



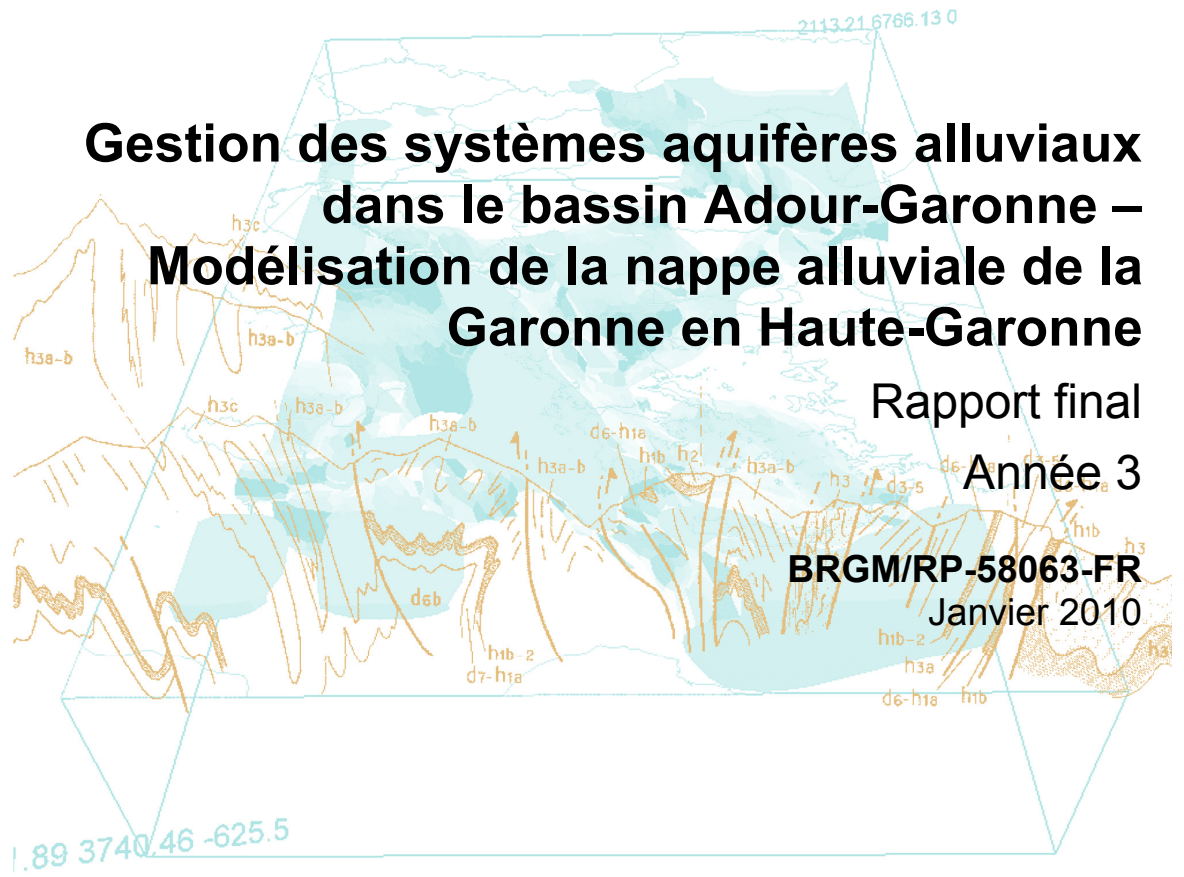
Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne – Modélisation de la nappe alluviale de la Garonne en Haute-Garonne

Rapport final

Année 3

BRGM/RP-58063-FR

Janvier 2010



Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne – Modélisation de la nappe alluviale de la Garonne en Haute-Garonne

Rapport final

Année 3

BRGM/RP-58063- FR

Janvier 2010

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 06EAUF29

M. Bardeau, S. Bourdaa,
Avec la collaboration de
E. Buscarlet, C. Belgodere, E. Poux

Vérificateur :

Original signé par : A. Wuilleumier

Date : 22/02/2010

Approbateur :

Original signé par : Ph. ROUBICHOU

Date : 22/02/2010

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

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Aquifère, nappe alluviale, gestion de la ressource, modélisation, régime transitoire, prélèvements, irrigation, outil de gestion, volume prélevable admissible, nappe d'accompagnement, Garonne, Haute-Garonne

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

M. Bardeau, S. Bourdaa, (2010) –Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne - Modélisation de la nappe alluviale de la Garonne en Haute-Garonne – Année 3. BRGM/RP-58063-FR. Rapport final – 175 p., 57 ill., 11 ann.

Synthèse

Une gestion maîtrisée des ressources alluviales s'impose, de façon à répondre à la demande en eau (AEP, Irrigation, Industries...) tout en préservant le débit d'étiage des cours d'eau. En Midi-Pyrénées, la connaissance du fonctionnement de ces aquifères et la recherche d'une gestion optimale, servant au mieux les intérêts de tous les utilisateurs compte tenu de l'état des ressources offertes, est engagée sur l'ensemble des grands domaines alluviaux de la région.

Concernant la plaine alluviale de la Garonne dans le département de Haute-Garonne, ce projet est réalisé en partenariat avec la DDEA de Haute-Garonne (Mission inter-Service de l'Eau), l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, le SMEAG pour la 1^{ère} année du projet et par le BRGM dans le cadre de ses actions de Service Public.

Les précédents travaux ont permis la réalisation d'une synthèse géologique et hydrogéologique de l'aquifère alluvial de la Garonne à partir de laquelle un modèle de simulation des écoulements souterrains a été construit.

La dernière phase du projet, faisant l'objet du présent rapport, a permis d'une part, la mise en place d'un outil de gestion, destiné aux services chargés de la délivrance des autorisations de prélèvements en période d'irrigation et d'autre part, la délimitation de la nappe d'accompagnement de la Garonne en Haute-Garonne.

Ces deux outils aux vocations différentes, sont issus de la construction préalable d'un modèle mathématique permettant de simuler les écoulements de la nappe alluviale de la Garonne. Ce dernier a été calé en régime transitoire sur neuf années (de 2000 à fin 2008) au pas de temps décadaire, le domaine modélisé étant inscrit dans une grille de mailles carrées de 250 mètres de côté, soit 21 630 mailles modélisées.

Au terme de cette opération, la piézométrie des différents points de contrôle répartis dans la plaine (16 points d'eau suivis dans le cadre du projet complétés par 11 points de mesures appartenant au réseau quantitatif de gestion patrimoniale de Midi-Pyrénées) est globalement bien restituée tant en termes de phase, d'amplitude et de pente des courbes.

Le bilan des flux sur la période de calage permet de mettre en évidence d'une part, la prédominance de l'alimentation du système par l'infiltration pluviale et d'autre part, l'importance du drainage de la nappe par l'ensemble des rivières. L'exploitation actuelle de l'aquifère alluvial paraît beaucoup plus marquée dans la basse plaine entre Muret et Mancieux que pour les hauts niveaux de terrasse.

La délimitation de la nappe d'accompagnement, a été définie en priorité en se référant au tracé de l'isochrone 90 jours, en utilisant les trajectoires d'eau les plus longues en fonction des scénarios climatiques.

La délimitation de la nappe d'accompagnement a été estimée à une distance comprise entre 900 et 3800 mètres de la Garonne selon les secteurs considérés. Elle concerne exclusivement les formations alluvionnaires des basses plaines, parfois dans leur totalité, parfois sur la moitié ou moins de leur largeur.

En complément de cette délimitation, le modèle mathématique a permis de simuler différents scénarios climatiques (année décennale sèche, quinquennale sèche et humide et année moyenne) afin de calculer des volumes prélevables admissibles (VPA) pour huit zones hydrogéologiques homogènes définies sur le domaine modélisé.

L'outil de gestion a ensuite été développé sur le principe d'une utilisation sous la forme de deux options. Une première consultation détermine des VPA dans la nappe sur la base d'un scénario de recharge hivernale et printanière moyenne (Gestion dite « Anticipée »). La seconde option fournit les VPA en fonction d'une part, de la recharge hivernale observée et d'autre part, d'une évolution printanière choisie par l'utilisateur

En comparaison des volumes prélevés annuellement entre 2000 et 2009 à l'échelle de la plaine alluviale, estimés selon les années entre 20 et 35 millions de m³, les valeurs de VPA obtenues sont suffisantes pour satisfaire les demandes agricoles dans la plupart des zones. Des problèmes de disponibilité de la ressource sont néanmoins observés dans les secteurs 14, 15 et 16 (de Muret à Boussens), où l'exploitation pour l'AEP et l'industrie sont importantes. Aussi, malgré les réserves exploitables importantes, des demandes croissantes en prélèvements agricoles sur ces zones pourraient être contraintes par cette disponibilité.

Ces différents résultats font ressortir le contraste existant entre les ressources en eau de surface et en eaux souterraines sur la zone modélisée.

Or, une grande partie des prélèvements destinés à l'irrigation est effectuée par des captages en rivière. L'outil de gestion actuel ne permet pas de gérer les deux ressources de manière concomitante. Toutefois, la mise en œuvre de nouvelles simulations à partir de scénarios limitant les prélèvements en rivières et augmentant ceux en nappe dans des secteurs ciblés pourrait être envisagée et devrait permettre d'identifier des aménagements visant à alléger les problèmes rencontrés par ces cours d'eau en période d'étiage. Cette opération devra être entreprise en étroite collaboration avec tous les acteurs locaux en charge de la gestion des eaux (tant de surface que souterraines) dans la zone étudiée.

Par ailleurs, il est proposé de procéder à la mise à jour du modèle hydrodynamique et de l'outil de gestion environ tous les 5 ans à partir de l'intégration des nouvelles données géologiques, climatiques, de prélèvements, de piézométrie, voire de paramètres hydrodynamiques (lors de la réalisation de nouveaux pompages d'essai), acquises au cours de cette période. Cette action permettra ainsi de maintenir et d'améliorer la connaissance de cet aquifère pour une gestion optimale et durable.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. RAPPELS DU CONTEXTE DE L'ETUDE.....	11
1.2. BILAN DES PHASES PRECEDENTES DU PROJET	12
2. Rappels du contexte géologique et hydrogéologique de la zone modélisée ...	17
2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE	17
2.1.1. Description des différentes formations géologiques	17
2.1.2. Morphologie de la vallée alluviale.....	19
2.1.3. Les terrasses alluviales	19
2.1.4. La nature des alluvions.....	22
2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	23
2.2.1. Les caractéristiques morphologiques et hydrodynamiques des nappes. .	23
2.3. CONTEXTE HYDROLOGIQUE	29
3. Campagne de jaugeage sur les cours d'eau secondaires de la plaine alluviale	33
3.1. CONTEXTE ET METHODOLOGIE	33
3.2. TYPOLOGIE DES COURS D'EAU SUR LA PLAINE ALLUVIALE	33
3.3. CHOIX DES COURS D'EAU A JAUGER	35
3.4. RESULTATS DES JAUGEAGES	36
3.4.1. Apports au système.....	37
3.4.2. Sorties du système	42
4. Modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale de la Garonne	47
4.1. PRESENTATION DES DIFFERENTES ETAPES DE CONSTRUCTION DU MODELE.....	47
4.1.1. Rappels sur la géométrie du modèle.....	47
4.1.2. Intégration du réseau hydrographique dans le modèle	50
4.2. PIEZOMETRIE DE REFERENCE	50
4.3. PRELEVEMENTS ET RECHARGE.....	51

4.3.1. Prélèvements d'eau	51
4.3.2. Recharge de la nappe	53
4.4. CALAGE ET RESULTATS DU MODELE HYDRODYNAMIQUE EN REGIME TRANSITOIRE	54
4.4.1. Paramètres restitués à l'issue du calage	55
4.4.2. Résultats du calage sur les chroniques piézométriques	58
4.4.3. Calage des chroniques de débit rivière	65
4.4.4. Bilan des flux annuels	66
5. Conception de l'outil de gestion	71
5.1. PRESENTATION GENERALE DE L'OUTIL	71
5.2. FONCTIONNEMENT DE L'OUTIL DE GESTION	72
5.2.1. Définition des scenarios climatiques	72
5.2.2. Sectorisation de la zone d'étude	74
5.2.3. Calculs des Volumes Prélevables Admissibles (VPA)	75
6. Utilisation de l'outil de gestion	81
6.1. PRESENTATION DE L'ARCHITECTURE DE L'OUTIL	81
6.1.1. Fichiers AEP.xls et INDUS.xls	81
6.1.2. Fichier IRRIG.xls	82
6.1.3. Actualisation des fichiers sources liés	83
6.2. INSTALLATION ET DEMARRAGE DE L'OUTIL	84
6.3. PRESENTATION DES DIFFERENTES OPTIONS DE L'OUTIL	85
6.3.1. Page d'accueil	85
6.3.2. Option "GESTION ANTICIPEE"	87
6.3.3. Option "GESTION REGULEE"	90
6.3.4. Enregistrement des résultats	94
7. Délimitation de la nappe d'accompagnement de la Garonne	97
7.1. RAPPELS REGLEMENTAIRES	97
7.2. PRINCIPE DES METHODES CHOISIES	98
7.2.1. Principe de la méthode dérivée de Theis	98
7.2.2. Méthode du tracé des isochrones	100
7.3. DELIMITATION DE LA NAPPE D'ACCOMPAGNEMENT	101
7.3.1. Données utilisées et hypothèses de calcul pour la méthode de Theis ..	101

7.3.2. Tracé des isochrones avec le modèle hydrodynamique.....	103
7.3.3. Comparaison des deux méthodes et tracé de la nappe d'accompagnement	103
8. Conclusion	107
9. Bibliographie.....	111

Liste des illustrations

Illustration 1 : Schéma théorique de la mise en place des terrasses alluviales de la Garonne d'après une synthèse bibliographique du BRGM.	18
Illustration 2 : photo du lit du Touch, dans la commune de Plaisance du Touch, illustrant l'interface alluvions/formations molassiques.....	20
Illustration 3 : coupes schématiques des types de terrasses alluviales.	21
Illustration 4 – Schéma de principe des directions d'écoulement des nappes alluviales de Midi-Pyrénées	25
Illustration 5 – Localisation des stations météorologiques et des points de suivi des niveaux piézométriques dans le secteur de la plaine alluviale de	26
la Garonne	26
Illustration 6 – Données climatiques moyennes calculées pour la période 1994-2009.....	27
Illustration 7 – Evolution des précipitations aux stations de Blagnac, Palaminy, Clarac et Lherm	27
Illustration 8 – Valeurs de DCR, DOE et VCN 10 1/5 sur la Garonne (Données SMEAG)	30
Illustration 9 – Points de contrôle des débits et hauteurs d'eau de la Garonne et ses affluents dans la zone d'étude	31
Illustration 10 : Schéma typologique des cours d'eau transitant dans la plaine alluviale	34
Illustration 11 : Localisation des sections de jaugeages sur la plaine	36
Illustration 12 : Représentation graphique des modules interannuels des débits de 10 stations hydrométriques en fonction de la superficie des bassins versants	38
Illustration 13 : Répartition des modules interannuels des débits sur les bassins versants molassiques situés en rive gauche de la plaine alluviale.....	39
Illustration 14 : Encaissement des cours d'eau secondaires dans les formations molassiques	40
Illustration 15 : Influence du canal de St-Martory sur le régime hydrologique des cours d'eau.....	41
Illustration 16 : Drainage de la nappe des moyennes terrasses par les cours d'eau	43
Illustration 17 – Drainage de la nappe de la basse terrasse et de la basse plaine par les cours d'eau.....	44
Illustration 18 – Représentation de la cote topographique issue du MNT au pas de 250 mètres intégrée dans MARTHE	48

Illustration 19 – Représentation de la cote du toit du substratum du réservoir alluvial intégrée dans MARTHE.....	48
Illustration 20 – Représentation des charges initiales intégrées dans MARTHE.....	49
Illustration 21 – Répartition des volumes prélevés en 2007 par usage sur la zone modélisée.....	52
Illustration 22 – Localisation des différentes zones de recharge intégrées au modèle.....	54
Illustration 23 – Zones de perméabilités homogènes définies dans le modèle.....	56
Illustration 24 – Répartition des zones de coefficient d’emmagasinement homogène dans le modèle (les valeurs indiquées dans les zones sont celles, en %, du coefficient d’emmagasinement appliqué pour chacune d’entre elles).....	57
Illustration 25 – Diagramme de dispersion entre les charges calculées et observées des basses eaux 2006 et hautes eaux 2007.....	59
Illustration 26 – Calage des charges piézométrique calculées et observées en régime transitoire sur le piézomètre de Lamasquère.....	61
Illustration 27 – Diagramme de dispersion et calcul des paramètres statistiques à la station de Lamasquère.....	62
Illustration 28 – Comparaison des courbes piézométriques mesurées et calculées en octobre 2006 (basses eaux) dans la partie centrale et nord de la zone d’étude (isopièzes rouges : calculées, isopièzes vertes : observées).....	63
Illustration 29 - Comparaison des courbes piézométriques mesurées et calculées en octobre 2006 (basses eaux) dans la partie sud de la zone d’étude (isopièzes rouges : calculées, isopièzes vertes : observées).....	64
Illustration 30 – Localisation des mailles dénoyées du modèle au pas de temps 360 (31/12/08).....	65
Illustration 31 – Calage des débits de cours d’eau sur la station du Mancieux.....	66
Illustration 32 – Tableau de synthèse du bilan de flux hydrologique pour les 9 années de simulation en millions de m ³	67
Illustration 33 – Graphique des bilans de flux hydrologique pour les 9 années de simulation.....	68
Illustration 34 – Cumul de pluie efficace obtenu pour les 4 stations de la zone d’étude en fonction des différents scénarios climatiques.....	74
Illustration 35 – Extension des 20 unités de gestion retenues pour le calcul des Volumes Prélevables Admissibles (VPA).....	75
Illustration 36 – Etat hydrologique de la Garonne à la station de Valentine et de Portet en fin d’année 2009 (Bulletin hydrologique du Bassin Adour-Garonne au 11/10/09 – DREAL).....	76
Illustration 37 - Restitution de l’état hydrologique de la Garonne pour 2009 sous MARTHE : Stations de Valentine et de Portet-sur Garonne.....	77
Illustration 38 – Volumes prélevables déterminés pour les 20 zones et les 6 scénarios climatiques.....	79
Illustration 39 – Fichiers "sources" AEP.xls et INDUS.xls.....	82
Illustration 40 – Fichier IRRIG.xls.....	83

Illustration 41 – Message d’avertissement de la présence de macros dans le classeur	84
Illustration 42 – Emplacement des fichiers liés	85
Illustration 43 – Page d’accueil	86
Illustration 44 – Rubriques d’aide sur les options choisies	87
Illustration 45– Représentation géographique de la zone d’étude.....	88
Illustration 46 – Message d’information sur la disponibilité en eau des zones sélectionnées	88
Illustration 47– Fenêtre de synthèse par zone.....	90
Illustration 48 – Boîte de saisie des données de pluies efficaces hivernales	91
Illustration 49 – Choix de la station météorologique	92
Illustration 50 – Choix du scénario d’évolution printanière	93
Illustration 51 – Synthèse de la zone – Gestion régulée	94
Illustration 52– Enregistrement des résultats pour toutes les zones	95
Illustration 53 – Export de la synthèse d’une zone	95
Illustration 54 – Caractéristiques des puits fictifs par rapport à 2 lignes parallèles	99
Illustration 55 – Carte des zones constituées pour l’application de la méthode de Theis	102
Illustration 56 – Comparaison des deux méthodes pour le tracé de la nappe d’accompagnement.....	104
Illustration 57 – Délimitation de la nappe d’accompagnement	105

Liste des annexes

Annexe 1 Carte géologique simplifiée du secteur d'étude	113
Annexe 2 Carte géologique simplifiée du sud de la zone d'étude (de BousSENS à Montréjeau).....	117
Annexe 3 Cartes piézométriques en de la nappe alluviale en hautes, basses et moyennes eaux	121
Annexe 4 Inventaire des prélèvements réalisés dans la plaine de la Garonne	127
Annexe 5 Utilisation du logiciel TEMPO pour compléter les chroniques piézométriques et de débits utilisées pour le calage en régime transitoire	135
Annexe 6 Présentation de l'outil de calage développé sous EXCEL	143
Annexe 7 Comparaison des charges simulées et observées sur les piézomètres de calage	147
Annexe 8 Comparaison des débits simulés et observés sur les points de contrôle du réseau hydrographique.....	155
Annexe 9 Description des deux méthodes de calcul utilisées pour la détermination des périodes de retour d'événements pluvieux.....	161
Annexe 10 Enregistrement des fichiers de l'Outil de Gestion	175
Annexe 11 Limite de la nappe d'accompagnement de la Garonne	179

1. Introduction

1.1. RAPPELS DU CONTEXTE DE L'ETUDE

Les aquifères alluviaux du bassin Adour-Garonne constituent des ressources convoitées pour deux raisons principales :

- leur abondance, leur facilité et leur faible coût de mobilisation les rendent économiquement intéressantes, notamment pour l'activité agricole fortement développée dans les plaines alluviales,
- leur relation étroite avec les cours d'eau, qu'il s'agisse d'une recharge de la nappe par la rivière en période de hautes eaux ou au contraire d'une alimentation de la rivière par la nappe et soutien de son débit en période d'étiage. De ce fait, les aquifères alluviaux doivent être pris en compte dans la mise en œuvre des Plans de Gestion des Etiages (PGE) prévus par le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) d'Adour-Garonne.

C'est pourquoi une gestion maîtrisée de cette ressource s'impose, de façon à répondre à la demande en eau (AEP, Irrigation, Industries...) tout en préservant le débit d'étiage des cours d'eau. La connaissance du fonctionnement de ces aquifères et la recherche d'une gestion optimale, servant au mieux les intérêts de tous les utilisateurs, passe par l'utilisation d'un modèle de simulation des écoulements. Outre les aspects quantitatifs, un tel outil pourrait aussi être utilisé pour évaluer les impacts sur la nappe, de pollutions ponctuelles (rejets industriels) ou diffuses (pollutions par les nitrates et les phytosanitaires par exemple).

En avril 1997, le BRGM a achevé une étude en Tarn-et-Garonne (82) portant sur la connaissance et l'évaluation des principaux aquifères alluviaux de ce département. Cette opération a permis de fournir aux services chargés de la Police de l'Eau (MISE 82) les éléments et les outils nécessaires pour assurer la gestion des ressources disponibles et notamment pour traiter au mieux les autorisations de prélèvements. Pour cela, une modélisation de la nappe alluviale a été réalisée en régime hydraulique permanent, sur la base des données collectées en 1996.

Dans un souci d'amélioration de cet outil de gestion et notamment de l'évaluation de la ressource et de sa capacité de recharge, une seconde étude, achevée en janvier 2007, a notamment permis l'élaboration d'un modèle en régime transitoire. Celui-ci permet de tenir compte de la variabilité climatique saisonnière et de proposer une certaine flexibilité vis-à-vis des autorisations de prélèvement. Ce nouvel outil de gestion a été développé, sur le principe d'une utilisation en deux étapes, une première consultation,

à la mi-février, permettant l'attribution des arrêtés d'autorisation annuels et une seconde, à la mi-juin, destinée à ajuster les débits en cas de sécheresse sévère.¹

En s'appuyant sur l'expérience acquise en Tarn-et-Garonne, la MISE de Haute-Garonne a demandé au BRGM de proposer une opération similaire sur la plaine alluviale de la Garonne.

Ce projet est réalisé en partenariat avec par la MISE de Haute-Garonne, par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (AEAG), par le SMEAG pour la 1^{ère} année du projet et par le BRGM dans le cadre de ses actions de Service Public (fiche 06 EAU F29).

Ce projet a débuté en juin 2006 pour une durée de 3 ans.

Les précédents travaux ont permis :

- la collecte d'informations et la mise en place d'un réseau d'acquisition des données,
- la construction et calage du modèle de simulation des écoulements souterrains en régime permanent puis transitoire,

Les travaux réalisés dans la dernière phase du projet, faisant l'objet du présent rapport, avaient pour objectif d'aboutir au développement d'un outil de gestion et à la délimitation de la nappe d'accompagnement.

Le projet est basé sur la réalisation d'une synthèse des données géologiques et hydrogéologiques du secteur considéré à partir de laquelle un modèle mathématique a été construit. A partir de ces informations, le BRGM a développé un outil de gestion de la nappe alluviale de la Garonne pour les services chargés de la Police de l'Eau (MISE de la Haute-Garonne) permettant notamment de délivrer des autorisations de prélèvements.

Cet outil, issu de la modélisation de la nappe en régime transitoire, a le double objectif de mise en adéquation des ressources et des besoins, et de compréhension du fonctionnement de l'aquifère dans un souci de préservation de celui-ci en terme quantitatif et qualitatif.

1.2. BILAN DES PHASES PRECEDENTES DU PROJET

Les précédents rapports des deux premières années du projet sont les suivants :

- BRGM/RP-55181-FR (Rapport d'avancement d'Année 1), Novembre 2006 :
Ce rapport présente l'avancement des résultats de l'analyse bibliographique, le début des travaux de modélisation géologique, la mise

¹ GHYSELINCK-BARDEAU M. (2007) – Gestion des aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne – Modélisation de la nappe alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron dans le département de Tarn-et-Garonne – Rapport BRGM/RP-55315-FR.

en place du réseau d'acquisition de données et une première valorisation des résultats d'analyse physico-chimiques in-situ.

- BRGM/RP-55877-FR (Rapport final d'Année 1), Octobre 2007 : Ce document présente l'hydrogéologie et la géologie du secteur d'étude à partir de l'analyse bibliographique. Il décrit l'ensemble de la méthodologie et des résultats obtenus lors de la modélisation géologique de la nappe alluviale.
- BRGM/RP-56490-FR (Rapport final d'Année 2), Juin 2008. Ce rapport fait un point sur l'acquisition des données de terrain et traite de l'avancement du calage du modèle hydrodynamique en régime permanent.
- Note BRGM MPY/09148 (Module de l'année 2), Avril 2009. Cette note est un compte-rendu des deux essais de nappe par pompages réalisés sur les communes de Labarthe-Inard et Launac. Ces travaux ont pour objectif d'améliorer la connaissance des paramètres hydrodynamique de la nappe dans ces secteurs. Ce document présente le déroulement des opérations et l'interprétation des données issues des essais de nappe par pompage.

L'ensemble des éléments décrits dans ces documents n'est pas repris dans le présent rapport final. Son objectif principal est de présenter le fonctionnement et les conditions de mise en œuvre et de calage du modèle hydrodynamique, la campagne de jaugeage des cours d'eau secondaires, le développement de l'outil de gestion et de la délimitation de la nappe d'accompagnement.

Rappel des travaux réalisés au cours des deux premières années du projet :

La construction du modèle nécessite de connaître un certain nombre de paramètres pour chaque maille de calcul, il s'agit notamment de la géométrie du réservoir, de la piézométrie de la nappe, de la perméabilité de l'aquifère ou des volumes prélevés au système.

Une étude géologique a permis de caractériser et de cartographier les différentes terrasses fluviales quaternaires de la Garonne ainsi que le terrain sur lesquelles elles reposent. Il apparaît que l'aquifère alluvial repose d'amont en aval sur des formations molassiques d'âge Aquitanien (Miocène) et Stampien (Oligocène).

Une cartographie précise du toit du substratum du réservoir alluvial a été dressée à partir de l'analyse critique des données géologiques, fournies par 4276 ouvrages recensés dans la zone d'étude (ville de Toulouse comprise) et par les cartes géologiques à l'échelle du 1/50 000 couvrant le secteur de l'étude.

Pour rappel, les délimitations des contours de l'aquifère alluvial de la Garonne prennent en compte les alluvions sablo-graveleuses des basses terrasses, de la moyenne terrasse et de la basse plaine. Latéralement, les limites de l'aquifère alluvial ont été définies selon les contours des talus molassiques imperméables de l'Aquitainien et du Stampien.

Un suivi des niveaux piézométriques sur 16 points de contrôle a été effectué en continu grâce à des sondes de pression équipées d'enregistreurs de juin 2006 à janvier 2010. Ces mesures permettent de compléter les données enregistrées en continu sur les 11 ouvrages du réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines de la région Midi-Pyrénées présents sur la zone d'étude. En parallèle, des mesures du fil de l'eau de la Garonne ont été réalisées sur 5 sites en complément des 16 stations du réseau hydrométrique, géré par la DIREN, intéressant le secteur.

L'inventaire des points d'eau de la plaine alluviale et des prélèvements concernés a été effectué à partir de données collectées par le BRGM Midi-Pyrénées ainsi que celles issues des organismes intervenant dans le secteur d'étude tels que l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et la MISE de Haute-Garonne. Tous usages confondus, les prélèvements moyens dans la nappe ont été estimés à 12,4 millions de m³/an (Mm³/an).

Les cartes piézométriques des périodes de basses eaux puis de hautes eaux ont été élaborées à partir de mesures du niveau d'eau collectées sur environ 243 et 284 ouvrages respectivement effectuées en octobre-novembre 2006 pour les basses eaux et en juin-juillet 2007 pour les hautes eaux.

Deux campagnes de jaugeage des cours d'eau secondaires de la plaine alluviale de la Garonne ont été organisées en période de basses eaux (septembre 2008) et de hautes eaux (mai 2009). Ces séries de mesures ont mis en évidence le caractère drainant des petits cours d'eau et ont permis d'estimer les volumes « sortants » de la nappe.

Les données de pluviométrie et d'évapotranspiration potentielle (ETP) des stations de Blagnac, Lherm, Palaminy et Clarac ont été collectées auprès de Météo France. L'analyse de ces informations fait ressortir une recharge du réservoir alluvial de la Garonne principalement assurée par l'infiltration des eaux de pluie et un régime de nappe, de périodicité annuelle.

Deux pompages d'essais ont été entrepris dans des zones caractérisées comme déficientes en paramètres hydrodynamiques de la nappe (transmissivité et coefficient d'emménagement). L'ensemble des données (pompages d'essai susmentionnés et informations recueillies dans la Banque de données du Sous-Sol - BSS -) fait ressortir la bonne transmissivité des alluvions de la basse plaine de la Garonne dans le secteur de St Gaudens et des alluvions de la basse terrasse dans le nord-ouest de la zone d'étude.

Le présent rapport présente d'une part les modalités de construction et de calage du modèle hydrodynamique de la nappe alluviale de la Garonne et d'autre part, la conception d'un outil d'aide pour la délivrance des autorisations de prélèvements agricoles dans la zone modélisée. En dernier point, la délimitation de la nappe d'accompagnement de la Garonne a également été entreprise afin de fournir, aux services en charge de la police de l'eau, tous les outils nécessaires à une gestion maîtrisée des réserves en eaux souterraines et superficielles.

Les actions menées ont ainsi été plus précisément consacrées :

- à la poursuite de la construction et du calage du modèle hydrodynamique de la nappe alluviale de la Garonne en régime transitoire,
- au calcul des volumes prélevables admissibles dans les différents secteurs de la zone d'étude en fonction des scénarios climatiques établis,
- à l'élaboration d'un outil de gestion des autorisations de prélèvements agricoles permettant de gérer la ressource alluviale en tenant compte des conditions de recharge de l'année étudiée,
- à la délimitation de la nappe d'accompagnement de la Garonne.

2. Rappels du contexte géologique et hydrogéologique de la zone modélisée

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

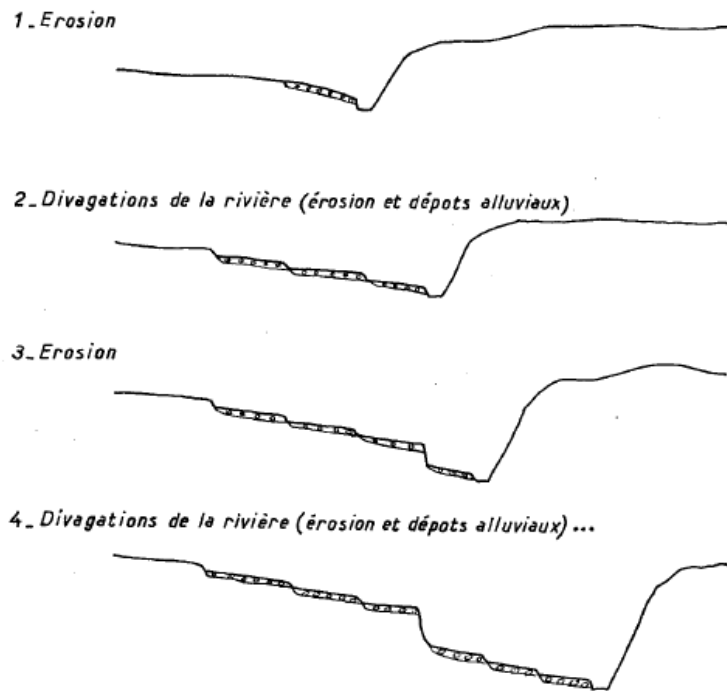
2.1.1. Description des différentes formations géologiques

Le projet s'intéresse à la nappe alluviale de la Garonne dans le département de Haute-Garonne.

Les formations géologiques rencontrées dans ce système sont principalement les formations molassiques et les terrasses alluviales. Les épisodes de glaciations successifs ont été le moteur du modelé géologique de cette région et la géomorphologie générale du substratum. Les formations molassiques résultent de l'érosion de la Chaîne Pyrénéenne et du Massif Central, qui se sont ensuite déposés en milieu continental, en régime souvent torrentiel.. Durant chaque période interglaciaire s'est développé un réseau fluvial caractérisé par la formation des terrasses alluviales. L'illustration 2 ci-dessous présente de manière schématique les mécanismes de dépôts des alluvions de la Garonne.

A ces matériaux globalement compacts et homogènes succèdent vers l'ouest des Ces matériaux peu consolidés résultent de l'érosion de la Chaîne Pyrénéenne et du Massif Central et qui se sont déposés en milieu continental, en régime souvent torrentiel. De ce fait ils sont pour la plupart hétérogènes et leur cartographie, comme celle de leurs propriétés physiques, est toujours délicate et d'une précision relative.

SCHEMA DE LA FORMATION DE TERRASSES ETAGEES DE LA GARONNE



DS6R 65 A 10

Illustration 1 : Schéma théorique de la mise en place des terrasses alluviales de la Garonne d'après une synthèse bibliographique du BRGM.

Une carte simplifiée des formations géologiques rencontrées sur le secteur d'étude est disponible en annexe 1

A noter cependant que cette carte reste schématique et ne fait pas apparaître le détail des formations dans toute la partie sud de la zone d'étude, de Mazères à Montréjeau, en rive droite de la Garonne. En effet les multiples formations de l'Albo-Cenomanien, les calcaires Urgo-aptiens (Crétacé inférieur) à Thanétiens (Paléocène), les calcaires jurassiques, les formations glaciaires et autres éboulis, poudingues, et flysch sont assimilés aux formations molassiques, en terme de comportement hydrogéologique. La carte géologique détaillée de cette zone est disponible en annexe 2. Elle montre la diversité des formations d'un point de vue stratigraphique et lithologique. Il est fort probable que celles-ci soient le siège de circulations d'eau, dont l'importance est difficile à évaluer. Aussi, bien que le contact avec entre les alluvions et ces formations soit considéré comme une limite à flux nul dans le modèle hydrodynamique, des alimentations pourront être simulées afin de restituer au mieux la piézométrie dans la plaine alluviale.

2.1.2. Morphologie de la vallée alluviale

La Garonne est un système fluvial de type méandriforme qui présente une divagation des méandres vers l'est qui élargit la vallée alluviale en rive gauche. La morphologie des méandres est variable. A l'amont les méandres sont petits voire absents localement traduisant un certain degré de pente. Au nord, les méandres deviennent de grande amplitude, dans une zone où la pente est quasiment nulle.

Le creusement du lit de la Garonne jusqu'à la molasse a des conséquences sur le comportement hydrodynamique de la nappe, dans la mesure où l'écoulement se fait sur une grande partie du linéaire de la nappe vers le cours d'eau. De plus, la Garonne reçoit de nombreux cours d'eau secondaires qui entaillent ses terrasses alluviales pour créer leur propre système de terrasses en remobilisant les alluvions déjà déposées. Ces principaux cours sont l'Ariège, le Touch, la Louge, l'Hers et la Save...

2.1.3. Les terrasses alluviales

Le système des terrasses alluviales de la Garonne n'est pas tout à fait le même du sud au nord du secteur étudié. Les principaux étages rencontrés sont la basse plaine contenant le lit majeur de la Garonne, les basses terrasses et les moyennes terrasses. Au sud, les terrasses sont emboîtées et asymétriques, quasiment absentes en rive droite, ce sont de larges bandes étroites dont l'altitude par rapport à l'étiage est assez élevée (50 m pour la moyenne terrasse et 30 m pour la basse terrasse).

En aval de l'accident frontal pyrénéen, qui dévie le cours de la Garonne vers l'est, la vallée alluviale s'élargit au niveau de la rive gauche. Les terrasses sont étagées et entre chaque terrasse le substratum molassique affleure soit directement soit sous des dépôts superficiels (éboulis ou dépôts de solifluxion). L'illustration 3 illustre la limite entre le substratum molassique et les dépôts alluvionnaires

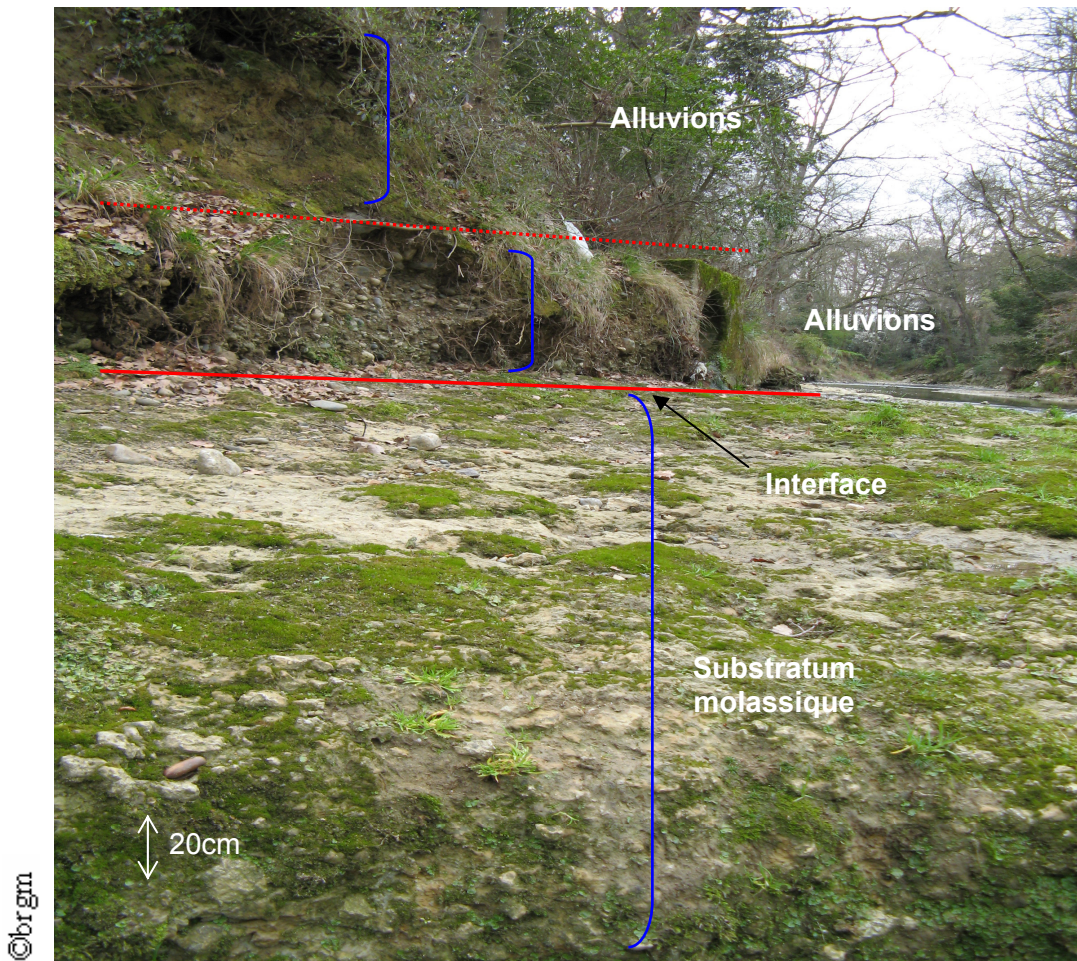
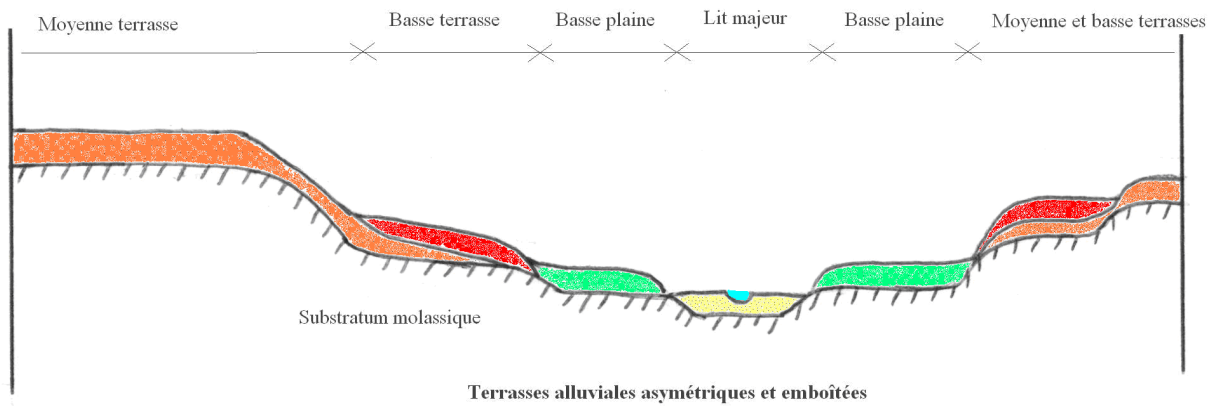
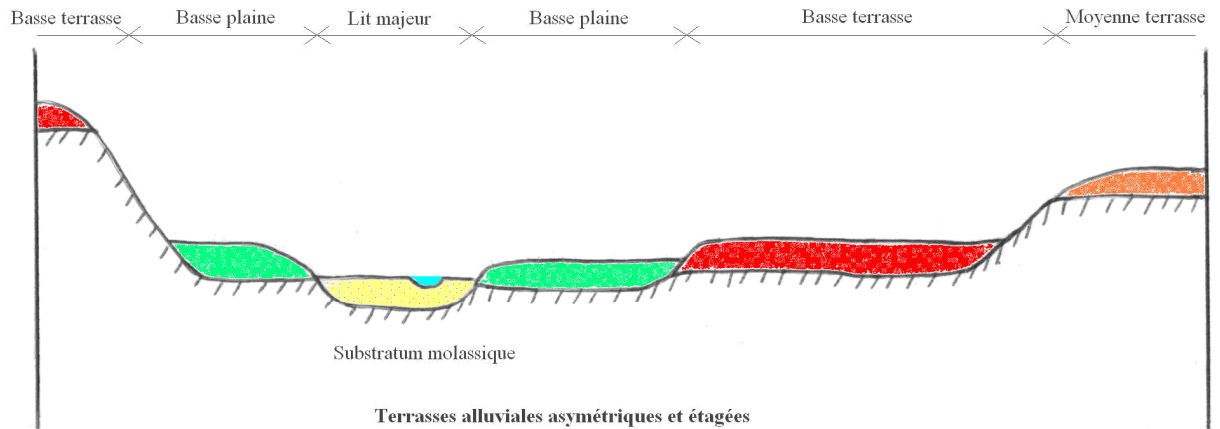


Illustration 2 : photo du lit du Touch, dans la commune de Plaisance du Touch, illustrant l'interface alluvions/formations molassiques

Sur la rive droite il existe une zone importante allant de Martres Tolosane jusqu'au sud de Toulouse où le talus molassique est abrupt et érodé directement à sa base par la Garonne, permettant ainsi la formation d'une couche épaisse d'alluvions actuelles, sans phénomène de terrassement. Les coupes schématiques de l'illustration 4 montrent la morphologie des terrasses alluviales



©brgm

Illustration 3 : coupes schématiques des types de terrasses alluviales.

A l'ouest de Toulouse la basse plaine est étagée en deux paliers séparés par le talus de Lalande d'une dénivellation de 3 m. Au niveau du palier inférieur il existe de nombreux anciens chenaux comblés.

2.1.4. La nature des alluvions

Les formations fluviales sont des dépôts détritiques issus du démantèlement des Pyrénées. En amont le matériel est grossier, hétérogène et anguleux. Il se compose de sables, de graviers et de blocs de granite, de gneiss, d'ophite et de schiste. En aval, ces éléments sont roulés, plus homogènes et se composent généralement de sables, graviers et galets de même composition qu'en amont.

Dans la basse plaine, en amont ces alluvions sont constituées de bancs de sable fin tandis qu'en aval les éléments alluvionnaires grossiers sont pris dans une matrice de sable fin. Dans les basses terrasses, les alluvions sont de même composition que ceux de la basse plaine mais avec degré d'altération plus poussé. Aussi, la fraction argileuse y est un peu plus importante. Les dépôts alluvionnaires subissent un phénomène de podzolisation du sol alluvionnaire qui transforme localement ces alluvions en boubène (sol sablo-argileux lessivé plus ou moins podzolisé).

L'altération des minéraux en argile est encore plus accentuée dans les moyennes terrasses. Ces altérations ont une grande importance sur la formation et le dynamisme des nappes ainsi que sur la composition des eaux souterraines.

Les épaisseurs d'alluvions sont variables, en amont de la Garonne elles sont supérieures à 10 m et en aval souvent inférieures à 10 m. Les épaisseurs peuvent varier fortement à l'intérieur d'une même terrasse, ainsi que d'une terrasse à l'autre : la couche alluvionnaire est plus épaisse sur les basses et moyennes terrasses et l'épaisseur de limon est plus forte au niveau des alluvions actuelles du lit majeur.

Localement il existe des zones de surépaisseur des alluvions causées par la présence d'anciens chenaux (de 5 m de profondeur en moyenne) remplis par des dépôts plus ou moins grossiers. Ces zones plus perméables jouent un rôle de drain à circulation préférentielle pour les eaux souterraines.

2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

2.2.1. Les caractéristiques morphologiques et hydrodynamiques des nappes.

Le contexte de mise en place des différentes terrasses alluviales détermine le schéma hydrogéologique de la zone étudiée. En effet, dans le département de la Haute-Garonne, les alluvions peuvent être agencées de trois (3) manières :

- en terrasses étagées, séparées par des affleurements de substratum : EX. les terrasses moyennes avec les basses terrasses.
- en terrasses étagées, avec connexion hydraulique entre elles,
- en terrasses emboîtées : Ex. des alluvions récentes avec la basse plaine.

Ces caractéristiques géomorphologiques induisent la distinction des aquifères suivants :

Aquifère des alluvions de la haute terrasse

Seuls quelques lambeaux de hautes terrasses subsistent, ils présentent une fraction argileuse issue de l'altération des éléments granitiques plus importante que celle des alluvions récentes, induisant une diminution de la perméabilité. Les nappes des hautes terrasses sont donc généralement peu développées et d'extension réduite.

Aquifère des alluvions de la moyenne terrasse

Les moyennes terrasses sont également présentes sous forme de lambeaux, plus ou moins réduits, dominant les cours d'eau. L'altération y est très poussée et la perméabilité des terrains faible. L'épaisseur de ces alluvions varie de 2 à 10 m.

Aquifère des alluvions de la basse terrasse et de la basse plaine

Les alluvions de la basse terrasse et de la basse plaine sont constituées par des graviers grossiers et des lentilles sableuses perméables. Les alluvions de la basse terrasse ont deux (2) à six (6) mètres d'épaisseur, et celles de la basse plaine ont une épaisseur variant de cinq (5) à quinze (15) mètres. Ces niveaux sont surmontés d'une couverture de 0,5 à deux (2) mètres de limons argileux récents, due aux dépôts formés lors des crues. Les valeurs de la perméabilité des alluvions sont comprises entre 1.10^{-4} et $1.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ (Cavaillé et *al.*, 1965).

Ces alluvions sablo-graveleuses de la basse terrasse et de la basse plaine contiennent une nappe libre continue en relation hydraulique directe avec les grands cours d'eau. En effet, la basse terrasse est une terrasse emboîtée induisant une continuité hydraulique avec la basse plaine. Des zones de discontinuité peuvent cependant être observées localement.

Ces nappes soutiennent le débit des cours d'eau et permettent un soutien d'étiage en période estivale. Selon les endroits et en fonction de degré d'encaissement des cours d'eau dans la molasse, les rivières peuvent temporairement recharger la nappe en période de crue.

L'alimentation de la nappe est assujettie aux apports pluviométriques et dans une moindre mesure au déversement des nappes des terrasses sus-jacentes. De ce fait, le potentiel de recharge du système est particulièrement sensible aux variations climatiques annuelles.

Les oscillations de cette nappe sont importantes et les basses eaux très marquées en fin d'été et en automne.

Direction et sens d'écoulement de la nappe

Deux campagnes piézométriques ont été entreprises en périodes de basses eaux puis de hautes eaux à partir de mesures du niveau d'eau collectées sur environ 243 et 284 ouvrages respectivement effectuées en octobre 2006 (basses eaux) et Juin 2007 (hautes eaux). Ces cartes sont présentées en annexe 3.

Deux campagnes de jaugeage des cours d'eau secondaires de la plaine alluviale de la Garonne ont été organisées en période de hautes eaux (en mai 2009) et durant l'étiage (en septembre 2008). Ces séries de mesures ont mis en évidence le caractère drainant de ces rivières et ont permis d'estimer les volumes sortant de la nappe vers les cours d'eau.

La lecture des cartes piézométriques amène les observations suivantes :

- l'écoulement général de la nappe se fait du sud vers le nord et des niveaux de terrasses les plus élevées vers les niveaux inférieurs,
- L'écoulement dans les nappes se fait, en amont de la vallée, d'ouest en est puis s'oriente sud-ouest nord-est jusqu'au sud de Toulouse, combiné à un écoulement inter terrasses matérialisé par des lignes de sources générées par l'affleurement de la molasse imperméable. En aval de la zone d'étude, l'écoulement se fait de terrasse en terrasse, vers la Garonne qui draine le système (cf. illustration 4).
- la nappe est constamment drainée par les cours d'eau de la Louge et du Touch, de l'Hers mort et probablement de l'Aussonnelle (manque de données).
- Le canal de Saint Martory semble drainer la nappe sur sa partie amont jusqu'à Frouzins, puis à partir de Cugnaux, le sens d'écoulement s'inverse et le canal semble réalimenter la nappe.
- Enfin, la nappe alluviale de la moyenne terrasse est très morcelée par l'entaillement des cours d'eau secondaires et la remontée de talus molassiques de part et d'autre de leurs alluvions. Cette nappe très

compartimentée présente de nombreuses discontinuités hydrauliques, au point qu'il serait préférable de considérer un ensemble de petites nappes alluviales, plutôt qu'une nappe continue,

- Dans la partie extrême sud de la zone d'étude, dans le secteur de St Gaudens, une alimentation par les coteaux molassiques est observée sous forme de sources ou écoulements diffus. Ce phénomène est également visible dans toute la moyenne terrasse de la zone d'étude.

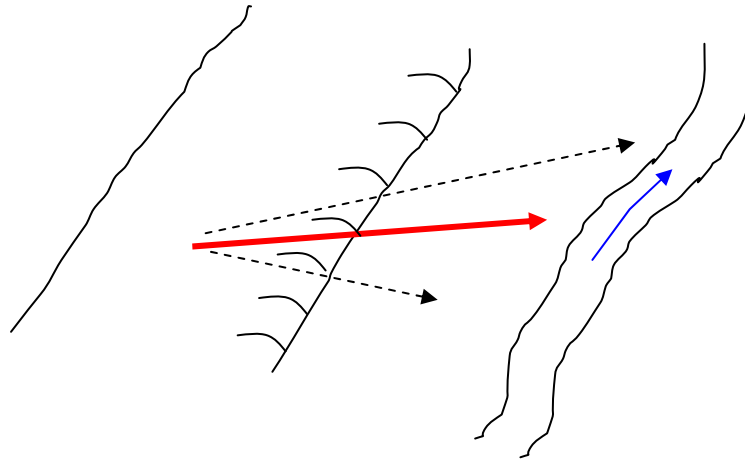


Illustration 4 – Schéma de principe des directions d'écoulement des nappes alluviales de Midi-Pyrénées

La forme des courbes piézométriques et les sens d'écoulement restent globalement identiques entre les deux campagnes. La différence de niveau piézométrique est plus importante dans la partie extrême sud de la zone d'étude, avec une évolution de 5 m en moyenne. Dans le secteur de Miramont de Comminges, on note une différence dans le sens du tracé des isopièzes. En réalité le nombre de points de mesure y est insuffisant pour connaître exactement le sens d'écoulement. Dans la partie médiane-sud de la plaine, sur les communes de Palaminy et Lavelanet, le battement de la nappe est de l'ordre de 2,5 m dans la basse plaine et de 1 m dans la basse terrasse.

Un peu plus au nord, dans le secteur du Fauga et Berat, le battement est inférieur à 1 m et la nappe est drainée par la Louge.

Enfin, dans toute la partie médiane de la zone d'étude, le battement est de l'ordre de 2,5 m et dans la partie nord du département, il se réduit considérablement, au point que de nombreux ouvrages présentent des niveaux similaires entre les hautes eaux et les basses eaux.

Recharge de la nappe et évolution piézométrique

L'alimentation de ces nappes se fait principalement par infiltration directe des précipitations, mais aussi par la réalimentation de la Garonne lors des crues et localement au niveau des canaux dans les zones où les berges ne sont pas imperméabilisées (cas du canal de St Martory). Le drainage des nappes se fait par la Garonne et ses affluents. Il existe aussi une alimentation entre les terrasses de la terrasse supérieure vers la terrasse inférieure.

L'estimation de la recharge a été faite à partir des données de pluviométrie et d'évapotranspiration potentielle (ETP) acquises auprès de MétéoFrance à un pas de temps décadaire entre 1994 et 2009, pour les stations de Blagnac, Palaminy, Clarac et Lherm (cf. Illustration 5). Ce travail a été entrepris au cours des années 2 et 3 de la présente étude.

Les valeurs ainsi obtenues par décade ont été agrégées au pas de temps annuel pour les 3 stations. L'illustration 6 synthétise les valeurs moyennes calculées alors que l'illustration 7 récapitule l'évolution des précipitations entre 1994 et 2009.

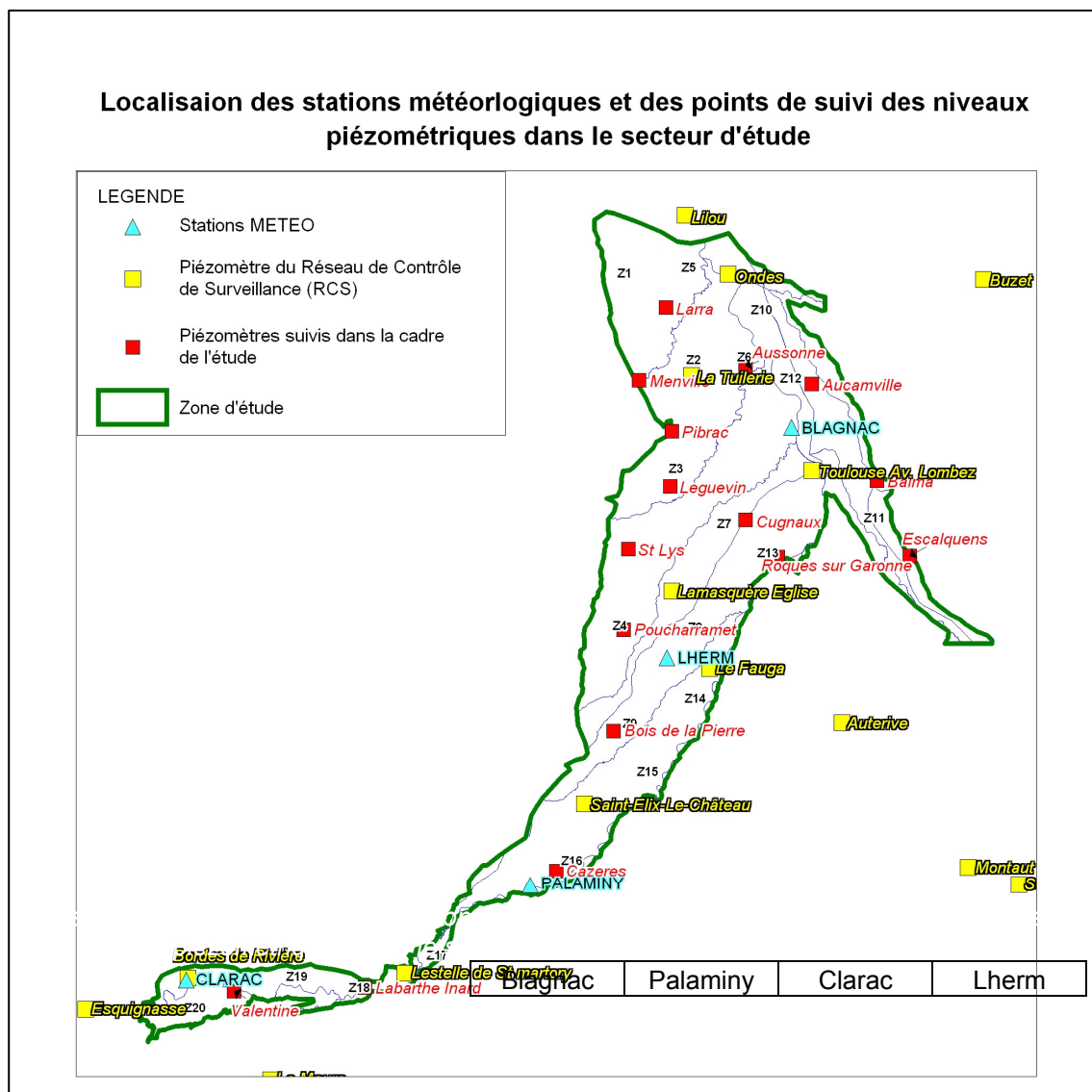


Illustration 5 – Localisation des stations météorologiques et des points de suivi des niveaux piézométriques dans le secteur de la plaine alluviale de la Garonne

Période des données	1996-2009	2000-2009	1994-2009	1997-2009
Moyenne interannuelle des précipitations sur la période en mm	610	641	727	588
Moyenne interannuelle des ETP sur la période en mm	1018	588	855	931

Illustration 6 – Données climatiques moyennes calculées pour la période 1994-2009

L'illustration 8 ci-dessous montre que sur une même année, les précipitations sont en moyenne plus importantes au sud de la plaine, et notamment vers Clarac (894 mm en 2002). Cela s'explique par le contexte géographique et notamment la proximité des massifs montagneux générant une plus forte pluviométrie et des températures globalement moins élevées. A l'inverse, le vent d'Autan soufflant du sud-est accentue la sécheresse dans le secteur Toulouse où les valeurs d'ETP sont en moyenne les plus fortes (945 mm à Blagnac en 2002).

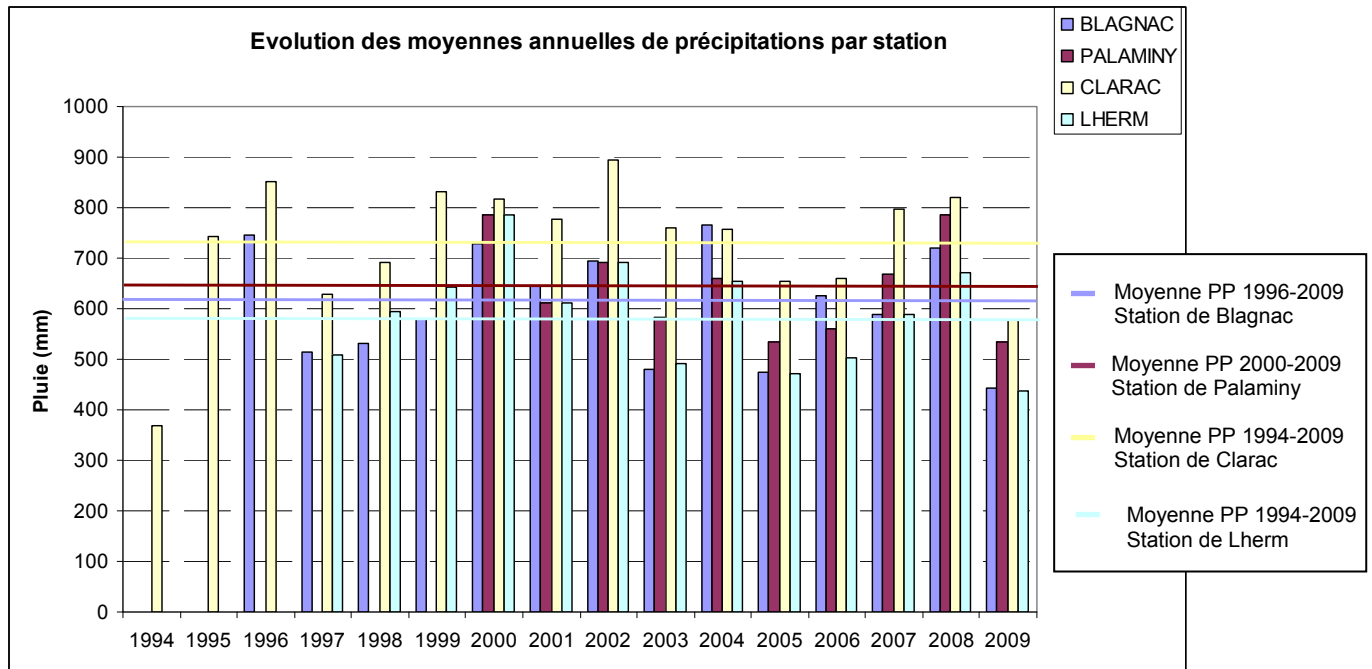


Illustration 7 – Evolution des précipitations aux stations de Blagnac, Palaminy, Clarac et Lherm

Afin de disposer de chroniques de niveaux piézométriques sur le secteur d'étude, des sondes de pression avec enregistreur ont été placées en Juin 2006 et janvier 2010 sur 16 points d'eau sélectionnés parmi les puits visités lors des campagnes piézométriques. Ces équipements ont fait l'objet d'un contrôle de terrain tous les 2 mois, de juillet 2007 à janvier 2010. Ces mesures permettent de compléter les données enregistrées en continu sur les 11 ouvrages du réseau quantitatif de gestion patrimoniale (Réseau de suivi quantitatif du SGR Midi-Pyrénées) également intégrés au RCS présents sur la zone (cf. Illustration 5).

L'analyse de ces informations fait ressortir une recharge du réservoir alluvial de la Garonne principalement assurée par l'infiltration des eaux de pluie et un régime de nappe, de périodicité annuelle, structuré en 3 phases :

- une phase de recharge automnale, hivernale et printanière débutant au mois de Octobre/Novembre avec un maximum des niveaux atteint de février à juin selon les années. A cette époque de l'année, les sols sont saturés et la lame d'eau infiltrée importante.

Selon l'intensité et la persistance de la période pluvieuse, une décrue partielle intervient entre février et avril, suivie d'une nouvelle phase de recharge printanière observée généralement entre mai et juin,

- une phase de tarissement régulière et prononcée des niveaux d'eau démarrant au début de l'été, entre mai et juin,
- une phase de décroissance très lente correspondant à l'étiage et se poursuivant habituellement jusqu'au mois de novembre.

La profondeur de la nappe par rapport au sol est très variable, elle peut dépasser dix mètres et être inférieure à un mètre sur une même terrasse et dans un même secteur. Elle est en moyenne de 3,3 mètres par rapport au sol.

L'aquifère alluvial de la Garonne présente globalement des battements moyens annuels peu importants, compris entre 0,30 et 2,50 mètres, en raison de circulations d'eau relativement rapides et d'une porosité élevée. Toutefois, la nappe contenue dans les moyennes et basses terrasses semble sujette à des variations annuelles un peu plus marquées (entre 0,5 et 2 mètres) que dans les alluvions de la basse plaine. En effet, les niveaux mesurés sur les points de cette formation témoignent de fluctuations comprises entre 0 et 1 mètre.

Productivité

La productivité des nappes est globalement croissante des terrasses anciennes aux alluvions les plus récentes. Ce phénomène est lié à la lithologie des matériaux, et notamment au degré d'altération des alluvions en relation avec le pourcentage d'argile. Dans les alluvions récentes (et éventuellement les basses plaines), la disponibilité de la ressource est augmentée par des effets de recharges ponctuels des cours d'eau en crue.

Ainsi, les gammes de productivité attendues par ouvrages de captage, vont de quelques m³/h voire moins dans les moyennes terrasses, à une centaine de m³/h dans les basses plaines et alluvions récentes.

Il est cependant nécessaire de rappeler le caractère très hétérogène des alluvions, y compris dans un même niveau de terrasse. Il est en effet très fréquent d'observer des débits très différents sur des ouvrages distants de quelques centaines de mètres seulement. Cela peut s'expliquer par la présence de paléo chenaux ou de passées

plus argileuses. Il est donc impossible de déterminer a priori le débit d'exploitation d'un ouvrage. Seul un essai de nappe par pompage peut apporter ce niveau d'information.

Physico-chimie

Les eaux de nappes alluviales sont globalement proches de la neutralité et de dureté moyenne, comme pour l'ensemble des nappes alluviales de Midi-Pyrénées. Leurs températures oscillent entre 12 et 14°C en fonction des saisons et ne présentent pas d'anomalie de salinité particulière ou de pouvoir corrosif. Elles peuvent être localement fortement contaminées par les nitrates et les produits phytosanitaires, de part leur grande vulnérabilité intrinsèque et une pression polluante de surface importante.

2.3. CONTEXTE HYDROLOGIQUE

La plaine de la Garonne compte deux bassins versants : le premier concerne la Garonne, de sa source au confluent de l'Ariège, et le deuxième, de la Garonne du confluent de l'Ariège au confluent du Tarn.

Le fleuve prend sa source en Espagne, se dirige au nord, rentre en France au Pont du Roy à Fos, reçoit la Pique descendue des massifs de Luchon. Il quitte les Pyrénées après avoir arrosé le site antique de Saint-Bertrand-de-Comminges, puis il reçoit la Neste, change de direction pour se diriger vers le nord-est en une large vallée (plaine de Rivière), il arrose Saint-Gaudens franchit les Petites Pyrénées entre Saint-Martory et Martres-Tolosane, reçoit le Salat descendu de Saint-Girons (source : wikipedia.org).

La longueur de son cours d'eau, en France, est alors de 522,6 km.

Les principaux affluents de la Garonne dans la zone étudiée sont l'Ariège, qui conflue en rive droite de la Garonne, sur la commune de Portet-sur-Garonne, la Louge qui conflue en rive gauche à Muret, le Touch qui débouche en rive gauche de la Garonne à Saint Martin du Touch, la Save et l'Hers qui confluent respectivement en rive gauche et droite sur la commune de Grenade.

La Garonne a un régime dit complexe. Trait d'union des systèmes hydrologiques des deux massifs montagneux, la Garonne, née pyrénéenne avec un régime pluvionival, voit ses écoulements fortement modifiés par les apports de ses affluents de régime pluvial océanique (Tarn et Lot, issus du Massif central) (source : www.eau-adour-garonne.fr).

Suite au plan de gestion des étiages (PGE), élaboré en 2004, la Garonne et ses affluents font l'objet de restrictions récurrentes en période d'étiage.

Le SDAGE et le PGE ont ainsi fixé des valeurs de Débit d'Objectif d'Etiage (DOE) et de Débit de Crise (DCR) permettant, s'ils sont respectés, de garantir le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques.

Le DOE de la Garonne à la station de Portet sur Garonne (centre de la zone d'étude) est fixé à 52 m³/s et le DCR à 27 m³/s.

L'illustration 8 ci-après indique les valeurs de DOE, DCR et VCN10 (une année sur cinq) pour l'ensemble des grandes stations hydrométriques de la Garonne.

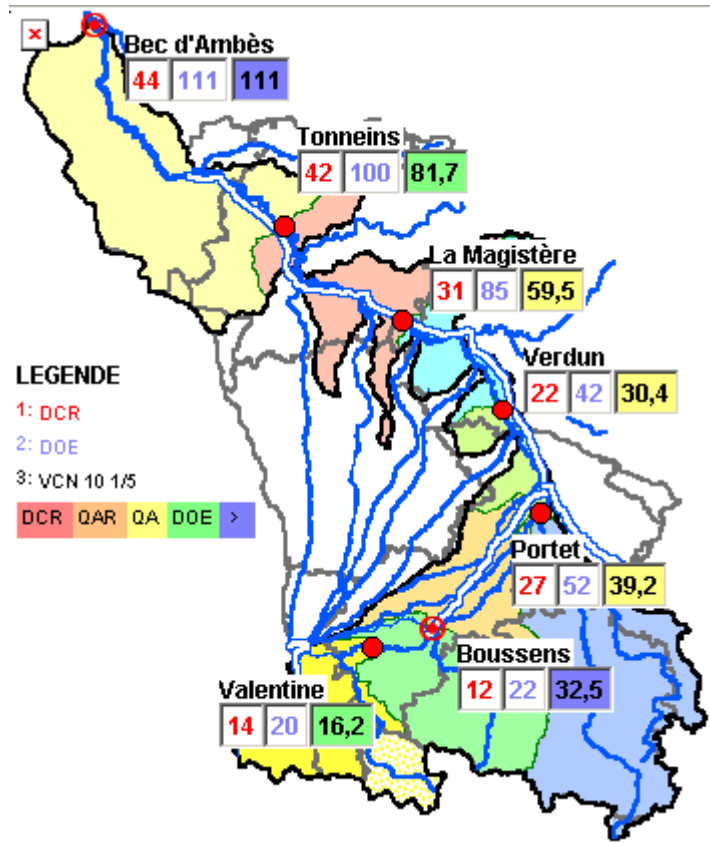


Illustration 8 – Valeurs de DCR, DOE et VCN 10 1/5 sur la Garonne (Données SMEAG)

Seize (16) stations appartenant au réseau hydrométrique géré par la DREAL de Midi-Pyrénées fournissent des mesures de débits et de hauteurs d'eau pour les tronçons de rivières Garonne, Louge, Touch, Save, Hers mort, Arize, Girou et Aussonelle dans le secteur d'étude. Les données issues de ces stations permettent de contrôler la restitution des données de débits et de hauteurs d'eau fournies par le modèle au cours du calage.

En complément de ces informations, cinq points de mesures du fil de l'eau de la Garonne ont été sélectionnés au niveau de ponts jalonnant le secteur d'étude. Ce suivi engagé en juin 2006 s'est poursuivi à une fréquence bimestrielle jusqu'en août 2008. L'illustration 9 représente la répartition de l'ensemble de ces points sur le réseau hydrographique intéressant le domaine modélisé.

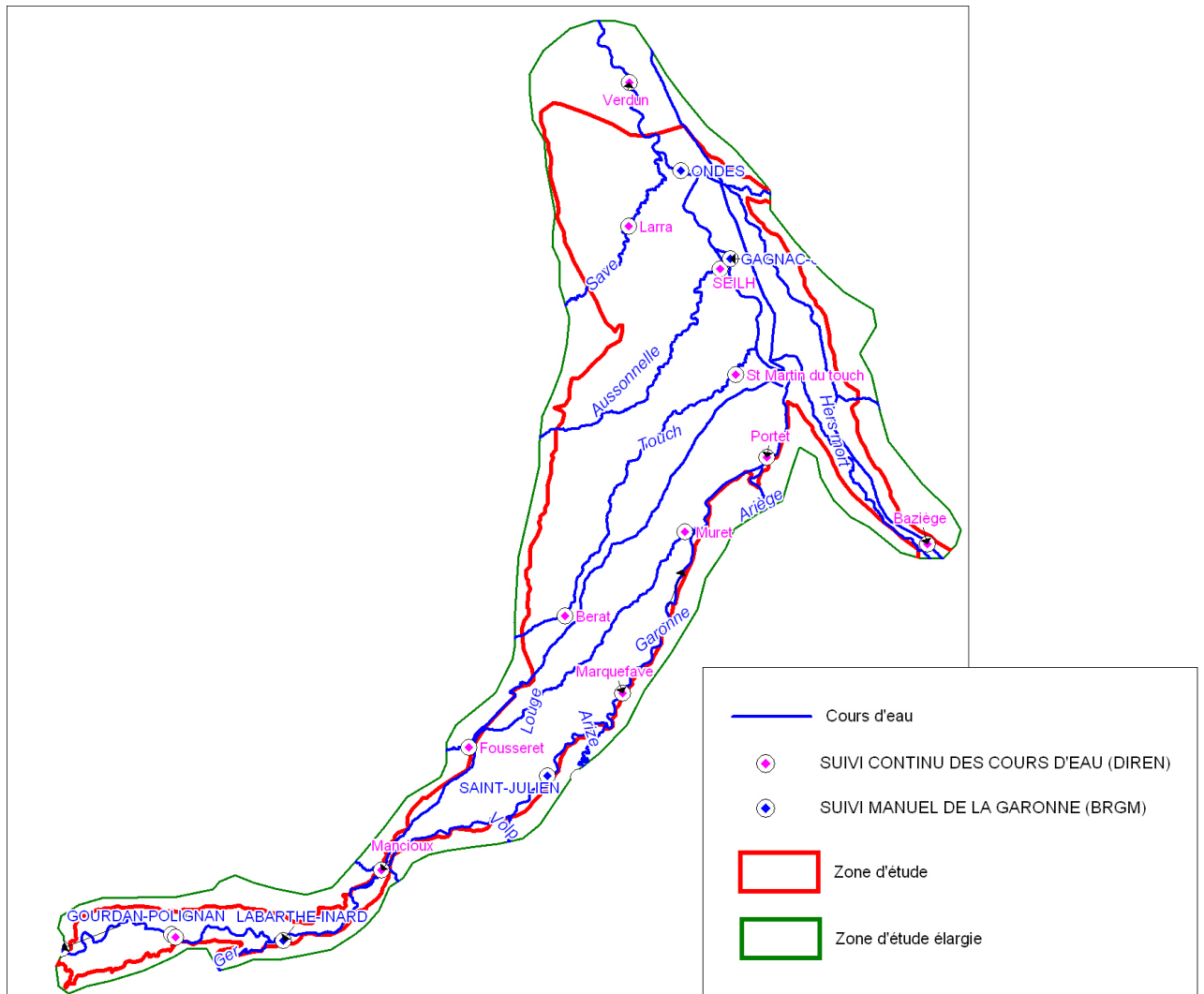


Illustration 9 – Points de contrôle des débits et hauteurs d'eau de la Garonne et ses affluents dans la zone d'étude

L'ensemble des informations recueillies lors de cette phase de synthèse des données géologique, hydrologique et hydrogéologique constitue une phase essentielle et préalable à la construction du modèle de simulation des écoulements décrite dans le chapitre 4.

3. Campagne de jaugeage sur les cours d'eau secondaires de la plaine alluviale

3.1. CONTEXTE ET METHODOLOGIE

La bonne connaissance des interactions nappe / rivière est nécessaire au calage du modèle en régime permanent et transitoire. Afin d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydraulique de la nappe et d'optimiser les phases de calage du modèle, deux campagnes de jaugeages ont été organisées en septembre 2008 et mai 2009. Ces campagnes de jaugeages concernent les cours d'eau affluents de la Garonne.

En raison du nombre important d'affluents, une typologie des principaux cours d'eau de la plaine a été effectuée. Cette typologie a permis de cibler les jaugeages sur les secteurs présentant le plus d'intérêt vis-à-vis de la construction du modèle.

L'accessibilité souvent limitée des cours d'eau a nécessité la réalisation des jaugeages selon la méthode dite du flotteur qui consiste à mesurer les vitesses dans la tranche superficielle des écoulements d'un cours d'eau. Le déplacement horizontal d'un flotteur de surface sur un cours d'eau durant un temps t permet de déterminer la vitesse de l'écoulement de surface. Plusieurs mesures sont ainsi réalisées afin d'obtenir une moyenne qui, ramenée à la section du cours d'eau étudié permet de déterminer le débit. Bien que présentant d'importantes incertitudes de mesures, cette méthode présente l'avantage d'être rapide à mettre en œuvre et d'évaluer les débits d'une manière suffisante en première approche pour la compréhension des mécanismes d'écoulements.

3.2. TYPOLOGIE DES COURS D'EAU SUR LA PLAINE ALLUVIALE

Parmi les deux grandes catégories de cours d'eau transitant dans la plaine alluviale figurent :

- les cours d'eau « exogènes »,
- les cours d'eau « endogènes ».

Les cours d'eau exogènes prennent naissance en dehors des limites du système alluvial. Ainsi, de nombreux cours d'eau naissent au sein des formations molassiques. Ces cours d'eau peuvent constituer des apports en eau pour les alluvions (dépendant du degré d'encaissement des cours d'eau sur la plaine).

Les cours d'eau endogènes prennent naissance au sein même de la plaine. Les écoulements y constituent alors des sorties d'eau.

Afin de guider les travaux de calage effectués sur le modèle, il importe de distinguer dans un premier temps les cours d'eau exogènes des cours d'eau endogènes. L'illustration 10 ci-dessous présente un récapitulatif des différents cas de figure existant.

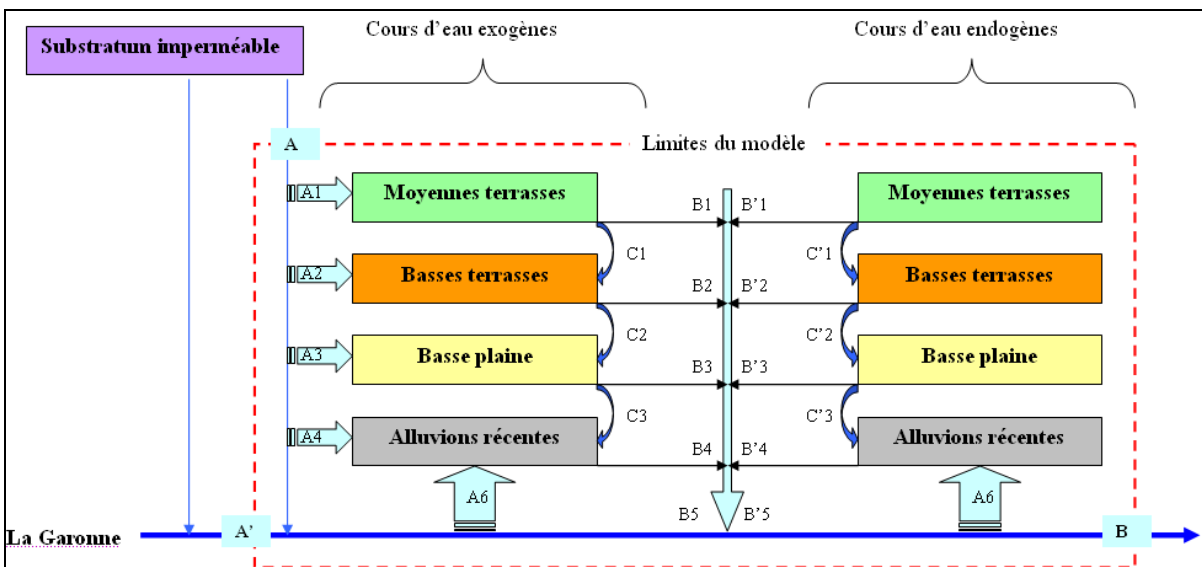
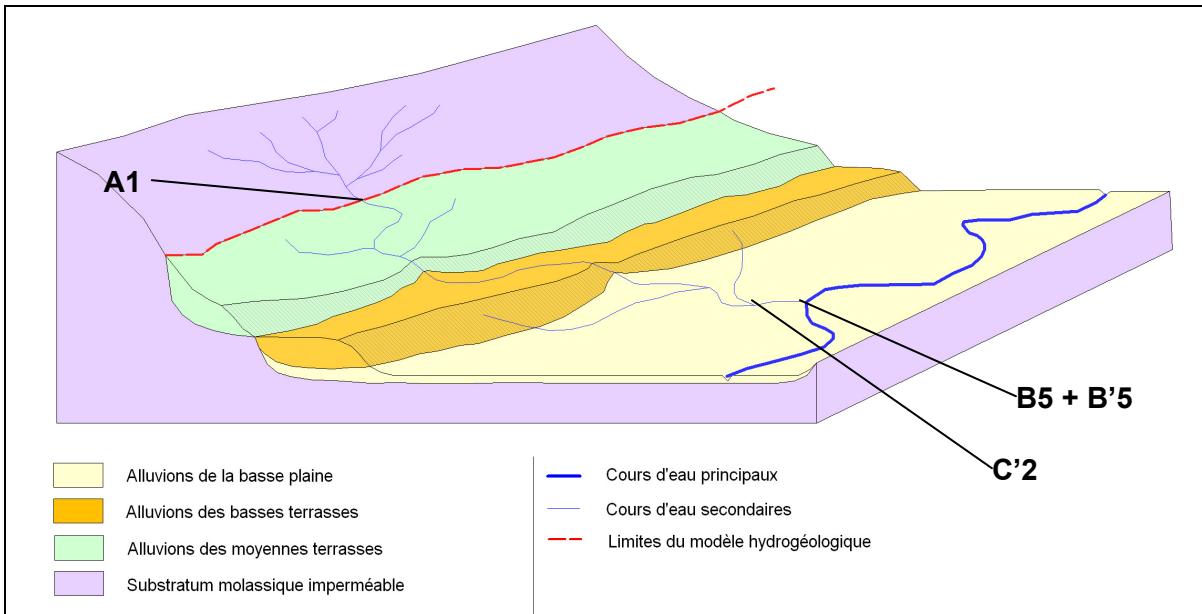


Illustration 10 : Schéma typologique des cours d'eau transitant dans la plaine alluviale

3.3. CHOIX DES COURS D'EAU A JAUGER

Le choix des sections a été réalisé dans plusieurs objectifs :

- mettre en évidence les entrées (A) dans la plaine pouvant constituer des apports à la nappe alluviale par infiltration (ex : composantes A1, A2, A3, A4),
- mettre en évidence les sorties du système (ex : ensemble des sorties B'5).

Le schéma présenté dans l'illustration 10 met en évidence la complexité des échanges qui peuvent se présenter en contexte alluvial. Le degré d'encaissement des cours d'eau influence en particulier la nature des échanges (entrées ou sorties du système).

Dans la pratique, l'intégralité des cours d'eau n'a pu faire l'objet de jaugeages. Ainsi, la réalisation d'un bilan entrées / sorties à l'échelle de la plaine n'a pas été possible.

Le choix des sections a donc été effectué dans le but d'identifier les secteurs potentiellement alimentés par les cours d'eau exogènes et les cours d'eau potentiellement drainant (sorties du système alluvial). Les jaugeages ont été effectués sur une trentaine de sections.

L'illustration 11 présente la localisation des sections ayant fait l'objet de jaugeage.

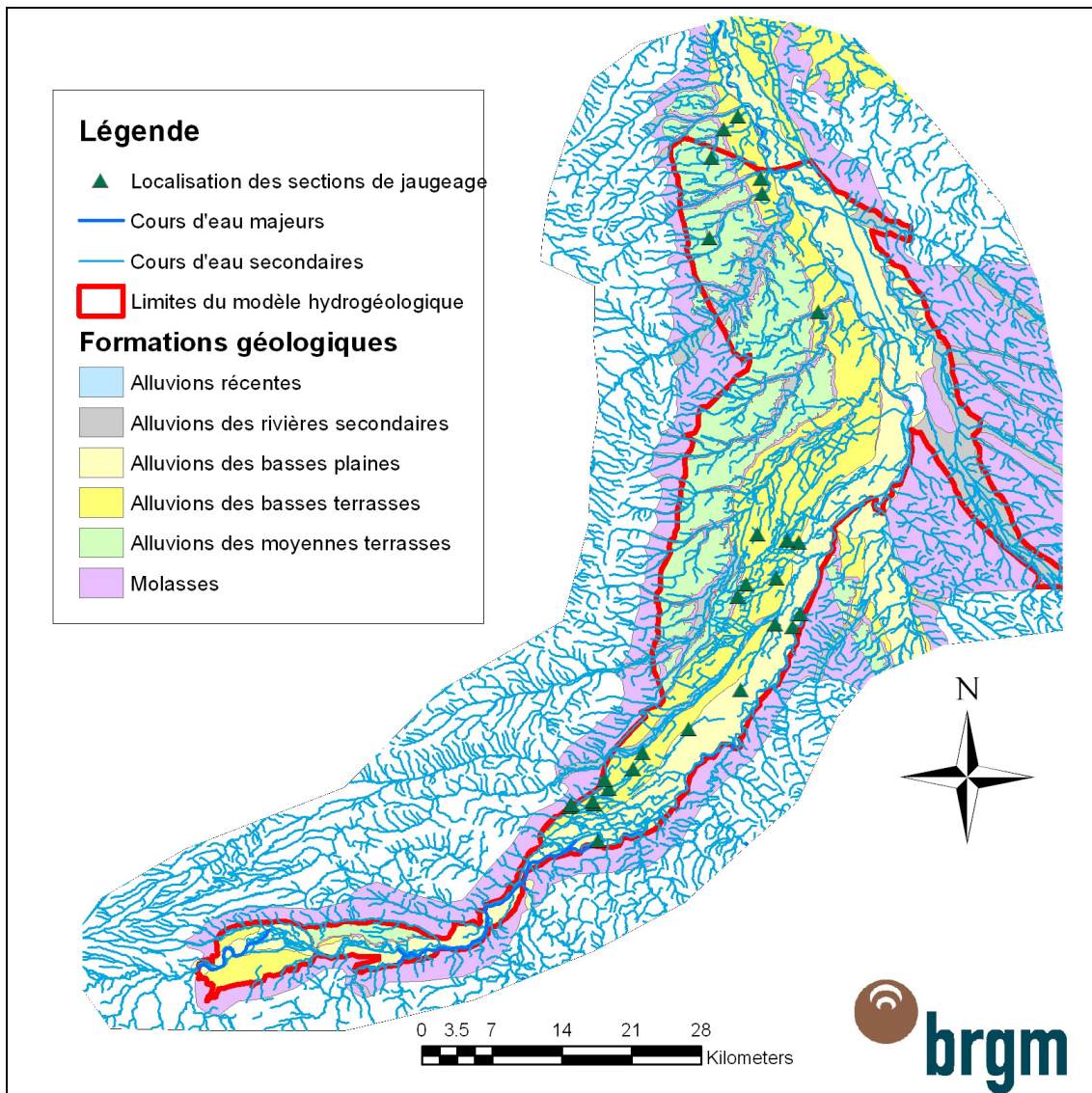


Illustration 11 : Localisation des sections de jaugeages sur la plaine

3.4. RESULTATS DES JAUGEAGES

Les résultats des jaugeages sont présentés en distinguant :

- les apports potentiels au système alluvial
- les sorties potentielles au système.

Les résultats sont présentés de manière à fournir les orientations générales sur le comportement des cours d'eau sur la plaine permettant d'optimiser les phases de calage du modèle.

3.4.1. Apports au système

Le transit des cours d'eau à travers la plaine alluviale permet d'envisager comme apports potentiels du système :

- le ruissellement provenant des coteaux molassiques lorsqu'il est associé à la perte partielle des cours d'eau dans les alluvions (drainage des cours d'eau par la nappe),
- les apports provenant des canaux d'irrigation (infiltration par manque d'étanchéité des canaux et excédents d'irrigation),
- les apports de la Garonne lors des crues.

Apports des cours d'eau issus des bassins versants molassiques

Les formations molassiques constituent le substratum imperméable de la plaine. Les terrains y sont généralement ruisselants. Une soixantaine de cours d'eau issus des bassins versants situés sur ces formations molassiques est susceptible d'être en relation avec les formations alluviales. Les jaugeages manuels ne pouvant être effectués sur l'intégralité de ces affluents, une méthode théorique a été appliquée afin d'approcher les modules annuels des débits (m^3/s) à l'entrée du système alluvial (équivalent aux limites du modèle hydrogéologique).

Les données hydrométriques de 10 stations implantées sur des bassins versants molassiques ont été acquises via la banque HYDRO. A partir des données recueillies, une relation linéaire a pu être définie entre la taille des bassins versants et le module annuel des débits (m^3/s). La relation indique que le module annuel des débits augmente de manière globalement linéaire d'environ $5 l / s / km^2$ (Cf. Illustration 12).

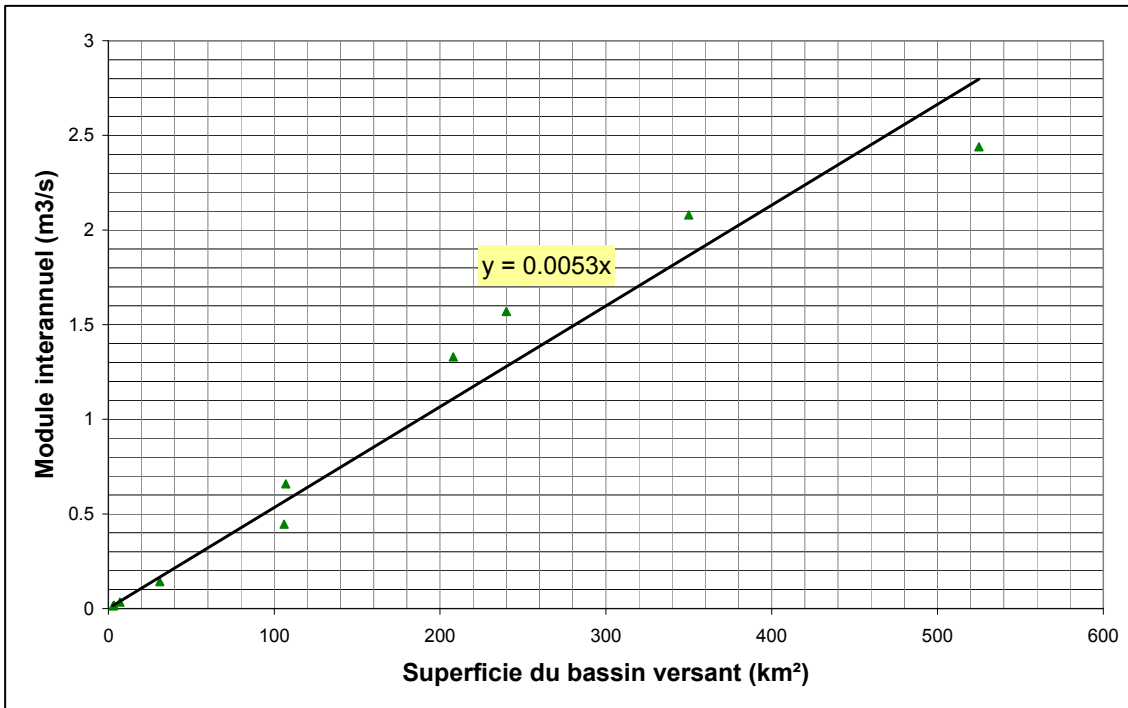


Illustration 12 : Représentation graphique des modules interannuels des débits de 10 stations hydrométriques en fonction de la superficie des bassins versants

Ce coefficient a été appliqué à la superficie des bassins versants concernés sur le secteur d'étude. Cette application est représentée dans l'illustration 13.

Seuls les bassins versants situés en rive gauche de la plaine ont fait l'objet de cette représentation. Les cours d'eau issus des bassins versants molassiques en rive droite de la plaine ne présentent pas de possibilités d'interactions avec la nappe alluviale (rejet direct dans la Garonne).

En rive gauche sont distingués principalement (superficie > 100 km²) les bassins versant de :

- la Save,
- le Touch,
- la Nère,
- la Noue.

Les modules interannuels des débits (théoriques) sur ces bassins sont susceptibles de dépasser les 0.5 m³/s (5 m³/s pour le bassin versant de la Save). Les autres bassins versants d'extensions plus réduites donnent lieu à une multitude de petits cours d'eau dont les modules interannuels des débits excèdent rarement 10 l/s.

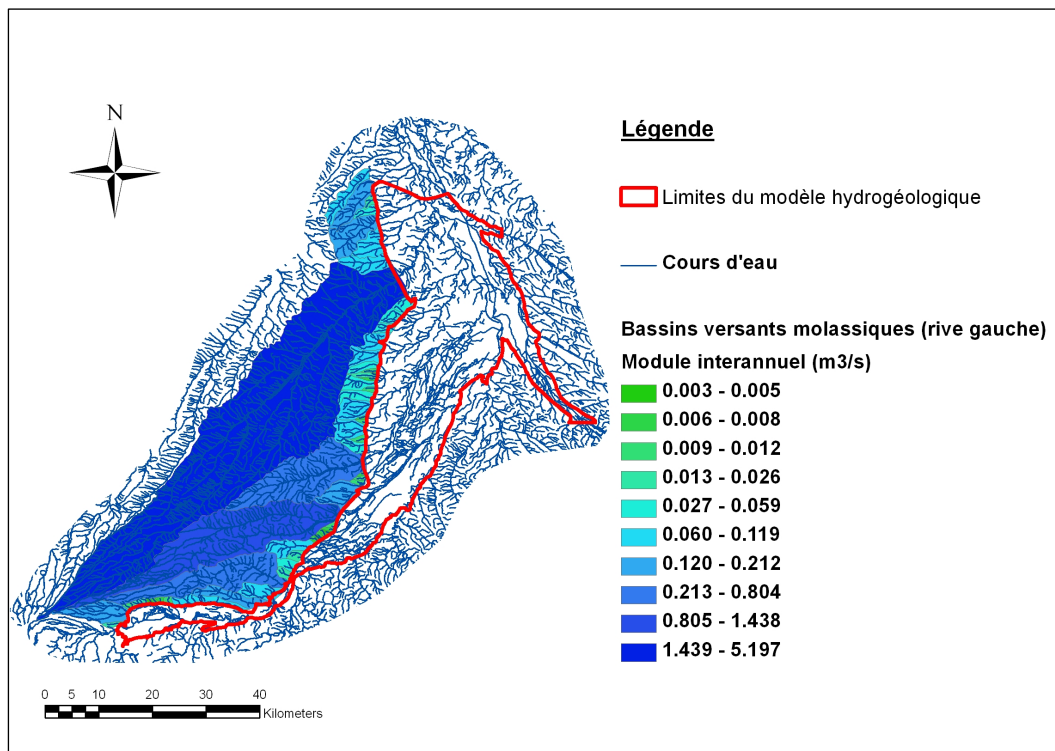


Illustration 13 : Répartition des modules interannuels des débits sur les bassins versants molassiques situés en rive gauche de la plaine alluviale

Ces cours d'eau peuvent participer à l'alimentation de la nappe alluviale lorsqu'ils circulent à une position topographique supérieure à celle de la nappe (perte partielle des cours d'eau). L'encaissement important des cours d'eau sur la plaine tend ainsi à limiter l'alimentation de la nappe par ces cours d'eau. Cet encaissement, présenté Illustration 14 concerne la quasi-totalité des cours d'eau issus des bassins versants molassiques.

Il est donc possible de considérer en première approche une contribution de quelques l/s par kilomètres de contact molasse / alluvions.

Les cours d'eau issus des bassins versants molassiques contribuent ainsi, par leur encaissement dans les terrasses, à assurer un rôle de drainage de la nappe (Cf. Illustration 14).

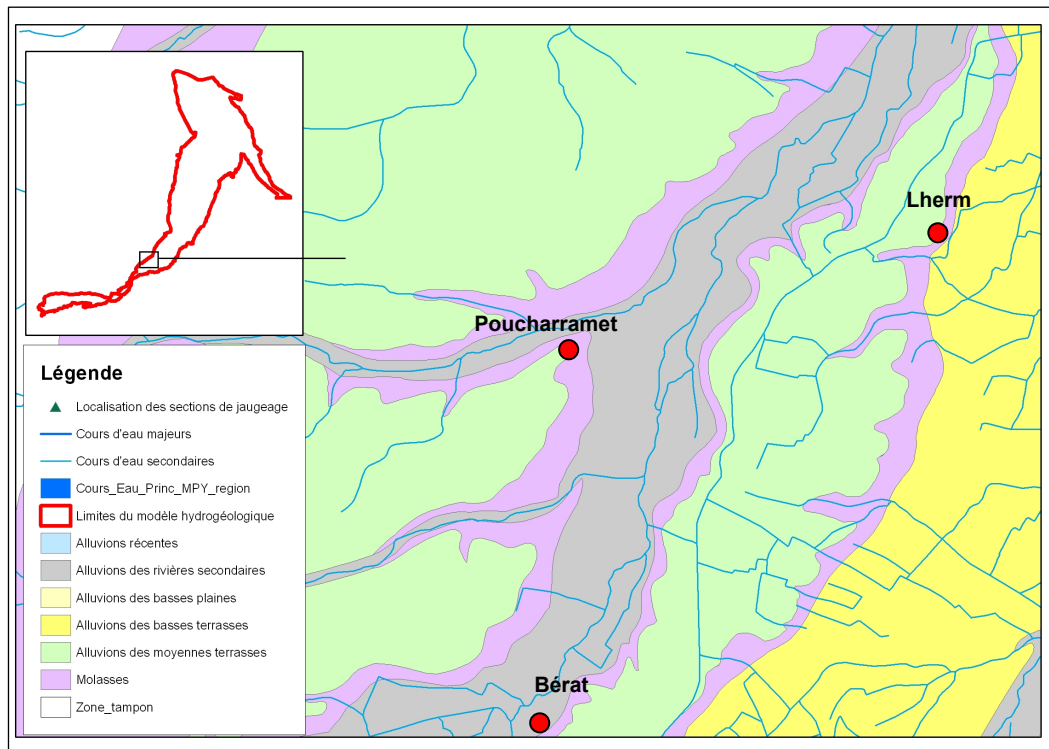


Illustration 14 : Encaissement des cours d'eau secondaires dans les formations molassiques

Apports des canaux d'irrigation

Des jaugeages effectués dans la moitié Sud de la plaine ont mis en évidence l'influence du canal de St-Martory et des embranchements de canaux résultants sur le débit des cours d'eau secondaires en relation. Ces canaux exercent une influence particulièrement importante sur les cours d'eau circulant à travers les alluvions des basses terrasses. Les jaugeages réalisés n'ont pas permis de mettre en évidence l'interaction des cours d'eau influencés avec la nappe. L'encaissement limité des cours d'eau dans la basse terrasse devrait toutefois permettre une alimentation de la nappe, notamment en période d'étiage.

Les mesures de débits effectuées montrent une importante variabilité conditionnée par l'état d'ouverture ou de fermeture des vannes reliant les cours d'eau aux canaux associés et par l'étanchéité de ces derniers (influence locale de la nappe).

Il serait utile de pouvoir disposer de mesures de débits du canal de St-Martory en amont et en aval de la plaine (cf. illustration 15). Une étude mandatée par le conseil général de Haute-Garonne est actuellement en cours pour déterminer ces différentes influences (étanchéité, relarguages, etc.).

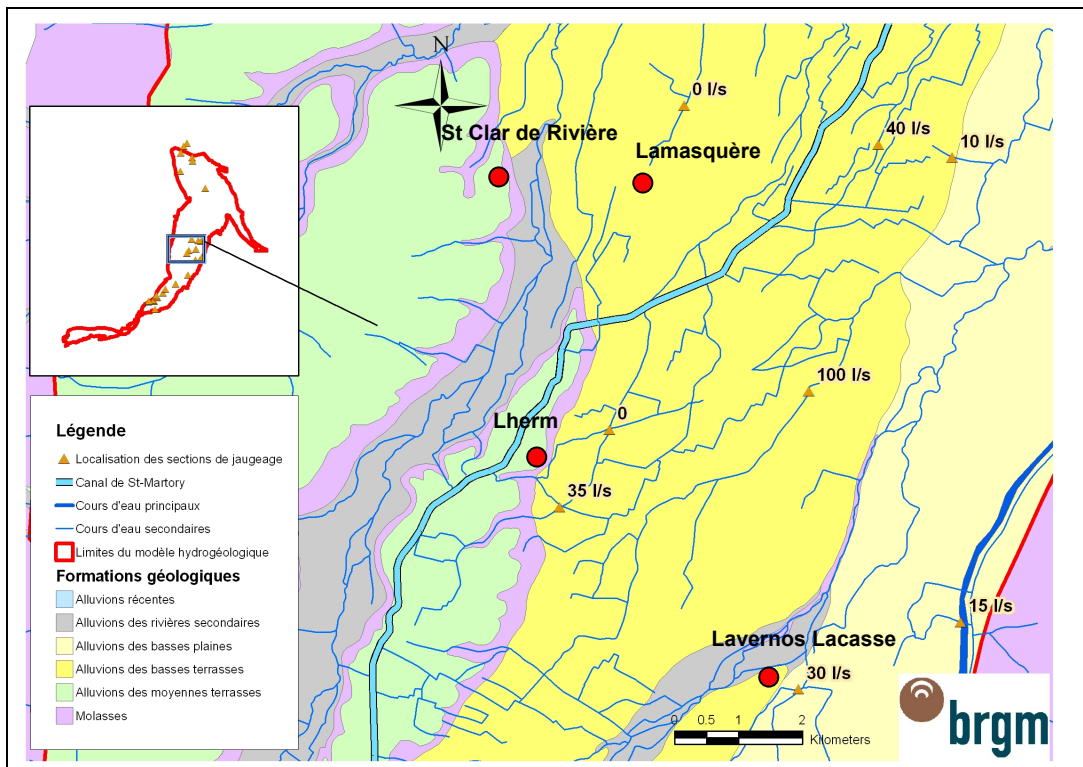
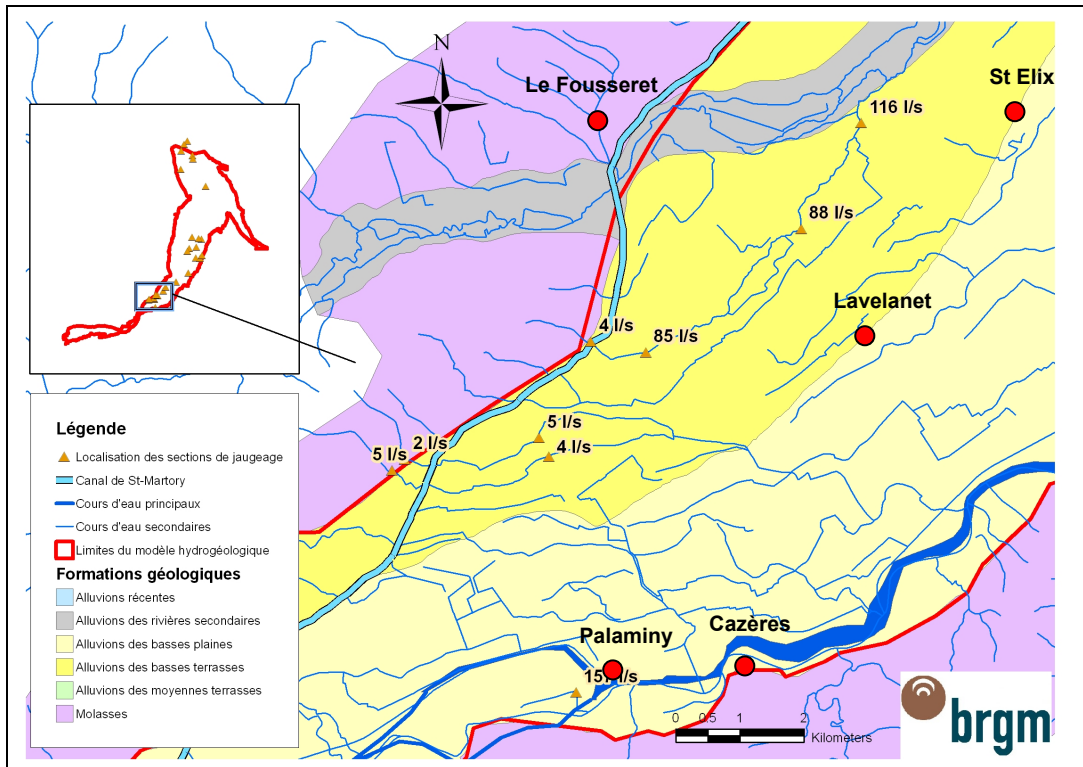


Illustration 15 : Influence du canal de St-Martory sur le régime hydrologique des cours d'eau

3.4.2. Sorties du système

Drainage de la nappe des moyennes terrasses par les cours d'eau

Les affleurements de moyennes terrasses sont le plus souvent individualisés en raison des nombreuses entailles des cours d'eau qui y circulent. La nappe des moyennes terrasses, dissociée hydrauliquement des terrasses sous-jacentes (basses terrasses) est ainsi drainée par de nombreux cours d'eau (cf. illustration 16). Des jaugeages, effectués sur des cours d'eau endogènes à ces terrasses ont été réalisés en différents secteurs.

Les débits mesurés ont été comparés aux longueurs de tronçons de cours d'eau situés en amont. D'une manière générale, sur les sections étudiées, le drainage de la nappe par les cours d'eau représente de 0.5 à 1.5 l/s/km de tronçon de rivière. Les moyennes terrasses sont entaillées par environ 445 km de cours d'eau du même type que ceux jaugés lors de la campagne. En première approximation, le drainage global de la nappe des moyennes terrasses à l'échelle de la plaine pourrait ainsi atteindre 200 à 700 l/s.

Ces valeurs sont fournies uniquement à titre indicatif dans le but de guider le calage du modèle. Les débits sont en effet représentatifs de la période de hautes eaux, et de fait probablement surestimés.

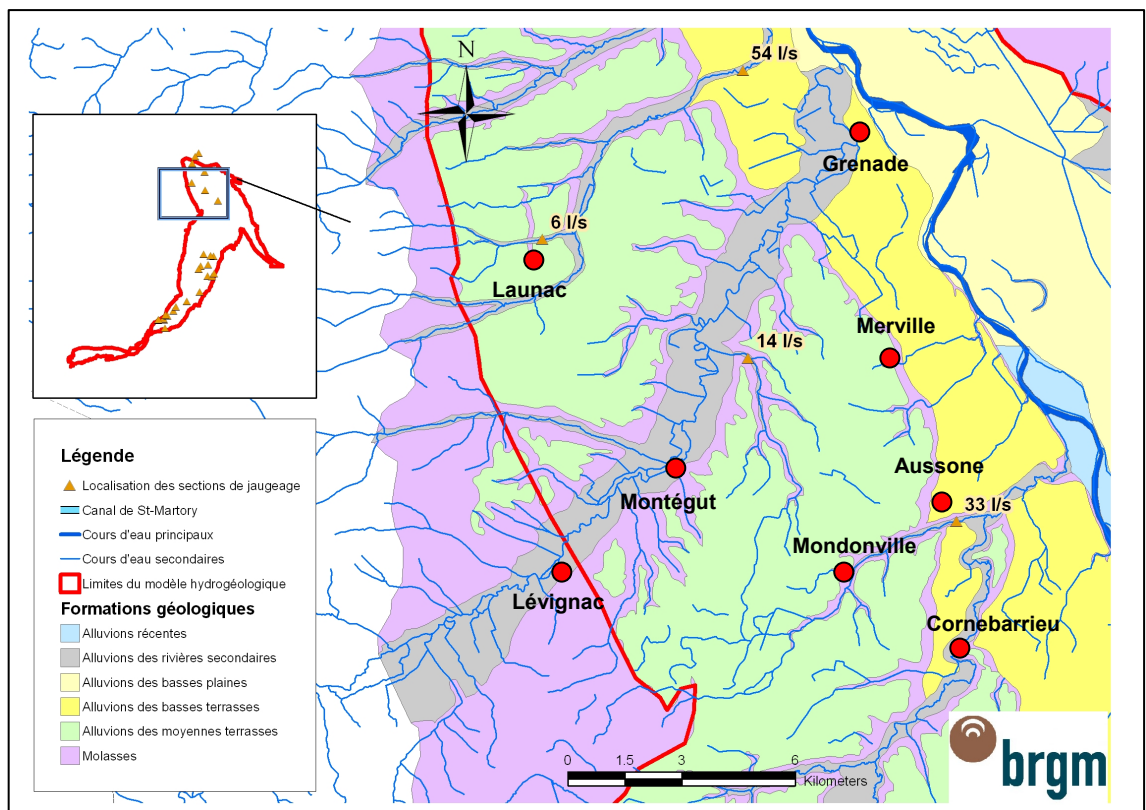
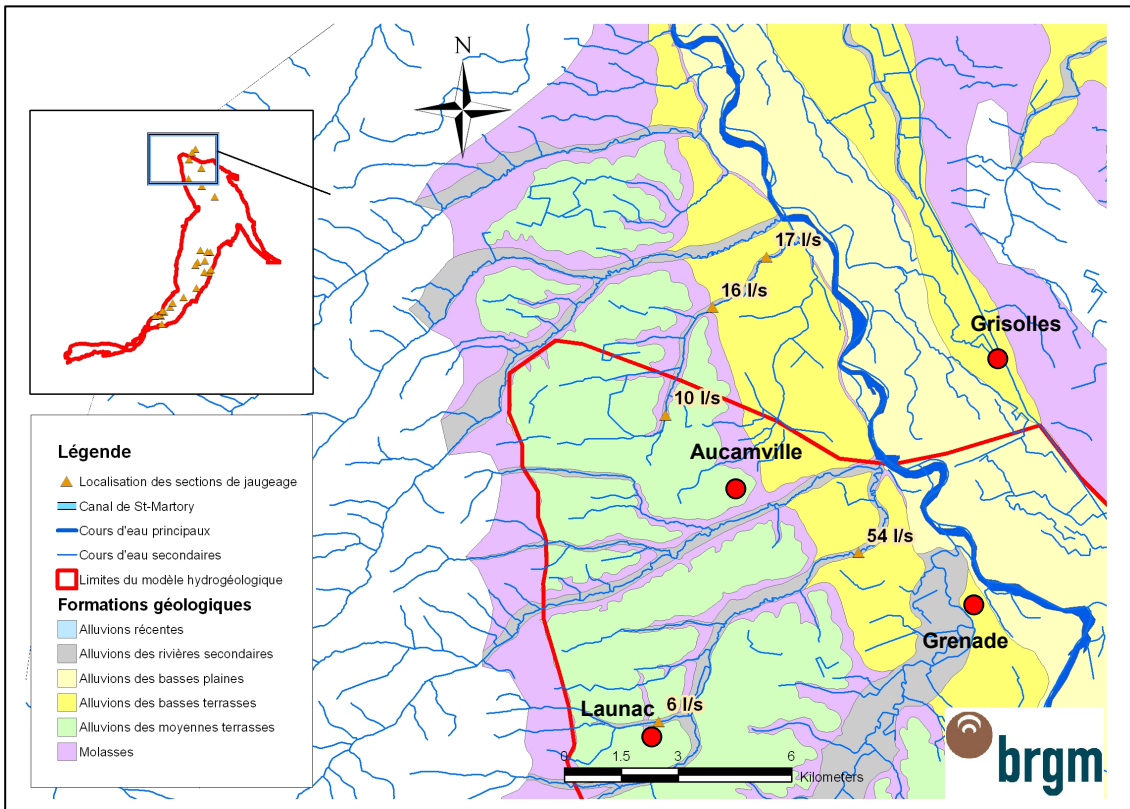


Illustration 16 : Drainage de la nappe des moyennes terrasses par les cours d'eau

Drainage de la nappe des basses terrasses et de la basse plaine par les cours d'eau

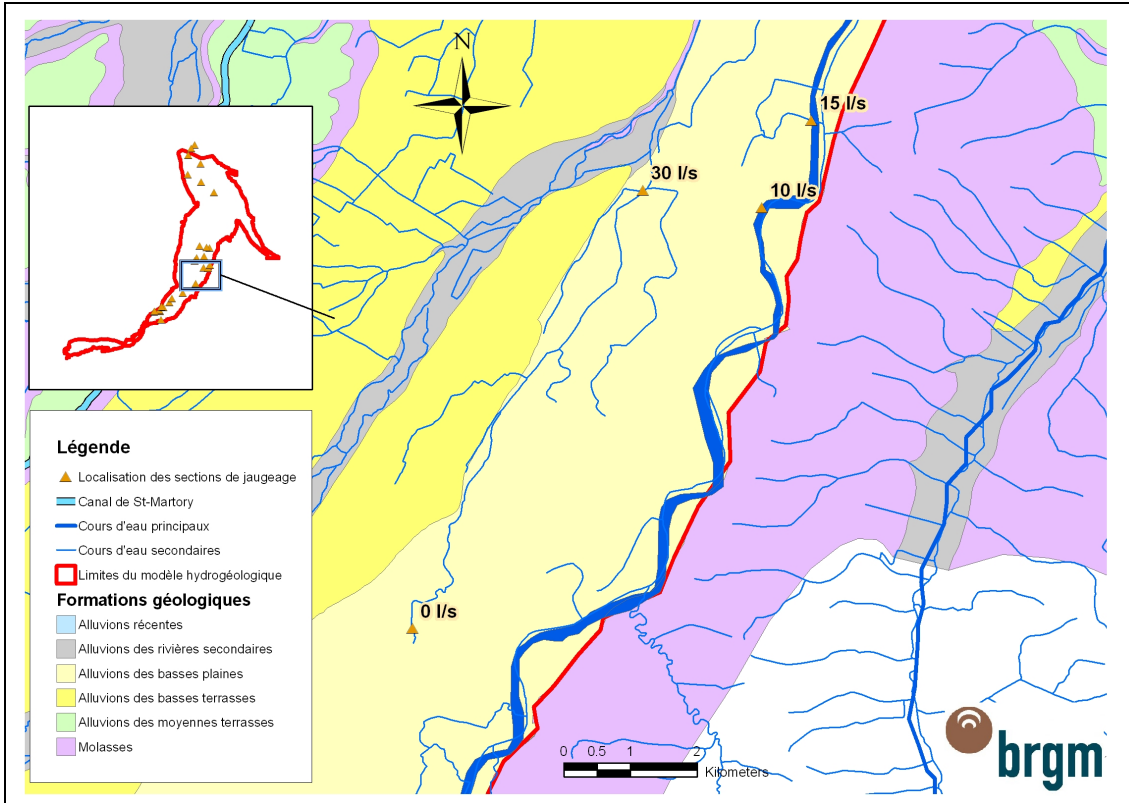


Illustration 17 – Drainage de la nappe de la basse terrasse et de la basse plaine par les cours d'eau

De nombreux cours d'eau naissent à la limite basse terrasse / basse plaine (cf. illustration 17). Ces cours d'eau sont générés au niveau du talus qui sépare les deux terrasses. De nombreux suintements diffus ont pu y être observés. Certains de ces cours d'eau ont été jaugés. Les débits mesurés ont été comparés aux longueurs de talus séparant les basses terrasses de la basse plaine.

Cette approche indiquerait que les sorties diffuses en bordure des basses terrasses s'élèvent à environ 5l/s/km de talus. Le talus marquant la limite basse terrasse / basse plaine s'étend sur environ 60 km sur la plaine. Les sorties matérialisées à ce niveau pourraient ainsi atteindre 300 l/s sur l'ensemble de la plaine.

Ces valeurs sont fournies uniquement à titre indicatif dans le but de guider le calage du modèle. Les débits sont en effet représentatifs de la période de hautes eaux, et de fait probablement surestimés. De plus, le contexte géologique marquant la transition basse terrasse / basse plaine est variable (emboîtement des deux terrasses plus ou moins marqué, affleurement basal de molasse aux limites, etc.).

Une partie du ruissellement généré en base de talus peut également être réinfiltrée. Ce phénomène n'a toutefois pas pu être mis en évidence au cours de la campagne de jaugeages.

Des suintements diffus ont été observés au niveau du talus bordant la Garonne. Ces sorties n'ont pu être évaluées à l'échelle de la plaine. Leur importance pourrait en effet dépendre de la perméabilité des alluvions de la basse plaine en bordure de Garonne et de l'encaissement de la Garonne dans les alluvions (variable le long de la plaine).

4. Modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale de la Garonne

4.1. PRESENTATION DES DIFFERENTES ETAPES DE CONSTRUCTION DU MODELE

4.1.1. Rappels sur la géométrie du modèle

Le modèle intègre la géométrie de l'aquifère alluvial définie en année 1 (cf. Rapport BRGM/RP-55877-FR).

L'extension du modèle provient de la prise en compte des alluvions récentes de la Garonne, des formations fluviatiles quaternaires de la basse plaine, de celles de la basse terrasse et de la moyenne terrasse. Il est limité latéralement par les coteaux molassiques.

Ce réservoir est délimité verticalement par le substratum des alluvions et par la surface topographique. La surface piézométrique évolue entre ces deux limites (il y a dénoyage si le substratum est atteint, débordement si elle dépasse la surface du sol).

Initialement défini comme un modèle monocouche, celui-ci a été finalement construit en considérant deux couches. La première couche correspond à la présence de colluvions recouvrant les bourrelets molassique entre terrasses. Cette couche est discontinue et présente essentiellement dans le nord de la zone d'étude. La seconde correspond à l'aquifère alluvial continu, et constitue à proprement parler l'objet de la modélisation. Un test a été effectué en créant une couche pour le substratum molassique. La présence de celle-ci n'améliorant pas le calage, elle n'a pas été conservée.

Le domaine modélisé est inscrit dans une grille à mailles carrées de 250 m de côté, en cohérence avec les autres modèles de gestion des aquifères alluviaux de Midi-Pyrénées actuellement achevés. Cette discrétisation en une grille régulière permet la résolution des équations d'écoulement par la méthode des différences finies.

Le modèle est supporté par le logiciel MARTHE (Modélisation d'Aquifères par Maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le Calcul Hydrodynamique des Ecoulements) développé par le BRGM.

Les données introduites dans le modèle sont structurées en couches d'information et ré-échantillonnées avec le pas d'espace approprié à celui-ci, il s'agit notamment :

- du toit du réservoir alluvial correspondant à la surface topographique dont les cotes sont issues du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de l'IGN à la maille de 50 mètres (cf. Illustration 18). Ces valeurs ont été moyennées au pas de 250 mètres pour correspondre à la taille des mailles du modèle, puis validées lors de la modélisation géologique sous GDM (Geological Database Management).

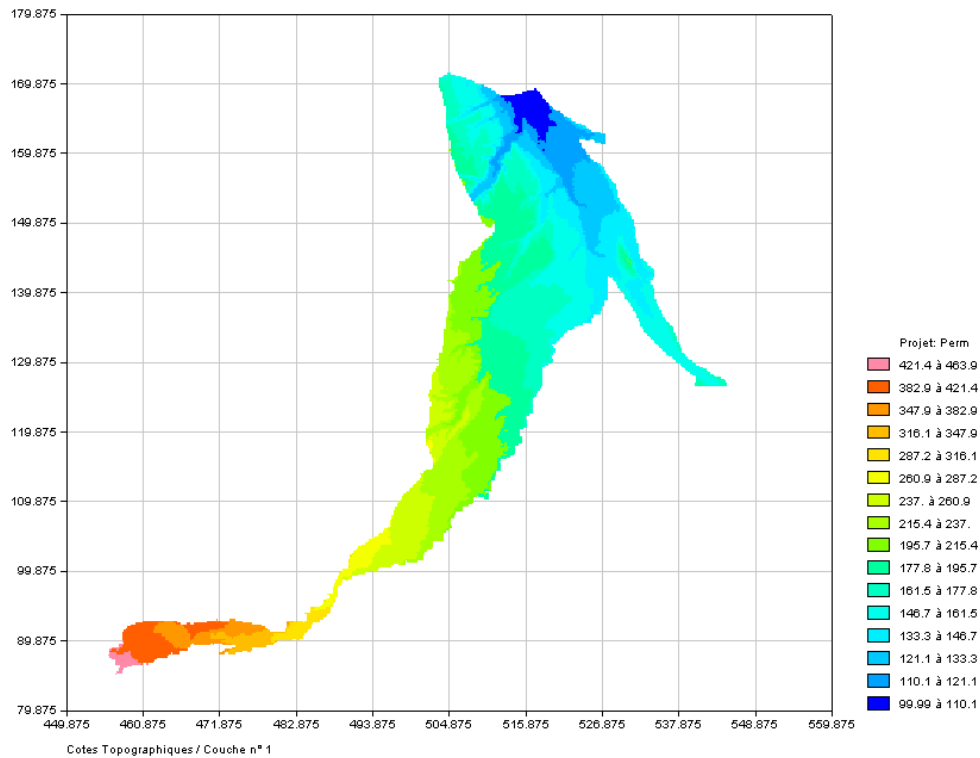


Illustration 18 – Représentation de la cote topographique issue du MNT au pas de 250 mètres intégrée dans MARTHE

- du toit du substratum imperméable de l'aquifère dont les valeurs proviennent du modèle géologique construit avec un pas de 250 mètres (cf. Illustration 12),

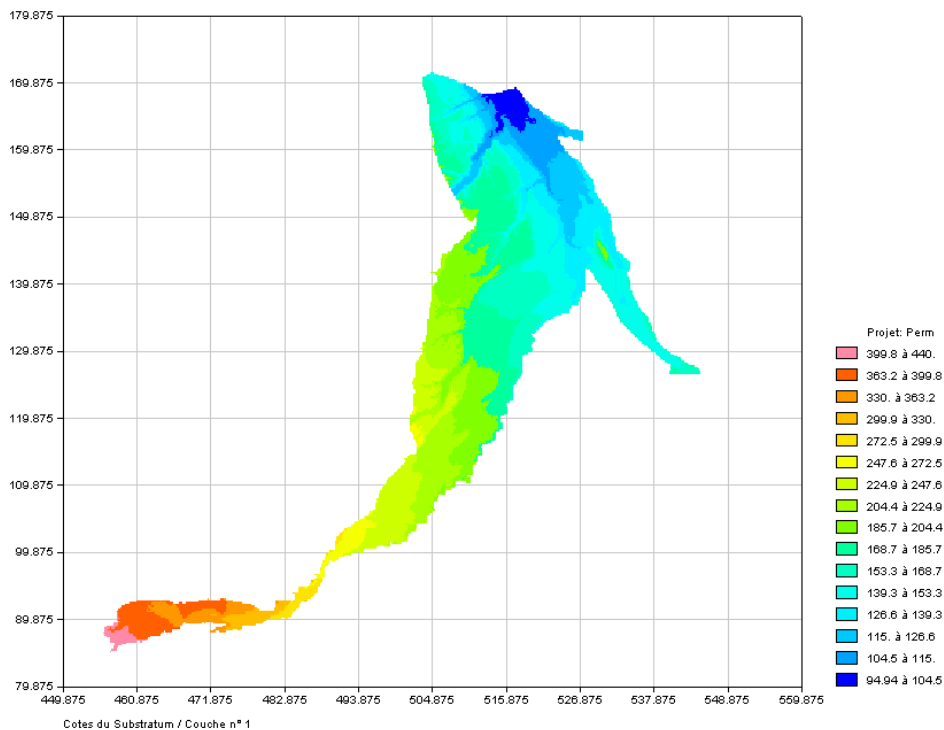


Illustration 19 – Représentation de la cote du toit du substratum du réservoir alluvial intégrée dans MARTHE

- des charges initiales, identifiées comme étant les niveaux piézométriques moyens calculés à partir des mesures faites en période de hautes eaux (juillet 2007) et de basses eaux (octobre 2006), puis interpolés avec un pas d'espace identique à celui du modèle (cf. Illustration20),

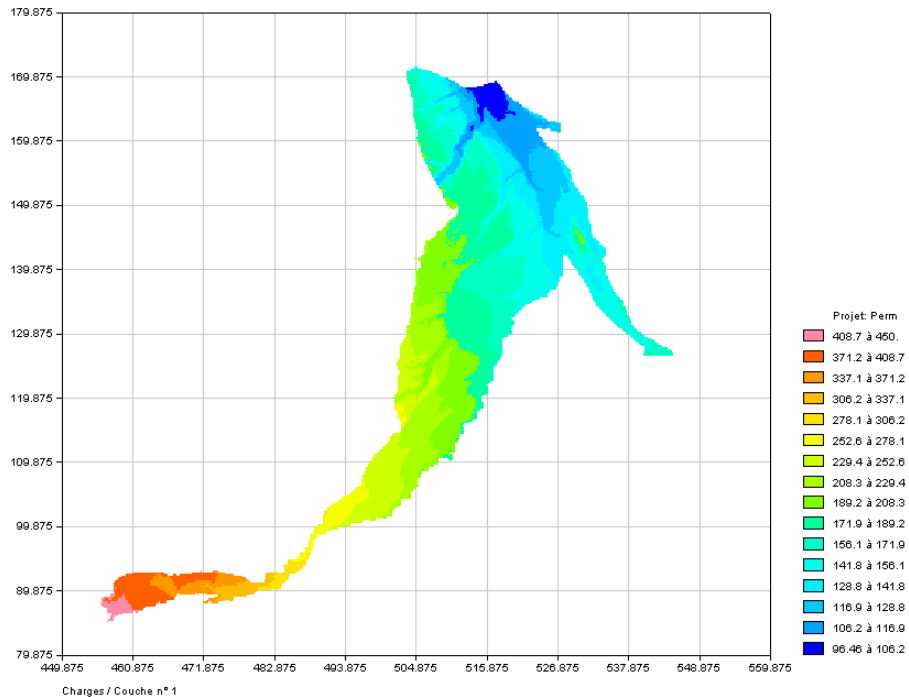


Illustration 20 – Représentation des charges initiales intégrées dans MARTHE

- de la recharge de la nappe, cette notion est appréhendée par le découpage du secteur d'étude en différentes zones où les valeurs d'infiltration peuvent être variables (en fonction de la gradation des précipitations et des différences de perméabilité des terrains étudiés). Les valeurs de recharge sont calculées grâce à un couplage avec le logiciel de modélisation globale GARDENIA® (BRGM),
- des prélèvements à la nappe, exprimés en m³/h, ces données sont issues de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et de la Direction Départementale de l'Équipement et de l'Agriculture (DDEA) de Haute-Garonne,
- des conditions imposées dans le modèle, localisées en bordure de plaine alluviale, au contact avec les formations encaissantes. Dans les zones où les alluvions sont en contact avec les formations molassiques, un léger flux hypodermique a été imposé en provenance des molasses. En effet, bien que la molasse soit globalement considérée comme imperméable, des observations montrent qu'il existe cependant des écoulements localisés. Dans le sud de la zone d'étude, les alluvions sont en contact avec des formations calcaires, des éboulis et formations glaciaires d'où émergent des sources. Ces entrées dans la nappe alluviale sont modélisées par des flux imposés,

- de la perméabilité de l'aquifère, différentes zones ont été découpées en fonction des valeurs affectées provenant d'une part, des résultats des pompages d'essais (valeur de transmissivité) et d'autre part, des données concernant la géologie de la plaine et des épaisseurs de la partie saturée de l'aquifère dans les différents secteurs. Le calage du modèle a induit de revoir la délimitation de ces zones et les valeurs affectées. Le découpage final est présenté dans l'illustration 23 du paragraphe 4.4.1. sur le calage en régime transitoire.

4.1.2. Intégration du réseau hydrographique dans le modèle

L'intégration d'un réseau hydrographique dans un modèle hydrodynamique en régime transitoire permet de caler le modèle à la fois sur les charges piézométriques calculées et sur le débit des cours d'eau. Le niveau des cours d'eau varie dans le temps et les relations entre nappe et rivières ne sont plus contraintes comme avec un modèle à potentiel imposé.

La construction d'un réseau hydrographique dynamique implique de générer de multiples semis permettant de décrire le fonctionnement et la morphologie des cours d'eau.

Les différentes étapes de construction sont explicitées dans le rapport BRGM référencé sous le numéro BRGM/RP-55877-FR.

4.2. PIEZOMETRIE DE REFERENCE

La piézométrie de référence prise en compte pour le calage du modèle correspond aux niveaux piézométriques moyens calculés à partir des mesures réalisées en période de hautes eaux (juillet 2007) et de basses eaux (octobre 2006).

Ces deux campagnes ont respectivement concerné 243 et 284 ouvrages répartis de façon homogène sur l'ensemble de la zone modélisée. Ces points de mesures n'ayant pas fait l'objet de nivellement, les cotes NGF du niveau de la nappe sont déduites des cotes topographiques issues du modèle numériques de terrain (MNT) de l'IGN au pas de 50 mètres. La précision des mesures est donc directement dépendante de la précision du MNT.

Les valeurs piézométriques moyennes ont été interpolées au pas de 250 m afin de pouvoir être intégrées dans le maillage du modèle et de permettre ainsi d'initialiser les calculs.

Un suivi en continu des niveaux piézométriques a été engagé de juillet 2007 à janvier 2010 sur 16 points de contrôle sélectionnés dans la plaine alluviale en complément des 8 ouvrages appartenant au réseau quantitatif de gestion patrimoniale de Midi-Pyrénées situés sur la zone étudiée (données enregistrées en continu depuis 1996).

Ces chroniques piézométriques permettent d'ajuster le calage du modèle mathématique en régime transitoire. Ces informations servent de référence, les écarts observés entre ces données de terrain et les charges calculées par le modèle permettent d'évaluer l'optimisation du calage.

4.3. PRELEVEMENTS ET RECHARGE

4.3.1. Prélèvements d'eau

La mise en relation de différentes sources de données (Agence de l'Eau Adour-Garonne, DDEA de Haute-Garonne) en année 2 du projet a permis d'estimer le nombre d'ouvrages et les prélèvements annuels par usage dans la nappe alluviale de la Garonne. L'illustration 21 précise la localisation de ces ouvrages et les volumes annuels associés. Le tableau de l'annexe 4 récapitule ces données.

En 2007, 255 points de captages en exploitation sont recensés sur la zone modélisée dont 193 utilisés pour l'irrigation (76 %), 46 pour un usage industriel (18 %) et 16 destinés à l'alimentation en eau potable (6 %).

En termes de volume, tout usage confondu, une estimation d'environ 20 millions de m³ d'eau prélevés dans la nappe alluviale en 2007 a été établie à partir des données précédemment nommées, dont 34 % dédiés à un usage agricole, 43 % à l'industrie et 23 % pour l'AEP.

La part de prélèvements industriels est très importante en 2007, par rapport aux plaines alluviales des départements voisins. Il est important de préciser que les volumes prélevés les plus importants sont dus aux exploitations de granulats, nombreuses entre Toulouse et Martres-Tolosane. Toutefois, depuis 2007, la réglementation impose le fonctionnement de ces unités en circuit fermé, ce qui a considérablement réduit les prélèvements d'eau souterraine. Malheureusement, les données de prélèvements des années 2008 et 2009 ne sont pas encore disponibles, mais il faut prévoir un prélèvement actuel pour ces usages de l'ordre de 10 à 20 % seulement des prélèvements 2007.

Les données de prélèvements utilisées dans le modèle en régime transitoire sont celles des années 2000 à 2007 inclus. Pour l'année 2008 simulée, les données de prélèvements 2007 ont été appliquées, sauf pour les prélèvements industriels où seuls 20 % des prélèvements 2007 ont été pris en compte.

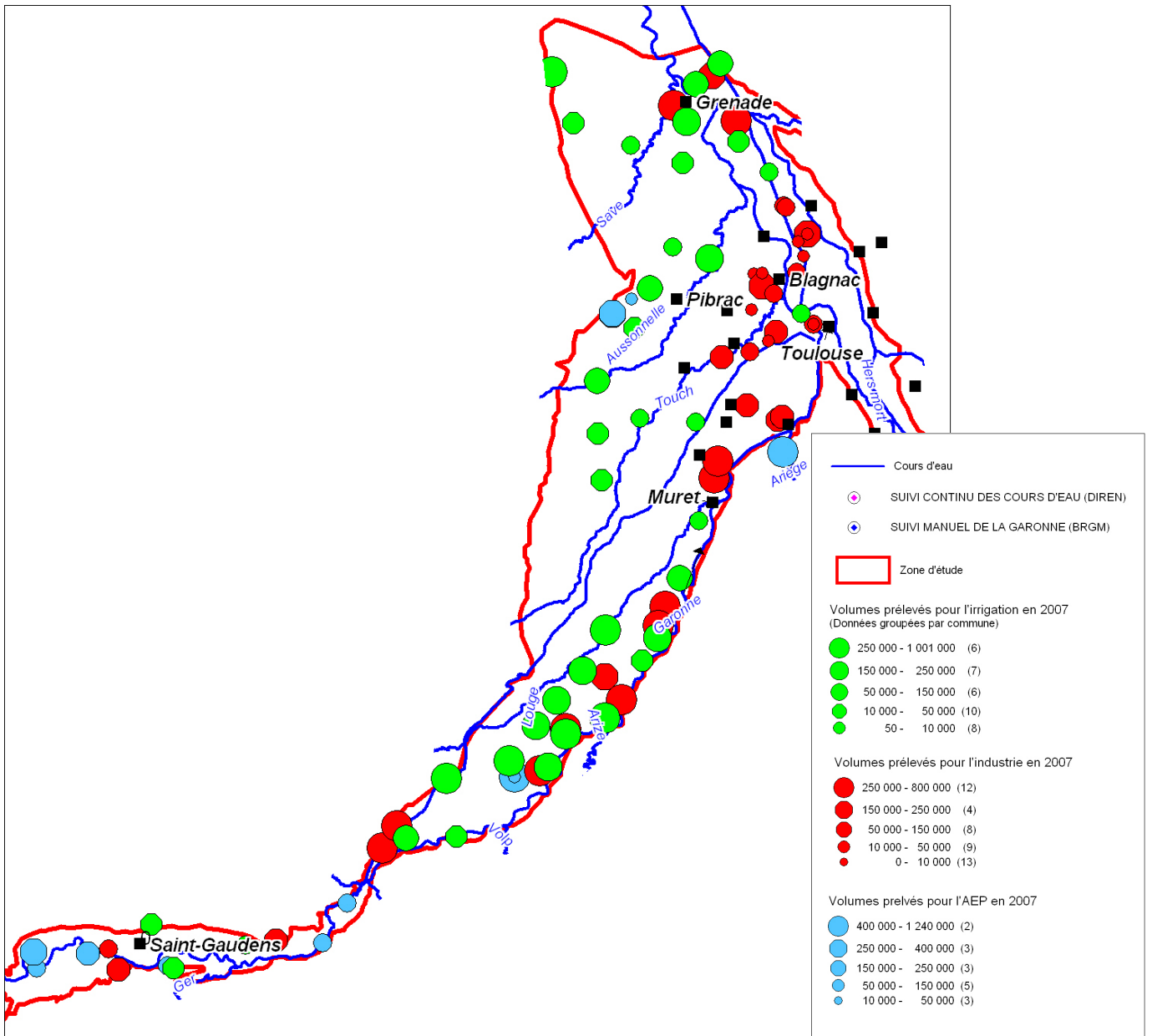


Illustration 21 – Répartition des volumes prélevés en 2007 par usage sur la zone modélisée

Pour le calage du modèle en régime permanent, ces prélèvements ont été retranscrits en m³/h en considérant une exploitation continue durant toute l'année.

Pour les besoins de la modélisation en régime transitoire réalisée au pas de temps décadaire sur la période comprise entre janvier 2000 et décembre 2008, les postulats suivants ont été appliqués :

- les captages à usage industriel et AEP ont été considérés en exploitation continue au cours de l'année, bien qu'une légère influence saisonnière puisse avoir lieu.

- les prélèvements agricoles pour chaque année modélisée ont été répartis sur 5 mois de la façon suivante :
 - 10% du volume total annuel prélevé au mois de mai,
 - 20% du volume total annuel prélevé au mois de juin,
 - 35% du volume total annuel prélevé au mois de juillet,
 - 25% du volume total annuel prélevé au mois d'août,
 - 10% du volume total annuel prélevé au mois de septembre.

4.3.2. Recharge de la nappe

Treize zones de recharge ont été différenciées dans le modèle en fonction d'une part, du gradient des précipitations observé entre les 4 stations météorologiques présentes sur le secteur d'étude et d'autre part, de la distinction probable des potentiels d'infiltration au sein des deux terrasses existantes (alluvions des basses terrasses et de la basse plaine). L'illustration 22 indique la répartition de ces zones de recharge dans la zone modélisée.

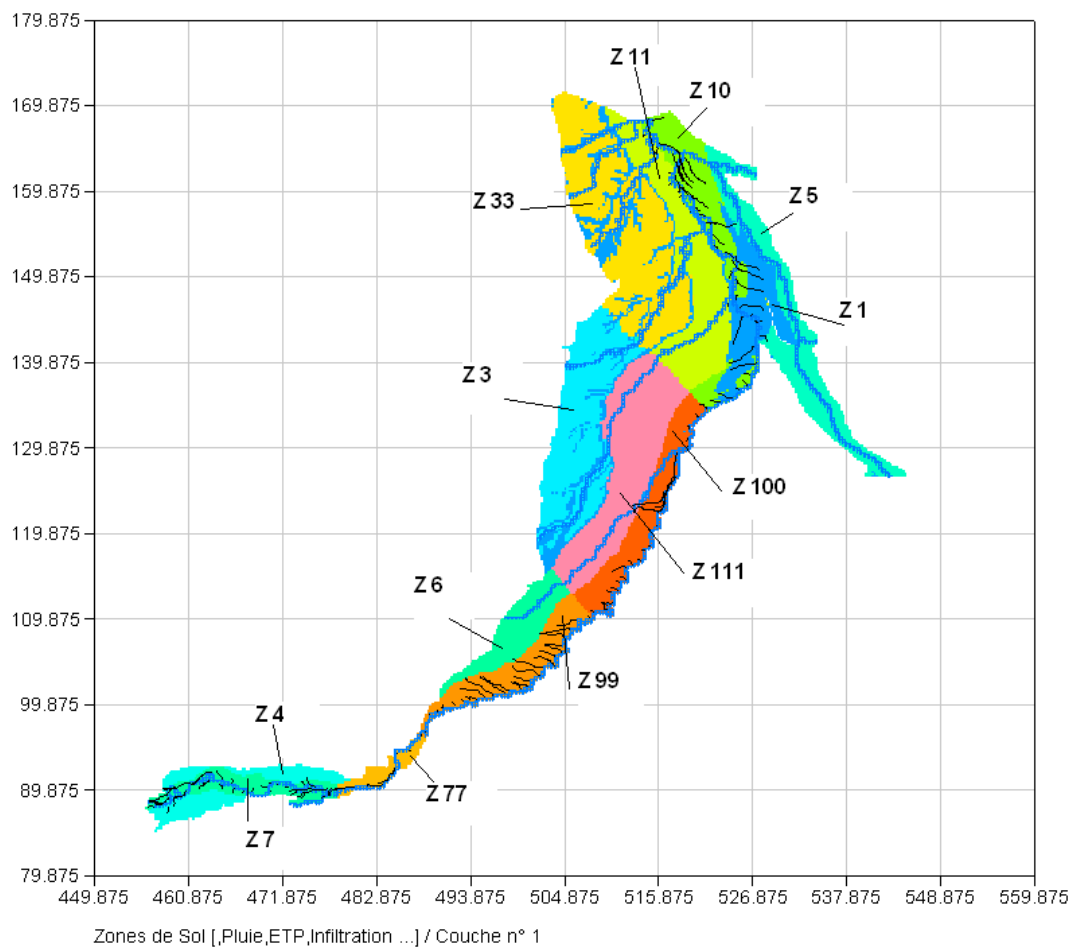


Illustration 22 – Localisation des différentes zones de recharge intégrées au modèle

L'évaluation de la pluie efficace a été réalisée en utilisant un schéma GARDENIA à partir des données de pluviométrie et d'évapotranspiration potentielle (ETP) enregistrées aux stations de Blagnac, de Palaminy, de Clarac et du Lherm gérées par Météo-France.

Un couplage existe entre le logiciel MARTHE et GARDENIA et permet de modéliser la recharge effective à la nappe à partir des données de pluie et d'ETP. Pour cela, GARDENIA propose un ajustement des paramètres de calage tels que la RFU, le temps de demi-montée et le temps de demi-tarissement, ensuite injectés dans MARTHE pour le calcul de la recharge.

4.4. CALAGE ET RESULTATS DU MODELE HYDRODYNAMIQUE EN REGIME TRANSITOIRE

Le calage du modèle a nécessité de travailler sur les différents champs de valeurs suivants :

- perméabilité de l'aquifère alluvial,
- valeurs de recharge par zone,
- perméabilité et épaisseur de colmatage des berges des cours d'eau.

La modélisation en régime transitoire a été réalisée au pas de temps décadaire sur la période comprise entre janvier 2000 et décembre 2009, correspondant à 360 pas de temps. L'année 2009 ayant été utilisée pour déterminer les volumes prélevables en fonction des scénarios climatiques, le travail de calage réel a été réalisé sur la période 2000-2008. Le temps de calcul moyen pour une simulation est de 6 heures environ, ce qui a considérablement compliqué et alourdi le travail de calage. Un système de calage en multipostes a du être mis en place.

L'objectif de cette seconde étape de calage est d'ajuster les charges calculées par le modèle aux chroniques piézométriques observées sur les 24 ouvrages de référence présents dans la zone étudiée. Un nouveau paramètre est intégré au calage, il s'agit de l'emménagement de l'aquifère (S), correspondant dans le cas présent (cas d'une nappe libre) à la porosité efficace.

Afin d'optimiser le calage sur les chroniques observées, un travail préalable de traitement des données piézométriques et hydrométriques a été réalisé sur TEMPO. L'ajustement des signaux sur des réponses impulsionnelles a permis de reconstituer les chroniques lorsque celles-ci présentaient des lacunes, dues essentiellement à des pannes du matériel de mesure. Ce travail de reconstitution du signal est présenté en annexe 5.

Un outil a été développé sous EXCEL, à l'aide de Macro-commandes afin de faciliter le travail de calage en régime permanent. Les résultats de charges calculées en nappe et

en rivière y sont injectés et des outils statistiques et graphiques permettent d'évaluer rapidement la validité d'un calage. Cet outil était particulièrement utile dans la mesure où le nombre de points de calage était très important : 24 points en nappe et 16 points en rivière. Son principe de fonctionnement est présenté en annexe 6.

4.4.1. Paramètres restitués à l'issue du calage

Les différents paramètres régissant les écoulements souterrains ont été ajustés de manière simultanée. Il s'agit notamment de la recharge, de la perméabilité, de l'emmagasinement, de la perméabilité et de l'épaisseur de colmatage des berges des rivières.

Les variations spatiales des principaux paramètres hydrodynamiques restitués à l'issue du calage sont représentées sur l'illustration 15.

- Perméabilité de l'aquifère

A la suite du travail préliminaire effectué en régime permanent (cf Rapports BRGM RP-55877-FR et RP-56490-FR), les zones de perméabilité (ou conductivité hydraulique) homogène ont été affinées au cours du calage en régime transitoire. Ces zones ont été délimitées suivant deux critères : le premier tient compte des discontinuités de l'aquifère alluvial provoquée par le système des terrasses étagées, séparées par des talus molassiques, et le second est lié à la répartition des stations piézométriques de référence utilisées pour le calage du modèle. Ces zones sont présentées dans l'illustration 23.

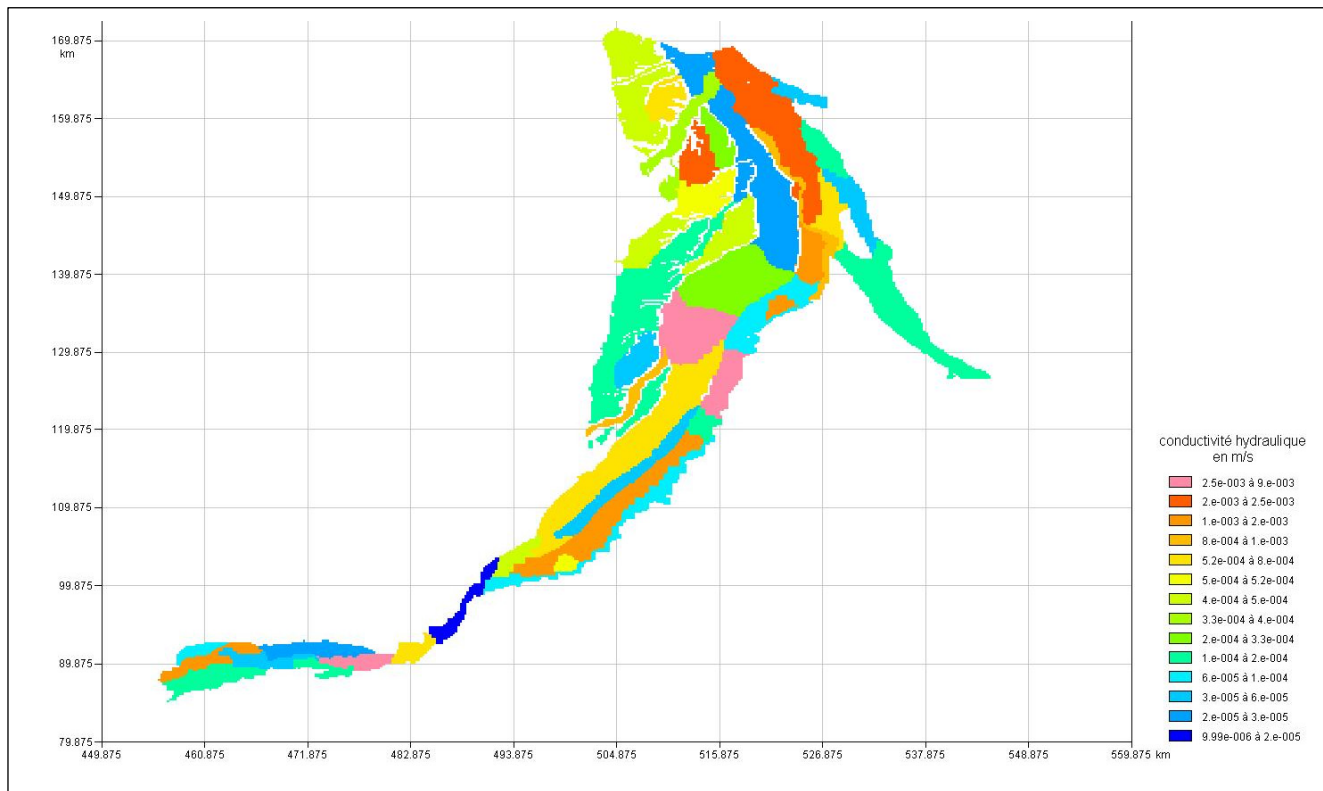


Illustration 23 – Zones de perméabilités homogènes définies dans le modèle

Sur le domaine aquifère les valeurs de conductivité hydrauliques varient de 10^{-5} à 9.10^{-3} m/s. La distribution des valeurs de perméabilité se concentre autour de l'intervalle $[10^{-3}-10^{-4}]$ m/s qui comprend 51% des mailles de l'aquifère modélisé. La majorité de ces mailles se concentre autour de la valeur 10^{-4} m/s.

D'un point de vue géographique, la carte des perméabilités montre une grande hétérogénéité au sein même des terrasses. Les basses terrasses possèdent globalement les perméabilités les plus élevées, de l'ordre de 10^{-3} m/s. De manière générale, plus les terrasses sont hautes en altitude, et donc plus âgées, plus la perméabilité est faible. L'altération du matériel et la présence d'argile jouent certainement un rôle important dans ce processus d'étagement des perméabilités.

- Coefficient d'emmagasinement

De la même manière que le paramètre des perméabilités, les zones de coefficients d'emmagasinement homogènes ont été définies suivant le type de terrasse et les stations piézométriques de référence pour le calage du modèle (cf. illustration 24). Au total, 18 zones ont été créées.

L'ajustement des zones d'emmagasinement a été complété par une vingtaine de valeurs expérimentales déterminées par essais de nappe par pompage sur la zone

d'étude. Les valeurs de calage obtenues varient de 0,1% à 25%. Cet ordre de grandeur est représentatif de la porosité efficace d'un aquifère alluvial contenant une nappe libre.

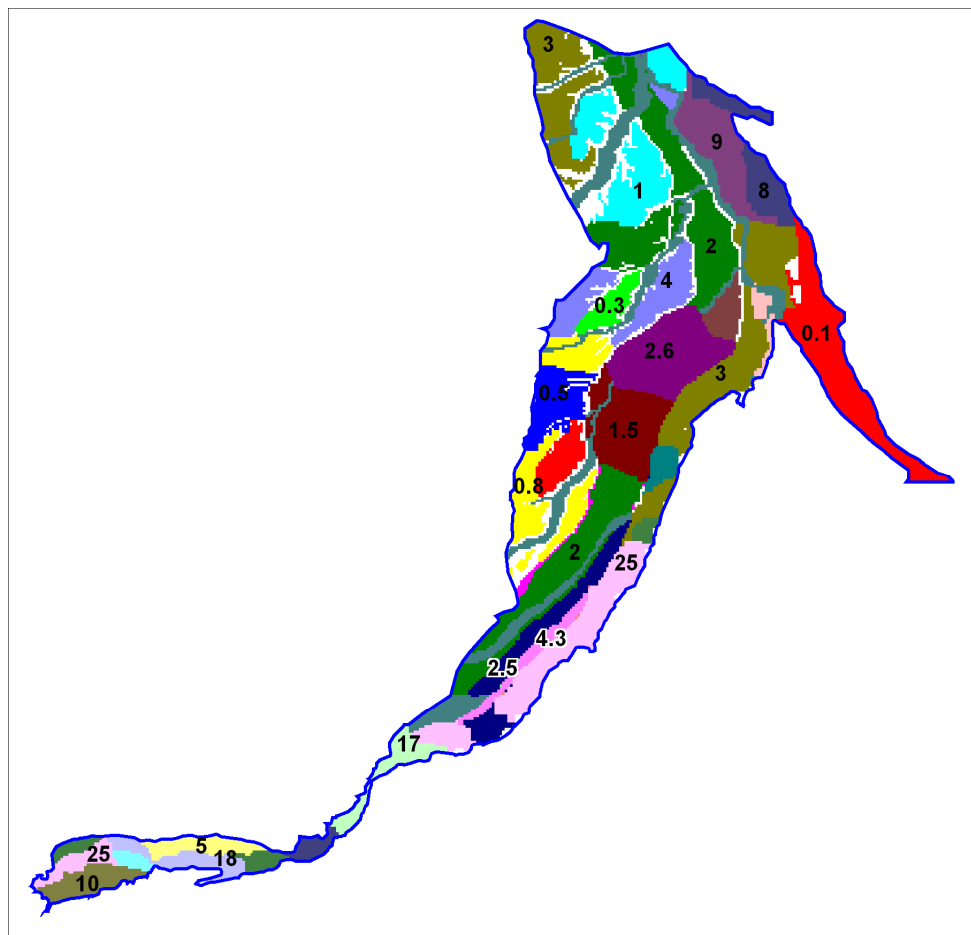


Illustration 24 – Répartition des zones de coefficient d'emménagement homogène dans le modèle (les valeurs indiquées dans les zones sont celles, en %, du coefficient d'emménagement appliqué pour chacune d'entre elles)

Deux choses sont à remarquer sur la répartition des valeurs d'emménagement :

- D'une part, la plaine est très morcelée, mais de manière générale, les zones se calent sur les limites de terrasses alluviales. La porosité efficace diminue en règle générale avec l'augmentation de l'âge des terrasses.
- D'autre part, le compartiment de la moyenne terrasse contient des zones de très faible emménagement (<1%). Au niveau de ce sous-réservoir, l'altération, parfois poussée, peut faire apparaître des lentilles d'argile plus ou moins profondes. Celles-ci peuvent conférer localement une porosité efficace très faible, parfois même inférieure à 1%, avec mise en charge partielle de la

nappe (phénomène décrit dans « les ressources aquifères de la plaine de la Garonne à l'ouest de Toulouse » BURGEAP 1964). Ces formations argileuses participent généralement au caractère faiblement exploitable de la moyenne terrasse dans le département de Haute-Garonne.

- Recharge et prélèvements de la nappe

En dehors des échanges nappe/rivière, la recharge de l'aquifère provient de deux principaux mécanismes :

- Les apports molassiques (et karstiques dans la zone sud) latéraux,
- Les apports hydroclimatiques dans la terrasse ou les terrasses sus-jacentes.

Les apports molassiques ont été estimés d'après une méthode de jaugeage différentiel des cours d'eau apparaissant à la base de la moyenne terrasse (campagne effectuée en octobre 2008 et juin 2009). Les apports karstiques dans le sud du modèle ont été déduits par analogie des débits karstiques calculés à partir de l'émergence de sources dans la région d'Arbas, située à une vingtaine de kilomètres.

Globalement ces apports sont évalués à environ 158000 m³ par an.

Cette part est importante pour le bilan hydrique aux limites du modèle. Elle reste cependant très inférieure aux apports hydroclimatiques qui constituent l'approvisionnement en eau principal de l'aquifère. Ceux-ci sont évalués en moyenne à 150 hm³ par an.

4.4.2. Résultats du calage sur les chroniques piézométriques

Le calage en régime transitoire a été effectué sur 24 stations de contrôle fournissant des chroniques piézométriques de terrain sur une période d'au moins 10 ans (2000-2009)

Les stations se distinguent selon deux réseaux de surveillance :

- le réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines (appartenant au Réseau de Contrôle de Surveillance) du BRGM. Ce réseau comprend 8 stations : Lamasquère, le Fauga, Saint Elix le château, Bordes de rivière, Lestelle, Toulouse, Ondes, La Tuilerie,
- et le réseau développé pour le projet et suivi en continu par le BRGM. Il comprend 16 stations : Escalquens, Aucamville, Aussonne, Cugnaux, Poucharamet, Bois de Pierre, Léguevin, Saint Lys, Larra, Valentine, Labarthe, Roques, Cazères, Pibrac, Menville, et le point de Labarthe-Inard, qui n'a pas pu être exploité pour le calage.

Le calage en régime transitoire a été effectué en deux étapes :

- comparaison des charges calculées et observées moyennes entre les hautes eaux et les basses eaux, sur 200 points de mesure du niveau de la nappe. Pour cela, il est demandé au modèle d'éditer les charges calculées sur ces 200 points communs aux deux campagnes piézométriques, pour les pas de temps correspondants aux dates 05/10/06, 15/10/06, 25/10/06 (basses eaux) et 05/07/07, 15/07/07, 25/07/07 (hautes eaux). Une moyenne est effectuée entre ces valeurs. Elles sont ensuite comparées à la moyenne des valeurs mesurées en octobre 2006 et juillet 2007 sur les 200 points communs aux campagnes piézométriques. Ces points sont placés dans un diagramme de dispersion, et la pente de la droite de régression linéaire de ces points permet de valider la cohérence des résultats. Ce graphique, présenté dans l'illustration 25 ci-dessous permet également de visualiser les écarts entre les valeurs observées et calculées.

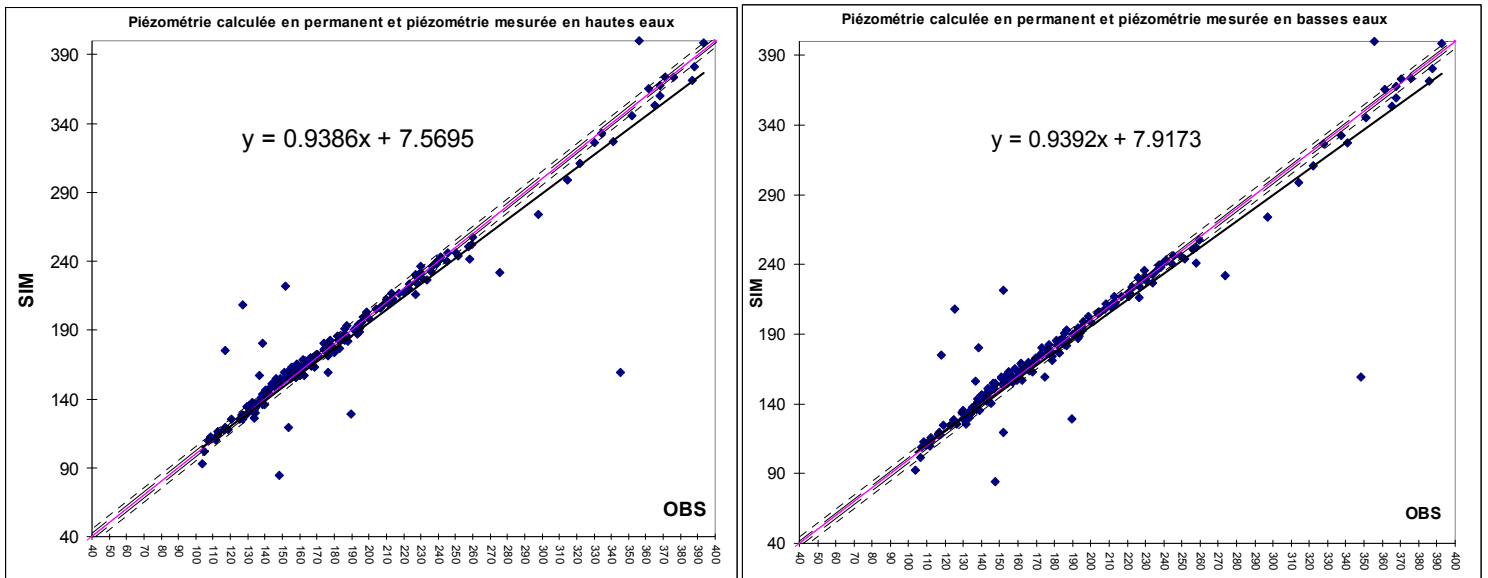


Illustration 25 – Diagramme de dispersion entre les charges calculées et observées des basses eaux 2006 et hautes eaux 2007

- Comparaison des charges calculées et observées pour chaque pas de temps du modèle sur les 24 points de suivi du niveau de la nappe.

La comparaison des chroniques observées et des chroniques simulées sur le modèle se fait de manière graphique en appréciant la restitution de la phase, de l'amplitude et de la pente des courbes. Cette analyse visuelle est complétée par deux indices statistiques de validation : l'indice de Nash et le coefficient de corrélation.

Le coefficient de Nash (NTD) est défini en hydrologie par la relation suivante :

$$NTD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (q_{oi} - \bar{q}_o)^2}$$

où q_{ci} et q_{oi} sont les débits calculés et observés du jour i ; \bar{q}_o est la moyenne de q_{oi} sur les n jours servant au calcul du coefficient.

Dans une étude effectuée, pour le compte de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 1986), sur l'intercomparaison des modèles hydrologiques, le coefficient de Nash a été utilisé comme critère pour quantifier la précision des simulations. Le coefficient de Nash représente le rapport de la variance résiduelle à la variance des débits observés (Nash & Sutcliffe, 1970). Quand l'écart entre les débits calculés et les débits observés diminue, la valeur du coefficient de Nash augmente et tend vers 1.

Le coefficient de Nash peut également s'appliquer pour des charges hydrauliques d'un système aquifère.

Le coefficient de corrélation (R), permet, en probabilités et en statistique, d'étudier la corrélation entre deux ou plusieurs variables aléatoires ou statistiques numériques, c'est-à-dire d'étudier l'intensité de la liaison qui peut exister entre ces variables. La liaison recherchée est une relation affine. Dans le cas de deux variables numériques, il s'agit de la régression linéaire.

Une mesure de cette corrélation est obtenue par le calcul du coefficient de corrélation linéaire. Ce coefficient est égal au rapport de leur covariance et du produit non nul de leurs écarts types. Le coefficient de corrélation est compris entre -1 et 1.

Le coefficient de corrélation (R) est défini par la relation suivante :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - \bar{q}_c)(q_{oi} - \bar{q}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - \bar{q}_c)^2 \sum_{i=1}^n (q_{oi} - \bar{q}_o)^2}}$$

Où \bar{q}_c est la moyenne de q_{ci} sur n jours.

Il est égal à 1 dans le cas où l'une des variables est fonction affine croissante de l'autre variable, à -1 dans le cas où la fonction affine est décroissante. Les valeurs intermédiaires renseignent sur le degré de dépendance linéaire entre les deux variables. Plus le coefficient est proche des valeurs extrêmes -1 et 1, plus la corrélation entre les variables est forte ; on emploie simplement l'expression « fortement corrélées » pour qualifier les deux variables. Une corrélation égale à 0 signifie que les variables sont linéairement indépendantes.

Source (*Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 43(5) October 1998 741 *Modélisation des écoulements de l'oued Miliane par le modèle CEQUEAU*, M. AYADI et Z. BARGAOUI)et *Wikipedia.org*

L'utilisation de ces deux indices de calage a nécessité de restructurer les données de mesures à un pas de temps décadaire en phase avec les date du modèle. Les valeurs mesurées correspondantes aux dates des pas du modèle ont été conservées telles quelles.

Ce travail de calage en mode graphique et statistique à été optimisé avec le développement d'un outil EXCEL avec macroscommandes, permettant d'importer directement les données du modèle et de générer les résultats sous forme de graphique et de tableurs. Cet outil est brièvement décrit en annexe 6.

Un exemple de calage graphique de la station piézométrique de Lamasquère est présenté dans l'illustration 26 ci-dessous.

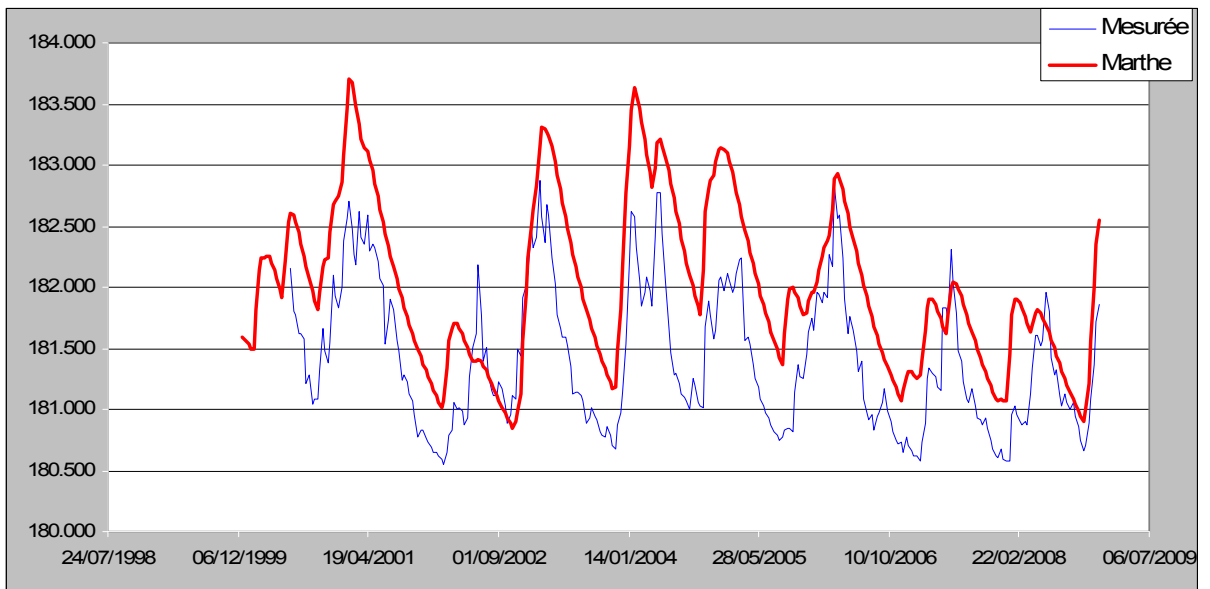


Illustration 26 – Calage des charges piézométrique calculées et observées en régime transitoire sur le piézomètre de Lamasquère

L'illustration 27 ci-après montre le diagramme de dispersion et les valeurs des paramètres statistiques obtenus au point de Lamasquère.

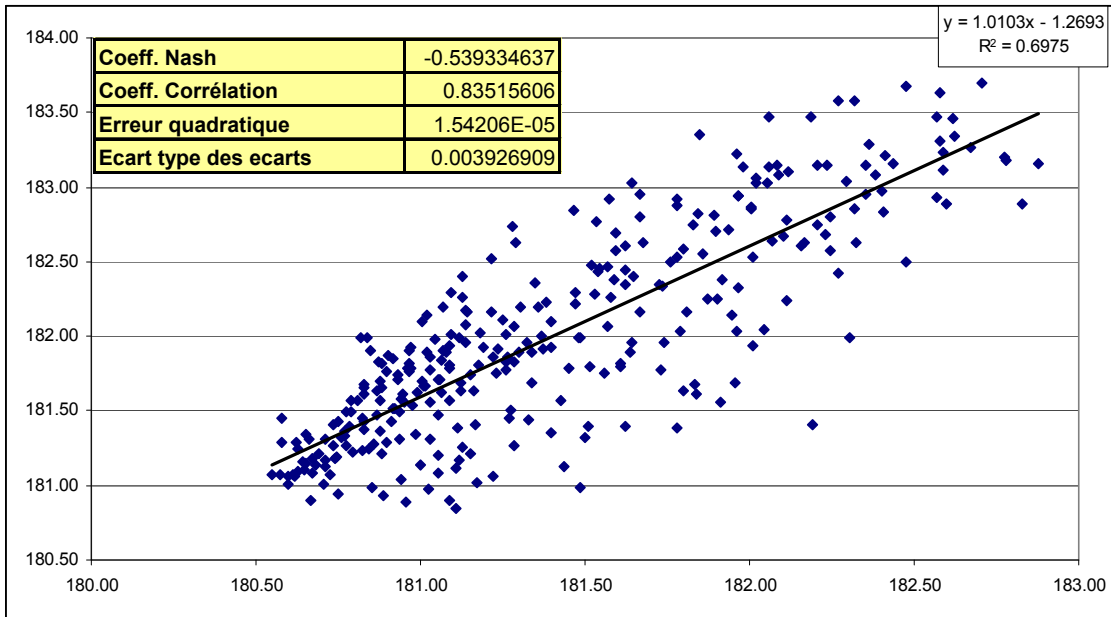


Illustration 27 – Diagramme de dispersion et calcul des paramètres statistiques à la station de Lamasquère

L'ensemble des graphiques de calage réalisés sur les 23 autres piézomètres est disponible en annexe 7.

Les graphiques de l'annexe 7 montrent que le calage est satisfaisant pour les piézomètres situés sur la partie centrale de la zone d'étude (Lamasquère, Le Fauga, St Elix le Château) où l'écart avec les valeurs mesurées est inférieur à 50 cm et le phasage des signaux bien calés sur l'observé. Le coefficient de Nash se rapproche difficilement de 1 pour l'ensemble des points. Cela peut notamment s'expliquer par la différence d'altitude entre les valeurs observées et calculées. Des incertitudes sont en effet cumulées entre les valeurs de MNT utilisées dans le maillage du modèle et la cote des piézomètres établis d'après les cartes IGN à 1/25000.

Dans la partie sud de la zone d'étude, où les mécanismes de dépôts sont différents du reste de la plaine, le calage est un peu moins satisfaisant avec un léger déphasage entre l'observé et le calculé. Certains épisodes de recharge sont également mal restitués. Ce phénomène est sans doute dû à un fonctionnement hydrogéologique différent du reste de la plaine. Ce secteur est séparé du centre de la zone d'étude par un goulot d'étranglement des alluvions situé sur la commune de Martres Tolosane et un changement de direction des dépôts. Par ailleurs, sur les chroniques des stations d'Ondes et de la Tuilerie, le modèle surestime la piézométrie de 4 à 5 m par rapport à l'observé : ce phénomène s'explique également par un problème de nivellement des points et des valeurs de topographie injectées dans le modèle. Ce secteur aurait sans doute mérité d'être traité dans un modèle indépendant afin de restituer au mieux les chroniques observées.

Enfin, le calage semble bien meilleur sur des chroniques longues, d'une dizaine d'année, que sur les points suivis dans le cadre de l'étude. Deux années de mesures ne semblent pas suffisantes pour ajuster finement le calage.

La superposition de la carte piézométrique mesurée en basses eaux, en octobre 2006, avec la carte piézométrique calculée par le modèle au pas de temps correspondant au 05/10/2006 montre une bonne correspondance des charges hydrauliques, de la forme des courbes et des sens d'écoulement (cf. illustrations 28 et 29). Les résultats sont encore une fois bien meilleurs dans la partie centrale de la zone d'étude et moins satisfaisants dans la partie sud, pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment.

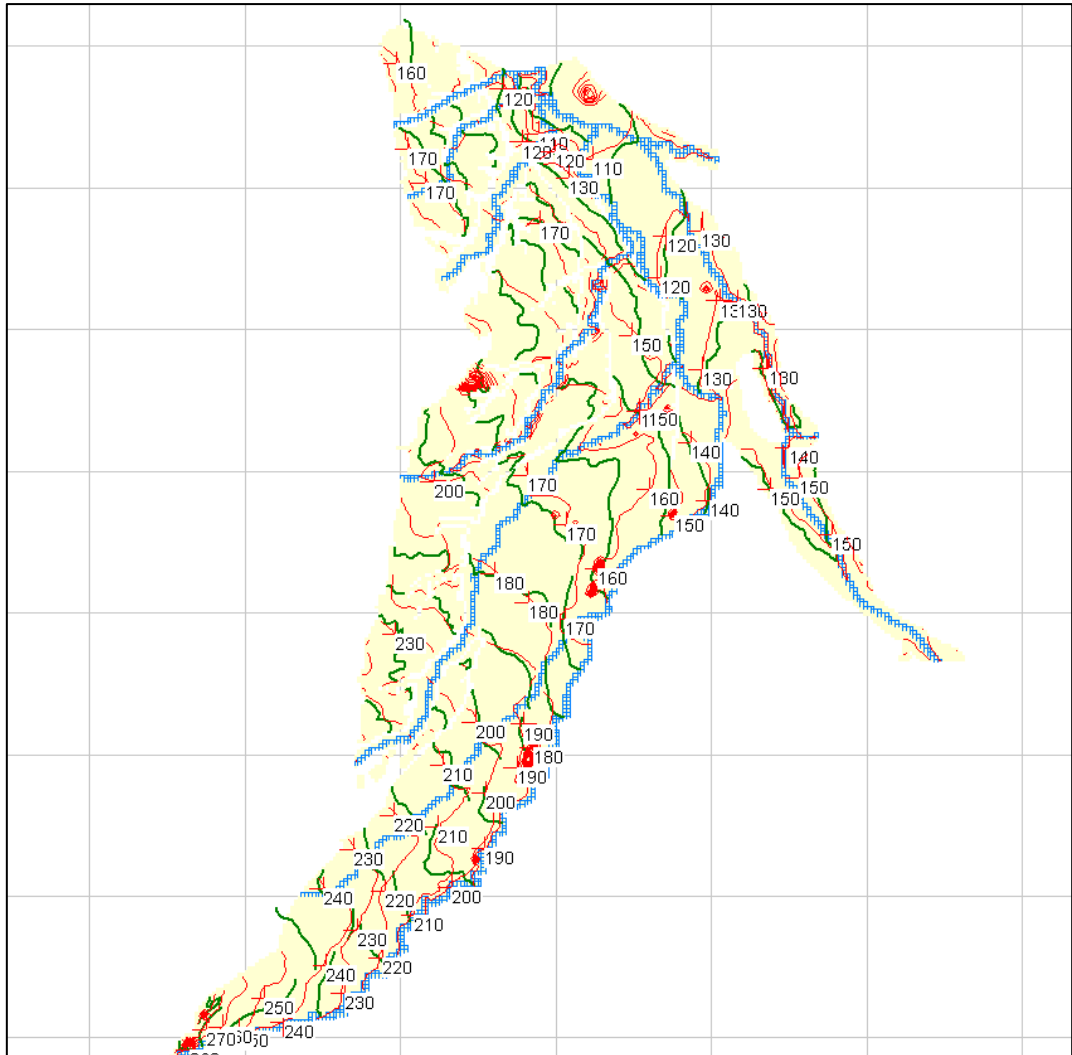


Illustration 28 – Comparaison des courbes piézométriques mesurées et calculées en octobre 2006 (basses eaux) dans la partie centrale et nord de la zone d'étude (isopièzes rouges : calculées, isopièzes vertes : observées)

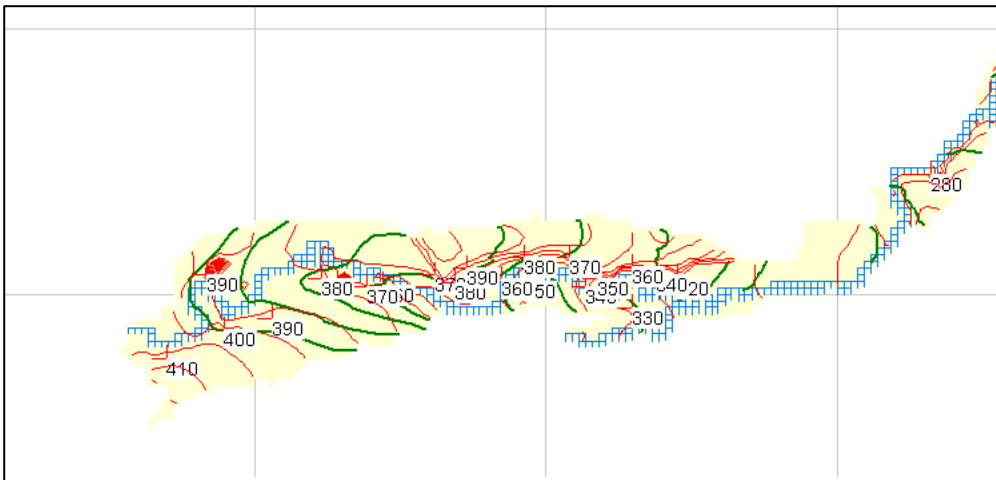


Illustration 29 - Comparaison des courbes piézométriques mesurées et calculées en octobre 2006 (basses eaux) dans la partie sud de la zone d'étude (isopièzes rouges : calculées, isopièzes vertes : observées)

Pour le dernier pas de temps du modèle, correspondant à la décennie se terminant le 31/12/2008, le modèle compte environ 1250 mailles dénoyées, c'est-à-dire désaturées en eau.

La carte de l'illustration 30 ci-dessous montre leur localisation (en rouge). Les dénoyages sont essentiellement localisés

- En bordure du modèle, au contact latéral des alluvions et des formations molassiques.
- Le long des affleurements de molasses bordant les alluvions des rivières secondaires. Ces deux types de configuration induisent en effet des épaisseurs d'alluvions moindres et des épaisseurs mouillées plus faibles. Par ailleurs, un modèle maillé à parfois du mal à gérer ce type de bordure en biseau.
- Dans la basse plaine, entre Muret et Boussens. Dans cette zone, les pressions des prélèvements AEP et industriels injectés dans le modèle sont très importants. Les entreprises d'extraction de granulats ont en effet exercés (au moins jusqu'en 2007) une pression importante sur la nappe alluviale. La répartition temporelle et spatiale de ces prélèvements étant mal connus, certaines mailles du modèle se retrouvent avec des débits horaires de pompage tellement importants que la recharge naturelle de la nappe ne suffit pas à maintenir la maille en eau. Ce phénomène peut ensuite se propager par diffusion numérique dans le modèle. Par ailleurs, il semble que dans ce secteur, des exploitants agricoles aient abandonnés leur puits d'irrigation suite à des dénoyages de pompe. La présence de mailles dénoyées peut donc également traduire une réalité de terrain.

De manière globale, la localisation des mailles dénoyées correspond à des phénomènes observés dans la plaine alluviale de la Garonne.

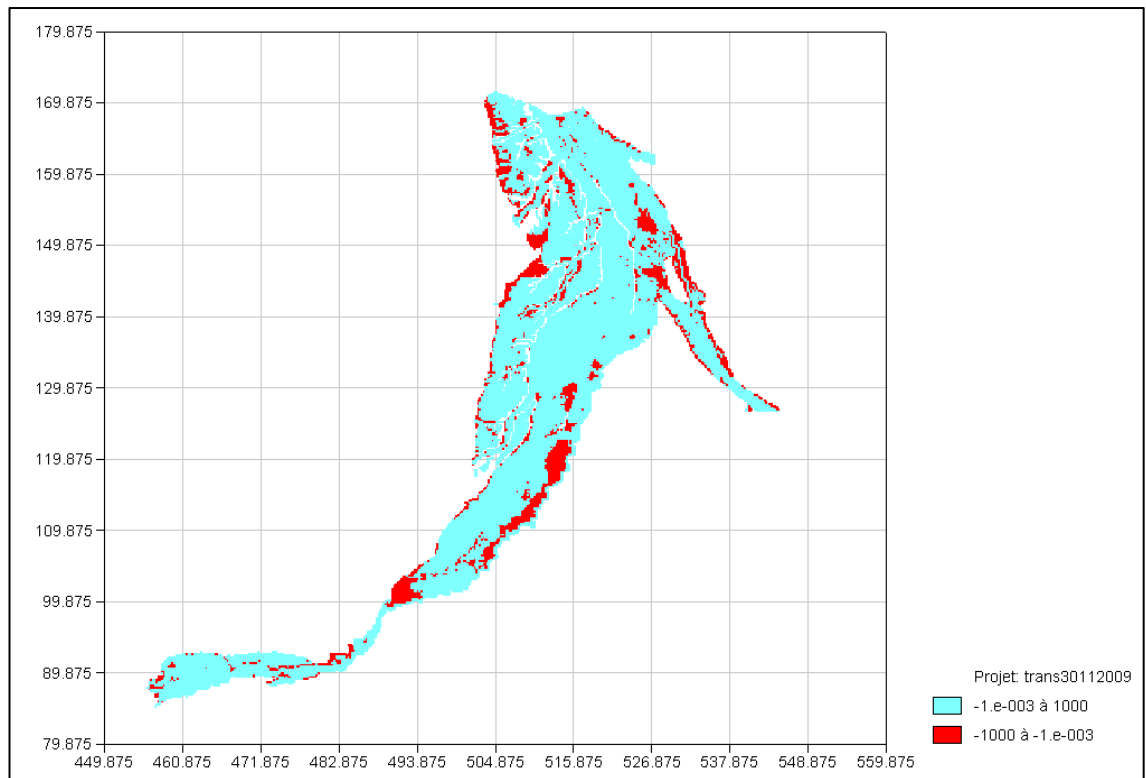


Illustration 30 – Localisation des mailles dénoyées du modèle au pas de temps 360 (31/12/08)

4.4.3. Calage des chroniques de débit rivière

La modélisation de la relation nappe/rivière passe par un travail de calage des débits simulés des cours d'eau sur leurs débits observés in situ. Le calage s'effectue en modifiant la perméabilité de colmatage du lit des rivières, qui va piloter les échanges entre la nappe et les cours d'eau. Les stations utilisées pour la modélisation de la relation nappe/rivière sont les 11 stations hydrométriques, réparties sur 8 cours d'eau de la DREAL, à savoir : La Garonne, La Save, Le Touch, Le Girou, L'Hers, L'Aussonnelle, La Louge.

Comme pour la piézométrie, une comparaison des chroniques simulées et observées a été appliquée pour le calage des débits en rivières.

L'illustration 31 donne l'exemple du calage sur la station hydrométrique du Mancieux.

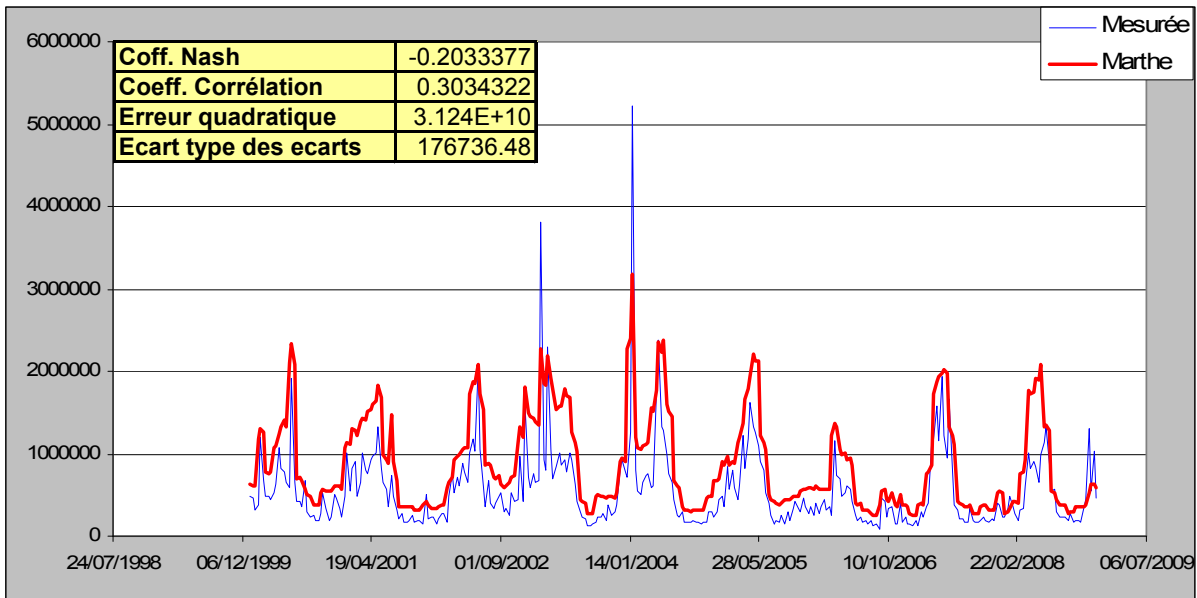


Illustration 31 – Calage des débits de cours d'eau sur la station du Mancieux

L'ensemble des 11 graphiques de calage sont présentés en annexe 8.

Présenter quelques indicateurs sur la fiabilité des calages, comme le Nash des débits simulés / observés

4.4.4. Bilan des flux annuels

Le bilan hydrologique du système alluvial est représenté par le bilan de flux de l'illustration 32.

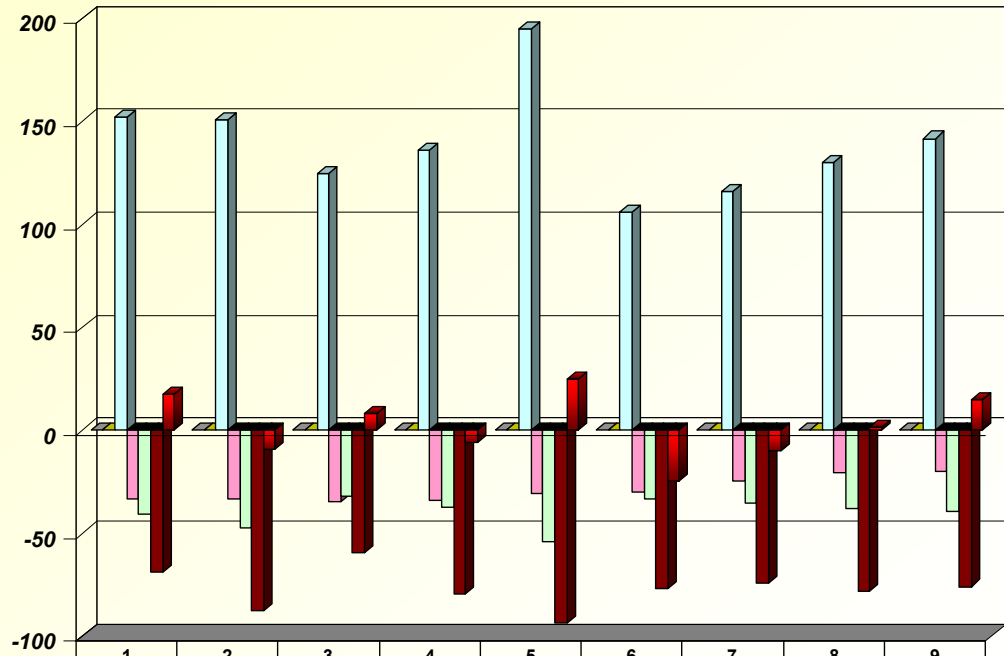
année	Apports molassiques et karstiques (hm ³)	Apports hydroclimatiques (hm ³)	Prélèvements (hm ³)	Débordements (hm ³)	Alimentation des rivières (hm ³)	Stockage (hm ³)
2000	0.2	152.0	-33.4	-40.4	-69.0	17.4
2001	0.2	150.9	-33.0	-47.6	-87.5	-8.9
2002	0.2	124.3	-34.8	-32.1	-59.2	8.2
2003	0.2	135.7	-34.3	-37.1	-79.4	-5.7
2004	0.2	195.0	-30.9	-54.3	-93.4	24.6
2005	0.2	106.1	-29.8	-33.3	-76.5	-24.7
2006	0.2	116.0	-24.5	-35.6	-74.3	-9.7
2007	0.2	129.9	-20.4	-38.1	-78.0	1.5
2008	0.2	141.7	-19.9	-39.3	-75.8	14.9
	ENTREES A LA NAPPE		SORTIES DE LA NAPPE			

Illustration 32 – Tableau de synthèse du bilan de flux hydrologique pour les 9 années de simulation en millions de m³.

Une autre représentation sous forme de graphique du bilan de flux est présentée dans l'illustration 33.

**Représentation du bilan volumique annuel de la nappe alluviale de la garonne
periode 2000-2008**

Volume (hm³)



année	1	2	3	4	5	6	7	8	9
apports molassiques et karstiques (m ³)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
apport hydroclimatique (m ³)	152.0	150.9	124.3	135.7	195.0	106.1	116.0	129.9	141.7
prélèvement (m ³)	-33.4	-33.0	-34.8	-34.3	-30.9	-29.8	-24.5	-20.4	-19.9
débordement (m ³)	-40.4	-47.6	-32.1	-37.1	-54.3	-33.3	-35.6	-38.1	-39.3
alimentation des rivières (m ³)	-69.0	-87.5	-59.2	-79.4	-93.4	-76.5	-74.3	-78.0	-75.8
stockage (m ³)	17.4	-8.9	8.2	-5.7	24.6	-24.7	-9.7	1.5	14.9

Illustration 33 – Graphique des bilans de flux hydrologique pour les 9 années de simulation

L'aquifère se caractérise par des entrées d'eau dans le système :

- les apports molassiques et karstiques aux limites extérieures et latérales du système,
- les infiltrations d'eau météoriques en surface

Les sorties sont, quant à elles, représentées par :

- les prélèvements anthropiques
- les débordements de nappe traduisant l'émergence de sources,
- le drainage des rivières qui recueillent une bonne partie des eaux souterraines

La balance annuelle entre les entrées et les sorties définit au final le stockage de la nappe. La pluviométrie semble influencer fortement le phénomène de stockage du réservoir phréatique à l'image de l'année 2004, où les fortes pluies ont induit un grand volume de stockage. A l'inverse, l'année 2005 à fort déficit pluviométrique a connu un fort déstockage de l'aquifère. Les deux dernières années de simulation montre un léger restockage de l'aquifère alluviale après deux années fortement déficitaires (2005-2006).

Le débordement, matérialisé par des sources de débordement ou des écoulements hypodermiques dans les colluvions entre terrasses représentent ici près de 25 % des apports à la nappe. Ce volume important traduit les nombreuses discontinuités hydrauliques entre terrasses, provoquées par la remontée du substratum molassique. Cependant, une grande part de cette eau est ré-infiltrée progressivement dans la nappe sous-jacente via des petits ruisseaux. Ces infiltrations ont été prises en compte dans la modélisation.

De manière globale, le bilan hydrologique confirme la faible inertie de l'aquifère alluvial et la grande dépendance du système à la pluviométrie. Ce phénomène s'explique par la faible épaisseur des alluvions et de la tranche d'eau et par l'influence prépondérante de la pluviométrie dans les mécanismes de recharge. Par ailleurs, les discontinuités hydrauliques et le fort pouvoir drainant des cours d'eau sur la nappe accentuent cette sensibilité.

5. Conception de l’outil de gestion

Suite au plan de gestion des étiages (PGE), élaboré en 2004, la Garonne et ses affluents font régulièrement l’objet de restrictions de prélèvements en période estivale. Ce plan prévoit de restaurer les débits d’étiage et de concilier les usages entre eux en garantissant une solidarité de bassin versant, tout en permettant un bon fonctionnement des écosystèmes.

Compte tenu des relations d’échanges existants entre ces cours d’eau et les nappes alluviales, les services déconcentrés de l’Etat des différents départements chargés de la Police de l’Eau sont confrontés à la nécessité de pouvoir concilier :

- la demande en eau (AEP, Irrigation, Industries...) à partir des ressources en eaux souterraines ;
- la préservation d’un débit d’étiage suffisant dans les rivières.

Ce chapitre a pour objectif de présenter le principe de fonctionnement de l’outil de gestion des autorisations de prélèvements agricoles conçu pour la plaine alluviale de la Garonne en Haute-Garonne.

Afin de pouvoir garantir une gestion homogène des ressources alluviales à l’échelle du bassin Adour-Garonne, cet outil est inspiré de ceux déjà réalisés par le BRGM pour les départements de Lot-et-Garonne (47), du Tarn-et-Garonne (82) et de l’Ariège (09).

5.1. PRESENTATION GENERALE DE L’OUTIL

La recharge du réservoir alluvial est principalement assurée par l’infiltration directe des pluies au travers des différentes terrasses. De ce fait, le potentiel de réalimentation du système est particulièrement sensible aux variations climatiques annuelles.

Généralement, les autorisations de prélèvements destinés à l’irrigation font l’objet d’une demande annuelle, s’effectuant en tout début d’année (février) dans le cadre d’une procédure mandataire. Il est alors très difficile de prévoir l’importance de la recharge entre la date de délivrance des autorisations et le début de la période d’irrigation (mai-juin).

L’objectif est donc de fournir un outil non pas prévisionnel mais de planification et d’aide à la décision. Cet outil est basé sur le calcul de Volumes Prélevables Admissibles (VPA) en fonction de différents scénarios de recharge.

Les VPA sont obtenus en utilisant le modèle mathématique calé en régime transitoire. Les résultats provenant des différentes simulations mises en œuvre permettent de faire fonctionner l’outil sous la forme de deux modes de gestion. L’utilisateur n’utilise donc pas directement le modèle mais les données en découlant, via l’outil de gestion.

Les deux possibilités de gestion offertes sont les suivantes :

- **Gestion « anticipée »**

La fonction de gestion dite « anticipée » est basée sur un scénario de recharge hivernale et printanière moyenne (dite « normale »), défini à partir de l'analyse statistique des pluies efficaces calculées avec les données météorologiques des stations de la zone d'étude. Des Volumes Prélevables Admissibles (VPA) dans la nappe sont ainsi attribués selon les secteurs pour une année moyenne en fonction des volumes demandés lors de la délivrance des autorisations. Cette option permet alors d'identifier les zones risquant la surexploitation,

- **Gestion « régulée »**

L'autre option proposée est celle de la gestion dite « régulée ». Elle fournit des VPA dans la nappe en fonction d'une part, de la recharge hivernale observée et d'autre part, de l'évolution printanière choisie par l'utilisateur. Si les prévisions se confirment, celui-ci aura la possibilité de vérifier l'adéquation entre les prélèvements autorisés précédemment et la capacité de la ressource. Dans le cas contraire, les volumes pourront être modulés si l'utilisateur le juge nécessaire.

5.2. FONCTIONNEMENT DE L'OUTIL DE GESTION

5.2.1. Définition des scénarios climatiques

La construction de l'outil de gestion pour l'aquifère alluvial de la Garonne en Haute-Garonne fait suite à la construction d'un modèle hydrodynamique du comportement de la nappe. L'outil doit permettre de définir des Volumes Prélevables Admissibles (VPA) en fonction de la recharge de la nappe. Sa mise en place nécessite au préalable une évaluation statistique des chroniques météorologiques (précipitations et EvapoTranspiration Potentielle) afin de définir des scénarios de recharge auxquels pourrait être soumis le réservoir alluvial. Ce travail fournit ainsi des contextes météorologiques de référence à partir desquels des Volumes Prélevables Admissibles pourront être estimés.

L'élaboration de **scénarios climatiques** passe par le calcul des périodes de retour d'événements pluvieux et d'évapotranspiration pour définir des valeurs de pluie efficace.

L'utilisateur de l'outil de gestion n'ayant pas toujours les éléments suffisants pour établir un bilan hydrique détaillé, la notion de pluie efficace a été simplifiée par la relation P-ETP.

Dans le cas de l'outil de gestion de la nappe alluviale en Haute-Garonne, la pluie efficace est directement calculée par le modèle hydrodynamique à partir des valeurs de précipitation brutes et d'ETP. Les périodes de retour sont donc définies sur les

paramètres hydroclimatiques (Pbrute et ETP), fournis par quatre stations météorologiques suivies par MétéoFrance (Blagnac, Lherm, Palaminy, Clarac). L'analyse statistique des périodes de retour est réalisée sur 14 années, de janvier 1996 à décembre 2009.

Les scénarios climatiques s'établissent en considérant d'une part la recharge hivernale (d'octobre à mars) et d'autre part la recharge printanière (d'avril à juin). Ils sont déterminés de deux manières : selon une méthode statistique simple déjà utilisée pour l'outil de gestion de la nappe alluviale de l'Ariège et selon une méthode statistique faisant intervenir une loi statistique représentant la distribution des données météorologiques.

La mise en place de la deuxième méthode, plus robuste, permet d'évaluer, dans un second temps, la méthode statistique simple initialement mise en œuvre, en vue d'affiner le calcul prévisionnel.

Le détail du calcul des périodes des scénarios climatiques pour chacune des deux méthodes, ainsi qu'une analyse comparative de celles-ci sont décrits en annexe 9.

L'objectif de ces deux démarches est de déterminer les quantiles de pluie efficace décadaire correspondant aux valeurs décennales sèches, quinquennales humides et quinquennales sèches. Le calcul des fréquences expérimentales correspondant à ces périodes de retour a permis de déterminer les valeurs de pluie efficace associées.

De cette approche devaient être déduits 9 scénarios climatiques issus de la combinaison de 3 types de recharges hivernales (faibles, moyennes ou fortes) et de 3 recharges printanières (déficitaires, moyennes et excédentaires). Toutefois, les cumuls de pluies efficaces calculés pour les recharges printanières correspondantes à des années quinquennales sèches et moyennes étant similaires et nulles, les neuf scénarios prévus se réduisent à six. Ces derniers permettent donc de faire fonctionner l'outil en mode de gestion régulée.

Le tableau de l'illustration 34 récapitule l'ensemble des valeurs obtenues pour les 4 stations en fonction des scénarios climatiques définis à partir de la méthode statistique probabiliste.

Scenario	saison de recharge	type climatique	cumul Peff Palaminy	cumul Peff Blagnac	cumul Peff Lherm	cumul Peff Clarac
etat ref critique	hiver	<i>decennal sec</i>	1.59	0	3.65	7.78
	printemps	<i>decennal sec</i>	0	0	0	0
1	hiver	<i>quinquennal sec</i>	7.67	2.37	13.82	21.53
	printemps	<i>moyen</i>	0	0	0	0
2	hiver	<i>quinquennal sec</i>	7.67	2.37	13.82	21.53
	printemps	<i>quinquennal humide</i>	32.41	8.23	36.92	57.09
3	hiver	<i>moyen</i>	66.18	46.70	86.10	120.77
	printemps	<i>quinquennal sec</i>	0	0	0	0
4	hiver	<i>moyen</i>	66.18	46.70	86.10	120.77
	printemps	<i>quinquennal humide</i>	32.41	8.23	36.92	57.09
5	hiver	<i>quinquennal humide</i>	281.25	227.13	288.13	417.15
	printemps	<i>moyen</i>	0	0	0	0
6	hiver	<i>quinquennal humide</i>	281.25	227.13	288.13	417.15
	printemps	<i>quinquennal humide</i>	32.41	8.23	36.92	57.09

Illustration 34 – Cumul de pluie efficace obtenu pour les 4 stations de la zone d'étude en fonction des différents scénarios climatiques

5.2.2. Sectorisation de la zone d'étude

Le compartiment alluvial en Haute-Garonne étant très hétérogène (lithologie des terrasses, encaissement partiel des cours d'eau, influence des coteaux molassiques), une zonation des mailles des calculs a été préconisée pour la détermination des Volume Prélevable Admissible (VPA).

Les secteurs hydrogéologiques ont été réalisés suivant les unités de gestion pour la qualité des eaux continentales en Midi-Pyrénées en accord également avec la géologie de l'aquifère (disposition des terrasses alluviales) et les lignes d'écoulement de la nappe phréatique selon la carte piézométrique moyenne de l'année hydrologique 2006-2007.

Vingt zones ont été identifiées. Elles traduisent une certaine homogénéité hydrogéologique sectorisée du réservoir. Cela a conduit parfois à subdiviser en sous-ensemble les unités de gestion en fonction des valeurs d'emménagement, de conductivité hydraulique et des principaux points de prélèvements déjà répertoriés.

L'illustration 35 montre la répartition des vingt zones de gestion définies pour la détermination des VPA.

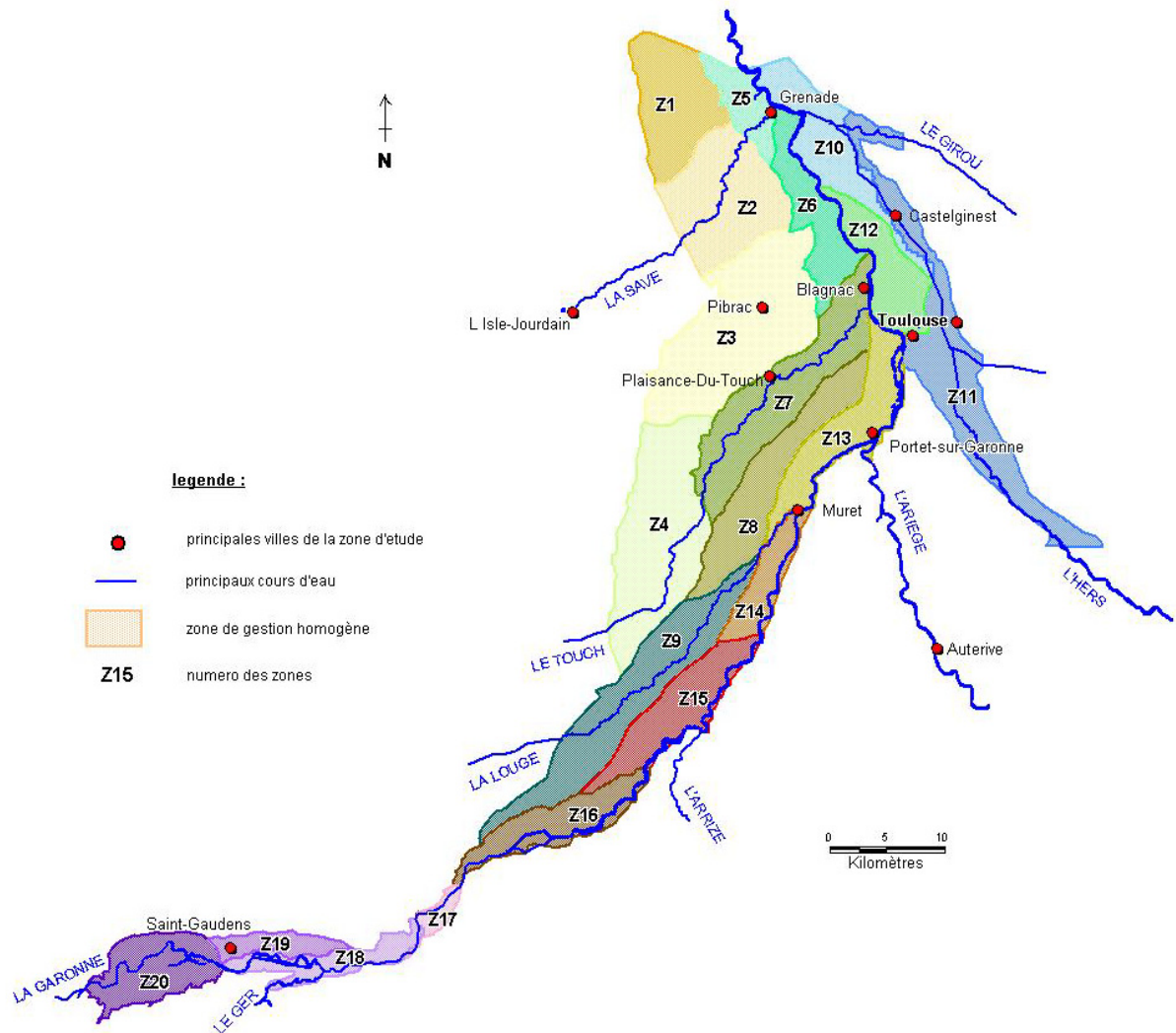


Illustration 35 – Extension des 20 unités de gestion retenues pour le calcul des Volumes Prélevables Admissibles (VPA)

5.2.3. Calculs des Volumes Prélevables Admissibles (VPA)

Les volumes Prélevables admissibles sont calculés à la suite de la détermination des scénarios de recharge prévisionnels intégrés dans le modèle numérique des écoulements de la nappe alluviale.

Détermination d'un état piézométrique de référence

Un seuil limite de non-dépassement est défini au départ afin de garantir la préservation de la ressource et ainsi conserver un volume de réserve. Cet état dit de référence est associé au maintien du débit d'objectif d'étiage de la Garonne (DOE) mesuré à plusieurs endroits et notamment aux stations de jaugeage de Valentine et de Portet-sur-Garonne.

Ce choix est en accord avec la problématique du Plan de Gestion d'Etiage (PGE) de la Garonne qui indique un déséquilibre quantitatif sur ce fleuve en période d'étiage.

Le DOE est fixé à 20 m³/s pour la station hydrologique de Valentine à l'entrée de la Garonne dans le système alluviale et de 50m³/s pour la station de Portet dans sa partie médiane plus au nord (Données « bulletin hydrologique bassin Adour-Garonne du 11/10/2009 »). Ces données correspondent à des valeurs statistiques fournies par la Banque Hydro représentant des débits moyens d'une année sèche pour une période de retour de dix ans.

Le couplage nappe/rivière du système alluvial de Haute-Garonne permet de relier l'état piézométrique de la nappe avec les débits des cours d'eau.

L'application d'un état de référence selon une période de retour d'événement de dix ans en année sèche est ainsi transposée à l'état piézométrique. Un contrôle sur les stations de Portet sur Garonne (en aval de la zone d'écoulement de la Garonne) et de Valentine (en amont de la zone d'écoulement) a été réalisé. Il consiste à comparer les débits simulés en période d'étiage pour l'année de simulation (soit une année 2009 fictive) avec les données du DOE (Débit d'Objectif d'Etiage) de la banque hydro et celles du bulletin hydrologique Adour-Garonne du 11 octobre 2009.

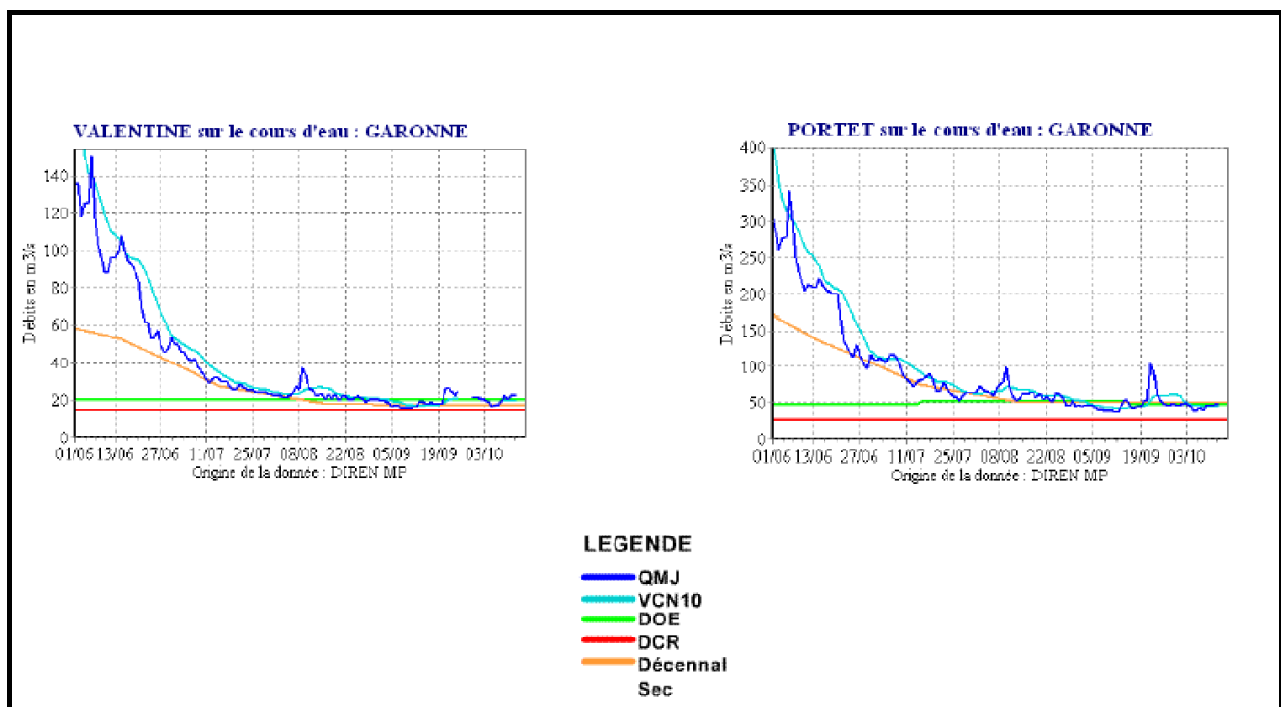


Illustration 36 – Etat hydrologique de la Garonne à la station de Valentine et de Portet en fin d'année 2009 (Bulletin hydrologique du Bassin Adour-Garonne au 11/10/09 – DREAL)

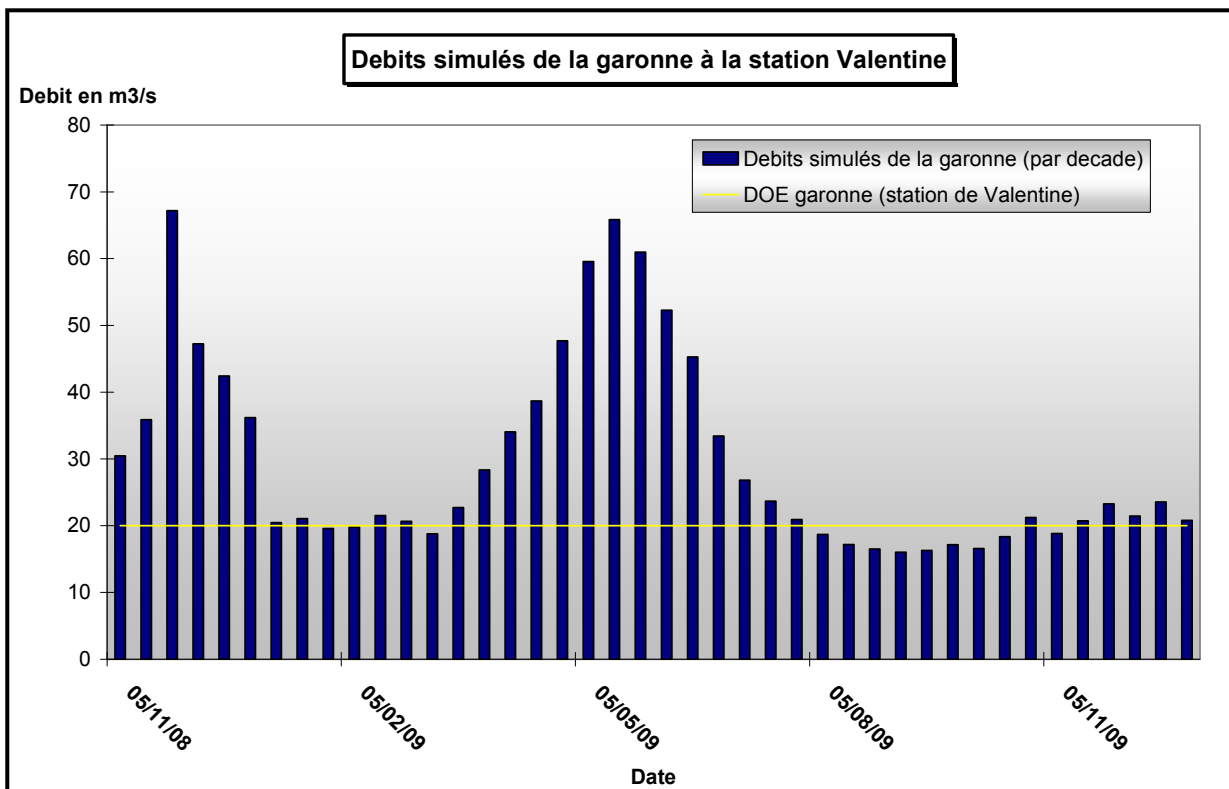
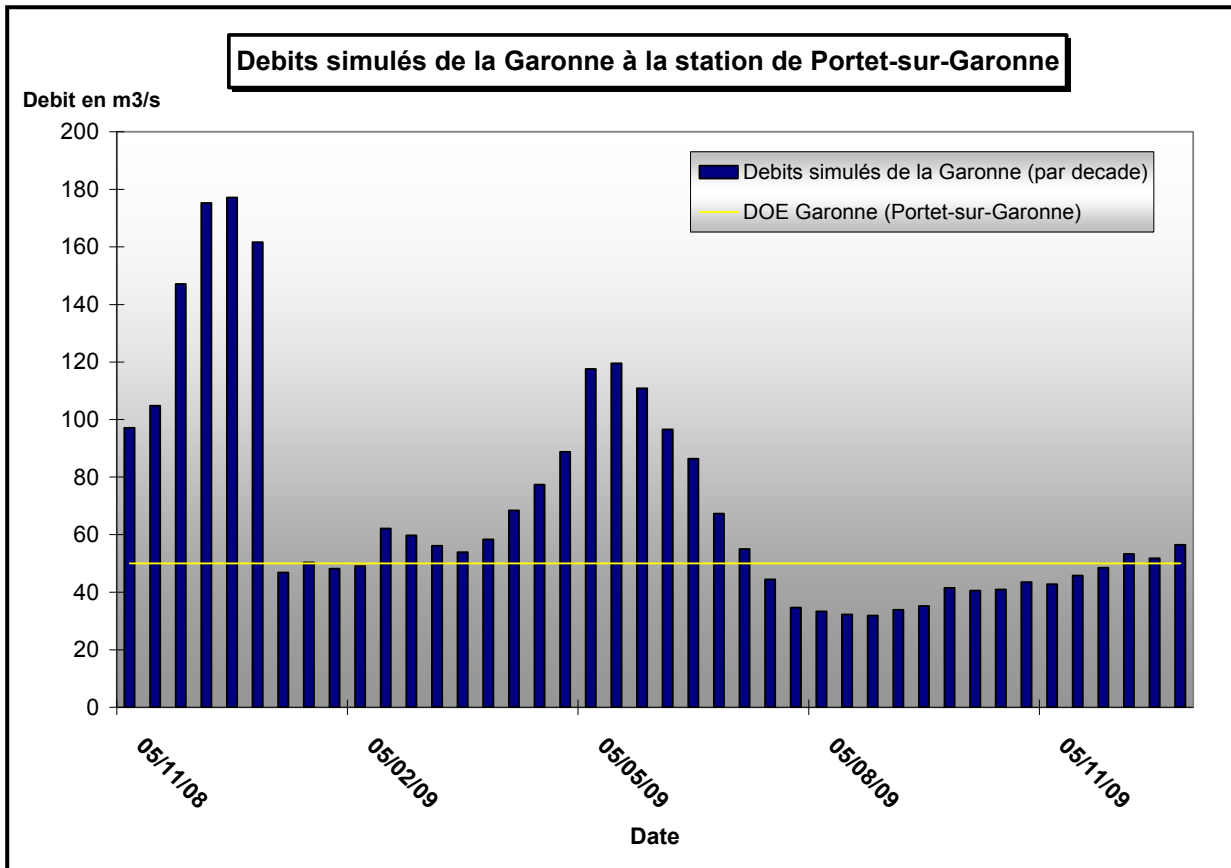


Illustration 37 - Restitution de l'état hydrologique de la Garonne pour 2009 sous MARTHE : Stations de Valentine et de Portet-sur Garonne

Le bulletin hydrologique montre que la période de retour décennale sèche semble en accord avec le seuil de débit d'étiage défini par le DOE sur la période de septembre-octobre de l'année de simulation (2009 fictif). Ce phénomène se retrouve au niveau des chroniques simulées où le niveau de base des débits de la Garonne s'approche de la valeur du DOE.

La simulation complète de l'état de référence a été réalisée sur dix années au pas de temps décadaire. Les 9 premières années correspondent à la période de calage du régime transitoire (2000-2008). L'année de référence décennale sèche est déterminée sur les 36 derniers pas de temps, représentant la dernière année civile du modèle numérique. Durant cette période, les paramètres de pluie, d'ETP et de débit d'entrée des rivières ont été actualisés à partir d'analyses statistiques probabilistes des données météorologiques et hydrologiques.

L'état piézométrique de référence est fourni à la fin de la période d'irrigation au 25 septembre de l'année finale de simulation. Il tient compte de l'impact d'une période de prélèvement agricole moyen dans le but de définir un état de base de la réserve. Il s'agit ici du seuil à ne pas dépasser pour préserver les débits d'étiage dans la Garonne.

Simulations des différents scénarios

Comme pour de l'année de référence, les différents scénarios, élaborés suivant les périodes de recharge hivernale et printanière, sont intégrés à la dernière année de simulation du modèle hydrodynamique.

L'état piézométrique de chaque scénario est fourni à la fin du mois d'avril avant la période d'irrigation des cultures. Il rend compte ainsi du volume d'eau disponible au début de la période d'irrigation.

Les volumes prélevables sont déterminés en soustrayant l'état de référence préservant la DOE (simulation en période décennale sèche) aux scénarios climatiques dernièrement simulés.

Ce travail est effectué selon les zones de gestion définies précédemment en tenant compte de la surface des mailles et de l'emmagasinement libre, assimilé à la porosité efficace.

Un Volume Prélevable Admissible a ainsi été estimé pour chaque zone homogène de gestion dont les résultats sont présentés dans l'illustration 38 ci-après.

Analyse des résultats

Les Volumes Prélevables Admissibles en fonction des scénarios climatiques sont présentés par zone de gestion dans l'illustration 38.

zone de gestion			Volumes Prélevables Admissibles (m3)									
surface (km ²)			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
scenario 1	hiver printemps	quinquennal sec quinquennal sec et moy	1 041 923	854 864	1 839 412	574 654	1 399 992	906 200	2 650 748	1 599 869	3 677 400	2 412 116
scenario 2	hiver printemps	quinquennal sec quinquennal humide	1 041 923	855 102	1 868 271	650 657	1 425 729	979 695	2 700 538	1 600 027	3 758 407	1 947 876
scenario 3	hiver printemps	quinquennal moyen quinquennal sec et moy	1 070 115	880 702	1 945 618	712 232	1 452 057	973 404	2 966 154	1 929 358	4 428 783	2 525 669
scenario 4	hiver printemps	quinquennal moyen quinquennal humide	1 070 115	880 948	1 974 363	616 482	1 477 683	1 047 014	3 015 281	1 929 546	5 142 464	2 629 895
scenario 5	hiver printemps	quinquennal humide quinquennal sec et moy	1 172 241	977 104	2 250 832	1 003 509	1 632 690	1 137 326	3 677 924	2 648 813	7 552 084	2 825 755
scenario 6	hiver	quinquennal humide	1 172 241	977 296	2 285 777	1 087 814	1 657 409	1 210 609	3 775 565	2 717 942	7 795 516	2 929 586
Demande de prélèvements pour l'année 2009 (source DDEA 31)			509 886	75 410	876 641	97 541	622 743	256 961	693 460	479 412	3 112 253	1 674 283

zone de gestion			Volumes Prélevables Admissibles (m3)										
surface (km ²)			11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	global
Scenario 1	hiver printemps	quinquennal sec quinquennal sec et moy	1 182 024	2 234 202	2 169 674	1 323 792	3 222 838	1 507 614	366 690	1 334 613	664 853	3 453 942	34 417 421
scenario 2	hiver printemps	quinquennal sec quinquennal humide	1 209 630	2 380 172	2 314 289	1 472 114	3 462 199	1 552 052	399 169	1 430 712	664 577	3 765 791	35 478 929
scenario 3	hiver printemps	quinquennal moyen quinquennal sec et moy	1 222 505	2 361 509	2 337 703	1 505 992	3 696 644	1 709 699	401 090	1 510 468	762 179	3 861 397	38 253 278
scenario 4	hiver printemps	quinquennal moyen quinquennal humide	1 249 998	2 507 315	2 481 836	1 653 722	4 405 717	2 291 378	544 262	1 722 683	767 398	4 388 567	41 796 669
scenario 5	hiver printemps	quinquennal humide quinquennal sec et moy	1 358 394	2 670 640	2 743 397	1 930 040	4 712 706	2 733 039	608 744	2 161 325	1 046 655	5 154 287	50 623 324
scenario 6	hiver printemps	quinquennal humide quinquennal humide	1 385 654	2 815 722	2 903 012	2 112 324	5338525	3 393 981	556 977	2 150 668	1 064 053	5 770 390	51 765 985
Demande de prélèvements pour l'année 2009 (source DDEA 31)			0	296 511	2 177 486	1 034 861	5 133 832	2 500 531	267 130	163 142	59 680	953 445	20 985 208

Illustration 38 – Volumes prélevables déterminés pour les 20 zones et les 6 scénarios climatiques

Les résultats délivrés dans le tableau sont donnés en volume d'eau (m³) disponible à la fin du mois d'avril. Ces résultats devront toutefois être utilisés avec prudence, en gardant à l'esprit les incertitudes inhérentes à la construction et au calage du modèle, en particulier vis-à-vis des cotes du substratum, des valeurs de porosité efficace ou celles de perméabilité et également par rapport aux approximations et hypothèses prises sur la répartition des volumes annuels prélevés.

A l'échelle de la zone d'étude (1356 km²), des disparités importantes, d'environ 17,5 million de m³, sont observés entre les scénarios extrêmes (quinquennale sec et

quinquennal humide). Cela met en évidence le rôle prépondérant de la recharge hydroclimatique (hivernale et printanière) sur la disponibilité de la ressource à l'échelle régionale.

Les valeurs obtenues montrent que les volumes prélevables sont du même ordre de grandeur pour les casiers hydrogéologiques situés sur une même terrasse alluviale.

Les écarts de VPA entre terrasses sont symptomatiques de la pression de prélèvements exercée sur chacune d'entre elles. Les demandes les plus importantes pour les années antérieures (2000-2007) concernent essentiellement les terrasses les plus récentes, c'est à dire la basse plaine et la basse terrasse. Ces formations de la basse plaine possèdent le plus grand volume d'eau disponible avec $13,7 \text{ Mm}^3$ pour la période quinquennale sèche contre $10,2 \text{ Mm}^3$ pour la basse terrasse. D'une manière plus générale, les VPA diminuent avec l'âge des terrasses.

Localement, les Volumes Prélevables Admissibles obtenus ne sont pas repartis uniformément dans chaque secteur géologique. Ramenées à un volume unitaire (m^3/km^2), les quantités d'eau disponibles les plus importantes se retrouvent dans la zone sud et médiane du modèle, entre Muret et Montréjeau (zone 14 à 20 et zone 9). Dans cet ensemble, la formation sédimentaire de la basse plaine regroupe les zones de gestion (zone 14, 15, 16) ayant le plus de volume d'eau disponible.

Ces réserves utilisables importantes expliquent l'exploitation intense de la ressource en eau souterraine par l'agriculture dans ces secteurs. A l'inverse, le secteur nord de la zone d'étude possède la quantité d'eau disponible pour l'irrigation (zone 1 à 8) la moins importante. La pression agricole dans ces secteurs est en adéquation avec ce constat et reste bien moins importante que les autres secteurs.

Les Volumes Prélevables Admissibles sont relativement importants pour les zones les plus favorables situées dans la basse plaine. Cependant la forte sollicitation de la nappe dans ces secteurs, tous usages confondus, réduit la part demeurant encore disponible.

Dans l'outil de gestion, les secteurs de la basse plaine apparaissent comme les zones les plus critiques en termes de quantité d'eau utilisable pour l'irrigation, dans la mesure où l'exploitation pour l'AEP et l'industrie y est déjà très importante. Le modèle indique en effet que pour une année de recharge défavorable (période de retour quinquennal sec) et une demande en prélèvements AEP et industriels actuelle, des restrictions pourraient être imposées aux prélèvements agricoles, si leurs demandes venaient à augmenter.

6. Utilisation de l'outil de gestion

6.1. PRESENTATION DE L'ARCHITECTURE DE L'OUTIL

Le présent rapport est fourni avec un CD Rom contenant un répertoire dans lequel se trouvent l'outil de gestion et sa notice d'utilisation.

Le répertoire dénommé [Outil_Gestion_Garonne] contient quatre classeurs Excel[®] constituant l'architecture de l'outil :

- un fichier "maître" *Gestion_Garonne.xls* correspondant au module principal de l'outil de gestion dans lequel sont stockées les macros. Celui-ci exploite les données contenues dans les trois fichiers "sources" liés,
- trois fichiers "sources" où sont stockés les renseignements sur les ouvrages en exploitation captant la nappe alluviale de la Garonne dans la zone modélisée. Chacun de ces trois fichiers intéressent respectivement les captages destinés à l'AEP (AEP.xls), les points d'eau industriels (INDUS.xls) et ceux utilisés pour un usage agricole (IRRIG.xls).

Remarque : Les fichiers "sources" actuels ont été établis à partir des informations disponibles au moment de l'élaboration de l'outil, soit les volumes prélevés pour :

- AEP.xls : fichier 2008 fourni par la MISE 31 (source DDASS 31),
- INDUS.xls : fichier 2007 fourni par l'AEAG,
- IRRIG.xls : fichier 2009 fourni par la MISE 31 (source CA 31).

L'ensemble de ces données devra être mis à jour pour une utilisation optimale de l'outil.

6.1.1. Fichiers AEP.xls et INDUS.xls

Les fichiers AEP.xls et INDUS.xls contiennent respectivement les informations disponibles sur les points de prélèvement à usage AEP et industriel (cf. Illustration 39) :

- Identification du point d'eau : Indice National, numéro attribué par l'Agence de l'Eau et code d'identification donné par les DDEA,
- Localisation du point de prélèvement : commune, lieu-dit, coordonnées du point en Lambert 2 étendu (m),
- Profondeur de l'ouvrage,

- Volumes prélevés lors de l'année précédente et de l'année n-2,

- Numé

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	INDICE_NATIONAL	NUM_DDEA	NUM_AEAG	UTILISATION	NOM_COMMUNE	LIEU_DIT	X_L2E (m)	Y_L2E (m)	PROF INVEST	Volume prélevé année N-2	Volume prélevé année N-1	N° ZONE
1			31145101	INDUSTRIEL	CINTEGABELLE	CEMEX GRANULATS SUD-OUEST	534 871,04	1811 487,78		181 200	268 560	6
2	10098D0206/F		31574100	INDUSTRIEL	VERNET	S.A. SABLIERES DE GARONNE	525 478,00	1823 967,00	4,0	350 000	156 800	7
3	10577X0175/C		9324101	INDUSTRIEL	VARILHES	SOCIETE DES GRAVIERES DE L'ARIEGE	543 342,00	1785 160,10		97 051	113 881	3

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	INDICE_NATIONAL	NUM_DDEA	NUM_AEAG	UTILISATION	NOM_COMMUNE	LIEU_DIT	X_L2E (m)	Y_L2E (m)	PROF INVEST	Volume prélevé année N-2	Volume prélevé année N-1	N° ZONE
1			31420004	AEP	PINSAGUEL	PUITS SYNDICAL JORDANIS PUIITS 2	524 252,00	1833 723,00	6,6	305 522	261 000	8
2	10094D0239/F		31420001	AEP	PINSAGUEL	PUITS COMMUNAL NOUVEAU JORDANIS P1	524 372,00	1833 633,00	6,0	101 833	65 497	8
3	10094D0427/F		31420002	AEP	PINSAGUEL	JORDANIS P2	524 510,36	1833 550,89		125 580	135 300	8
4	10098E0195/F		31574002	AEP	VERNET	LE MOULIN	526 011,00	1827 132,00	4,7	189 812	155 940	7
5	10351X0005/F		31145001	AEP	CINTEGABELLE	PUITS SYNDICAL NOUVEAU LA MONGENDRE (P1)	534 087,00	1811 332,00	9,3	403 640	357 455	6
6	10351X0021/F		31145002	AEP	CINTEGABELLE	PUITS SYNDICAL ANCIEN LA MONGENDRE (P2)	534 107,00	1811 352,00	9,0	403 640	357 455	6
7	10351X0023/F		31033002	AEP	AUTERIVE	STATION DE POMPAGE DU RAMIER (P2)	530 533,00	1815 911,00	9,5	283 007	230 243	7
8	10577X0101/F		09324002	AEP	VARILHES	FORAGE DE LAGREOU	542 570,00	1784 108,00	8,3	160 727	137 037	3
9	10577X0112/F		09324001	AEP	VARILHES	CAPTAGE COMMUNAL PAR GALEPIE	543 051,00	1783 347,00		104 723	166 805	3
10	10577X0125/F		09285002	AEP	SAINT-JEAN-DU-ESCALGA	PUITS COMMUNAL MONIE	541 623,00	1786 744,00	6,5	207 803	220 485	3

Illustration 39 – Fichiers "sources" AEP.xls et INDUS.xls

6.1.2. Fichier IRRIG.xls

Ce fichier contient la liste des ouvrages exploités à usage agricole situés sur le secteur modélisé (cf. Illustration 40). Il a été élaboré à partir des données transmises par les DDEA de la Haute-Garonne (volumes prélevés entre 2000 et 2007 et demande d'autorisation de 2008). Le fichier contient les informations suivantes :

- Identification du point d'eau : indice national (BSS) et code d'identification donné par les DDEA (numéros IRISCOPE et PACAGE),
- Informations sur le propriétaire de l'ouvrage² : nom, prénom, société, adresse, commune de résidence
- Localisation du point de prélèvement : commune, lieu-dit, coordonnées du point en Lambert 2 étendu (m),
- Profondeur de l'ouvrage,
- Volumes demandés lors de l'année précédente et de l'année en cours,
 - Numéro de la zone auquel le point d'eau est rattaché,
- Numéro du compteur,

² Le présent rapport étant public, les informations relatives aux propriétaires des ouvrages ont volontairement été masquées pour des raisons de confidentialité.

- Appartenance ou non à la zone de délimitation de la nappe d'accompagnement défini par ailleurs.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	
INDICE NATIONAL	NUM IRRISCOPE	NUM PACKAGE	UTILISATION	NOM	PRENOM	SOCIETE	ADRESSE	CP	COMMUNE	X_L2E (m)	Y_L2E (m)	PROF INVEST	COMMUNE DE L'OUVRAGE	LIEU DE POMPAGE	Volume demandé année N-1	Volume demandé en cours	N° ZONE	Volume prélevable admissible	Réduction (%)	NUM COMPTEUR	Napp. Accompagn	
105720017F	IABM_184	9004276	EAU-AGRICOLE				Brustes	09700	LE YERNET	540 430,77	1798 837,07	12	BONNAC	Le planis de Sissac	0	30 000	5			103015	OUI	
105720018F	IABM_183	9004276	EAU-AGRICOLE				Brustes	09700	LE YERNET	541 232,00	1797 574,00	12	LE YERNET	Brustes	50 000	68 000	5			103020	NON	
105720019F	IABM_185	9004276	EAU-AGRICOLE				Brustes	09700	LE YERNET	541 250,00	1797 768,00	12	LE YERNET	Brustes	40 000	68 000	5			103024	NON	
103520067F		3008823	EAU-AGRICOLE				petit siné	31550	CINTEGABELLE	535 269,00	1811 368,00		CINTEGABELLE	petit siné	10 000	10 000	6				OUI	
1058600046F	IABM_121	9009091	EAU-AGRICOLE				Montgautz	09500	LABASTIDE DE BOUSIGNAC	564 044,00	1780 570,00			ST QUENTIN LA TOUR	30 000	20 000	0			133204	NON	
1058600045F	IABM_125	9009091	EAU-AGRICOLE				Borde Chère	09500	LABASTIDE DE BOUSIGNAC	564 266,00	1782 174,00	8		ST QUENTIN LA TOUR	30 000	30 000	0			043A27	NON	
1058600042F	IABM_1	9005986	EAU-AGRICOLE				Montgautz	09500	ST QUENTIN LA TOUR	564 350,70	1781 893,00	6		ST QUENTIN LA TOUR	25 000	25 000	0			133923	NON	
1058600043F	IABM_1	9005986	EAU-AGRICOLE				Montgautz	09500	ST QUENTIN LA TOUR	564 185,00	1782 521,00	6		ST QUENTIN LA TOUR	25 000	40 000	0			103024	NON	
105720027F	IABM_191	?	EAU-AGRICOLE				Les Espésars	09900	VILLENEUVE DU PAREAGE	542 035,00	1797 075,00	9		VILLENEUVE DU PAREAGE	0	70 000	5			WA02A247	NON	
1008600265F		3185242	EAU-AGRICOLE				1300 ch des Chassagnou	31870	LAGARDELLE SURLEZE	525 180,00	1823 985,00			LAGARDELLE SURLEZE	les cotétaudes	3000	3000	7				NON
1008600264F		3185242	EAU-AGRICOLE				1200 ch des Chassagnou	31870	LAGARDELLE SURLEZE	525 120,00	1823 985,00			LAGARDELLE SURLEZE	la maison-la zette	8000	8000	7				NON
103520068F		3008823	EAU-AGRICOLE				220 chemin de la croix de Puy	31550	CINTEGABELLE	538 093,00	1811 345,00			CINTEGABELLE	plano del lougats	38000	38000	4	38000	0,0		OUI
103520077F		3008823	EAU-AGRICOLE				220 chemin de la croix de Puy	31550	CINTEGABELLE	538 694,00	1810 858,00			CINTEGABELLE	fontou	38 000	38 000	4	38000	0,0		OUI
103560018F		3008821	EAU-AGRICOLE				220 chemin de la croix de Puy	31550	CINTEGABELLE	538 840,00	1809 790,00			CALMONT	bordeneuve	43 000	43 000	5				OUI
103560013F		3008821	EAU-AGRICOLE				220 chemin de la croix de Puy	31550	CINTEGABELLE	540 000,00	1809 736,00			CALMONT	fontanier C	43 000	43 000	4	43000	0,0		OUI
103560016F		3008821	EAU-AGRICOLE				220 chemin de la croix de Puy	31550	CINTEGABELLE	540 257,00	1809 996,00			CALMONT	fontanier H	43 000	43 000	4	43000	0,0		OUI
103560014F		3008821	EAU-AGRICOLE				220 chemin de la croix de Puy	31550	CINTEGABELLE	538 520,00	1809 480,00			CALMONT	bourat	43 000	43 000	5				NON
103560060F		3007797	EAU-AGRICOLE				la Verrière	31180	AUTERIVE	527 980,00	1816 482,00			AUTERIVE	Bordenoble	68000	68000	7				NON

Illustration 40 – Fichier IRRIG.xls

6.1.3. Actualisation des fichiers sources liés

Pour chacun des trois fichiers "sources" liés, l'utilisateur peut actualiser les données à tout moment en fonction des nouvelles informations à sa disposition. Il peut ainsi supprimer des points d'eau qui ne sont plus exploités ou en ajouter de nouveaux. Il peut également modifier les renseignements saisis dans les fichiers actuels (changement d'adresse ou de propriétaire.....).

Les modifications sont réalisées directement dans les fichiers "sources" et enregistrées avant d'être refermés. L'outil peut alors être relancé en prenant en compte les nouvelles informations introduites préalablement.

Remarque : Un format de saisie est à respecter pour effectuer ces changements.

Pour les trois fichiers "sources", il est impératif qu'une valeur de volume soit saisie si un numéro de zone est spécifié. Si le volume prélevé en un point n'est pas connu mais que l'utilisateur souhaite conserver l'ouvrage dans le fichier, la valeur zéro (0) doit être rentrée dans la colonne "volume" ou le numéro de la zone où le point d'eau est rattaché doit être supprimé.

Pour toutes les autres colonnes, l'utilisateur peut laisser un champ vide s'il ne dispose pas de l'information.

6.2. INSTALLATION ET DEMARRAGE DE L'OUTIL

L'installation de l'outil nécessite de disposer d'un ordinateur PC avec :

- Windows 95 / 98 / 2000 / XP / VISTA,
- une version du logiciel Microsoft Excel[®] (minimum 97).

Les actions suivantes sont à suivre pour installer l'outil dans les meilleures conditions :

- Insérer le CD-Rom dans son lecteur, rechercher le répertoire dénommé [Outil_Gestion_Garonne] et le copier sur le disque dur de l'ordinateur à l'endroit souhaité par l'utilisateur,

L'installation complète du répertoire [Outil_Gestion_Garonne] occupera environ 5,7 Mo sur le disque dur (avec sa notice d'utilisation).

Remarque : Il est impératif de s'assurer que les quatre (4) fichiers Excel copiés sur le disque dur ne sont pas en "lecture seule". Dans ce cas, décocher cette option dans le menu "Propriétés" (clic droit de la souris).

Le **démarrage de l'outil** s'effectue en double cliquant sur le fichier Gestion_Garonne.xls.

A l'ouverture, pour certaines configurations PC, une boîte de dialogue avertit de la présence de macros dans le classeur (cf. Illustration 41). Il faut alors choisir d'activer les macros pour permettre le fonctionnement de l'outil. Dans le cas contraire, l'utilisateur arrive sur le menu principal avec pour seule option la fermeture du classeur.

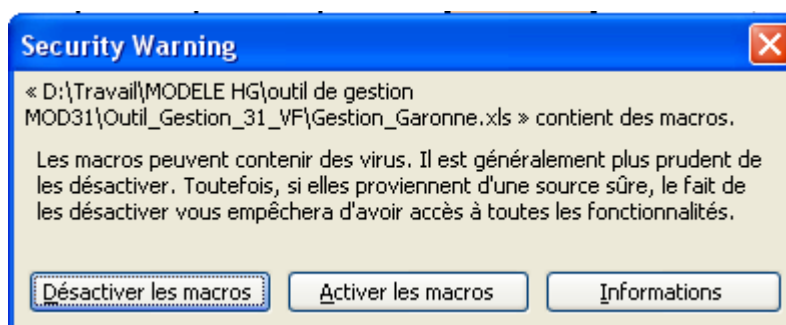


Illustration 41 – Message d'avertissement de la présence de macros dans le classeur

Lors de la première utilisation, le chemin des fichiers sera demandé à l'utilisateur. Une fenêtre Windows apparaît, demandant d'indiquer l'emplacement du dossier [Outil_Gestion_Garonne] à l'aide l'arborescence à disposition (cf. Illustration 42).

Lors des utilisations ultérieures, ce message n'apparaîtra plus dès lors que le chemin d'accès du dossier contenant les fichiers liés ne sera pas modifié.

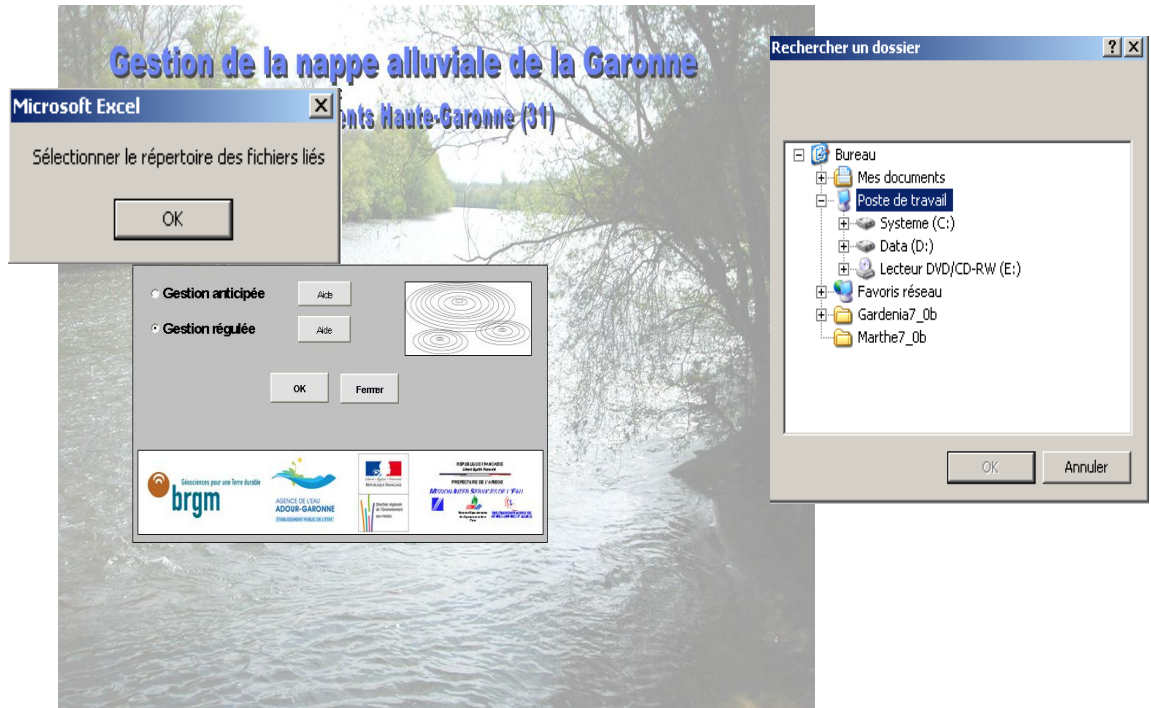


Illustration 42 – Emplacement des fichiers liés

6.3. PRESENTATION DES DIFFERENTES OPTIONS DE L'OUTIL


6.3.1. Page d'accueil

Le menu principal de l'outil offre deux options d'utilisation (cf. Illustration 43).



Illustration 43 – Page d'accueil

Le bouton  de la page d'accueil permet de valider l'option choisie.

Le bouton  est utilisé pour sortir de l'outil de gestion.

Deux boutons d'aide permettent de rappeler succinctement la définition de chacune des deux options (cf. Illustration 44).

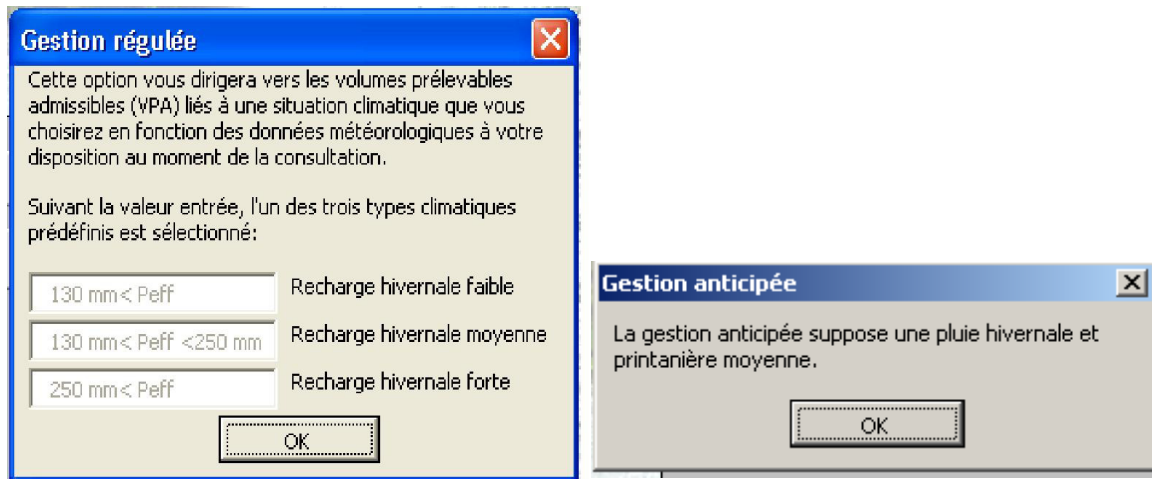


Illustration 44 – Rubriques d'aide sur les options choisies

6.3.2. Option "GESTION ANTICIPEE"

Cette option est basée sur un scénario de recharge annuelle moyenne défini à partir de l'analyse statistique des données de pluies efficaces calculées entre janvier 1996 et décembre 2009 (soit 14 années de mesures) pour les quatre stations de Blagnac, de Lherm et de Palaminy et de Clarac.

Choix de la zone à consulter

Le choix de cette option fait basculer directement l'utilisateur vers la carte représentant les différentes zones homogènes de gestion du secteur étudié (cf. Illustration 45).

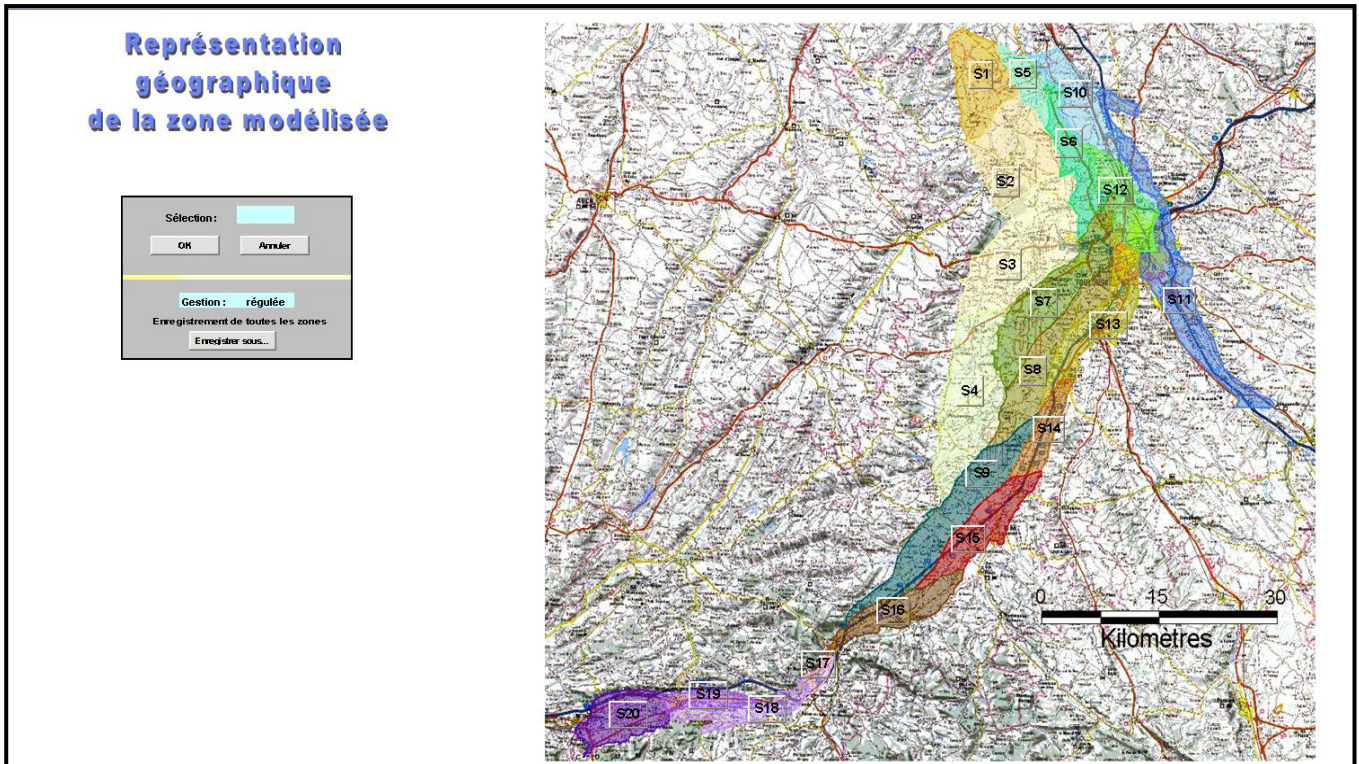


Illustration 45– Représentation géographique de la zone d'étude

La consultation des résultats s'effectue en cliquant sur l'onglet désignant le code de la zone sur la carte située à gauche et en validant par dans la boîte de dialogue.

Le bouton permet de ramener l'utilisateur au menu principal de la page d'accueil.

Consultation des résultats

Une fois la zone sélectionnée, l'utilisateur bascule sur une feuille de données synthétisant les informations du secteur désigné.

Remarque : Une boîte de dialogue mentionne si la zone choisie dispose d'une ressource en eau suffisante pour satisfaire tous les prélèvements (cf. Illustration 46).



Illustration 46 – Message d'information sur la disponibilité en eau des zones sélectionnées



Les informations relatives à la zone sélectionnée sont récapitulées sous la forme d'un cartouche contenant les éléments suivants (cf. Illustration 47) :

- Numéro de la zone consultée (exemple zone 4),
- Volume total demandé pour l'irrigation sur la zone,
- Volume Prélevable Admissible (VPA) de la zone,
- Réduction proposée en fonction du VPA : Oui ou Non,
- Coefficient de réduction à appliquer aux volumes demandés par les irrigants pour respecter le VPA de la zone. Par défaut, l'outil applique une réduction homogène à tous les prélèvements demandés. Toutefois, l'utilisateur connaissant le VPA de la zone, pourra manuellement moduler les réductions et ainsi ajuster les prélèvements en fonction sa connaissance du contexte local,
- Nombre total de puits recensés dans la zone (AEP, industriel et agricoles),
- Nombre de puits AEP/INDUS et IRRIG : détail du nombre de puits par usage,
- Option de gestion choisie.

Dans la seconde partie de la fenêtre figure la liste des ouvrages de la zone dont les principales informations sont extraites des trois fichiers "sources" liés (AEP.xls, INDUS.xls et IRRIG.xls) (cf. Illustration 47).

Le Volume Prélevable Admissible de chaque ouvrage et le coefficient de réduction appliqué au volume demandé sont rajoutés dans la feuille de données relative à l'irrigation.

A partir de cette feuille de synthèse, il est possible :

- de revenir à la carte pour choisir une autre zone à visualiser tout en restant dans le scénario en cours : 
- de basculer sur le menu principal pour choisir un nouveau scénario ou quitter l'outil : 

Synthèse de la zone

N° ZONE	4
Volume TOTAL	3006000
Volume Prélevable Admissible	4300000
Réduction proposée (Oui/Non)	Non
Coefficient de réduction (%)	0,00
Nombre total de puits	44
Nombre de puits/AEP	0
Nombre de puits/INDUS	0
Nombre de puits/IRRIG	44
Gestion	anticipée

Exporter synthèse zone

Synthèse de la zone

Volume Prélevable Admissible
 Coefficient de Réduction (%)
 Nombre de puits/AEP
 Nombre de puits/INDUS
 Nombre de puits/IRRIG
 Gestion anticipée

Liste des ouvrages de la zone

INDICE_BSS	N° PIÈCE	N° AEAG	COMMUNE DE L'OUVRAGE	LIEU DE POMPAGE	Volume prélevable	Réduction (%)
001010101			NOGENT-FELLES	SARRELOTT (SPECC DE COUCHON)	0000	0,00
001010102			NOGENT-FELLES	NOGENT-FELLES	0000	0,00
001010103			NOGENT-FELLES	BRANS	0000	0,00
001010104			NOGENT-FELLES	CHELAIS-RENGUS	0000	0,00
001010105			NOGENT-FELLES	PUITS DE L'ALLONGE	0000	0,00
001010106			NOGENT-FELLES	LACROSSE	0000	0,00
001010107			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010108			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010109			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010110			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010111			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010112			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010113			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010114			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010115			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010116			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010117			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010118			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010119			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010120			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010121			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010122			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010123			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010124			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010125			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010126			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010127			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010128			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010129			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010130			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010131			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010132			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010133			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010134			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010135			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010136			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010137			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010138			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010139			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010140			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010141			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010142			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010143			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010144			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010145			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010146			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010147			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010148			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010149			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010150			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010151			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010152			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010153			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010154			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010155			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010156			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010157			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010158			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010159			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010160			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010161			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010162			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010163			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010164			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010165			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010166			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010167			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010168			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010169			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010170			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010171			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010172			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010173			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010174			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010175			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010176			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010177			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010178			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010179			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010180			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010181			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010182			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010183			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010184			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010185			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010186			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010187			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010188			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010189			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010190			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010191			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010192			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010193			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010194			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010195			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010196			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010197			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010198			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010199			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00
001010200			NOGENT-FELLES	SAINT-LOUIS	0000	0,00

Liste des ouvrages de la zone

INDICE_BSS	N° CA	N° AEAG	COMMUNE DE L'OUVRAGE	LIEU DE POMPAGE	Volume prélevé année en cours	Volume prélevable admissible	Réduction (%)
	IIABM_152		Saverdun	Le Roussel	48000	48000	0,00
			Mazères		0	0	0,00
			CALMONT	la bourdette	30000	30000	0,00
			CALMONT	Le metchou	30000	30000	0,00
			CALMONT	Bouchet	30000	30000	0,00
			CALMONT	Terraqueuse	100000	100000	0,00
			CALMONT	Catala	90000	90000	0,00
			CALMONT	fortanier C	43000	43000	0,00
			CALMONT	Catala	90000	90000	0,00
			CALMONT	fortanier H	43000	43000	0,00
			CALMONT	Le syndic	50000	50000	0,00
			CALMONT	Le duc Daganc	80000	80000	0,00
			CALMONT	La bourdettes	15000	15000	0,00
			CALMONT	Enframines	70000	70000	0,00
			CALMONT	L'Hoste	30000	30000	0,00
			CALMONT	Fenuillet	249000	249000	0,00
			CALMONT	montplaisir maison	25000	25000	0,00
			CALMONT	Sauret	249000	249000	0,00
			CALMONT	montplaisir fumier	40000	40000	0,00
			CALMONT	le cordier gros puit	150000	150000	0,00
			CALMONT	Sauret	249000	249000	0,00

Illustration 47– Fenêtre de synthèse par zone

6.3.3. Option "GESTION REGULEE"

Cette option permet de choisir un scénario climatique à partir des pluies efficaces réelles sur la période hivernale (septembre à mars) et à partir d'une tendance d'évolution climatique sur la période printanière (avril, mai, juin).

Choix du type climatique (ou recharge hivernale)

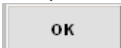
Lors du choix de l'option "Gestion régulée", une boîte de dialogue apparaît demandant de saisir la somme des pluies efficaces calculées sur la période septembre-mars (cf. Illustration 48).



Illustration 48 – Boîte de saisie des données de pluies efficaces hivernales

Par simplification, l'utilisateur n'ayant pas toujours les éléments suffisants pour établir un bilan hydrique détaillé, la notion de pluie efficace est restreinte à sa plus simple expression, soit à **la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP)**.

La zone d'étude étant marquée par une gradation des précipitations efficaces entre le nord et le sud de la plaine, un bouton d'aide a été rajouté pour permettre à l'utilisateur de sélectionner les données de la station météorologique (station de Blagnac, de Lherm ou de Palaminy et de Clarac) la plus adaptée en fonction de la zone à gérer (cf. Illustration 49).

Une fois la station choisie, l'utilisateur peut saisir le cumul des pluies efficaces et appuyer sur le bouton 

A noter que les données météorologiques nécessaires à l'utilisation de cette option (précipitations et ETP décadaires) pourront être recueillies auprès de Météo-France (Climathèque).

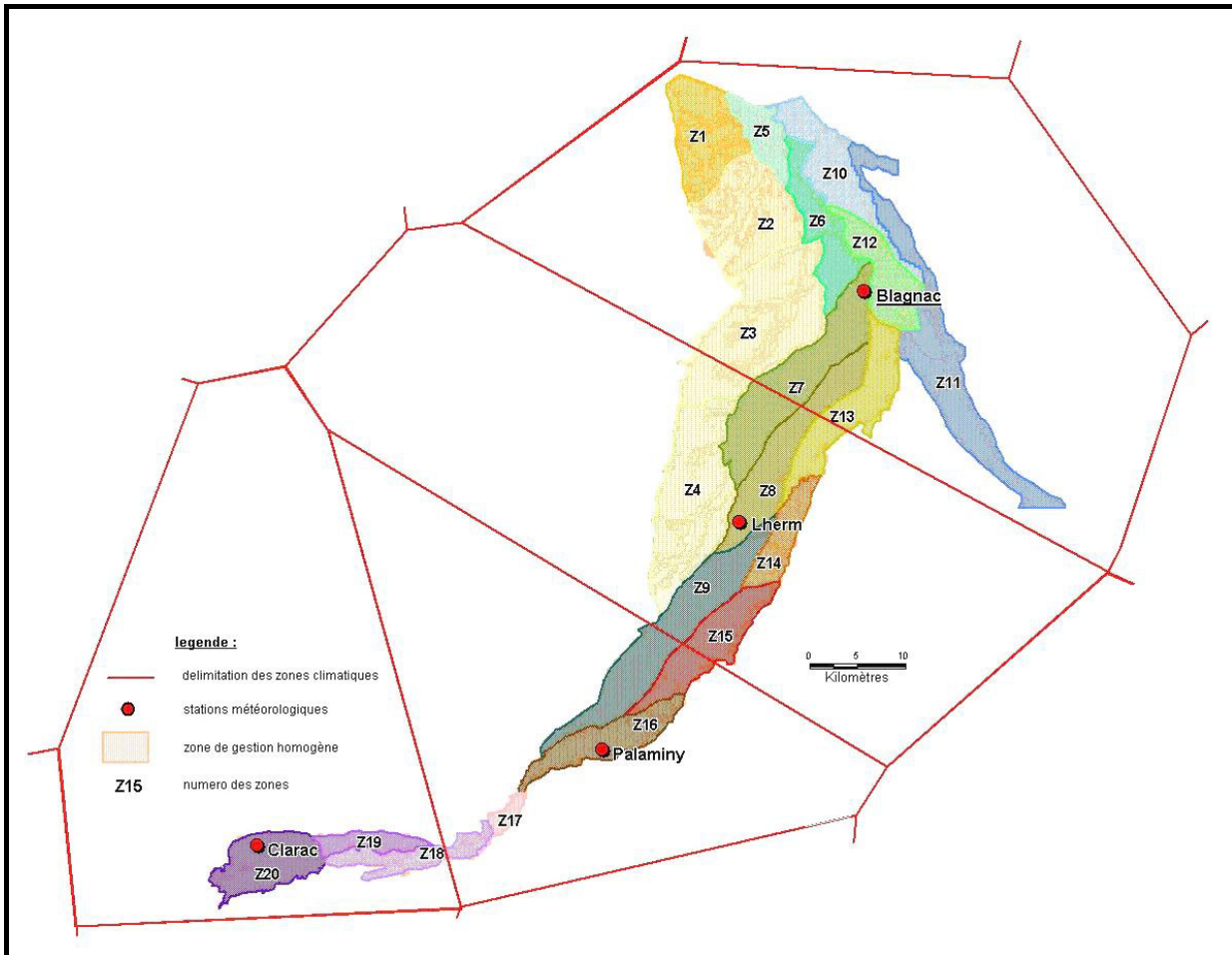


Illustration 49 – Choix de la station météorologique

Choix du scénario d'évolution (ou recharge printanière)

Une fois le type climatique défini, l'utilisateur doit choisir un scénario d'évolution printanier (avril, mai, juin) parmi les trois possibilités (déficitaire, moyen et excédentaire). Pour cela il faut sélectionner le graphique (en cliquant dessus) correspondant au scénario d'évolution choisi et appuyer sur le bouton (cf. Illustration 50).

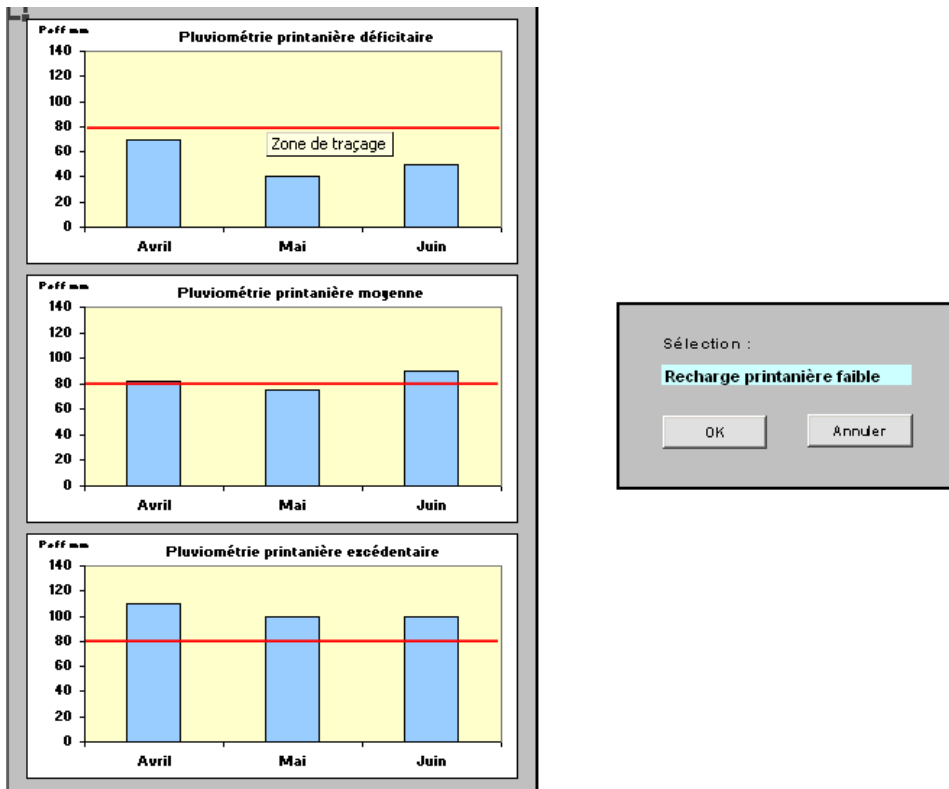


Illustration 50 – Choix du scénario d'évolution printanière

L'utilisateur bascule alors sur la carte représentant le secteur modélisé avec les huit zones de gestion. La consultation de l'une d'entre elles s'effectue comme indiqué dans le chapitre sur la Gestion anticipée.

La présentation des résultats de la zone sélectionnée est également similaire à celle décrite dans l'option précédente. Seules quelques modifications liées aux particularités de la gestion régulée ont été apportées.

Dans la fenêtre "Synthèse de la zone", deux rubriques sont ajoutées, une renseigne sur le type de recharge hivernale choisie et l'autre sur le type de la recharge printanière sélectionnée. Par exemple, pour 100 mm de pluies efficaces enregistrées entre septembre et mars et un choix d'évolution printanier déficitaire, la synthèse de la zone 4 est présentée dans l'illustration 51.

Synthèse de la zone	
N° ZONE	4
Volume TOTAL	3006000
Volume Prélevable Admissible	3400000
Réduction proposée (Oui/Non)	Non
Coefficient de réduction (%)	0,00
Nombre total de puits	44
Nombre de puits/AEP	0
Nombre de puits/INDUS	0
Nombre de puits/IRRIG	44
Gestion	régulée
Recharge hivernale	faible
Recharge printanière	faible

Illustration 51 – Synthèse de la zone – Gestion régulée

6.3.4. Enregistrement des résultats

Les fonctions d'enregistrement sont valables quelque soit l'option de gestion choisie (anticipée ou régulée).

Enregistrement des résultats pour toutes les zones

Pour un scénario climatique donné (Gestion anticipée ou régulée), l'enregistrement des résultats pour l'ensemble des zones s'effectue à partir de la fenêtre représentant la carte du secteur d'étude (cf. Illustration 52).

Le bouton permet d'enregistrer les résultats dans un fichier Excel.

En fonction du scénario sélectionné, un nom de fichier est proposé par défaut au moment de l'enregistrement. Le tableau de correspondance entre le nom du fichier enregistré et le scénario climatique choisi est présenté en annexe 10.

Le fichier enregistré est une copie de IRRIG.xls à laquelle deux champs sont rajoutés, le premier indique le pourcentage de réduction à appliquer aux prélèvements demandés, le second donne le prélèvement corrigé en fonction de ce pourcentage ("Volume Prélevable").

Dans le cas de la gestion anticipée, le nom du fichier proposé par défaut sera Irrig_00.xls, le "00" correspondant spécifiquement à ce scénario. Il est toutefois possible de choisir un autre nom de fichier.

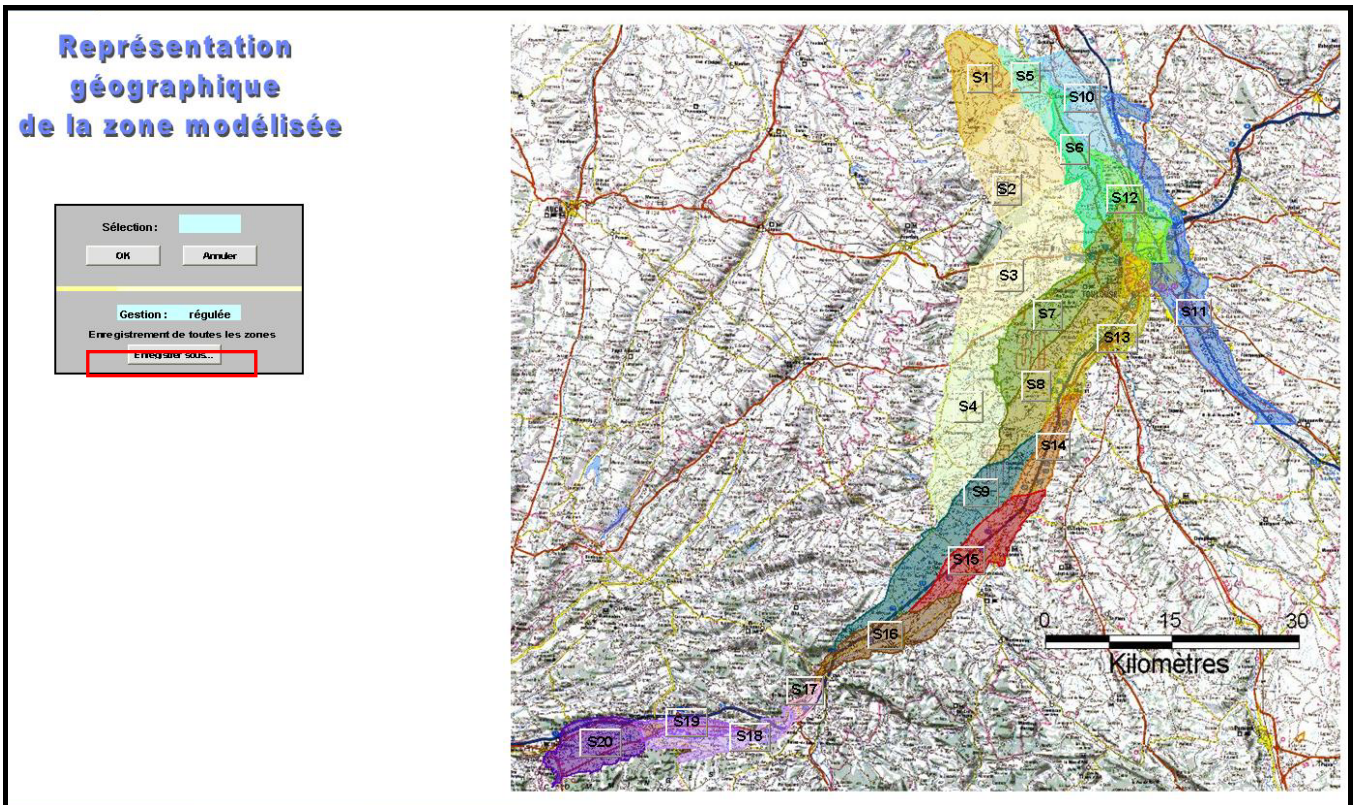


Illustration 52– Enregistrement des résultats pour toutes les zones

Enregistrement de la synthèse par zone

Il est également possible d'exporter la synthèse de la fenêtre correspondant aux résultats au format texte (.txt) (cf. Illustration 53). En fonction de l'option (anticipée ou régulée) et de la zone choisie, un nom de fichier est proposé par défaut (cf. annexe 10).

Synthèse de la zone	
N° ZONE	4
Volume TOTAL	3006000
Volume Prélevable Admissible	3400000
Réduction proposée (Oui/Non)	Non
Coefficient de réduction (%)	0,00
Nombre total de puits	44
Nombre de puits/AEP	0
Nombre de puits/INDUS	0
Nombre de puits/IRRIG	44
Gestion	régulée
Recharge hivernale	faible
Recharge printanière	faible

Exporter synthèse zone

Illustration 53 – Export de la synthèse d'une zone

7. Délimitation de la nappe d'accompagnement de la Garonne

7.1. RAPPELS REGLEMENTAIRES

Les prélèvements effectués dans les aquifères en relation avec les cours d'eau privent ceux-ci d'une partie significative des apports latéraux contribuant à leurs écoulements de base. En effet, lors d'un pompage deux phénomènes sont à prendre en considération, le premier, à impact direct, est celui de la réalimentation induite par le pompage empruntant de l'eau à la rivière et le second, correspondant à un « manque à gagner », est de prélever une partie du flux transitant dans les alluvions et donc privant le cours d'eau de cet apport.

Afin de maintenir un débit minimum dans les cours d'eau, la réglementation française assimile les prélèvements dans ces aquifères à ceux réalisés dans le cours d'eau lui-même. Le texte de référence est le **décret n°93-743 du 29 mars 1993** relatif à la nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en application de l'article 10 de la loi sur l'eau du 03 janvier 1992. Dans le texte du décret, les aquifères présentant une relation forte avec des cours d'eau ont été dénommés **nappes d'accompagnement**.

La réglementation stipule ainsi que dans la nappe d'accompagnement :

- les prélèvements sont soumis à **autorisation** pour les débits supérieurs à **5%** du débit d'étiage du cours d'eau,
- les prélèvements sont soumis à **déclaration** pour les débits compris entre **2 et 5%** du débit d'étiage du cours d'eau

Cette notion a été introduite dans un souci de protection du débit des cours d'eau en période d'étiage en fixant les seuils d'autorisation et de déclaration des prélèvements en fonction du débit demandé. Par ailleurs, en cas d'insuffisance temporaire de la ressource, les pompages effectués dans la nappe d'accompagnement sont les premiers concernés par les arrêtés préfectoraux limitant l'usage de l'eau.

Par arrêté préfectoral, la nappe alluviale de la Garonne a également été déclarée « zone de répartition quantitative des eaux ». Cette réglementation concerne les secteurs présentant une insuffisance autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins. Cela implique que tout prélèvement, qu'il soit en rivière ou dans la nappe est soumis à :

- **autorisation** si le débit de prélèvements est supérieur à **8 m³/h**,
- **déclaration** si le débit de prélèvement est inférieur à **8 m³/h**.

Ces deux outils réglementaires ayant des vocations différentes, la délimitation de la nappe d'accompagnement reste néanmoins importante dans le cadre de la préservation des débits d'étiage des rivières.

7.2. PRINCIPE DES METHODES CHOISIES

En première approche, deux méthodes ont été utilisées pour la délimitation de la nappe d'accompagnement : la méthode dérivée de l'équation de Theis, développée par le BRGM en 1995 (R 38586) et la méthode du tracé des isochrones à l'aide du modèle hydrodynamique.

7.2.1. Principe de la méthode dérivée de Theis

Principe de la méthode

La méthode choisie permet d'évaluer les quantités d'eau indirectement soutirées à un cours d'eau en période d'étiage, par l'exploitation de captages dans une nappe en connexion hydraulique avec celui-ci.

Cela revient à définir la nappe d'accompagnement lorsqu'un certain seuil est dépassé. Cet impact relatif peut être quantifié par le rapport du débit instantané provenant de la rivière au débit de pompage (Q_r/Q_p) ou par le rapport du volume d'eau soutiré à la rivière au volume total pompé (V_r/V_p), pour un nombre de jours donné.

Ces rapports sont fonction des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe (transmissivité et coefficient d'emmagasinement), de la distance du pompage au cours d'eau et de la durée du prélèvement.

Par conséquent, pour une nappe donnée dont les caractéristiques hydrodynamiques sont connues, la limite de la nappe d'accompagnement peut être déterminée en se fixant un seuil d'impact « acceptable » (exprimé en % à partir de V_r/V_p ou de Q_r/Q_p) et un temps de manifestation choisi.

Ce seuil d'impact acceptable α est fonction de la configuration de la zone étudiée :

- nappe semi-infinie : nappe de grande dimension uniquement limitée par une rivière, constituant pour la nappe une limite à potentiel imposé,
- limite étanche et parallèle : coteau imperméable constituant une limite à flux nul parallèle à la rivière,
- limite à potentiel imposé : seconde étendue d'eau (rivière, étang, lac....) en contact avec la nappe, constituant une limite à potentiel imposé parallèle à la rivière étudiée.

Dans le cas de la plaine alluviale de la Garonne, deux types de configuration sont à prendre en compte selon les secteurs. Des limites étanches et parallèles sont

distinguées en bordure de la plaine alluviale, et une limite à potentiel imposé est considérée dans la partie centrale.

Ainsi, les outils de calcul, tous dérivés de la formule de Theis, adaptée à l'aide de la théorie des images, permettent de calculer la distance d du point de pompage à la rivière telle que le seuil d'impact α soit atteint au temps t choisi.

L'illustration 54 récapitule les caractéristiques des puits fictifs, images successives du forage réel P1 (situé à la distance d de la rivière) par rapport à deux lignes parallèles.

Forage	Débit	Distance à la rivière	Obtention
P1	+ Q	+ d	Puits réel
P2	- Q	- d	Image rivière de P1
P3	+ Q	2.l-d	Image limite coteau ou à potentiel de P1
P4	- Q	- (2.l-d)	Image rivière de P3
P5	+ Q	2.l-d	Image limite coteau ou à potentiel de P2
P6	- Q	- (2.l-d)	Image rivière de P5
.....

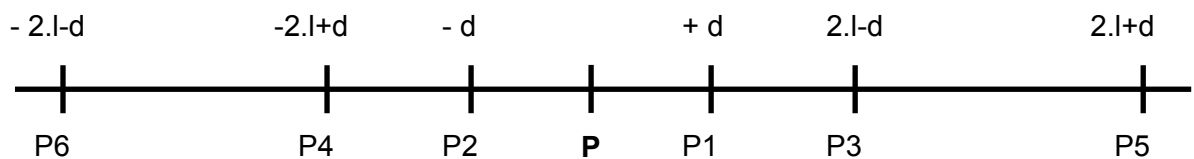


Illustration 54 – Caractéristiques des puits fictifs par rapport à 2 lignes parallèles

En présence d'une limite étanche et parallèle, le rapport du volume extrait à la rivière au volume total pompé pendant la même durée s'écrit :

$$V_r/V_p = 4i^2 \operatorname{erfc}(\sqrt{u}) + \sum (-1)^n \cdot \{ 4i^2 \operatorname{erfc}[(2.n.\alpha + 1).\sqrt{u}] - 4i^2 \operatorname{erfc}[(2.n.\alpha - 1).\sqrt{u}] \}$$

avec :

$u = (d^2.S) / (4.T.t)$ et n variant de 1 à l'infini

$i^2 \operatorname{erfc}(z)$ intégrale répétée 2 fois de la fonction $\operatorname{erfc}(z)$ (Abramowitz, 1970)

T : transmissivité en m^2/s

S : coefficient d'emménagement sans unité

d : distance du point de pompage à la berge

t : durée du pompage

En présence d'une limite à potentiel imposé, le rapport du volume extrait à la rivière au volume total pompé pendant la même durée s'écrit :

$$V_r/V_p = 4i^2 \operatorname{erfc}(\sqrt{u}) + \sum \{ 4i^2 \operatorname{erfc}[(2.n.\alpha. + 1).\sqrt{u}] - 4i^2 \operatorname{erfc}[(2.n.\alpha. - 1).\sqrt{u}] \}$$

avec $u = (d^2.S) / (4.T.t)$, et n variant de 1 à l'infini

Des abaques sont disponibles pour effectuer le calcul, point par point, des profils de pourcentage d'eau extrait du cours d'eau en fonction de la distance (Collins, 1958 ; BURGEAP-ENSMP, 1969 ; Houdaille et de Marsily, 1969 ; Lelièvre, 1969). Par la suite, des outils informatiques ont été mis en œuvre pour faciliter la démarche, notamment par une programmation directe des formules analytiques (BRGM, 1996).

Choix du seuil d'impact et du temps de manifestation

Compte tenu de l'esprit de la loi sur l'Eau du 03 janvier 1992, la manière de mettre en œuvre ce processus peut être adaptée à une protection réelle des débits d'étiage des cours d'eau en prenant plus particulièrement en considération les prélèvements agricoles, générateurs le plus souvent d'impacts lourds, effectués lors des épisodes de basses eaux.

Ainsi dans la plaine alluviale de la Garonne, les pompages pour l'irrigation sont réalisés sur une période équivalente à environ 3 mois (généralement de la fin du mois de juin jusqu'à la fin septembre), soit approximativement 90 jours. Dans le modèle, les prélèvements sont considérés de mai à fin septembre, mais l'essentiel des pompages a lieu en Juin, Juillet et Aout (environ 80 % du volume pompé total), ce qui correspond à la période de 90 jours.

Concernant l'appréciation d'un début d'impact sensible ou « significatif », ce concept entre dans le domaine du subjectif. Il vient assez naturellement à l'esprit à se référer à un seuil faible, en pratique quelques %. En effet, il est déjà question d'impact lorsque 5% du débit pompé ont été soutiré à la rivière. Inversement, une valeur trop faible conduira à des distances importantes (grande largeur assignée à la nappe d'accompagnement), engendrant des surfaces trop vastes pour être gérées efficacement de manière conjointe avec la rivière.

Un seuil d'impact de 1% a été choisi de manière consensuelle avec les différents acteurs de la gestion de l'eau, valeur suffisamment faible pour ne pas poser de problème aux rivières à faibles débits.

7.2.2. Méthode du tracé des isochrones

Le modèle hydrodynamique maillé réalisé avec le logiciel MARTHE® permet de tracer des trajectoires de particules d'eau en fonction du temps. Ainsi, en identifiant des

points d'arrivée, le modèle peut tracer des trajectoires inverses, en tenant compte des sens d'écoulement et de l'ensemble des paramètres géométriques et hydrodynamiques entrés et calés.

La période d'irrigation la plus intense ayant été établie à 3 mois, soit 90 jours, le modèle a été paramétré pour tracer les trajectoires inverses, c'est à dire de remontée du courant d'eau souterraine, sur une période de 9 pas de temps décennales. Pour cela, 150 points d'arrivée des trajectoires ont été placés en bordure de Garonne, en fonction de la configuration géologique et de la présence ou non d'alluvions. Dans la majorité des cas, ces points ont dû être placés dans une maille voisine de la rivière. En effet, dans la zone d'étude, la Garonne est très encaissée dans les formations molassiques, sur une grande partie de son linéaire. Aussi la relation nappe-rivière se réduit à un échange unilatéral de la nappe vers le cours d'eau. Dans ce cas, le modèle ne peut tracer une trajectoire d'un point situé sur la rivière.

Aussi, dans le contexte hydrogéologique de la nappe alluviale de la Garonne en Haute-Garonne, la définition de la nappe d'accompagnement se réduit uniquement à la notion de « manque à gagner » pour le cours d'eau (cf. paragraphe 7.1).

Des simulations ont donc été réalisées en régime transitoire sur 9 pas de temps, et pour 3 scénarios climatiques :

- le scénario 1, représentant un état de recharge extrême sec,
- le scénario 3, représentant un état de recharge moyen,
- le scénario 6, représentant un état de recharge extrême humide.

Pour chaque scénario, le tracé de la courbe enveloppe des 150 trajectoires définit l'isochrone 90 jours.

7.3. DELIMITATION DE LA NAPPE D'ACCOMPAGNEMENT

7.3.1. Données utilisées et hypothèses de calcul pour la méthode de Theis

La délimitation des nappes d'accompagnement nécessite un niveau de connaissance élevé sur le fonctionnement hydrodynamique des nappes et en particulier de disposer de données sur la transmissivité (T), les coefficients d'emménagement (S) et la diffusivités (T/S) des formations étudiées.

La construction du modèle de simulations des écoulements souterrains dans la plaine alluviale de la Garonne a nécessité de connaître un certain nombre de paramètres pour chaque maille de calcul. Il s'agit notamment de la géométrie du réservoir, de la piézométrie de la nappe, de la perméabilité de l'aquifère ou des volumes prélevés au système.

Ainsi, en complément des données existantes, cinq pompages d'essais ont été entrepris dans des zones où peu d'informations sur les paramètres hydrodynamiques

de la nappe (transmissivité et coefficient d’emménagement) étaient disponibles (cf. Rapport BRGM/RP-54969-FR).

Différentes zones de perméabilité et de coefficients d’emménagement ont été définies en fonction d’une part, des résultats des pompages d’essais, et d’autre part, des données recueillies sur la géologie de la plaine et sur les épaisseurs de la nappe dans les différents secteurs.

Cette répartition des paramètres hydrodynamiques résulte également du travail de calage ayant permis d’ajuster la piézométrie observée (isopièzes et chroniques) à celle calculée par le modèle.

Les valeurs de transmissivité majoritairement observées dans la zone d’étude, obtenues au terme du calage du modèle, varient entre 4.10^{-4} et 1.10^{-2} m²/s. Les données sur les coefficients d’emménagement sont comprises entre 1 et 25 %, valeurs généralement rencontrées pour les nappes libres en milieu alluvial.

La délimitation de la nappe d’accompagnement a donc été effectuée en prenant d’une part, en considération la répartition des paramètres hydrodynamiques et d’autre part, en fonction des deux types de configurations (présence d’une limite étanche ou à potentiel imposé parallèle au cours d’eau) présentes dans la plaine alluviale. Neuf zones présentant des transmissivités et des coefficients d’emménagement relativement homogènes ont été créés. Ces zones sont présentées dans l’illustration 55 ci-dessous.

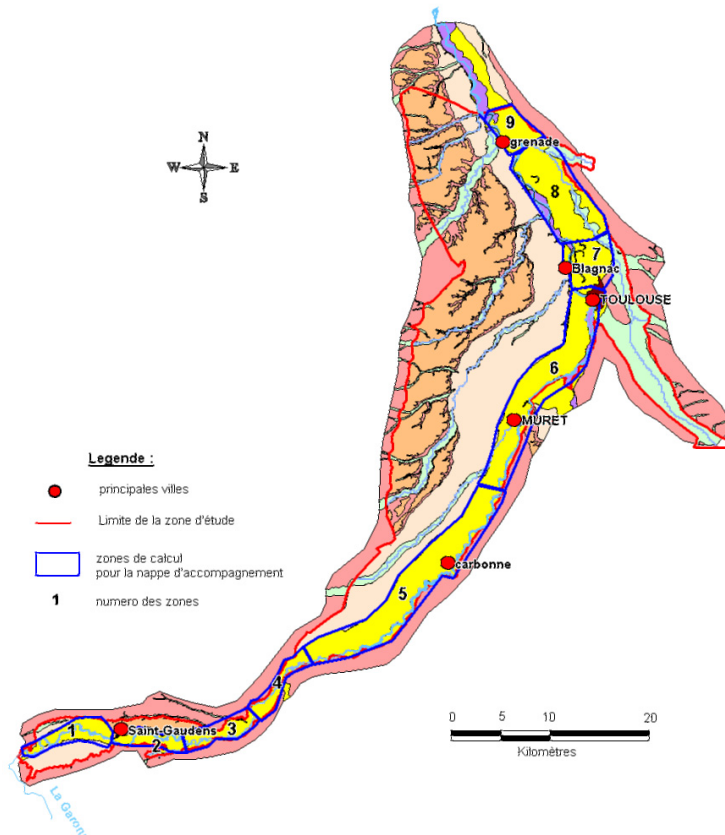


Illustration 55 – Carte des zones constituées pour l’application de la méthode de Theis

Les calculs détaillés au chapitre 6.2. ont ainsi été engagés distinctement sur les neuf zones pour une période de référence de 90 jours et un seuil d'impact de 1%.

7.3.2. Tracé des isochrones avec le modèle hydrodynamique

La méthode utilisée est décrite dans le paragraphe 7.2.2.

Pour chaque scénario, le tracé de la courbe enveloppe des 150 trajectoires définit l'isochrone 90 jours. Le tracé entre les scénarios de recharge varie plus ou moins en fonction des secteurs et notamment des sens d'écoulement et des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère.

La courbe enveloppe de l'isochrone 90 jours a été tracée en tenant compte des trajectoires les plus longues sur les 3 scénarios de recharge, c'est-à-dire en considérant le tracé de la nappe d'accompagnement la plus large possible.

7.3.3. Comparaison des deux méthodes et tracé de la nappe d'accompagnement

Les résultats des deux méthodes ont été superposés dans l'illustration 56 ci-après.

La nappe d'accompagnement réalisée avec la méthode de Theis n'a pas été retravaillée et son extension n'est pas contrainte par l'affleurement des formations alluviales.

L'illustration 56 montre que la nappe d'accompagnement est globalement plus étendue avec la méthode de Theis. La zone la plus étroite, située à Boussens, fait 400 m de large et la zone la plus large, située au nord de Toulouse, fait 8,9 km de large.

La nappe d'accompagnement définie avec l'isochrone 90 jours fait 900 m de large dans le secteur le plus étroit (Boussens) et 3,8 km de large dans les secteurs les plus importants (nord de Toulouse et Portet-sur-Garonne).

Au vue des approximations supplémentaires qui ont été nécessaires à l'application de la méthode de Theis, et du tracé très étendu de la nappe d'accompagnement qui en découle, il a été décidé de ne pas tenir compte de cette méthode dans la délimitation finale.

La nappe d'accompagnement a donc été définie à partir du calcul des trajectoires sur 90 jours, en considérant les trajectoires le plus longues. Très localement, la méthode de Theis a permis d'ajuster le tracé. Elle concerne ainsi exclusivement les formations alluvionnaires des basses plaines, parfois dans leur intégralité, parfois sur la moitié de sa largeur.

La nappe d'accompagnement est présentée dans l'illustration 57 sur fond de carte géologique simplifiée et en annexe 11 sur fond de carte IGN à 1/250 000.

**DELIMITATION DE LA NAPPE D'ACCOMPAGNEMENT
DE LA GARONNE EN HAUTE-GARONNE
COMPARAISON DES DEUX METHODES UTILISEES**

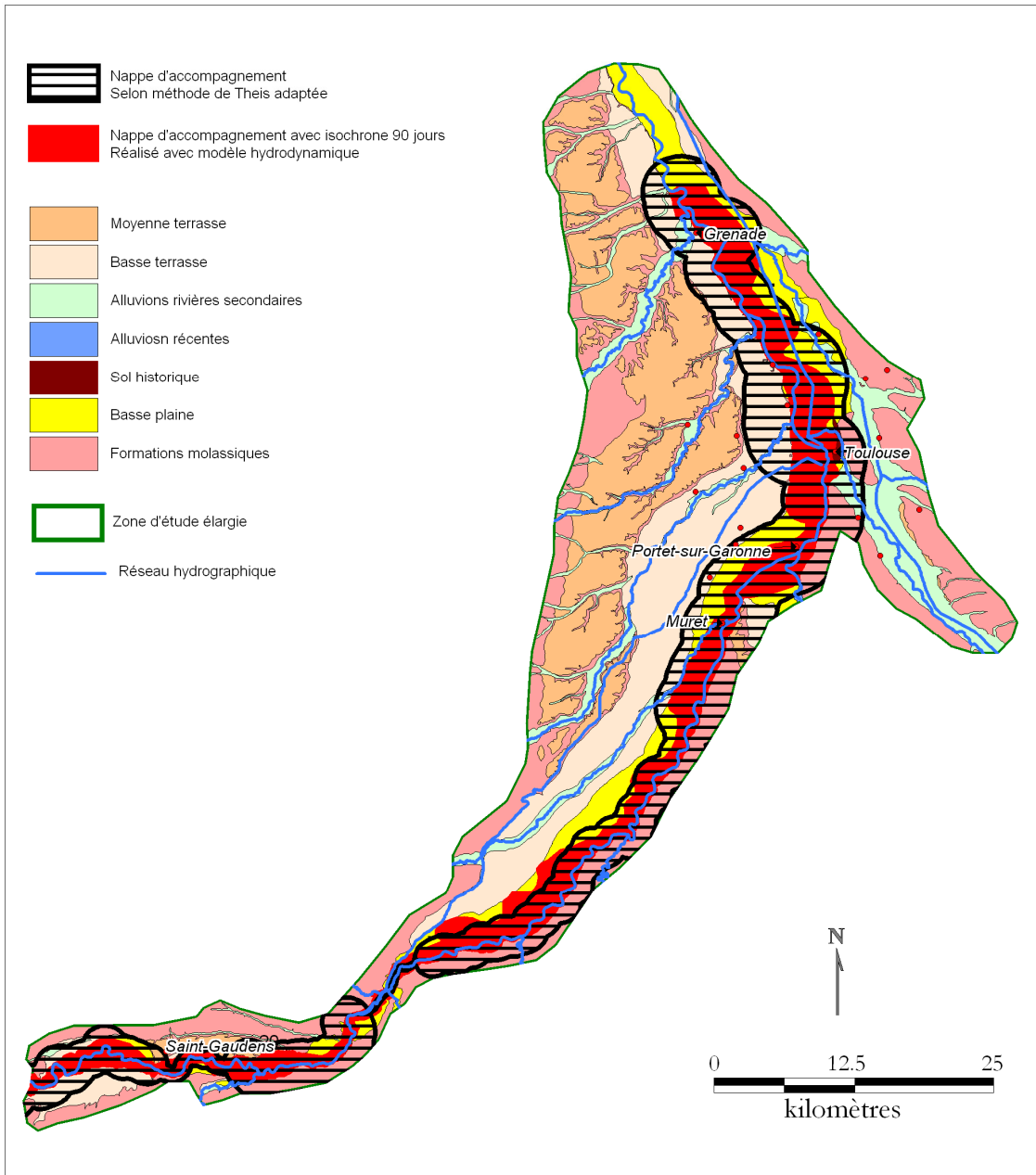
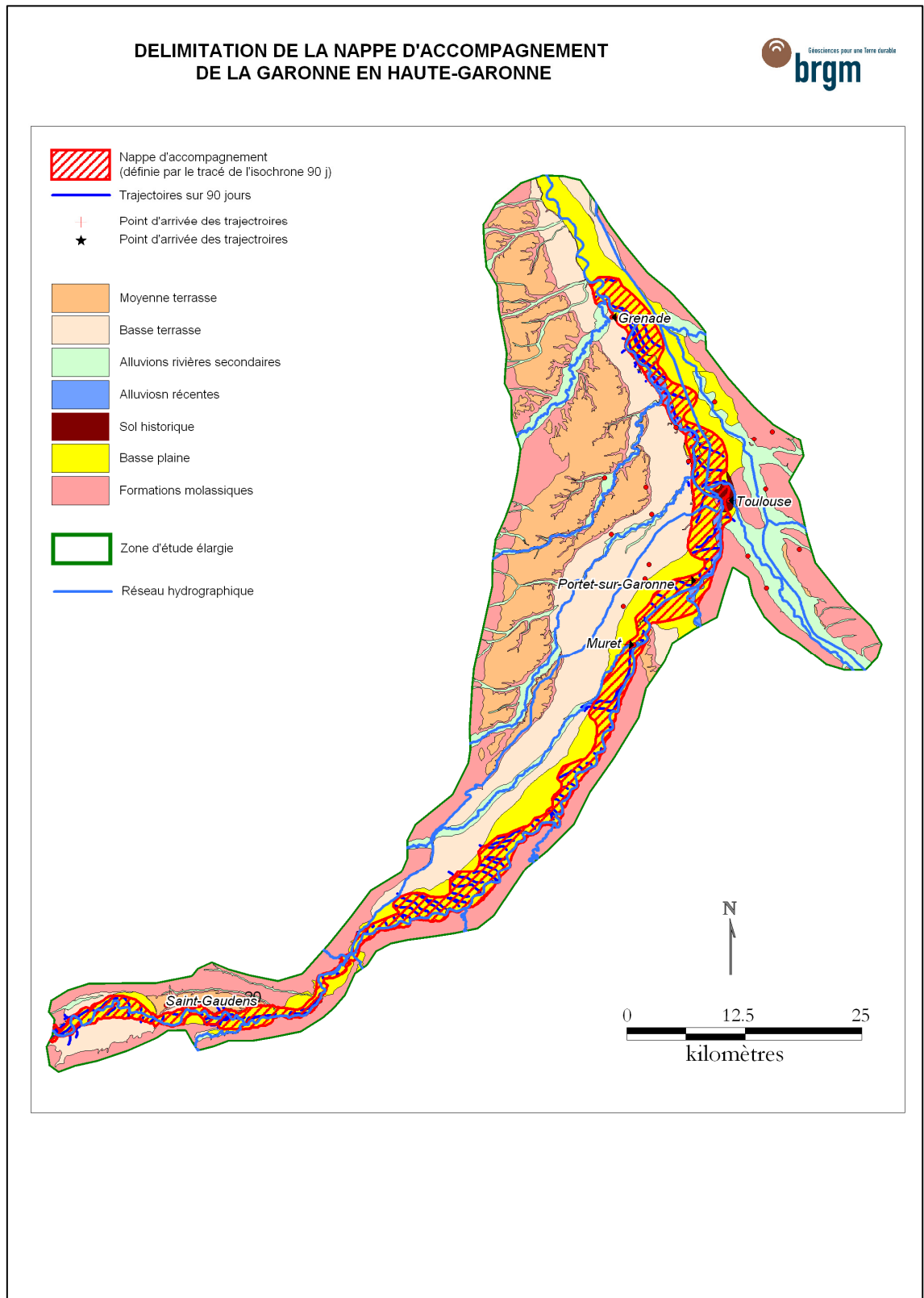


Illustration 56 – Comparaison des deux méthodes pour le tracé de la nappe d'accompagnement



8. Conclusion

La troisième phase du projet de modélisation de la nappe alluviale de la Garonne a permis d'une part, la mise en place d'un outil de gestion, destiné aux services chargés de la Police de l'Eau dans les départements de la Haute-Garonne, pour la délivrance des autorisations de prélèvements en période d'irrigation et d'autre part, la délimitation de la nappe d'accompagnement de la Garonne en Haute-Garonne.

Ces deux outils sont issus de la construction préalable d'un modèle mathématique permettant de simuler les écoulements de la nappe alluviale de la Garonne et de ses affluents. Ce dernier a été calé en régime transitoire sur neuf années (de 2000 à 2008) au pas de temps décadaire, le domaine modélisé étant inscrit dans une grille de mailles carrées de 250 mètres de côté.

Le calage du modèle a été effectué à partir d'une répartition des champs de perméabilité, d'emmagasinement (porosité efficace) et de recharge de l'aquifère alluvial. L'intégration du réseau hydrographique a permis d'évaluer les échanges existants entre la nappe et les cours d'eau de la zone étudiée. Au terme de cette opération, la piézométrie des différents points de contrôle répartis dans la plaine (16 points d'eau suivis dans le cadre du projet complétés par 8 points de mesures appartenant au réseau quantitatif de gestion patrimoniale de Midi-Pyrénées) est globalement bien restituée tant en termes de phase, d'amplitude et de pente des courbes.

Le bilan des flux sur la période de calage permet de mettre en évidence d'une part, la prédominance de l'alimentation du système par l'infiltration pluviale et d'autre part, l'importance du drainage de la nappe par l'ensemble des rivières. L'exploitation actuelle de l'aquifère alluvial est peu marquée au regard de la ressource renouvelable dans les basses et moyennes terrasses. L'exploitation, tous usages confondus, est par contre beaucoup plus importante dans la plaine basse entre Muret et Martres-Tolosane et nécessiterait, selon l'outil de gestion, des réductions de débit d'exploitation pour l'irrigation en année hydrologique moyenne.

La délimitation de la nappe d'accompagnement, a été définie par l'utilisation combinée de deux méthodes : le tracé des isochrones de 90 jours avec le modèle en régime transitoire, pour des périodes hydroclimatiques contrastées, et la méthode de Theis, se référant à un impact relatif sur le cours d'eau, correspondant au dépassement d'un certain seuil. Le choix de l'isochrone et du seuil d'impact a été fait par les services de la DDEA 31.

Dans le secteur d'étude, les pompages pour l'irrigation sont réalisés sur une période équivalente à environ 3 mois (généralement de la fin du mois de juin jusqu'à la fin septembre), soit approximativement 90 jours. Cette durée a donc été prise en considération pour établir la délimitation afin de protéger les débits d'étiage de la Garonne.

Un seuil d'impact de 1% a été choisi de manière consensuelle avec les différents acteurs de la gestion de l'eau, valeur suffisamment faible pour ne pas poser de problème aux rivières à faibles débits.

La comparaison des deux méthodes et des incertitudes induites a montré que la méthode de l'isochrone 90 jours était la plus précise. La nappe d'accompagnement a donc été définie à l'aide du modèle hydrodynamique. Le tracé final montre une distance comprise entre 900 et 3 800 mètres de la Garonne selon les secteurs considérés. Elle concerne ainsi exclusivement les formations alluvionnaires des basses plaines, parfois dans leur intégralité, parfois sur la moitié de sa largeur.

En complément de cette délimitation, le modèle mathématique a permis de simuler différents scénarios climatiques (année décennale sèche, quinquennale sèche et humide et année moyenne) afin de calculer des volumes prélevables admissibles (VPA) pour les vingt zones hydrogéologiques homogènes définies sur le domaine modélisé.

L'outil de gestion a ensuite été développé sur le principe d'une utilisation sous la forme de deux options. Une première consultation détermine des VPA dans la nappe sur la base d'un scénario de recharge hivernale et printanière moyenne (Gestion dite « Anticipée »). La seconde option fournit les VPA en fonction d'une part, de la recharge hivernale observée et d'autre part, d'une évolution printanière choisie par l'utilisateur.

En comparaison des volumes prélevés annuellement entre 2000 et 2009 à l'échelle de la plaine alluviale, estimés selon les années entre environ 20 et 35 millions de m³, les valeurs de VPA obtenues sont suffisantes pour satisfaire les demandes agricoles dans la plupart des zones. Des problèmes de disponibilité de la ressource sont néanmoins observés dans les secteurs 14, 15 et 16 (de Muret à Boussens), où l'exploitation pour l'AEP et l'industrie sont importantes. Aussi, malgré les réserves exploitables importantes, des demandes croissantes en prélèvements agricoles sur ces zones pourraient être contraintes par cette disponibilité.

Dans le détail, il apparaît qu'à surface égale, la disponibilité en eau est plus importante au niveau de certaines zones correspondant aux alluvions des basses plaines de la Garonne. Les secteurs englobant les formations des basses terrasses sont a contrario ceux où les VPA sont les moins élevés.

Ces différents résultats font ressortir le contraste existant entre les ressources en eau de surface et en eaux souterraines sur la zone modélisée. En effet, la Garonne est un axe où des restrictions de prélèvement sont récurrentes l'été, en période d'étiage. Un PGE (Plan de Gestion des Etiages) est d'ailleurs en cours afin de rétablir l'équilibre quantitatif sur le fleuve. D'autre part, un SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) devrait s'engager prochainement pour aborder l'ensemble des problématiques de gestion de l'eau sur ce grand bassin hydrographique.

L'outil de gestion actuel ne permet pas de gérer les deux ressources de manière concomitante. Toutefois, la mise en œuvre de nouvelles simulations à partir de scénarios limitant les prélèvements en rivières et augmentant ceux en nappe dans des

secteurs ciblés pourrait être envisagée et devrait permettre d'alléger les problèmes rencontrés par ces cours d'eau en période d'étiage. Cette opération devra être entreprise en étroite collaboration avec tous les acteurs locaux en charge de la gestion des eaux (tant de surface que souterraines) dans la zone étudiée.

Par ailleurs, il est proposé de procéder à la mise à jour du modèle hydrodynamique et de l'outil de gestion environ tous les 5 ans à partir de l'intégration des nouvelles données géologiques, climatiques, de prélèvements, de piézométrie, voire de paramètres hydrodynamiques (lors de la réalisation de nouveaux pompages d'essai), acquises au cours de cette période. Cette action permettra ainsi de maintenir et d'améliorer la connaissance de cet aquifère pour une gestion optimale et durable.

.....

9. Bibliographie

Bichot F. (1995) – Délimitation des nappes d'accompagnement des cours d'eau Garonne, Dordogne, Gironde, Dropt, Dronne et Isle pour le département de la Gironde. Rapport BRGM/RP-38431-FR.

BRGM (1996) – Impact sur le débit des cours d'eau des prélèvements d'eau souterraine des nappes connexes aux rivières. Rapport BRGM R38930, 63p.

Cavaillé A. (1965) – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille **Villefranche-de-Lauragais** (1010). Orléans : BRGM. Notice explicative par A. Cavaillé (1965), 8 p. Edition BRGM.

Cavaillé A. (1965) – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille **Muret** (1009). Orléans : BRGM. Notice explicative par A. Cavaillé (1965), 6 p. Edition BRGM.

Cavaillé A. (1970) – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille **Saverdun** (1035). Orléans : BRGM. Notice explicative par A. Cavaillé (1970), 12 p. Edition BRGM.

Cavaillé A. (1970) – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille **Cazères** (1034). Orléans : BRGM. Notice explicative par A. Cavaillé (1970), 16 p. Edition BRGM.

Cavaillé A. (1976) – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille **Mirepoix** (1058). Orléans : BRGM. Notice explicative par A. Cavaillé (1976), 17 p. Edition BRGM.

Cavaillé A., Paris J.P. (1966) – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille **Pamiers** (1057). Orléans : BRGM. Notice explicative par A. Cavaillé, J.P. Paris (1966), 23 p. Edition BRGM.

Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées (1995) – Les grands ensembles morpho-pédologiques de la région Midi-Pyrénées.

Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne (1978) – Exploitation de la nappe alluviale du Crieu. Propositions pour une gestion de la ressource. Direction Départementale de l'Agriculture de l'Ariège, 144 p.

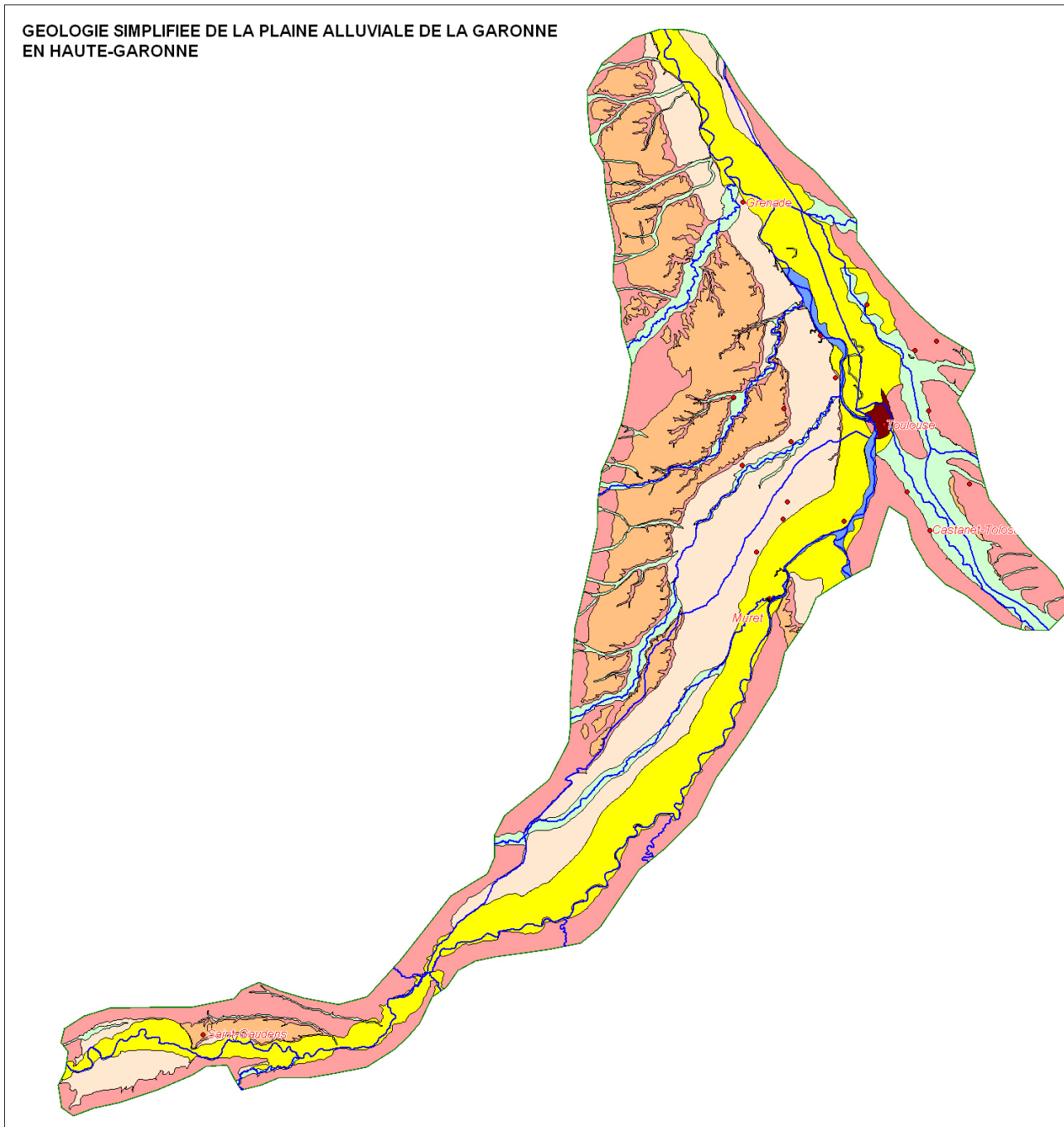
Cugny M.T. (1980) – Aptitude à l'aménagement de la plaine alluviale de l'Ariège – Facteurs hydrogéologiques et hydro-pédologiques. Thèse 3^{ème} cycle de l'Université Paul Sabatier (Toulouse).

Daum J.R., Durand F. (1995) – Méthodes d'évaluation de l'impact des prélèvements réalisés dans les nappes d'accompagnement sur les eaux superficielles associées. Rapport BRGM/RR-38586-FR, 57p.

- Dassibat C., Torrent H.** (1969) – Etude hydrogéologique de la basse vallée de l'Ariège (région de Pamiers-Saverdun). 69 SGL 094 MPY. Toulouse : BRGM, 40 p.
- Houdaille A., Marsily G. (de)** (1969) – Débits soustraits à une rivière par un pompage effectué dans une nappe alluviale. Journées H. Schoeller, Bordeaux, 2 avril 1969.
- Lelièvre R.F.** (1969) – Etude de l'influence de pompages en nappes alluviales sur le régime d'étiage du réseau superficiel. Rapport BRGM 69 SGL 073 HYD.
- Ricard J.** (1998) – Mise en place d'un outil de gestion des aquifères alluviaux et des nappes d'accompagnement dans la vallée de l'Ariège de Pamiers à la confluence de la Garonne (phase 1 – tranche 1). R 40463. Toulouse : BRGM, 17 p.
- Roche J., Soulé J.C.** (1982) – Evaluation des ressources hydrauliques de la France – Etats des connaissances et synthèse hydrogéologique du département de l'Ariège. 82 SGN 863 MPY. Toulouse : BRGM, 39 p.
- Roche J.** (1971) – Etudes hydrogéologiques dans la plaine alluviale de l'Ariège (région de Pamiers-Saverdun) – Rapport complémentaire. 71 MPY ERH 13. Toulouse : BRGM, 20 p.
- Saplaïroles M., Buscarlet E.** (2009) – Gestion des systèmes alluviaux dans le bassin Adour-Garonne. Modélisation de la nappe alluviale de l'Ariège et de l'Hers Vif – Année 3. Rapport final. BRGM/RP-57184-FR., 74 p., 42 ill., 5 ann.
- Saplaïroles M., Ghyselinck-Bardeau M., Alaux V.** (2005) – Gestion des systèmes alluviaux dans le bassin Adour-Garonne. Modélisation de la nappe alluviale de l'Ariège et de l'Hers Vif – Année 1. Rapport d'avancement. BRGM/RP-54139-FR. Ramonville-Saint-Agne : BRGM, 53 p.
- Saplaïroles M., Ollagnier.** (2006) – Gestion des systèmes alluviaux dans le bassin Adour-Garonne. Modélisation de la nappe alluviale de l'Ariège et de l'Hers Vif – Années 1 et 2. Rapport final. BRGM/RP-54969-FR. Ramonville-Saint-Agne : BRGM, 60 p.
- Soulé J.C.** (1982) – Evaluation des ressources hydrauliques de la France. Hydrogéologie de la plaine alluviale de l'Ariège. 82 SGN 868 MPY. Toulouse : BRGM, 21 p.
- Seguin J.J.** (1980) – Modélisation mathématique du transfert des pollutions azotées dans la nappe alluviale de l'Ariège. Thèse 3^{ème} cycle de l'Université Paul Sabatier (Toulouse).
- Thirion C.** (1951) – L'hydrogéologie de la grande plaine alluviale de l'Ariège entre Varilhes et le confluent de l'Ariège et de l'Hers (plaine de la Basse-Ariège). Ministère de l'Agriculture. Direction Générale du Génie Rural et de l'Hydraulique Agricole.

Annexe 1

Carte géologique simplifiée du secteur d'étude



Echelle : 1 cm - 3,5 km



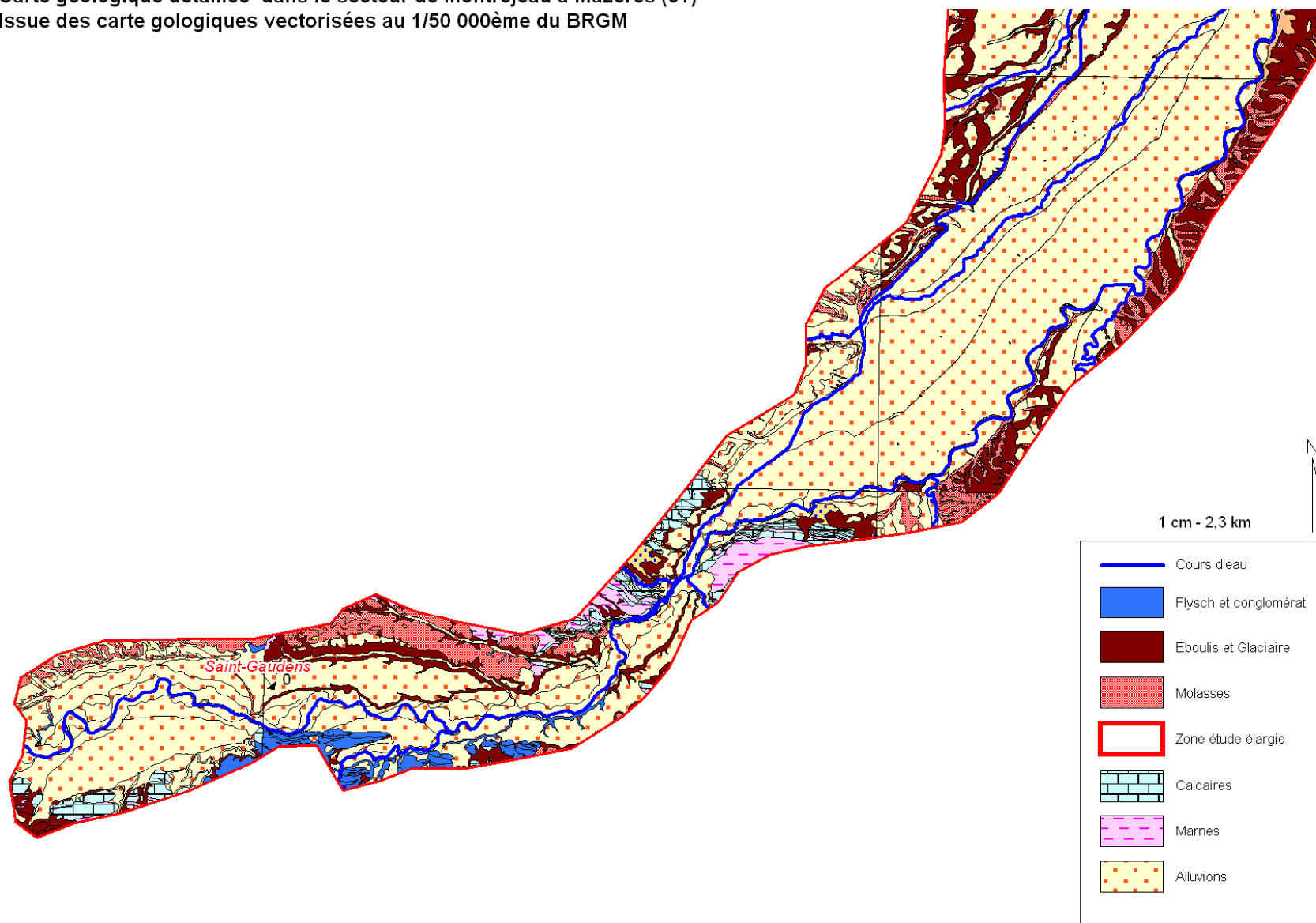
Géologie simplifiée

- Moyenne Terrasse
 - Basse terrasse
 - Alluvions des rivières secondaires
 - Alluvions récentes
 - Sol historique de Toulouse
 - Basse Plaine
 - Formations molassiques
 - Cours d'eau
 - Villes
 - Zone d'étude élargie
- Les valeurs situées à côté des points
sont les valeurs ponctuelles de C

Annexe 2

Carte géologique simplifiée du sud de la zone d'étude (de BousSENS à Montréjeau)

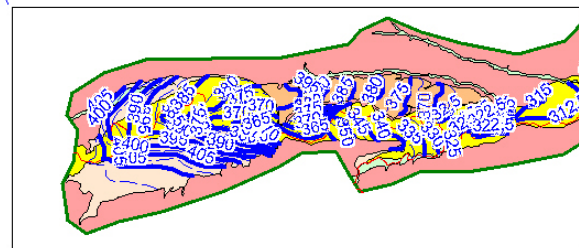
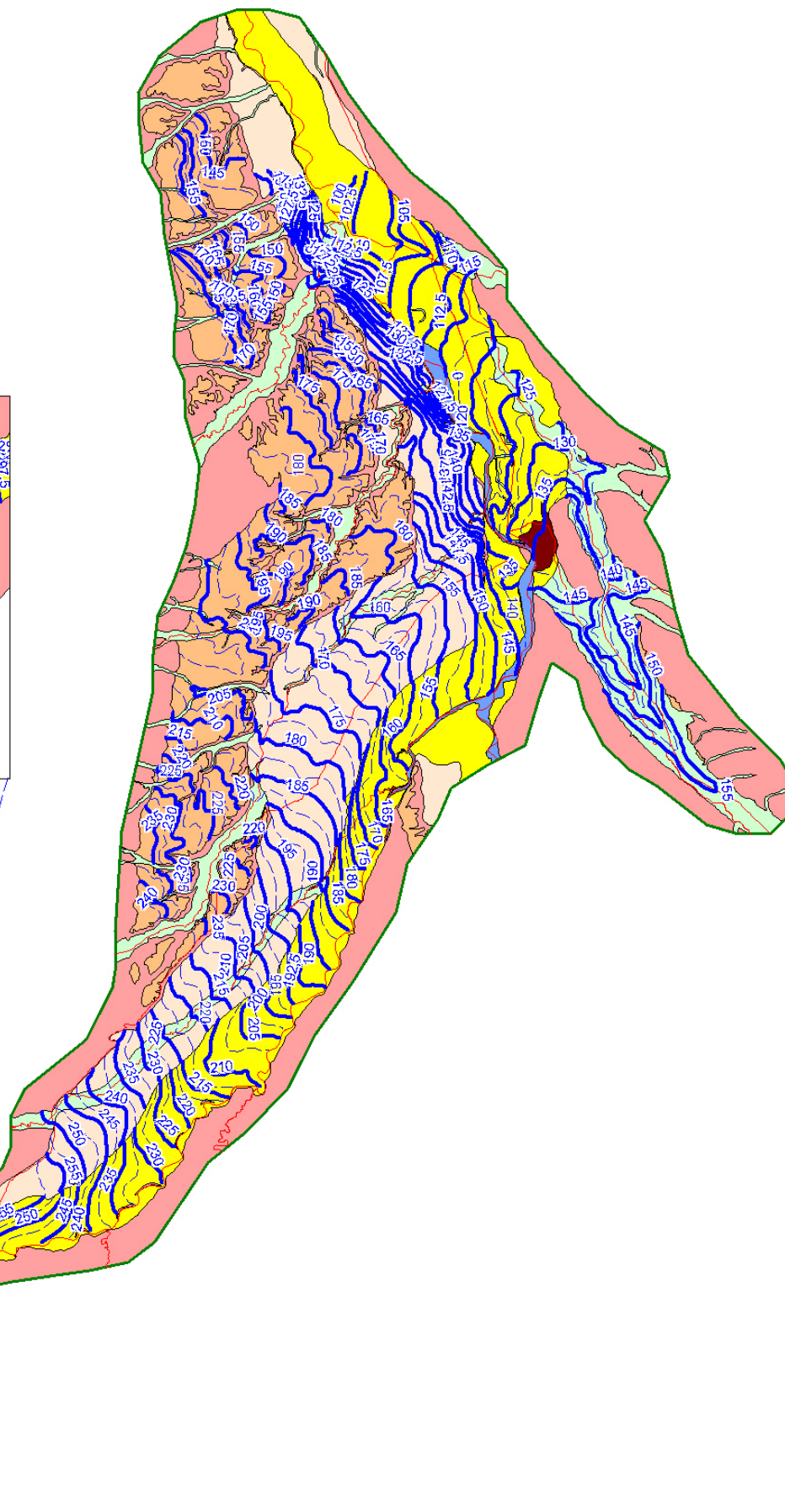
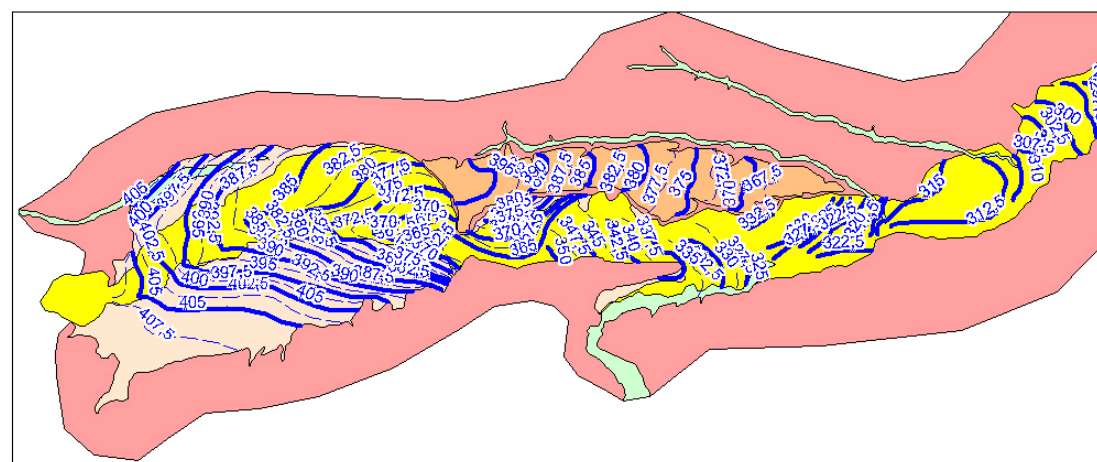
Carte géologique détaillée dans le secteur de Montréjeau à Mazères (31) -
Issue des carte gologiques vectorisées au 1/50 000ème du BRGM



Annexe 3

Cartes piézométriques de la nappe alluviale en hautes, basses et moyennes eaux

CARTE PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE ALLUVIALE DE LA GARONNE
EN PERIODE DE BASSES EAUX (OCTOBRE 2006)



— Cours d'eau et canaux

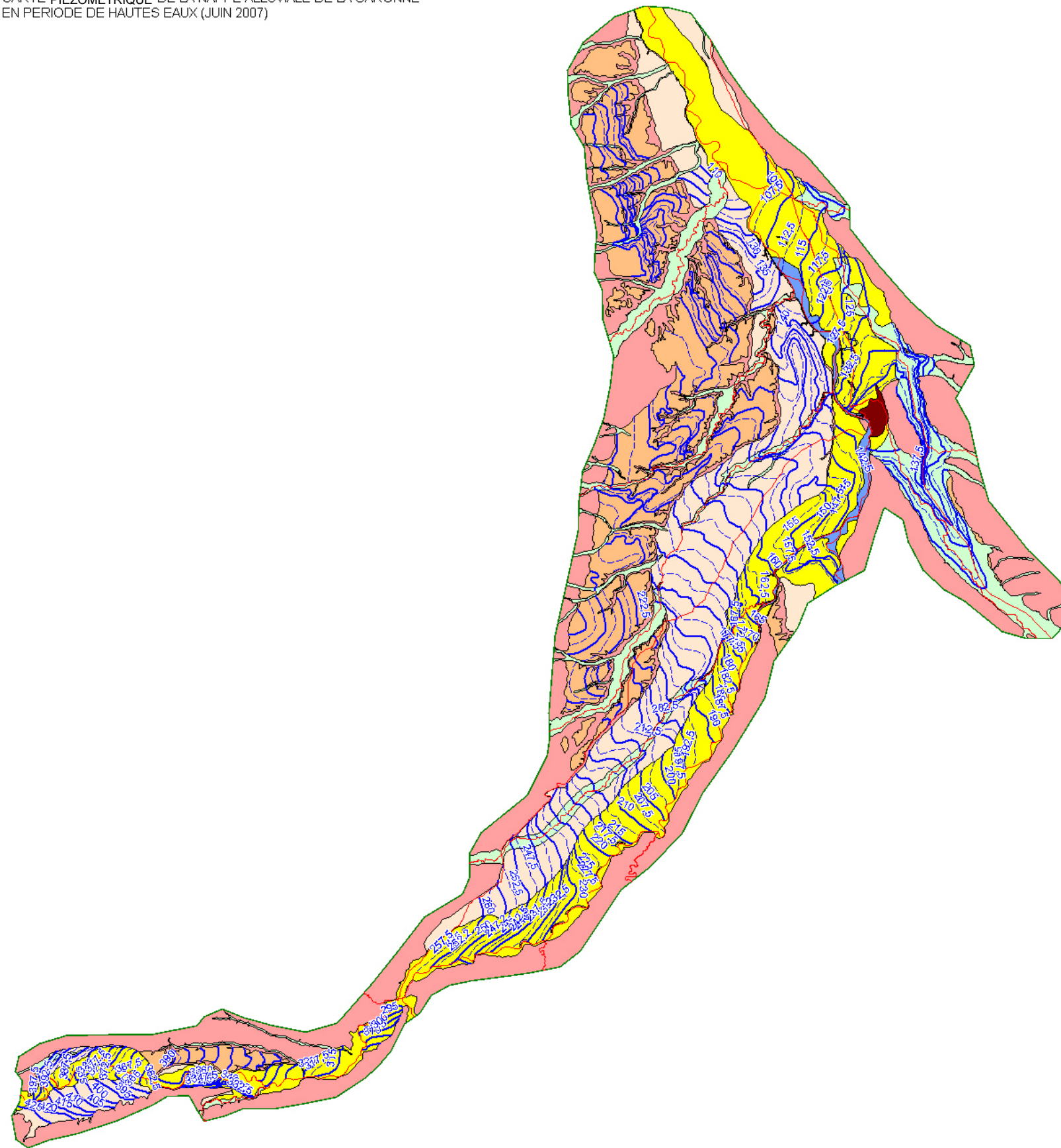
Géologie simplifiée

- Moyenne Terrasse
- Basse terrasse
- Alluvions des rivières secondaires
- Alluvions récentes
- Sol historique de Toulouse
- Basse Plaine
- Formations molassiques

Echelle : 1 cm - 3,5 km

N
↑

CARTE PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE ALLUVIALE DE LA GARONNE
EN PERIODE DE HAUTES EAUX (JUN 2007)



LEGENDE

- Isopièze (intervalle 5 m)
- - - Isopièze (intervalle 2,5 m)
- Cours d'eau et canaux

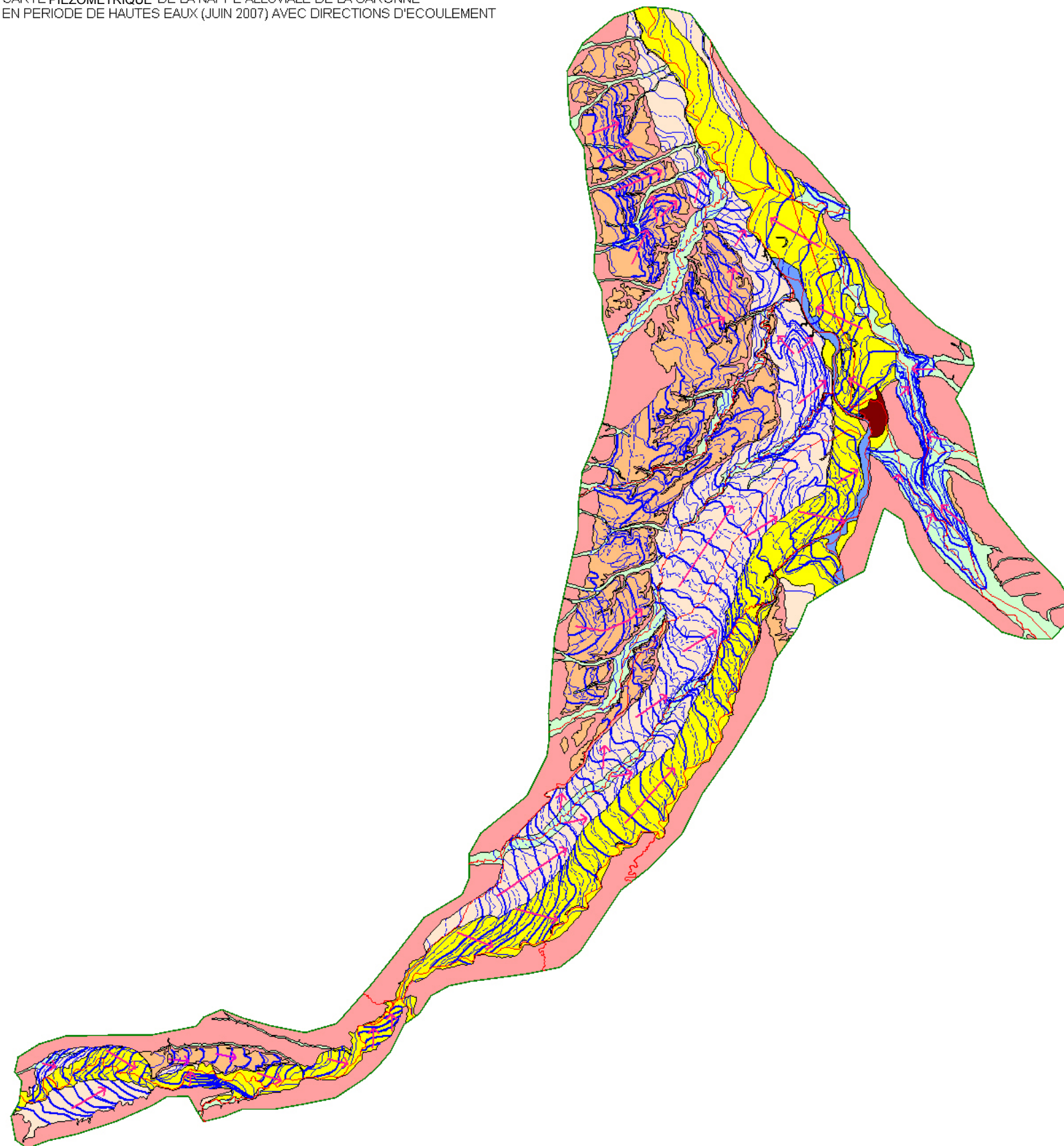
Géologie simplifiée

- Moyenne Terrasse
- Basse terrasse
- Alluvions des rivières secondaires
- Alluvions récentes
- Sol historique de Toulouse
- Basse Plaine
- Formations molassiques



Echelle : 1 cm - 3,5 km

CARTE PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE ALLUVIALE DE LA GARONNE
EN PERIODE DE HAUTES EAUX (JUN 2007) AVEC DIRECTIONS D'ECOULEMENT

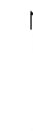


LEGENDE

- Isopièze (intervalle 5 m)
- - - Isopièze (intervalle 2,5 m)
- Cours d'eau et canaux

Géologie simplifiée

- Moyenne Terrasse
- Basse terrasse
- Alluvions des rivières secondaires
- Alluvions récentes
- Sol historique de Toulouse
- Basse Plaine
- Formations molassiques
- Principales directions d'écoulement
- FLECHES_ECOULMT



Echelle : 1 cm - 3,5 km

Annexe 4

Inventaire des prélèvements réalisés dans la plaine de la Garonne

Prélèvements à usage d'AEP (Données 2007)

X_L3 Sud	Y_L3 Sud	CP	COMMUNE	Code Aquifère BDRHF V1	Volume prélevé en m ³ /an
511209.66	147139.95	31088	Brax	342B	35069
501099.72	105700.35	31286	Lavelanet de Comminges	131A	107425
501099.72	105700.35	31286	Lavelanet de Comminges	131A	1235337
501099.72	105700.35	31286	Lavelanet de Comminges	131A	10450
464140.06	90380.42	31247	Labarthe Rivière	352A	242954
509539.87	145829.73	31291	Léguevin	342B	364526
509589.8	145909.71	31291	Léguevin	342B	364526
484478.91	91333.92	31296	Lestelle de Saint Martory	352A	66553
471030.04	89359.97	31344	Miramont de Comminges	352A	78282
513350.41	118080.01	31399	Noé		201389
524490.15	133849.89	31420	Pinsaguel	132	49062
524629.1	133768.12	31420	Pinsaguel	132	156600
524370.34	133939.65	31420	Pinsaguel	132	504348
459729.59	89150.5	31426	Pointis de Rivière	352A	65785
486590.24	94800.14	31503	Saint Martory	352A	145930
459449.81	90499.71	31430	Ponlat Taillebourg	352A	376568

Prélèvements à usage industriel (Données 2007)

X_L3 Sud	Y_L3 Sud	CP	COMMUNE	Code Aquifère BDRHF V1	Volume prélevé en m ³ /an
480449.44	91515.12	31170	TOURNEFEUILLE		86400
521850.89	149360.48	31170	TOURNEFEUILLE		1692
522539.22	148268.03	31800	VALENTINE		175200
522582.62	149414.3	31800	VALENTINE		6496
523533.18	147653.49	31800	VALENTINE		2175
523533.18	147653.49	31800	VALENTINE		17944
489669.78	99589.72	31800	VALENTINE		286450
508933.21	114415.46	31800	VALENTINE		233270
510356.11	112418.8	31800	VALENTINE		301968
518179.93	166489.99	31800	VALENTINE		154057
524397.77	155270.89	31800	VALENTINE		16283
524605.56	155150.23	31800	VALENTINE		12020
526466.21	152807.47	31800	VALENTINE		238000
520302.82	162639.72	31810	LE VERNET		326400
514860.02	163914.52	31810	LE VERNET		326400
490885.1	101473.29	31810	LE VERNET		252560
514129.54	120540.49	31810	LE VERNET		432000
513584.48	118847.9	31810	LE VERNET		432000
518384.99	131649.75	31810	LE VERNET		615600
524254.83	136993.86	31810	LE VERNET		47040
524048.19	136817.71	31810	LE VERNET		47040
523908.4	136682.44	31810	LE VERNET		62720
523881.71	136604.24	31810	LE VERNET		7840
524254.83	136993.86	31810	LE VERNET		52188
518719.74	133119.73	31810	LE VERNET		502250
503307.42	106254.88	31810	LE VERNET		773500
503307.42	106254.88	31810	LE VERNET		773500
505577.14	109927.1	81800	RABASTENS		535200
521649.72	146270.43	31340	VILLEMUR SUR TARN		5876
526466.21	152807.47	31340	VILLEMUR SUR TARN		1080
526466.21	152807.47	31340	VILLEMUR SUR TARN		1620
527024.42	144965.25	31340	VILLEMUR SUR TARN		3200
525669.63	152150.04	31340	VILLEMUR SUR TARN		540
527024.42	144965.25	31340	VILLEMUR SUR TARN		556
526125.36	150909.19	31340	VILLEMUR SUR TARN		556
523739.61	144299.52	31340	VILLEMUR SUR TARN		120960
523729.73	144289.54	31340	VILLEMUR SUR TARN		120960
525550.13	149479.78	31340	VILLEMUR SUR TARN		18435
521231.09	137944.74	31340	VILLEMUR SUR TARN		61348
527024.42	144965.25	31340	VILLEMUR SUR TARN		32381
527024.42	144965.25	31340	VILLEMUR SUR TARN		5400
521480.09	142569.94	31340	VILLEMUR SUR TARN		45942
523065.89	143554.65	31340	VILLEMUR SUR TARN		937
520119.09	148063.19	31340	VILLEMUR SUR TARN		112500
465954.26	90821.33	31340	VILLEMUR SUR TARN		37380
466817.27	89018.7	31340	VILLEMUR SUR TARN		83600

Prélèvements à usage agricole - Département Haute-Garonne (Données 2007)

N° AEAG	X_L3s	Y_L3s	N° INSEE Commune	Nom_Commune	Lieu-dit	Volume mesuré m3/an
31088006	510926.19	146903.05	31088	BRAX	BORDENEUVE	5340
31093010	504346.17	166875.72	31093	LE BURGAUD	ENGILIS	6015
31093013	504346.17	166875.72	31093	LE BURGAUD	DAURES	14630
31093015	504346.17	166875.72	31093	LE BURGAUD	LES ROUDES	6090
31093018	504346.17	166875.72	31093	LE BURGAUD	CONTARDS	51
31093028	504346.17	166875.72	31093	LE BURGAUD	LABARTHE	102074
31093030	504346.17	166875.72	31093	LE BURGAUD		120000
31093031	504346.17	166875.72	31093	LE BURGAUD	SANT	13500
31104004	512196.9	115804.2	31104	CAPENS	PEGUILHAM	3400
31104007	512196.9	115804.2	31104	CAPENS	LACAZE	29193
31107009	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	FAVARES	1210
31107010	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	LAVERAN	28880
31107011	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	LE GALOUE	15728
31107013	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	ROUTE DE LAFITTE	36280
31107016	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	BRABE	22340
31107018	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	LE LANCON (BERNACHOT)	50
31107025	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	BORDENEUVE	891
31107030	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	LE LANCON (COTES DE CHELLE)	570
31107033	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	BORDENEUVE	288
31107034	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	MANGAT	49420
31107035	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	LA MONJOYE	19650
31107036	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	LA MONJOYE	23230
31107037	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	LA MONJOYE	19900
31107038	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	LA RUE	13000
31107041	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	ROUTE DE LAFITTE	28390
31107042	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	BOURDETTE	22410
31107043	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	COTE DE CHELLE	12000
31107044	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	BARES	90338
31107046	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	VIEILLE GAGE	10150
31107048	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	BORDENEUVE	28340
31107050	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	HARIOLE	44840
31107054	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	PONS	5588
31107059	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE		8100
31107062	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	BAQUE BERNES	80000
31107063	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	MATEOUS	28000
31107065	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	BOIS DE BONY	62000
31107066	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	MARRAIS MANGAT	54000
31107069	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	LE PORT	2090
31107070	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	LE LANCON	20819
31107072	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	SERIE	41720
31107073	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	BARHIS	71643
31107075	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	HARIOLE	20450
31107076	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	SAUNE	41730
31107077	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	GALOUE	24267
31107078	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	HAUGUERA	360
31107080	508908.62	110849.6	31107	CARBONNE	HAUGUERA	72240
31135014	499556.37	103051.95	31135	CAZERES	PICAYNE	101620
31135018	499556.37	103051.95	31135	CAZERES	PROPRIETE DE CLAVETE	55654
31135041	499556.37	103051.95	31135	CAZERES	GIRONNE	47557
31135044	499556.37	103051.95	31135	CAZERES	RACHAC	23570
31135057	499556.37	103051.95	31135	CAZERES	CLAVETE	6750
31150003	517966.57	150706.76	31150	CORNEBARRIEU	UILLET	5021
31160002	514474.92	154955.58	31160	DAUX	SUSTERRO	36480

N° AEAG	X_L3s	Y_L3s	N° INSEE Commune	Nom Commune	Lieu-dit	Volume mesuré en m3/an
31160005	514474.92	154955.58	31160	DAUX	BALAT MAIRAOU	13592
31181009	515431.05	122984.26	31181	LE FAUGA	HAOURET	13014
31181017	515431.05	122984.26	31181	LE FAUGA	VILLAGE	5073
31181020	515431.05	122984.26	31181	LE FAUGA	LAS GRAOUS	5046
31181021	515431.05	122984.26	31181	LE FAUGA	HAOURET	11554
31181022	515431.05	122984.26	31181	LE FAUGA	HAOURET	14438
31187020	511926.99	136817.92	31187	FONSORBES	LA RIVIERE	2490
31188009	508267.59	140091.59	31188	FONTENILLES	LAUNAGRET	54000
31188012	508267.59	140091.59	31188	FONTENILLES	GUILLARET	72000
31188022	508267.59	140091.59	31188	FONTENILLES	RAND BOIS ST HUBEI	9380
31188023	508267.59	140091.59	31188	FONTENILLES	RAND BOIS ST HUBEI	3100
31188024	508267.59	140091.59	31188	FONTENILLES	LABOURDAYRE	10200
31203013	516798.76	136472.55	31203	FROUZINS	AIGUILLON	3382
31203016	516798.76	136472.55	31203	FROUZINS	RTE DE PLAISANCE	5869
31232017	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	BALLY	6440
31232024	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	SAINT CAPRAIS	7587
31232027	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	JAGAN	5840
31232030	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	ST CAPRAIS	11950
31232031	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	BALLY	3750
31232039	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	SAINT CAPRAIS	7282
31232043	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	ST CAPRAIS	23014
31232045	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	MAROUL ST CAPRAIS	1550
31232047	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	FONTAINE	47670
31232055	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	RIGOULET	13500
31232057	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	LE CETE	45000
31232062	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	JAGAN	30542
31232065	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	ST CAPRAIS	1494
31232067	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	AUBINELS	3940
31232068	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	IVIERE DES AUBINEL	24660
31232073	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	CAMP DE LA CROUX	5286
31232074	515992.3	162545.02	31232	GRENADE	ST CAPRAIS	9682
31246002	477773.71	91147.47	31246	LABARTHE-INARD	LAS GAYES	2938
31261003	504747.77	112352.17	31261	LAFITTE-VIGORDANE	MILHAT	27062
31261004	504747.77	112352.17	31261	LAFITTE-VIGORDANE	LE LANUS	34419
31261005	504747.77	112352.17	31261	LAFITTE-VIGORDANE	CALIXTE	10119
31261009	504747.77	112352.17	31261	LAFITTE-VIGORDANE	MILHAT	18038
31261010	504747.77	112352.17	31261	LAFITTE-VIGORDANE	LE PEYRON	10407
31261016	504747.77	112352.17	31261	LAFITTE-VIGORDANE	CIMETIERE	30510
31261021	504747.77	112352.17	31261	LAFITTE-VIGORDANE	MILHAT	33513
31281014	506204.72	162407.02	31281	LAUNAC	LA PLANE	16630
31281026	506204.72	162407.02	31281	LAUNAC	BORDENEUVE	8046
31286003	500669.42	107132.5	31286	LAVELANET-DE-COMMINGES	PAILHAS	66395
31286004	500669.42	107132.5	31286	LAVELANET-DE-COMMINGES	LAROUSSET	93473
31286010	500669.42	107132.5	31286	LAVELANET-DE-COMMINGES	DOUAT	50723
31286011	500669.42	107132.5	31286	LAVELANET-DE-COMMINGES	LE VIGNE	44876
31286014	500669.42	107132.5	31286	LAVELANET-DE-COMMINGES	LAROUSSET	127814
31286031	500669.42	107132.5	31286	LAVELANET-DE-COMMINGES	LALANNE	31192
31286038	500669.42	107132.5	31286	LAVELANET-DE-COMMINGES	MISERE	59840
31286043	500669.42	107132.5	31286	LAVELANET-DE-COMMINGES	LAROUSSET	156806

N° AEAG	X_L3s	Y_L3s	N° INSEE Commune	Nom Commune	Lieu-dit	Volume mesuré en m3/an
31286044	500669.42	107132.5	31286	LAVELANET-DE-COMMINGES	DOUAT	63099
31286046	500669.42	107132.5	31286	LAVELANET-DE-COMMINGES	MISERE	32970
31286055	500669.42	107132.5	31286	LAVELANET-DE-COMMINGES	CATALAN	927
31286057	500669.42	107132.5	31286	LAVELANET-DE-COMMINGES	CAP BLANC	52680
31286058	500669.42	107132.5	31286	LAVELANET-DE-COMMINGES	GARAGNON	35054
31291004	511509.73	144621.88	31291	LEGUEVIN	CASTEL NOUVEL	30000
31291013	511509.73	144621.88	31291	LEGUEVIN	MONDOU	600
31293004	523145.88	158181.22	31293	LESPINASSE	CHEMIN PEYRAILLES	5100
31303006	509000.48	118435.78	31303	LONGAGES	PENDELLI	72000
31303020	509000.48	118435.78	31303	LONGAGES	PEGUICHEN	193554
31303026	509000.48	118435.78	31303	LONGAGES	LA TUILERIE	156000
31303029	509000.48	118435.78	31303	LONGAGES	NTE CHEMIN DE CAP	278232
31324028	491729.4	100392.93	31324	MARTRES-TOLOSANE	LES LANES	57491
31324029	491729.4	100392.93	31324	MARTRES-TOLOSANE	LES MUDAOUS	55550
31324039	491729.4	100392.93	31324	MARTRES-TOLOSANE	CROIX DE PIERRE	13980
31341003	515623.91	158964.66	31341	MERVILLE	TUCOL	4002
31341008	515623.91	158964.66	31341	MERVILLE	TRESCAPT	10000
31341015	515623.91	158964.66	31341	MERVILLE	LES QUINS	13700
31341017	515623.91	158964.66	31341	MERVILLE	CHEMIN DE LEZENS	5535
31341019	515623.91	158964.66	31341	MERVILLE	CAILLAOUERO	504
31341020	515623.91	158964.66	31341	MERVILLE	PASSE DE CAZEVIEIL	7448
31344007	471571.11	89122.85	31344	MIRAMONT-DE-COMMINGES		31600
31349018	495208.23	105588.21	31349	MONDAVEZAN	PABAN	85700
31349020	495208.23	105588.21	31349	MONDAVEZAN	PABAN	50000
31349045	495208.23	105588.21	31349	MONDAVEZAN	SARANS	67400
31349050	495208.23	105588.21	31349	MONDAVEZAN	BALAGUE	28000
31349060	495208.23	105588.21	31349	MONDAVEZAN	PABAN	24122
31351009	514772.57	151687.48	31351	MONDONVILLE	LES TOUDATS	5160
31395021	517040.4	127941.06	31395	MURET	LES CARRETES	5339
31399003	513523.2	117824.71	31399	NOE	CAVAILHER	5011
31399005	513523.2	117824.71	31399	NOE	BOURDASSE	9360
31399008	513523.2	117824.71	31399	NOE	LA TOUR	3363
31399009	513523.2	117824.71	31399	NOE	GAILLARD DU PORT	18490
31399010	513523.2	117824.71	31399	NOE	STE MARIE	4026
31399011	513523.2	117824.71	31399	NOE	PEYREFIL / SERRES	34597
31399012	513523.2	117824.71	31399	NOE	RIOU	29490
31399013	513523.2	117824.71	31399	NOE	POMAREDE	15260
31399015	513523.2	117824.71	31399	NOE	BOURDASSE	24770
31399016	513523.2	117824.71	31399	NOE	BOURDASSE	30360
31399017	513523.2	117824.71	31399	NOE	PEYREFIL / SERRES	27369
31403009	516785.2	165783.17	31403	ONDES	LA PLANETE	10350
31403016	516785.2	165783.17	31403	ONDES	COUJEL D'EN HAUT	10460
31403018	516785.2	165783.17	31403	ONDES	LES DIX ARPENTS	32320
31406003	496081.43	100575.91	31406	PALAMINY	JUILLET	11183
31416004	507010.13	114932.36	31416	PEYSSIES	E DE NOUGARET FA	1386
31416008	507010.13	114932.36	31416	PEYSSIES	CANON	144000
31416018	507010.13	114932.36	31416	PEYSSIES	MARIN	46536
31417006	512779.8	148065.6	31417	PIBRAC	LA BENOUEZE	20516
31417015	512779.8	148065.6	31417	PIBRAC	BIROCELS	1868
31417016	512779.8	148065.6	31417	PIBRAC	LA GRIFFE	8461

N° AEAG	X_L3s	Y_L3s	N° INSEE Commune	Nom Commune	Lieu-dit	Volume mesuré en m3/an
31417021	512779.8	148065.6	31417	PIBRAC	PERRAMOND	5722
31417022	512779.8	148065.6	31417	PIBRAC	LABOUCHE	27280
31417023	512779.8	148065.6	31417	PIBRAC	GAYNE	28640
31475014	508626.73	131451.32	31475	SAINT-CLAR-DE-RIVIERE	ARMAGNAC	21025
31476003	502961.32	110173.89	31476	SAINT-ELIX-LE-CHATEAU	VIGNOBLE	24120
31476004	502961.32	110173.89	31476	SAINT-ELIX-LE-CHATEAU	TUTELLE	50950
31476009	502961.32	110173.89	31476	SAINT-ELIX-LE-CHATEAU	EN CLOS	16200
31476010	502961.32	110173.89	31476	SAINT-ELIX-LE-CHATEAU	CASTAGNAC	35660
31476011	502961.32	110173.89	31476	SAINT-ELIX-LE-CHATEAU	BORIOS	4840
31476015	502961.32	110173.89	31476	SAINT-ELIX-LE-CHATEAU	DURRIEU	16741
31476018	502961.32	110173.89	31476	SAINT-ELIX-LE-CHATEAU	DURRIEU	24750
31476019	502961.32	110173.89	31476	SAINT-ELIX-LE-CHATEAU	TERRE	13130
31476025	502961.32	110173.89	31476	SAINT-ELIX-LE-CHATEAU	LE VILLAGE	5578
31476027	502961.32	110173.89	31476	SAINT-ELIX-LE-CHATEAU	GAUBERT	130
31476029	502961.32	110173.89	31476	SAINT-ELIX-LE-CHATEAU	PYLONE TERRE	18669
31476030	502961.32	110173.89	31476	SAINT-ELIX-LE-CHATEAU	GAUBERT	10980
31483002	469659.38	92934.02	31483	SAINT-GAUDENS	BORDE BASSE	29088
31490006	520503.04	160840.97	31490	SAINT-JORY	GRANDELLE	3900
31490008	520503.04	160840.97	31490	SAINT-JORY	LA ROUMEGUE	8094
31490014	520503.04	160840.97	31490	SAINT-JORY	MAJOURAL	5250
31490016	520503.04	160840.97	31490	SAINT-JORY	4D CHEMIN DE SIRAC	3100
31490023	520503.04	160840.97	31490	SAINT-JORY	GRANGERON	10975
31492003	504005	106571.77	31492	SAINT-JULIEN-SUR-GARONNE	LITRE	39117
31492005	504005	106571.77	31492	SAINT-JULIEN-SUR-GARONNE	GARGOTIS	17659
31492009	504005	106571.77	31492	SAINT-JULIEN-SUR-GARONNE	RTE CARBONNE	47941
31492013	504005	106571.77	31492	SAINT-JULIEN-SUR-GARONNE		38730
31492015	504005	106571.77	31492	SAINT-JULIEN-SUR-GARONNE	LA GRANGE	20955
31492016	504005	106571.77	31492	SAINT-JULIEN-SUR-GARONNE	LA GRANGE	4902
31492017	504005	106571.77	31492	SAINT-JULIEN-SUR-GARONNE	LA GRANGE	6427
31499003	508283.56	135475.64	31499	SAINT-LYS	PLAINE DE RATOU	23550
31515001	518917.44	167582.96	31515	SAINT-RUSTICE	LARRAMET - A193	54000
31525003	505558.33	109465.8	31525	SALLES-SUR-GARONNE	TUTELLE	20720
31525007	505558.33	109465.8	31525	SALLES-SUR-GARONNE	LAFIVAT GARONNE	206794
31525014	505558.33	109465.8	31525	SALLES-SUR-GARONNE	MARASTON B142 ET B 443	28900
31525015	505558.33	109465.8	31525	SALLES-SUR-GARONNE	LACAU	2444
31525016	505558.33	109465.8	31525	SALLES-SUR-GARONNE	GRAGNON	11110
31525019	505558.33	109465.8	31525	SALLES-SUR-GARONNE	PONT D'ERCUS	1587
31525020	505558.33	109465.8	31525	SALLES-SUR-GARONNE	SEIGLANE	30000
31525021	505558.33	109465.8	31525	SALLES-SUR-GARONNE		64000
31555005	525970.54	145905.3	31555	TOULOUSE	CHEMIN DES IZARDS	4500
31592013	511154.16	160465.96	31592	LARRA	LA BROUSSE	8260

Annexe 5

Utilisation du logiciel TEMPO pour compléter les chroniques piézométriques et de débits utilisées pour le calage en régime transitoire

L'étude des chroniques piézométriques et de débits montre que celles-ci sont parfois incomplètes or, dans le cadre de la comparaison des signaux observés et simulés, il est nécessaire que, pour chaque pas de temps du modèle, une valeur observée soit disponible. C'est dans cet objectif que les chroniques ont été reconstituées quand les données le permettaient. La reconstitution des chroniques a également été utile pour la mise en place du calage automatique.

Reconstitution des chroniques par une méthode de modélisation globale à l'aide du logiciel TEMPO

Principe général de l'approche de modélisation TEMPO

Le type d'approche utilisée apporte, à partir du suivi en continu d'un niveau piézométrique ou d'un débit et de paramètres physico-chimiques tels que la conductivité ou la température de l'eau, des renseignements sur les processus de transfert responsables des variations observées et, ce faisant, sur les mécanismes régissant le fonctionnement d'un hydrosystème.

Le traitement numérique des chroniques fait appel à des techniques d'inversion. On parle alors de modélisation inverse des phénomènes. Contrairement à la modélisation directe qui consiste à simuler le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de concepts reposant à la fois sur la description de l'hydrosystème et l'application de lois de la physique, la modélisation inverse décrit le fonctionnement de l'hydro système à partir de réponses impulsionnelles (ruisselement, écoulement souterrain, transfert de masse). Ces réponses impulsionnelles (appelées également fonctions de transfert ou diagramme unitaire) sont estimées à partir de séries chronologiques : pluie, débit, niveau piézométrique, concentration de divers solutés, propriétés physico-chimiques du milieu.

Application à la reconstitution des chroniques piézométriques et de débits

L'approche employée est basée sur l'étude comparée des signaux d'entrée (pluie et ETP) et des signaux de sortie (débit) par établissement de fonctions de transfert calées sur la plus longue série d'observations possible. Il est en effet nécessaire de disposer de séries de mesures (pluviométrie et débits validés) au pas de temps journalier concomitantes de plusieurs années recouvrant des périodes sèches et humides. Les interruptions de mesures sont préjudiciables et ne peuvent être compensées lorsqu'il s'agit de signaux d'entrée. Cependant, les interruptions de mesures dans les signaux de sortie (chronique piézométrique ou de débits) peuvent être reconstituées quand l'on dispose d'une série de mesures concomitantes sur une période suffisamment longue afin de permettre de calculer la ou les réponses impulsionnelles liant les signaux d'entrée avec le signal de sortie. Il est ensuite possible d'appliquer cette relation sur une période où le signal de sortie (chronique piézométrique ou de débit) n'est pas disponible et de le simuler. Cette méthode a permis, dans certains cas, de reconstituer les chroniques. Ainsi, toutes les chroniques piézométriques et de débits du réseau

patrimonial ont pu être reconstituées. Cependant, la courte période de mesure sur les piézomètres du réseau Mod 31, n'a pas permis de reconstituer les trous pouvant exister dans les chroniques.

Analyse et traitement préalable des données sources

La première étape du travail consiste en une analyse des données existantes et exploitables :

- Les données piézométriques et de débit du réseau patrimonial sont au format journalier.
- Les données de précipitation et d'ETP sont au format dataire à raison d'une donnée tous les 5, 15 et 25 de chaque mois sur une période de huit (8) ans allant du 1^{er} Janvier 2000 au 1^{er} Janvier 2008. Le traitement préalable de ces données a consisté à les transformer en format journalier en divisant la valeur décadaire par le nombre de jour auquel elle correspond.

Les données ainsi traitées sont au format journalier et concernent la même période.

Etapas de modélisation

Dans le cas du système du système alluvial de la Haute Garonne, le débit a été modélisé à partir de deux réponses impulsionnelles distinctes : une réponse impulsionnelle rapide qui est décrite comme le ruissèlement de surface et une réponse impulsionnelle lente correspondant à la contribution des aquifères au débit des cours d'eau étudiés. Le calcul des ces réponses impulsionnelles est fait de telle sorte à minimiser l'écart type des écarts entre le signal mesuré et le signal simulé de même que pour le calcul du seuil de pluie efficace Omega. Les chroniques ont été modélisées avec un pas de temps d'échantillonnage décadaire.

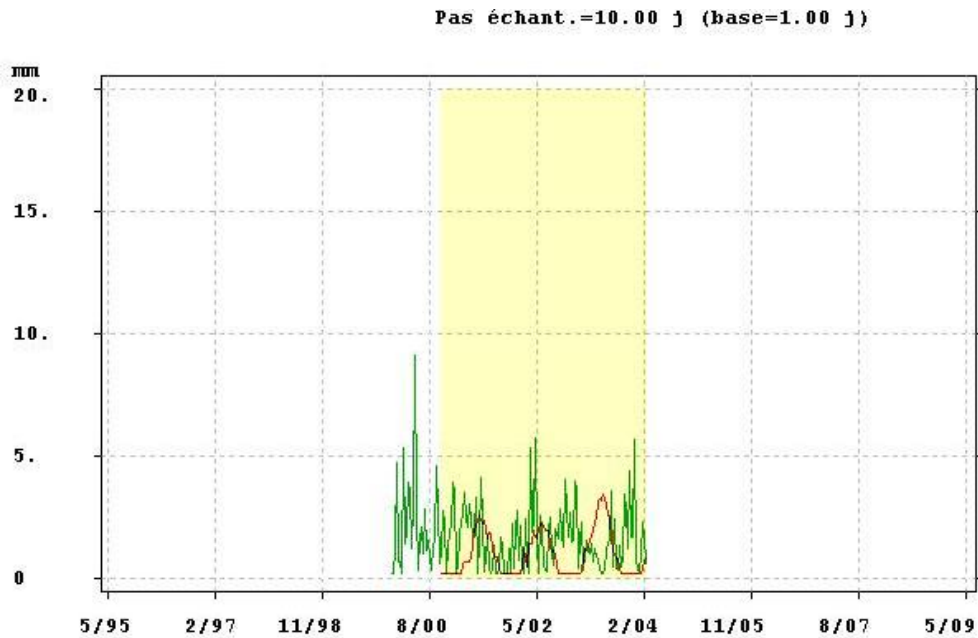
• Choix du type de réponse impulsionnelle

Le choix du type de ces réponses impulsionnelles revient au modélisateur. Elles peuvent être de type paramétrique (fonction mathématique connue, fonction exponentielle par exemple) ou non paramétrique. Dans ce dernier cas c'est le logiciel TEMPO qui détermine la fonction mathématique appropriée qui permet de décrire au mieux la variable de sortie à modéliser. L'étude du système aquifère alluvial de la Haute-Garonne a été réalisée à l'aide d'une fonction paramétrique de type **Gaussienne-Exponentielle** qui est généralement le type de réponse impulsionnelle utilisée pour décrire ce type de système.

• Calcul du seuil de pluie efficace Omega

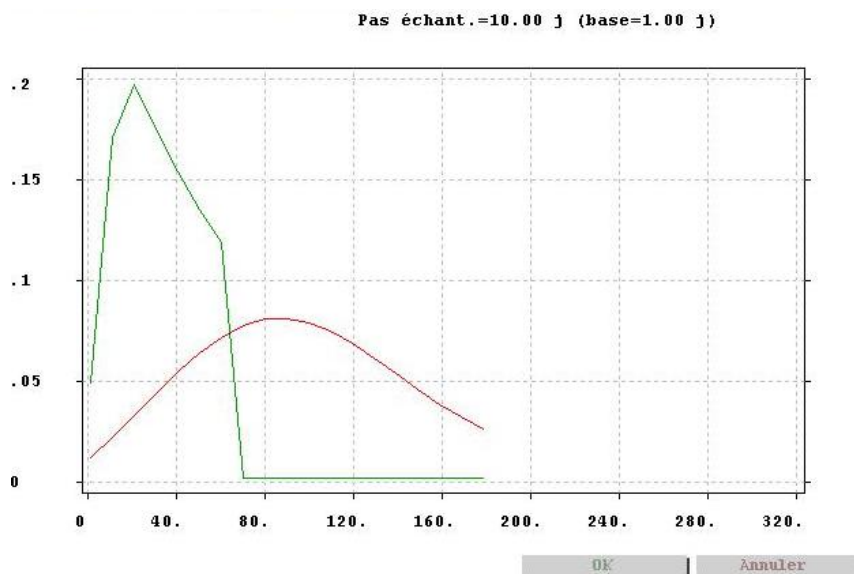
La technique d'inversion par l'approche de modélisation TEMPO consiste à calculer les hydrogrammes unitaires et le seuil Omega de pluie efficace de telle sorte que le débit simulé par le modèle soit le plus proche possible du débit observé. Ce seuil Omega est

observé à partir de la pluie et de l'ETP (variable climatique) de telle façon que la seule hauteur de pluie au dessus de ce seuil génère un débit à l'exutoire. Il est calculé à partir de la réponse impulsionnelle de la pluie et à l'ETP, également obtenues par inversion.



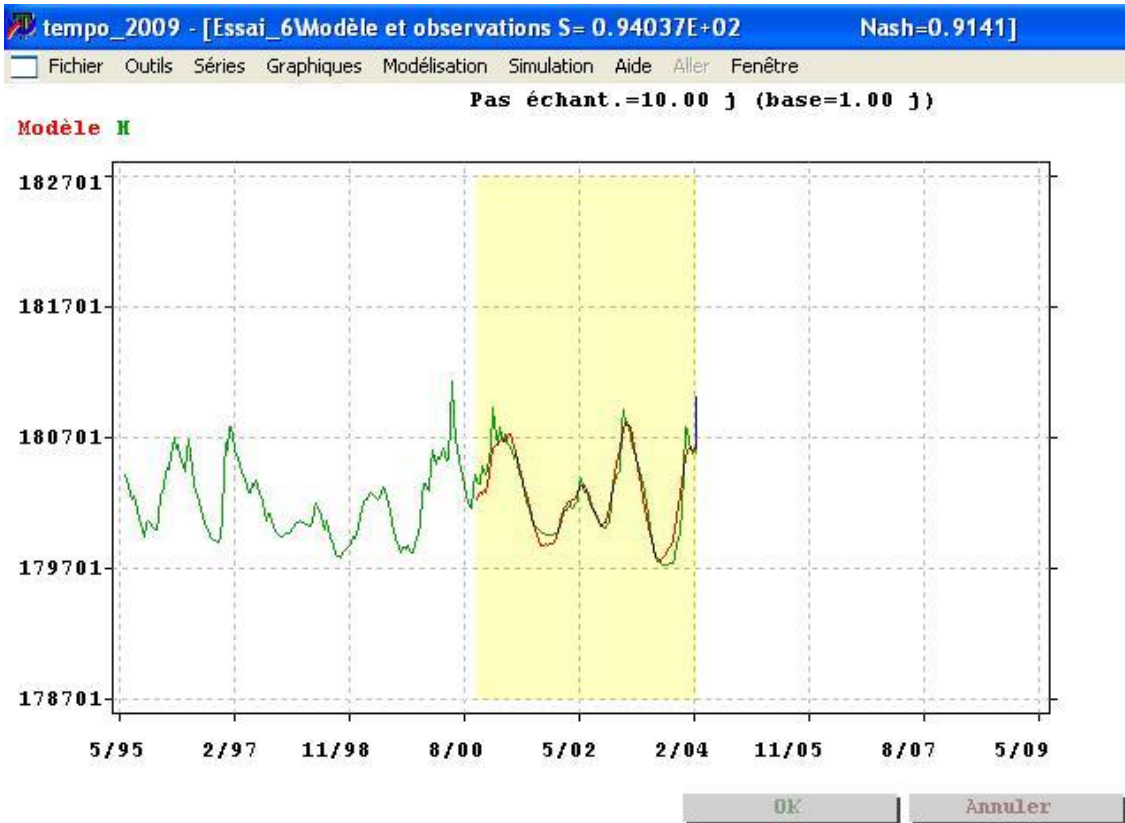
• Calcul des hydrogrammes unitaires

Le calcul des hydrogrammes unitaires par inversion est optimisé de façon à ce que le signal simulé soit le plus proche possible du signal mesuré.



Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés du ruissellement et de la recharge des aquifères.

La fonction de transfert est calculée sur une période où les données d'entrée et de sortie sont concomitantes. Il est nécessaire de disposer de cela sur une période suffisamment longue pour que la ou les réponses impulsionnelles soient représentatives.

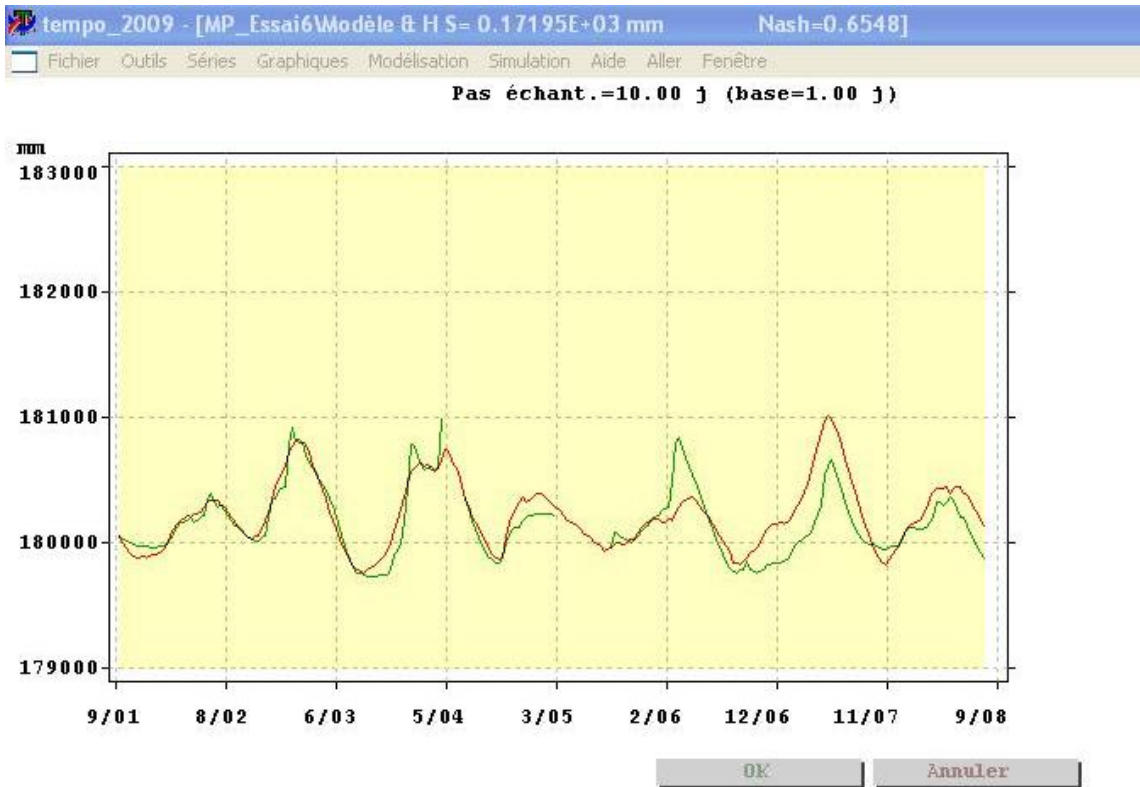


Comparaison du niveau piézométrique simulé et du niveau piézométrique calculé.

Les réponses impulsionnelles lentes et rapides sont paramétrées de façon à ce que le signal simulé soit le plus proche possible du signal mesuré. Ce calage est effectué sur la plus grande période possible. Le calage présenté en illustration 34 entre les deux chroniques est validé par les coefficients S (écart type des écarts) et le coefficient de Nash Lorsque la chronique possède une petite lacune (<10 jours), une interpolation linéaire a été effectuée.

Calcul d'un modèle prévisionnel et reconstitution des chroniques

Les étapes décrites précédemment ont permis d'établir des modèles prévisionnels pour chaque piézomètre ou station de débit qui sont constitués par une ou plusieurs réponses impulsionnelles. Dans le cas de d'utilisation de prévisions de chroniques pluviométriques et d'ETP, le modèle prévisionnel permet de prédire le niveau piézométrique ou le débit. De même, quand il y a une lacune dans la chronique mais que les données d'entrées sont disponibles, il est possible de simulé un signal en fonction de ces paramètres d'entrée.



Chronique piézométrique observée et simulée au niveau du piézomètre du Fauga.

Le modèle prévisionnel permet de calculer un signal à partir des données d'entrée comme le montre l'illustration ci-dessus, y compris dans les périodes où le signal mesuré est absent. Les lacunes sont comblées avec le signal simulé afin d'avoir une chronique complète.

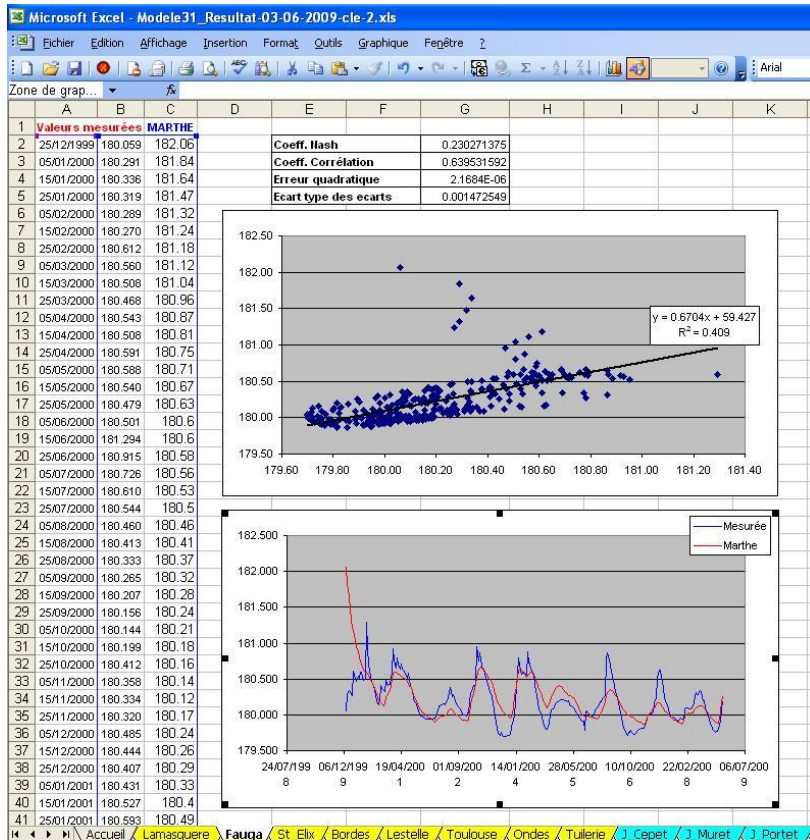
Annexe 6

Présentation de l’outil de calage développé sous EXCEL

Un outil de calage a été conceptualisé afin d’automatiser la comparaison entre les signaux observés et simulés.

Le logiciel Marthe génère un fichier de résultats sous format .Txt dit fichier « prn » dans lequel se trouvent les valeurs calculées dans les mailles à historique.

D’une part, un fichier Excel a été constitué dans lequel, dans chaque onglet, se trouve une chronique mesurée. Une procédure permet alors d’aller chercher la chronique simulée dans le fichier « prn » et de l’associer à la chronique mesurée. Les deux chroniques sont alors reportées sur un graphe, ce qui permet en premier lieu un contrôle visuel de la phase. D’autre part, la valeur de la simulation est évaluée de façon statistique grâce au calcul du coefficient de corrélation, du coefficient de Nash, de l’écart-type et de l’écart-type des erreurs. Le détail des formules des coefficients statistiques est donné en Annexe. Les points observés et simulés sont reportés sur une droite de régression présentée dans l’illustration ci-dessous.

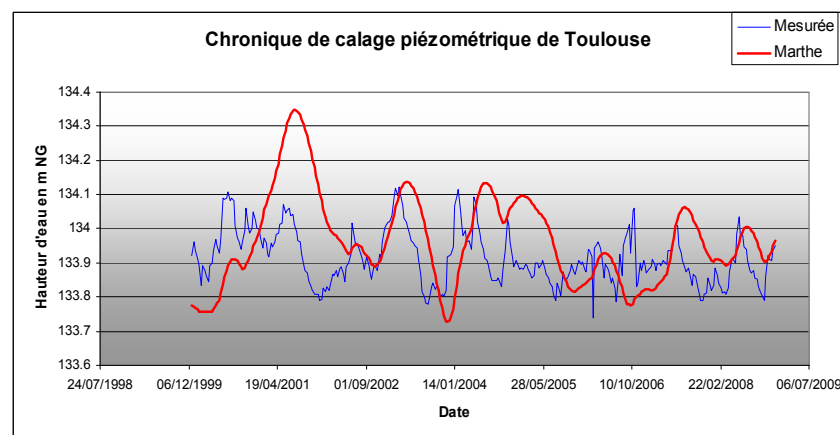
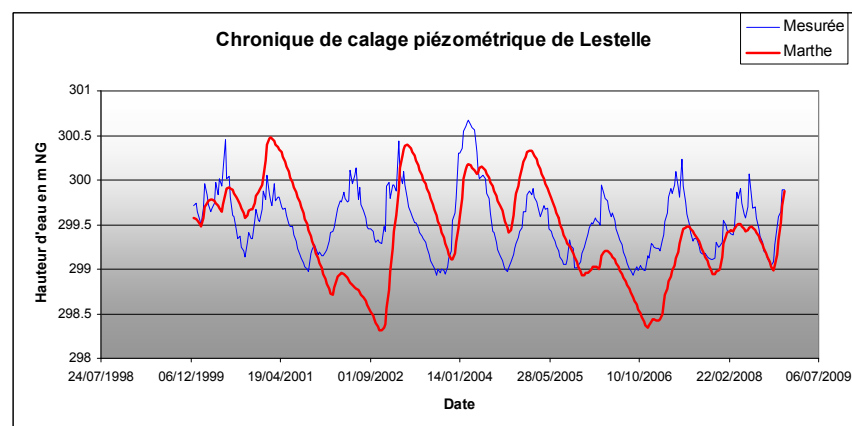
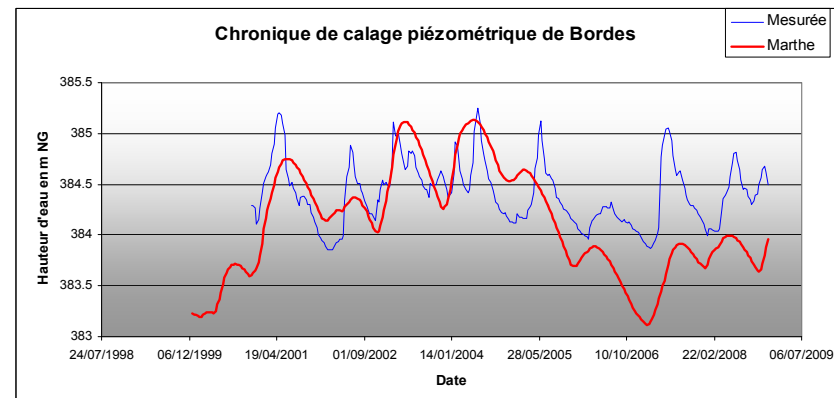
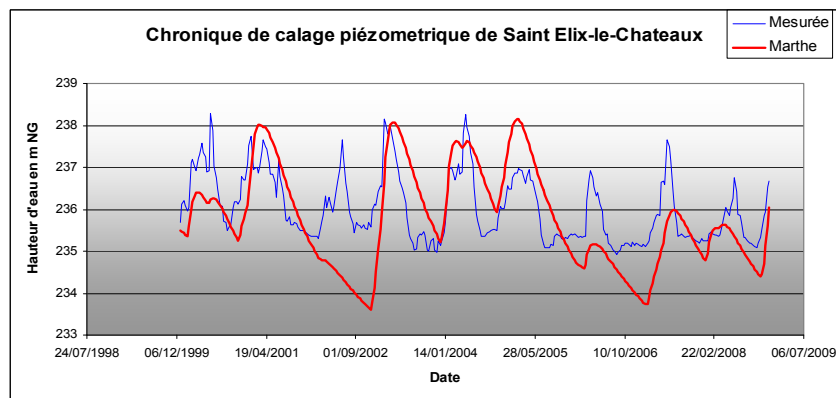
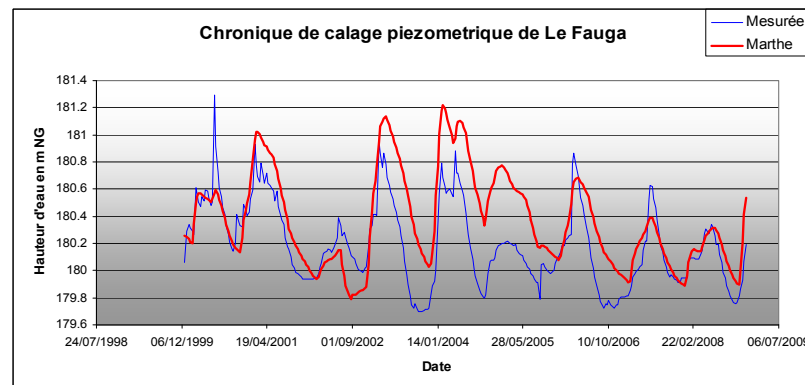
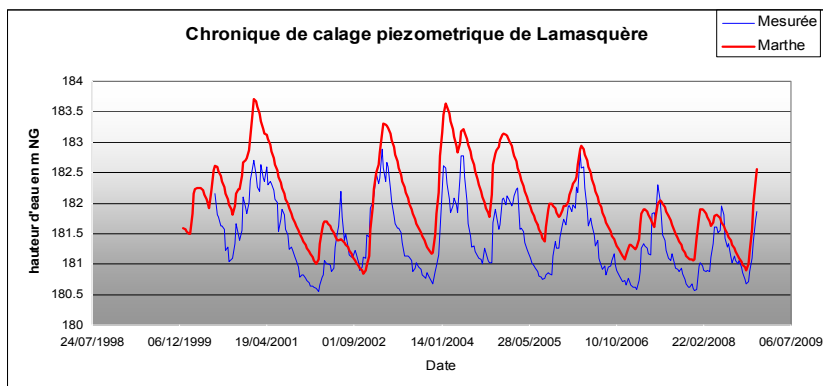


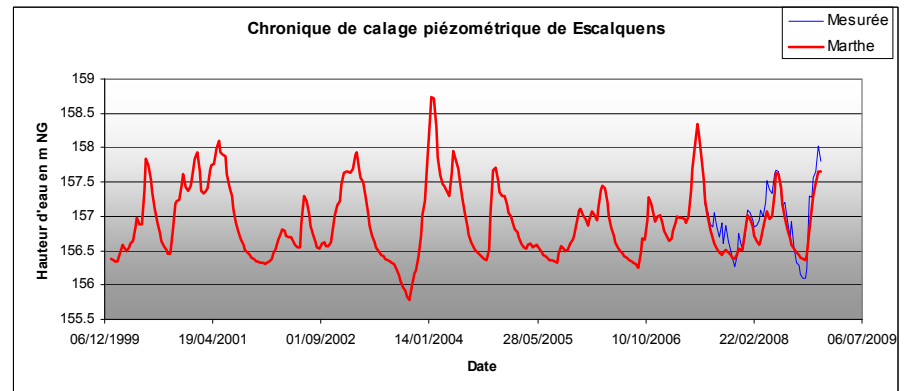
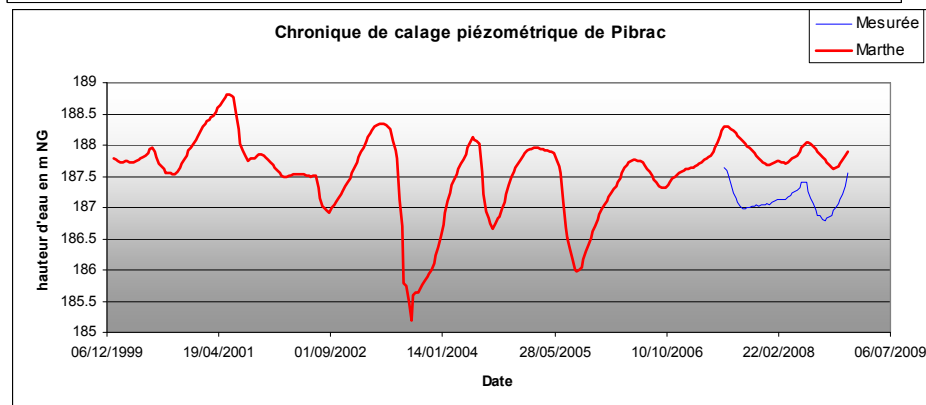
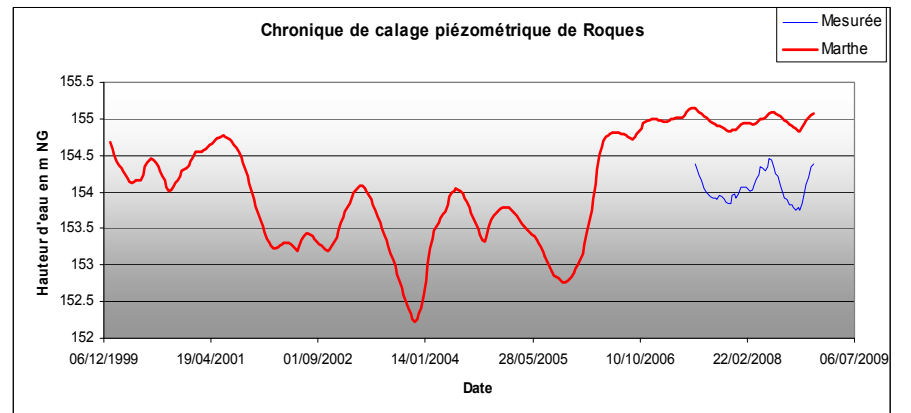
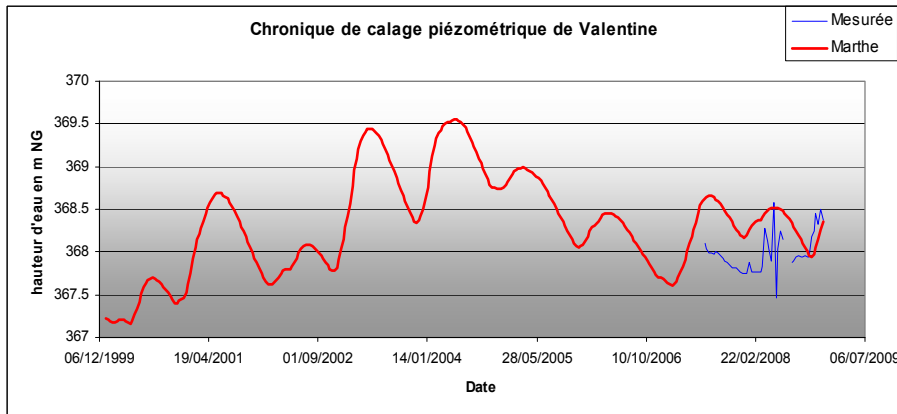
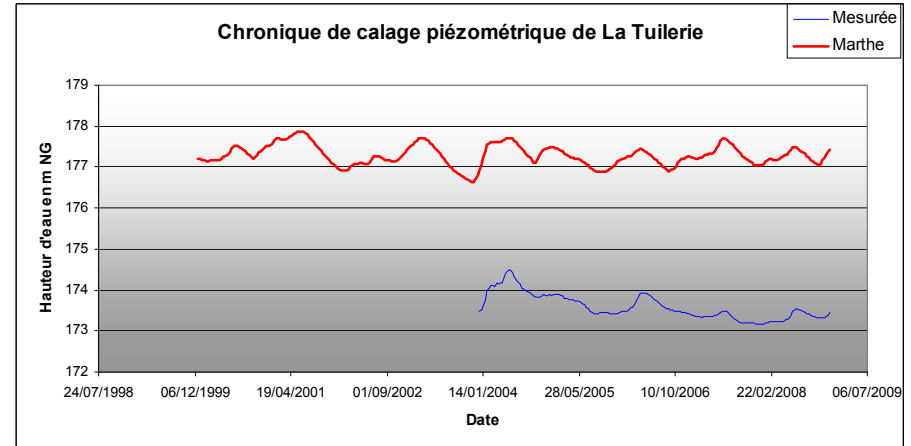
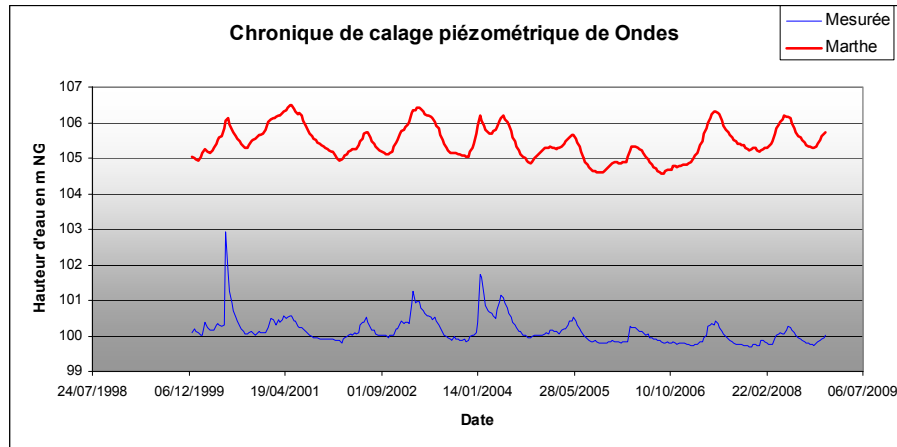
Prise d’écran de l’outil de calage du modèle dans le cas du piézomètre du Fauga.

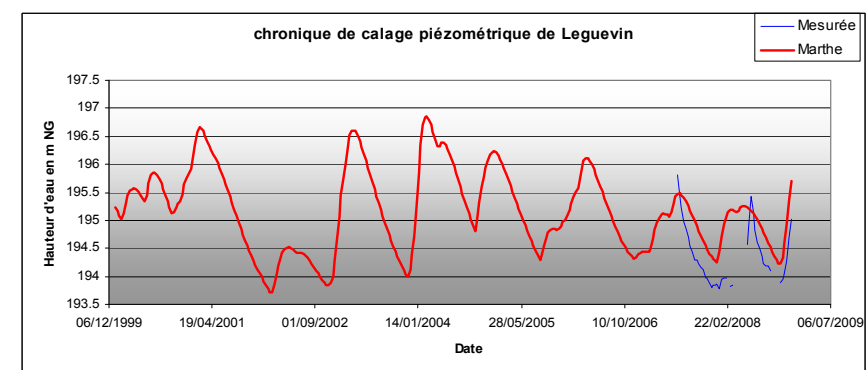
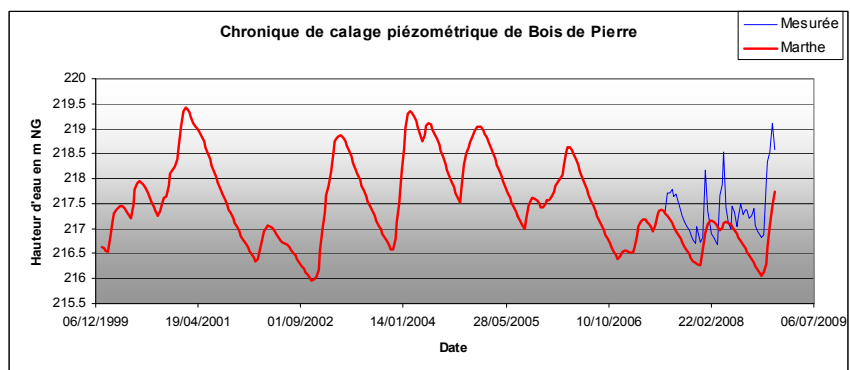
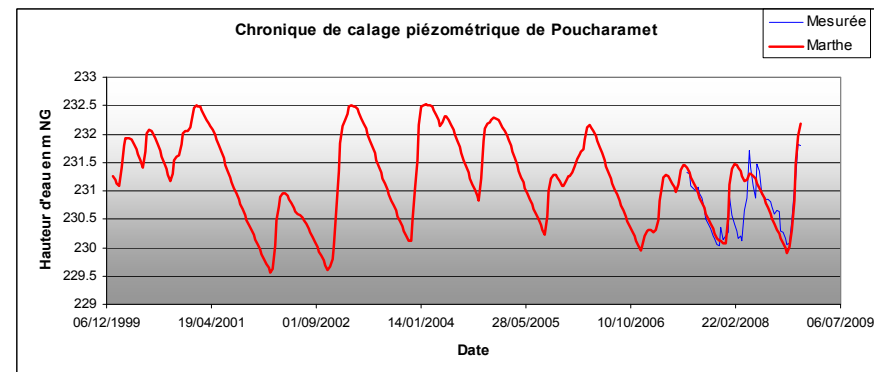
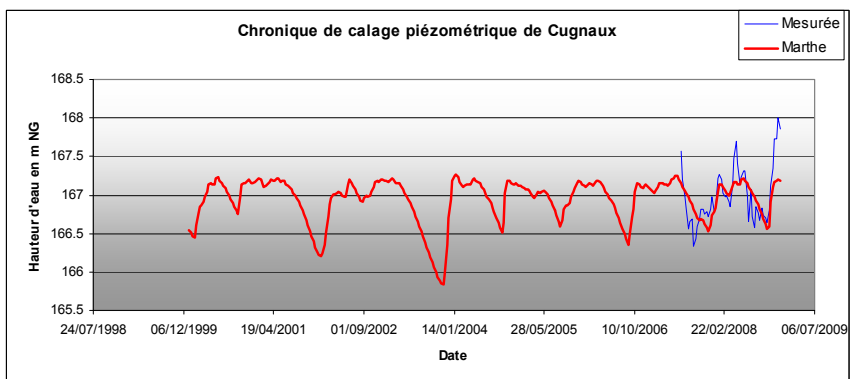
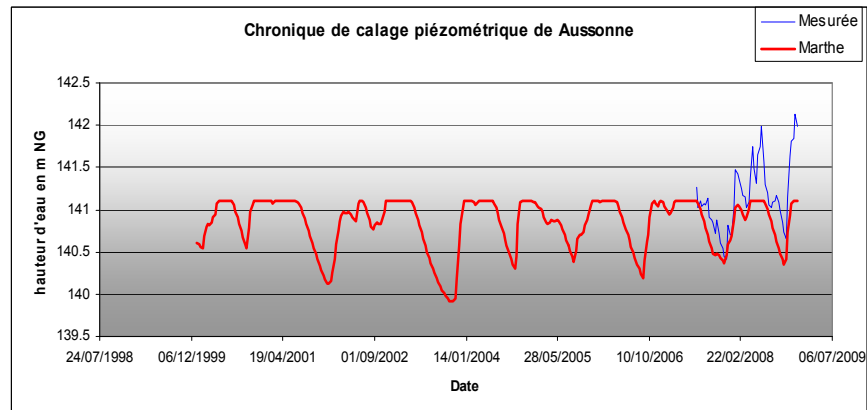
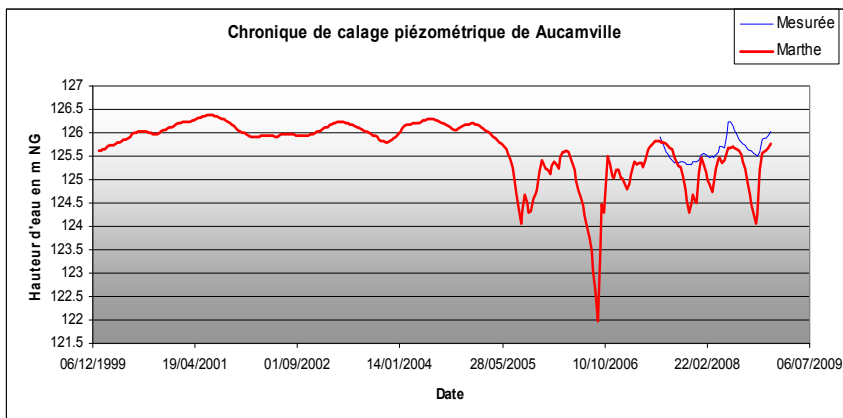
Cette procédure, programmée sous Macro-commande permet de comparer de façon instantanée les chroniques simulées avec les chroniques observées et de juger ainsi de la valeur de la simulation.

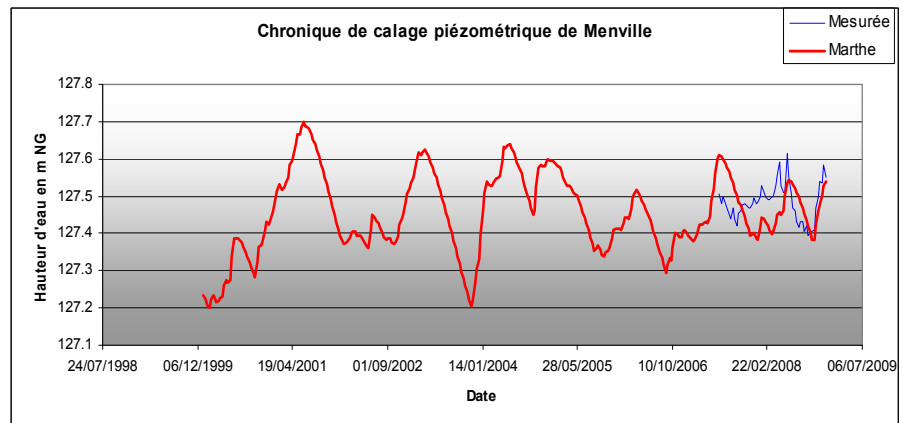
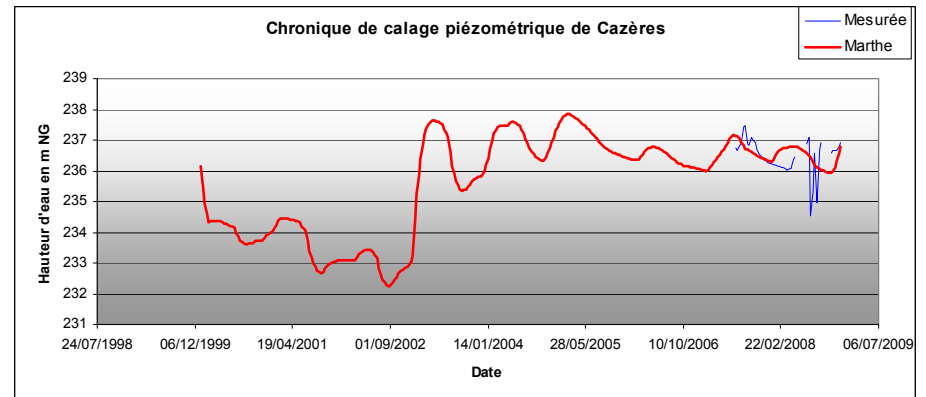
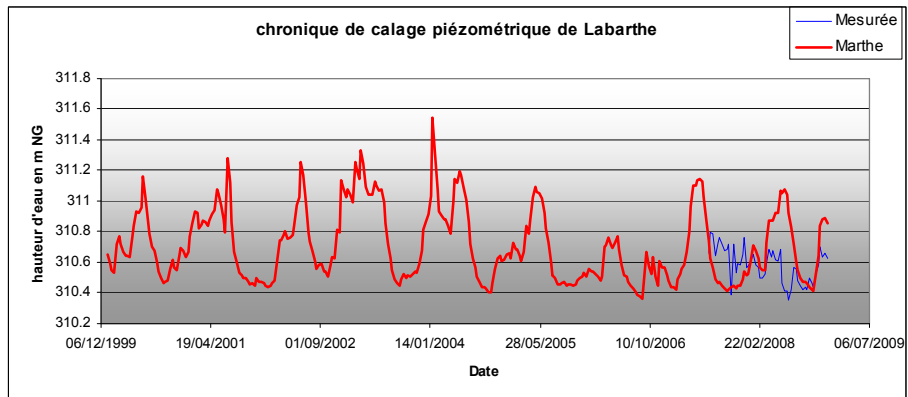
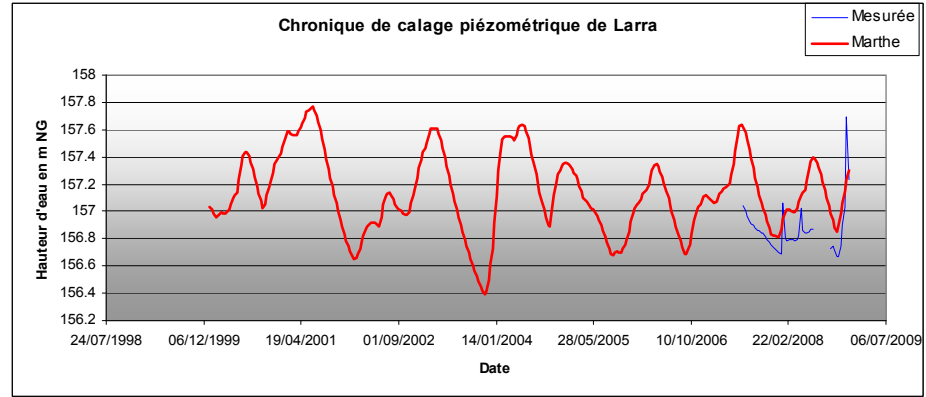
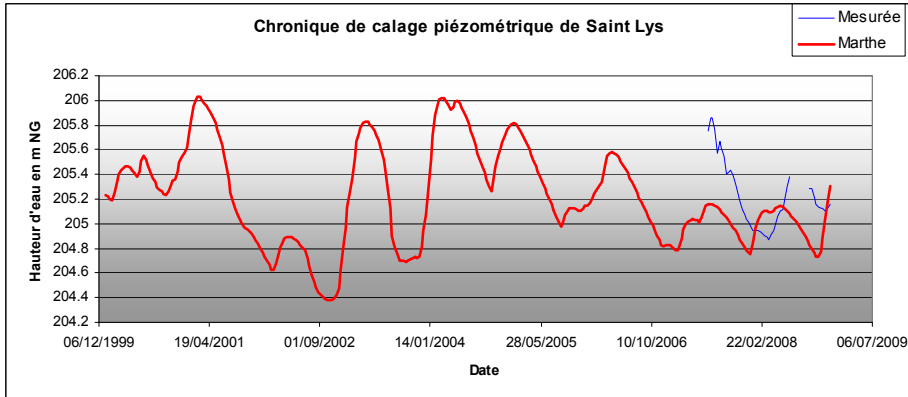
Annexe 7

Comparaison des charges simulées et observées sur les piézomètres de calage



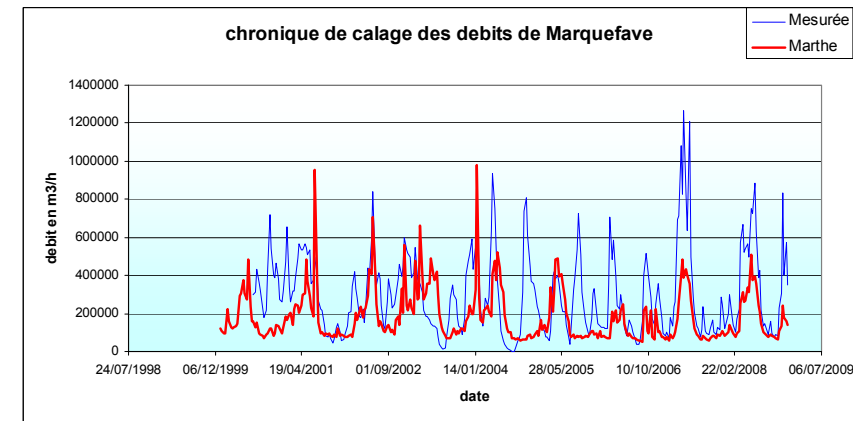
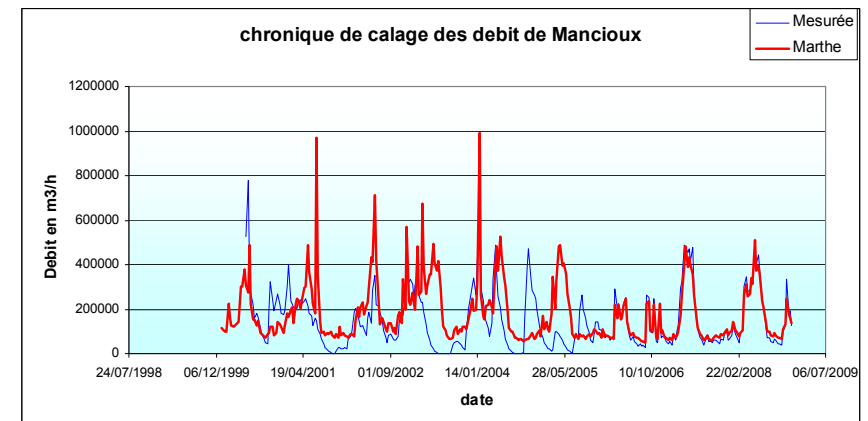
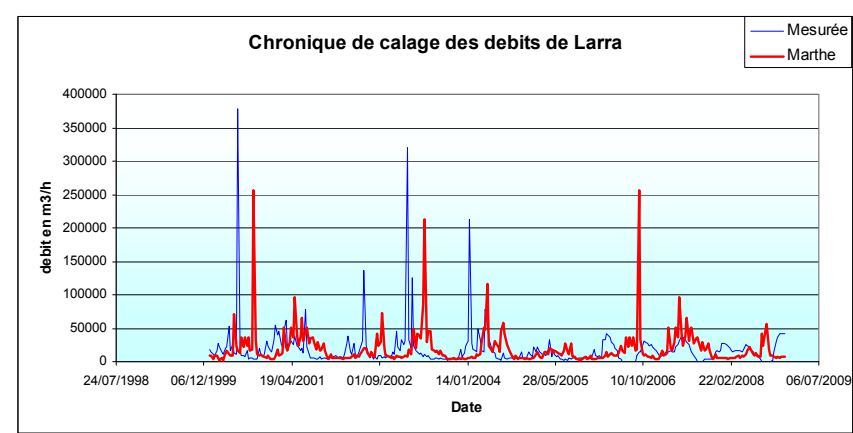
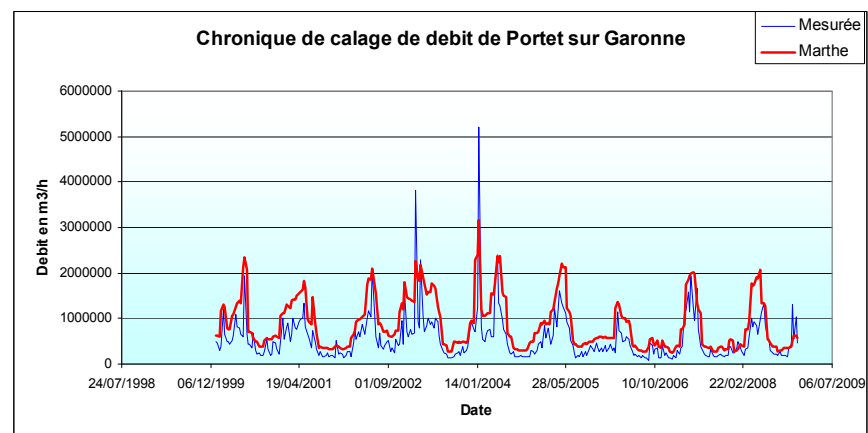
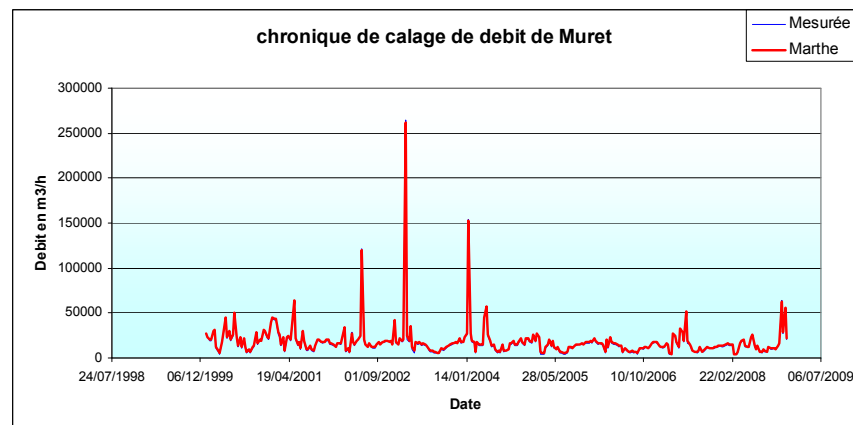
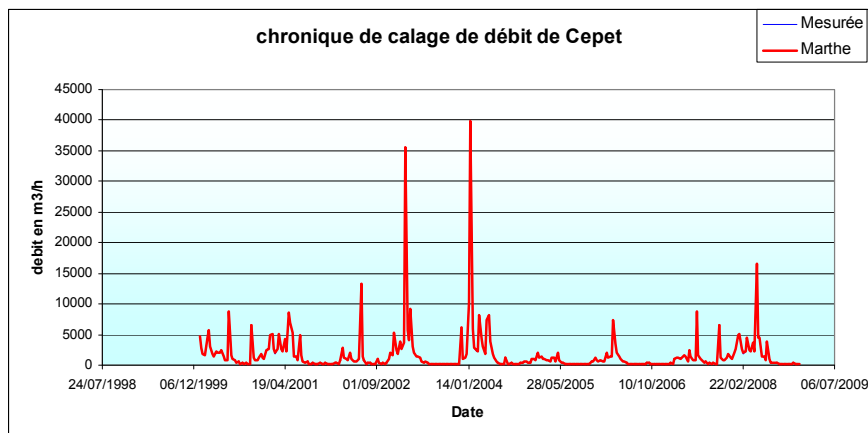


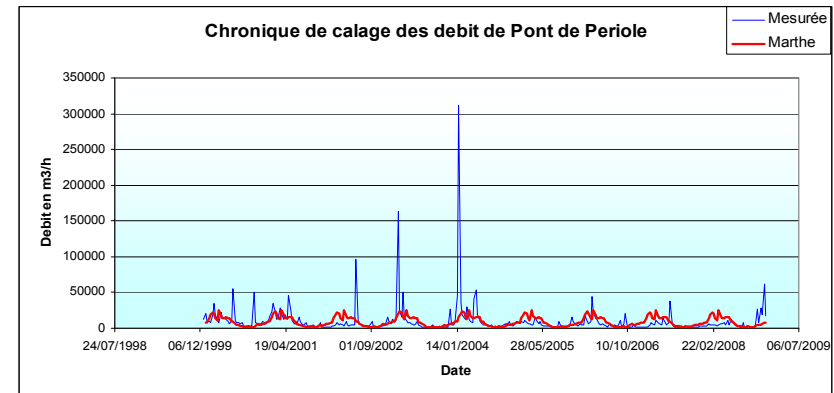
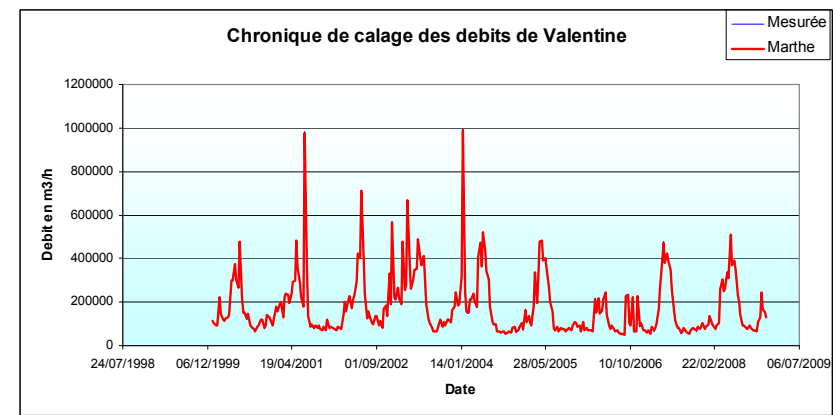
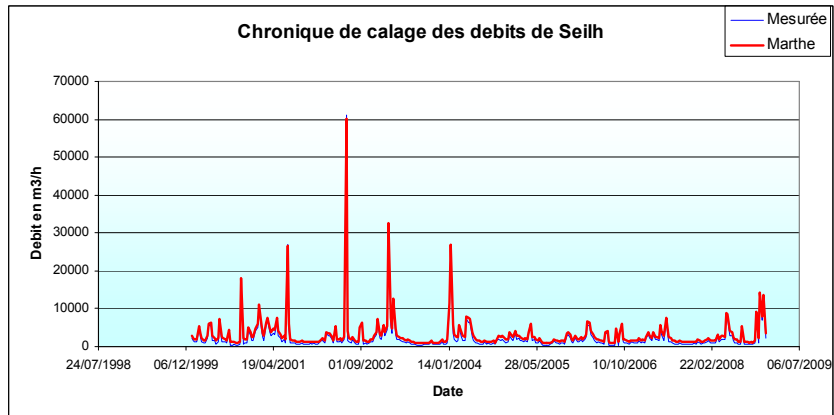
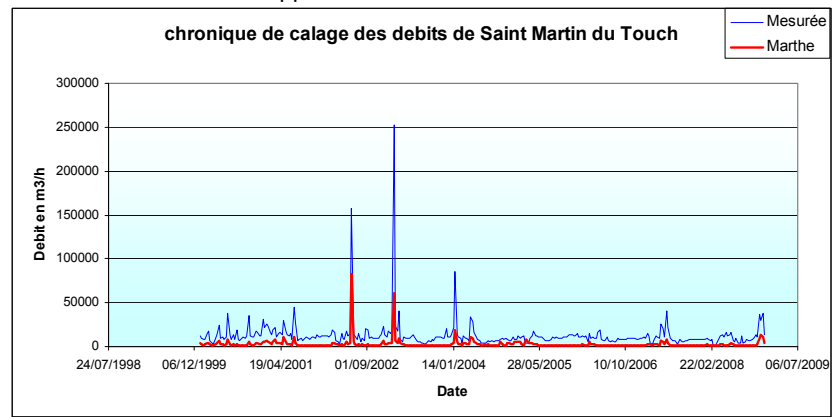
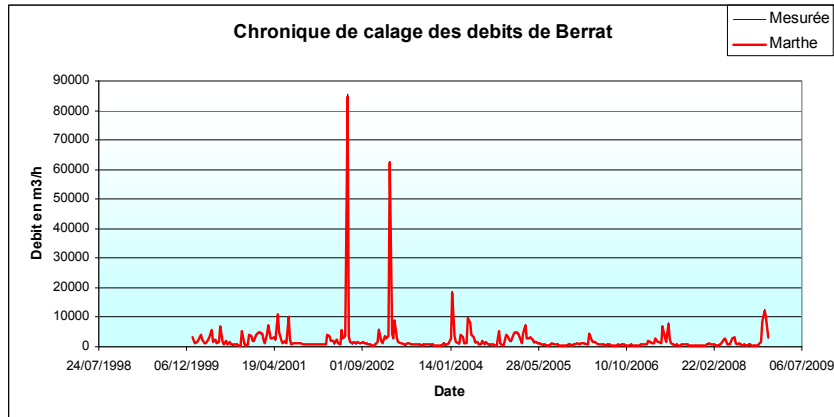




Annexe 8

Comparaison des débits simulés et observés sur les points de contrôle du réseau hydrographique





Annexe 9

Description des deux méthodes de calcul utilisées pour la détermination des périodes de retour d'événements pluvieux

Application de la méthode de calcul des périodes de retour d'événement pluvieux utilisée dans le modèle de la plaine alluviale de l'Ariège

La méthode de calcul de la période de retour d'événements hydroclimatiques qui a été utilisée pour le modèle Ariège a été appliquée suivant le principe de calcul de fréquences des pluies (ou ETP) classées. Les périodes de retour utilisées pour les scénarios prévisionnels sont les périodes : décennales sèches (fréquence de retour = 0.1), quinquennale sèches (f =0.2), moyenne (f =0.5), humide (f= 0.8). Les valeurs décennales et quinquennales sont obtenues par interpolation linéaire des fréquences calculées.

Décade 05/01	RR Blagnac classé (mm)	rang	Fréquence expérimentale	Période de retour (année)
05/01/2002 12:00	0	1	0.05	20
05/01/2000 12:00	1.6	2	0.15	6.67
05/01/2009 12:00	1.6	3	0.25	4
05/01/2005 12:00	6.6	4	0.35	2.86
05/01/2007 12:00	9	5	0.45	2.22
05/01/2008 12:00	9.6	6	0.55	1.82
05/01/2006 12:00	13.2	7	0.65	1.54
05/01/2004 12:00	15.6	8	0.75	1.33
05/01/2001 12:00	22.2	9	0.85	1.18
05/01/2003 12:00	67.8	10	0.95	1.05

Exemple du calcul des périodes de retour des pluies par décade pour la station de Blagnac

Mise en place d'une méthode statistique probabiliste pour le calcul de périodes de retour

Démarche de l'application probabiliste du calcul des périodes de retour hydroclimatique

La principale différence avec la méthode précédente réside dans le fait d'ajuster des lois de probabilité connues au comportement statistique des données de précipitation et d'ETP.

Une analyse du comportement statistique des variables va être effectuée afin d'identifier la loi probabiliste qui sera appliquée par la suite pour le calcul des périodes de retour. Les valeurs de retour sont ensuite extraites de la loi de probabilité ajustée.

Ajustement de la loi statistique.

Principe fondamental

Pour chaque station météorologique, les distributions statistiques des données de Pluie brutes et d'ETP sont analysées à l'aide de tests qui permettent de choisir la loi de probabilité appliquée pour le calcul des périodes de retour d'événements climatiques.

Deux tests sont disponibles suivant le caractère continu ou discret de la variable. Le Test de Kolmogorov-Smirnov pour les données continues et le Test du χ^2 pour les données discrètes.

Les précipitations et l'ETP sont des variables continues aléatoires. Cela implique qu'à un instant donné, le paramètre peut prendre n'importe quelle valeur et que son comportement est indépendant de la valeur précédente. Dans le cas présent, ces deux variables, Pluie brute et ETP, se définissent sur un intervalle de valeurs $[0 ; +\infty[$.

Plusieurs lois probabilistes de détermination d'événement sont testées suivant leur intérêt hydrogéologique. Les lois de Weibull et Exponentielle sont couramment utilisées pour la détermination de seuils de dépassement et le calcul de retour d'événements hydrologiques.

Il est à noter que l'ajustement de ces lois est normalement régi par le mode d'échantillonnage. En effet, lors de l'analyse statistique d'une plage de données, une analyse préalable de la méthode d'échantillonnage est effectuée afin de déterminer le biais que peut engendrer un prélèvement aléatoire de valeurs dans une population. Dans le cas présent, l'échantillonnage se fait par décade à date fixe : le 05, 15 et 25 de chaque mois (pas de temps de base de la modélisation). L'échantillonnage est ainsi identique pour toutes les stations et non-aléatoire. Le biais ne sera pas pris en compte ici car il est similaire partout.

Plusieurs lois, couramment utilisées en hydrogéologie, sont testées notamment les lois de distribution de WEIBULL, GALTON, EXPONENTIEL, GUMBEL, NORMAL qui retranscrivent bien la plupart du temps l'évolution des paramètres hydroclimatiques et hydrologiques.

Validation du choix de la loi probabiliste à appliquer

Pour valider (ou rejeter) l'ajustement d'une loi de probabilité, on applique deux tests statistiques paramétriques : le test de Kolmogorov et le test de χ^2 . Un regard plus attentif sera porté sur le test de Kolmogorov suivant le caractère continu des deux variables ETP et Pluie.

Principe des tests de validation d'hypothèse

Le principe général de ces tests de validation d'hypothèse réside dans la comparaison d'une valeur théorique définie par des tables préétablies selon des indices paramétriques et une valeur calculée coïncidant à la formulation empirique à partir des données réelles. La validation de l'hypothèse formulée au départ (H_0) se fait grâce à un indice de satisfaction qui traduit le pourcentage d'acceptation de l'hypothèse formulée.

Le principe mathématique est résumé ci-dessous

Test de Kolmogorov

Conditions d'applications : $F_0(x)$ entièrement spécifiée (i.e. pas de paramètres) et continue.

H_0 : données issues de $F_0(x)$ contre H_1 : données issues d'une autre distribution

Statistique de test :

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F_0(x)|, \text{ où } F_n(x) \text{ est la fonction de répartition empirique}$$

Sous H_0 , la loi de D_n est tabulée

Test du χ^2

Conditions d'applications : $F_{\theta}(x)$ doit être discrète ou discrétisée. p_1, \dots, p_k les probabilités théoriques de chaque classe, et N_1, \dots, N_k les effectifs observés pour chaque classe.

H_0 : données issues de $F_{\theta}(x)$ contre H_1 : données issues d'une autre distribution

Statistique de test :

$$D^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - np_i)^2}{np_i}$$

Loi sous H_0 :

si $F_{\theta}(x)$ est entièrement spécifiée, $D^2 : \chi^2(k-1)$ asymptotiquement

si $F_{\theta}(x)$ dépend de l paramètres, alors il faut estimer ces paramètres par maximum de vraisemblance à partir de la loi discrétisée, et $D^2 : \chi^2(k-1-l)$ asymptotiquement

Note : on admettra l'approximation asymptotique si $np_i > 5$ pour toutes les classes (procéder éventuellement à des regroupements)

*Principe mathématique de la validation par Test (« Statistique et probabilité en hydrologie »
CEMAGREF)*

Résultat des tests d'hypothèses et validation du choix de la loi probabiliste à employer

Cette méthodologie a été appliquée sur les quatre stations météorologiques : Blagnac, Lherm, Palaminy, Clarac.

L'ensemble des résultats, réalisé sous le logiciel XL-Stat, montre que les variables de pluie et d'ETP suivent a priori une loi de distribution de Weibull à trois paramètres γ , β , η .

La loi de WEIBULL est une loi généraliste de détermination d'apparition d'événements. Cette loi de probabilité est en réalité un cas particulier de la loi généralisée des Valeurs Extrêmes (GEV) très souvent appliquée en hydrologie. Elle se définit suivant la formule et les paramètres suivants :

La loi généralisée des valeurs extrêmes $GEV(\mu, \lambda, \xi)$ généralise la loi de Gumbel :

$$f(x) = \frac{1}{\lambda} \left(1 - \frac{\xi(x-\mu)}{\lambda} \right)^{\frac{1}{\xi}-1} \exp \left(- \left(1 - \frac{\xi(x-\mu)}{\lambda} \right)^{\frac{1}{\xi}} \right)$$

$$\mu > 0, \lambda > 0, \xi \neq 0, 1 - \frac{\xi(x-\mu)}{\lambda} > 0$$

$$E(X) = \mu + \frac{\lambda}{\xi} (1 - \Gamma(\xi + 1))$$

$$Var(X) = \left(\frac{\lambda}{\xi} \right)^2 (\Gamma(2\xi + 1) - \Gamma^2(\xi + 1))$$

$$\Gamma(t) = \int_0^{+\infty} x^{t-1} e^{-x} dx \text{ est la fonction gamma.}$$

Pour $\xi = 0$, on retrouve la loi de Gumbel. Si $\xi < 0$, on obtient la loi de Fréchet, et si $\xi > 0$, la loi de Weibull.

La fonction de répartition de la loi de Weibull de forme générale :

$$F(z) = \Pr(Z < z) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{z - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right],$$

Avec γ = paramètre d'origine des temps

β = paramètre de forme

η = paramètre d'échelle

z = donnée observée

Illustration 5 - Principe mathématique de la loi de Weibull (« application de la théorie des valeurs extrêmes en assurance automobile » N.benlagha et M. grun-Réhomme)

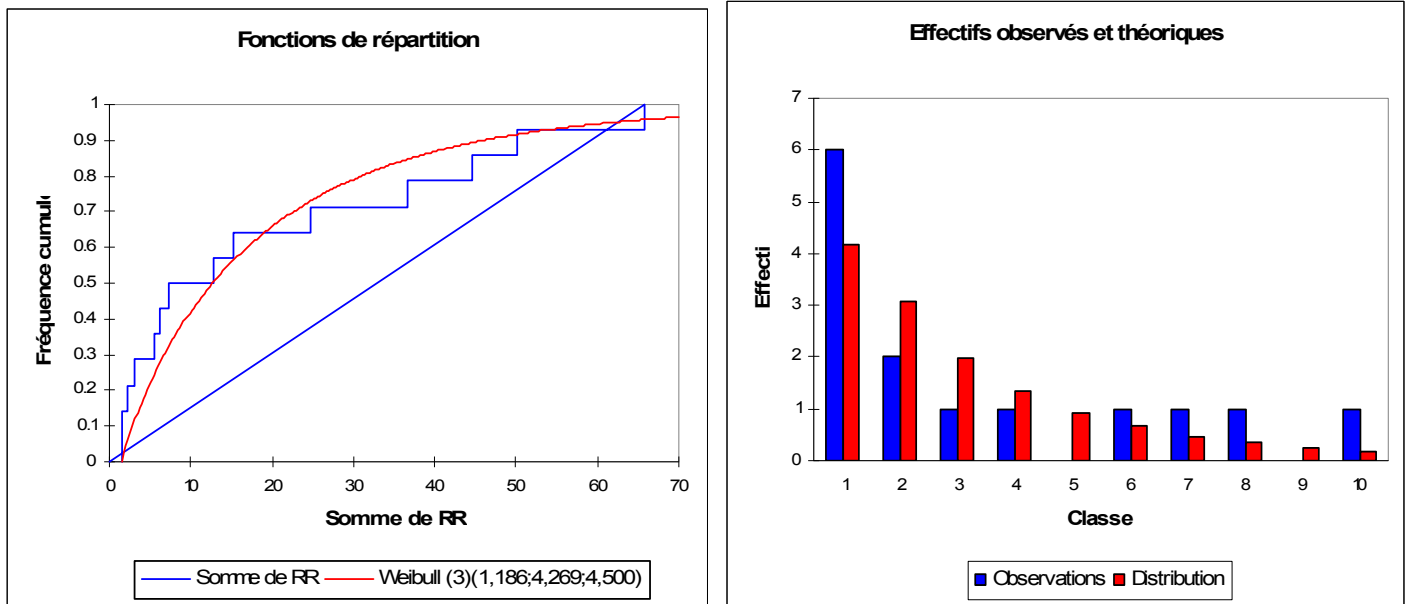
Dans de rares cas, les données climatiques peuvent se rapprocher d'une loi exponentielle avec un « γ » proche de 0.

Une nuance est cependant à apporter concernant la variable ETP. Sa distribution n'est pas aussi claire que celle des précipitations brutes. Sur certaines stations, le type de distribution du paramètre ETP est peu identifiable concernant le test de validation.

Néanmoins, en testant plusieurs lois de distribution, il s'avère que la loi de Weibull traduit le mieux l'évolution des données d'ETP.

L'analyse finale a été effectuée par décade pour les deux variables climatiques.

L'illustration XX ci-dessous montre l'analyse statistique du paramètre précipitation brute (RR) pour la station météorologique de Blagnac à la décade 15/01.



Statistique	Données	Paramètres
Moyenne	19.829	2.531
Variance	448.135	1.168
Asymétrie (Pearson)	0.867	2.496
Aplatissement (Pearson)	-0.770	9.787

Test de Kolmogorov-Smirnov (RR) :	
D	0.181
p-value	0.706
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : L'échantillon suit une loi de Weibull (3)

Ha : L'échantillon ne suit pas une loi de Weibull (3)

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0,05$,

on peut valider l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de **70,58%**.

Analyse statistique du paramètre précipitation brute (RR) pour la station météorologique de Blagnac à la décade 15/01

On peut conclure dans le cas présent que les données de pluie de la station de Blagnac pour le pas de temps 15/01 suivent une loi de distribution de Weibull avec une certitude de 70%. Ce résultat permet de valider l'application de la loi de probabilité de Weibull sur les données afin de connaître les valeurs statistiques théoriques de retour.

Application de la loi de probabilité de Weibull pour déterminer les valeurs de retour

L'analyse du comportement statistique des données va permettre à présent d'utiliser une loi de probabilité ajustée afin de définir les valeurs théoriques probable de retour.

Un exemple de résultat final concernant les périodes de retour de débit (en m³/h) sur la décade 25/01 de la station de Muret sur La Louge (relevés de débits allant de 1990 à 2009) est présenté dans l'illustration ci-après.

		Ajustement à une loi de Weibull			Formule empirique : $F(x) = 1 - \text{Exp} \left\{ - \left[\frac{x-1287.29}{20526.05} \right]^{1.04} \right\}$			
Taille n=19		Xo =1287.29015						
		g =20526.0456			p =1.04			
Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	u = $\frac{\{\ln(T)\}^{1/p}}$	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inf $(Q_j - Q_0)^p$	Borne sup $\ln(Q_j - Q_0)$
13114.8	1415.78	1	0.0263	0.0	1415.78186	1923.655	158.601283	4.855864439
24724.8	1459.96	2	0.0789	0.1	1459.96358	3159.961	215.884672	5.15140216
20728.8	2216.29	3	0.1316	0.2	2216.29086	4428.592	1249.38472	6.834109506
19940.4	2975.89	4	0.1842	0.2	2975.89086	5752.11	2330.54969	7.431655484
29754	8797.09	5	0.2368	0.3	8797.09129	7145.238	11057.5439	8.923964266
33033.6	13114.8	6	0.2895	0.4	13114.8	8622.106	17761.3548	9.378183441
24580.8	19940.4	7	0.3421	0.4	19940.4	10198.36	28570.1336	9.833768159
33346.8	20728.8	8	0.3947	0.5	20728.8	11892.57	29831.1841	9.875165742
28267.2	24580.8	9	0.4474	0.6	24580.8	13727.71	36022.9326	10.05593005
33393.6	24724.8	10	0.5000	0.7	24724.8	15733.21	36255.3117	10.062093
2975.891	28267.2	11	0.5526	0.8	28267.2	17947.92	41990.4913	10.20284779
31971.27	28446.5	12	0.6053	0.9	28446.5461	20425.01	42281.7622	10.20947319
1415.782	29241.8	13	0.6579	1.1	29241.8174	23240.22	43574.3377	10.23833444
28446.55	29754	14	0.7105	1.2	29754	26507.06	44407.6491	10.25649061
42732	31971.3	15	0.7632	1.4	31971.2731	30407.31	48022.4735	10.33149607
8797.091	33033.6	16	0.8158	1.7	33033.6	35260.38	49758.4571	10.36553177
2216.291	33346.8	17	0.8684	2.0	33346.8	41711.71	50270.7524	10.37534914
29241.82	33393.6	18	0.9211	2.4	33393.6	51423.14	50347.3209	10.37680786
1459.964	42732	19	0.9737	3.4	42732	72051.64	65714.6639	10.63211553

Fréquence	Val. Théo.
0.1	3661.91402
0.2	6162.1099
0.5	15733.2063
0.8	33675.8303
0.99	90000.9416

Illustration 6 - Périodes de retour de débit (en m³/h) sur la décade 25/01 de la station de Muret sur La Louge (relevés de débits allant de 1990 à 2009)

Comparaison des deux méthodes et résultats de calcul des périodes de retour d'événements hydrologiques : méthode utilisée pour le modèle Ariège et méthode probabiliste

Il est intéressant de connaître les différences en termes de rendu brute des deux méthodes utilisées pour définir les scénarios hydroclimatiques de référence.

Les deux méthodes partent d'un même principe de détermination à savoir le calcul de fréquence de retour d'événement suivant le classement de données hydrologiques.

La différence se fait au niveau de l'analyse des résultats finaux. Dans le premier cas, celui appliqué pour le département de l'Ariège, le rendu analytique vient directement des données expérimentales. La seconde méthode, développée pour l'outil de gestion de Haute-Garonne, met en place un système analytique supplémentaire qui va permettre d'ajuster aux données expérimentales une loi de probabilité de période de retour. Le rendu final dans le cas présent viendra de données théoriques calculées à partir des données expérimentales de départ.

La comparaison des résultats de deux méthodes montre quelques différences.

A l'échelle saisonnière, les valeurs résultant de l'analyse probabiliste par loi de Weibull sont globalement inférieures à celles venant de l'analyse statistique simple (méthode « Ariège »).

Un bémol est à apporter concernant la station Lherm où les valeurs sont supérieures pour les périodes de retour hivernal quinquennal sec et moyen.

METHODE STATISTIQUE SIMPLIFIEE	<u>Palaminy</u>		<u>Blagnac</u>		<u>Lherm</u>		<u>Clarac</u>	
	recharge hiver(mm)		recharge hiver(mm)		recharge hiver (mm)		recharge hiver(mm)	
décennal sec	4.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	8.20	0.00
quinquennal sec	24.90	0.00	3.60	0.00	10.30	0.00	20.80	0.00
moyen	103.60	4.20	73.60	1.60	76.40	0.00	175.60	4.70
quinquennal humide	379.00	60.70	279.70	9.90	297.00	34.40	461.30	51.20
max	611.00	145.50	588.80	86.00	705.80	163.70	925.20	197.10
METHODE PROBABILISTE WEIBULL	<u>Palaminy</u>		<u>Blagnac</u>		<u>Lherm</u>		<u>Clarac</u>	
	recharge hiver (mm)		recharge hiver(mm)		recharge hiver(mm)		recharge hiver(mm)	
décennal sec	1.59	0.00	0.00	0.00	3.65	0.00	7.78	0.00
quinquennal sec	7.67	0.00	2.37	0.00	13.82	0.00	21.53	0.00
moyen	66.18	0.00	46.70	0.00	86.10	0.00	120.77	0.00
quinquennal humide	281.25	32.41	227.13	8.23	288.13	36.92	417.15	57.09
max	1269.85	457.79	1177.98	415.66	1171.33	508.21	1603.49	490.64

Illustration 7 – Tableau montrant les différences de résultats des scénarios climatiques entre les deux méthodes

En conclusion, il apparaît une relative similarité des résultats entre les deux méthodes. Cependant le mode de calcul par méthode statistique probabiliste peut sembler plus robuste. Elle repose en effet sur des lois strictes de probabilité couramment utilisées dans le domaine de l'hydrogéologie et bien adaptées au contexte de l'étude. Ceci donne un poids supplémentaire pour la construction de l'outil de gestion à partir de scénarios hydroclimatiques de référence.

Le même processus d'analyse a été appliqué pour les périodes de retour concernant les débits d'entrée dans le modèle. La comparaison montre le même type de résultat à

savoir une relative homogénéité lors du rendu de calculs entre la méthode « Ariège » et la méthode de probabilité.

Annexe 10

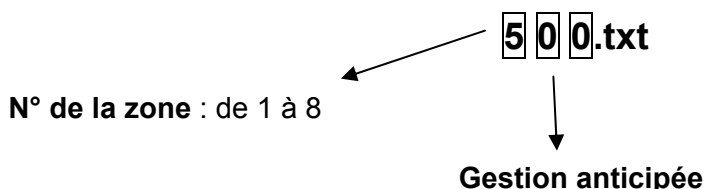
Enregistrement des fichiers de l’Outil de Gestion

	Type climatique (septembre – mars)	Scénario d'évolution (avril – mai – juin)	Nom du fichier enregistré
Gestion Régulée	Pluies efficaces faibles	Pluviométrie déficitaire	Irrig_11.xls
		Pluviométrie moyenne	Irrig_12.xls
		Pluviométrie excédentaire	Irrig_13.xls
	Pluies efficaces moyennes	Pluviométrie déficitaire	Irrig_21.xls
		Pluviométrie moyenne	Irrig_22.xls
		Pluviométrie excédentaire	Irrig_23.xls
	Pluies efficaces fortes	Pluviométrie déficitaire	Irrig_31.xls
		Pluviométrie moyenne	Irrig_32.xls
		Pluviométrie excédentaire	Irrig_33.xls
Gestion Anticipée			Irrig_00.xls

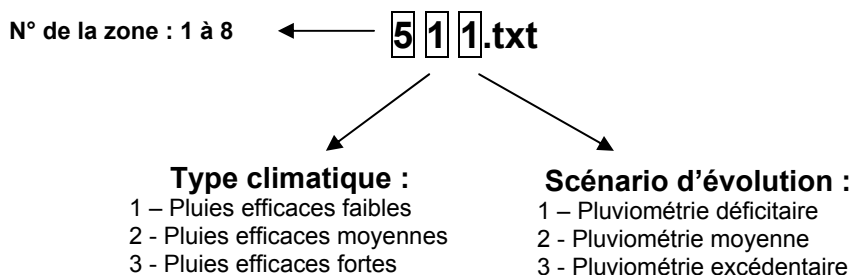
Tableau de correspondance des fichiers enregistrés – Scénario climatique

Format du nom de fichier proposé par défaut lors de l'export de la synthèse par zone

Gestion Anticipée :



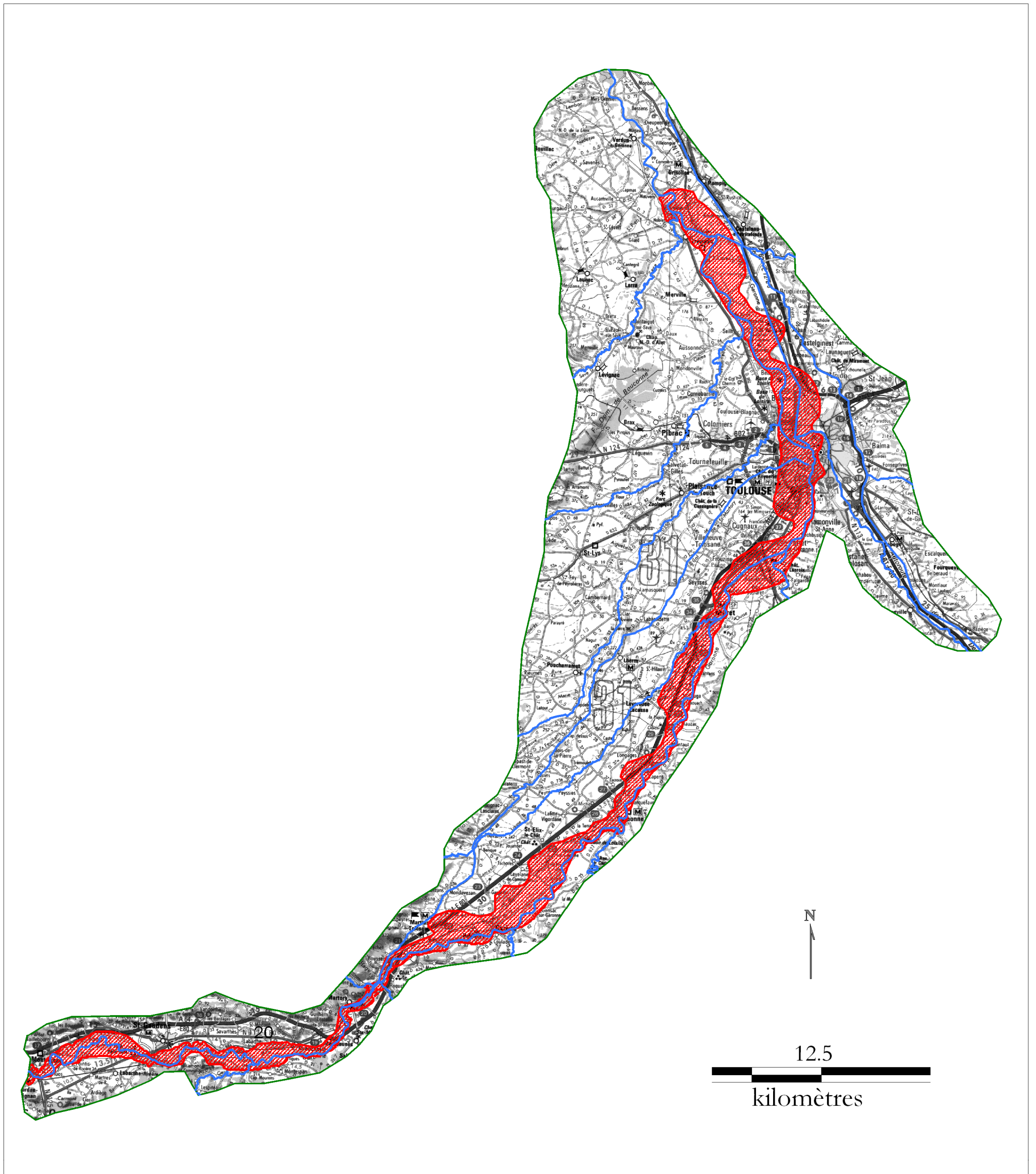
Gestion Régulée :



Annexe 11

Limite de la nappe d'accompagnement de la Garonne

DELIMITATION DE LA NAPPE D'ACCOMPAGNEMENT DE LA GARONNE EN HAUTE-GARONNE
(sur fond IGN à 1/250 000)



Délimitation de la nappe d'accompagnement de la Garonne sur fond de carte IGN à 1/250 000



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Service géologique régional "Midi-Pyrénées"
3, rue Marie Curie / Bât. ARUBA
BP 49
31527 – Ramonville-Saint-Agne - France
Tél. : 05 62 24 14 50