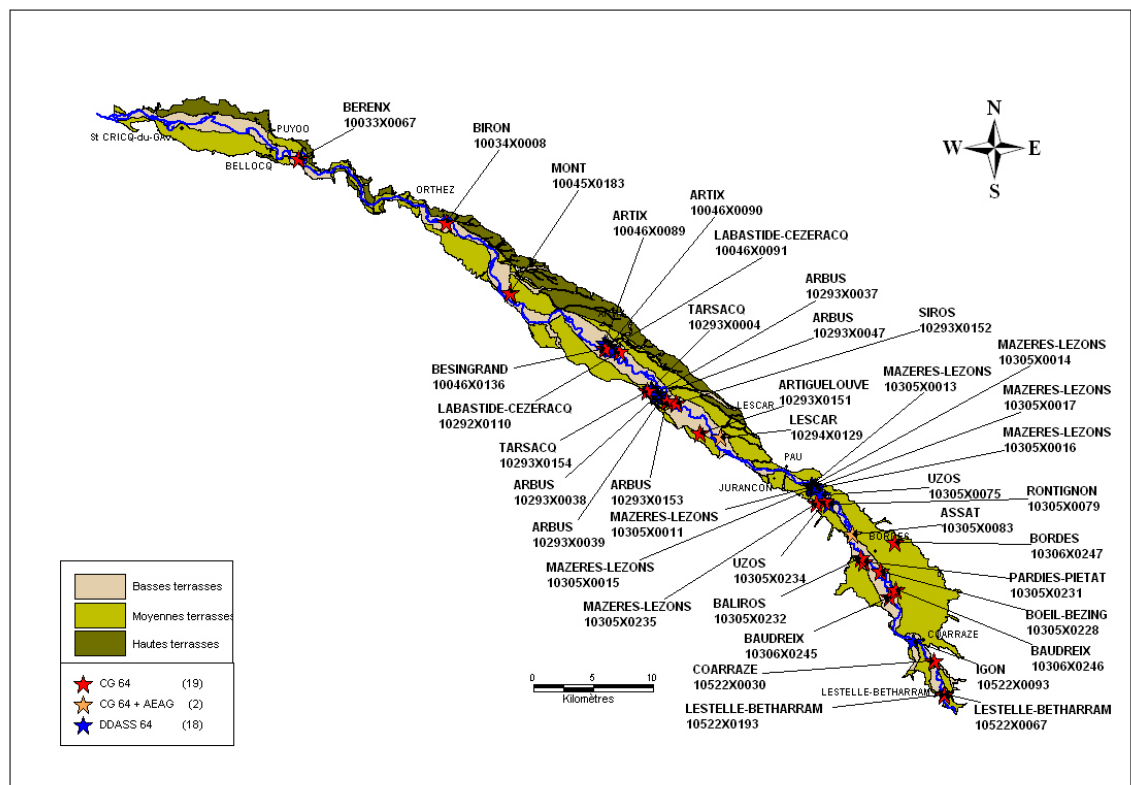


Illustration 69 : Localisation des points de contrôle de la qualité

• Paramètres de terrain

Parmi les paramètres mesurés sur le terrain, seule la conductivité qui caractérise la minéralisation globale des eaux a été représentée (cf. Illustration 70).

Les valeurs moyennes s'échelonnent de 236 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Coarraze, 10522X0030) à 574 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Uzos, 10305X0234) mais sont pour la plupart (23/38) comprises entre 300 et 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Dans ces conditions, la minéralisation de la nappe alluviale peut, dans son ensemble, être qualifiée de moyenne. La variabilité peut, quant à elle, s'expliquer par l'hétérogénéité lithologique des terrasses, par la nature du substratum, par la distance à la rivière mais aussi par la présence de contaminants.

Les eaux les plus minéralisées présentent en effet de fortes teneurs en nitrates et sont localisées dans les secteurs urbanisés et/ou agricoles.

En ce qui concerne le pH, les valeurs sont proches de la neutralité : elles s'échelonnent de 6,4 à Mont (10045X0183) à 7,9 à Mazères Lezons (10305X0014).

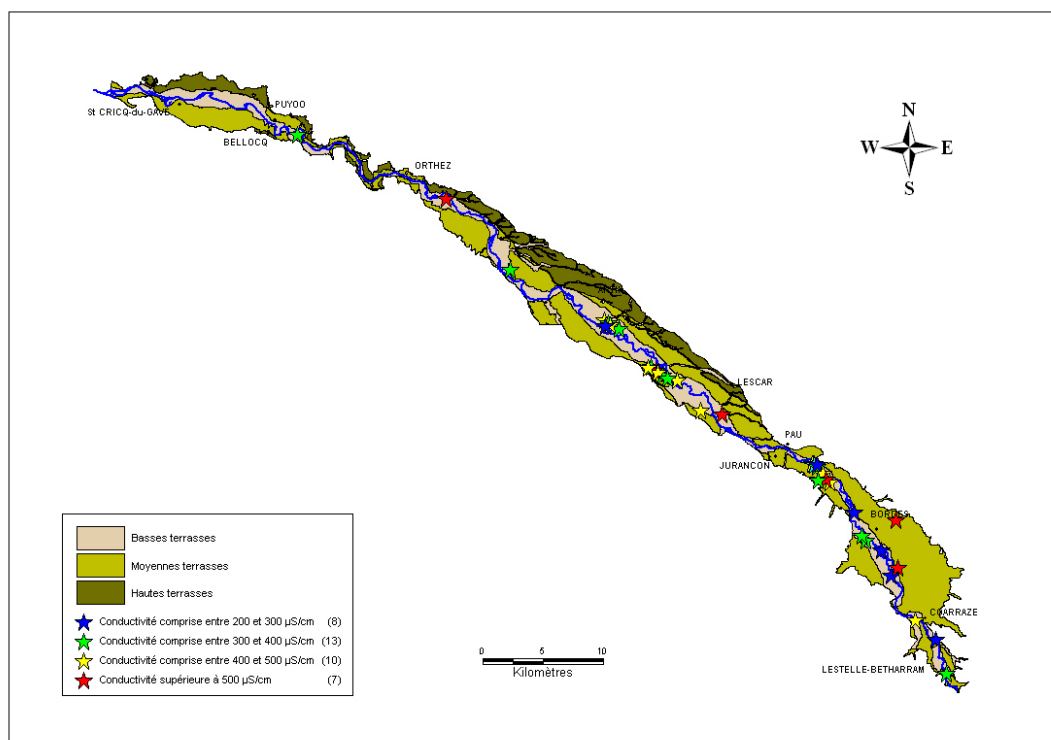


Illustration 70 : Valeurs moyennes de conductivité

- **Faciès chimique et éléments majeurs**

Dans un premier temps, les teneurs moyennes en éléments majeurs des 39 points de contrôle précédemment mentionnés ont été reportées sur un diagramme de Schoëller (cf. Illustration 71) dans l'objectif de déterminer le faciès des eaux de la nappe.

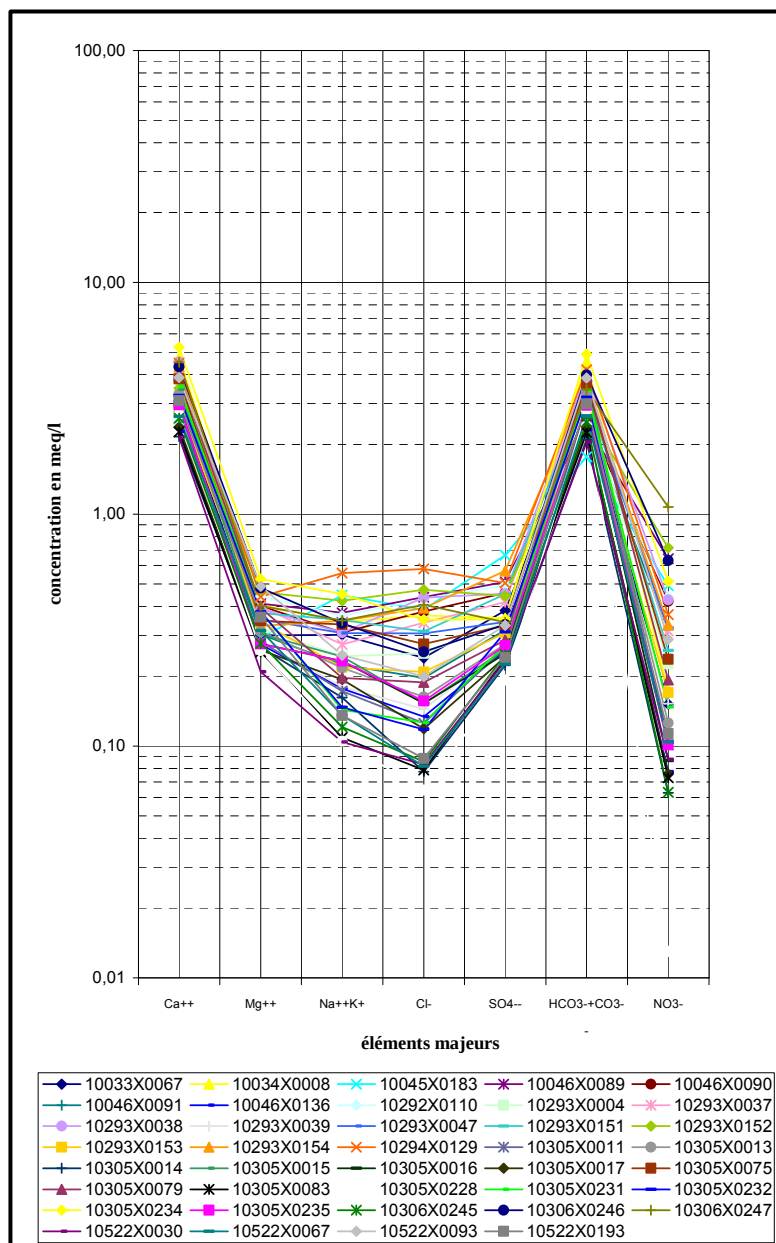


Illustration 71 : Diagramme de Schoëller représentant les teneurs moyennes en éléments majeurs des 39 points de contrôle

Le diagramme établi montre clairement que le faciès chimique des eaux de la nappe alluviale du Gave de Pau est de type bicarbonaté-calcique. Cette observation laisse supposer que les eaux ont circulé dans des formations calcaires : celles des coteaux et/ou du substratum (calcaires de l'Albien, flysch cénomanien, calcaires de l'Eocène...).

Dans une deuxième phase, une carte de répartition des teneurs moyennes a été réalisée pour chacun des 8 éléments majeurs. L'origine des éléments et la répartition des concentrations sont commentées dans les paragraphes suivants.

➤ les bicarbonates

Les bicarbonates proviennent de la dissolution des minéraux carbonatés. Le phénomène est contrôlé par le pH qui est lui-même contrôlé par la pression partielle de CO_2 ($p\text{CO}_2$). Lorsque la pression partielle de CO_2 baisse, les carbonates précipitent. Inversement, lorsque la pression augmente, le phénomène de dissolution s'accélère.

Dans le cas de l'aquifère alluvial du Gave de Pau, les concentrations moyennes s'échelonnent de 107 mg/l (Mont, 10045X0183) à 297 mg/l (Uzos, 10305X0234) mais sont pour la plupart (27/39) comprises entre 150 et 250 mg/l (cf. Illustration 72).

La carte établie ne met pas en évidence de zonation particulière. On remarquera tout au plus une zone où les teneurs sont particulièrement faibles dans les environs d'Artix (au droit de la coupe n°8).

Il convient de noter que l'environnement géologique de ce secteur n'est pas du tout calcaire : le substratum et les coteaux sont en effet constitués de poudingues du Jurançon. La nature imperméable de ces formations pourrait être à l'origine des faibles teneurs observées.

➤ le calcium

Le calcium provient aussi de la dissolution des roches carbonatées. Sa teneur est donc directement liée à la nature géologique des terrains.

L'illustration 73 montre que les teneurs sont toutes inférieures à 100 mg/l à l'exception de celle caractérisant le point d'Uzos (10305X0234) qui est légèrement plus élevée (105 mg/l).

Comme pour les bicarbonates, il n'est pas possible d'identifier de zones se caractérisant soit par de faibles teneurs, soit par de fortes teneurs.

On peut juste émettre l'hypothèse selon laquelle la minéralisation serait acquise par dissolution des roches calcaires formant les coteaux.

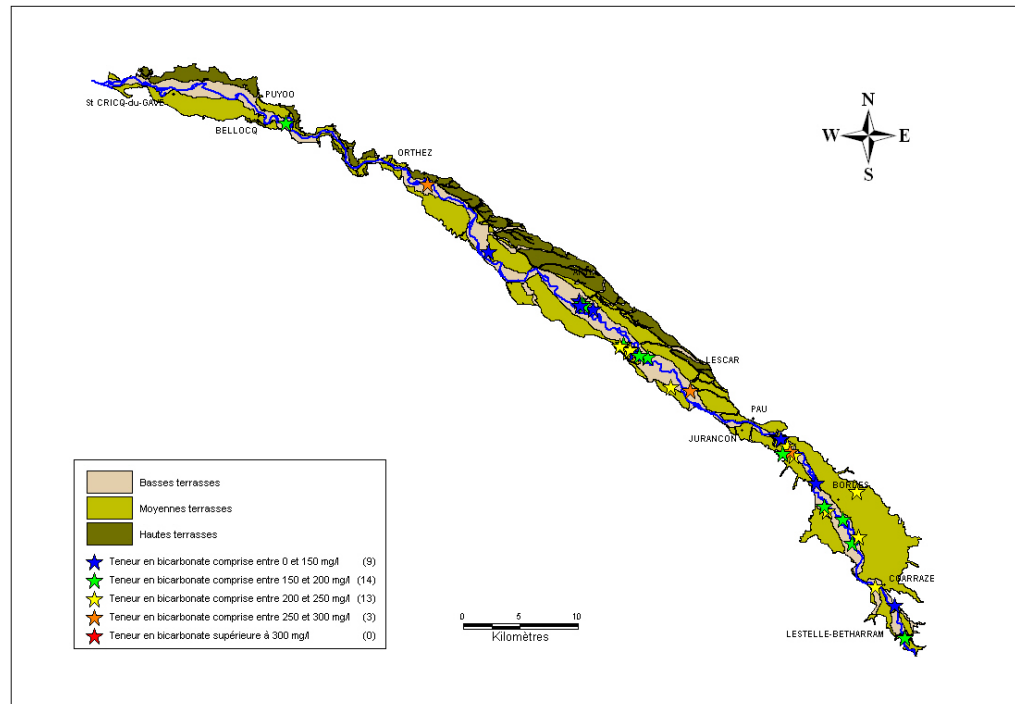


Illustration 72 : Teneurs moyennes en bicarbonates

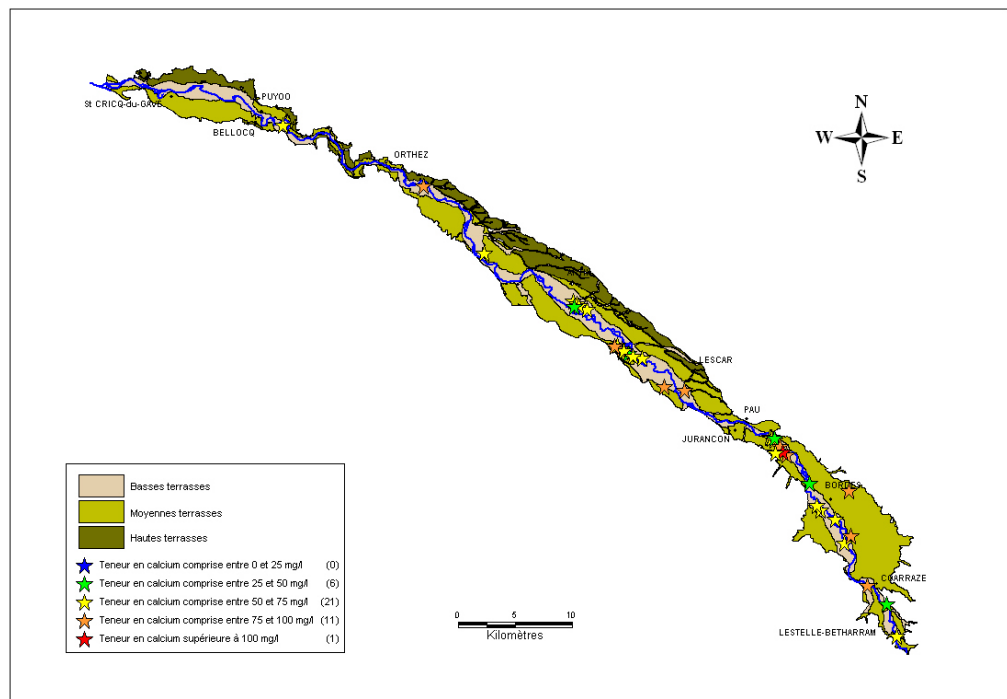


Illustration 73 : Teneurs moyennes en calcium

➤ le magnésium

Les carbonates magnésiens et en particulier la dolomie ($(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$) représentent la principale source de magnésium. Suivant le contexte géologique ou anthropique, de fortes teneurs peuvent aussi indiquer la présence d'évaporites dans le sous-sol ou un phénomène de contamination (ex : industrie de la potasse).

L'examen de la figure 74 montre que les teneurs en magnésium sont relativement faibles sur l'ensemble de la nappe. Trente-huit d'entre elles (sur 39) sont en effet comprises entre 2 et 6 mg/l. Une seule est légèrement supérieure : il s'agit de la teneur moyenne calculée pour le puits d'Uzos (6,38 mg/l).

Parmi les aquifères susceptibles d'être en relation avec le réservoir alluvial du Gave de Pau, aucun ne présente de formations dolomitiques franches. Ceci explique probablement les faibles teneurs en magnésium observées.

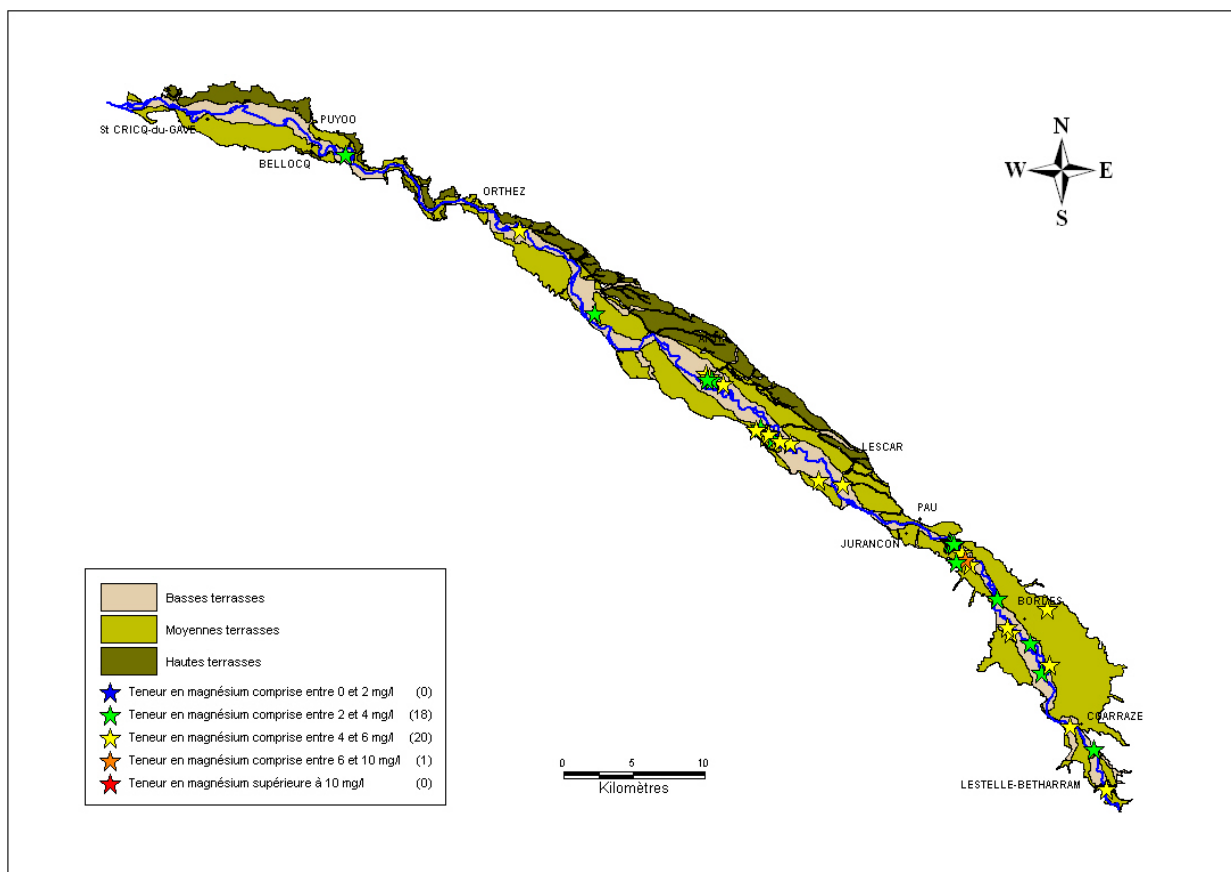


Illustration 74 : Teneurs moyennes en magnésium

➤ le sodium

Dans les eaux naturelles, le sodium est essentiellement présent sous sa forme ionique Na^+ . Des teneurs anormalement élevées peuvent traduire une contamination des précipitations par les embruns, l'intrusion d'un biseau salé, la présence de sels (ex : halite) dans les formations géologiques ou des phénomènes de lessivage.

L'illustration 75 ne met en évidence qu'une seule teneur moyenne supérieure à 10 mg/l : celle relative au point de Lescar (10294X0129).

Dans la mesure où cette dernière est égale à 12 mg/l, il est probable qu'aucun des phénomènes précédemment décrits ne soient en jeu dans l'acquisition de la minéralisation en sodium des eaux de la nappe alluviale du Gave de Pau.

➤ les chlorures

Les chlorures sont largement répandus dans la nature. Ils peuvent avoir une origine météorique (contamination des eaux de pluie par les embruns), anthropique (salage des routes, épandages, eaux usées...), océanique (intrusion d'un biseau salé) ou géologique (lessivage de halite ou de potasse).

L'illustration 76 met en évidence des teneurs relativement faibles (38 valeurs sur 39 inférieures à 20 mg/l). Elle semble aussi montrer une augmentation des teneurs moyennes de l'amont vers l'aval.

On remarque ainsi que la plupart des points situés à l'amont de Pau présentent des teneurs comprises entre 0 et 10 mg/l alors qu'à l'aval, les teneurs sont plus généralement comprises entre 10 et 20 mg/l. La valeur maximale est aussi observée dans ce secteur : il s'agit du puits de Lescar qui présente une teneur de 20.6 mg/l.

L'observation simultanée de fortes teneurs en sodium et en chlorures sur un point isolé (celui de Lescar) laisse supposer un phénomène de contamination local et permet d'écarter l'hypothèse de phénomènes de plus grande ampleur.

L'augmentation des teneurs d'amont en aval pourrait, quant à elle, s'expliquer par des pressions anthropiques plus importantes. L'hypothèse reste néanmoins à confirmer.

➤ le potassium

Le potassium est généralement présent en très faibles quantités dans les eaux naturelles. Bien que solubles, les sels de potassium restent en effet adsorbés dans les sols (Bremond, 1973).

Dans le cas de la nappe alluviale du Gave de Pau, toutes les teneurs sont inférieures à 4 mg/l (cf. Illustration 77). Il est donc possible d'écarter l'hypothèse selon laquelle le potassium proviendrait de la dissolution d'évaporites riches en potassium (de type sylvite (KCl) ou carnallite (KMgCl_2)) ou d'activités agricoles ou industrielles polluantes.

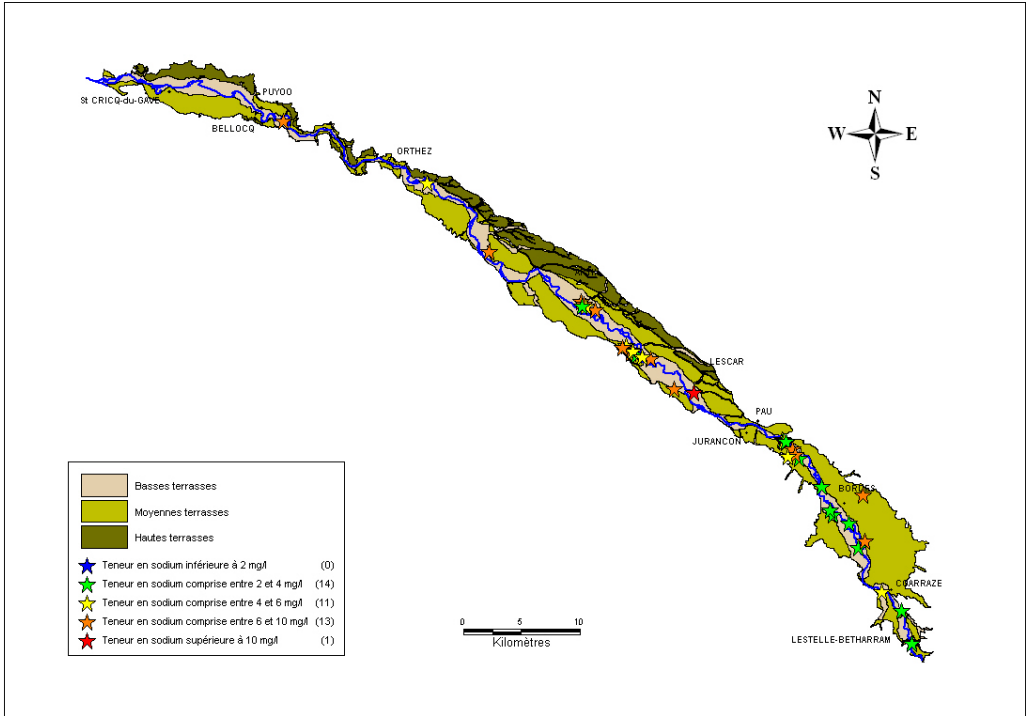


Illustration 75 : Teneurs moyennes en sodium

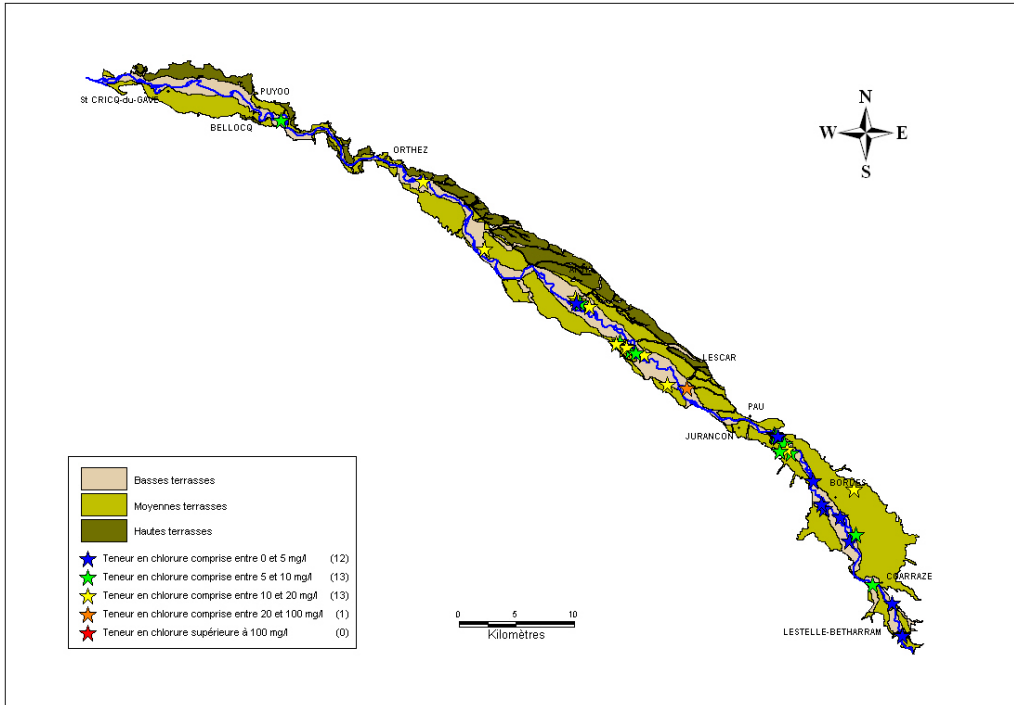


Illustration 76 : Teneurs moyennes en chlorures

➤ les sulfates

La présence de sulfates dans les eaux souterraines peut être liée à l'oxydation de différentes espèces minérales riches en soufre comme la pyrite (FeS_2) ou au lessivage de certains dépôts évaporitiques comme le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou la barytine (BaSO_4).

Elle peut aussi provenir du lessivage de formations marno-calcaires, de la contamination des précipitations par les embruns ou de l'activité anthropique (traitements agricoles, tanneries, papeteries, usines textiles, ateliers de décapage métallique...).

L'illustration 78 montre qu'à l'échelle de la nappe alluviale, les concentrations en sulfates sont faibles. Elles sont en effet comprises entre 10 et 30 mg/l pour la plupart d'entre elles (37/39).

Comme pour les chlorures, il semble que les teneurs moyennes des points situés à l'amont de Pau soient légèrement inférieures à celles qui caractérisent les points situés à l'aval. Dans ce secteur, c'est le puits de Mont (10045X0183) qui présente la plus forte valeur (32 mg/l). Cette teneur moyenne reste toutefois non significative par rapport à la mise en évidence d'un éventuel phénomène de contamination.

On peut en dernier lieu imaginer que la zonation mise en évidence soit liée au transfert et à l'accumulation de polluants depuis la partie amont où l'activité agricole est relativement importante vers la partie médiane de la zone d'étude.

➤ les nitrates

Les nitrates (NO_3^-) constituent le stade final d'oxydation de l'azote organique. Solubles dans l'eau, on les retrouve naturellement dans les eaux superficielles et souterraines.

Les teneurs sont de l'ordre de 0 à 10 mg/l en l'absence de source de pollution mais peuvent atteindre de très fortes valeurs dès lors que le contexte est propice : épandage d'engrais ou de fumier, rejets d'eaux usées ou présence d'industries polluantes (fabriques d'explosifs, industries chimiques et alimentaires...) à proximité des points de contrôle.

Dans le cas de la nappe alluviale du Gave de Pau, 16 points sur 39 présentent des teneurs moyennes supérieures à 15 mg/l (cf. Illustration 79). Parmi ces points, seul le puits de Bordes présente une teneur supérieure à 50 mg/l (66.5 mg/l).

Ces observations montrent que la nappe est sujette, à des degrés divers, à des problèmes de pollution en lien très probable avec l'activité agricole.

Comme pour les chlorures ou les sulfates, il semble que les teneurs augmentent d'amont en aval, ce qui laisse supposer des transferts de pollution depuis les secteurs les plus contaminés (ex : secteur de Bordes où la nappe éocène est aussi contaminée) vers la partie médiane de la zone d'étude.

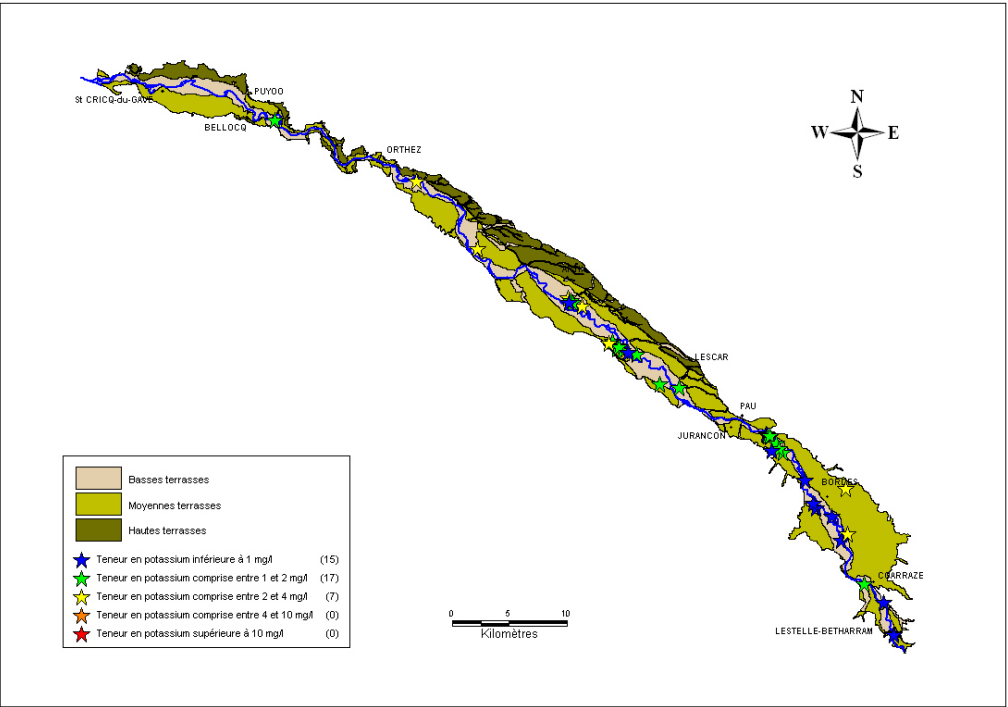


Illustration 77 : Teneurs moyennes en potassium

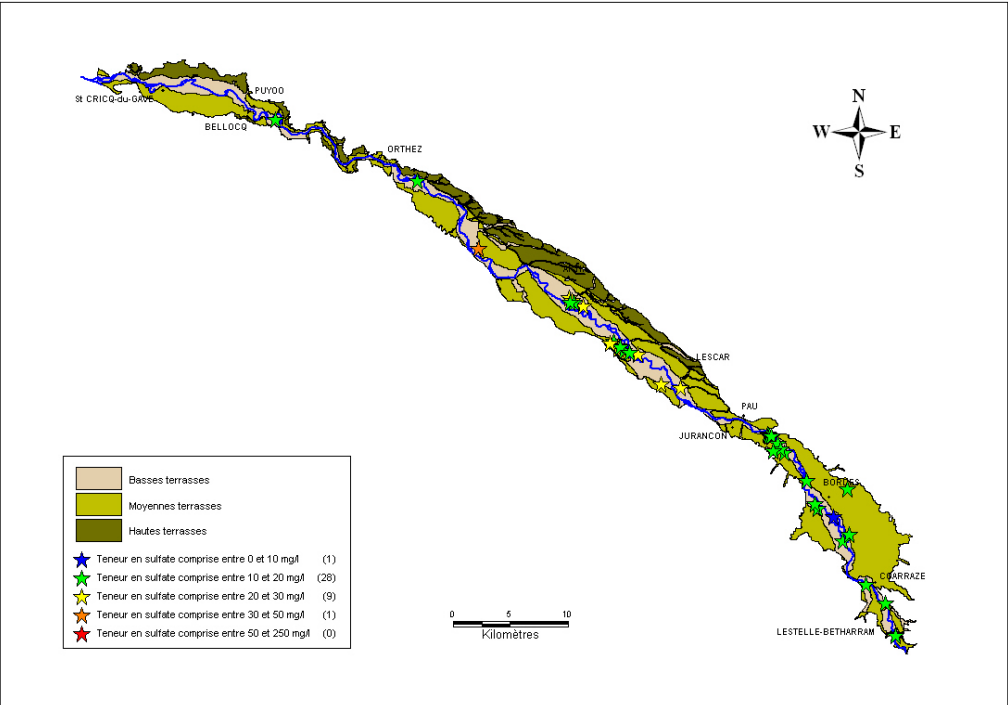


Illustration 78 : Teneurs moyennes en sulfates

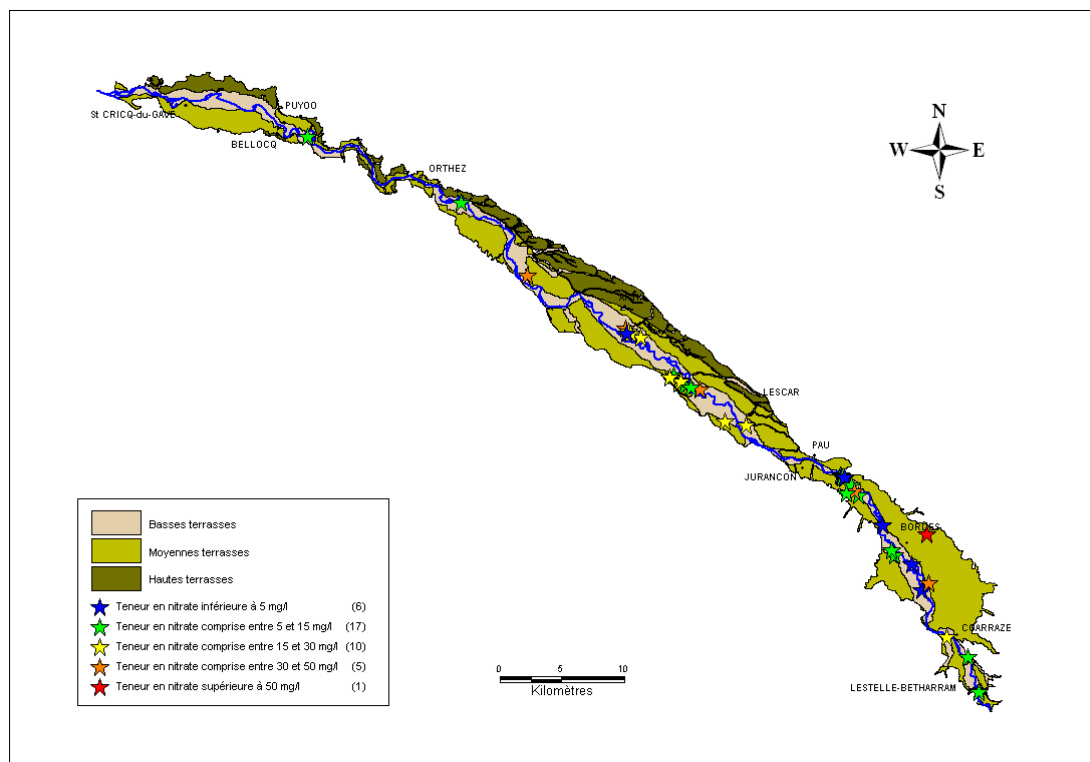


Illustration 79 : Teneurs moyennes en nitrates

Il convient enfin de préciser que les teneurs en nitrates présentent une variabilité saisonnière relativement importante avec des maxima observés de janvier à avril et des teneurs minimales observées d'août à octobre, ce qui confirme leur origine agricole.

Ces variations sont directement liées aux épisodes de recharge qui entraînent un lessivage des surfaces agricoles contaminées et le transfert des nitrates vers la zone saturée.

- **Les éléments mineurs**

- **la silice**

Dans la nature, la silice peut se présenter sous forme de macro-éléments (filons, blocs, galets, graviers...) ou d'éléments plus fins comme dans le cas des sables.

Dans le cas de la nappe alluviale du Gave de Pau, les teneurs moyennes s'échelonnent entre 3,93 mg/l à Mazères-Lezons (10305X0017) et 13,05 mg/l à Bordes (10306X0247) (cf. Illustration 80). La plupart des concentrations sont toutefois supérieures à 5 mg/l et traduisent la nature siliceuse du réservoir.

➤ le fer

La présence de fer dans l'eau peut avoir diverses origines : le lessivage et la dissolution de roches ou de minerais dans le sous-sol, les rejets industriels (pollutions minières, métallurgiques, sidérurgiques...) et la corrosion des canalisations métalliques (en fonte ou en acier).

Au niveau des eaux souterraines, la concentration en fer est principalement contrôlée par le pH et le potentiel d'oxydo-réduction ainsi que par la présence de matière organique.

Dans les eaux bien oxygénées, la teneur en fer ferrique (Fe^{3+}) n'excède pas quelques dizaines de $\mu\text{g/l}$ car elle est limitée par la précipitation de l'hydroxyde ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Dans les eaux plus réductrices, la forme réduite (Fe^{2+}) prédomine et peut atteindre quelques mg/l surtout si le pH est acide. Les nappes captives et les systèmes où l'oxygène a été consommé par dégradation de la matière organique sont donc favorables à un enrichissement en fer.

L'illustration 81 montre que parmi les points faisant l'objet de contrôles, un seul présente une teneur moyenne supérieure à la référence de qualité (0.2 mg/l). Il s'agit du puits de Labastide-Cézeracq (10046X0091).

La plupart des autres points (30/38) présentent des teneurs inférieures à $50 \mu\text{g/l}$, ce qui indique que l'aquifère est dans son ensemble bien oxygéné. Ce constat est normal compte tenu du mode d'alimentation de l'aquifère par les précipitations et par le cours d'eau.

➤ le manganèse

Comme pour le fer, l'apparition de manganèse est essentiellement contrôlée par les conditions de pH et d'oxydo-réduction.

L'illustration 82 montre que parmi les points faisant l'objet de contrôles, seuls 2 points présentent une teneur moyenne supérieure à la référence de qualité (0.05 mg/l). Il s'agit des puits d'Arbus (10293X0047) et de Boeil-Bezing (10305X0228) se caractérisant par des teneurs moyennes respectives de 81 et $94 \mu\text{g/l}$. L'origine de ces anomalies reste à déterminer.

• Les métaux lourds

Les métaux lourds sont assez peu recherchés dans les eaux brutes par le Conseil Général et la DDASS des Pyrénées Atlantiques. Tous les points de contrôle ont néanmoins fait l'objet d'au moins une analyse en arsenic, bore, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb, sélénium et zinc.

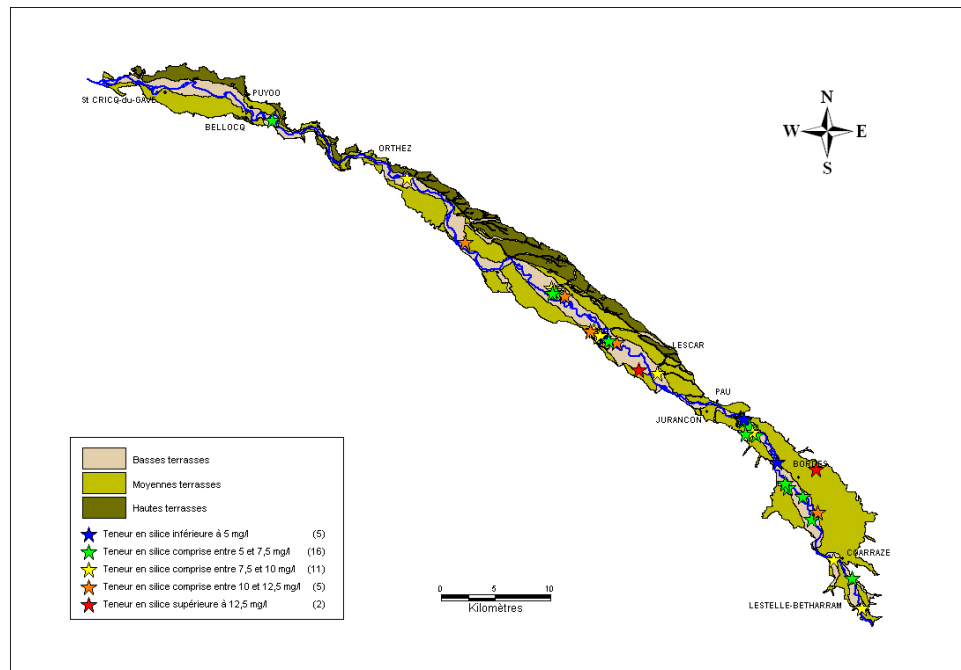


Illustration 80 : Teneurs moyennes en silice

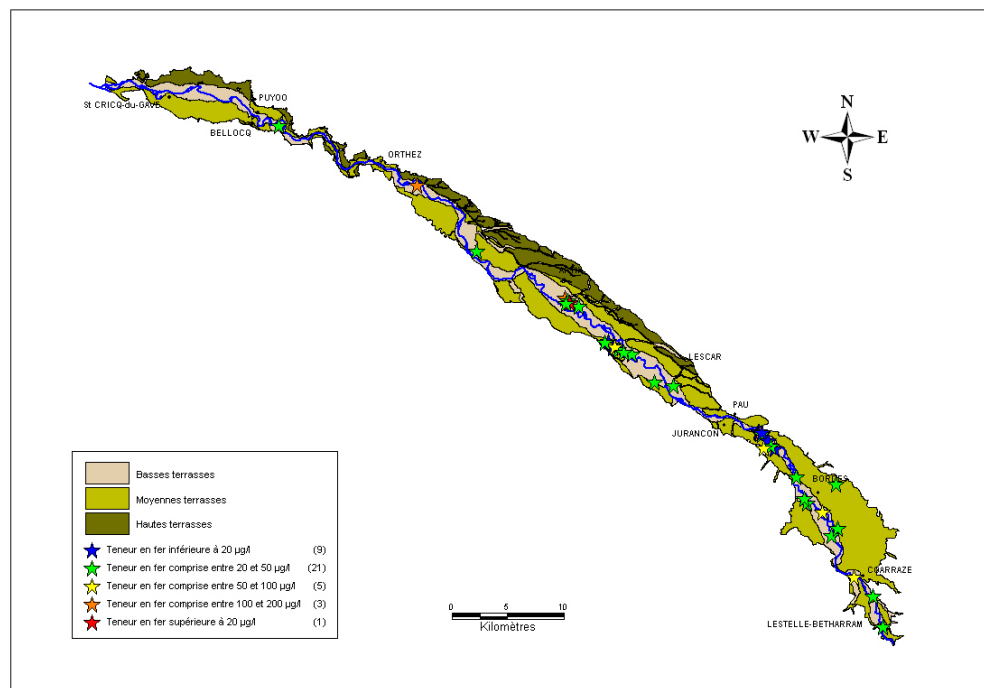


Illustration 81 : Teneurs moyennes en fer

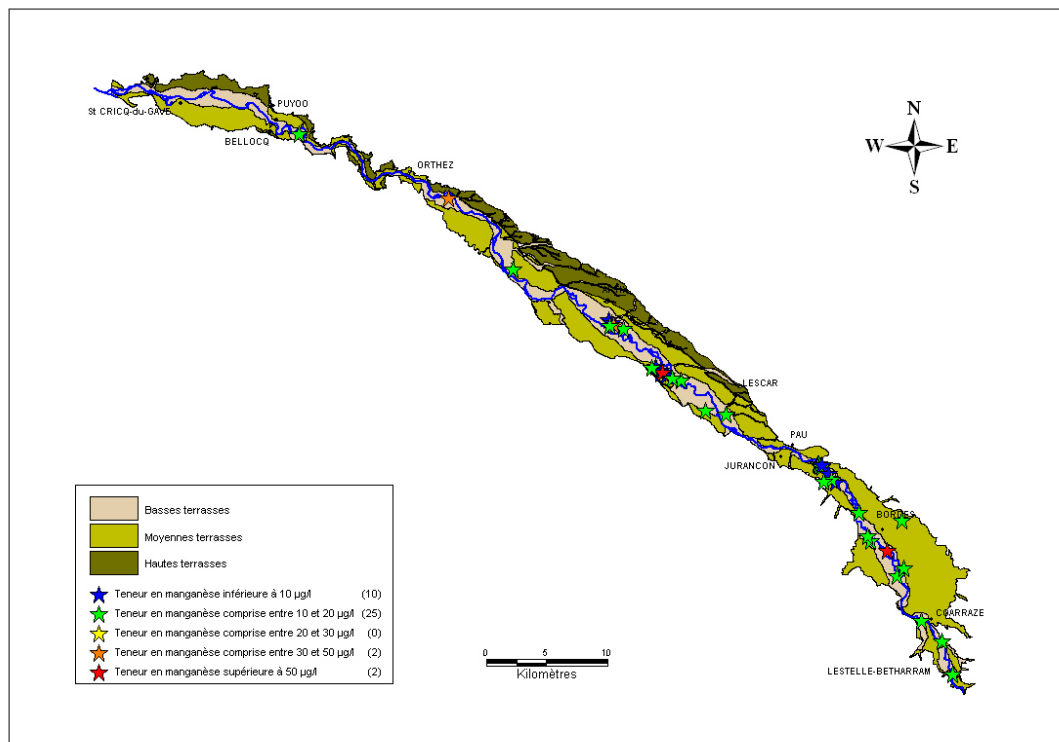


Illustration 82 : Teneurs moyennes en manganèse

Les teneurs dosées sur ces ouvrages sont toutes inférieures aux seuils de potabilité à l'exception :

- de la teneur en cadmium mesurée le 13 novembre 1996 sur le puits de Tarsacq (10293X0004) (teneur de 8,4 µg/l pour une limite de qualité des eaux destinées à la consommation humaine fixée à 5 µg/l). Par rapport aux autres mesures qui ont toujours été inférieures à 1 µg/l, cette valeur paraît anormale et pourrait être liée à la présence de la chaudronnerie industrielle plastique ou de l'atelier de carrosserie et de tôlerie automobile situés au droit de la commune. Ces deux activités utilisent en effet des pigments et des colorants qui sont fabriqués à partir de cadmium. Un rejet abusif ou accidentel pourrait expliquer la forte teneur détectée sur le puits en novembre 1996.
- de la teneur en plomb mesurée le 24 novembre 1999 sur le puits d'Arbus (10293X0037) (teneur de 21,7 µg/l pour une limite de qualité des eaux destinées à la consommation humaine fixée à 10 µg/l). Cette concentration est supérieure à celles qui sont généralement observées sur ce puits (teneurs inférieures à 7 µg/l) et laisse supposer une pollution d'origine anthropique. La commune d'Arbus fait partie du périmètre d'exploitation de Lacq et possède des forages pétroliers. Les eaux résiduelles issues de ces sites d'extraction peuvent contenir du plomb en concentration importante et pourraient donc être à l'origine de cette pollution ponctuelle.

4.3.9. Prélèvements

Une enquête a été menée auprès de l'Agence de l'Eau Adour Garonne et des organismes en charge de la gestion de l'eau sur le département des Pyrénées Atlantiques (Chambre d'Agriculture, DDAF...) afin d'estimer les prélèvements effectués dans la nappe alluviale du Gave de Pau.

Les données transmises par l'Agence de l'Eau ont permis d'établir le tableau suivant qui précise les volumes prélevés et le nombre de points de captage en fonction des usages pour l'année 2001.

Pression de prélèvement				
Année de référence 2001	AEP	Irrigation	Industrie	Total
Eaux souterraines m ³ /an	11 760 000	1 397 000	4 991 000	18 140 000
% du volume total	65	8	28	
Nombre de points de captage	28,9	134,0	18,0	180,9

Tableau 7 : Volumes prélevés et nombre d'ouvrages sollicitant la nappe alluviale du Gave de Pau (données AEAG)

Selon ces chiffres, il semblerait que les prélèvements effectués dans la nappe alluviale soient de l'ordre de 18 millions de m³ avec des prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable qui représenteraient plus de la moitié des volumes totaux prélevés.

Un contact pris auprès de la chambre d'agriculture a permis d'obtenir des informations plus précises quant aux prélèvements agricoles. Dans un fichier datant de 2002, 235 ouvrages (non géoréférencés) étaient recensés pour un volume autorisé annuel de 2.4 millions de m³.

Les divergences de chiffres montrent à quel point il est difficile d'obtenir une information synthétique de qualité sans procéder à des investigations plus minutieuses.

Ces dernières seront menées au cours de la prochaine année du programme.

4.4. CONCLUSION

La caractérisation géologique et hydrogéologique menée sur la nappe alluviale du Gave de Pau en année 4 a permis de préciser un certain nombre de points. Il apparaît ainsi que :

- 3 niveaux de terrasse datant respectivement de l'Holocène, du Würm et du Riss ont pu être identifiés et que les basses et moyennes terrasses sont souvent en connexion du fait que les alluvions se trouvent en relais (toit de la terrasse inférieure plus haut que la base de remblaiement de la terrasse supérieure)
- que la cote du substratum des alluvions diminue du sud-est vers le nord ouest, dans le sens d'écoulement du Gave de Pau. Elle passe de + 250 m à 0 m NGF sur une distance d'environ 90 km. Dans ces conditions, la pente a pu être évaluée à 0,3 %.
- que la partie amont de la zone d'étude se caractérise par des épaisseurs souvent comprises entre 10 et 30 m. A l'aval de Pau (secteur médian), les épaisseurs sont plus généralement comprises entre 0 et 10 mètres.
- que la perméabilité des formations est généralement élevée mais très dépendante de la granulométrie et de la teneur en argile des matériaux. Les essais de pompage menés sur le secteur d'étude ont permis de calculer des transmissivités comprises entre 1.10^{-4} et $2.5.10^{-1}$ m²/s et des coefficients d'emménagement de l'ordre de 3 à 15 %, confirmant le caractère libre de la nappe.
- que les saligues (zones d'expansion des crues) et les basses terrasses représentent les zones à plus fort potentiel hydrogéologique pour la recherche de ressources
- que la recharge de la nappe est très variable d'une année sur l'autre (cumul annuel de précipitations efficaces pouvant varier dans un rapport de 1 à 2) et en fonction de la partie de la nappe alluviale considérée (les stations de Lestelle-Bétharram, Pau et Orthez se caractérisent par des cumuls de précipitations efficaces moyens respectifs de 485, 272 et 404 mm)
- que les épisodes de recharge par les précipitations s'étendent d'octobre à mai (avec un pic en décembre-janvier) pour les parties médiane et aval de la zone d'étude et que les pluies restent efficaces toute l'année dans le secteur amont
- la nappe est en étroite relation avec le Gave de Pau. Les périodes de plus hautes eaux s'observent en effet de façon synchrone sur les 2 systèmes au moment de la fonte des neiges.
- que les eaux de la nappe se caractérisent par une minéralisation moyenne (300 à 500 µS/cm), des pH proches de la neutralité et un faciès bicarbonaté calcique. Elles sont généralement pauvres en magnésium, sodium et potassium et riches en silice.

- que les teneurs en fer, manganèse et métaux lourds sont très rarement supérieures aux limites de qualité. Il en va de même pour les teneurs en nitrates qui traduisent néanmoins une contamination assez généralisée de la nappe (16 teneurs moyennes supérieures à 15 mg/l sur 39 points de contrôle)

- que les prélèvements effectués dans la nappe alluviale du Gave de Pau représenteraient un volume annuel de 18 millions de m³ dont plus de la moitié serait destiné à l'alimentation en eau potable. Ce chiffre reste toutefois à valider par une nouvelle enquête auprès des acteurs de la gestion de l'eau.

Au terme de ces investigations, il semble nécessaire de procéder à une étude plus détaillée des relations qui existent entre la nappe alluviale et le Gave de Pau.

Pour ce faire, un outil de type TEMPO pourra être mis en œuvre lors de la prochaine année d'étude. Ce dernier devrait permettre de mieux appréhender le fonctionnement de l'hydrosystème et de dégager des pistes pour mener une gestion plus efficace de l'aquifère.

5. Conclusion

En année 4 du programme d'étude des nappes alluviales de la Région Aquitaine, l'outil de gestion mis en place sur la nappe alluviale de la Garonne a été utilisé par la DDAF 47 pour instruire les dossiers d'autorisation de prélèvement. Les enregistrements effectués sur les puits alluviaux ont aussi été poursuivis de façon à disposer de chroniques plus étoffées qui pourront servir à actualiser l'outil en cas de besoin.

Parallèlement à ce suivi, un travail de valorisation des données acquises sur la nappe alluviale de la Dordogne a été entrepris. Dans un premier temps, le fonctionnement hydrogéologique de la nappe a été appréhendé au moyen d'une approche fonctionnelle et d'une analyse des débits et des hauteurs classés.

Le logiciel TEMPO a ensuite été utilisé pour modéliser les fonctions de transfert entre les signaux d'entrée (les précipitations et l'ETP) et de sortie (les débits et les niveaux piézométriques) puis pour déterminer les débits de la Dordogne et les niveaux piézométriques de 3 ouvrages de référence correspondant à différentes périodes de retour (mode prévisionnel).

Ces travaux ont permis de montrer que les basses terrasses étaient logiquement mieux connectées à la Dordogne que les moyennes terrasses, que l'inertie des systèmes était variable d'un secteur de la nappe alluviale à l'autre et que la réponse à un épisode de pluies efficaces était complexe (car due aux effets de la Dordogne et de l'impluvium dans des proportions variables), retardée (jusqu'à une trentaine de jours après l'évènement pluvieux) et atténuée du fait de la probable faible diffusivité des formations.

Il a aussi été démontré que les débits de la Dordogne et les niveaux piézométriques étaient très peu, voire pas du tout, impactés par les prélèvements agricoles effectués durant la période estivale. Ce constat peut s'expliquer par le fait que les prélèvements ne représentent que de faibles pourcentages des apports de la nappe au débit de la Dordogne et des volumes totaux transitant par le cours sur cette même période.

Enfin, les cotes piézométriques calculées pour les 3 piézomètres de référence (Allès, Siorac et La Force) pour des périodes de retour égales à 10 ans ont été assimilées à des piézométries objectif d'étiage.

Au final, la nappe alluviale de la Dordogne apparaît donc comme un secteur où il n'existe pas de réel problème quantitatif, ce qui était supposé mais non démontré au moment du lancement de l'étude. Dans ces conditions, une restriction des prélèvements n'apparaît pas nécessaire. On peut juste recommander que des efforts soient menés pour mieux les connaître.

Conformément au cahier des charges de l'étude, les enregistrements ont aussi été poursuivis sur la nappe alluviale du Gave de Pau. Un travail de caractérisation géologique et hydrogéologique a aussi été mené.

Il a permis de préciser l'extension et la géométrie du réservoir alluvial, d'identifier son mode et ses périodes de recharge et d'évaluer sa qualité qui peut être qualifiée de correcte au vu des éléments examinés.

Au terme de ces investigations, il apparaît nécessaire de procéder à un recensement plus précis des prélèvements et à une étude détaillée des relations qui existent entre la nappe alluviale et le cours d'eau.

De nouveaux contacts seront donc pris auprès des organismes en charge de la gestion de l'eau et une approche du même type de celle qui a été menée pour la Dordogne pourra être mise en oeuvre. Elle devrait permettre de mieux appréhender le fonctionnement de l'hydrosystème et de dégager des pistes pour mener une gestion plus efficace de l'aquifère.

Le programme de la prochaine année d'étude prévoit aussi l'instrumentation d'une nouvelle nappe alluviale : celle du Dropt.

Bibliographie

ANTEA (1995) - Etude globale de protection de l'aquifère alluvial du Gave de Pau

AQUADOUR, Bulletin d'information sur l'eau dans le Bassin de l'Adour - Numéro 28, P. REGNACQ, 2002.

Armand C. (1997) - Avis hydrogéologique pour la définition des périmètres de protection des forages de Bordes

Baudin G. (1979) - Ressources en eau de la nappe des alluvions du Gave de Pau entre Lestelle – Bétharram et Pau, Thèse

Cabinet Berre (2000) - Rapport hydrogéologique pour l'alimentation en eau potable de la région de Jurançon

Cabinet Berre (2003) - Recherche d'eau potable sur les communes de Siros, Arbus et Artiguelouve

Cabinet Berre (2005) - Etude hydrogéologique de l'extension de la gravière de la commune de Lescar

Cabinet Berre (2005) - Essais de puits et de nappe sur les quatre points de prélèvements d'eau potable sur les communes d'Artix, Labsatide-Cézéracq et Bézingrand

Calligée (1988-1999) - Suivi piézométrique de la nappe alluviale du Gave de Pau entre Baliros et Baudreix

Calligée (1998) - Etude hydrogéologique préalable à la définition des périmètres de protection des forages de Baliros et Pardies

Calligée (1998) - Réalisation de 4 piézomètres de reconnaissance dans la vallée alluviale du Gave de Pau entre Baliros et Baudreix

Institut de Géodynamique de l'Université de Bordeaux III (1982) - Etude de la nappe phréatique du Gave de Pau, Secteur Pau à Coarraze

Pedron N., Capdeville J.P., Etcheverry P. (2003) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Gestion intégrée des nappes alluviales - Etude de la nappe alluviale de la Garonne - Année 1

Pellissier-Hermitte G. (1970) - Etude de l'alimentation des aquifères éocènes et adjacents en région Béarn-Bigorre, Thèse

Carte géologique de la France (1/50 000), Feuille de Lourdes (1052), B.R.G.M.

Carte géologique de la France (1/50 000), Feuille de Morlaàs (1030), B.R.G.M

Carte géologique de la France (1/50 000), Feuille de Pau (1029), B.R.G.M

Carte géologique de la France (1/50 000), Feuille d'Arthez-de-Béarn (1004), B.R.G.M.

Carte géologique de la France (1/50 000), Feuille d'Orthez (1003), B.R.G.M.

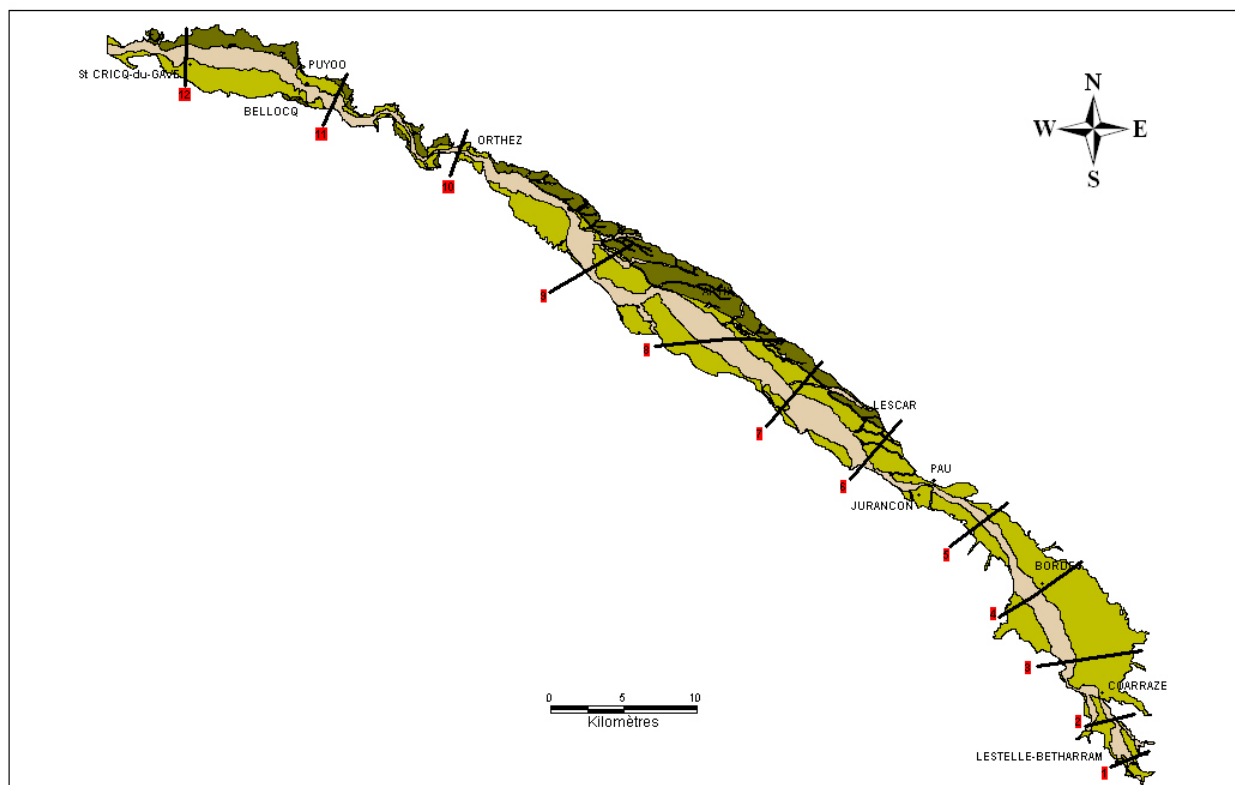
Carte géologique de la France (1/50 000), Feuille d'Hasparren (1002), B.R.G.M.

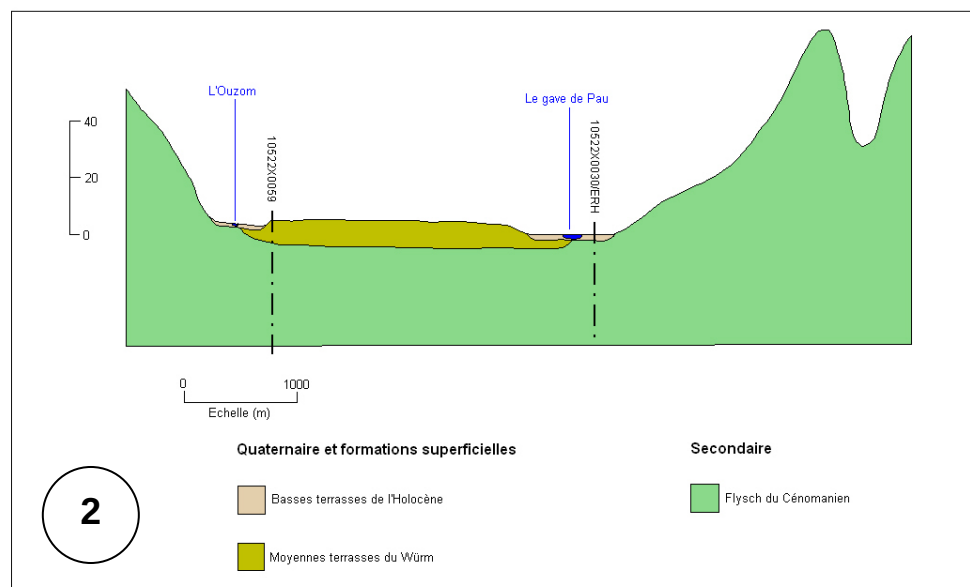
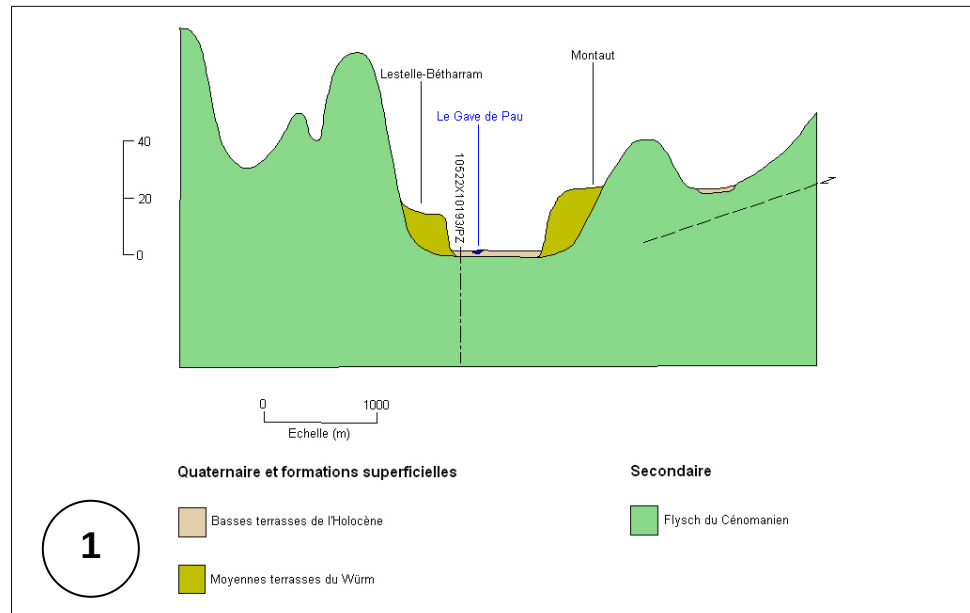
Banque de données du Sous Sol (BSS)

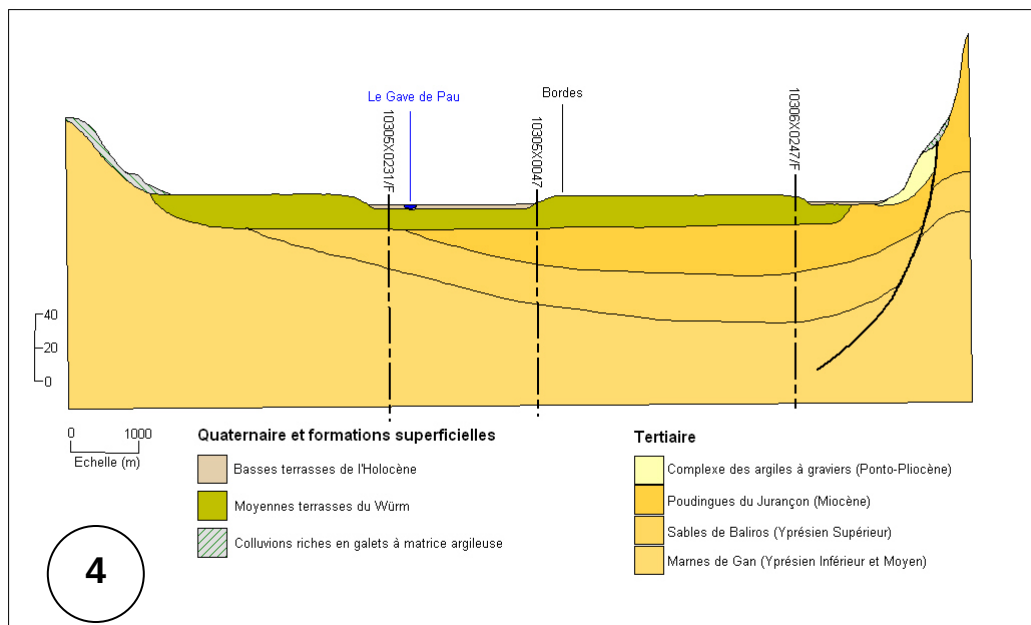
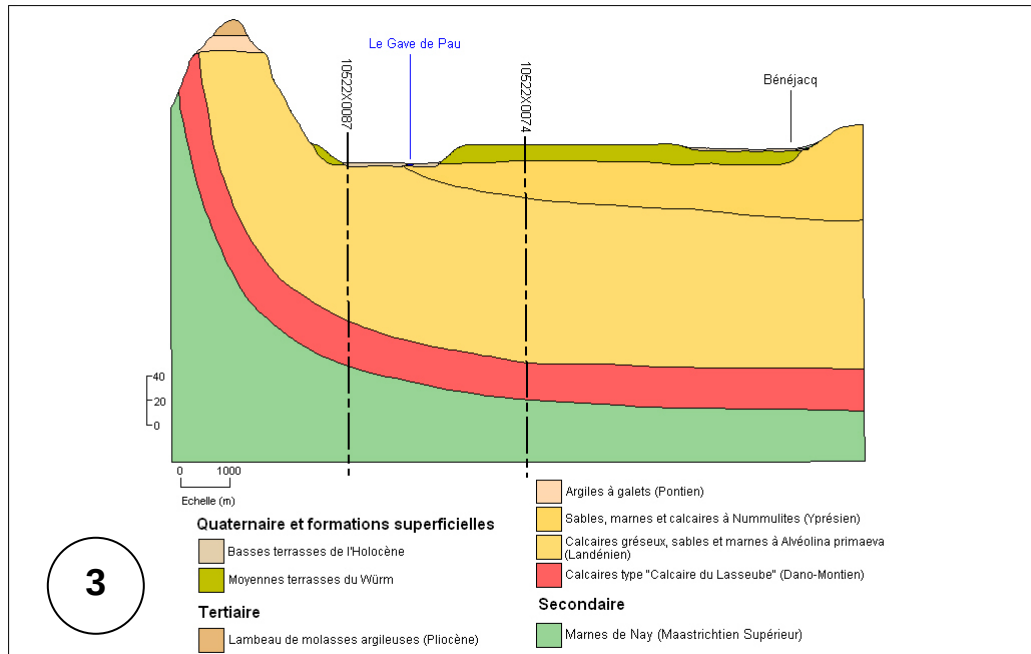
Banque Hydro - <http://hydro.mde.tm.fr>

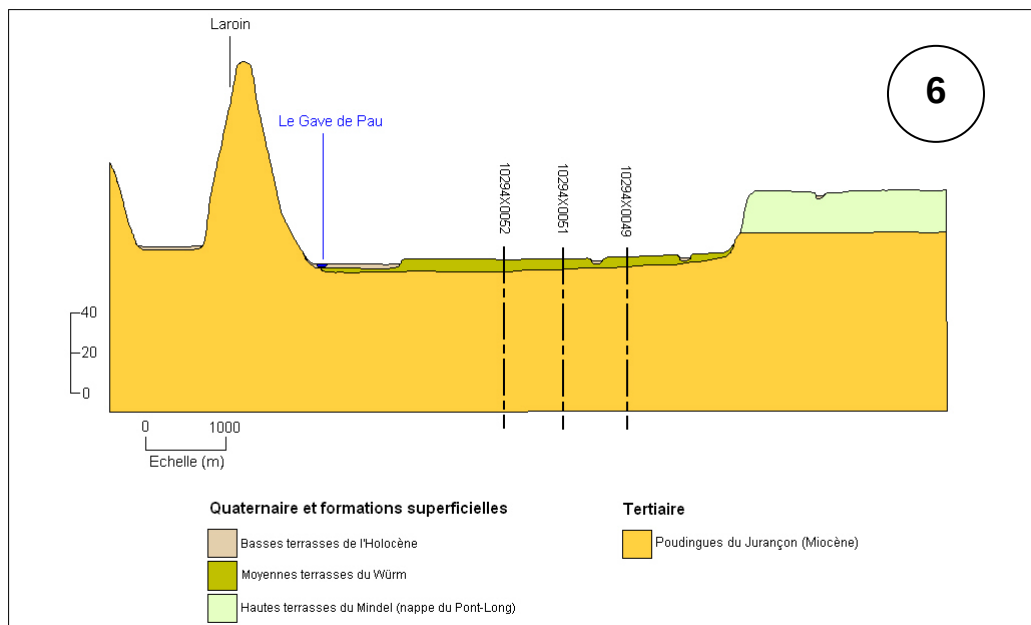
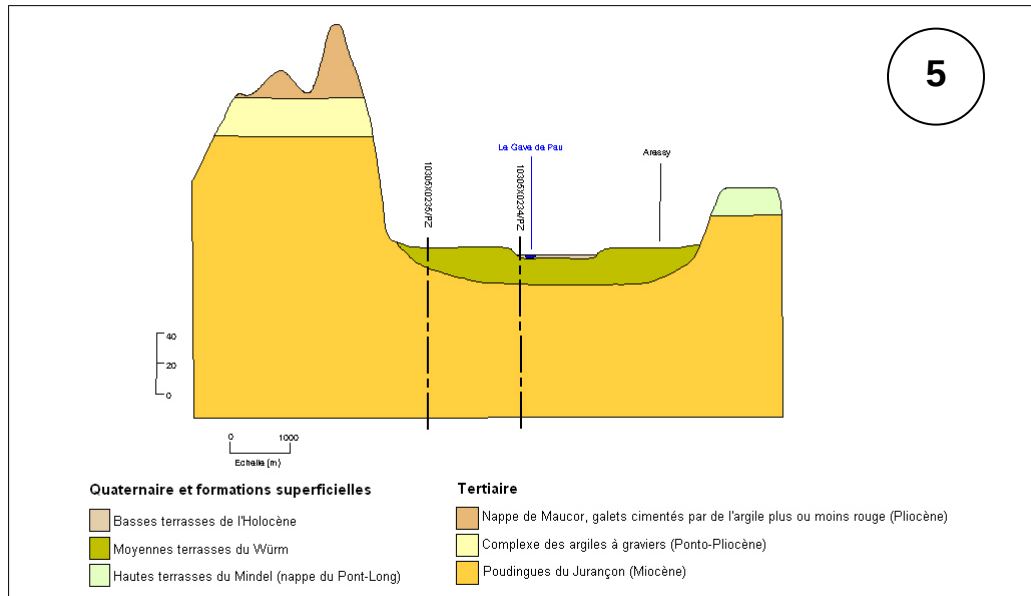
Annexe 1

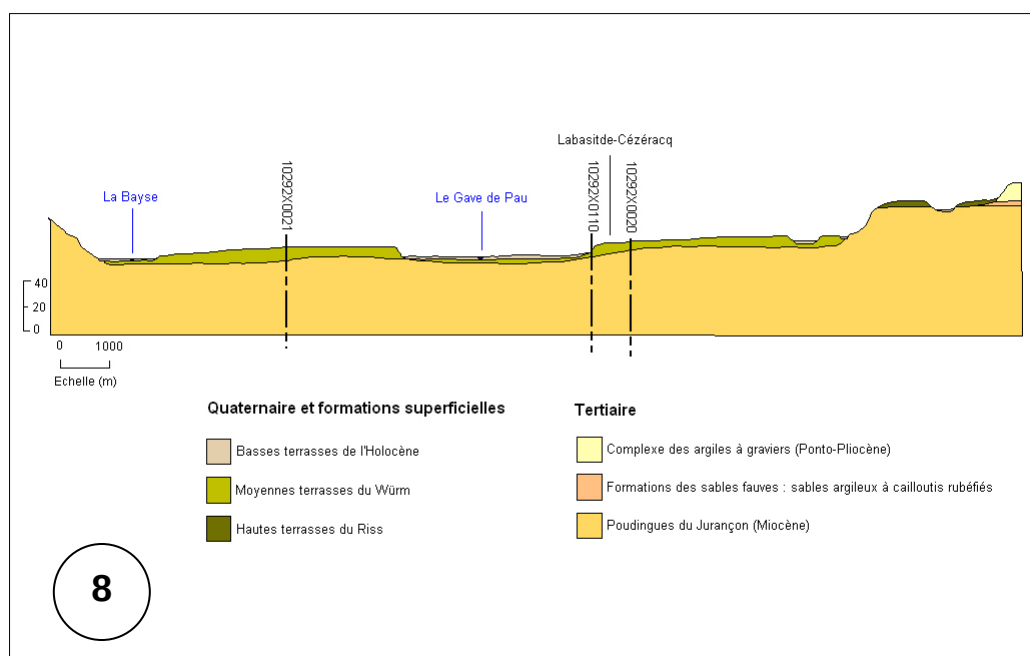
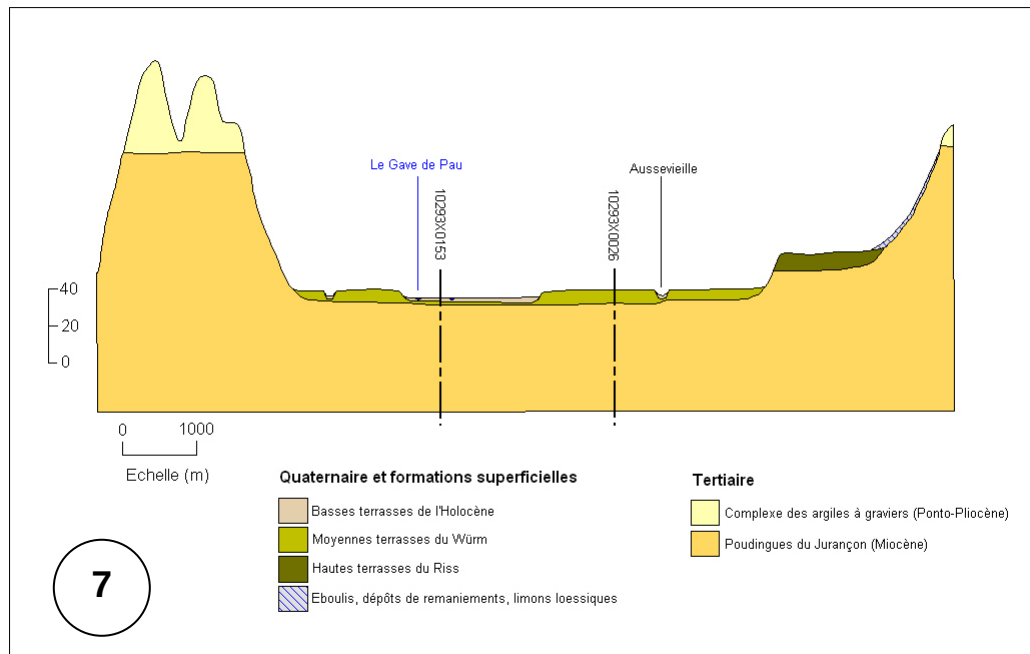
Coupes géologiques relatives à la nappe alluviale du Gave de Pau

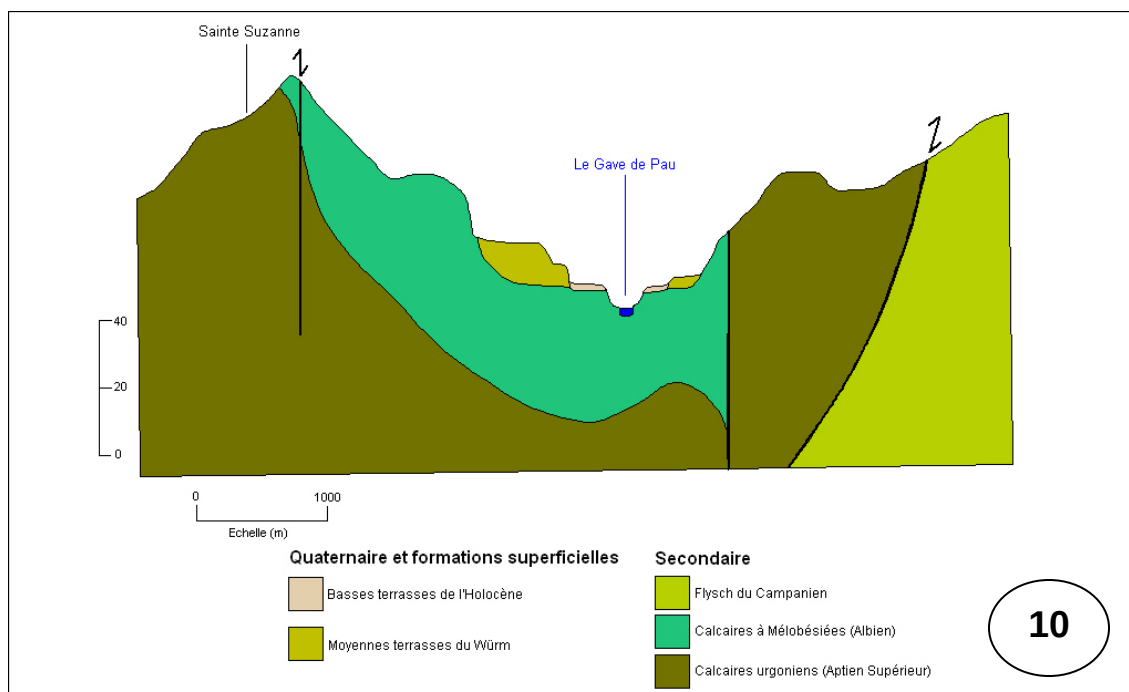
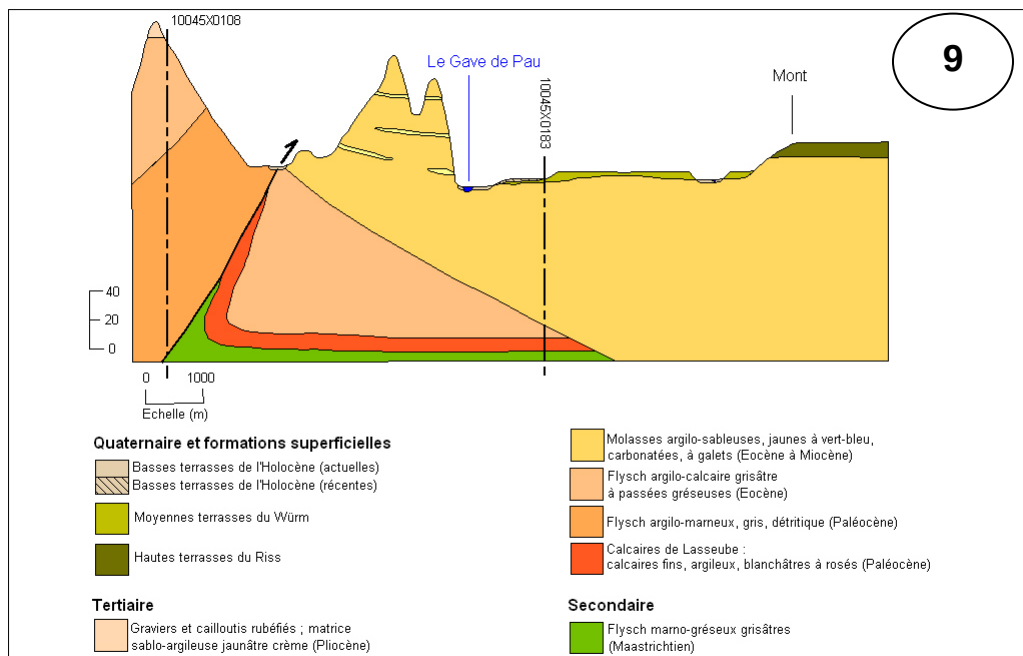


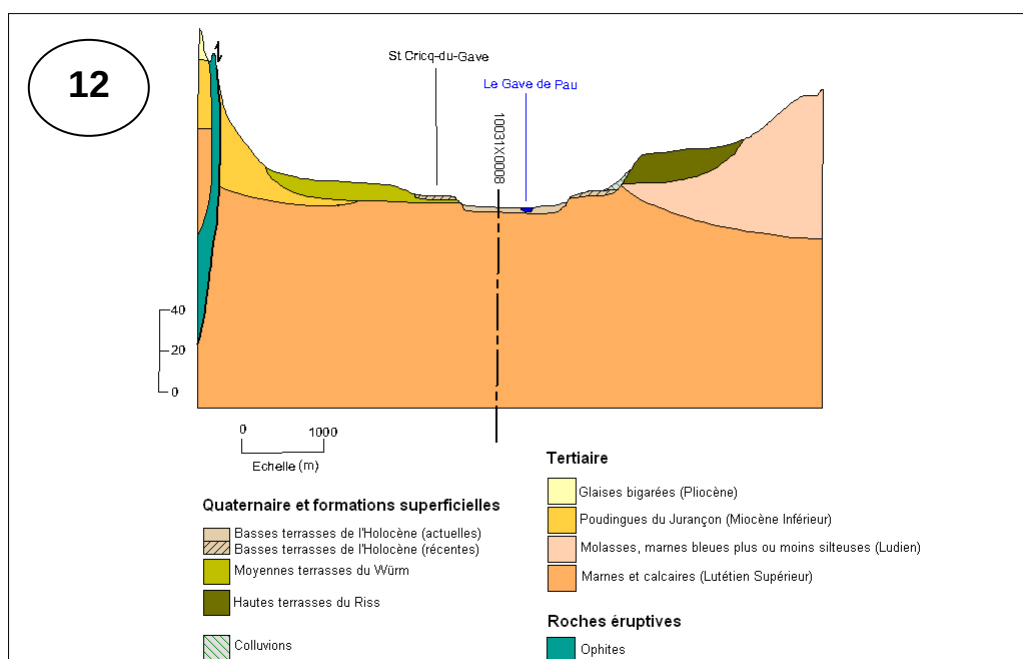
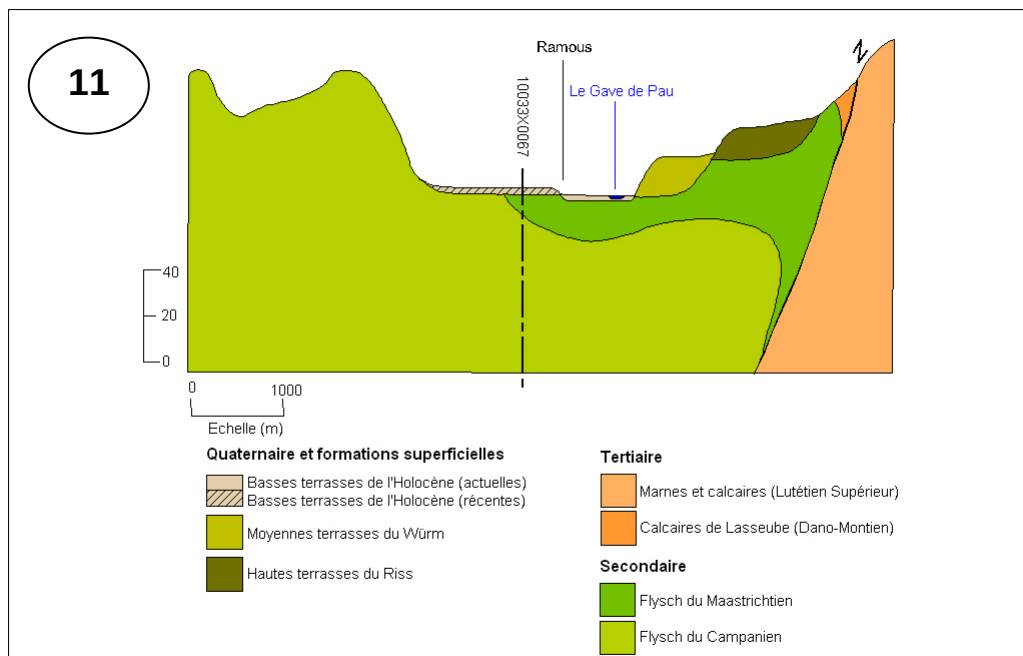














Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service Géologique Régional Aquitaine
Parc Technologique Europarc
24, Avenue Léonard de Vinci
33600 – Pessac - France
Tél. : 05 57 26 52 70