Document public

Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne - Résultats de la modélisation et outil de gestion des prélèvements dans le Tarn-et-Garonne

Rapport final

BRGM/RP-65583-FR
Décembre 2016

PRÉFET DE TARN-ET-GARONNE

DREAL OCCITANIE

AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE
ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTERE DU DEVELOPPEMENT DURABLE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne - Résultats de la modélisation et outil de gestion des prélèvements dans le Tarn-et-Garonne

Rapport final

BRGM/RP-65583-FR
Décembre 2016

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2013-2016, Axe programmatique IV-14

M. Bardeau, P. Le Cointe
Avec la collaboration de
M.E. Bonnet, B. Bourgine, A. Grandemange, T. Hineux, T. Klinka, F. Le Guellanf

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : **O. Douez**	Nom : **A.V. Hau-Barras**
Fonction : Hydrogéologue, Responsable scientifique de programme	Fonction : Directrice Régionale Déléguée Occitanie
Date : 08/11/2016	Date : 27/03/2017
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : Hydrogéologie, Gestion de la ressource, Aquifères, Nappe alluviale, Rivières, Modélisation, MARTHE, Calage, Outil de gestion, Garonne, Tarn, Aveyron, Tarn-et-Garonne, Midi-Pyrénées, Occitanie.

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

Bardeau M., Le Cointe P. (2016) – Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne – Résultats de la modélisation et outil de gestion des prélèvements dans le Tarn-et-Garonne. Rapport BRGM/RP-65583-FR, 358 p., 138 ill., 35 tabl., 26 ann., CD.

© BRGM, 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les services de la Police de l'Eau de Tarn-et-Garonne ont souhaité améliorer l'outil de gestion des autorisations de prélèvements agricoles utilisé depuis 2007 et basé sur un modèle hydrodynamique de la nappe alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron en régime transitoire perfectible.

L'objectif de cette étude était de pouvoir :

- améliorer certains paramètres du modèle préexistant en particulier le calcul de la recharge via un couplage avec le logiciel GARDENIA, la prise en compte d'un réseau hydrographique dynamique et une meilleure évaluation spatiale et temporelle des prélèvements ;
- ajuster si besoin l'extension de la nappe d'accompagnement de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron ;
- mettre à jour l'outil de détermination des volumes prélevables admissibles en fonction de la recharge annuelle à partir de la nouvelle version du modèle, d'un schéma de gestion revu et d'un redécoupage des zones de gestion.

Pour cela, une modélisation en régime transitoire a été réalisée avec le logiciel MARTHE sur 720 pas de temps décadaires, soit 20 ans de simulation, à partir d'un maillage de 250 m de côté.

Comme pour la précédente version du modèle, le calage en régime transitoire s'est avéré très délicat, en raison d'une géométrie du milieu très complexe : terrasses étagées en discontinuité hydraulique, épaisseurs mouillées très faibles etc. Des ajustements des valeurs de la cote du substratum ont dû être appliqués pour résoudre les problèmes de mailles dénoyées et de pompages non satisfaits. Cette opération a permis d'améliorer considérablement le calage des chroniques piézométriques, mais rend l'exploitation des résultats pour l'outil de gestion plus complexe.

La prise en compte du réseau hydrographique dynamique s'est également avérée difficile à implanter dans le modèle en raison des nombreux aménagements hydrauliques sur la Garonne, le Tarn et l'Aveyron (barrages, seuils, canal de dérivation). Le résultat permet néanmoins de définir un exutoire de la nappe alluviale précis et respectant les variations saisonnières.

Le travail de modélisation a également permis de valider le contour de la nappe d'accompagnement défini en 1996.

Un nouvel outil de gestion a ensuite été développé, sur le principe d'une utilisation en trois temps :

- une première consultation à la fin du mois de janvier, au moment du dépôt des demandes d'autorisation annuelle de prélèvement ;
- une deuxième consultation à la fin du mois de mars, avant la publication des arrêtés d'autorisation annuelle de prélèvement ;
- une dernière au début du mois de juin, permettant d'anticiper des restrictions potentielles liées à une modification du scénario climatique annuel entre fin mars et le début de la période d'irrigation.

Le découpage de la plaine alluviale en 58 unités de gestion a été revu. 21 casiers hydrogéologiques ont été dessinées en fonction de paramètres scientifiques (géologie, géomorphologie, caractéristiques hydrodynamiques et sens d'écoulement) et administratifs (contour des périmètres élémentaires gérés par les Organismes Uniques).

Hormis sur certains casiers et pour les scenarii climatiques les plus secs, les volumes disponibles sont suffisants pour satisfaire les demandes de prélèvements actuelles.

Afin d'améliorer la gestion équitable de la ressource en eau de la plaine alluviale du Tarn-et-Garonne, il a été proposé de mettre en place un réseau d'observation adapté et de définir un point de suivi automatique du niveau piézométrique par casier hydrogéologique.

Actuellement, 5 casiers disposent d'un ouvrage suivi automatiquement par le BRGM dans le cadre du Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS quantitatif). 7 autres casiers disposent d'un piézomètre identifié, suivi manuellement, et dont l'équipement pourra éventuellement se faire après un diagnostic. Pour les 9 derniers casiers, un ouvrage doit être identifié ou foré, puis équipé.

Une fois ce réseau en place et plusieurs années de mesures bancarisées, le modèle permettra d'affiner la détermination des volumes prélevables admissibles dans chaque casier en associant à chaque scénario climatique, un niveau piézométrique de référence dans l'ouvrage suivi.

Sommaire

1. Contexte et historique 17

1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL 17

1.2. SYSTÈMES ALLUVIAUX EN EX-MIDI-PYRÉNÉES 17
1.2.1. Rappel de notions d'hydrogéologie 17
1.2.2. Systèmes alluviaux régionaux 21

1.3. PROBLÉMATIQUE DU SYSTÈME ALLUVIAL DE LA GARONNE, DU TARN ET DE L'AVEYRON DANS LE DÉPARTEMENT DE TARN-ET-GARONNE 23
1.3.1. Géologie / Hydrogéologie 23
1.3.2. Besoins / Ressources 23
1.3.3. Activité anthropique et impact sur le milieu 24

1.4. HISTORIQUE DE L'ÉTUDE 24

2. Géologie et hydrogéologie de la zone d'étude 27

2.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET MECANSIMES DE DEPOT 27

2.2. DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES FORMATIONS ALLUVIALES ET MOLASSIQUES 28
2.2.1. Les terrasses anciennes (Fw, Fx, Fy) 28
2.2.2. Les basses plaines (Fz, Fz1, Fz2) 29
2.2.3. Alluvions actuelles du lit majeur (Fz2, Fz3) 29
2.2.4. Formations superficielles 29
2.2.5. Formations molassiques (g3, g3C, g2) 29

2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE 29
2.3.1. Fonctionnement hydrogéologique des systèmes aquifères 30
2.3.2. Propriétés physico-chimiques des eaux 33
2.3.3. Relations nappes-rivières 33

3. Construction du modèle hydrogéologique 35

3.1. PRÉSENTATION DU CODE DE CALCUL UTILISÉ 35
3.1.1. Un modèle multicouche 35
3.1.2. Variables et paramètres d'entrée du modèle 36

3.2. PÉRIODE ET PAS DE TEMPS DE CALCULS 38

3.3. GÉOMÉTRIE 39
3.3.1. Extension du modèle et conditions aux limites 39
3.3.2. Couches représentées 41
3.3.3. Maillage 41
3.3.4. Modèle géologique 43

3.4. PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES INITIAUX 46
3.4.1. Charges initiales 46
3.4.2. Perméabilité 47
3.4.3. Coefficient d'emmagasinement 48

3.5. RECHARGE ET RUISSELLEMENT 50
3.5.1. Paramètres nécessaires à la modélisation 50
3.5.2. Climat de la plaine du Tarn-et-Garonne 50
3.5.3. Pluviométrie 51
3.5.4. Evapotranspiration potentielle 58
3.5.5. Calcul de la recharge 60

3.6. RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE 63
3.6.1. Passage au réseau hydrographique dynamique 63
3.6.2. Paramètres définissant le réseau hydrographique 63
3.6.3. Cours d'eau modélisés 64
3.6.4. Numéros d'affluents 65
3.6.5. Numéros de tronçons 66
3.6.6. Arbre de branchement des affluents de rivière 67
3.6.7. Longueur des tronçons 67
3.6.8. Largeur des tronçons 67
3.6.9. Cotes du fond et pente du lit des rivières 68
3.6.10. Cote du fil d'eau dans les rivières 72
3.6.11. Stations de mesure de la hauteur et du débit des cours d'eau 75
3.6.12. Rugosité du lit de la rivière 76
3.6.13. Hauteurs et facteurs débit des seuils 80
3.6.14. Epaisseur et perméabilité du colmatage du lit et des berges 83
3.6.15. Débits des rivières à l'entrée du modèle 83
3.6.16. Modélisation des débits des cours d'eau non instrumentés 85
3.6.17. Evaluation du débit instantané des petits cours d'eau non instrumentés 87

3.7. PRÉLÈVEMENTS 89
3.7.1. Croisement des données disponibles 89
3.7.2. Synthèse des volumes annuels prélevés 90
3.7.3. Localisation des prélèvements 94
3.7.4. Ventilation temporelle des prélèvements 95
3.7.5. Création des chroniques de prélèvements 97
3.7.6. Canal de Golfech 98
3.7.7. Canal latéral à la Garonne 100

3.8. OBSERVATIONS 102
3.8.1. Carte piézométrique d'octobre 1996 102
3.8.2. Chroniques piézométriques 103
3.8.3. Chroniques de débit et de hauteur des cours d'eau 106
3.8.4. Mesures ponctuelles du niveau des cours d'eau 106

4. Calage et résultats du modèle 107

4.1. PROCEDURE DE CALAGE 107
4.1.1. Les objectifs du calage et les différentes étapes 107
4.1.2. Paramètres de calage 110
4.1.3. Données de calage 111
4.1.4. Déroulement du calage 111

4.2. CALAGE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES 115
4.2.1. Paramètres hydrodynamiques 115
4.2.2. Paramètres hydroclimatiques 119
4.2.3. Paramètres géométriques 120
4.2.4. Paramètres hydrographiques 122
4.2.5. Cas particulier de la retenue de Malause 124
4.2.6. Charges et débits initiaux 125

4.3. RÉSULTATS DU CALAGE 127
4.3.1. Calage en régime permanent 127
4.3.2. Calage en régime transitoire : piézométrie 130
4.3.3. Calage en régime transitoire : hauteurs et débits des rivières 139
4.3.4. Bilan hydrologique du modèle 145

5. Analyse critique du modèle 157

5.1. AMÉLIORATIONS APPORTÉES AU MODÈLE PRÉ-EXISTANT 157

5.2. LIMITES DU MODÈLE ACTUEL 158

6. Délimitation de la nappe d'accompagnement 160

6.1. NOTION DE NAPPE D'ACCOMPAGNEMENT 160

6.2. MÉTHODE DE DÉLIMITATION 160
6.2.1. Méthode de Theis simplifiée 160
6.2.2. Méthode des trajectoires inverses 161

6.3. NAPPE D'ACCOMPAGNEMENT DE LA GARONNE, DU TARN ET DE L'AVEYRON 162
6.3.1. Méthode de Theis (Darcy) 163
6.3.2. Méthode des trajectoires inverses – Réseau hydrographique fixe 164
6.3.3. Méthode des trajectoires inverses – Réseau hydrographique dynamique 165
6.3.4. Synthèse 168

7. Casiers hydrogéologiques et réseau de suivi piézométrique 171

7.1. ANCIENS CASIERS HYDROGÉOLOGIQUES 171

7.2. NOUVEAUX CASIERS HYDROGÉOLOGIQUES 172

7.3. RÉSEAU DE SUIVI QUANTITATIF 173

8. Outil de gestion des prélèvements 175

8.1. CALCUL DES VOLUMES PRÉLEVABLES ADMISSIBLES 175
8.1.1. Méthodologie 175
8.1.2. Détermination des scenarii climatiques 177
8.1.3. Analyse des épaisseurs d'eau disponible 182
8.1.4. VPA calculés – Réseau hydrographique fixe 184
8.1.5. VPA calculés – Réseau hydrographique dynamique 186
8.1.6. Test de prélèvement des VPA 187

8.2. ADAPTATION DE L'OUTIL DE GESTION DES PRÉLÈVEMENTS 189
8.2.1. Fonctionnalités disponibles 189
8.2.2. Données d'entrée 190
8.2.3. Détermination du scénario climatique et des VPA appliqués 191
8.2.4. Consultation des résultats 193
8.2.5. Notice d'utilisation de l'outil de gestion 194

9. Conclusions 195

10. Bibliographie 197

Liste des illustrations

Illustration 1 – Zone saturée et zone non saturée d'un aquifère (source documentaire BRGM) 18
Illustration 2 – Nappe libre et nappe captive : en 1, la nappe est libre ; en 2, la nappe est captive ; en 3, la nappe est captive et artésienne (source documentaire BRGM) 19
Illustration 3 – Porosité d'un aquifère, eau libre et eau liée (source documentaire BRGM) 20
Illustration 4 – Effet de la perméabilité sur un pompage : une perméabilité plus faible induit un rabattement plus important du niveau de la nappe (source documentaire BRGM) 21
Illustration 5 – Schémas de l'agencement des terrasses étagées / emboîtées (source documentaire BRGM) 22
Illustration 6 – Carte géologique harmonisée à 1/50 000 et MNT 250 m sur le secteur étudié (emprise approximative du modèle tracée en rouge) 27
Illustration 7 – Coupe Nord-Sud des alluvions de la Garonne, à l'ouest de Saint-Nicolas-de-la-Grave 28
Illustration 8 – Carte piézométrique issue des mesures d'octobre 1996 31
Illustration 9 – Exemple de discrétisation d'un modèle maillé multicouche 36
Illustration 10 – Paramètres et variables nécessaires à la modélisation MARTHE 37
Illustration 11 – Schéma représentant l'organisation du fichier des pas de temps de calcul du modèle 38
Illustration 12 – Carte géologique harmonisée au 1/50 000 sur le secteur étudié (emprise approximative du modèle tracée en rouge) 39
Illustration 13 – Limites du modèle en plan (schéma supérieur) et selon une coupe A-B (schéma inférieur) 41
Illustration 14 – Maillage de la couche 1 (alluvions) du modèle hydrodynamique 42
Illustration 15 – Localisation des ouvrages avec logs géologiques validés (losanges noirs) et des sondages réalisés au pénétromètre (carrés rouges) dans le cadre du projet 44
Illustration 16 – Carte de la topographie / toit des alluvions, basée sur le MNT 25m 44
Illustration 17 – Carte du mur des alluvions / toit des molasses, basée sur le modèle géologique 45
Illustration 18 – Carte des épaisseurs des alluvions basée sur le modèle géologique 45
Illustration 19 – Charges hydrauliques initiales – Interpolation campagne piézométrique octobre 1996 46
Illustration 20 – Perméabilités initiales basées sur la géologie 47
Illustration 21 – Carte des perméabilités issue du calage du modèle 2007 48
Illustration 22 – Coefficients d'emmagasinement initiaux basés sur la géologie 49
Illustration 23 – Carte des coefficients d'emmagasinement issue du calage du modèle 2007 49
Illustration 24 – Carte de répartition des pluies – Normale des pluies 1981-2010 (AURHELY – Météo France) 51
Illustration 25 – Postes pluviométriques suivis par Météo France 52
Illustration 26 – Graphique de simple cumul relatif à la station de Montauban 54
Illustration 27 – Graphiques des doubles cumuls relativisés des stations dans la zone modélisée 55
Illustration 28 – Graphiques des doubles cumuls relativisés des stations sur le pourtour de la zone modélisée 57
Illustration 29 – Carte de localisation des stations météorlogiques avec données d'ETP (triangles rouges) 58
Illustration 30 – ETP décadaire aux stations Météo France de Montauban, Ondes et Savenès 59

Illustration 31 – Graphique du simple cumul des données d'ETP de la station de Montauban 59
Illustration 32 – Graphique du double cumul des données d'ETP 60
Illustration 33 – Comparaison des différentes méthodes de calcul de la pluie efficace 62
Illustration 34 – Carte des cours d'eau modélisés 65
Illustration 35 – Numéros d'affluents affectés aux cours d'eau modélisés 66
Illustration 36 – Numéros de tronçons affectés aux cours d'eau modélisés 66
Illustration 37 – Exemple du tracé du polygone d'un cours d'eau à partir de la BDORTHO (sur fond du maillage du modèle) 67
Illustration 38 – Localisation des points de mesures au droit des ponts des principaux cours d'eau ... 69
Illustration 39 – Profils bathymétriques récupérés 70
Illustration 40 – Exemple de profil en travers (Tarn, 2005) 70
Illustration 41 – Carte de localisation des points de mesure de la cote du fil de l'eau 73
Illustration 42 – Différences de hauteur d'eau entre hautes eaux et basses eaux 2015 74
Illustration 43 – Carte de localisation des stations Banque HYDRO de la zone d'étude 75
Illustration 44 – Calage de la rugosité et de la cote de fond pour la station de la Garonne à Verdun .. 78
Illustration 45 – Estimation de la rugosité pour la Gimone 78
Illustration 46 – Carte des coefficients de rugosité retenus 79
Illustration 47 – Carte des hauteurs de seuil retenu 82
Illustration 48 – Carte des facteurs débit des seuils retenus 82
Illustration 49 – Localisation des « mailles sources » du modèle (flèches bleues) 83
Illustration 50 – Carte de localisation des bassins de référence 86
Illustration 51 – Localisation des 53 points de mesures de débit ponctuel (mi-mars 2014) 87
Illustration 52 – Répartition des volumes prélevés totaux (ESU et ESO) annuels par types d'usage .. 91
Illustration 53 – Évolution des prélèvements annuels totaux (ESO et ESU) par usages de 1996 à 2012 dans la plaine alluviale du Tarn-et-Garonne 92
Illustration 54 – Évolution des prélèvements annuels dans les eaux souterraines de 1996 à 2012 dans la plaine alluviale du Tarn-et-Garonne 93
Illustration 55 – Évolution des prélèvements annuels des eaux superficielles de 1996 à 2012 dans la plaine alluviale du Tarn-et-Garonne 93
Illustration 56 – Carte de localisation des prélèvements dans les eaux souterraines – Moyenne interannuelle de 2006 à 2012 (Données AEAG et DDT 82, retraitées par le BRGM) . 94
Illustration 57 – Carte de localisation des prélèvements des eaux superficielles – Moyenne interannuelle de 2006 à 2012 (Données AEAG et DDT 82, retraitées par le BRGM) . 95
Illustration 58 – Ventilation des volumes prélevés sur une année 95
Illustration 59 – Évolution des prélèvements annuels quantifiés sur la période 1996-2012 97
Illustration 60 – Plan d'ensemble de l'aménagement hydroélectrique de Golfech (Travade, 1992) 99
Illustration 61 – Synoptique de fonctionnement hydraulique du canal (HYDRATEC, 2007) 101
Illustration 62 – Débits de fuite du canal latéral injectés dans la nappe alluviale 102
Illustration 63 – Carte piézométriques et ouvrages mesurés lors de la campagne d'octobre 1996 ... 103
Illustration 64 – Carte de localisation des points d'observation : piézomètres et stations hydrométriques 104
Illustration 65 – 118 pompages non satisfaits (pixels colorés) 113

Illustration 66 – 802 mailles en débordement (pixels colorés) 113
Illustration 67 – 2 247 mailles quasi-dénoyées (pixels rouges) 114
Illustration 68 – Comparaison cotes fils d'eau avant/après campagne d'avril 2015 114
Illustration 69 – Coupe du modèle montrant la morphologie des alluvions sur les pentes 115
Illustration 70 – Carte des perméabilités de calage du modèle en régime transitoire 117
Illustration 71 – Carte des coefficients d'emmagasinement de calage en période transitoire 118
Illustration 72 – Carte des temps de ½ percolation de calage en période transitoire 120
Illustration 73 – Proportion de pompages non satisfaits en fonction de l'épaisseur des alluvions 121
Illustration 74 – Nombre de mailles dénoyées en fonction de l'épaisseur des alluvions 121
Illustration 75 – Cote du substratum des alluvions issue du calage en régime transitoire 122
Illustration 76 – Cotes de fond du lit des rivières après calage 123
Illustration 77 – Pente du lit des rivières après calage 123
Illustration 78 – Niveaux de la nappe alluviale imposés par les contre-canaux de Malause 125
Illustration 79 – Charges hydrauliques initiales en fin de calage 126
Illustration 80 – Écarts charges basses eaux simulées – charges 1996 interpolées 126
Illustration 81 – Débits initiaux des rivières en fin de calage 127
Illustration 82 – Comparaison entre la carte piézométrique observée en octobre 1996 et la carte piézométrique calculée à cette même période 128
Illustration 83 – Diagramme de dispersion charges mesurées / simulées en régime permanent 129
Illustration 84 – Diagramme de dispersion régime permanent - Zoom sur l'intervalle h = 40 à 120 m 129
Illustration 85 – Diagramme de dispersion charges mesurées / simulées en régime transitoire (10/1996) 130
Illustration 86 – Diagramme de dispersion régime transitoire - Zoom sur l'intervalle h = 40 à 120 m 131
Illustration 87 – Localisation des piézomètres RCS dans les basses terrasses 133
Illustration 88 – Chroniques piézométriques dans les basses terrasses (piézomètres RCS) 134
Illustration 89 – Chroniques piézométriques dans la basse plaine de la Garonne (piézomètres RCS) 135
Illustration 90 – Chroniques piézométriques dans les basses plaines du Tarn et de l'Aveyron (piézomètres RCS) 136
Illustration 91 – Diagramme de dispersion moyenne des niveaux mesurés / moyenne des niveaux simulés 137
Illustration 92 – Diagramme de dispersion moyenne des niveaux mesurés / moyenne des niveaux simulés en période d'étiage (septembre – octobre) 138
Illustration 93 – Histogramme de distribution de la moyenne des écarts de calage 138
Illustration 94 – Contribution de la nappe alluviale au débit de la Garonne à Lamagistère 141
Illustration 95 – Chroniques de débit des rivières, hors stations à l'entrée du modèle 142
Illustration 96 – Sélection de chroniques de hauteurs des rivières 143
Illustration 97 – Diagramme de dispersion – Cote du fil d'eau des rivières – Avril 2015 144
Illustration 98 – Diagramme de dispersion – Cote du fil d'eau des rivières – Septembre 2015 145
Illustration 99 – Histogramme des éléments des bilans hydrologiques annuels (en millions de m^3) .. 146
Illustration 100 – Histogramme des éléments des bilans hydrologiques annuels (en %) 146

Illustration 101 – Échanges rivière -> nappe (en m³/h) – Mai 2008 (débit moyen) 149
Illustration 102 – Échanges rivière -> nappe (en m³/h) – Janvier 2004 (crue) 149
Illustration 103 – Ratio débordements cumulés / recharge cumulée 150
Illustration 104 – Maximum de débordements (3ème décade janvier 1997) 151
Illustration 105 – Maximum de désaturations (2ème décade novembre 2012) 152
Illustration 106 – Échanges décadaires Molasse -> Alluvions (en m³/h) 153
Illustration 107 – Échanges annuels Molasse -> Alluvions (en millions de m³) 153
Illustration 108 – Histogramme de l'évolution du stockage de la zone modélisée (en millions de m³) 154
Illustration 109 – Histogramme de l'évolution du stockage de la nappe alluviale (en millions de m³) 155
Illustration 110 – Histogramme de l'évolution du stockage de la molasse modélisée (en millions de m³) 155
Illustration 111 – Schéma de synthèse du bilan hydrologique sur la période 1995-2015 156
Illustration 112 – Carte de l'emprise de la nappe d'accompagnement définie en 1996 (cf. Gandolfi, 1997) 162
Illustration 113 – Carte de délimitation de la nappe d'accompagnement avec le méthode de Theis, à partir des données de calage du nouveau modèle 163
Illustration 114 – Isochrones à 90 j pour trois scenarii climatiques (modèle 2015) 164
Illustration 115 – Isochrones à 90 j pour trois scenarii climatiques (modèle 2015) – Zoom sur le secteur d'Escatalens (rouge : décennal sec, vert : moyen, bleu : décennal humide) 164
Illustration 116 – Isochrones à 122 j pour trois scenarii climatiques 165
Illustration 117 – Isochrones à 122 j pour trois scenarii climatiques – Zoom sur le secteur d'Escatalens (rouge : décennal sec, vert : moyen, bleu : quinquennal humide) 166
Illustration 118 – Analyse de la sensibilité de la porosité efficace sur les isochrones à 122 j 167
Illustration 119 – Échanges rivière -> nappe simulés au 01/08/2014 168
Illustration 120 – Carte des 58 casiers hydrogéologiques définis en 1996 171
Illustration 121 – Carte des 21 casiers hydrogéologiques et du réseau de suivi associé 172
Illustration 122 – Carte des casiers hydrogéologiques colorés par OU-Gc et des prélèvements agricoles (autorisés en 2015 sur les eaux souterraines) 174
Illustration 123 – Schéma chronologique de la modélisation 175
Illustration 124 – Schéma présentant le principe de calcul des VPA à l'échelle des mailles du modèle 176
Illustration 125 – Évolution des niveaux décadaires moyens des piézomètres du RCS sur une année hydrologique 177
Illustration 126 – Évolution du cumul annuel de pluie efficace de 1949 à 2015 (station de Montauban) 179
Illustration 127 – Étapes de calcul des VPA à l'échelle des mailles du modèle 181
Illustration 128 – Carte de comparaison des VPA et des demandes de prélèvements agricoles pour l'année de recharge minimale 185
Illustration 129 – Page d'accueil de l'outil EXCEL 189
Illustration 130 – Exemple de chronique piézométrique 190
Illustration 131 – Exemple de chronique piézométrique indiquant la période de retour (indcateur BSH) 190
Illustration 132 – Données climatiques décadaires rentrées dans l'outil EXCEL 191
Illustration 133 – Exemple de fichier source pour les prélèvements pour l'irrigation 191

Illustration 134 – Graphiques des scenarii de recharge Février-Mai 192
Illustration 135 – Graphiques des scenarii de recharge Avril-Mai 192
Illustration 136 – Choix du casier pour lequel on souhaite connaître les résultats de la simulation de gestion 193
Illustration 137 – Résultats de la simulation de gestion pour un des casiers 193
Illustration 138 – Synthèse des prélèvements dans la zone choisie 194

Liste des tableaux

Tableau 1 – Valeurs de porosité efficace pour diverses formations (source : Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003, MEDD, 2004) 20
Tableau 2 – Classification des aquifères selon leur perméabilité (source : Les eaux souterraines. Connaissance et gestion, J.J. Collin, 2004, BRGM Editions) 21
Tableau 3 – Historique des travaux de modélisation menés par le BRGM sur la nappe alluviale dans le Tarn-et-Garonne (cf. chapitre 3 pour l'explication des différentes notions liées aux outils de modélisation) 25
Tableau 4 – Systèmes aquifères alluviaux modélisés (d'après la BDRHF V1) 30
Tableau 5 – Principales caractéristiques des stations météorologiques dans et autour du secteur d'étude 52
Tableau 6 – Données pluviométriques décadaires récupérées 53
Tableau 7 – Valeurs AURELHY stations étudiées et écart à station de Montauban 53
Tableau 8 – Comparaison des chroniques de pluies décadaires de Montauban et des autres stations 55
Tableau 9 – Comparaison des écarts à la station de Montauban AURELHY / Chroniques décadaires 56
Tableau 10 – Stations avec données d'ETP dans la zone d'étude élargie et données obtenues 58
Tableau 11 – Comparaison des chroniques d'ETP décadaires de Montauban et des autres stations 59
Tableau 12 – Caractéristiques des stations Banque HYDRO de la zone d'étude 76
Tableau 13 – Coefficients de rugosité usuels 77
Tableau 14 – Coefficients de rugosité retenus 79
Tableau 15 – Synthèse des données des différents seuils 81
Tableau 16 – Ratios des BV station hydrométrique / maille source 84
Tableau 17 – Géologie de surface des bassins 86
Tableau 18 – Synthèse des mesures de débit ponctuel (mi-mars 2014) 88
Tableau 19 – Bilan des volumes annuéls prélevés sur la période 2006-2012 90
Tableau 20 – Coefficients de répartition temporelle des prélèvements agricoles (EAUCEA, 2006) 96
Tableau 21 – Coefficients de répartition temporelle des prélèvements agricoles 2011- 2012. 97
Tableau 22 – Reconstitution des prélèvements pour les années 1996 à 2005. 98
Tableau 23 – Estimation des fuites du canal latéral à la Garonne dans le Tarn-et-Garonne 100
Tableau 24 – Liste des piézomètres et terrasses alluviales captées 105
Tableau 25 – Quantification des écarts entre données moyennes simulées et observées 139

Tableau 26 – Critères de Nash sur les débits des rivières 140
Tableau 27 – Tableau des éléments du bilan hydrologique du modèle calé, en m³/an, de 1995 à 2015 145
Tableau 28 – Années retenues, cumuls de pluie efficace et périodes de retour correspondantes 180
Tableau 29 – Équivalences années climatiques / chroniques de débit amont utilisée 181
Tableau 30 – Années réelles retenues pour le calcul des VPA 182
Tableau 31 – Différence de charge moyenne par casier (en m) entre la charge simulée au 1ER juin et la charge de référence au 1er juin 2012 183
Tableau 32 – Résultats des VPA par casier (en m³/an) calculés pour chacun des 8 scenarii climatiques identifiés (modèle 2015) 184
Tableau 33 – Résultats des VPA par casier (en m³/an) calculés pour chacun des 8 scenarii climatiques identifiés (modèle 2016) 186
Tableau 34 – Différence de charge moyenne par casier (en m) entre la charge simulée au 1er octobre et la charge simulée au 1er octobre 2012 188
Tableau 35 – Seuils de recharge octobre-mai associés à chaque scenario climatique 192

Liste des annexes

Annexe 1 Carte de la zone modélisée 201
Annexe 2 Carte géologique harmonisée à 1/50 000 dans le secteur de la plaine alluviale du Tarn-et-Garonne 205
Annexe 3 Carte des systèmes aquifères, selon la BDRHF Version 1 209
Annexe 4 Carte piézométrique de la nappe alluviale – Octobre 1996, basses eaux 213
Annexe 5 Carte des points de prélèvements des eaux de surface et souterraines (années 2006 à 2012) 217
Annexe 6 Présentation du logiciel MARTHE 221
Annexe 7 Méthodologie et résultats du modèle géologique 227
Annexe 8 Fiche climatique de la station de Montauban (82221002) – Source MétéoFrance 245
Annexe 9 Présentation du modèle GARDÉNIA (pluie-débit) 249
Annexe 10 Principe du réseau hydrographique dans MARTHE 257
Annexe 11 Modélisation des débits des cours d'eau non instrumentés (GARDENIA) 267
Annexe 12 Traitement des fichiers de prélèvements des eaux souterraines et superficielles 277
Annexe 13 Chroniques de calage des niveaux piézométriques 283
Annexe 14 Chroniques de calage des débits en rivières 291
Annexe 15 Chroniques de calage des hauteurs d'eau en rivières 297
Annexe 16 Composantes du bilan hydrologique 301
Annexe 17 Délimitation de la nappe d'accompagnement – Méthode de Theis simplifié et Darcy 307
Annexe 18 Tableau des 21 casiers hydrogéologiques 313
Annexe 19 Classes des volumes annuels prélevés sur les eaux souterraines, par casier hydrogéologique et par usage (en m³/an) 317
Annexe 20 Calcul de la pluie efficace et du niveau du réservoir sol progressif à chaque pas de temps par intégration (extrait de De Oliveira Nascimento, 1995) 323

Annexe 21 Pluie efficace annuelle / octobre-mai et période de retour – Station de Montauban – 1949-2015 325
Annexe 22 Comparaison des charges au 01/06 à la charge de référence (01/06/2012) pour les 8 scenarii retenus 329
Annexe 23 Carte des VPA calculés par casier, pour différents scenarii de recharge 335
Annexe 24 Tableaux des VPA calculés et comparaison avec les volumes demandés 341
Annexe 25 Comparaison des charges au 01/10 à la charge au 01/10/2012 pour les 8 scenarii retenus 347
Annexe 26 Etude statistique des recharges saisonnières – Station de Montauban – 1949-2015 353

1. Contexte et historique

1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL

Les aquifères alluviaux du bassin Adour-Garonne constituent des réservoirs économiquement importants d'autant qu'ils sont quasiment tous situés dans les « zones de répartition des eaux superficielles et souterraines » dans lesquelles les seuils d'autorisation sont abaissés à 8 m^3/h. Dans ces conditions, la moindre ressource devient importante et doit être finement gérée entre les exigences de gestion des débits d'étiage et les enjeux socio-économiques : Alimentation en Eau Potable (AEP), irrigation, eau industrielle, ...

Par ailleurs, l'activité anthropique actuelle ou historique impose de savoir estimer les effets sur le milieu naturel de sources diffuses de polluants potentiels (miniers, agricoles…) ou ponctuelles (sites industriels, voiries, bâtis urbains, …). D'une manière générale, le devenir dans la nappe des eaux d'infiltration et des éléments qu'elles sont susceptibles d'y entraîner constitue une problématique croissante.

Les différentes terrasses alluviales contiennent des aquifères libres ou des aquifères alluviaux proprement dits, susceptibles d'être hydrauliquement interconnectées entre eux et, pour les bas niveaux topographiques, en relation avec le cours d'eau. La connaissance de leur fonctionnement en vue de leur préservation et de leur gestion implique de mettre en œuvre une modélisation des ressources. Celle-ci est proposée à partir de la mise en place d'un modèle mathématique maillé permettant, d'une part, une utilisation des réserves souterraines équitable entre les utilisateurs dans le respect d'un développement durable et, d'autre part, d'apprécier les impacts directs (rejets) ou indirects (ruissellement, mobilisation et concentration de polluants, infiltration) de l'activité humaine sur la ressource en eau.

1.2. SYSTÈMES ALLUVIAUX EN EX-MIDI-PYRÉNÉES

1.2.1. Rappel de notions d'hydrogéologie

Les descriptions, tableaux et figures présentés dans les chapitres suivants sont issus du rapport BRGM RP-62648-FR et très largement inspirés du guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable), dont la référence est donnée en bibliographie. On pourra s'y reporter pour plus d'informations.

Aquifère et nappe

Deux termes sont régulièrement utilisés par les hydrogéologues lorsque l'on évoque les eaux souterraines : aquifère et nappe.

Un aquifère peut être défini[1] comme un ensemble de roches perméables, reposant sur – et parfois recouvert par – des roches moins perméables, comportant une zone saturée[2] et

[1] Définition du Comité National Français des Sciences Hydrologiques

[2] La zone saturée d'un aquifère correspond à la zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices des roches.

conduisant suffisamment l'eau pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables.

Une nappe est quant à elle définie comme « ensemble de l'eau présente dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique ».

En simplifiant, l'aquifère est le contenant (« le réservoir ») dans lequel s'écoule une nappe (le contenu).

Un aquifère comporte une zone saturée et, le cas échéant, une zone non saturée (cf. Illustration 1). La zone non saturée correspond à la partie de l'aquifère dans laquelle les « vides » de la roche ne sont pas entièrement saturés d'eau.

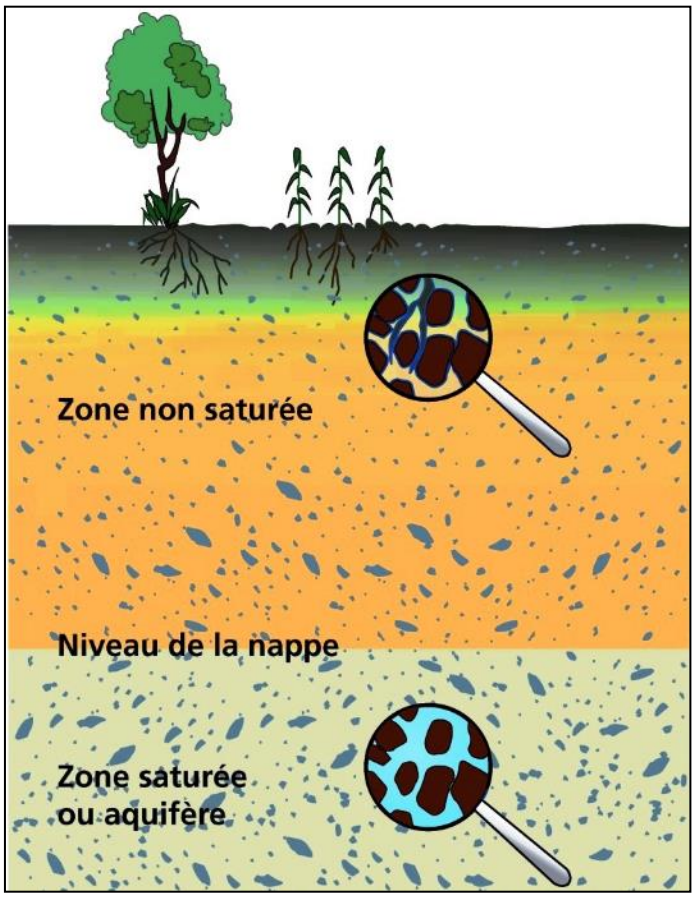


Illustration 1 – Zone saturée et zone non saturée d'un aquifère (source documentaire BRGM).

Nappe libre et nappe captive

Selon les conditions géologiques et topographiques – parfois artificiellement modifiées – une nappe se trouve en situation de « nappe libre » ou de « nappe captive ».

Une nappe libre repose sur une couche très peu perméable et elle est surmontée d'une zone non saturée au sein de l'aquifère. Elle est donc soumise à la pression atmosphérique. C'est en général la première nappe rencontrée depuis la surface.

Dans une nappe captive, l'eau est confinée dans l'aquifère entre deux formations géologiques très peu perméables. Elle est donc mise sous pression. Ceci se produit souvent dans des aquifères profonds mais peut aussi être observé à quelques dizaines de mètres de profondeur.

Lorsqu'un forage atteint une nappe captive, le niveau de l'eau remonte dans le forage. Ce niveau, exprimé en altitude par rapport au niveau de la mer, définit le niveau piézométrique. Si ce niveau se situe au-dessus de la surface du sol, l'eau jaillit naturellement. On dit alors que le forage est artésien.

L'Illustration 2 présente les différents cas évoqués précédemment.

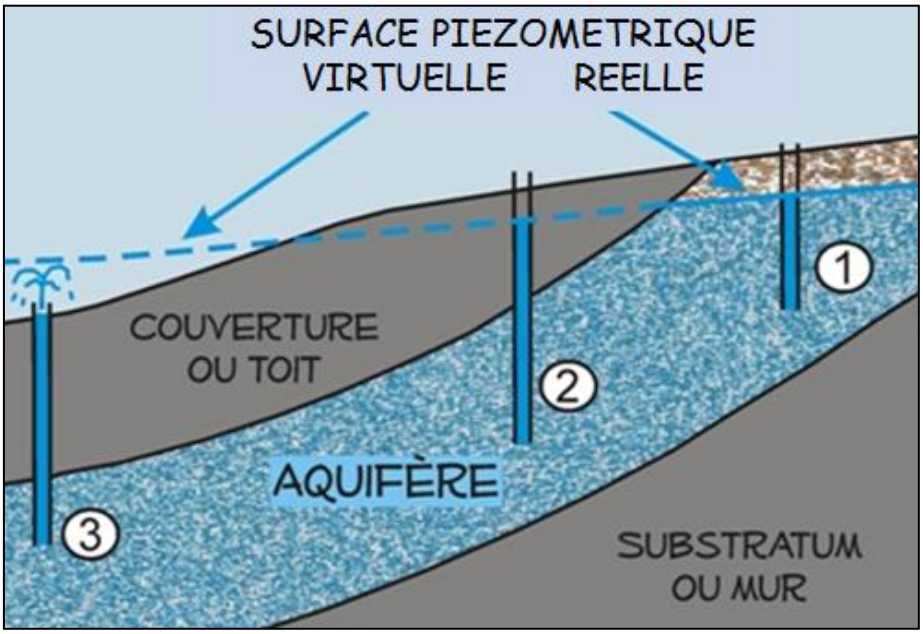


Illustration 2 – Nappe libre et nappe captive : en 1, la nappe est libre ; en 2, la nappe est captive ; en 3, la nappe est captive et artésienne (source documentaire BRGM).

Caractérisation d'un aquifère

De nombreux paramètres permettent de qualifier les propriétés d'un aquifère. Quelques-uns sont cités ci-après, selon leur capacité à qualifier une fonction de stockage de l'aquifère ou une fonction d'écoulement dans l'aquifère.

- **Capacité de stockage**

La quantité d'eau qu'un aquifère emmagasine dépend de ses dimensions (étendue, extension) et de la porosité des roches qui le constituent. La porosité d'une roche correspond au ratio entre le volume des « vides » dans la roche et le volume total. Une roche comporte en effet des vides résiduels entre les grains ou blocs qui la constituent (cf. Illustration 3). Cette porosité varie de quelques pourcents dans une roche compacte et massive (par exemple un basalte massif) à plus de 40% dans des argiles (la porosité des argiles n'est cependant pas exploitable en raison de la très petite taille des pores, laquelle induit d'importants phénomènes de capillarité).

La notion de porosité est essentielle car c'est elle, avec le volume du réservoir aquifère, qui détermine le volume d'eau contenu dans un aquifère. Néanmoins, seule une partie de l'eau contenue dans l'aquifère est disponible pour les écoulements. En effet, une partie de l'eau contenue au sein des pores est liée aux grains de la roche par des forces de capillarité. On l'appelle l'eau liée, par opposition à l'eau disponible pour les écoulements, dénommée l'eau libre (cf. Illustration 3).

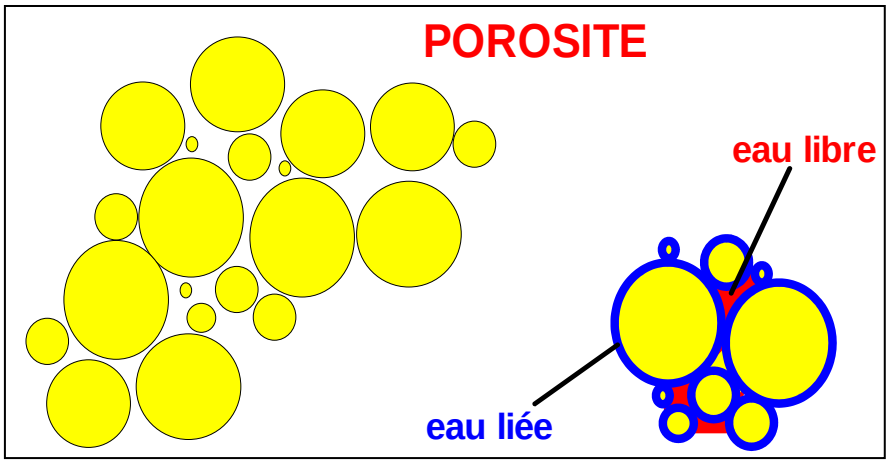


Illustration 3 – Porosité d'un aquifère, eau libre et eau liée (source documentaire BRGM).

On définit donc une porosité efficace, correspondant schématiquement au ratio entre le volume d'eau libre qu'une roche peut contenir et le volume total de la roche. Cette « porosité efficace » est à bien distinguer de la « porosité » : pour une argile par exemple, la porosité dépasse 40 %, tandis que la porosité efficace est généralement inférieure à 1 %. Le Tableau 1 fournit des exemples de valeurs de porosité efficace.

Formation	Porosité
Graviers	25 %
Sable, sable et graviers	20 %
Sable fin, grès	10 %
Graviers argileux, cimentés	5 %
Sables argileux	2 à 4 %
Argile	< 1 %
Craie	2 à 5 %

Tableau 1 – Valeurs de porosité efficace pour diverses formations (source : Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003, MEDD, 2004).

En nappe libre, la porosité efficace est assimilable au coefficient d'emmagasinement (calculé comme le volume d'eau libéré gravitairement par surface unitaire d'une nappe dont la surface libre baisserait de 1 m).

On définit également un coefficient d'emmagasinement pour les nappes captives. Dans ce cas, la quantité d'eau libérée pour une baisse d'un mètre du niveau piézométrique est bien plus faible puisqu'elle n'est due qu'à la décompression de l'eau et de la roche réservoir.

On définit un coefficient d'emmagasinement spécifique, dont l'unité s'exprime en m^{-1}, qui correspond à la quantité d'eau libérée par un cube aquifère d'un mètre carré de section et un mètre d'épaisseur saturée pour une baisse d'un mètre du niveau piézométrique.

- **Capacité d'écoulement**

L'aptitude d'un aquifère à laisser circuler l'eau est caractérisée par la notion de perméabilité, ou conductivité hydraulique (exprimée en m/s). Plus la perméabilité est élevée, meilleure est la capacité de l'aquifère à laisser circuler l'eau. L'effet de la perméabilité sur un pompage est présenté en Illustration 4 : pour un même débit pompé, plus la perméabilité est faible, plus le rabattement est important. Des exemples de valeurs de perméabilité sont fournis au Tableau 2.

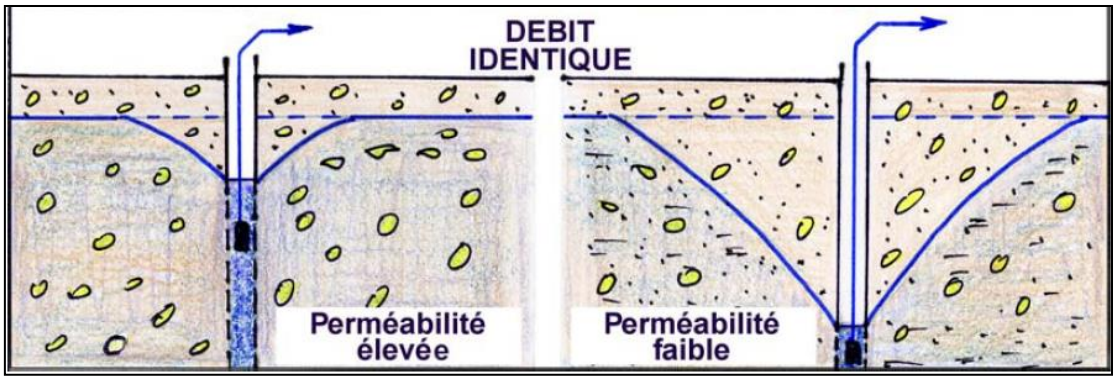


Illustration 4 – Effet de la perméabilité sur un pompage : une perméabilité plus faible induit un rabattement plus important du niveau de la nappe (source documentaire BRGM).

Valeur de la Perméabilité	Classification hydrogéologique	Valeur de l'aquifère	Exemple de roche
10^{-2} à 10^{-4} m/s	perméable	très bon à bon	Sables et Graviers
10^{-5} m/s	assez perméable	assez bon	Calcaires gréseux
10^{-6} à 10^{-7} m/s	peu perméable	médiocre à mauvais	Limons, Marnes
égale ou inférieure à 10^{-8} m/s	très peu perméable	non aquifère	Argiles

Tableau 2 – Classification des aquifères selon leur perméabilité (source : Les eaux souterraines. Connaissance et gestion, J.J. Collin, 2004, BRGM Editions).

Un autre paramètre utilisé en hydrogéologie (car il est déduit des pompages d'essai généralement effectués après la réalisation d'un forage) est la transmissivité. Exprimée en m²/s, elle est égale au produit de la perméabilité par l'épaisseur saturée de l'aquifère.

Dans les modèles d'écoulement souterrain, des valeurs de perméabilité sont affectées à différentes zones de propriétés hydrodynamiques différentes et la transmissivité de l'aquifère varie automatiquement en fonction du niveau de nappe simulé par le logiciel. Les valeurs de perméabilité attribuées à chaque zone sont généralement déduites des transmissivités calculées au cours de l'interprétation des pompages d'essai, par le biais d'une estimation de l'épaisseur aquifère saturée.

En l'absence de valeurs de perméabilité ou de transmissivité, le débit spécifique peut apporter une première approximation de la capacité d'un aquifère à laisser l'eau circuler en son sein. Ce paramètre, exprimé en $m^3/h/m$, est calculé comme le ratio entre un débit de pompage et le rabattement mesuré dans le forage pour ce débit. Le débit spécifique intégrant les pertes de charges quadratiques associées au forage et à son équipement, il ne reflète cependant pas uniquement les propriétés de l'aquifère.

1.2.2. Systèmes alluviaux régionaux

La partie orientale du bassin Adour-Garonne correspondant à l'ancienne région Midi-Pyrénées est traversée par un système alluvial composé des alluvions de la Garonne, de l'Ariège, du Tarn, de l'Aveyron et de l'Adour. Les systèmes alluviaux sont caractérisés par une structuration en glacis et terrasses, issue du modelage par séquences successives de creusement et de remblaiement des vallées opéré au cours du Quaternaire. De cette histoire récente résulte l'apparition de terrasses d'autant plus anciennes que leur replat est élevé en altitude.

Au Quaternaire, ces grands cours d'eau ont creusé leur vallée alluviale sur un substratum molassique et déposé des sédiments essentiellement sableux et graveleux. Ils ont ensuite

connu des déplacements latéraux dits de « reptation des méandres » au cours desquels les alluvions déposées ont été remaniées.

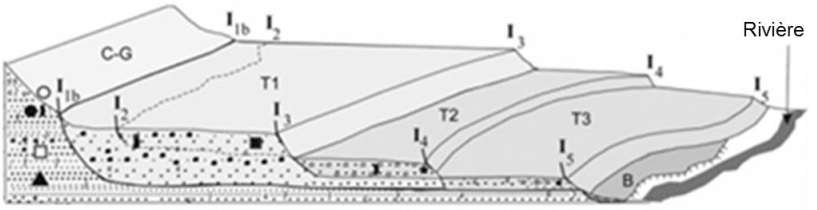
Les terrasses alluviales, situées à différentes altitudes, témoignent des variations du niveau du cours d'eau de l'époque. Elles correspondent aux dépôts des anciens lits des rivières et leur histoire est liée aux variations climatiques. En effet, les épisodes de glaciations successifs (Donau, Günz, Mindel, Riss et Würm) ont conditionné la géométrie du substratum et l'alluvionnement en cinq niveaux distincts de terrasses.

Les mouvements successifs des cours d'eau ont conditionné la morphologie des terrasses alluviales. L'enfoncement progressif des cours d'eau entraîne l'échelonnement de plusieurs terrasses, d'autant plus anciennes que leur altitude relative mesurée au-dessus du lit actuel est élevée. Apparaissent successivement des coteaux vers le cours d'eau : le plateau couvert d'alluvions déposées avant le creusement des vallées, la haute terrasse, la moyenne terrasse, la basse terrasse, la basse plaine ou plaine alluviale moderne inondable.

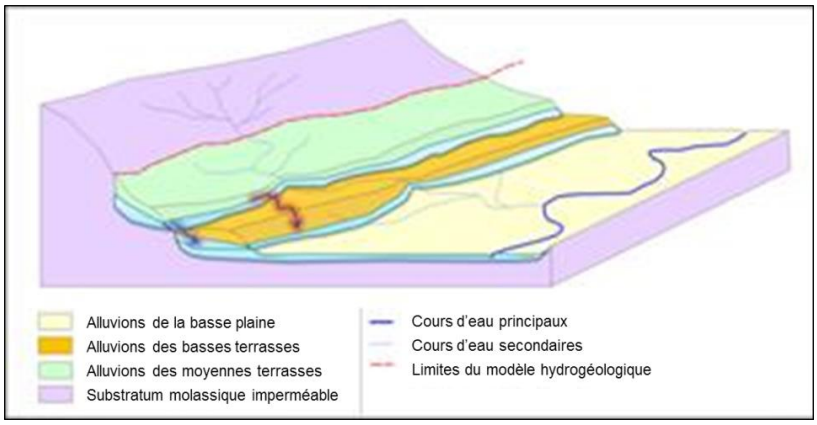
Pour ces cours d'eau, deux schémas d'agencement relatif des terrasses entre elles peuvent être distingués (cf. Illustration 5) :

- les terrasses de type emboîté symétrique et asymétrique : lors des phases d'incision pendant les périodes interglaciaires, le cours d'eau n'entaille pas complètement les alluvions déposées lors de la période glaciaire précédente ;
- les terrasses de type étagé symétrique et asymétrique : lors des phases d'incision pendant les périodes interglaciaires, le cours d'eau entaille complètement les alluvions déposées lors de la période glaciaire précédente et entaille également le substratum sous-jacent.

La majeure partie du système alluvial de la région fonctionne en terrasses étagées. Le plus souvent, ces terrasses sont séparées par des remontées de talus molassiques Généralement, seule la basse plaine est en relation hydraulique réciproque avec le cours d'eau.



Terrasses emboîtées



Terrasses étagées

Illustration 5 – Schémas de l'agencement des terrasses étagées / emboîtées (source documentaire BRGM).

D'un point de vue hydrogéologique, les aquifères alluviaux du bassin Adour-Garonne peuvent se répartir de la façon suivante :

- terrasses des hauts niveaux, étagées et comprenant des aquifères alluviaux discontinus à surface libre. Par exemple les hautes, moyennes et basses terrasses de la Garonne, du Tarn et de l'Ariège ;
- terrasses alluviales récentes (basses plaines et alluvions récentes, situées plus bas dans la topographie). Ces formations sont emboitées et enclavées dans des formations molassiques peu perméables et subordonnées à un cours d'eau allogène. Par exemple les basses plaines et alluvions récentes des différentes vallées alluviales.

Seul le secteur amont de la vallée de la Garonne, de Muret à Montréjeau se différencie du fait d'un encaissement profond du cours d'eau dans les formations molassiques. Sur ce tronçon, les alluvions des basses plaines et des alluvions récentes sont perchées par rapport au lit actuel du cours d'eau et sont uniquement drainées par celui-ci.

1.3. PROBLÉMATIQUE DU SYSTÈME ALLUVIAL DE LA GARONNE, DU TARN ET DE L'AVEYRON DANS LE DÉPARTEMENT DE TARN-ET-GARONNE

1.3.1. Géologie / Hydrogéologie

Le secteur de la plaine alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron dans le département de Tarn-et-Garonne, présente une superficie de 940 km² environ. Cette plaine est le siège de la confluence des trois cours d'eau, la Garonne, le Tarn et l'Aveyron, ce qui lui confère une forme particulière de triangle renversé.

La morphologie de la plaine date du Quaternaire où les dépôts alluviaux se sont organisés en cinq niveaux de terrasses reposant sur un substratum molassique oligo-miocène, de faible pendage et de faciès argilo-calcaire entrecoupé de lentilles sableuses.

Dans la vallée de la Garonne, la moyenne terrasse et la basse terrasse sont séparées par un bourrelet molassique (le plus souvent dissimulé sous des colluvions de pente) provoquant l'apparition de sources de déversement. Cependant, il n'est pas exclu qu'il puisse exister une continuité hydraulique entre les alluvions de la moyenne terrasse et de la basse terrasse dans certains secteurs de la zone d'étude.

Les terrasses les plus âgées (hautes et moyennes terrasses), situées aux altitudes les plus élevées, ont subi une altération beaucoup plus poussée que les formations récentes et présentent ainsi une fraction argileuse très importante réduisant la perméabilité et la transmissivité des aquifères.

Leurs nappes sont donc morcelées et colmatées, par opposition aux terrasses récentes de la Garonne où se développent des nappes libres et continues de grande extension.

1.3.2. Besoins / Ressources

L'agriculture tient une place importante dans les activités économiques du département de Tarn-et-Garonne. Cet usage nécessite des prélèvements importants d'eau de surface et d'eau souterraine, dont les relations doivent être précisées.

L'illustration de l'Annexe 5 (données 2006-2012 issues de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne), montre que de nombreux puits d'exploitation sont situés dans la basse terrasse, la basse plaine et les alluvions récentes de la Garonne. Ces prélèvements, particulièrement

importants en période estivale pour l'irrigation des cultures mais aussi l'arrosage des jardins particuliers, constitue un volume d'eau potentiellement soustrait aux rivières pour le soutien de leur débit d'étiage.

Les systèmes aquifères libres de cette plaine sont cernés à l'amont par des limites étanches constituées de formations molassiques imperméables et sont drainés en aval par les grandes rivières. L'encaissement des cours d'eau dans le substratum molassique sous-jacent induit un phénomène de drainage de la nappe quasi univoque, en limitant fortement la réalimentation de celle-ci par les eaux de surface en période de crue. L'alimentation des nappes est donc restreinte à la pluviométrie (et dans une moindre mesure, au déversement des nappes des terrasses sus-jacentes), ce qui rend le potentiel de recharge de ces nappes particulièrement sensible aux variations climatiques annuelles.

Enfin, si globalement les valeurs de transmissivité mesurées augmentent lorsque l'âge des formations alluviales diminue, il subsiste cependant de fortes disparités influant sur la productivité des ouvrages d'eau.

1.3.3. Activité anthropique et impact sur le milieu

Une mise à jour et un élargissement des connaissances sur le fonctionnement des aquifères alluviaux au sein des grands ensembles géologiques est par ailleurs incontournable pour :

- d'une part, répondre aux besoins globaux et régionaux de gestion environnementale et d'aménagement du territoire,
- d'autre part, fournir des informations publiques constituant les éléments de base à intégrer et utiliser dans le cadre de problématiques localisées tels que des travaux d'expertises, des études d'impacts, des évaluations des risques environnementaux…

Il paraît donc nécessaire de disposer de connaissances et de moyens dont l'application doit permettre aussi bien de gérer l'utilisation de la ressource en eau souterraine que sa préservation. L'objectif est de répondre, aussi bien, mais dans des cadres et avec des mises en œuvre différentes, à des problématiques générales à l'échelle du bassin versant que locale à l'échelle de l'étude d'impact.

1.4. HISTORIQUE DE L'ÉTUDE

La gestion des réserves en eau des nappes libres alluviales, parfaitement circonscrites en systèmes aquifères permettant une gestion comptable pertinente de l'eau, nécessite la connaissance de leur fonctionnement à des degrés divers déterminés suivant le niveau de gestion souhaité. Ce niveau de gestion est bien souvent fonction du **rapport existant entre les réserves en eau et les besoins exprimés**. Si les besoins sont du même ordre de grandeur que les réserves disponibles, le niveau de connaissance devra être élevé afin de gérer très finement la ressource.

L'objectif final de cette étude est de pouvoir fournir aux services chargés de la gestion de la ressource en eau, à savoir les Organismes Uniques de Gestion Collective (OUGC), et les services de l'État chargés de la Police de l'Eau, un outil d'aide à la gestion de la ressource alluviale permettant la délivrance des autorisations de prélèvement pour l'irrigation. L'historique des travaux menés depuis 1996 sur la modélisation de la nappe alluviale et la conception d'un outil de gestion des prélèvements agricoles associé est synthétisé dans le Tableau 3.

PERIODE	Taille des mailles	Régime de simulation	Période simulée	Prise en charge du réseau hydrographique	Couplage modèle pluie-débit (GARDENIA)	Nb de casiers ou de zones de gestion	Outil de gestion	Réalisation technique
1996-1997	1 km	Permanent	1996	Potentiel imposé	Non	58	Oui, Excel	BRGM
1997-2005	La MISE 82 utilise l'outil de gestion pour fixer les autorisations de prélèvements liés à l'irrigation.							
	Limites de ce modèle :							
	Les débits admissibles de l'outil de gestion sont fixes et basés sur une année moyenne. -> Non prise en compte de l'état de la recharge.							
	L'outil ne donne que des débits, alors que les arrêtés nécessitent de fixer également un volume.							
	Nécessité de développer un nouvel outil de gestion basé sur une modélisation en régime transitoire							
2005-2007	250 m	Transitoire	1996-2006	Potentiel imposé	Non	58	Oui, Excel	BRGM
2007-2013	La MISE 82 utilise l'outil de gestion pour fixer les autorisations de prélèvements liés à l'irrigation.							
	Toujours 58 casiers et adaptation des Volumes Prélevables Admissibles (VPA) en fonction de la recharge annuelle.							
	Limites de ce modèle :							
	Nécessité d'actualisation du modèle + redéfinition du modèle géologique + passage en couplage modèle pluie-débit + passage en réseau hydrographique dynamique.							
2013-2016	250 m	Transitoire	1995-2015	Potentiel imposé, puis réseau hydrographique dynamique	Oui	21	Oui, Excel	BRGM

Tableau 3 – Historique des travaux de modélisation menés par le BRGM sur la nappe alluviale dans le Tarn-et-Garonne (cf. chapitre 3 pour l'explication des différentes notions liées aux outils de modélisation)

2. Géologie et hydrogéologie de la zone d'étude

2.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET MÉCANSIMES DE DÉPOT

Pour rappel, le secteur de la plaine alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron dans le département de Tarn-et-Garonne présente une superficie de 940 km² environ. Cette plaine est le siège de la confluence des trois cours d'eau, la Garonne, le Tarn et l'Aveyron, ce qui lui confère une forme particulière de triangle renversé.

Les alluvions quaternaires occupent une grande surface dans le département et sont issues des dépôts de la Garonne et de son principal affluent, le Tarn. L'Aveyron, affluent du Tarn, et les rivières secondaires accroissent encore la superficie de cet ensemble.

Ce système alluvial est structuré en cinq niveaux de terrasses étagées (cf. Illustration 6) :

- hautes terrasses ;
- moyennes terrasses ;
- basses terrasses ;
- basses plaines ;
- alluvions récentes.

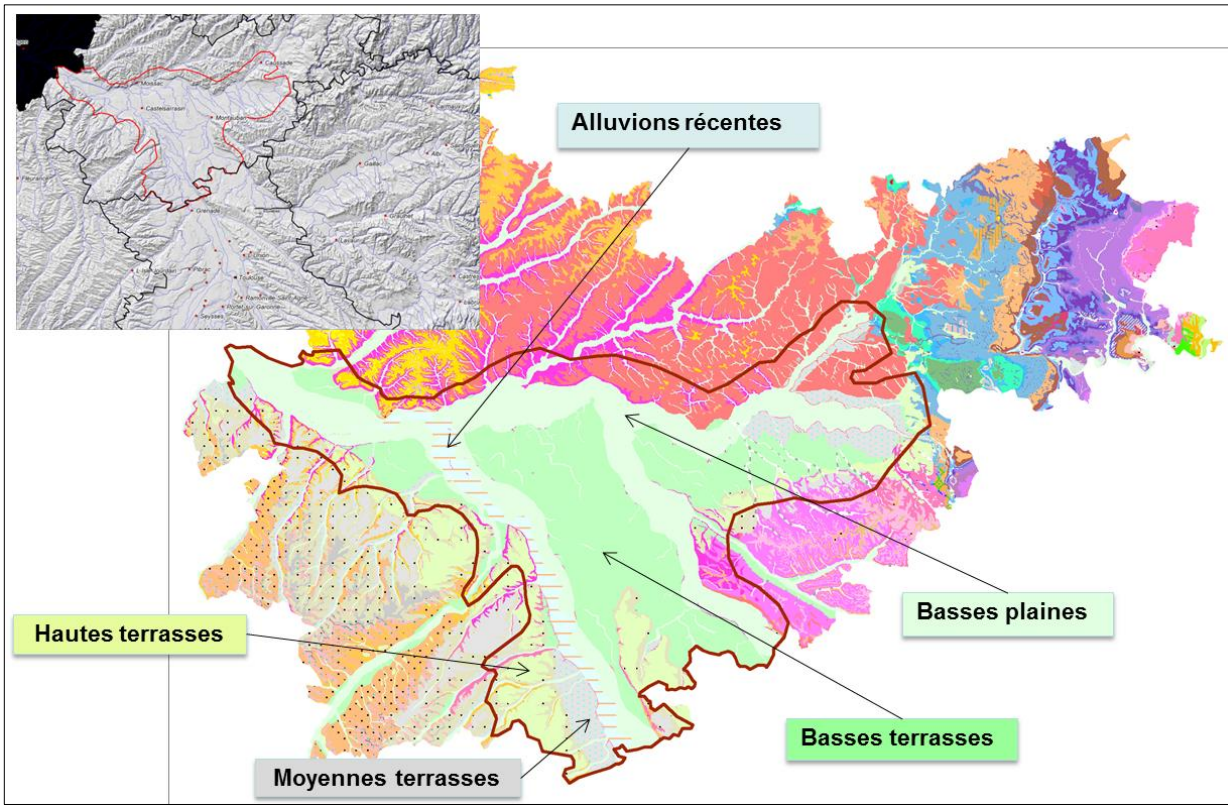


Illustration 6 – Carte géologique harmonisée à 1/50 000 et MNT 250 m sur le secteur étudié (emprise approximative du modèle tracée en rouge).

L'Illustration 7 met en évidence cette morphologie par une coupe transversale dans la vallée de la Garonne au niveau de Saint-Nicolas-de-la-Grave.

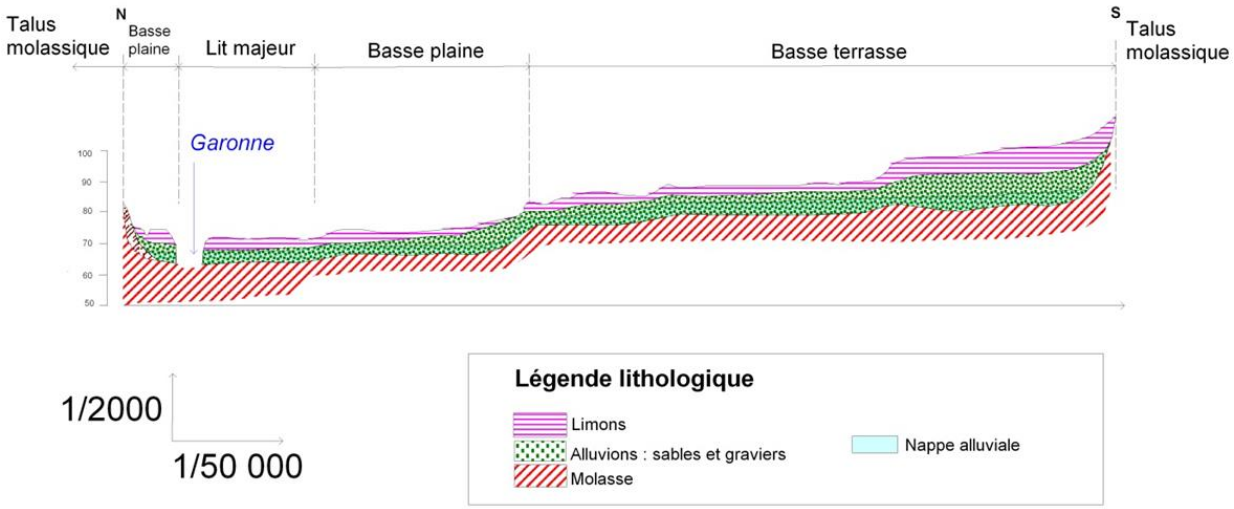


Illustration 7 – Coupe nord-sud des alluvions de la Garonne, à l'ouest de Saint-Nicolas-de-la-Grave.

2.2. DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES FORMATIONS ALLUVIALES ET MOLASSIQUES

2.2.1. Les terrasses anciennes (Fw, Fx, Fy)

Dans le département de Tarn-et-Garonne, les terrasses sont étagées en cinq (5) niveaux de dépôt. Les terrasses anciennes se sont formées pendant les dernières périodes glaciaires :

- les hautes terrasses (Fw) – Période présumée de dépôt : Mindel. Situées de 100 à 130 m au-dessus de l'étiage du cours d'eau, ces alluvions sont très altérées, au point que seuls les cailloux de quartz sont encore présents ;
- les moyennes terrasses (Fx, Fx1) – Période présumée de dépôt : Riss. Ces alluvions sont situées de 40 à 80 m d'altitude au-dessus de l'étiage du cours d'eau. Dans ces niveaux, les quartzites, gneiss et schistes silicifiés sont décomposés. Ces alluvions ont une teinte ocre, plus ou moins foncée avec présence de trainées bleutées dans les lentilles argileuses ;
- les basses terrasses (Fy, Fy1) – Période présumée de dépôt : Würm. Il s'agit de matériaux assez frais de couleur grise, où les granites, grès et schistes sont également décomposés jusqu'au centre du caillou roulé.

Les alluvions des hautes, moyennes et basses terrasses présentent la même succession lithologique. Elles présentent une couche caillouteuse et sableuse de 2 à 5 m d'épaisseur reposant sur la molasse, surmontée par un niveau sableux puis limoneux d'épaisseur variable. L'épaisseur de ces alluvions est également similaire pour chaque niveau de terrasse et dépend de la rivière qui les a déposées : elle est de 8 m en moyenne pour la Garonne, 6,5 m pour le Tarn et de 5 m pour l'Aveyron.

2.2.2. Les basses plaines (Fz, Fz1, Fz2)

Basses plaines des rivières secondaires : Elles correspondent à des dépôts actuels de crues et sont constituées d'argiles limoneuses avec une fraction argileuse importante.

Basses plaines de l'Aveyron, du Tarn et de la Garonne : Leur extension correspond aux territoires couverts par les grandes crues récentes (1875, 1952). Ces alluvions sont composées d'éléments fins, d'argiles, de limons et de sables fins décalcifiés. Ce niveau recouvre toute la plaine du Tarn où l'on observe la présence d'un palier supérieur en amont de Moissac composé d'alluvions semblables au niveau inférieur mais totalement décalcifiées. Les alluvions de la basse plaine sont présentes sur une grande partie de la plaine de l'Aveyron et ont une extension très importante dans la vallée de la Garonne.

2.2.3. Alluvions actuelles du lit majeur (Fz2, Fz3)

De natures caillouteuses et sableuses, ces alluvions ont une extension importante, notamment dans la vallée de la Garonne, où elles correspondent aux espaces couverts par les crues d'importance moyenne. Le long du Tarn, dont les berges sont plus profondément encaissées, elles sont d'extension plus réduites. Les alluvions récentes ont également été observées le long de l'Aveyron.

2.2.4. Formations superficielles

Les formations dites superficielles comprennent les dépôts de pente, les éboulis de coulées de solifluxion pouvant être issues des terrains molassiques ou des terrasses alluviales.

Dans le premier cas, ces dépôts affectent la majorité des versants à faible pente des ensembles molassiques. Ils correspondent à des matériaux argilo-limoneux, résultat de la remobilisation gravitaire des formations molassiques, et peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur au pied des pentes (Bourgine et *al*., 1997).

Dans le second cas, sur le rebord des plateaux, les fragments de terrasses altérés par l'érosion ont glissé le long des talus molassiques. Ceux-ci sont alors recouverts d'une formation caillouteuse emballée dans une matrice argileuse.

2.2.5. Formations molassiques (g3, g3C, g2)

Pendant l'Oligocène et le Miocène, on assiste à la formation d'importants dépôts molassiques caractérisés dans le département par une intercalation de niveaux de calcaires lacustres. Pour les formations d'âge oligocène (et principalement du Stampien) qui affleurent dans le nord du département, les faciès dominants sont calcaires, tandis que les affleurements miocènes du sud présentent surtout des faciès marneux. On observe parfois des lentilles sableuses intra-molassiques d'extension variable.

La molasse affleure, sous les alluvions, dans les talus entre les terrasses. Le plus souvent, elle est cachée par les éboulis de gravité, issus des alluvions qui la surmontent.

2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

La confluence du Tarn et de la Garonne a constitué un ensemble alluvial de grande extension qui occupe toute la partie méridionale du département, où sont concentrées les activités essentielles. Ces alluvions renferment des nappes d'eaux souterraines, fortement exploitées pour l'agriculture et, dans une moindre mesure, pour l'industrie et la production d'eau potable.

On constate que des niveaux de terrasses les plus récents (altitudes les plus faibles) aux alluvions anciennes (altitudes les plus importantes), la teneur en argiles des matériaux augmente considérablement, du fait d'une altération plus poussée des minéraux. Ce phénomène a pour conséquence de diminuer la perméabilité des aquifères vers les hauts niveaux.

Aussi, l'étude a porté uniquement sur les niveaux de terrasses dont la perméabilité est suffisamment importante pour permettre l'exploitation de nappes, c'est-à-dire : les alluvions du lit majeur, de la basse plaine, de la basse terrasse, les alluvions des rivières secondaires et de la moyenne terrasse.

La codification d'après le Référentiel Hydrogéologique Français, Version 1 (BDRHF V1), des Systèmes Aquifères (SA) étudiés est présentée dans le Tableau 4.

Les limites de ces systèmes aquifères sont cartographiées en Annexe 3.

CODE SA	NOM SA	LITHOLOGIE
343	GARONNE MOYENNE AVAL	Alluvial
341	AVEYRON ET TARN	Alluvial
341	AVEYRON ET TARN	Alluvial
130	PLAINE DE LA GARONNE ET DU TARN	Alluvial
342a	GARONNE MOYENNE / BASSE PLAINE ET BASSE TERRASSE	Alluvial

Tableau 4 – Systèmes aquifères alluviaux modélisés (d'après la BDRHF V1).

2.3.1. Fonctionnement hydrogéologique des systèmes aquifères

L'ensemble du système alluvial repose sur les formations molassiques considérées comme imperméables. Elles constituent donc le mur des aquifères alluviaux.

Aquifère des alluvions de la moyenne terrasse

Les moyennes terrasses sont principalement présentes dans le sud-ouest du département, et sont fortement entaillées par les cours d'eau secondaires : chaque sous ensemble constitue donc un aquifère indépendant, drainé par ces cours d'eau. L'altération y est très poussée et la perméabilité des terrains médiocre. Localement, la nappe peut cependant fournir des débits de l'ordre de 10 m^3/h.

La moyenne terrasse est séparée du niveau inférieur par un talus de 60 à 80 m.

Toutes les terrasses sont perchées les unes par rapports aux autres et sont toujours séparées par un talus molassique, observable ou caché par les dépôts de pentes et les solifluxions.

Ces nappes sont alimentées essentiellement par l'infiltration des apports pluviométriques et, dans une bien moindre mesure, par le déversement de la nappe sus-jacente.

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

- Plaine « Garonne – Tarn »

Cet aquifère est délimité au Sud par le contact avec les molasses du talus de la moyenne terrasse et sur les autres côtés par les rivières Garonne et Tarn. Cet ensemble est constitué

de deux systèmes aquifères : la basse terrasse, unité continue de grande extension, et la basse plaine, bande de faible largeur qui occupe une position périphérique.

La basse terrasse forme un aquifère continu à nappe libre, qui se déverse dans la basse plaine par l'intermédiaire d'un talus à affleurement molassique, ce qui se traduit par une discontinuité de la surface piézométrique.

Cette surface piézométrique présente un écoulement divergent, dont la crête piézométrique occupe une position médiane en amont, dans la forêt de Montech. Vers l'aval, le ruisseau de Saintonge draine la nappe, la partageant ainsi en deux interfluves dont les crêtes piézométriques divergent, l'une se dirigeant vers le Tarn, l'autre vers la Garonne. Ces observations sont visualisables sur la carte piézométrique réalisée en octobre-novembre 1996, en période de basses eaux (cf. Illustration 8).

Dans la partie amont (forêt de Montech), la nappe est subplane au centre et présente un fort gradient vers la périphérie (environ 5 ‰), avec un écoulement perpendiculaire à la limite de la basse plaine, ce qui favorise le déversement. Vers l'aval, les gradients sont plus faibles (de 1 à 1,6 ‰), ce qui implique un déversement direct plus faible. Par contre, le drainage par les rivières y est beaucoup plus important.

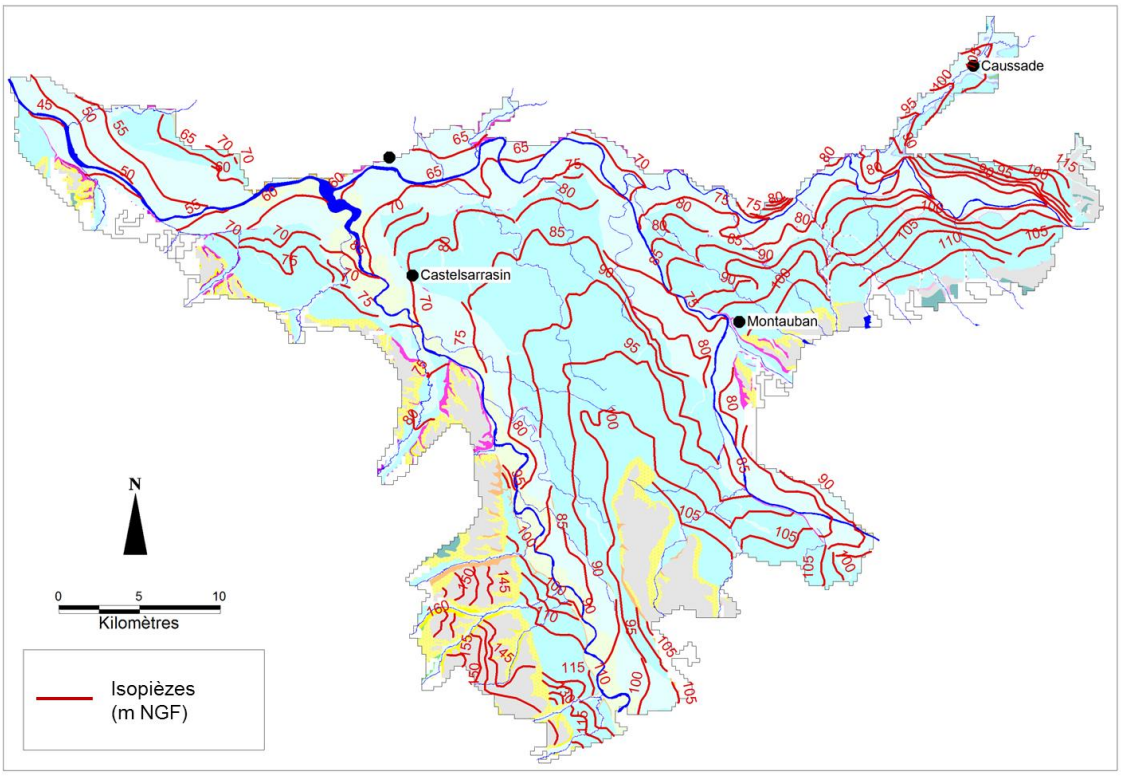


Illustration 8 – Carte piézométrique issue des mesures d'octobre 1996.

La basse plaine, qui reçoit les eaux de la basse terrasse, présente un gradient piézométrique de l'ordre de 3 ‰ et un écoulement oblique par rapport à la rivière. Ces différences de gradient sont essentiellement dues à l'influence de la topographie.

Cet ensemble sablo-graveleux présente des variations d'épaisseur et de lithologie importante. On constate notamment la présence d'éléments fins en plus ou moins grande proportion, qui entraîne d'importantes variations de perméabilité. En théorie, les alluvions de la basse plaine devraient présenter une meilleure perméabilité que celles de la basse

terrasse, car les matériaux, plus jeunes y sont moins altérés et donc moins argileux. En réalité, les mesures réalisées à l'occasion d'essais de pompage ne permettent pas de mettre ce phénomène en évidence. Les valeurs de perméabilité et de transmissivité observées sont :

- valeurs extrêmes : $10^{-6} < K < 10^{-3}$ m/s – $10^{-5} < T < 10^{-2}$ m²/s ;
- valeurs moyennes : $K = 10^{-5}$ m/s – $T = 10^{-4}$ m²/s.

Les débits d'exploitation recensés peuvent être très différents et reflètent l'hétérogénéité du milieu. Ceux-ci peuvent être inférieurs à 10 m³/h et atteindre 100 m³/h par endroits. Il est donc très difficile de connaître *a priori* la productivité de la nappe. Dans la basse plaine, bien que les valeurs de perméabilités observées ne soient pas supérieures à celles de la basse terrasse, les débits semblent plus importants, dans une gamme de 20 à 100 m³/h.

Les basses terrasses et basses plaines du Tarn peuvent localement fournir des débits intéressants, mais la faible épaisseur d'alluvions saturées peut entraîner des baisses du niveau piézométrique considérables lors des années de sécheresse hydrogéologique sévère. Seuls les secteurs de la basse plaine subordonnés à la rivière présentent une pérennité dans leur débit d'exploitation.

- Plaine de la « Garonne »

Cet aquifère concerne la rive gauche de la Garonne et l'ensemble de la plaine en aval de la confluence avec le Tarn.

Les basses terrasses sont compartimentées par les rivières secondaires. Les unités ainsi constituées sont de faibles dimensions, ce qui a pour effet de réduire considérablement la ressource. Les débits relevés sont généralement inférieurs à 5 m³/h.

En amont de Castelsarrasin, la basse plaine n'existe qu'en rive droite. En aval, elle n'est présente que dans la partie concave des méandres. Les valeurs de perméabilité mesurées dans ces terrains sont de l'ordre de 2.10^{-5} m/s et les débits fournis par un ouvrage classique sont compris entre 20 et 150 m³/h. Dans la zone en connexion hydraulique avec la rivière, les débits présentent une certaine pérennité, notamment dans les biefs à niveau contrôlé (région de Golfech). Ailleurs, ces débits restent très sensibles aux périodes de sécheresse.

- Plaine de la confluence « Tarn – Aveyron »

Cette plaine est présente à travers deux niveaux de terrasses, la basse plaine et la basse terrasse. Ces deux niveaux sont eux-mêmes compartimentés par un réseau de rivières secondaires qui les entaillent profondément.

La basse terrasse se caractérise par des débits faibles, de l'ordre de 10 m³/h pour l'Aveyron. Cependant, on observe là aussi une grande hétérogénéité des terrains, ce qui entraîne une grande variation des débits d'exploitation. Localement, certains puits peuvent fournir jusqu'à 80 m³/h et d'autres, majoritaires, ne dépassent pas 10 m³/h.

La basse plaine de l'Aveyron et la basse plaine de la rive droite du Tarn offrent de meilleurs productivités avec des débits qui peuvent atteindre 50 à 100 m³/h.

2.3.2. Propriétés physico-chimiques des eaux

Les eaux de nappes alluviales sont globalement proches de la neutralité et de dureté moyenne. Leurs températures oscillent entre 12 et 14 °C en fonction des saisons et ne présentent pas d'anomalie.

On observe une minéralisation croissante des eaux dans le sens de l'écoulement des nappes, pouvant être caractérisée par des conductivités liées à une pollution anthropique. En effet, ces nappes peuvent être localement fortement contaminées par les nitrates et les produits phytosanitaires, notamment dans la basse plaine et la basse terrasse du système « Tarn – Garonne » et de la rive gauche de la Garonne. Dans ces secteurs, les concentrations en nitrates peuvent dépasser 100 mg/l. Cette pollution est favorisée par la grande vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère et par une pression polluante importante en surface.

2.3.3. Relations nappes-rivières

Il semble que les rivières Tarn et Aveyron soient en majorité fortement encaissées dans les molasses, au point que la cote du fil de l'eau se trouve en-dessous du mur de l'aquifère alluvial. Dans ce cas, les relations hydrauliques se font uniquement dans le sens d'un drainage de la nappe par les cours d'eau. Un essai de pompage réalisé aux alentours de Montauban montre que si une réalimentation induite de la nappe à partir de la rivière Aveyron existe, elle se fait dans de très mauvaises conditions.

Cependant, il n'est pas exclu que, localement, l'enfoncement des cours d'eau soit moins prononcé, qu'un échange bilatéral puisse se produire et qu'une alimentation de la nappe par les rivières en période de hautes eaux superficielles soit observée.

Dans la plaine de la Garonne, il semble que les échanges entre le cours d'eau et ses alluvions récentes soient plus importants et recouvrent des zones plus étendues.

Selon le premier modèle hydrodynamique réalisé en régime permanent en 1996, il semble que 78 % des écoulements en sortie de nappe sont drainés par les rivières et que seulement 1 % des apports à la nappe est issu d'une alimentation par les rivières. La réalimentation de la nappe par les cours d'eau semble donc très minoritaire.

3. Construction du modèle hydrogéologique

Construire un modèle maillé, c'est traduire numériquement, dans des fichiers reconnus par le logiciel de modélisation, le schéma hydraulique sous-tendant le modèle conceptuel d'écoulement élaboré à l'issue de la synthèse hydrogéologique initiale.

Ainsi que présenté dans le rapport de recommandations pour la modélisation maillée des écoulements souterrains (Barthélemy et Seguin, 2013), la construction d'un modèle maillé comporte plusieurs étapes, détaillées dans les paragraphes suivants :

- choix d'un logiciel de modélisation, d'où découlent le type de maillage à mettre en œuvre et le format des fichiers de données à élaborer (cf. chapitre 3.1) ;
- définition de la période modélisée et des pas de temps du modèle (cf. chapitre 3.2) ;
- définition précise de l'extension horizontale et verticale du domaine à modéliser et définition des conditions aux limites (cf. chapitre 3.3.1 et 3.3.2) ;
- construction du maillage, définition de la géométrie du système aquifère par assignation des cotes de toit et mur à chacune des mailles du modèle (cf. chapitre 3.3.3 et 0) ;
- affectation des propriétés hydrogéologiques à chacune des mailles (cf. chapitre 3.4) ;
- définition des flux de recharge et de ruissellement (cf. chapitre 3.5) ;
- définition du réseau hydrographique et des échanges nappe-rivière (cf. chapitre 3.6) ;
- distribution des débits de pompage dans les mailles concernées (cf. chapitre 3.7).

3.1. PRÉSENTATION DU CODE DE CALCUL UTILISÉ

3.1.1. Un modèle multicouche

Le code de calcul retenu pour cette étude est le logiciel MARTHE (Thiéry, 1990), développé au BRGM et utilisé depuis plus de 25 ans dans de très nombreux projets de modélisation hydrogéologique. Il a notamment servi à la construction de plusieurs modèles d'extension régionale de gestion de la ressource, comme par exemple :

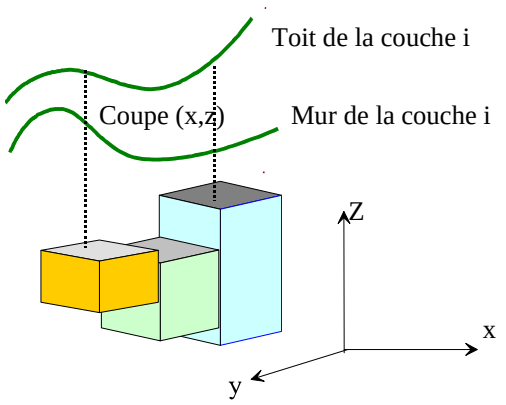
- le modèle Nord-Aquitain (MONA), initié en 1993 et enrichi dans le cadre de plusieurs projets. Dans sa version actuelle, ce modèle simule les écoulements au sein de 15 aquifères du nord du Bassin aquitain ;
- le modèle des aquifères du Jurassique de Poitou-Charentes ;
- le modèle du bassin versant de la Somme, construit pour mieux comprendre le risque d'inondations par remontées de nappe.

Dans l'ancienne région Midi-Pyrénées, trois modèles de nappes alluviales ont été construits dans le but de gérer les ressources en eaux souterraines, notamment vis-à-vis des prélèvements pour l'irrigation agricole. Il s'agit de la nappe alluviale de la Garonne en Haute-Garonne (31), de l'Ariège et de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron dans le Tarn-et-Garonne (82). L'historique du dernier modèle, au cœur de ce travail, a été présenté au chapitre 1.4.

Ce logiciel utilise la méthode des différences finies et permet de traiter les écoulements en deux dimensions ou en multicouche, en zone saturée et non saturée, en régime permanent

et transitoire. Il permet de prendre en compte les échanges entre un réseau hydrographique et les nappes sous-jacentes.

Le modèle utilisé est de type multicouche : chaque couche est discrétisée en mailles parallélépipédiques dont la face supérieure correspond au toit de la formation et la face inférieure au mur de la formation (voir Illustration 9). Pour une maille, les échanges peuvent se faire avec les mailles adjacentes appartenant à la même couche, ainsi qu'avec la maille sous-jacente et la maille sus-jacente.



Chaque formation géologique modélisée (aquifère ou éponte) est représentée par un assemblage de mailles parallélépipédiques (voir schéma ci-contre).

Dans chacune des mailles, le logiciel calcule une charge hydraulique (cote piézométrique) en fonction des données introduites (perméabilité, emmagasinement, débit de pompage…)

Illustration 9 – Exemple de discrétisation d'un modèle maillé multicouche.

Les différentes fonctionnalités de MARTHE et leur mise en œuvre sont décrites par Thiéry (1990 et 2004).

Le fonctionnement du logiciel est brièvement décrit en Annexe 6.

L'interface graphique Win-MARTHE est utilisée en pré- et post-processeur pour la préparation et la mise en forme des données ainsi que pour la visualisation des données et des résultats.

3.1.2. Variables et paramètres d'entrée du modèle

Les variables et paramètres constituant les données d'entrée du modèle sont récapitulés sur l'Illustration 10.

On différencie les ***paramètres***, qui ont une valeur fixe pendant toute la durée de la simulation, des ***variables***, dont la valeur peut varier à chaque pas de temps.

On peut également distinguer :

- les variables ou paramètres de calage (sur fond orange sur la figure) qui, n'étant évalués que par interprétation de mesures ponctuelles ou n'étant pas accessibles aux mesures, doivent être ajustés ou déterminés au cours des phases de calage du modèle : propriétés hydrogéologiques des formations (emmagasinements, perméabilités…), propriétés du réseau hydrographique, paramètres impliqués dans les calculs hydroclimatiques (capacité de stockage du sol, partition entre ruissellement et infiltration, déphasage induit par la zone non saturée) ;
- les variables ou paramètres définis *a priori* (sur fond bleu sur la figure), dont la valeur n'est pas réévaluée au cours du calage : structure du milieu géologique, structure du réseau hydrographique, pompages, chroniques de pluie et d'ETP…

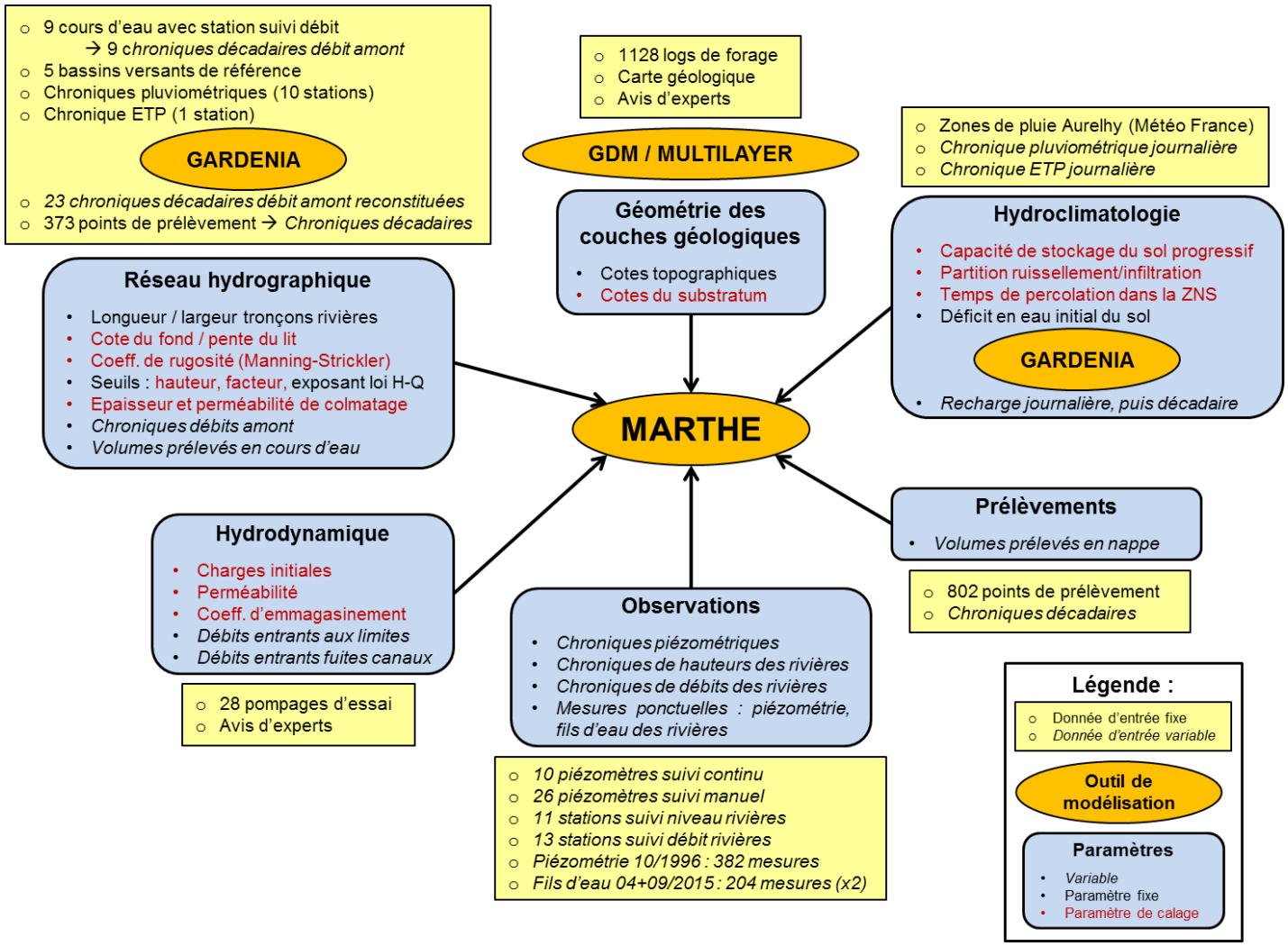


Illustration 10 – Paramètres et variables nécessaires à la modélisation MARTHE.

3.2. PÉRIODE ET PAS DE TEMPS DE CALCULS

La période simulée par le modèle va du 1er janvier 1995 au 30 septembre 2015, soit 20 années.

La simulation commence et se termine à la date du 1er octobre, qui se situe dans la période des basses eaux de la nappe et correspond à la fin de la période d'irrigation.

Le pas de temps de calcul choisi est la décade, à raison de trois décades par mois calendaire, soit 10 jours pour les deux premières et entre 8 et 11 jours pour la dernière suivant le mois concerné. Cette fréquence est un bon compromis entre l'inertie des temps de recharge de la nappe alluviale et la réactivité du réseau hydrographique. Par ailleurs, ce pas de temps ayant été choisi pour les modèles alluviaux de la Haute-Garonne et de l'Ariège, la cohérence régionale des modèles est respectée.

Sur une période de 20 ans, le modèle comprend donc 720 pas de temps pour lesquels il va systématiquement calculer les charges hydrauliques (niveaux piézométriques et niveaux des rivières) et les débits dans chacune des mailles représentant l'aquifère et les cours d'eau.

Avant le démarrage de la simulation proprement dite, il a été ajouté trois années de « pré-simulation » correspondant à la répétition de la même année hydrologique moyenne (2013-2014). En effet, bien que le fonctionnement hydrogéologique des nappes alluviales du Tarn-et-Garonne présente une faible inertie (temps de réaction assez court suite aux épisodes de recharge), il existe néanmoins un effet mémoire dont il convenait de s'affranchir.

Un schéma de l'organisation des pas de temps et de la période modélisée est présenté sur l'Illustration 11.

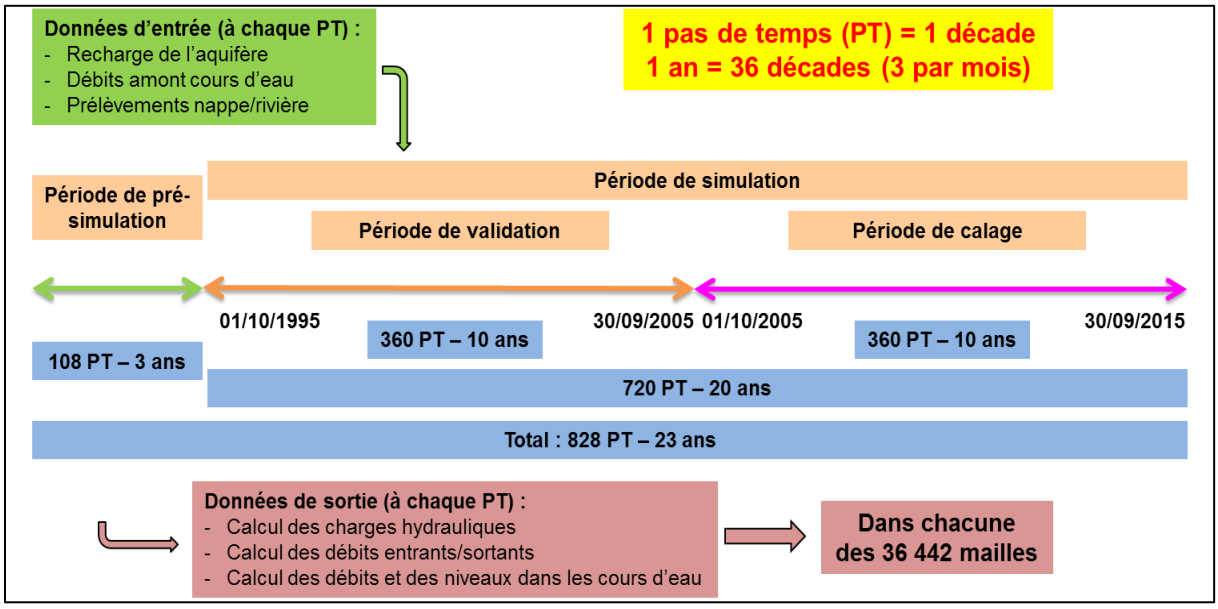


Illustration 11 – Schéma représentant l'organisation du fichier des pas de temps de calcul du modèle.

3.3. GÉOMÉTRIE

3.3.1. Extension du modèle et conditions aux limites

Le système modélisé est l'ensemble des cinq niveaux de terrasses des nappes alluviales de la Garonne, du Tarn aval et de l'Aveyron aval, à savoir :

- les alluvions récentes,
- les basses plaines,
- les basses terrasses,
- les moyennes terrasses,
- les hautes terrasses.

L'emprise élargie du secteur modélisé est présentée dans l'Illustration 12.

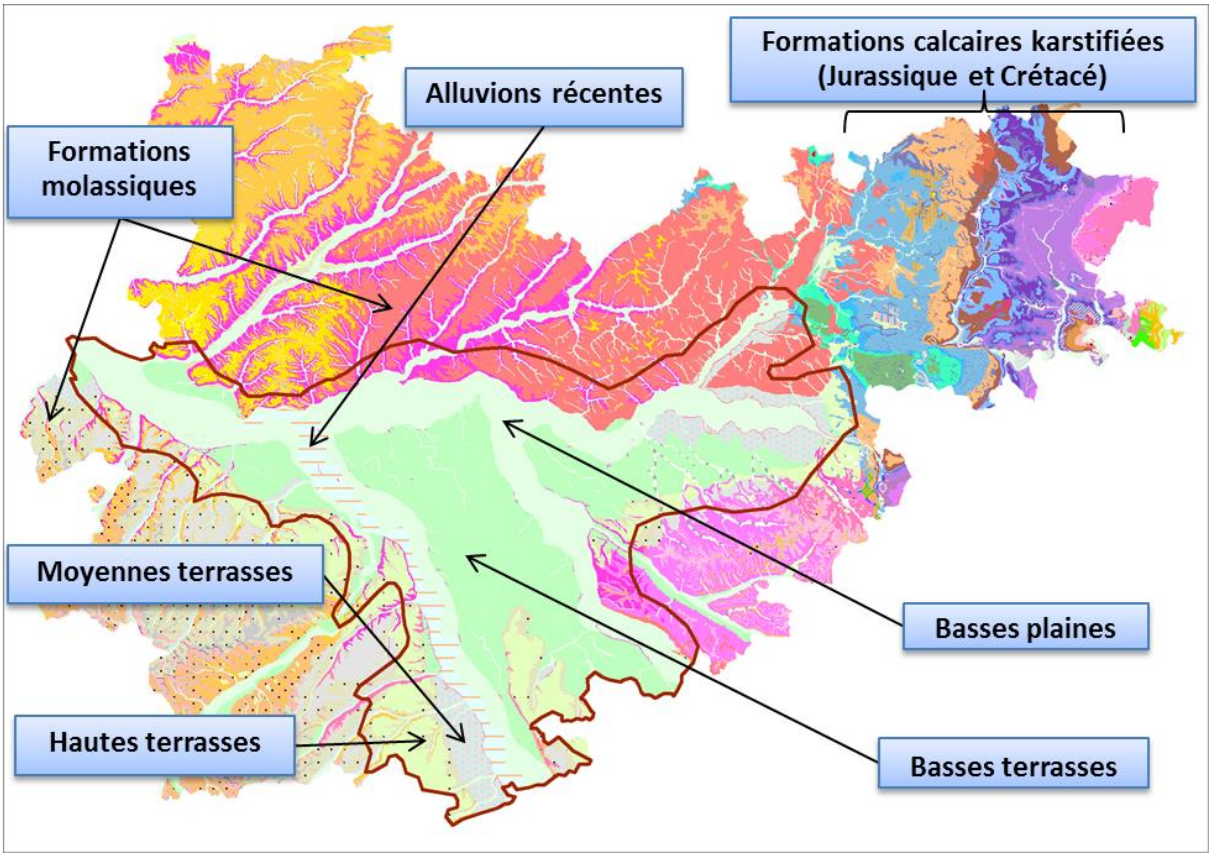


Illustration 12 – Carte géologique harmonisée au 1/50 000 sur le secteur étudié (emprise approximative du modèle tracée en rouge).

Les limites latérales du modèle correspondent à l'affleurement des formations molassiques, considérées comme imperméables. Celles-ci sont donc définies comme des **limites à flux nul** (aucun d'apport d'eau des coteaux molassiques vers la plaine alluviale).

Les seules exceptions concernent les vallées de la Garonne et du Tarn, où les formations alluviales sont également présentes en amont. En imposant un niveau de nappe moyen dans les vallées alluviales de la Garonne et du Tarn, le modèle a permis de calculer le débit d'eau entrant nécessaire pour maintenir ce niveau. Ce débit entrant a ensuite été introduit dans le modèle comme une **limite à flux imposé constant**.

La limite inférieure du modèle correspond également aux formations molassiques et est donc considérée comme une **limite à flux nul** aussi (pas d'apport d'eau des formations molassiques sous-jacentes).

Le réseau hydrographique constitue l'exutoire naturel de la nappe. Le niveau des cours d'eau, variable dans le temps, définit donc le niveau de la nappe dans les mailles du modèle où une rivière est présente (sauf assèchement du cours d'eau). Ce niveau hydrographique constitue dans ces mailles, dans un premier temps, un ensemble de **limites à potentiel imposé**. Dans un second temps, les niveaux hydrographiques sont liés aux débits dans les cours d'eau par des relations hauteur-débit. Seule exception, le niveau de la nappe reste imposé par des contre-canaux sur la Garonne et le Tarn en amont du barrage de Malause.

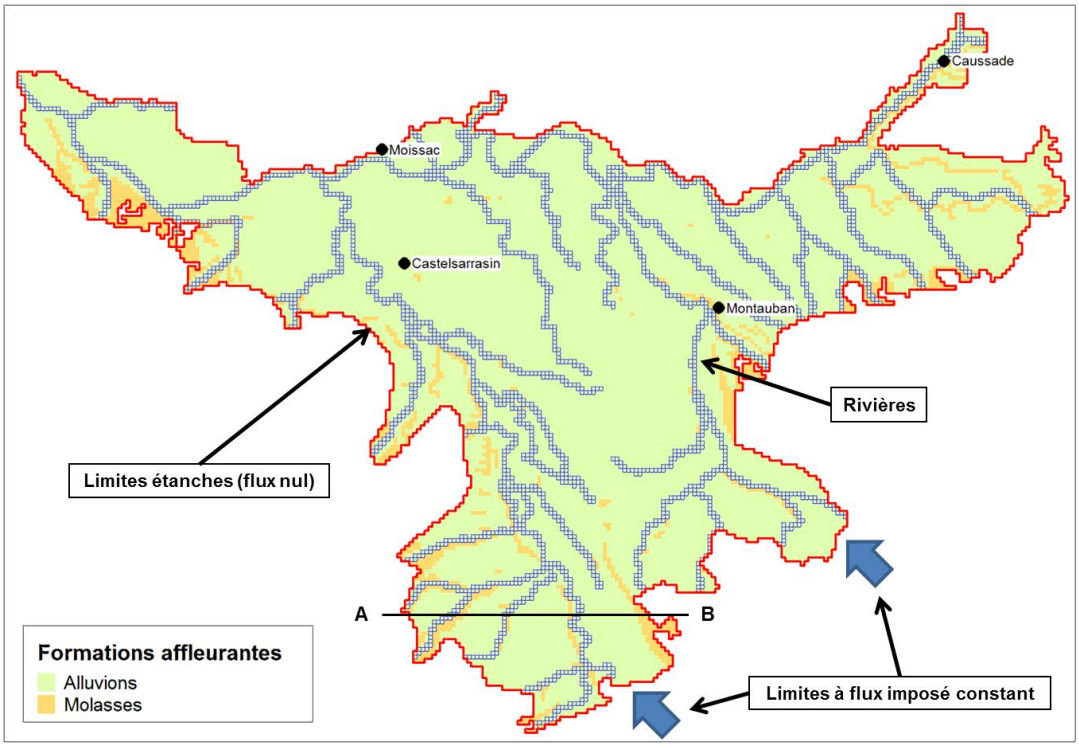
La recharge de la nappe alluviale résultant des précipitations atmosphériques constitue un flux d'eau entrant sur toutes les mailles de la couche affleurante. Ainsi, cette recharge constitue une **limite à flux imposé variable** sur l'ensemble des mailles de la couche 1.

Les prélèvements (et rejets) en nappe constituent des flux d'eau sortants (entrants) sur les mailles où ils sont localisés. Ces prélèvements constituent donc également des **limites à flux imposé variable**.

Enfin, les fuites du canal latéral à la Garonne ont pu être estimées dans le Tarn-et-Garonne (cf. HYDRATEC, 2007). Le flux d'eau entrant dans la nappe induit par ces fuites constitue donc une **limite à flux imposé constant** dans les mailles traversées par le canal.

Le canal d'amenée de la chute de Golfech est quant à lui considéré comme étanche et les travaux réalisés lors de l'aménagement de celui-ci doivent *a priori* permettre à la nappe de s'écouler sans entrave. Il n'a donc pas été représenté à proprement parler dans le modèle.

Les principales limites du modèle sont représentées en plan et en coupe dans l'Illustration 13.



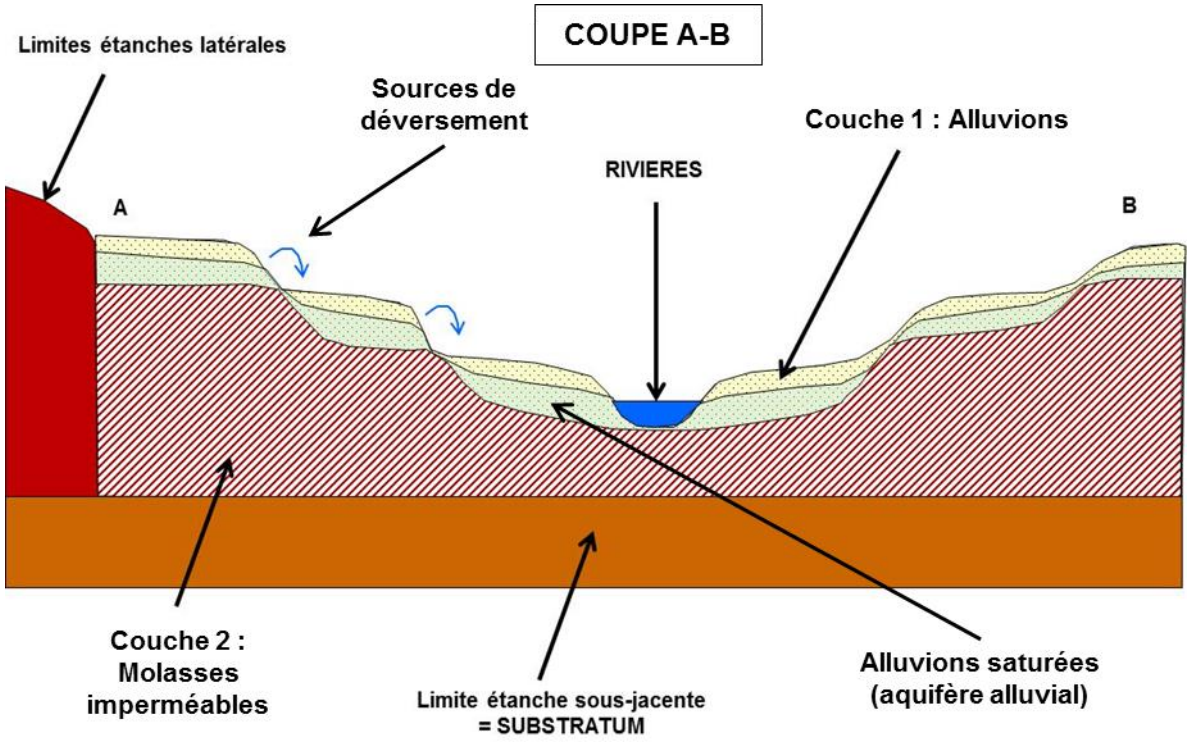


Illustration 13 – Limites du modèle en plan (schéma supérieur) et selon une coupe A-B (schéma inférieur).

3.3.2. Couches représentées

Le modèle hydrogéologique comporte deux couches superposées :

- la couche 1 représente les formations affleurantes. Sur la quasi-totalité du domaine modélisé, il s'agit des alluvions aquifères, de perméabilité variable entre les différents niveaux de terrasses et à l'intérieur d'un même niveau de terrasse. Elles représentent 16 874 des 18 221 mailles de la couche. Les 1 347 mailles restantes correspondent à des zones où la molasse affleure à l'intérieur de la zone d'étude ;

- la couche 2 représente la partie supérieure des formations molassiques sous-jacentes. Cette couche, de perméabilité faible (10^{-7} m/s), a été intégrée à la zone modélisée afin de mieux appréhender les écoulements souterrains entre les terrasses alluviales étagées. Elle permet notamment de limiter les effets de débordements et donc de sorties d'eau du système modélisé. La base de la formation a été arbitrairement fixée à la cote de 26 m NGF dans chaque maille afin d'assurer la présence de cette couche sur l'ensemble de la zone modélisée, avec une épaisseur supérieure à 1 m. Cette couche comporte donc également 18 221 mailles, avec une épaisseur fortement variable, de 1,4 à 194 m.

3.3.3. Maillage

« Il n'existe pas de critère reconnu pour dimensionner un maillage de façon optimale. En pratique, les dimensions affectées aux mailles sont le fruit d'un compromis entre :

- le pas et la variabilité spatiale des données de terrain disponibles ;
- la taille et la complexité géométrique et hydrogéologique des aménagements à simuler ;
- pour le transport de masse, éventuellement, le respect de critères numériques assurant la représentativité des calculs (nombre de Péclet et nombre de Courant) ;

- la précision de calcul recherchée ;
- un nombre de mailles compatible avec une durée de calcul « raisonnable » sur un micro-ordinateur standard.

À titre indicatif, on utilise en général des mailles de 500 à 1 000 mètres de côté pour les modèles régionaux, affinées à 200-250 m dans les zones d'un intérêt particulier. »[3]

Pour le modèle des nappes alluviales du Tarn-et-Garonne, il a été choisi de conserver la taille des mailles du précédent modèle, à savoir des mailles carrées de 250 m de côté.

Le modèle comprend un total de 150 300 mailles, dont 36 442 mailles calculées pour les deux couches représentées, avec la répartition suivante :

- 18 221 mailles pour la couche 1 (16 874 représentant les alluvions et 1 347 les formations molassiques) ;
- 18 221 mailles pour la couche 2 (formations molassiques).

L'Illustration 14 présente le maillage du modèle, avec un zoom plus détaillé sur le secteur de nord-est du domaine étudié.

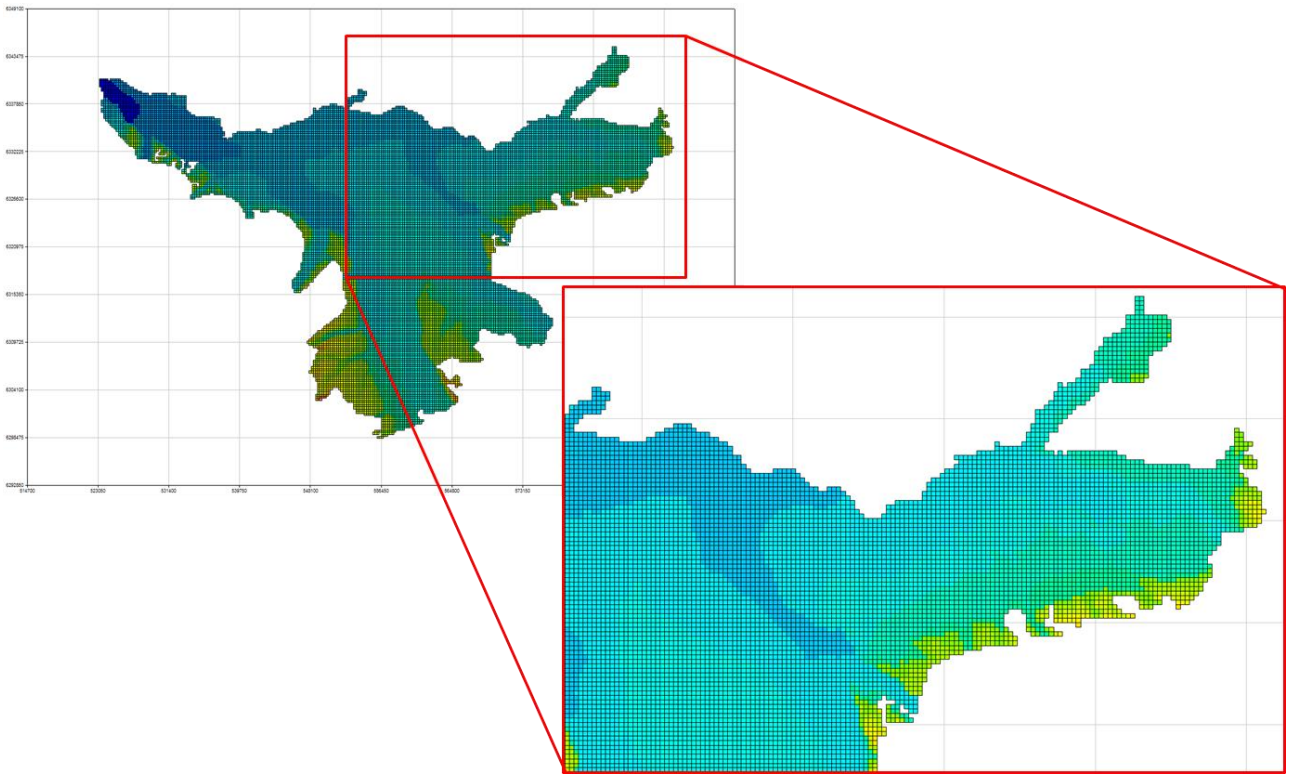


Illustration 14 – Maillage de la couche 1 (alluvions) du modèle hydrodynamique.

[3] Barthélemy et Seguin, 2013

3.3.4. Modèle géologique

Dans le précédent modèle, la modélisation du toit, du mur et de l'épaisseur de l'aquifère alluvial avait été réalisée à partir des données de profondeur des puits et forages recensés dans la Banque de Données du Sous-Sol (BSS). Une interpolation par krigeage avait été réalisée sur l'ensemble de la plaine, sans prise en compte du compartimentage par terrasse.

Le résultat final, bien que repris manuellement, ne restituait pas de manière suffisamment précise le modelé de ces terrasses très peu épaisses. Par la suite, ces imprécisions ont induit des problèmes de dénoyage et de débordement de l'eau de la nappe, difficiles à résoudre.

Pour éviter cet écueil et améliorer la phase de calage du modèle, un modèle géologique a été réalisé en début de projet à partir des logiciel GDM et Multilayer du BRGM.

La méthodologie utilisée pour la construction du modèle, ainsi que les résultats du calage sont présentés en détails dans l'Annexe 7. Elle est résumée dans l'enchaînement des travaux suivants :

- collecte des données géologiques (coupes, logs) depuis la Banque de Données du Sous-Sol (BSS) : 1128 points dont 925 ont atteint la molasse ;
- validation des données et saisie des forages et coupes validées dans une base ACCESS ;
- acquisition de données de terrain complémentaires dans les secteurs où il persistait un manque de données important sur la profondeur du contact alluvions-molasses : réalisation de 40 sondages au pénétromètre (sous-traitance - bureau d'études Ginger) ;
- modélisation géologique sous Multilayer : toit (haut), mur (bas), épaisseur des différentes terrasses alluviales.

Le modèle géologique a été conçu avec le même maillage que le modèle hydrodynamique, à savoir des mailles carrées de 250 m de côté. Chaque terrasse a été modélisée indépendamment, afin de respecter la morphologie en terrasses étagées (cf. Illustration 15).

Cette modélisation a permis d'obtenir une carte de l'épaisseur des alluvions. La géométrie des couches géologiques dans MARTHE a ainsi pu être définie, produisant les semis suivants :

- carte de la cote du toit, en m NGF (haut de l'aquifère correspondant ici à la topographie (Illustration 16) ;
- carte du mur (bas) de l'aquifère correspondant à l'interface entre alluvions et formations molassiques, en m NGF (Illustration 17) ;
- carte de l'épaisseur des alluvions, en m (Illustration 18).

La cote topographique a été calculée telle que :

- elle soit égale à la moyenne du MNT 25 m dans les mailles où aucune rivière n'est présente ;
- elle soit égale à la cote du fil de l'eau, si celle-ci est supérieure à la valeur moyenne du MNT 25 m, dans les mailles où une rivière est présente.

La carte des épaisseurs montre une bonne puissance des alluvions, comprise entre 15 et plus de 20 m sur la partie orientale de la basse terrasse centrale, ainsi que sur les hauts niveaux situés en rive gauche de la Garonne. Sur les basses plaines, les épaisseurs sont plus faibles, avec de nombreux secteurs caractérisés par un amincissement des alluvions,

notamment aux limites de terrasses. Ce phénomène s'explique par la géomorphologie en terrasses étagées et par le caractère hétérogène des séries de dépôts.

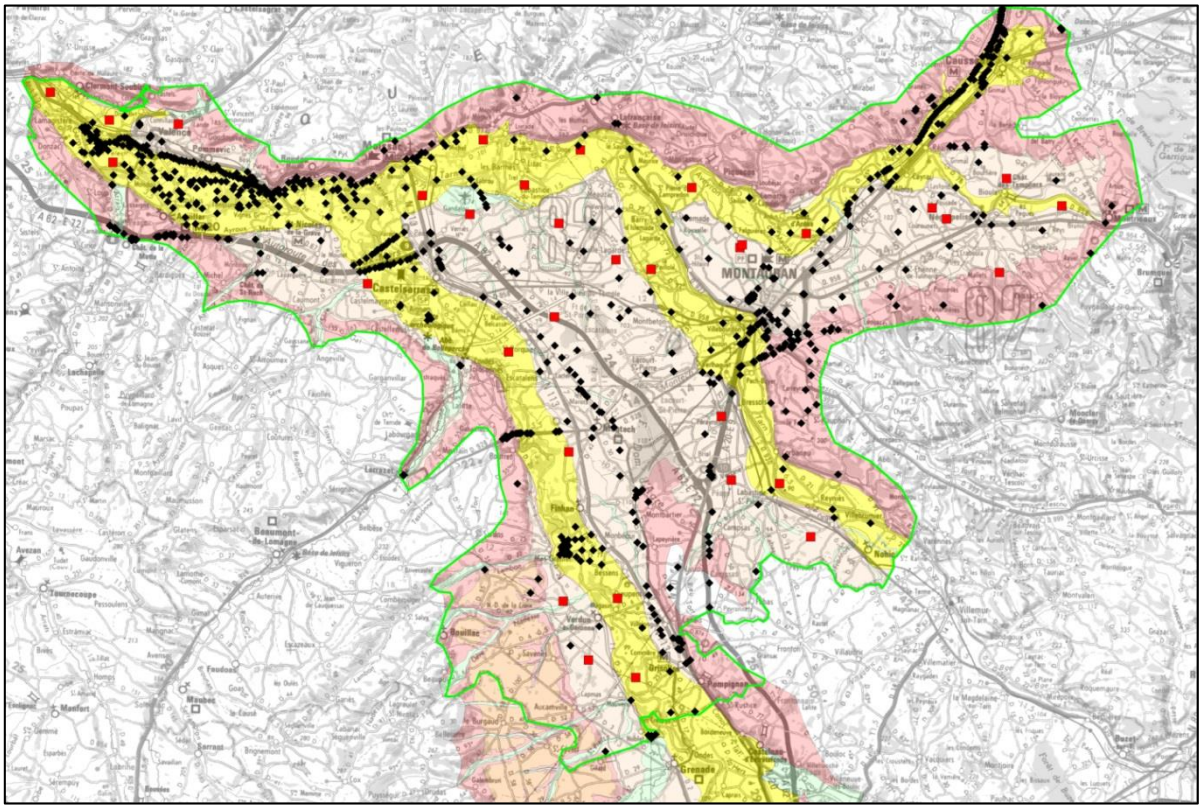


Illustration 15 – Localisation des ouvrages avec logs géologiques validés (losanges noirs) et des sondages réalisés au pénétromètre (carrés rouges) dans le cadre du projet.

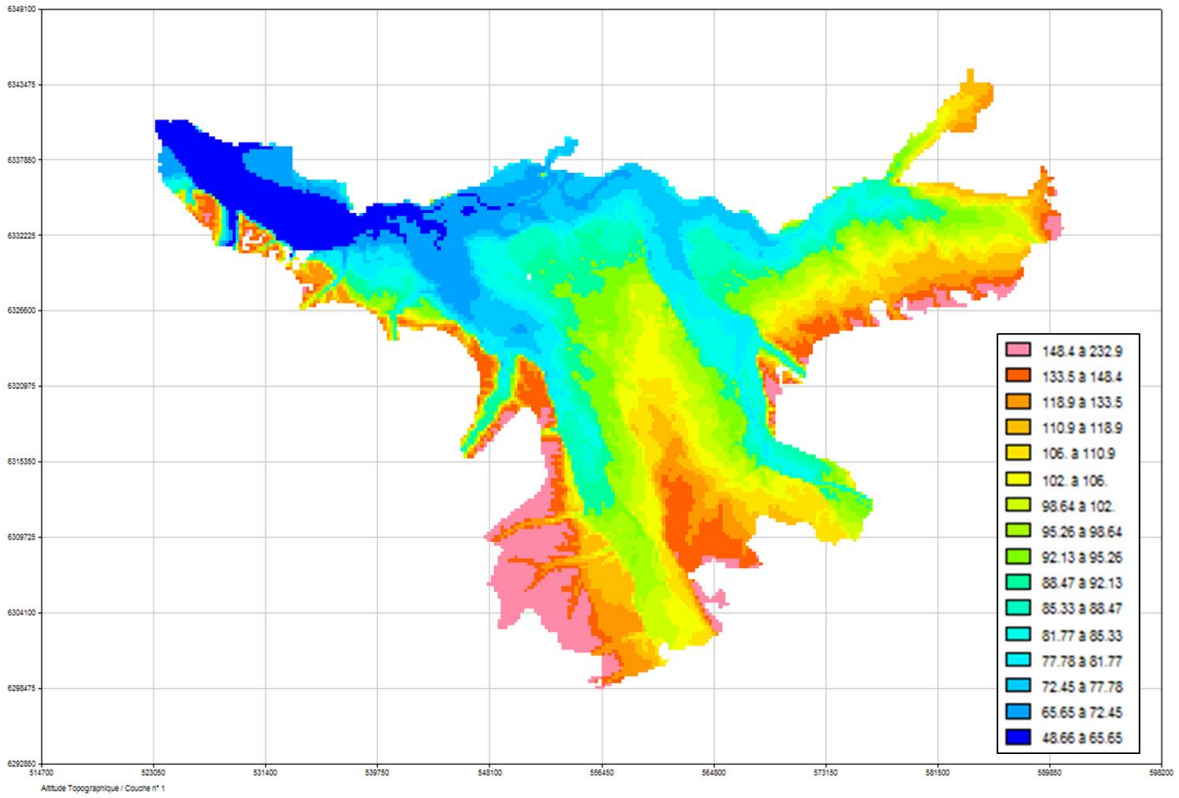


Illustration 16 – Carte de la topographie / toit des alluvions, basée sur le MNT 25 m.

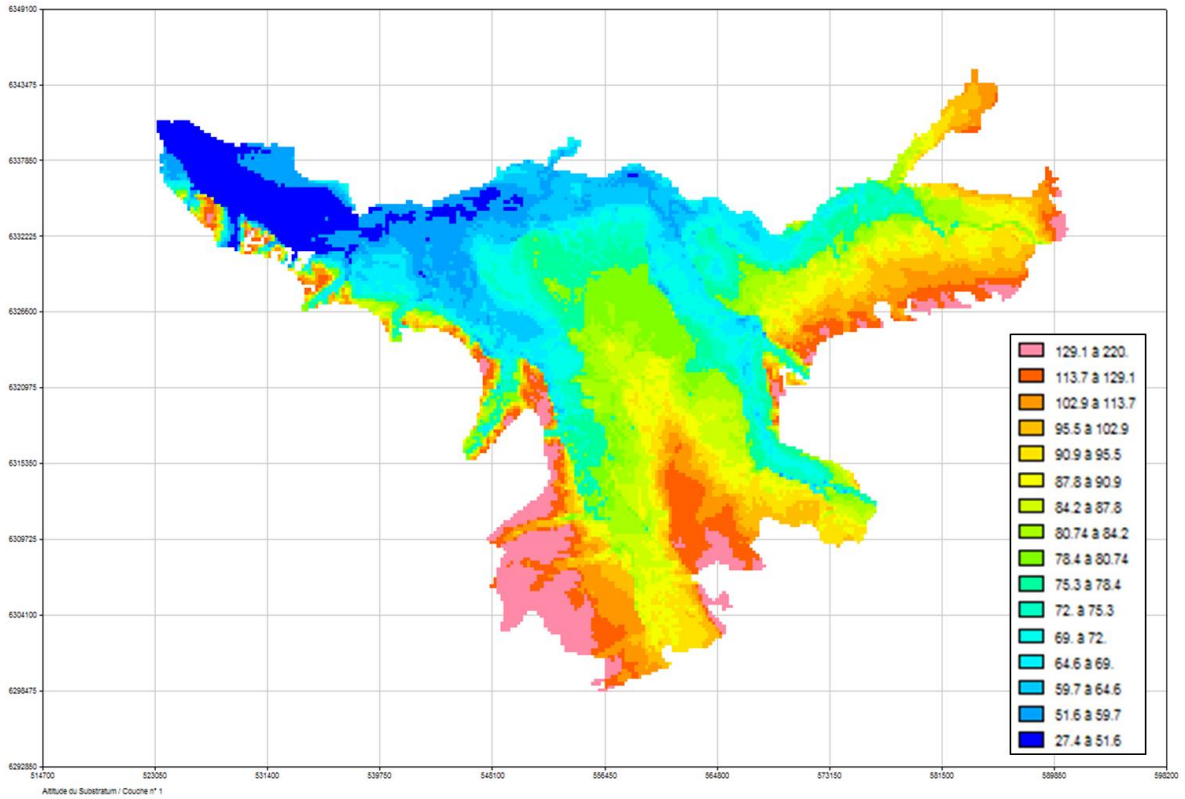


Illustration 17 – Carte du mur des alluvions / toit des molasses, basée sur le modèle géologique.

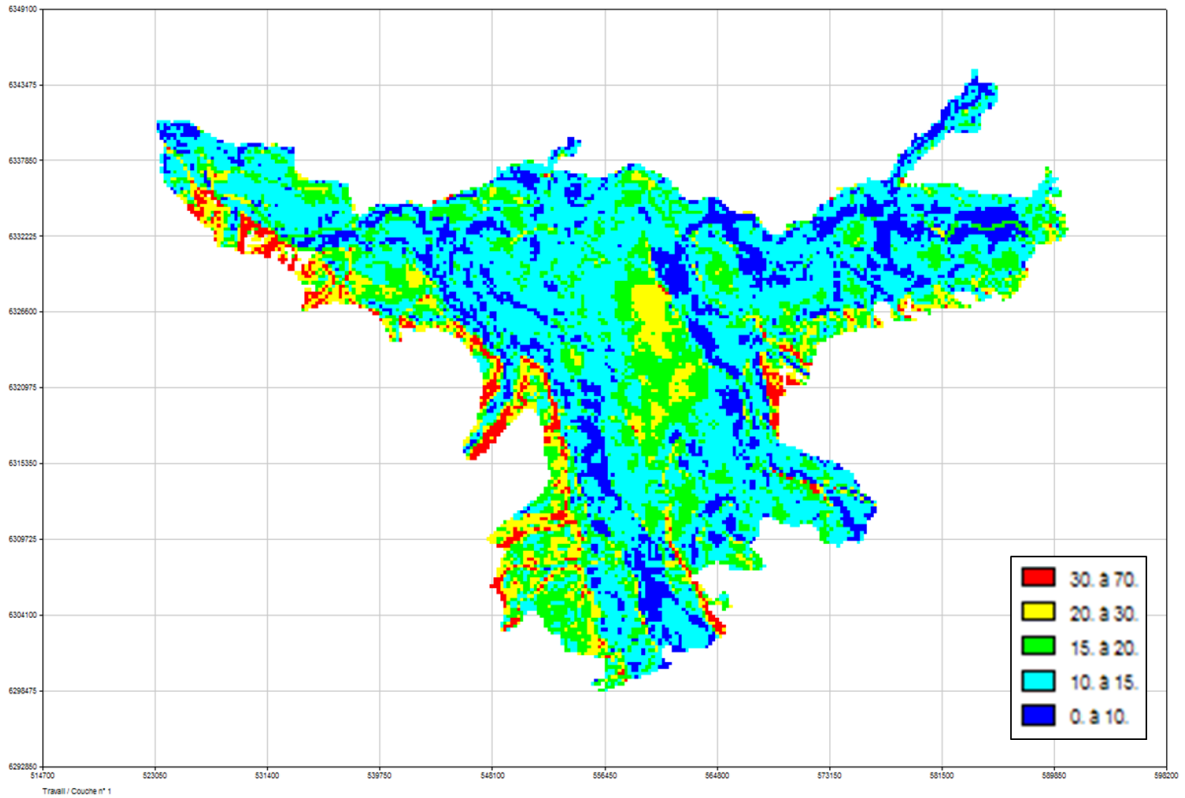


Illustration 18 – Carte des épaisseurs des alluvions basée sur le modèle géologique.

3.4. PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES INITIAUX

3.4.1. Charges initiales

Les charges initiales sont les hauteurs piézométriques (ou charges hydrauliques) appliquées dans chaque maille du modèle, au moment du démarrage des calculs. Afin de faciliter le démarrage de calcul, ces valeurs doivent être les plus proches possibles des valeurs observées au moment du démarrage du modèle, à savoir les basses eaux de 2013, l'année hydrologique 2013-2014 servant à la phase de pré-simulation du modèle (cf. chapitre 3.2).

Dans le cadre des premiers travaux de modélisation, une campagne de relevés piézométriques avait été réalisée en période de basses eaux, en octobre 1996, sur plus de 300 points de mesure. Ces données ont permis d'élaborer manuellement une carte piézométrique, présentée en Annexe 4.

Les niveaux piézométriques varient de 230 m d'altitude (cote NGF) sur les hauts niveaux de terrasse situés au sud de la zone d'étude à 45 m NGF dans les alluvions récentes situées à l'aval du bassin (nord-ouest de la zone étudiée).

Le niveau à l'étiage étant celui qui présente le moins de variations d'une année sur l'autre en fonction des conditions climatiques, la piézométrie des basses eaux 1996 peut être utilisée comme charge initiale du modèle.

Afin d'obtenir un fichier des charges initiales, les mesures de 1996 ont donc été interpolés par krigeage pour obtenir une grille à intervalle de 250 m. Elles ont ensuite été intégrées dans le modèle hydrodynamique (cf. Illustration 19) comme charges initiales pour la première simulation.

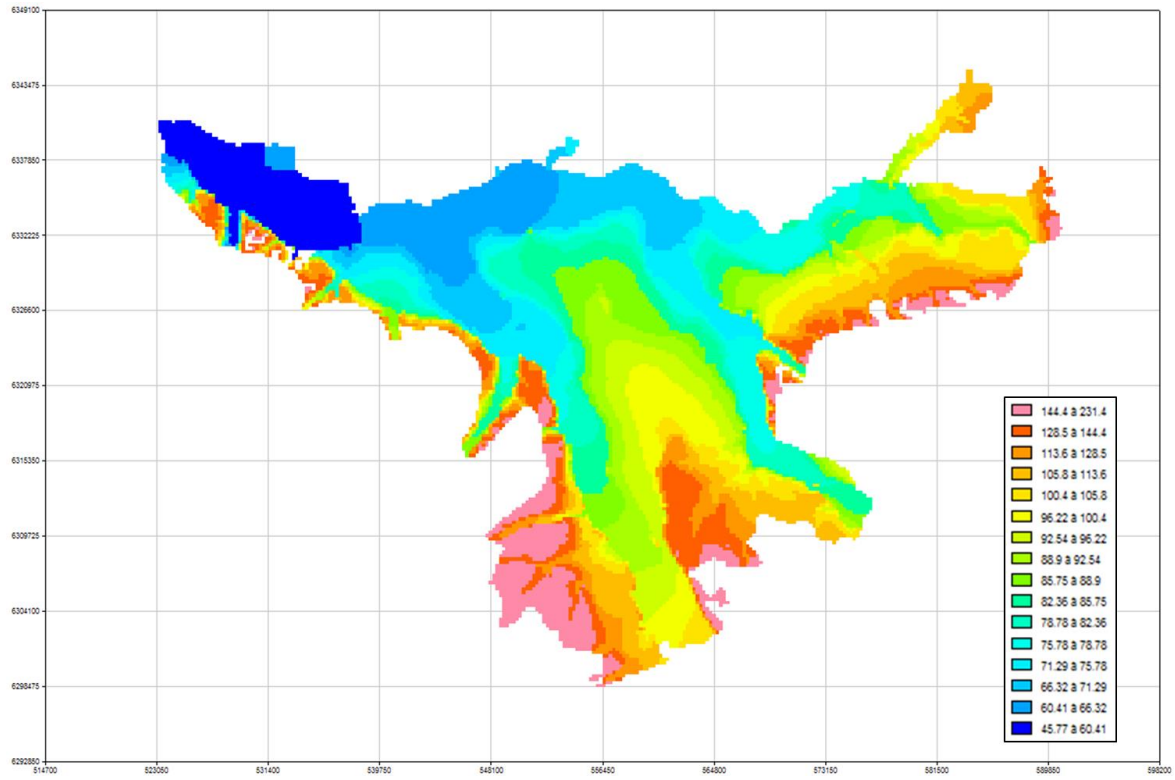


Illustration 19 – Charges hydrauliques initiales – Interpolation campagne piézométrique octobre 1996.

3.4.2. Perméabilité

Les données récoltées sur les formations alluviales dans le Tarn-et-Garonne au cours des différentes études menées par le BRGM, incluant 28 pompages d'essais, ont permis d'identifier des gammes de perméabilité en fonction de l'âge des terrasses :

- basses plaines / lit majeur : $10^{-3} < K < 10^{-2}$ m/s
- basses terrasses : $10^{-5} < K < 10^{-3}$ m/s
- moyennes terrasses : $10^{-6} < K < 10^{-5}$ m/s
- hautes terrasses : $K = 10^{-6}$ m/s
- molasses : $K = 10^{-7}$ m/s

En se basant sur ces données et sur la carte géologique, le semis des perméabilités initiales présenté dans l'Illustration 20 a été obtenu et utilisé pour la première simulation.

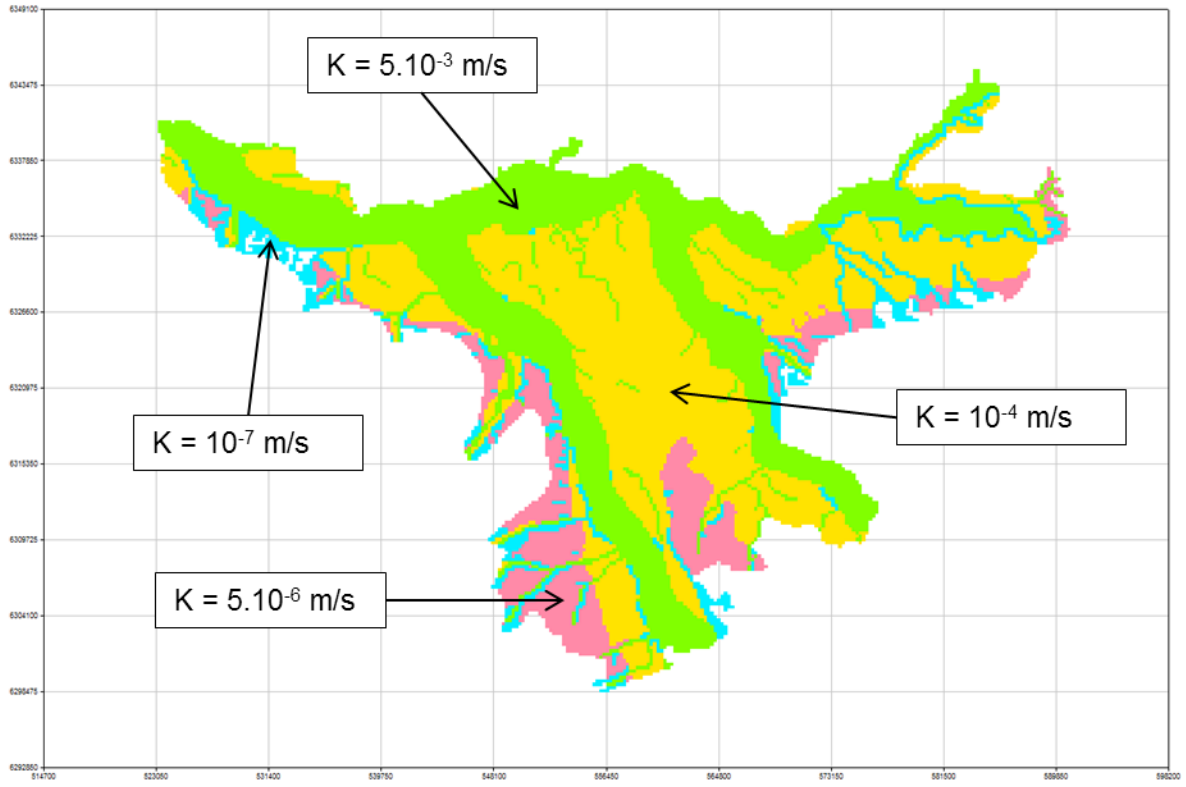


Illustration 20 – Perméabilités initiales basées sur la géologie.

Le semis de perméabilité issu du calage de la version précédente du modèle (cf. Ghyselinck-Bardeau, 2007) n'a pu être réutilisé tel quel du fait de la modification de l'emprise de la zone modélisée, mais le découpage final en 9 zones de perméabilité, variant de 10^{-6} à 6.10^{-3} m/s, a permis d'orienter les premières étapes du calage (cf. Illustration 21).

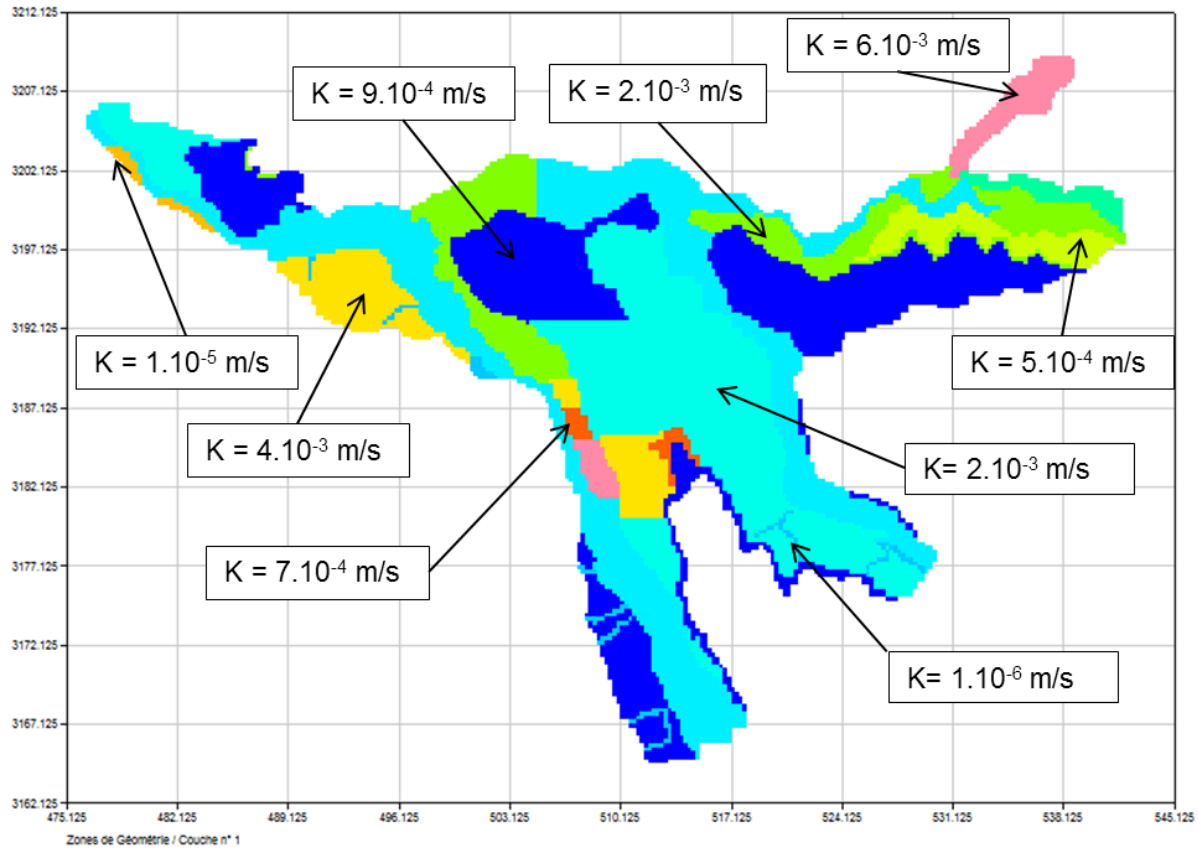


Illustration 21 – Carte des perméabilités issue du calage du modèle 2007.

3.4.3. Coefficient d'emmagasinement

De la même manière, les valeurs de coefficient d'emmagasinement libre (équivalant à la porosité efficace de l'aquifère) ont été reprises en se basant sur la géologie (cf. Illustration 22) et sur le calage du précédent modèle de 2007 (cf. Illustration 23).

Le semis issu du calage de la version précédente du modèle (cf. Ghyselinck-Bardeau, 2007) comprend 5 zones de coefficient d'emmagasinement homogène, allant de 1 % (sans dimension) dans une partie de la basse plaine de l'Aveyron à 20 % dans la basse terrasse de la Garonne.

Le semis basé sur la géologie utilisé en début de calage comprend quant à lui 4 zones de coefficient d'emmagasinement homogène, allant de 5% dans les zones où la molasse affleure à 20 % dans les basses terrasses.

Dans la couche n° 2 formée par les formations molassiques sous-jacentes, le coefficient d'emmagasinement spécifique S_s (cf. chapitre 1.2.1) a été fixé à 10^{-5} m^{-1} (cf. Thiéry, 2015), ce qui correspond à une valeur pour une roche altérée (on considère que c'est le cas pour les premiers mètres de la molasse).

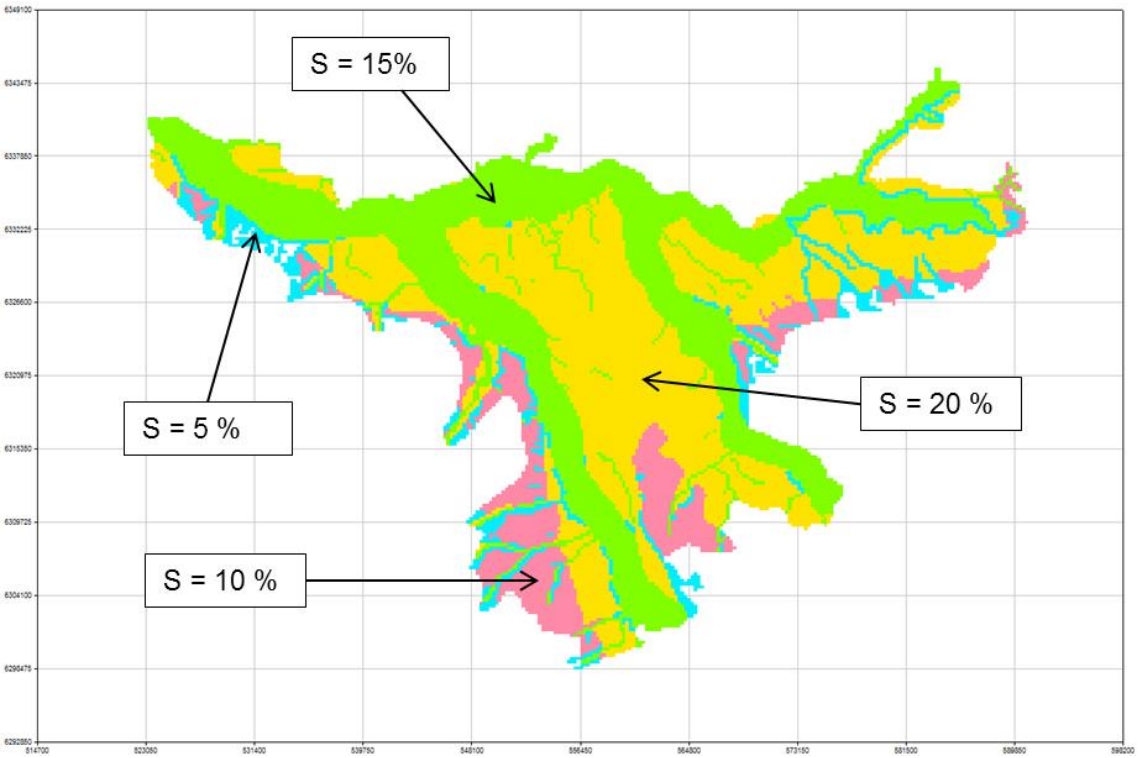


Illustration 22 – Coefficients d'emmagasinement initiaux basés sur la géologie.

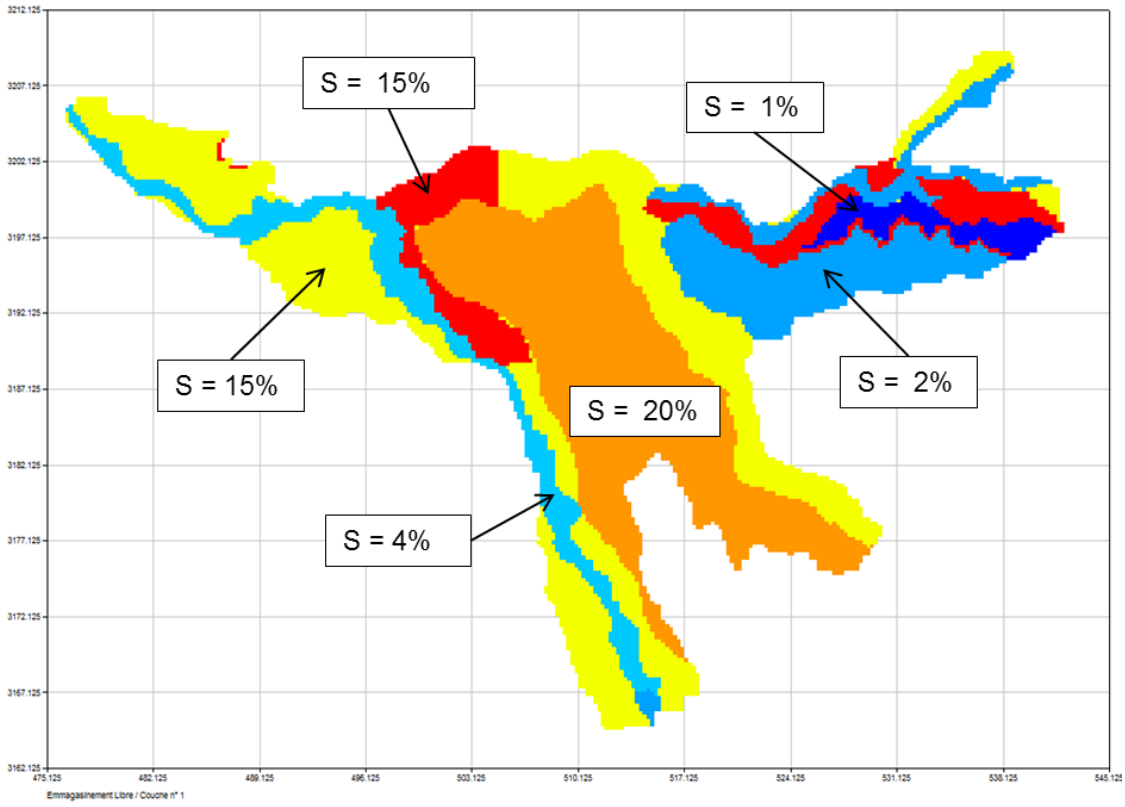


Illustration 23 – Carte des coefficients d'emmagasinement issue du calage du modèle 2007.

3.5. RECHARGE ET RUISSELLEMENT

3.5.1. Paramètres nécessaires à la modélisation

La recharge et le ruissellement doivent être estimés pour chaque maille et à chaque pas de temps du modèle.

Pour estimer les flux de recharge des nappes et les flux de ruissellement, plusieurs paramètres ou variables sont nécessaires :

- la pluviométrie ;
- l'évapotranspiration potentielle (ETP) ;
- des paramètres associés au processus de recharge qui permettent, à partir des données de pluie et d'évapotranspiration potentielle, i) de calculer la pluie efficace, ii) de définir la distribution de la pluie efficace entre écoulements de surface et écoulements souterrains, et iii) de rendre compte du déphasage entre la pluie et la recharge effective de la nappe, associé à la traversée de la zone non saturée.

Pour chaque maille du modèle, la pluie et l'évapotranspiration sont extraites des chroniques météorologiques locales. Ces chroniques proviennent des données acquises par Météo France aux différentes stations météorologiques de la zone d'étude (cf. chapitres 3.5.3 et 3.5.4).

Les paramètres du processus de recharge sont affectés d'une incertitude importante car ils ne peuvent être déduits de mesures de terrain. Ces paramètres sont donc réévalués au cours du processus de calage afin de reproduire au mieux les fluctuations de la nappe. Un jeu de paramètres initial (capacité de stockage du sol, partition de la pluie efficace entre infiltration et ruissellement, temps de demi-percolation) a été évalué à partir de simulations préalables effectuées à l'aide du logiciel GARDENIA (cf. chapitre 3.5.5).

3.5.2. Climat de la plaine du Tarn-et-Garonne

Le climat du Tarn-et-Garonne est influencé par le climat montagnard du Massif Central et le climat plus doux et tempéré de la Gascogne. Il bénéficie également de la double influence des masses d'air issues de l'Atlantique et de la Méditerranée, ce qui lui confère un climat de type océanique dégradé.

Les hivers y sont généralement doux et humides et les étés chauds et généralement secs. Le record de froid jamais observé jusqu'alors à Montauban est survenu lors de l'hiver 1985 avec une température de -20,0 °C. Sur la station de Montauban, le maximum de température a été mesuré à 41,8 °C lors de l'été 2003.

Les pluies, essentiellement apportées par les vents d'ouest ne dépassent pas 646 mm à Monbéqui, secteur le plus sec du département. Mais, par effet orographique, elles atteignent 836 mm à Montaigu de Quercy dans l'extrême nord-ouest et même 941 mm dans la région de Caylus.

La pluviométrie annuelle moyenne observée à la station de Montauban est de 711,9 mm. À ce jour l'année la plus sèche observée à Montauban fut 1967, avec 425 mm de précipitations. L'année la plus arrosée fut celle de 1959, avec 1005 mm de précipitations. Ces valeurs illustrent la grande variabilité de ce paramètre, qui va du simple au double.

Les vents dominants viennent d'ouest mais l'Autan, un vent régional de sud-est chaud et sec, y souffle parfois violemment (les rafales ont atteint ou dépassé 100 km/h six fois en dix ans sur le département). Au cours de la tempête du 27 décembre 1999, le vent venait du nord-ouest et a atteint 112 km/h à Montauban (record de vitesse de vent), 108 km/h à Castelsarrasin et 101 km/h à Cayrac.

Les principales statistiques relatives à la station de Montauban sont synthétisées dans la fiche climatologique disponible en Annexe 8.

3.5.3. Pluviométrie

La pluviométrie de la zone d'étude est appréhendée au travers :

- d'une représentation de la variabilité spatiale de la pluie basée sur la grille AURELHY (Analyse Utilisant le Relief pour l'Hydrométéorologie) de Météo France ;
- d'une représentation de la variabilité temporelle de la pluie reposant sur les chroniques pluviométriques des postes pluviométriques existants.

Grille AURELHY

La grille AURELHY de Météo France représente la pluviométrie moyenne annuelle (ou normale climatique) de la période 1981-2010 au pas de 1 km et à l'échelle de la France métropolitaine. Ces normales en points de grille, appelées normales Aurelhy, sont obtenues à partir des normales de référence aux postes de mesures, par une méthode d'interpolation qui prend en compte l'influence du relief sur la distribution des paramètres météorologiques.

Cette grille fait apparaitre une faible variabilité de la pluviométrie annuelle moyenne sur la zone d'étude : celle-ci passe de 850 mm au nord-est à 630 mm au sud de la zone d'étude (cf. Illustration 24).

Le cumul annuel de la pluie est influencé par la topographie : sa valeur est supérieure sur les coteaux molassiques en bordure du domaine. Un gradient de précipitations sud-ouest – nord-est se dessine également : la pluviométrie annuelle est minimale dans la vallée amont de la Garonne et plus élevée dans la vallée amont du Tarn et la vallée de l'Aveyron.

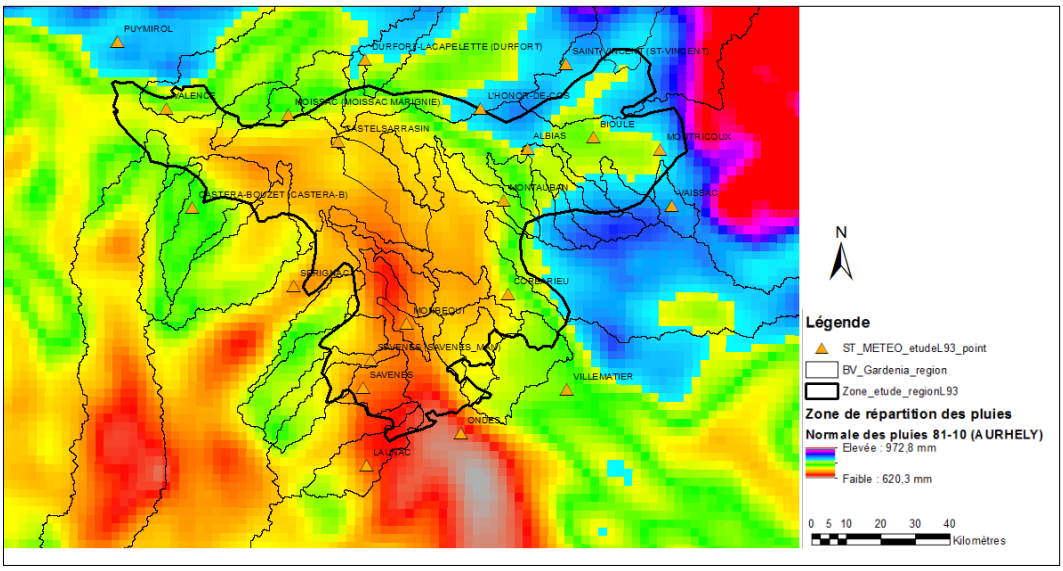


Illustration 24 – Carte de répartition des pluies – Normale des pluies 1981-2010 (AURHELY – Météo France).

Chroniques pluviométriques

Dix stations permettent de suivre l'évolution temporelle de la pluviométrie dans la zone d'étude. Onze autres stations se situent en bordure immédiate de la zone modélisée (cf. Illustration 25). Leurs dates de mise en service sont précisées dans le Tableau 5 : 14 de ces stations ont été créées avant fin 1995 (début de la modélisation).

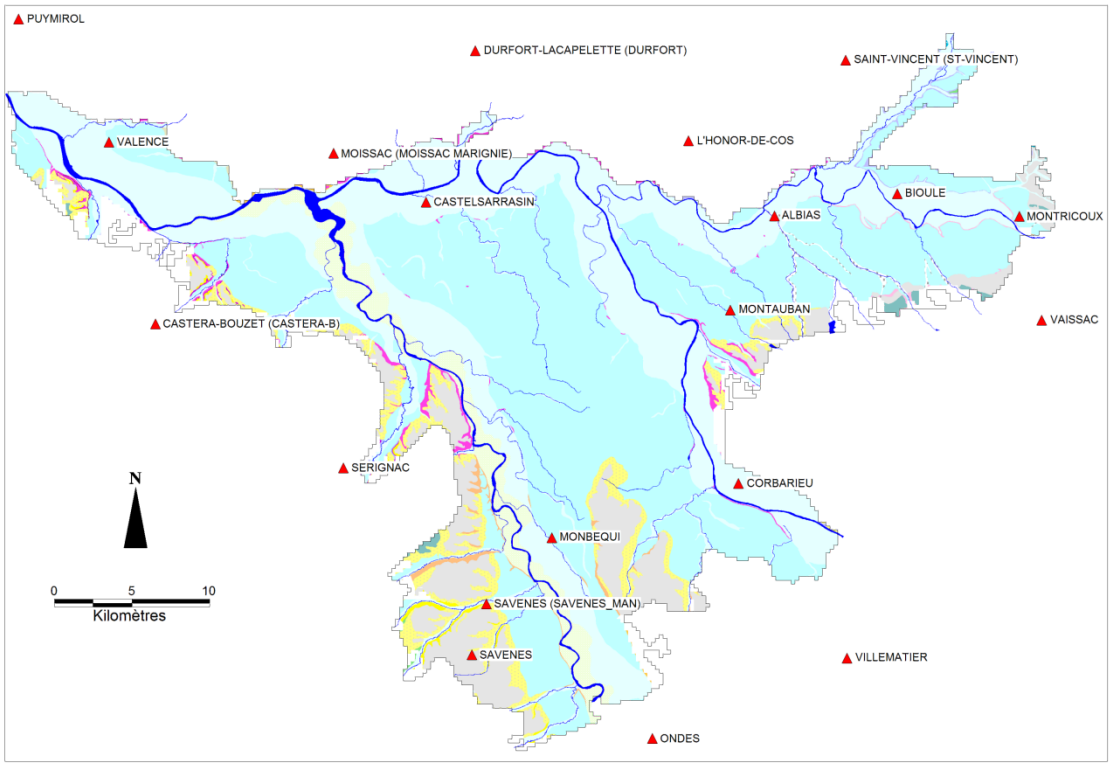


Illustration 25 – Postes pluviométriques suivis par Météo France.

Station		Pluie		ETP	
Code station	Nom station	Date début	Date fin	Date début	Date fin
31281001	LAUNAC	01/01/1953			
31403002	ONDES	01/08/1988		11/08/1988	20/10/2001
31583001	VILLEMATIER	01/01/1994			
47217001	PUYMIROL	01/12/1969			
82002001	ALBIAS	01/10/1963			
82018003	BIOULE	01/07/2002			
82033005	CASTELSARRASIN	01/03/1989		01/04/1990	28/02/2000
82034001	CASTERA-BOUZET (CASTERA-B)	01/01/1983			
82044001	CORBARIEU	01/01/1978			
82051001	DURFORT-LACAPELETTE (DURFORT)	01/12/1992			
82076001	L'HONOR-DE-COS	01/07/2001			
82112004	MOISSAC (MOISSAC MARIGNIE)	15/12/2005			
82114001	MONBEQUI	01/01/1993	31/08/2012		
82121002	MONTAUBAN	01/06/1865		01/06/1865	
82132002	MONTRICOUX	01/01/1999			
82174001	SAINT-VINCENT (ST-VINCENT)	01/06/1976			
82178001	SAVENES (SAVENES_MAN)	01/04/1986			
82178002	SAVENES	01/07/2001		04/05/2006	19/10/2010
82180001	SERIGNAC	01/01/1978			
82184002	VAISSAC	01/04/2000			
82186003	VALENCE	01/07/1994			

Tableau 5 – Principales caractéristiques des stations météorologiques dans et autour du secteur d'étude.

Les données pluviométriques décadaires ayant pu être obtenues auprès de Météo France dans le cadre de cette étude sont présentées dans le Tableau 6.

Station		Pluie	
Code station	Nom station	Date début	Date fin
31583001	VILLEMATIER	01/01/1994	30/09/2015
82002001	ALBIAS	01/01/2006	30/04/2013
82018003	BIOULE	01/01/2006	30/04/2013
82033005	CASTELSARRASIN	01/01/2006	30/04/2013
82034001	CASTERA-BOUZET (CASTERA-B)	01/01/1990	31/12/2013
82044001	CORBARIEU	01/01/2006	30/04/2013
82051001	DURFORT-LACAPELETTE (DURFORT)	01/01/1993	30/09/2015
82121002	MONTAUBAN	01/01/1945	30/09/2015
82174001	SAINT-VINCENT (ST-VINCENT)	01/01/1990	30/09/2015
82180001	SERIGNAC	01/01/1990	31/12/2013
82184002	VAISSAC	01/01/1998	30/09/2015

Tableau 6 – Données pluviométriques décadaires récupérées.

Comparaison AURELHY – Stations

Afin de s'assurer d'une bonne corrélation entre chroniques pluviométriques locales et informations fournies par la grille AURELHY au pas kilométrique, la pluviométrie moyenne interannuelle 1981-2010 a été comparée à la valeur AURELHY locale.

Seule la chronique pluviométrique de la station de Montauban a été obtenue sur l'intégralité de la période 1981-2010. La pluviométrie moyenne interannuelle sur cette période est de 707,4 mm/an, soit un écart de moins de 1% avec la valeur AURELHY (713,6 mm/an).

La comparaison des valeurs AURELHY des autres stations de la zone d'étude à la station de Montauban illustre la faible variabilité spatiale de la pluviométrie :

- écart de 1,3 à 6,6 % pour une moyenne de 4,4 % (en valeur absolue) pour les stations dans la zone modélisée ;
- écart de 0,9 à 10,1 % pour une moyenne de 6,0 % (en valeur absolue) pour les stations sur le pourtour de la zone modélisée.

Code station	Nom station	Valeur AURELHY (mm/an)	Ecart MONTAUBAN (%)
31281001	LAUNAC		
31403002	ONDES	641.8	-10.1
31583001	VILLEMATIER	725.7	1.7
47217001	PUYMIROL		
82002001	ALBIAS	760.4	6.6
82018003	BIOULE	744.5	4.3
82033005	CASTELSARRASIN	694.4	-2.7
82034001	CASTERA-BOUZET (CASTERA-B)	735.4	3.1
82044001	CORBARIEU	704.6	-1.3
82051001	DURFORT-LACAPELETTE (DURFORT)	761.1	6.7
82076001	L'HONOR-DE-COS	772.3	8.2
82112004	MOISSAC (MOISSAC MARIGNIE)	719.7	0.9
82114001	MONBEQUI	667.0	-6.5
82121002	MONTAUBAN	713.6	0.0
82132002	MONTRICOUX	753.8	5.6
82174001	SAINT-VINCENT (ST-VINCENT)	770.0	7.9
82178001	SAVENES (SAVENES_MAN)	677.3	-5.1
82178002	SAVENES	667.5	-6.5
82180001	SERIGNAC	675.0	-5.4
82184002	VAISSAC	783.9	9.9
82186003	VALENCE	724.1	1.5

Tableau 7 – Valeurs AURELHY stations étudiées et écart à station de Montauban.

Analyse par simple cumul de la station de Montauban

Une analyse par simple cumul relatif a été réalisée sur la station de Montauban, qui présente la chronique la plus complète. Afin d'observer d'éventuelles déviations liées à un « bruit » dans la mesure ou le traitement des données, ou bien à un changement de la tendance climatique, le cumul de pluie décadaire est divisé par sa moyenne sur l'ensemble de la période d'observation (cf. Hiez, 1977).

La courbe de cumul relatif reste proche de la première bissectrice (droite y=x). L'absence de déformation systématique pendant une période déterminée met en évidence l'absence de biais lié à un changement du mode de mesure ou de l'appareil, un déplacement de la station, etc. (ou ces bruits ont été corrigés par Météo France avant publication des données).

Dans le cas de la station de Montauban (cf. Illustration 26), on constate un écartement à la moyenne pendant les années 1990, conséquence des années 1992 et 1993 particulièrement pluvieuses.

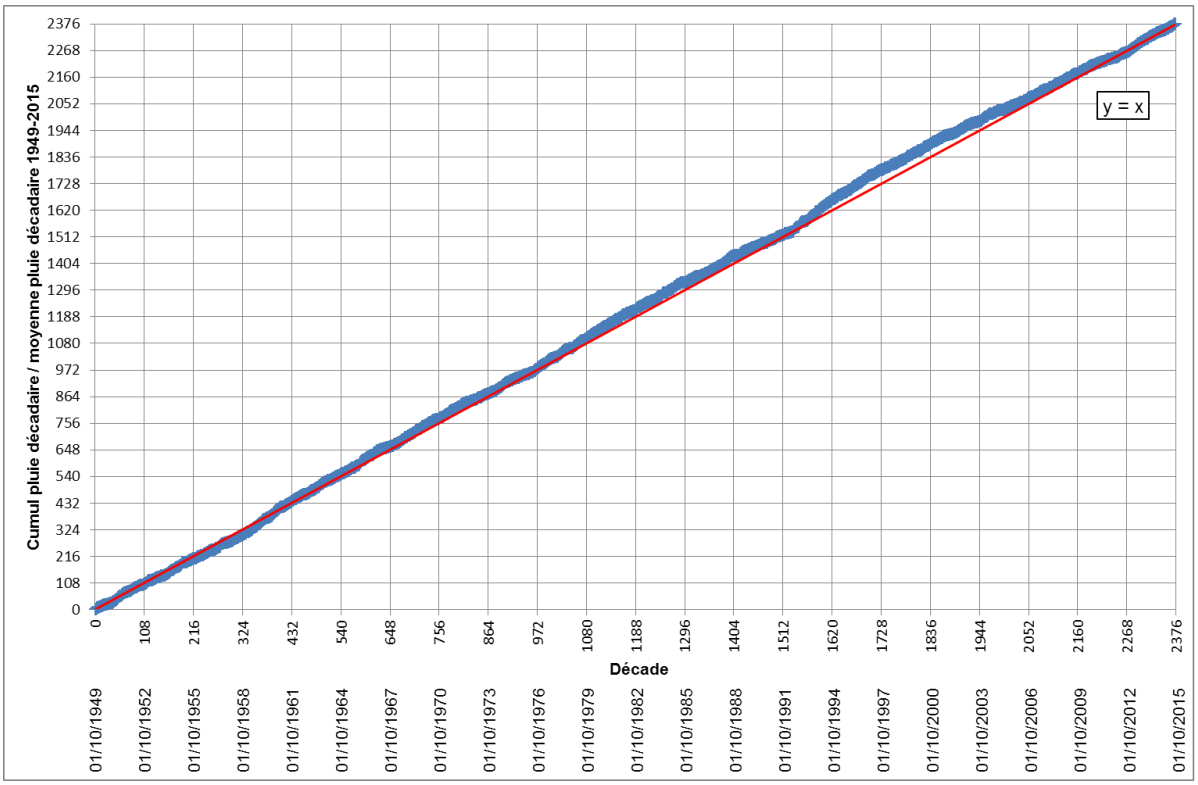


Illustration 26 – Graphique de simple cumul relatif à la station de Montauban.

Comparaison des chroniques décadaires à celle de Montauban

Chacune des dix chroniques de pluies décadaires obtenues a été comparée à celle de Montauban sur la même période, correspondant partiellement ou intégralement à la période de modélisation suivant les données disponibles (cf. Tableau 8).

Les coefficients de corrélation sont supérieurs pour les stations situées dans la zone modélisée (entre 88,5 et 95,6 %, lignes à fond vert), et donc dans le même contexte topographique (et géologique) de plaine alluviale. Les stations situées en pourtour de modèle, dans les coteaux molassiques, sont néanmoins bien corrélées à la station de Montauban (coefficient entre 84,5 et 88,3 %), à l'exception notable de la station de Durfort (13,6 %).

Les écarts à la station de Montauban sur les périodes comparées sont compris entre 3,3 et 14,3 % (en valeur absolue), sans qu'il soit possible de dégager une tendance régionale, les périodes de comparaison étant hétérogènes.

Code station	Nom station	Comparaison Montauban - Autre station		
		Période comparaison	Coeff. de corrélation	Ecart cumul final
31583001	VILLEMATIER	1994-2015	85.0%	3.3%
82002001	ALBIAS	2006-2013	95.6%	14.3%
82018003	BIOULE	2006-2013	93.0%	6.9%
82033005	CASTELSARRASIN	2006-2013	91.2%	5.3%
82034001	CASTERA-BOUZET (CASTERA-B)	1990-2013	84.5%	4.9%
82044001	CORBARIEU	2006-2013	88.5%	7.4%
82051001	DURFORT-LACAPELETTE (DURFORT)	1993-2015	13.6%	6.6%
82174001	SAINT-VINCENT (ST-VINCENT)	1990-2015	88.3%	8.9%
82180001	SERIGNAC	1990-2013	87.8%	-3.4%
82184002	VAISSAC	1998-2015	85.6%	11.0%

Tableau 8 – Comparaison des chroniques de pluies décadaires de Montauban et des autres stations.

Analyses par doubles cumuls

Une analyse par double cumul au pas de temps décadaire a été réalisée à partir des données disponibles sur les stations du Tableau 6. Le cumul de chacune des 10 autres stations a été comparé au cumul sur la même période pour la station de Montauban (seule station avec une chronique complète).

Le principe de la méthode du double cumul consiste à vérifier la proportionnalité des valeurs mesurées à deux stations, en comparant sur un même graphique le cumul des précipitations de chaque station pour une période donnée. Comme pour le simple cumul, les représentations graphiques sont relativisées en divisant chaque cumul décadaire par sa moyenne sur la station sur l'ensemble de la période d'observation.

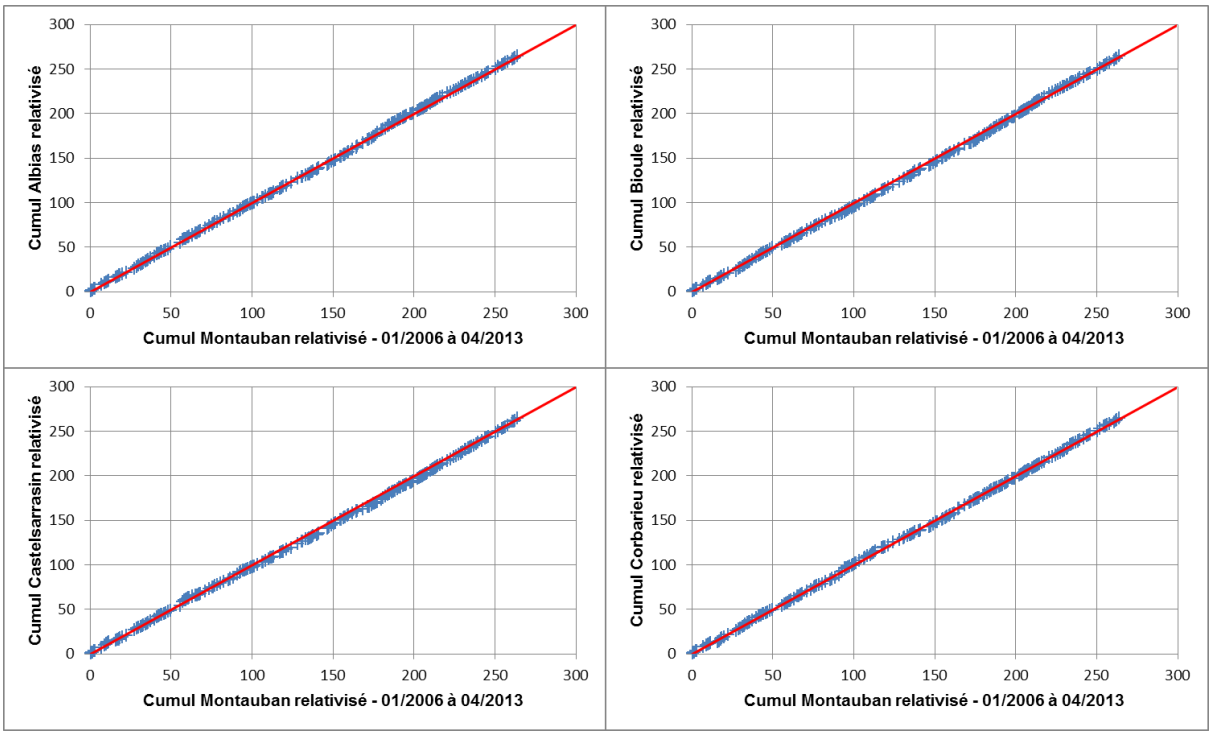


Illustration 27 – Graphiques des doubles cumuls relativisés des stations dans la zone modélisée.

Les doubles cumuls effectués (cf. Illustration 27 et Illustration 28) ne mettent en évidence aucune rupture de pente franche par rapport à la première bissectrice. Les données sont donc homogènes et ne présentent pas d'anomalies liées à une modification des conditions de l'observation.

Choix des données d'entrée du modèle

Le Tableau 9 compare les écarts de pluviométrie par rapport à la station de Montauban pour les deux types de données disponibles :

- grille AURELHY : pluviométrie sur la période 1981-2010 ;
- stations ponctuelles : pluviométrie sur tout ou partie de la période modélisée (1990-2015).

Code station	Nom station	Ecart MONTAUBAN (%)		Période double cumul
		AURELHY	Double cumul décadaire	
31583001	VILLEMATIER	1.7	3.3	1994-2015
82002001	ALBIAS	6.6	14.3	2006-2013
82018003	BIOULE	4.3	6.9	2006-2013
82033005	CASTELSARRASIN	-2.7	5.3	2006-2013
82034001	CASTERA-BOUZET (CASTERA-B)	3.1	4.9	1990-2013
82044001	CORBARIEU	-1.3	7.4	2006-2013
82051001	DURFORT-LACAPELETTE (DURFORT)	6.7	6.6	1993-2015
82121002	MONTAUBAN	0.0	0.0	-
82174001	SAINT-VINCENT (ST-VINCENT)	7.9	8.9	1990-2015
82180001	SERIGNAC	-5.4	-3.4	1990-2013
82184002	VAISSAC	9.9	11.0	1998-2015

Tableau 9 – Comparaison des écarts à la station de Montauban AURELHY / Chroniques décadaires.

La comparaison des deux méthodes d'estimation de la variabilité spatiale de la pluviométrie sur la zone d'étude met en évidence le fait que le coefficient correcteur multiplicatif entre deux stations (et donc les moyennes de chaque station) varie en fonction de la période sur laquelle se fait l'estimation.

Ainsi, la station de Montauban apparaît relativement moins pluvieuse par rapport à ses voisines (à la seule exception de la station de Durfort) sur les périodes comprises entre 1990 et 2015 par rapport à la période 1981-2010.

La différence entre les deux coefficients est particulièrement marquée pour les quatre stations situées dans la zone modélisée (Albias, Bioule, Castelsarrasin et Corbarieu), pour lesquelles la période de comparaison des chroniques (janvier 2006 à avril 2013) est la plus courte et correspond à une grande partie de la période de calage du modèle (octobre 2005 à septembre 2015).

En prenant en compte les paramètres suivants :

- l'analyse de la grille AURELHY et des chroniques pluviométriques disponibles ont mis en évidence une faible variabilité spatiale de la pluviométrie sur la zone modélisée ;
- les coefficients correcteurs par rapport à la station de Montauban issus de la grille AURELHY ne sont pas directement transposables pour la période modélisée ;
- seules les chroniques des stations de Montauban et Saint-Vincent (hors modèle, située sur les coteaux molassiques) couvrent l'ensemble de la période modélisée ;

La chronique pluviométrique issue de la seule station de Montauban (n° 82121002) a donc été retenue pour modéliser la recharge sur l'ensemble de la zone modélisée.

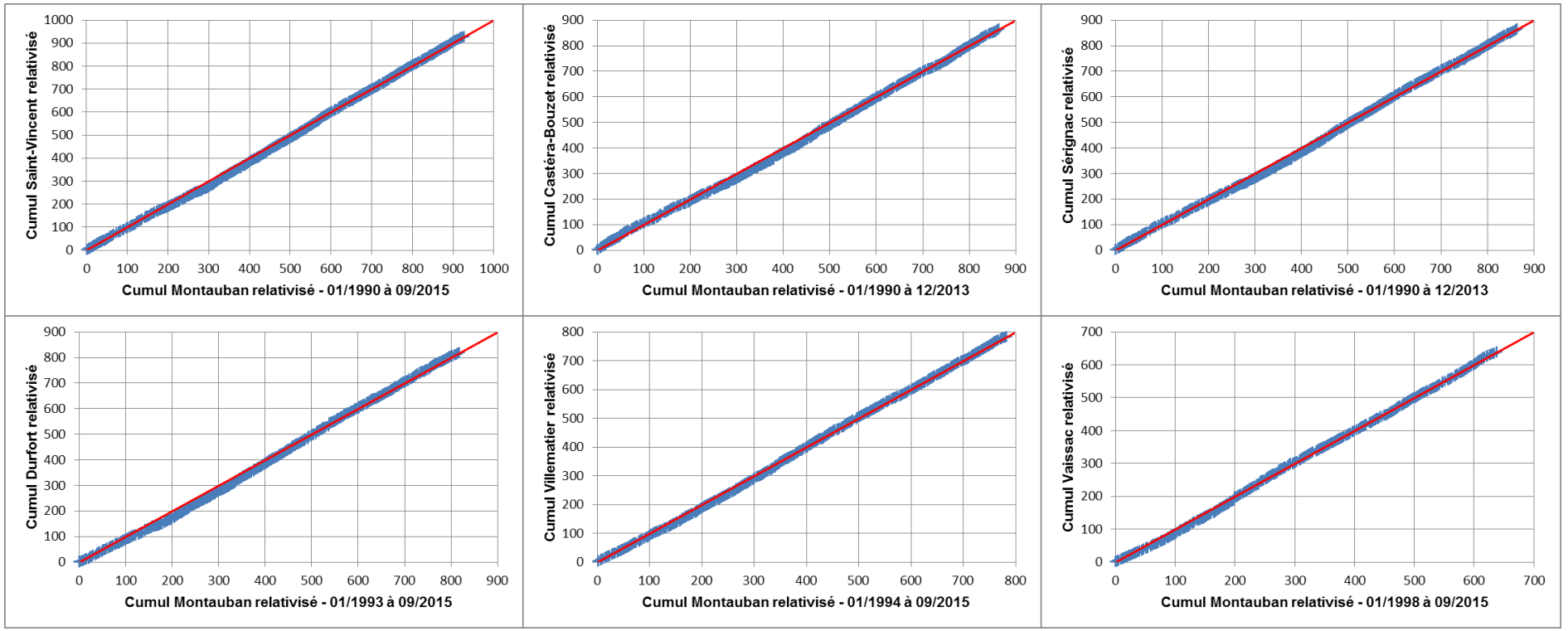


Illustration 28 – Graphiques des doubles cumuls relativisés des stations sur le pourtour de la zone modélisée.

3.5.4. Évapotranspiration potentielle

L'évaluation de la recharge de la nappe nécessite d'intégrer les données d'évapotranspiration potentielle (ETP). Ces données sont disponibles auprès de Météo France sur certaines stations météorologiques (cf. Illustration 29).

Le Tableau 10 présente les chroniques d'ETP Penman de Météo France obtenues au voisinage de la zone d'étude et correspondant à la période de modélisation.

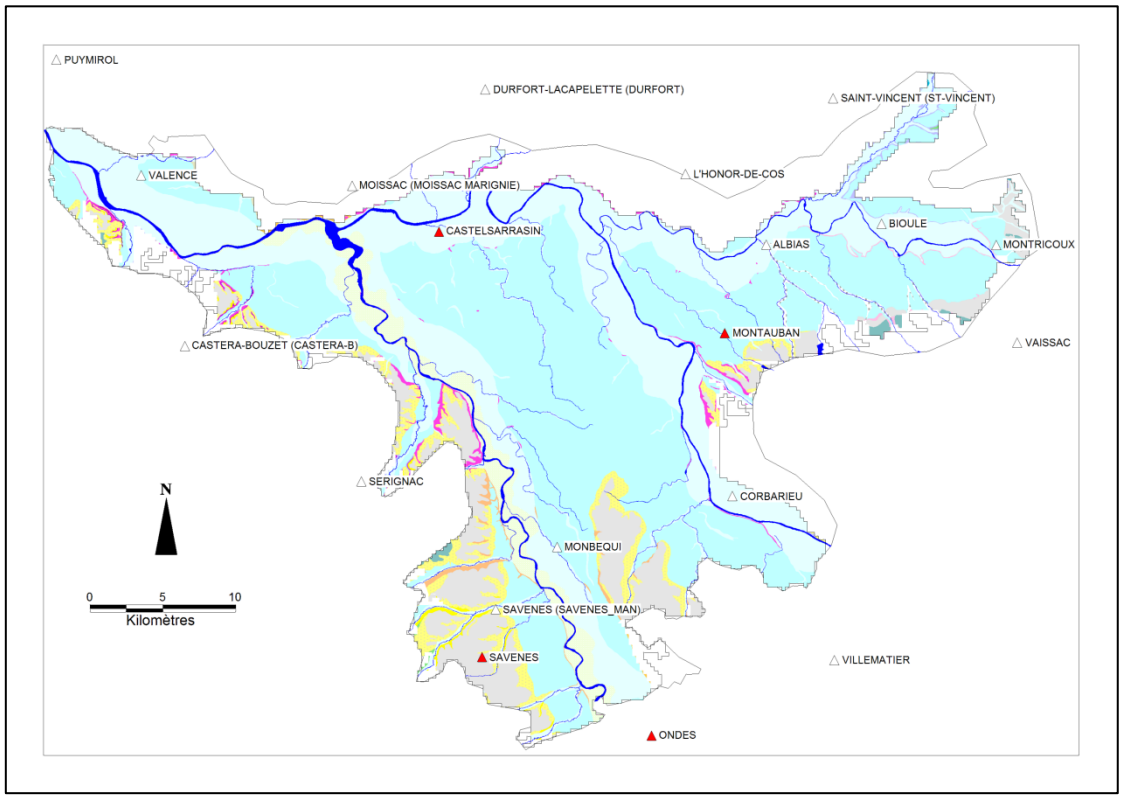


Illustration 29 – Carte de localisation des stations météorlogiques avec données d'ETP (triangles rouges).

Station		ETP	
Code station	Nom station	Date début	Date fin
31403002	ONDES	01/05/1990	20/10/2001
82033005	CASTELSARRASIN		
82121002	MONTAUBAN	01/01/1990	30/09/2015
82178002	SAVENES	01/05/2006	20/10/2010

Tableau 10 – Stations avec données d'ETP dans la zone d'étude élargie et données obtenues.

L'Illustration 30 représente les chroniques d'ETP décadaire de Montauban, Ondes et Savenès sur la période de 1990 à 2015. Elle montre une forte corrélation de l'évolution de l'ETP calculée par ces stations. Le Tableau 11 confirme cette impression visuelle, les coefficients de corrélation étant supérieurs à 99 %.

En cumul, les écarts à la station de Montauban sur les périodes comparées sont également limités (-3,2 et 5,4 % respectivement).

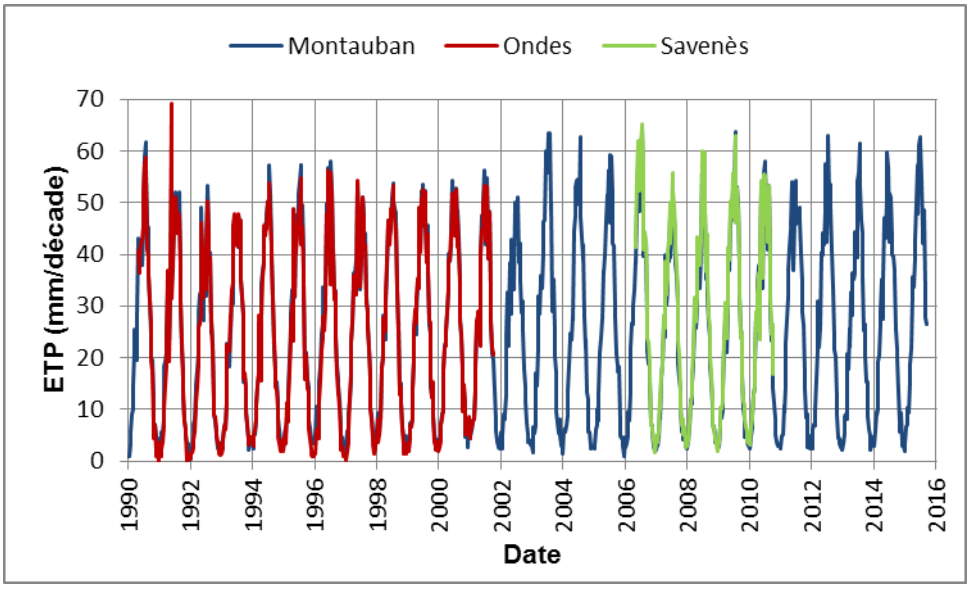


Illustration 30 – ETP décadaire aux stations Météo France de Montauban, Ondes et Savenès.

Code station	Nom station	Comparaison Montauban - Autre station		
		Période comparaison	Coeff. de corrélation	Ecart cumul final
31403002	ONDES	1990-2001	99.3%	-3.2%
82178002	SAVENES	2006-2010	99.6%	5.4%

Tableau 11 – Comparaison des chroniques d'ETP décadaires de Montauban et des autres stations.

Les graphiques de simple et de double cumuls (cf. Illustration 31 et Illustration 32) mettent en évidence des données homogènes et ne présentant pas d'anomalies liées à une modification des conditions de l'observation sur la période et la zone d'étude.

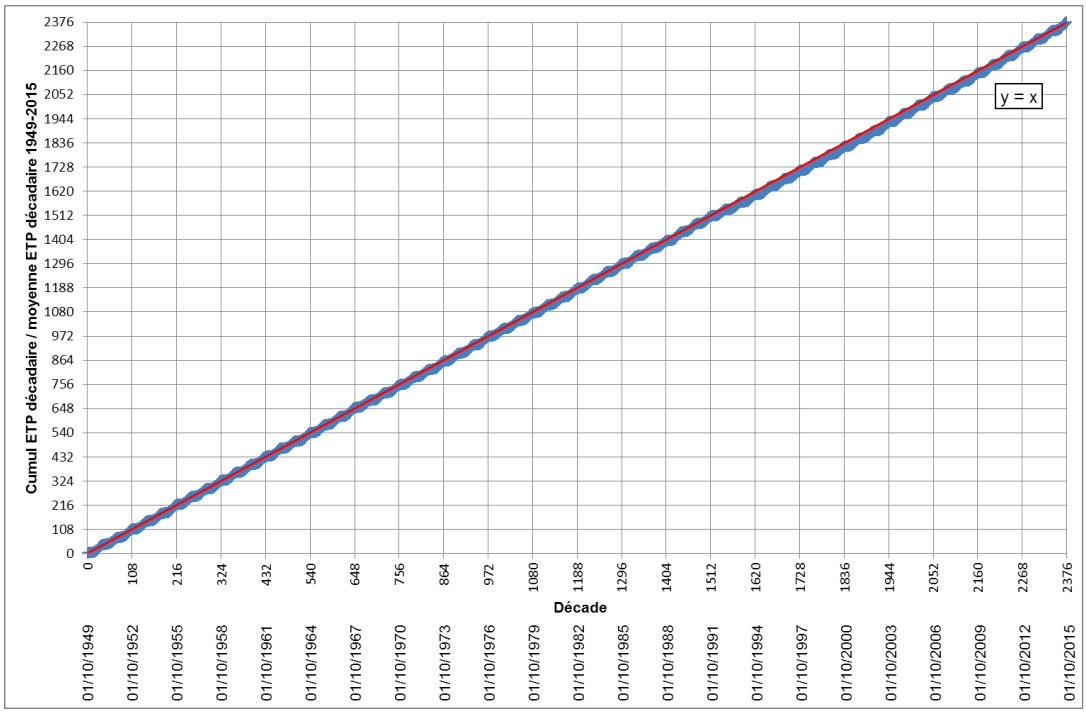


Illustration 31 – Graphique du simple cumul des données d'ETP de la station de Montauban.

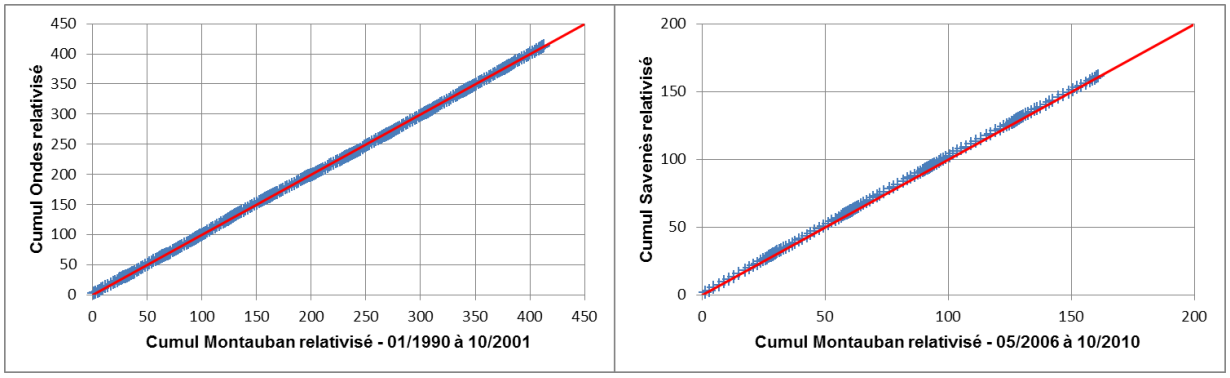


Illustration 32 – Graphique du double cumul des données d'ETP.

L'homogénéité des données, la corrélation quasi-parfaite des deux autres stations et le fait que seule la chronique de la station de Montauban (n° 82121002) couvre l'ensemble de la période modélisée permet de retenir cette chronique d'ETP pour l'ensemble de la zone d'étude.

3.5.5. Calcul de la recharge

Présentation du modèle GARDENIA

GARDÉNIA est un modèle global conceptuel qui permet de réaliser le bilan hydrologique de bassins versants à partir de chroniques de pluie et d'évapotranspiration potentielle (ETP), représentatives. Une fois calé sur les observations disponibles, le modèle permet de simuler l'évolution du débit à l'exutoire et/ou du niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente pour différentes chroniques de pluie et ETP. Le fonctionnement du logiciel est décrit en Annexe 9.

Dans le cas du couplage avec MARTHE, la modélisation GARDÉNIA permet de calculer la recharge à la nappe et le ruissellement superficiel vers les cours d'eau en fonction des données de pluie et d'ETP et des paramètres du sol.

Modélisation et calcul de la recharge

- **Paramètres hydrologiques**

Les paramètres hydrologiques du modèle sont au nombre de neuf.

Cinq paramètres dimensionnels caractérisent les différents réservoirs :

- la capacité de stockage du sol (en mm) correspond à la hauteur d'eau maximale que le sol peut stocker ;
- le déficit initial du réservoir sol (en mm) correspond à la hauteur d'eau présente dans le sol au début de la simulation. Pour une modélisation commençant en basses eaux, le réservoir sol sera considéré comme vide et le déficit initial sera donc égal à la capacité de stockage du sol ;
- le niveau d'équi Ruissellement/Percolation (en mm) correspond à la hauteur d'eau dans le réservoir intermédiaire pour laquelle l'infiltration et le ruissellement sont égaux. ;
- la durée de ½ percolation (en jours ou décades suivant le pas de temps choisi) correspond au temps nécessaire pour une ½ vidange du réservoir intermédiaire ;

- la durée de ½ décroissance (en jours ou décades suivant le pas de temps choisi) correspond au temps nécessaire pour une ½ vidange du réservoir souterrain.

Deux coefficients correctifs permettent d'ajuster si nécessaire les chroniques de pluie et d'ETP prises en compte pour la modélisation. Ces coefficients sont globaux, c'est-à-dire qu'ils portent sur l'ensemble de la chronique considérée. L'un porte sur la pluviométrie et l'autre sur l'ETP. Cette possibilité n'a pas été utilisée dans le cadre de cette modélisation, en raison des choix expliqués aux chapitres 3.5.3 et 3.5.4.

En outre, deux autres paramètres peuvent être ajustés lors d'un modèle lorsque celui-ci prend en compte un niveau piézométrique : le coefficient d'emmagasinement « équivalent » et le niveau de base local. Le calage hydroclimatologique sur les chroniques piézométriques ayant été réalisé directement dans le modèle MARTHE, ces deux derniers paramètres, qui concernent le réservoir souterrain, ainsi que le dernier paramètre dimensionnel (durée de ½ décroissance) n'ont pas été utilisés pour le calage de la recharge à la nappe.

En effet, seuls les quatre premiers paramètres dimensionnels des modèles GARDENIA sont transférés au modèle maillé réalisé avec le logiciel MARTHE : capacité de stockage du sol, déficit initial du réservoir sol, niveau d'équi Ruissellement/Percolation et temps de demi-percolation.

Les valeurs initialement retenues pour ces quatre paramètres sont les suivantes :

- capacité de stockage du sol = 50 mm : Basée sur la connaissance locale de la réserve utile des sols (information fournie par la Chambre d'Agriculture du Tarn-et-Garonne) ;
- déficit initial du réservoir sol = 50 mm : Pour une simulation commençant en basses eaux (1er octobre), on considère le réservoir sol initialement vide ;
- niveau d'équi Ruissellement/Percolation = 9999 : Cette valeur permet de rendre le ruissellement négligeable sur l'ensemble de la zone d'étude. En effet, les fortes pentes topographiques aux bordures du modèle et aux discontinuités entre terrasses génèrent des débordements conséquents (30 % de la recharge) directement transférés au réseau hydrographique et donc assimilables à un ruissellement superficiel (cf. chapitre 4.3.4) ;
- durée de ½ percolation = 30 jours / 3 décades : Cette valeur est dans la gamme des valeurs conseillées pour la simulation d'une nappe libre.

- **Données d'entrée et données de calage**

Les données d'entrée sont les précipitations et l'évapotranspiration potentielle et, le cas échéant, les prélèvements. Les données de calage sont de deux types : niveaux piézométriques et données de débit.

L'emprise du modèle MARTHE ne recoupant que des fragments de bassins versants (à l'exception de quelques cours d'eau secondaires autochtones), le calage de la recharge n'a pas pu être réalisé avec GARDENIA et a donc été fait directement sous MARTHE.

Les données d'entrée utilisées sont donc les chroniques de pluie et d'ETP de la station de Montauban (n°82121002).

- **Comparaison des différentes méthodes de calcul de la pluie efficace**

L'Illustration 33 met en évidence les cumuls annuels pour les différentes manières de calculer la pluie efficace :

- schéma de type « réserve utile » ou « réservoir sol progressif » ;
- utilisation de chroniques décadaires ou journalières.

Le schéma « réservoir sol progressif » retranscrit mieux la réalité de l'infiltration progressive de l'eau dans le sol qu'un modèle de type « réserve utile » en tout ou rien (cf. Thiéry, 2014).

Initialement, le pas de temps décadaire de la modélisation MARTHE avait été utilisé, mais il est mal adapté au rythme circadien de la végétation. En effet, en période de stress hydrique, une plus grande fraction de la pluie pourra être récupérée pour l'évapotranspiration si les données sont intégrées sur une période de 10 jours.

En considérant donc le schéma « réservoir sol progressif » avec des chroniques journalières comme le plus proche de la réalité physique, les autres schémas sous-estiment la pluie efficace sur l'ensemble de la période étudiée (1990-2015) :

- de 17,3 % pour le schéma « réservoir sol progressif » avec des chroniques décadaires ;
- d'environ 25 % pour les schémas « réserve utile » (23,5 % pour les chroniques décadaires et 26,7 % pour les chroniques journalières).

L'écart entre le schéma « réservoir sol progressif » avec des chroniques journalières et les autres schémas est particulièrement criant pour les années les plus sèches, 2001-2002 et 2011-2012. Il atteint alors 55 à 89 % de sous-estimation de la pluie efficace.

Le pas de temps des chroniques climatiques influe sensiblement moins sur le calcul de la pluie efficace pour le schéma « réserve utile » (4,4 % d'écart sur le total de la période 1990-2015). Dans le cas de la station de Montauban, la quantité de pluie efficace estimée à partir des chroniques journalières est même le plus souvent inférieure à la quantité estimée à partir des chroniques décadaires (18 cumuls annuels sur 25 et cumul total).

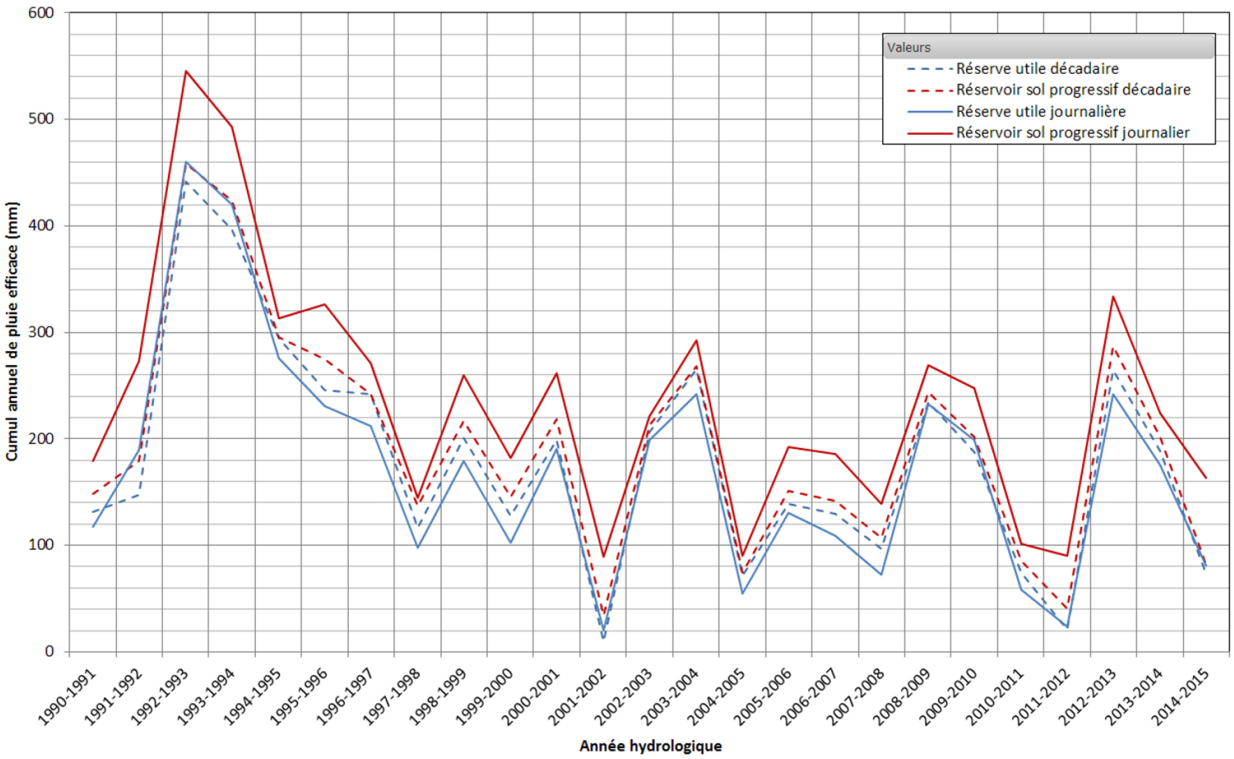


Illustration 33 – Comparaison des différentes méthodes de calcul de la pluie efficace.

Les chroniques journalières de pluie et d'ETP de la station de Montauban ont été obtenues et utilisées pour déterminer la pluie efficace et la recharge quotidienne avec le schéma « réservoir sol progressif ». Les recharges quotidiennes ont ensuite été sommées par décade.

3.6. RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

3.6.1. Passage au réseau hydrographique dynamique

Afin d'améliorer le calcul des relations nappes-rivières, notamment pour les aquifères situés dans les alluvions récentes et la basse plaine, il a été décidé de modéliser les cours d'eau de niveau 1 à 4 de la base de données BD CARTHAGE en tant que réseau hydrographique dynamique.

Dans la version précédente du modèle (Ghyselinck-Bardeau, 2007), des potentiels imposés avaient été affectés aux mailles parcourues par les rivières principales. Les cours d'eau secondaires avaient été laissés en débordement libre et un ajustement de la topographie avait été réalisé dans certains secteurs pour permettre au modèle de reconstituer le phénomène de drainage de la nappe par ces ruisseaux.

Le modèle rendait ainsi compte du rôle d'exutoire ou d'alimentation de la nappe joué par le réseau hydrographique, mais pas des variations saisonnières liées aux variations du débit et du niveau dans les cours d'eau.

Ces variations ont été prises en compte :

- en introduisant des chroniques de débit amont pour les rivières allochtones (dont la source se situe à l'extérieur de la zone modélisée) ;
- en laissant le débit des rivières autochtones (dont la source se situe à l'intérieur de la zone modélisée) être défini par le débordement de la nappe, après ajustement de la topographie ;
- en définissant les relations liant le débit et la hauteur d'eau dans toutes les mailles parcourues par le réseau hydrographique.

Deux types de relations hauteur-débit ont été utilisées dans le modèle suivant le contexte hydrographique :

- loi de Manning-Strickler dépendant de la largeur et de la pente du cours d'eau ainsi que d'un coefficient de « rugosité », dans le cas d'un écoulement non influencé ;
- loi de seuil dépendant de la largeur du cours d'eau, de la hauteur du seuil et de deux paramètres adimensionnels fonction de la forme du seuil, dans le cas où le niveau de la rivière est imposé par une retenue.

3.6.2. Paramètres définissant le réseau hydrographique

L'Annexe 10 décrit le fonctionnement du réseau hydrographique dans MARTHE, résumé ci-dessous.

Dans le logiciel, le réseau de cours d'eau est organisé en affluents. Chaque affluent est découpé en un ensemble linéaire de tronçons. Un tronçon de rivière est défini par son numéro d'affluent et par son numéro de tronçon. Une maille rivière du modèle ne peut appartenir qu'à un seul tronçon.

Les numéros de tronçons croissants définissent le sens d'écoulement de l'eau dans un même affluent. Le sens d'écoulement entre affluents est défini par un arbre de branchement des affluents de rivière.

Le débit de la rivière dans chaque tronçon est calculé de manière itérative à partir du débit provenant du tronçon amont, du débit sortant dans le tronçon aval, du débit échangé avec l'aquifère, et éventuellement d'un terme source (pompage ou injection dans la rivière).

Les interactions entre la nappe et la rivière dépendent de la différence entre la hauteur d'eau dans la rivière et le niveau piézométrique.

Le réseau hydrographique est composé de tronçons superposés aux mailles aquifères. Chaque tronçon est défini par les paramètres suivants :

- numéro d'affluent et numéro de tronçon ;
- longueur et largeur du cours d'eau ;
- cote du fond de la rivière et pente du lit ;
- épaisseur et perméabilité du colmatage du lit et des berges ;
- rugosité du lit de la rivière ;
- le cas échéant, hauteur et facteur débit du seuil impactant l'écoulement.

Outre ces paramètres constants, deux variables sont définies dans chaque tronçon du réseau hydrographique :

- cote du fil de l'eau ;
- débit de la rivière.

Les chroniques de débit à la maille amont de chaque cours d'eau allochtone constituent une donnée d'entrée du modèle, tandis que les valeurs de débit et de hauteur d'eau dans les différents tronçons au cours de la modélisation constituent des résultats à comparer aux observations pendant la phase de calage du modèle.

3.6.3. Cours d'eau modélisés

Le réseau hydrographique modélisé correspond aux cours d'eau de niveau 1 à 4 de la BD CARTHAGE traversant la zone modélisée (cf. Illustration 34). On dénombre ainsi :

- 33 cours d'eau allochtones,
- 8 cours d'eau autochtones.

Parmi les cours d'eau allochtones, il existe :

- 9 cours d'eau instrumentés, dont :
  - **les 3 cours d'eau majeurs** : la Garonne, le Tarn et l'Aveyron. L'Aveyron se jette dans le Tarn dans le secteur de Lafrançaise, et le Tarn conflue avec la Garonne dans le secteur de Moissac :
    - la Garonne est suivie par 5 stations hydrométriques dans le secteur étudié, dont 3 présentent des données sur la période modélisée (1996-2015),
    - le Tarn est suivi par 5 stations hydrométriques, dont 2 présentent des données sur la période modélisée,

  - l'Aveyron est suivi par 3 stations hydrométriques, dont 2 possèdent des données sur la période modélisée ;
- **6 cours d'eau de niveau inférieur** : l'Arrats, la Gimone, la Barguelonne, le Lemboulas, la Lère et le Tescou (1 station hydrométrique avec des données sur la période modélisée chacun).

- 15 cours d'eau ne sont pas du tout instrumentés en continu.

Parmi les 8 cours d'eau autochtones, aucun n'est équipé d'une station de mesure en continu. Ces cours d'eau prennent naissance dans la plaine alluviale entre le Tarn et la Garonne. Contrairement aux cours d'eau allochtones, leur débit n'est pas imposé par une chronique à leur maille amont, mais uniquement par le débordement de la nappe, quand le niveau piézométrique dépasse la cote topographique.

Le tracé des cours d'eau a été effectué à partir des polylignes de la BD CARTHAGE : chaque maille du modèle intersectant une polyligne a été définie comme une maille rivière. 2539 mailles rivières se sont donc vu attribuer l'ensemble des paramètres permettant de caractériser le réseau hydrographique dans le logiciel MARTHE.

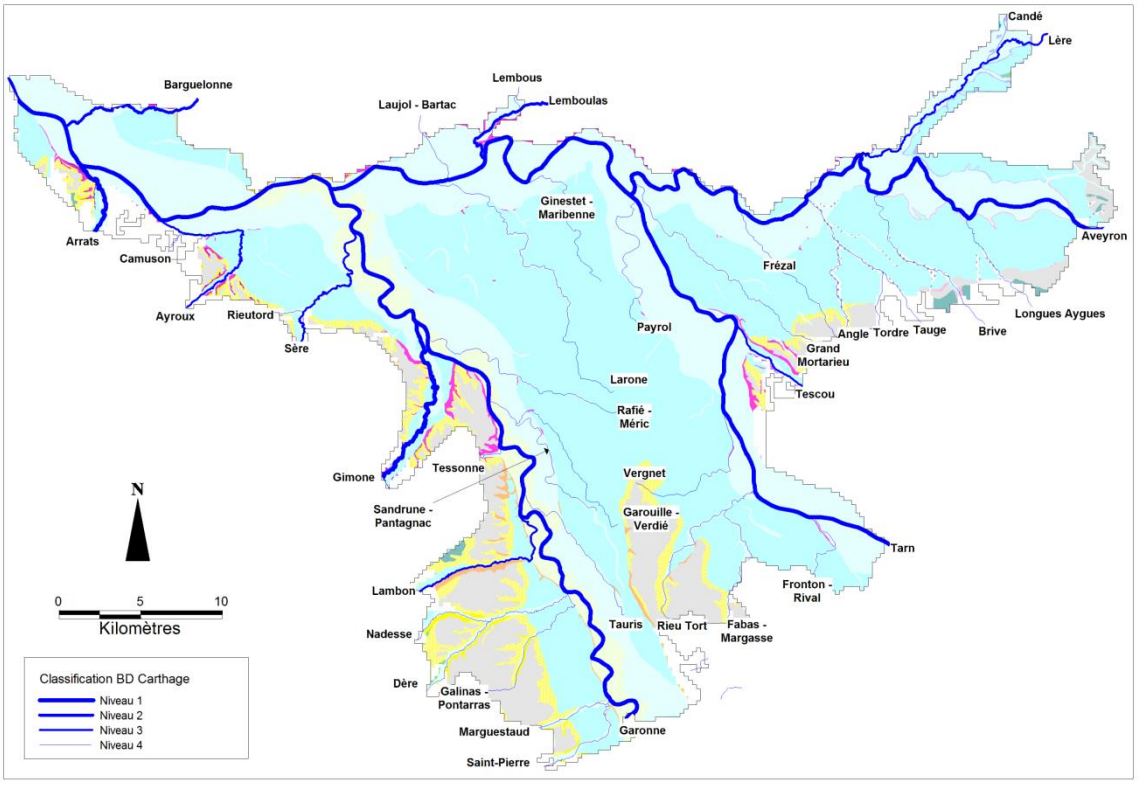


Illustration 34 – Carte des cours d'eau modélisés.

3.6.4. Numéros d'affluents

Les affluents ont été numérotés de 1 à 82, en créant un nouveau numéro d'affluent à chaque confluent de cours d'eau. La numérotation commence par la vallée de la Lère, puis la vallée de l'Aveyron, du Tarn, et enfin de la Garonne (cf. Illustration 35).

Le tronçon de Garonne entre le confluent avec le Tarn et le confluent avec l'Ayroux a été scindé en deux affluents distincts : l'un en amont du barrage de Malause, l'autre en aval de ce dernier.

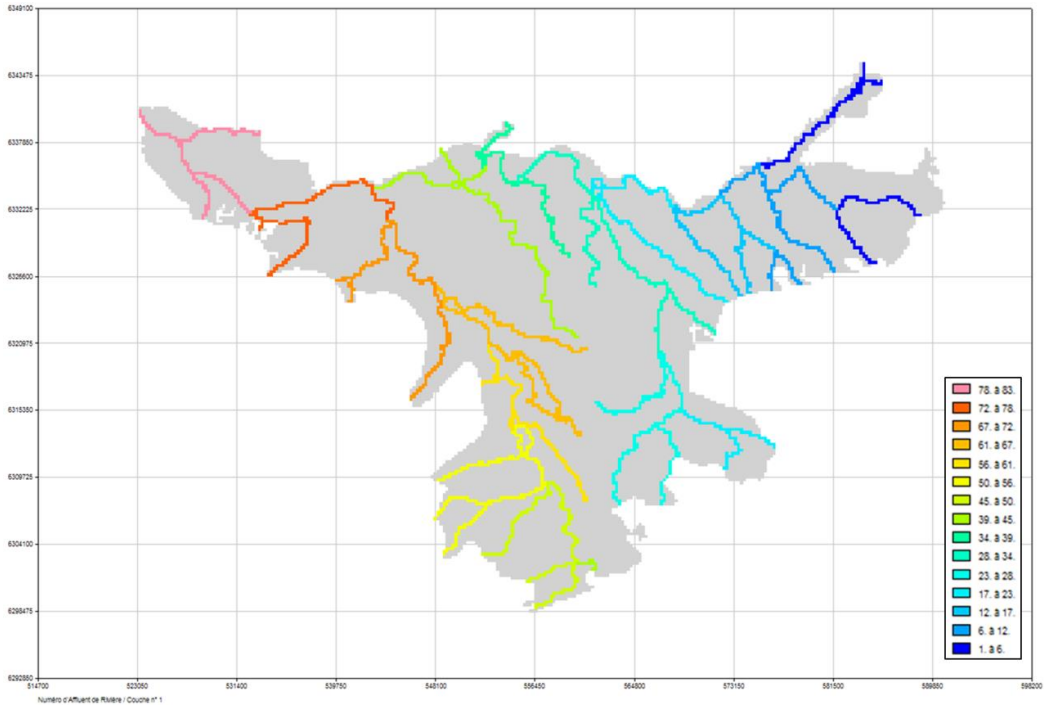


Illustration 35 – Numéros d'affluents affectés aux cours d'eau modélisés.

3.6.5. Numéros de tronçons

Pour chaque affluent, les tronçons ont été numérotés de 1 à 106 (au maximum), le tronçon n° 1 correspondant à la maille amont de l'affluent et le tronçon avec la valeur la plus élevée correspondant à la maille aval de l'affluent, avant le confluent avec un autre cours d'eau (ou la présence du barrage de Malause) (cf. Illustration 36).

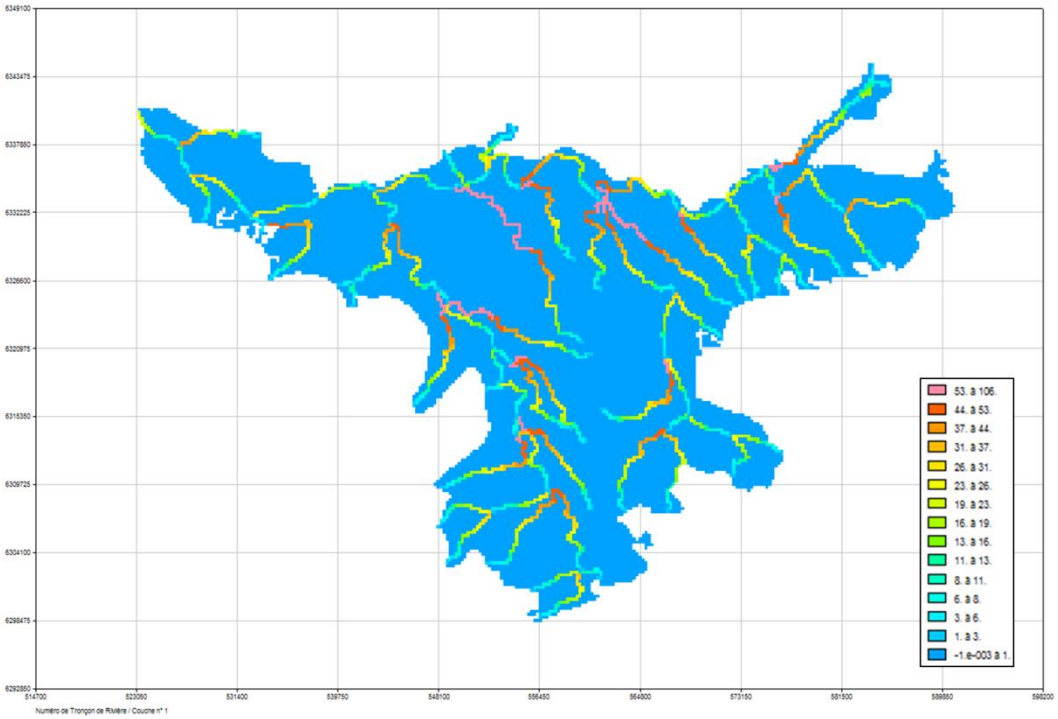


Illustration 36 – Numéros de tronçons affectés aux cours d'eau modélisés.

3.6.6. Arbre de branchement des affluents de rivière

L'arbre de branchement des affluents de rivière a été établi sous MARTHE pour tenir compte du sens global d'écoulement du réseau hydrographique et pour respecter l'ordre des confluences.

Le réseau hydrographique comporte 41 « tronçons sources » (un pour chaque cours d'eau) et un exutoire unique, la Garonne à Lamagistère.

3.6.7. Longueur des tronçons

La longueur des tronçons a été calculée dans chaque maille rivière en mesurant la longueur de la polyligne de la BD CARTHAGE intersectant la maille en question.

Ce travail a été réalisé à l'aide du logiciel SIG (Système d'Information Géographique) MAPINFO.

Trois cas ont nécessité un traitement particulier :

- une maille rivière est le lieu d'une confluence : la longueur de la rivière à laquelle est affectée la maille est conservée ; la longueur de l'autre rivière est affectée à la maille correspondant à son tronçon aval ;
- une même maille rivière est traversée par deux cours d'eau, sans confluence : la longueur de la rivière à laquelle est affectée la maille est conservée ; la longueur de l'autre rivière est affectée à la maille la plus proche ;
- une rivière traverse une zone hors modèle : la longueur correspondante est affectée aux mailles rivières les plus proches.

3.6.8. Largeur des tronçons

La largeur des cours d'eau modélisés a été établie en traçant le contour des polygones des cours d'eau étudiés à partir des photographies aériennes (BD ORTHO). Un exemple du travail effectué est présenté dans l'Illustration 37.

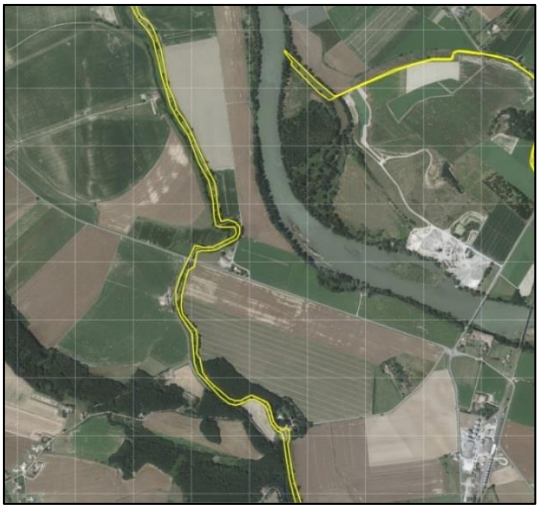


Illustration 37 – Exemple du tracé du polygone d'un cours d'eau à partir de la BDORTHO (sur fond du maillage du modèle).

Ces polygones définissent une superficie de la rivière, considérée comme représentative de son état moyen. La superficie de rivière intersectant chaque maille du modèle ensuite a été calculée à l'aide de MAPINFO.

Cinq cas ont nécessité un traitement particulier :

- les trois cas présentés au chapitre 3.6.7 qui ont été traités de la même manière, la superficie remplaçant la longueur ;
- une maille avec une superficie d'eau n'est pas une maille rivière (rivière trop large) : la superficie d'eau de ces mailles a été ajoutée à la maille rivière la plus proche ;
- une maille rivière est sans superficie d'eau (disjonction entre le tracé de la polyligne et du polygone) : la superficie de la rivière a été calculée telle que la largeur corresponde à la moyenne des tronçons voisins (amont et aval).

La largeur de chaque tronçon a ensuite été calculée en divisant la superficie d'eau dans la maille par la longueur du tronçon de rivière.

Cependant, en raison des sinuosités des cours d'eau ne recoupant pas systématiquement le maillage carré, cette division a fait apparaître de nombreuses valeurs aberrantes : la largeur varie brutalement d'un tronçon à l'autre sans que cela ne reflète une réalité physique.

Afin de corriger ce biais, les largeurs des cours d'eau ont donc été moyennées pour chaque affluent MARTHE. Ainsi, dans chaque affluent, l'ensemble des tronçons a la même largeur. Ce compromis permet de refléter l'évolution de la largeur des cours d'eau tout en maintenant une certaine réalité physique et une certaine homogénéité pour éviter une divergence des calculs numériques.

Ce choix explique la nécessité de séparer le tronçon de Garonne barré par la retenue de Malause en deux affluents (cf. chapitre 3.6.4).

3.6.9. Cotes du fond et pente du lit des rivières

Campagne de mesures d'octobre 2013

Cette campagne de terrain a permis d'évaluer la profondeur de la rivière au droit de 25 ponts enjambant les trois cours d'eau principaux, à savoir la Garonne, le Tarn et l'Aveyron (cf. Illustration 38). Cette évaluation a nécessité deux mesures sur chaque pont :

- la distance entre un repère de mesure identifié sur le pont (photographies, distance depuis la berge avec schéma) et le fond du lit du cours d'eau ;
- la distance entre le repère de mesure et le fil de l'eau.

Le nivellement des repères de mesure n'a pas été possible à l'occasion de cette campagne. La cote du fond du lit du cours d'eau et la cote du fil de l'eau ont été recalculés à partir des bornes IGN identifiées sur le terrain (sur le pont), d'un relevé sur la carte topographique au 1/25 000 ou du MNT 25 m suivant les données disponibles.

Cette campagne a également permis d'identifier, par lecture de la géomorphologie du cours d'eau, le type de relation nappe-rivière (unilatérale lorsque le cours d'eau est profondément encaissé dans les formations molassiques, bilatérale lorsque le cours d'eau coule au même niveau topographique que les alluvions récentes).

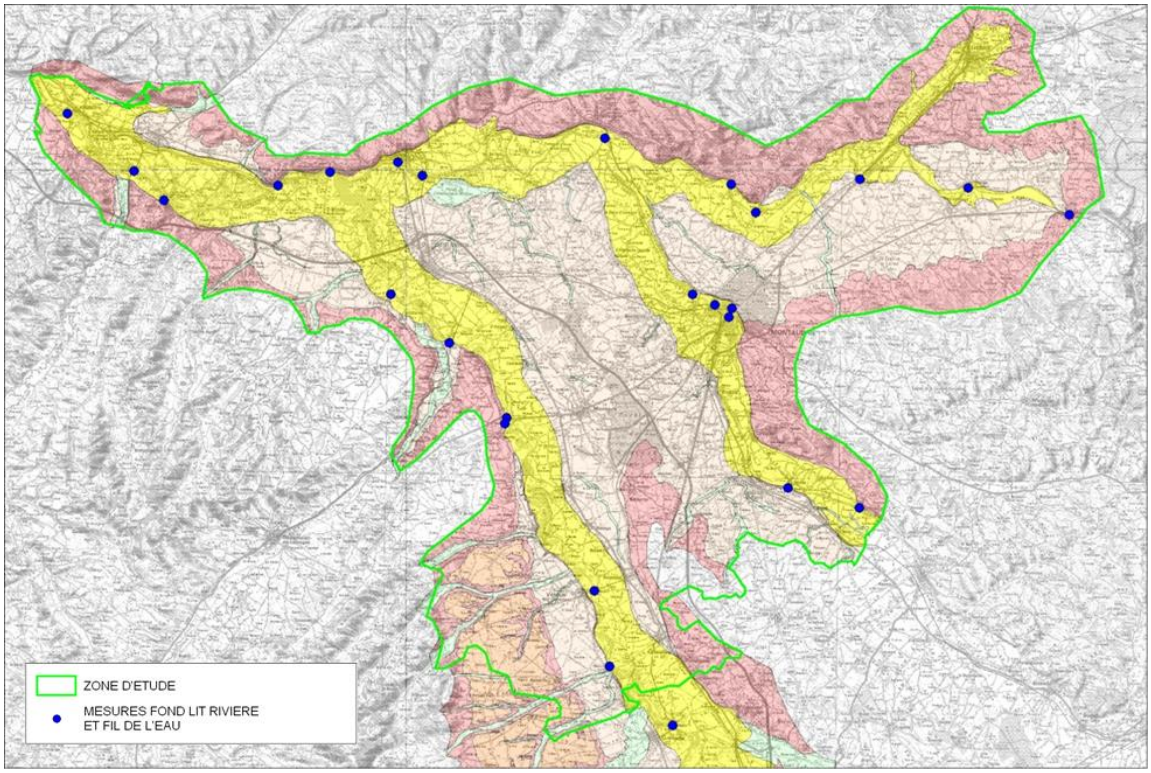


Illustration 38 – Localisation des points de mesures au droit des ponts des principaux cours d'eau.

Campagnes de mesures d'avril et septembre 2015

Ces campagnes, dont l'objectif principal était le nivellement de la cote du fil de l'eau sur l'ensemble des cours d'eau de classe 1 à 3 dans BD CARTHAGE (cf. chapitre 3.6.10), ont également permis d'évaluer la profondeur de la rivière au droit de certains ponts :

- en avril 2015, le débit des cours d'eau et le matériel disponible n'ont permis de mesurer la profondeur que sur certains cours d'eau secondaires ;
- en septembre 2015, la profondeur a pu être mesurée au droit de tous les ponts sur les cours d'eau secondaires suivis (Arrats, Gimone, Barguelonne, Lemboulas, Lère, Tescou, Lambon, Sère, Ayroux) et sur les deux ponts les plus en amont sur l'Aveyron, ainsi que les deux ponts les plus en amont sur le Tarn.

Profils bathymétriques

Des profils bathymétriques datant de 1982 à 2005 ont été collectés auprès de la DDT82 et, dans le cadre du projet de recherche REGARD, de l'IMFT (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse). Quatre cours d'eau sont concernés par ces mesures : la Garonne, le Tarn, l'Aveyron et la Lère (cf. Illustration 39).

Pour une partie des profils (le Tarn en aval de Saint-Hilaire et l'Aveyron), aucun profil en long ou géoréférencement ne localisait l'emplacement des profils. Ceux-ci ont été estimés d'après les cotes du fil de l'eau relevées en 1996 (date de réalisation des profils) et les cotes mesurées en 2015, en utilisant l'existence des différents seuils comme points de repère.

Une étude bathymétrique de la Garonne, du confluent avec la Sère au barrage de Malause a permis de compléter ponctuellement ces données.

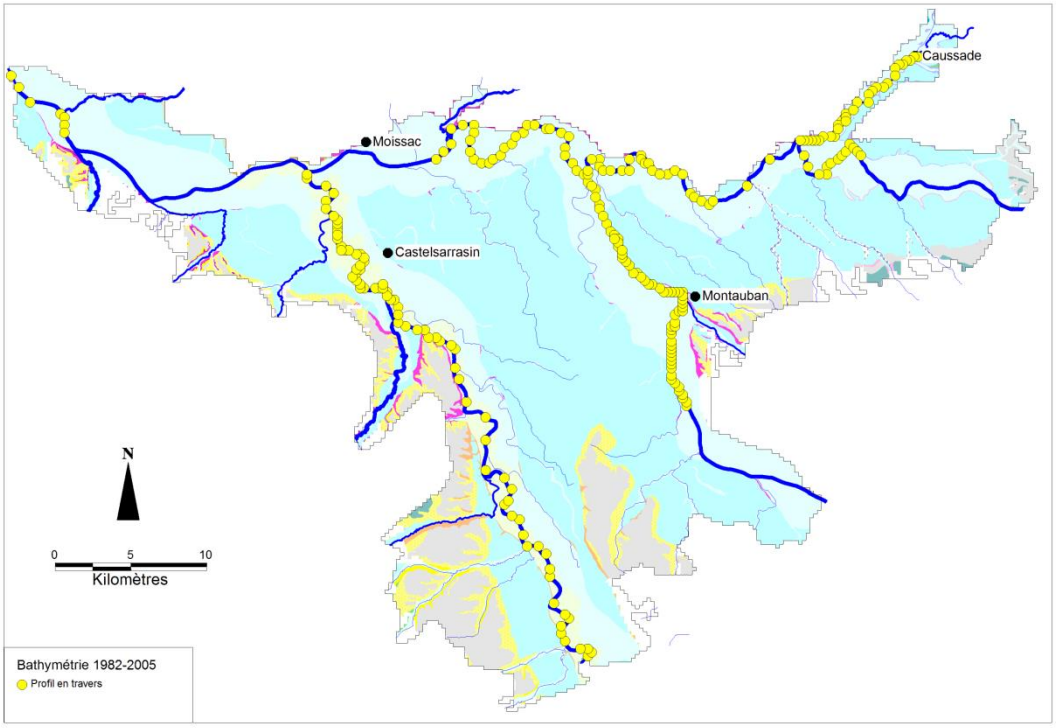


Illustration 39 – Profils bathymétriques récupérés.

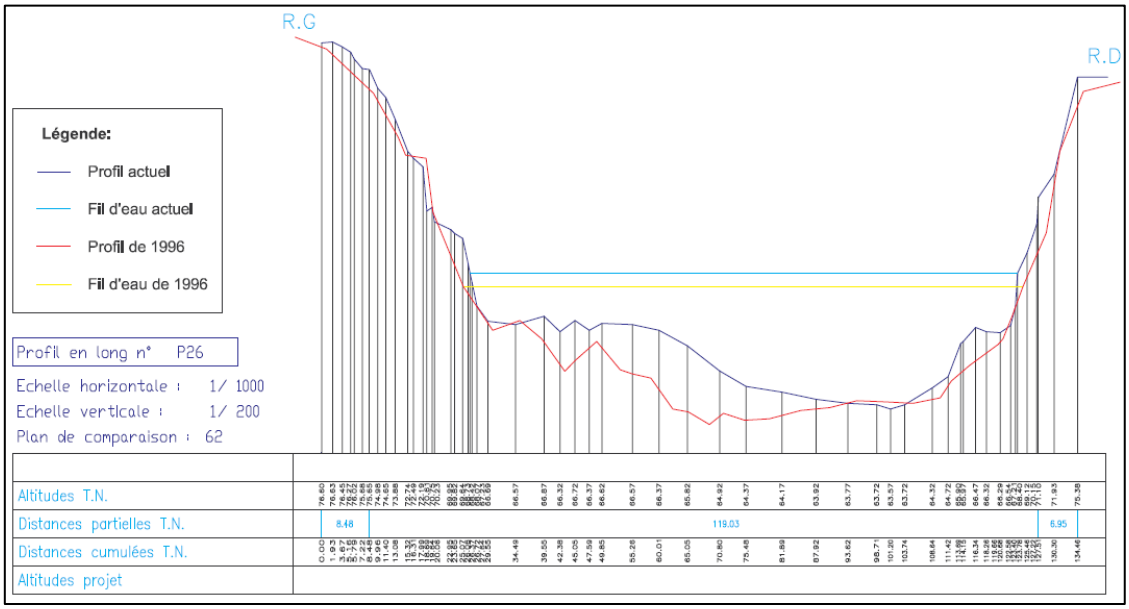


Illustration 40 – Exemple de profil en travers (Tarn, 2005).

Calcul de la cote de fond

Le logiciel MARTHE représente les cours d'eau avec une section rectangulaire (S), égale à la largeur du tronçon de rivière (L) multipliée par la hauteur d'eau (H), définie par la différence entre la cote du fil de l'eau (Zfe) et la cote de fond (Zf). C'est cette section d'eau qui est utilisée dans la relation entre la hauteur d'eau et le débit (cf. Annexe 10).

Cette représentation schématique ne restitue pas les variations de la cote de fond sur le profil en travers de la rivière : la rivière est généralement plus profonde dans une partie centrale et moins profonde à l'approche des berges (cf. Illustration 40).

Afin d'obtenir dans le logiciel MARTHE des sections de rivière les plus fidèles possibles, les données obtenues ont donc été traitées de la façon suivante :

- mesures ponctuelles de la profondeur :
  - la mesure (H) a été considérée comme prise au maximum de profondeur de la rivière,
  - le profil de la rivière a été considéré comme intermédiaire entre un rectangle (S = L.H soit Zf = Zfe - H) et un triangle (S = L.H/2, soit Zf = Zfe - H/2),
  - la cote de fond du modèle a donc été calculée avec la formule : Zf = Zfe – 0,75.H ;
- profils bathymétriques :
  - les mesures ponctuelles de la profondeur de la rivière le long du profil en travers découpent la section d'eau en autant de trapèzes qu'il y a de mesures,
  - la section mesurée (S) a donc été calculée en sommant la surface de ces trapèzes,
  - la hauteur d'eau « MARTHE » a ensuite été calculée par la formule : H = S/L, où L représente la largeur du tronçon de rivière dans MARTHE,
  - la cote de fond a été déduite par la formule : Zf = Zfe – H, la cote du fil d'eau étant celle mesurée le jour de la réalisation du profil bathymétrique.

Pour les cours d'eau n'ayant fait l'objet d'aucune mesure (classe 4 BD CARTHAGE), la cote de fond a été estimée ponctuellement avec les cartes topographiques IGN au 1/25 000 :

- par les intersections avec les courbes de niveau ;
- par la présence de points cotés.

Toutes les mesures ponctuelles de la cote de fond ont ensuite été interpolées sur l'ensemble des mailles du réseau hydrographique, de la même manière que pour la cote du fil d'eau (cf. chapitre 3.6.10).

Calcul de la pente du lit

La pente du lit des rivières a été calculée dans chaque maille suivant la formule suivante :

$$Pente = 2 . \frac{Zf1 - Zf2}{L1 + L2}$$

Avec :

Zf1 = cote du fond de la rivière dans la maille où est calculée la pente ;

Zf2 = cote du fond de la rivière dans la maille immédiatement en aval ;

L1 = longueur du tronçon de rivière dans la maille où est calculée la pente ;

L2 = longueur du tronçon de rivière dans la maille immédiatement en aval.

Pour la maille correspondant à l'unique exutoire du modèle, la pente du lit est considérée comme égale à la pente de la maille rivière immédiatement en amont.

Calage de la cote de fond et de la pente du lit

Les pentes les plus importantes (jusqu'à $3{,}7.10^{-2}$ m/m) se situent en bordure du modèle, sur les formations des terrasses les plus anciennes. Pour les cours d'eau principaux, les pentes sont plus faibles (10^{-4} à 10^{-3} m/m). Localement, des inversions de pente (cote fond aval > cote fond amont) liées à la géomorphologie du cours d'eau sont même constatées dans le lit des cours d'eau principaux.

Le logiciel MARTHE n'est pas conçu pour gérer ce type de particularité locale. Afin de remédier à cette difficulté, les pentes des cours d'eau principaux (Garonne, Tarn, Aveyron) ont donc été moyennées pour chaque affluent MARTHE, comme cela a été fait pour la largeur (cf. chapitre 3.6.8). Ainsi, dans chaque affluent, l'ensemble des tronçons a la même pente du lit.

Les cotes de fond ont ensuite été recalculées dans les tronçons de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron pour refléter cette modification.

L'étape de calage du modèle (cf. chapitre 4.1) a par la suite mis en évidence que les cotes de fond issues des profils bathymétriques, pour la plupart datant de la période 1984-1996, ne permettaient pas de restituer les cotes du fil de l'eau mesurées avec une formulation de Manning-Strickler. Les mesures de la cote du fil de l'eau réalisées en avril et septembre 2015 étant à la fois plus récentes et plus précises, la cote du fond a été considérée comme un paramètre de calage (avec un calage atteignant -3 m à +3 m).

3.6.10. Cote du fil d'eau dans les rivières

Campagnes de mesures d'octobre 2013 et mars 2014

La campagne de terrain d'octobre 2013 a permis d'évaluer la cote du fil d'eau au droit de 25 ponts enjambant les trois cours d'eau principaux, à savoir la Garonne, le Tarn et l'Aveyron (cf. chapitre 3.6.9).

À ces mesures s'ajoutent les données de hauteur d'eau issues des stations hydrométriques de la Banque HYDRO (cf. chapitre 3.6.11), soit 10 mesures supplémentaires en octobre 2013 : deux sur la Garonne, le Tarn et l'Aveyron ; une sur la Barguelonne, le Lemboulas, la Lère et le Tescou.

En mars 2014, dans le cadre des mesures du débit instantané des cours d'eau non instrumentés (cf. chapitre 3.6.17), les hauteurs d'eau ont été estimées au niveau des points de mesures du débit.

Une première interpolation linéaire des cotes du fil de l'eau a été réalisée à partir de ces mesures, en utilisant les valeurs interpolées aux confluences sur les cours d'eau principaux comme cote à l'aval des cours d'eau secondaires.

La faible précision des mesures (qui ne constituaient pas l'objectif principal de ces campagnes) ainsi que le maillage trop lâche n'ont pas permis de restituer suffisamment fidèlement la cote du fil de l'eau des rivières. La hauteur du niveau d'eau dans les rivières influençant fortement les niveaux piézométriques dans les bas niveaux de la nappe alluviale, il a été décidé d'effectuer une campagne de mesures plus complète et plus précise.

Campagnes de mesure d'avril et septembre 2015

Afin de disposer d'une carte des fils d'eau la plus proche possible de la réalité, deux campagnes de terrain ont été menées avec un appareil GNSS (Global Navigation Satellite System) utilisant les différentes constellations de satellites disponibles (GPS américain, GLONASS russe et, prochainement, GALILEO européen et COMPASS chinois). L'appareil corrige les coordonnées à la précision centimétrique (quelques centimètres en pratique), en temps réel (RTK), par correction différentielle avec des antennes régionales de référence grâce au réseau GSM 3G Orphéon. L'appareil utilisé est un LEICA GS12.

204 mesures de la cote du fil d'eau ont été effectuées (cf. Illustration 41) :

- du 9 au 15 avril 2015, en période de hautes eaux (hors crue) ;
- du 31 août au 10 septembre 2015, en période de basses eaux.

Elles se répartissent le long des 12 cours d'eau de classe 1 à 3 dans la BD CARTHAGE, soit :

- classe 1 : la Garonne, le Tarn, l'Aveyron, l'Arrats et la Gimone ;
- classe 2 : la Barguelonne et le Lemboulas ;
- classe 3 : le Tescou, la Lère, le Lambon, la Sère et l'Ayroux.

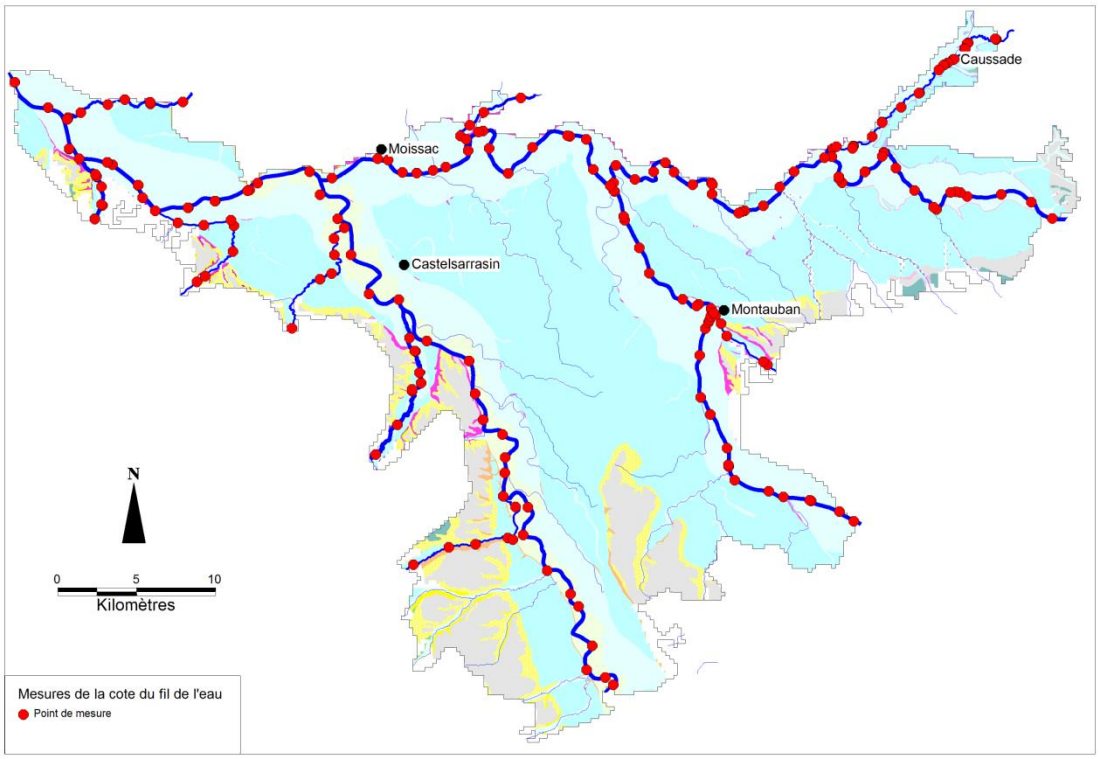


Illustration 41 – Carte de localisation des points de mesure de la cote du fil de l'eau.

La cote du fil de l'eau dans les 29 cours d'eau de classe 4 a été déterminée à partir de leurs cotes de fond (cf. chapitre 3.6.9), en fixant arbitrairement la hauteur d'eau à 10 cm en basses eaux et 20 cm en hautes eaux.

Une seconde interpolation linéaire des cotes du fil de l'eau a été réalisée à partir de ces deux jeux de mesures, en utilisant les valeurs interpolées aux confluences sur les cours d'eau principaux comme cote à l'aval des cours d'eau secondaires.

Lors de la première interpolation, c'est le nombre de mailles rivières entre deux points de mesure qui servait à évaluer la cote du fil de l'eau dans les mailles entre ces deux points. Pour cette seconde interpolation, c'est la distance entre les deux points de mesure, calculée en sommant les longueurs des tronçons de rivière, qui a été utilisée.

Ces deux jeux de données ont été utilisés pour caler le modèle, en particulier les cotes de fond, la pente du lit et le coefficient de rugosité des différents cours d'eau.

Ils ont également permis d'évaluer la variation du niveau d'eau entre les hautes eaux et les basses eaux de 2015 (cf. Illustration 42).

Cette carte met notamment en évidence le fait que le niveau des principaux cours d'eau est contrôlé par la présence de seuils (cf. chapitre 0) :

- pour l'Aveyron, sur l'ensemble de son parcours à l'exception de tronçons en amont des confluents avec la Lère et le Tarn ;
- pour le Tarn, sur l'ensemble de son parcours à l'exception d'un tronçon autour du confluent avec l'Aveyron ;
- pour la Garonne, en amont du barrage de Malause et en aval de celui-ci, jusqu'au confluent avec l'exutoire du canal de Golfech.

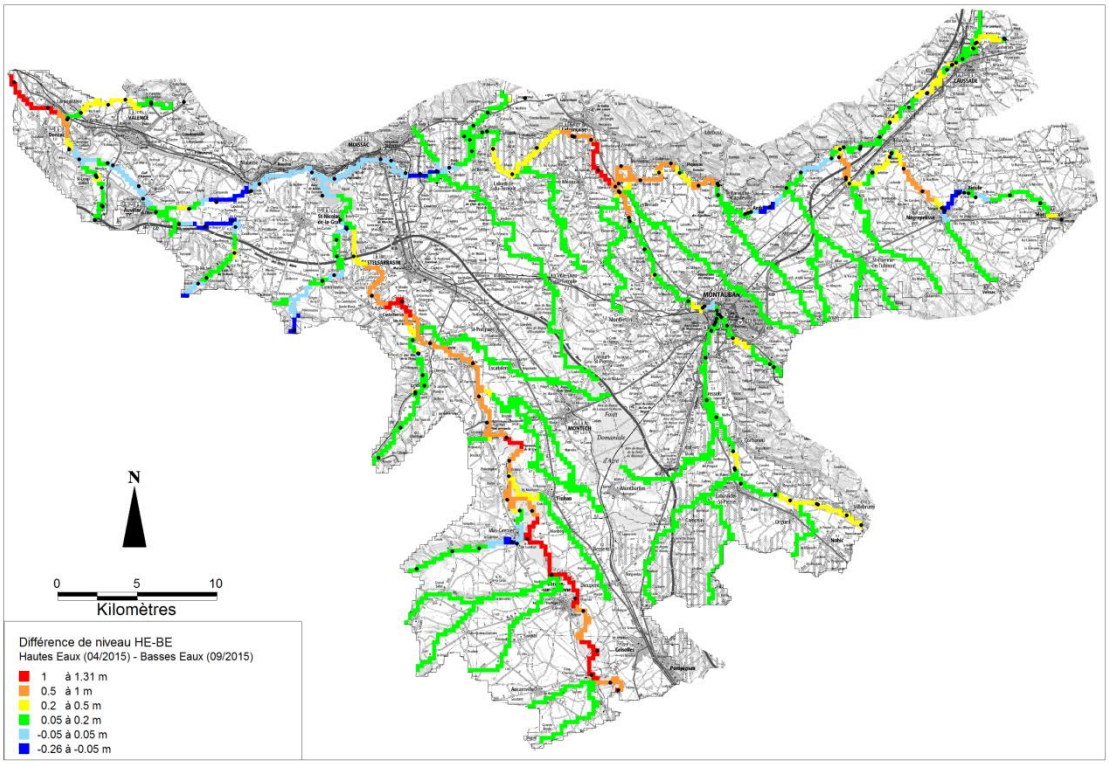


Illustration 42 – Différences de hauteur d'eau entre hautes eaux et basses eaux 2015.

3.6.11. Stations de mesure de la hauteur et du débit des cours d'eau

Quinze stations de suivi continu de la hauteur et/ou du débit des cours d'eau ont été recensées dans la banque HYDRO (cf. Illustration 43 et Tableau 12).

Aucune donnée n'est disponible pour la période de modélisation (1995-2015) pour deux d'entre elles, soit parce que la station n'est plus en service (le Tarn à Montauban), soit parce que les données appartiennent à EDF (la Garonne à Malause), qui n'a pu nous les communiquer dans le cadre de cette étude.

Les stations situées sur la Gimone et l'Arrats, deux cours d'eau appartenant au système Neste (réalimentation artificielle par le canal de la Neste), font l'objet de mesures de débit uniquement.

Les onze autres stations font l'objet de mesures de débit et de hauteur d'eau, au moins sur une partie de la période modélisée.

Les données de niveau et de débit de la Garonne à Saint-Aignan, au lieu-dit Très Cassés, ne sont pas disponibles dans la banque HYDRO, la station étant gérée par EDF. Les données pour la période 2006-2012 ont été obtenues par l'intermédiaire de l'IMFT dans la cadre du projet de recherche REGARD.

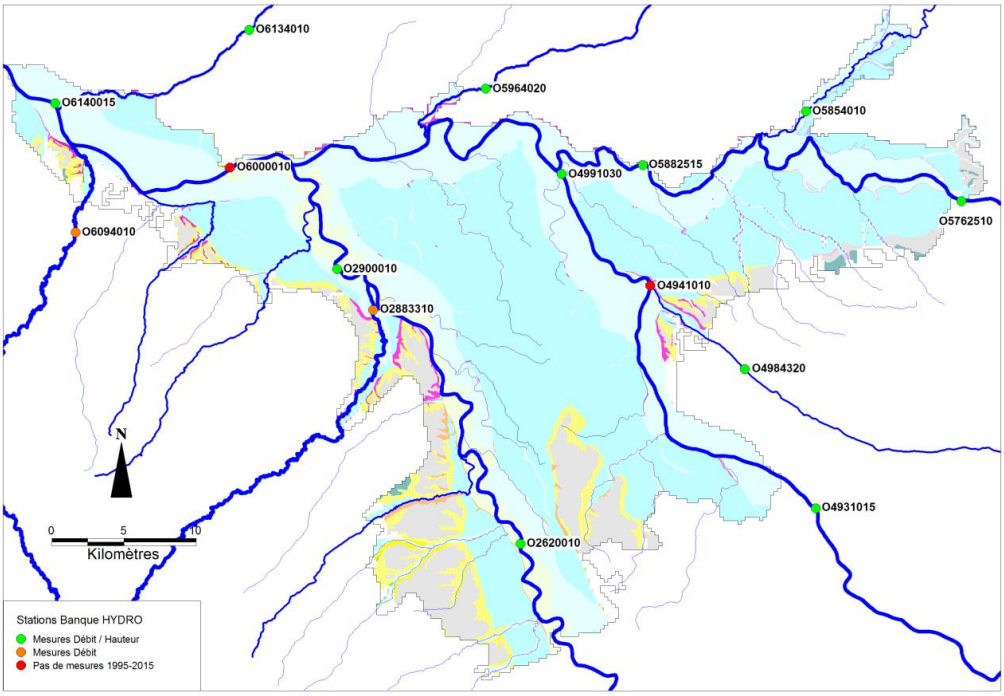


Illustration 43 – Carte de localisation des stations Banque HYDRO de la zone d'étude.

N° station	Nom station	Type données	Z "0 échelle" (m NGF)
O2620010	La Garonne à Verdun-sur-Garonne	Q + H	90.129
O2883310	La Gimone à Garganvillar [Castelferrus]	Q	72.85
O2900010	La Garonne à Saint-Aignan [Très Cassés]	Q + H	67.22
O4931015	Le Tarn à Villemur-sur-Tarn	Q + H	82.986
O4941010	Le Tarn à Montauban	-	74.26
O4984320	Le Tescou à Saint-Nauphary	Q + H	83.65
O4991030	Le Tarn à Villemade	Q + H	66.825
O5762510	L'Aveyron à Bruniquel [Montricoux]	Q + H	88.345
O5854010	La Lère à Réalville	Q + H	89.502
O5882515	L'Aveyron à Montauban [Loubéjac]	Q + H	72.858
O5964020	Le Lemboulas à Lafrançaise [Lunel]	Q + H	73.054
O6000010	La Garonne à Malause	-	-
O6094010	L'Arrats à Saint-Antoine	Q	-
O6134010	La Barguelonne à Valence [Fourquet]	Q + H	64.362
O6140015	La Garonne à Lamagistère	Q + H	46.736

Tableau 12 – Caractéristiques des stations Banque HYDRO de la zone d'étude.

3.6.12. Rugosité du lit de la rivière

La formule de Manning-Strickler permet de relier, à vitesse d'écoulement constante, la hauteur d'eau au débit dans la rivière (cf. Annexe 10) :

$$Q_{AV} = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{Pente}$$

Où :

A = Section du tronçon = Largeur . H_{RL}

R = Rayon hydraulique = (Largeur . H_{RL}) / (Largeur + 2 H_{RL})

n = Coefficient de Manning-Strickler (traduisant la « rugosité »)

Pente = Pente du lit du cours d'eau

H_{RL} = Hauteur de l'eau au-dessus du lit (tirant d'eau)

Le coefficient de Manning-Strickler traduit la rugosité du fond et des berges de la rivière. Il est variable dans le temps (suivant l'évolution du tirant d'eau) et dans l'espace (suivant la morphologie du cours d'eau). Dans le cadre de cette étude, il a été considéré comme constant dans le temps ; seule sa variabilité spatiale a été prise en compte.

La bibliographie mentionne un coefficient de rugosité compris entre 0,02 et 0,1, voire plus, pour une rivière, suivant sa morphologie et celle de ses berges (cf. Tableau 13).

Source données	Cours d'eau / Nature des parois	Coeff. de Manning n = 1/Ks en s.m^(-1/3)	
		Borne inf.	Borne sup.
Fichier d'aide du logiciel MARTHE MartheHelp.chm	Canal en ciment propre, ou en métal	0.01	
	Canal en maçonnerie	0.017	
	Cours d'eau propre, rectiligne, bien rempli	0.03	
	Cours d'eau à bas niveau avec des herbes et pierres	0.05	0.06
Hydraulique, Dynamique et Morphologie Fluviales, Chapitre 1 - Hydraulique à surface libre, G. Degoutte (2012)	Canal en béton lisse	0.011	0.013
	Canal en terre, non enherbé	0.017	
	Canal en terre, enherbé	0.02	
	Rivière de plaine, sans végétation arbustive	0.025	0.029
	Rivière de plaine, large, végétation peu dense	0.033	
	Rivière à berges étroites très végétalisées	0.067	0.1
	Lit majeur en prairie	0.033	0.05
	Lit majeur en vigne ou taillis	0.067	0.1
	Lit majeur urbanisé	0.067	0.1
	Lit majeur en forêt	> 0.1	
Extrait de "Hydraulique pour le génie rural", J.-P. Baume, G. Belaud, P.-Y. Vion (2006)	Canal bétonné, très lisse	0.01	0.013
	Canal bétonné, état moyen	0.013	0.02
	Canal en terre	0.02	0.033
	Rivière régulière, bien entretenue	0.02	0.025
	Rivière ordinaire	0.025	0.033
	Rivière avec embâcles	0.033	0.05
Ch. Ancey, Cours hydraulique à surface libre, EPFL	Canal en béton lisse	0.013	0.015
	Canal en terre	0.017	0.025
	Rivière à galet, rectiligne, section uniforme	0.025	0.033
	Rivière avec méandre, sinuosité…	0.033	0.05
	Rivière végétalisée ou torrent	0.1	

Tableau 13 – Coefficients de rugosité usuels.

En utilisant l'équation présentée ci-dessus, le coefficient de rugosité et la cote de fond ont été calés pour les 11 stations équipées pour un suivi du débit et de la hauteur d'eau. La largeur utilisée est celle calculée pour la maille rivière où se trouve la station (cf. chapitre 3.6.8).

Il a été nécessaire d'ajouter la modification de la cote de fond (de -0,5 à +2,5 m d'écart) au processus de calage, sans quoi il s'avérait impossible de reproduire les fluctuations du débit mesuré.

Le calage des deux paramètres s'est fait suivant un processus itératif, en minimisant la somme des carrés des différences entre débits mesurés et débits calculés à partir des hauteurs mesurées et de la formule de Manning-Strickler.

Un exemple de calage est présenté dans l'Illustration 44, Q_SH correspondant au débit mesuré et Q_MS au débit calculé à partir des hauteurs mesurées.

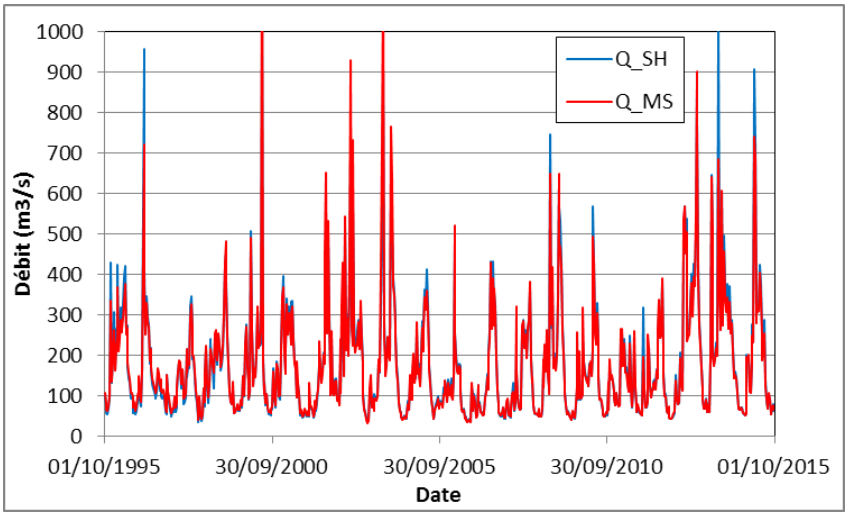


Illustration 44 – Calage de la rugosité et de la cote de fond pour la station de la Garonne à Verdun.

Pour les cours d'eau secondaires ayant fait l'objet de mesures de la cote du fil d'eau, l'estimation du coefficient de rugosité a été faite en utilisant :

- les mesures ponctuelles de la hauteur d'eau réalisées en avril et septembre 2015 ;
- la mesure ou la modélisation du débit (suivant l'existence d'une station ou non) à la même époque.

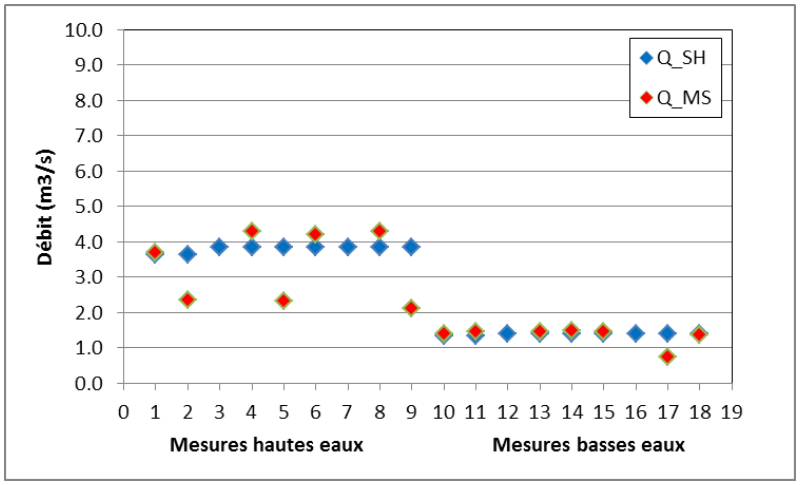


Illustration 45 – Estimation de la rugosité pour la Gimone.

Pour les cours d'eau de classe 4, le coefficient de rugosité a été initialement fixé à 0,1 et calé ultérieurement à 0,06 sur les cours d'eau prenant naissance dans le sud de la plaine alluviale entre le Tarn et la Garonne en raison de problèmes de convergence numérique (cf. chapitre 4.2.4).

Le Tableau 14 et l'Illustration 46 récapitulent les valeurs des coefficients de rugosité retenus.

Cours d'eau	Station Banque HYDRO	Coefficient de rugosité en s.m^(-1/3)
Garonne (amont barrage Malause)	Verdun-sur-Garonne	0.026
	Saint-Aignan [Très Cassés]	0.026
Garonne (aval barrage Malause)	Lamagistère	0.020
Tarn (amont seuil de Lagarde)	Villemur-sur-Tarn	0.018
Tarn (aval seuil de Lagarde)	Villemade	0.026
Aveyron	Bruniquel [Montricoux]	0.028
	Montauban [Loubéjac]	0.028
Barguelonne	Valence [Fourquet]	0.065
Lemboulas	Lafrançaise [Lunel]	0.087
Lère	Réalville	0.060
Tescou	Saint-Nauphary	0.032
Arrats	-	0.038
Gimone	-	0.03
Lambon	-	0.06
Sère	-	0.03
Ayroux	-	0.03
Fronton-Rival, Fabas-Margasse, Rieu Tort, Vergnet, Tauris, Sandrune-Pantagnac, Garouille-Verdié	-	0.06
Autres classes 4	-	0.1

Tableau 14 – Coefficients de rugosité retenus.

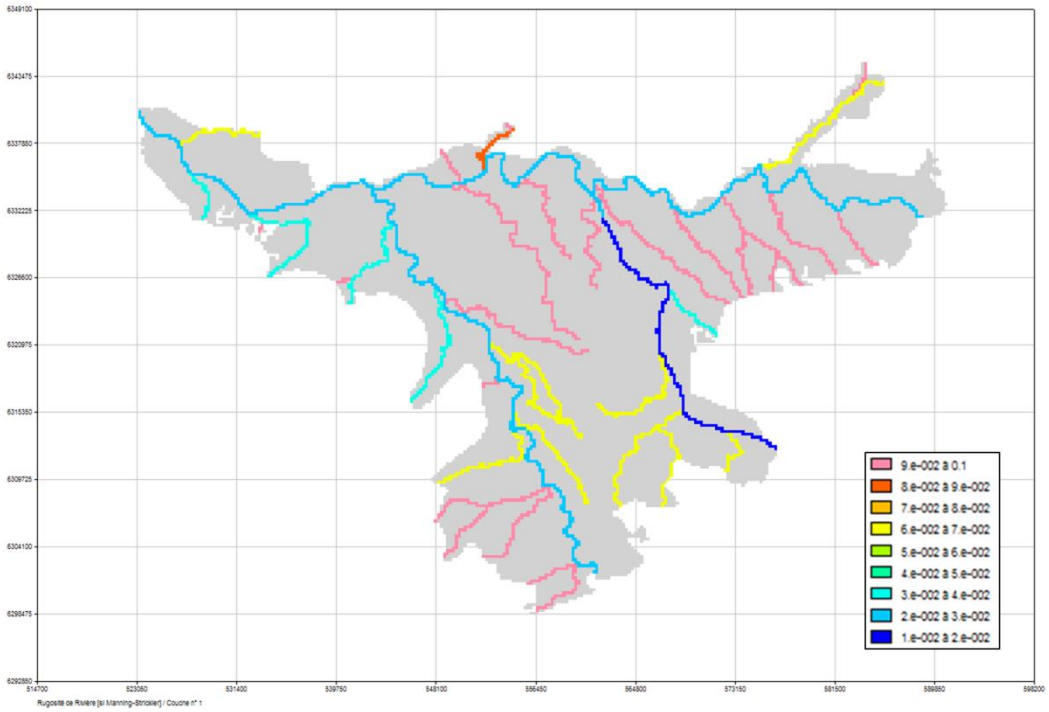


Illustration 46 – Carte des coefficients de rugosité retenus.

3.6.13. Hauteurs et facteurs débit des seuils

L'écoulement des rivières est parfois conditionné par la présence de seuils ou barrages. Ceux-ci influencent le niveau d'eau des cours d'eau en amont du seuil, jusqu'à l'endroit où la cote de fond de la rivière dépasse la cote du seuil.

Dans la zone d'étude, on recense les cas suivants :

- sur la Garonne :
  - le barrage de Malause impose un niveau d'eau strict (64,5 m NGF) sur la Garonne et le Tarn, bien au-delà du plan d'eau de Saint-Nicolas-de-la-Grave marquant la confluence ;
  - le barrage permet de détourner une grande fraction du débit de la Garonne dans le canal de Golfech, qui alimente la station hydroélectrique et la centrale nucléaire du même nom ;
  - dans le tronçon de Garonne parallèle au canal de Golfech, le débit, hors période de crue, est compris entre 10 et 20 m^3/s. Le niveau y est conditionné par 6 seuils aménagés de manière à ce que :
    - au pied de chaque seuil, le niveau corresponde au niveau d'étiage de la Garonne avant la construction du barrage de Malause,
    - à la crête de chaque seuil, le niveau corresponde au niveau de la Garonne avant la construction du barrage de Malause, pour un débit moyen (450 m^3/s).

    La Garonne servant d'exutoire à la nappe alluviale, cet aménagement permet de maintenir le niveau de celle-ci à un niveau compris entre l'étiage et un niveau moyen ;
- sur le Tarn et l'Aveyron :
  - treize microcentrales hydroélectriques réparties sur les deux cours d'eau (7 sur le Tarn, 6 sur l'Aveyron) imposent le niveau sur des tronçons de longueur variable en amont des seuils proprement dits ;
  - contrairement au barrage de Malause, le niveau en amont des seuils n'est pas strictement imposé dans le temps, bien que ses variations soient plus limitées que dans les zones d'écoulement libre (cf. Illustration 42) ;
- sur les cours d'eau secondaires :
  - douze seuils, correspondants le plus souvent à d'anciens moulins, ont été recensés sur l'Arrats (3), la Barguelonne (2), la Gimone (2), le Lambon (1) et la Lère (4) ;
  - Leur impact sur l'écoulement des cours d'eau est plus limité dans l'espace, du fait de la plus forte pente du lit de ces rivières ;
- sur le Grand Mortarieu et le Tordre :

  un barrage a été construit sur chacun de ces cours d'eau, en bordure du modèle. Ces barrages fournissent des réserves d'eau pour les terrains situés en amont, dans les formations molassiques, où les réserves en eaux souterraines ne sont pas aisément mobilisables.

Si on introduit un seuil ou un barrage, la relation hauteur-débit dans le cours d'eau en amont du seuil/barrage n'est plus conditionnée par une loi de Manning-Strickler, mais par une loi de seuil de la forme suivante (cf. Annexe 10) :

$$Q_{AV} = \mathrm{Larg} \cdot \mathrm{FactQ} \cdot \sqrt{2g} \cdot (H_{Riv} - H_{Seuil})^{Expos}$$

Avec :

FactQ = Facteur (sans unité).

g = Accélération de la pesanteur = 9,81 $m.s^{-2}$ (à Paris).

Larg = Largeur du tronçon (m).

H_{Riv} = Hauteur d'eau au-dessus du fond dans le tronçon considéré (m).

H_{Seuil} = Hauteur au-dessus du fond, du seuil situé à l'aval du tronçon considéré (m).

Expos = Exposant : très généralement égal à 1,5 (sans dimension).

Avec g = 9,81 $m.s^{-2}$, Expos =1,5 et la largeur de rivière définie au chapitre 3.6.8, on peut caler la hauteur et le facteur débit des différents seuils en utilisant les mesures de niveau effectuées en avril et septembre 2015 (cf. chapitre 3.6.10) et les débits simulés par une modélisation réalisée avant l'introduction du module seuil en rivière sous MARTHE.

Dans certains cas, « l'influence » d'un seuil diminue en s'éloignant de celui-ci, bien que la cote de fond reste inférieure à la cote du seuil et qu'une relation de Manning-Strickler satisfaisante ne puisse être définie. Dans ce cas, le facteur débit a été diminué progressivement en s'éloignant du seuil.

Le Tableau 15 synthétise les données calées au droit des différents seuils. L'Illustration 47 et l'Illustration 48 synthétisent l'emprise géographique des seuils.

Référence du Seuil	Nom rivière	Cote fond (m NGF)	Hseuil	FactQ
Moulin de la Garde	Arrats	59.731	1.416	0.609
Moulin de Lassaigne	Arrats	56.563	1.679	0.309
Moulin de Jouet	Arrats	52.072	3.593	2.917
Moulin de Cornillas	Barguelonne	61.955	3.018	0.547
Moulin de Castels	Barguelonne	58.719	3.718	0.406
Moulin de Sapiac	Gimone	81.150	1.241	0.570
Moulin de la Théoule	Gimone	74.324	3.023	1.419
Barrage de la Piboulette	Grand Mortarieu	127.068	10.932	1000
Seuil de Contard	Lambon	93.311	0.690	0.447
Lavoir de Gasherbes	Lère	118.079	1.876	1.764
Seuil de la Jonquière	Lère	102.990	1.865	0.407
Moulin de Camp d'Alba	Lère	83.480	2.281	0.644
Moulin de Sadoul	Lère	79.614	2.878	0.320
Barrage du Tordre	Tordre	121.265	6.735	1000
Moulin de Bioule	Aveyron	83.521	4.927	10.121
Moulin de Nègrepelisse	Aveyron	81.900	4.148	100
Moulin d'Albias	Aveyron	77.763	3.014	1.780
Moulin d'Ardus/Escudié	Aveyron	73.789	4.015	100
Moulin de Loubéjac	Aveyron	72.849	2.789	4.443
Radier de Piquecos	Aveyron	71.988	0.701	2.711
Chute de Lamothe-Saliens	Tarn	79.540	3.054	1.083
Usine de Corbarieu/Claux	Tarn	75.774	4.085	3.606
Usine de Sapiac/Sapiacou	Tarn	72.685	4.367	4.176
Usine des Albarèdes / Moulin de Palisse	Tarn	71.952	2.745	10.252
Usine de Lagarde	Tarn	68.410	3.592	4.593
Rivière Basse	Tarn	65.585	1.036	0.345
Usine de Sainte-Livrade	Tarn	61.781	4.990	2.411
Barrage de Malause	Garonne	55.947	8.553	3000
Golfech Seuil 1	Garonne	54.926	1.035	0.400
Golfech Seuil 2	Garonne	53.399	1.494	0.400
Golfech Seuil 3	Garonne	51.593	1.846	0.400
Golfech Seuil 4	Garonne	50.462	1.149	0.400
Golfech Seuil 5	Garonne	47.682	2.764	0.400
Golfech Seuil 6	Garonne	46.701	0.445	0.361

Tableau 15 – Synthèse des données des différents seuils.

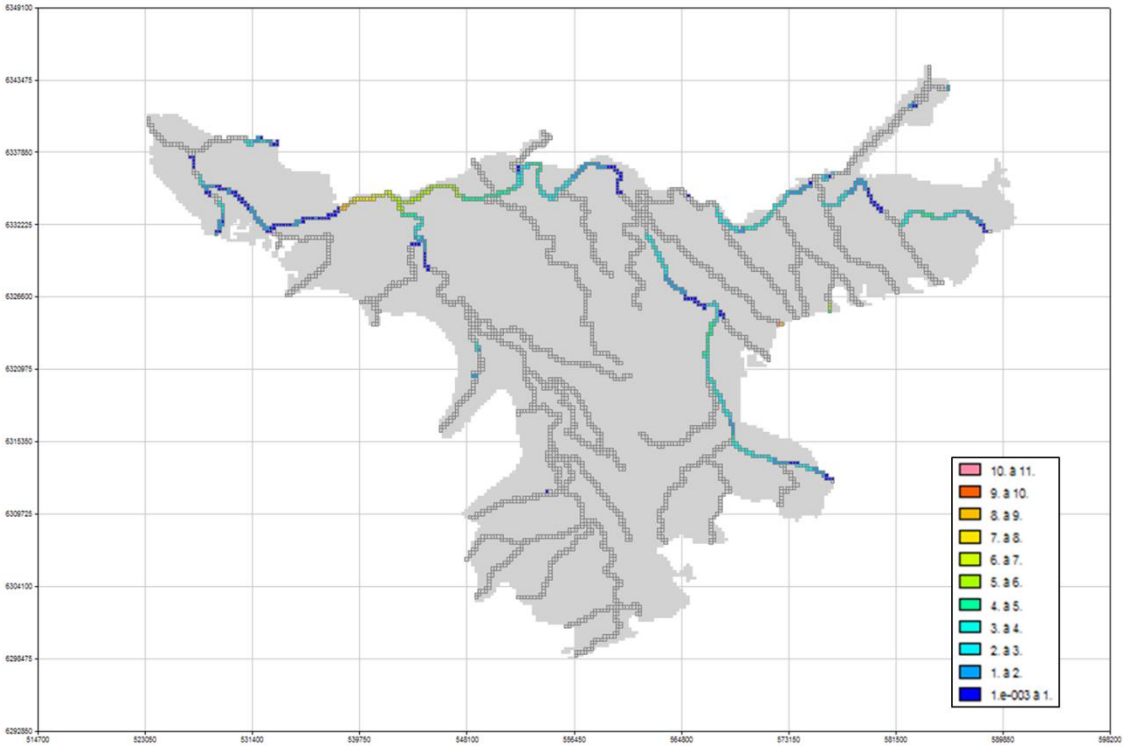


Illustration 47 – Carte des hauteurs de seuil retenu.

Les hauteurs de seuils sont des valeurs relatives (en m) : elles correspondent à la distance entre le fond de la rivière et le sommet du seuil. C'est pourquoi ces hauteurs diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne d'un seuil et que la cote de fond remonte.

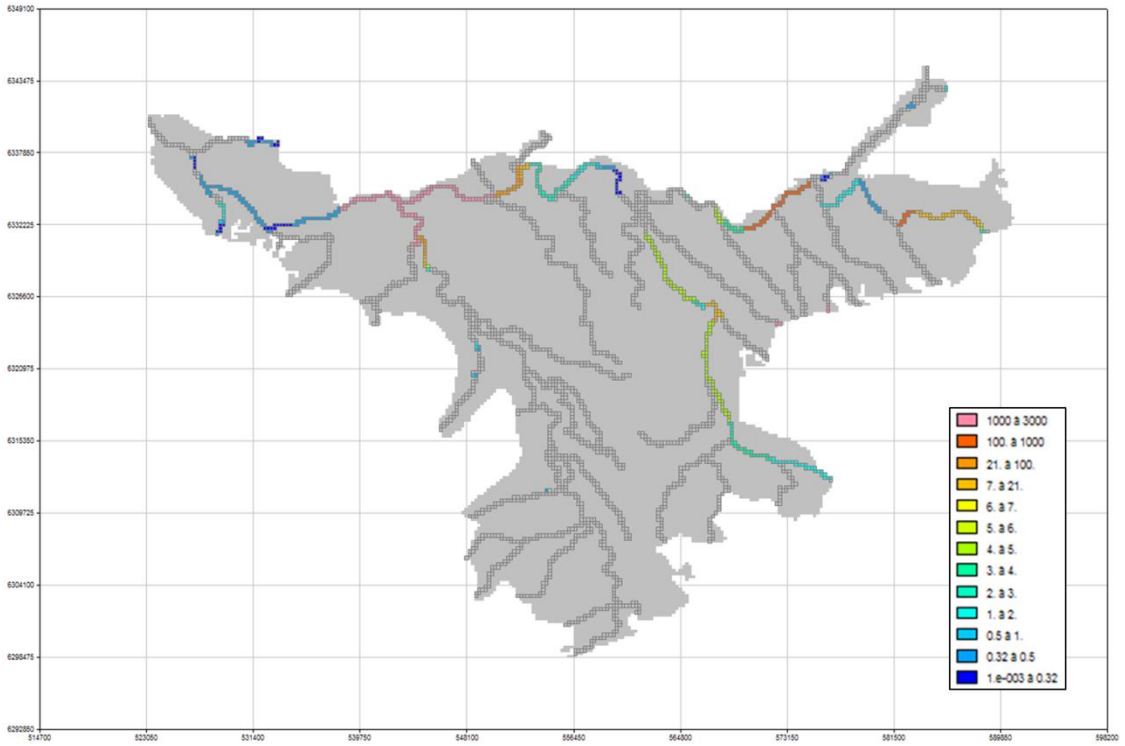


Illustration 48 – Carte des facteurs débit des seuils retenus.

3.6.14. Épaisseur et perméabilité du colmatage du lit et des berges

L'épaisseur du colmatage des berges a été imposée arbitrairement en fonction de la catégorie du cours d'eau, liée à sa longueur (classe BD Carthage), sa largeur et son débit. Elle a été fixée à :

- 50 cm pour la Garonne, le Tarn et l'Aveyron ;
- 40 cm pour les autres cours d'eau de classe 1 (l'Arrats et la Gimone) ;
- 30 cm pour les cours d'eau de classe 2 (la Barguelonne et le Lemboulas) ;
- 20 cm pour les cours d'eau de classe 3 (le Tescou, la Lère, le Lambon, la Sère et l'Ayroux) ;
- 10 cm pour les 29 cours d'eau de classe 4.

La perméabilité du colmatage a été fixée arbitrairement à 10^{-5} m/s, soit une perméabilité inférieure à la perméabilité des alluvions récentes et des basses plaines, de l'ordre de la perméabilité des hautes et moyennes terrasses. On considère donc que ces dépôts liés au transport solide dans les cours d'eau sont essentiellement composés de particules fines, formant une couche relativement peu perméable.

Ces paramètres sont des paramètres de calage. Leur ajustement ultérieur (cf. chapitre 4.1) permettra de restituer l'amplitude des fluctuations observées sur les piézomètres situés en bordure de cours d'eau.

3.6.15. Débits des rivières à l'entrée du modèle

La prise en compte d'un réseau hydrographique au sein du modèle hydrodynamique nécessite d'injecter le débit d'écoulement des cours d'eau allochtones au niveau des premières mailles rivières entrant dans le modèle (appelées **« mailles sources »** ou **« mailles amont »**). Pour chacune de ces 33 mailles, une chronique de débit du cours d'eau au pas de temps du modèle (ici, décadaire) doit être introduite comme donnée d'entrée (cf. Illustration 49).

Les 8 cours d'eau autochtones, dont le débit est déterminé par le débordement de la nappe alluviale, ne requièrent pas ce type de chronique.

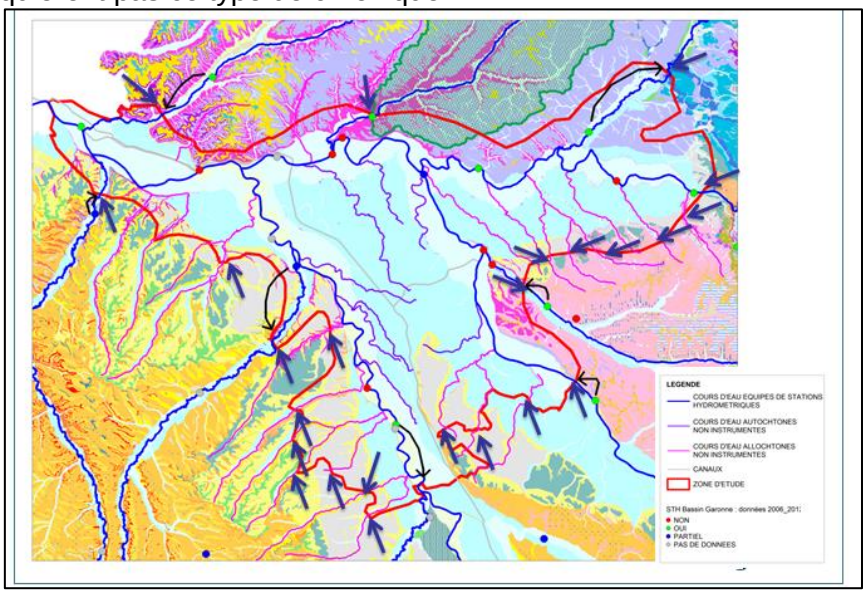


Illustration 49 – Localisation des « mailles sources » du modèle (flèches bleues).

En fonction des cours d'eau et de leur degré d'instrumentation, le traitement à adopter va différer :

- pour les cours d'eau instrumentés :
  - la chronique de débit journalier la plus proche de la maille source a été extraite de la banque HYDRO pour la période de modélisation (1995-2015),
  - la chronique a été moyennée pour obtenir une chronique au pas de temps décadaire,
  - dans le cas où la station ne se situe pas exactement sur la maille source (hors Aveyron et Lemboulas donc), le bassin versant (BV) ayant comme exutoire la maille source du modèle a été tracé avec un logiciel SIG (ArcGIS). La surface du BV à la station hydrométrique a été obtenue via la banque HYDRO. Les chroniques de débits à la « maille source » ont été recalculées en appliquant un coefficient de correction égal au ratio entre la surface du BV de la station hydrométrique et la surface du BV à la maille source (cf. Tableau 16),
  - dans le cas de l'Aveyron, il existe une lacune dans la chronique de Bruniquel de juin 2004 à mars 2012. C'est alors la chronique de Loubéjac qui a été utilisée,
  - dans le cas de la Garonne, il existe une lacune dans la chronique de Verdun du 17 février au 27 mars 1990. C'est alors la chronique du Tarn à Villemur multipliée par un coefficient de 1,5 qui a été utilisée ;
- pour les cours d'eau allochtones non instrumentés, une modélisation GARDENIA a été réalisée afin de simuler leurs débits décadaires au niveau des mailles sources (cf. chapitre 0).

Station banque HYDRO	Ratio BV station/entrée modèle
La Garonne à Verdun-sur-Garonne	0.984
Le Tarn à Villemur-sur-Tarn	1.005
L'Aveyron à Bruniquel [Montricoux]	1
L'Aveyron à Montauban [Loubéjac]	0.841
La Lère à Réalville	0.553
Le Tescou à Saint-Nauphary	1.044
Le Lemboulas à Lafrançaise [Lunel]	1.000
La Gimone à Garganvillar [Castelferrus]	0.945
L'Arrats à Saint-Antoine	1.018
La Barguelonne à Valence [Fourquet]	1.104

Tableau 16 – Ratios des BV station hydrométrique / maille source.

3.6.16. Modélisation des débits des cours d'eau non instrumentés

Présentation du modèle GARDENIA

Une succincte présentation générale a été effectuée au chapitre 3.5.5. Le fonctionnement du logiciel est décrit en Annexe 9.

La modélisation des relations pluie-débit ou pluie-niveau fait intervenir une dizaine de paramètres globaux (réserve utile, temps de tarissement, etc.) définis pour un bassin versant ou une entité homogène au sein d'un bassin versant. Ces paramètres doivent être ajustés sur une période d'observation commune des pluies et des débits (ou des niveaux). Cette phase de calage du modèle est réalisée automatiquement par le logiciel sous contrôle de l'utilisateur.

À l'issue du calage, GARDENIA permet :

- d'établir un bilan hydrologique sur le bassin : évapotranspiration réelle, pluie efficace, ruissellement, recharge de la nappe ; ce bilan contribue à l'évaluation de la recharge naturelle des aquifères ;
- de réaliser une extension des chroniques de débits, de niveaux piézométriques ou de recharges pendant une longue période durant laquelle les précipitations et l'évapotranspiration potentielle sont connues.

Ces longues séries de débits ou de niveaux peuvent ensuite être utilisées pour :

- effectuer des prévisions de niveaux ou de débits pour le dimensionnement d'ouvrages ;
- étudier des phénomènes particuliers, tels que remontées de nappe, occurrence d'inondations ou de sécheresses.

Choix des bassins versants de référence à modéliser

Afin de pouvoir simuler les débits des cours d'eau non instrumentés, il est nécessaire de réaliser au préalable une modélisation de cours d'eau instrumentés et développés sur des bassins aux propriétés géologiques homogènes. Cette modélisation nécessite également de disposer de chroniques de pluies et d'ETP représentatives des mécanismes de ruissellement de ce bassin. Une fois le calage entre les données calculées et observées réalisé sur ces bassins de référence, ces mêmes paramètres de calage pourront être repris pour modéliser les débits des cours d'eau non instrumentés, à partir des données de pluies et d'ETP des bassins simulés.

Les bassins versants de référence ont été choisis en fonction de leur lithologie, avec l'objectif de travailler sur des bassins versants aussi homogènes que possible, la lithologie étant supposée un facteur décisif pour la recharge.

Cinq bassins versants ont été sélectionnés : la Gimone, l'Arrats, le Lemboulas, le Tescou et l'Aussonnelle (cf. Illustration 50). Tous ces bassins versants ont des propriétés géologiques homogènes (cf. Tableau 17).

Le détail des travaux de simulation des débits d'entrée des cours d'eau non instrumentés est présenté en Annexe 11.

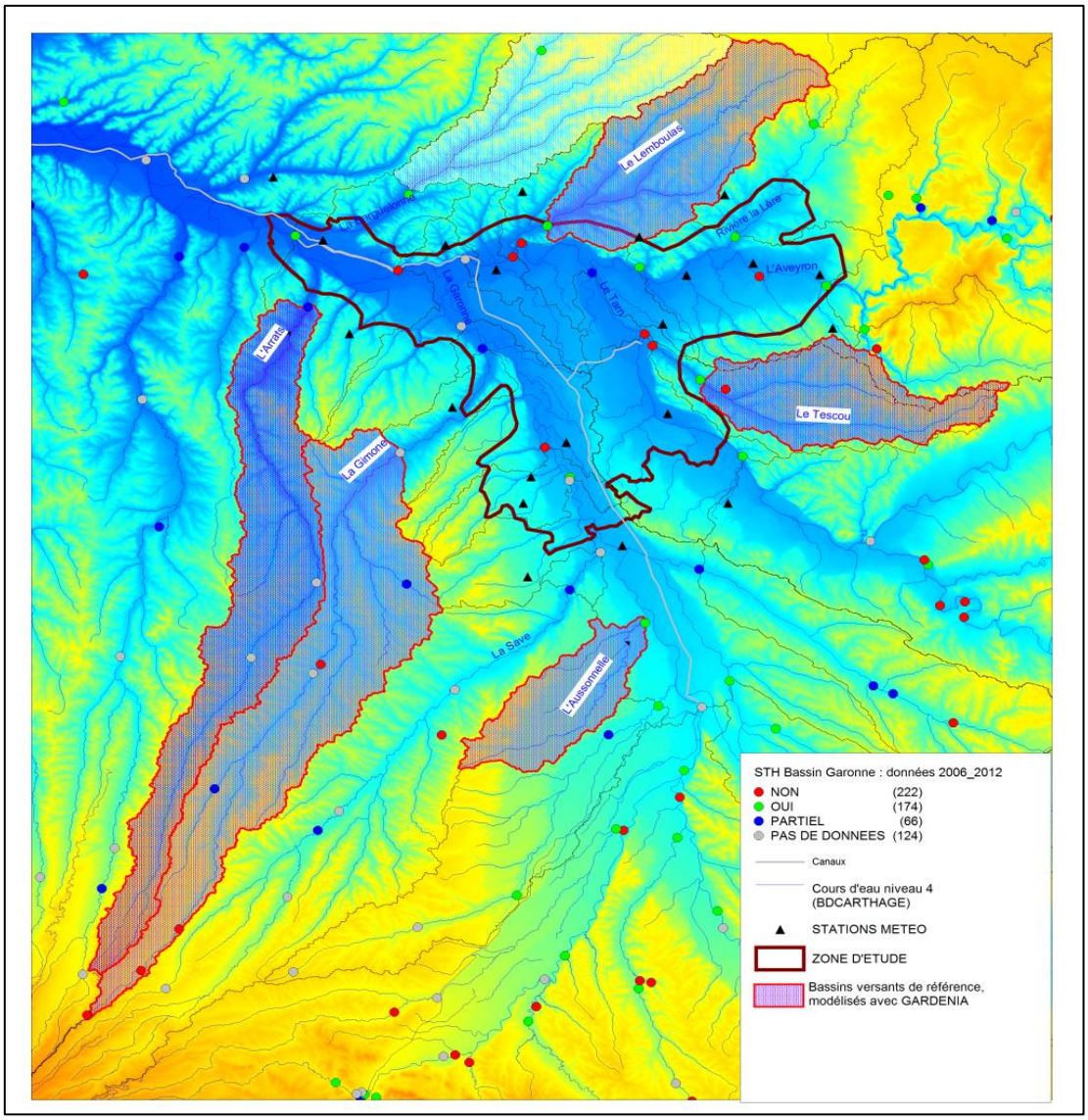


Illustration 50 – Carte de localisation des bassins de référence.

Bassin versant	Géologie
Aussonnelle	Alluvions
Arrats	Formations molassiques tertiaires
Gimone	Formations molassiques tertiaires
Lemboulas	Formations molassiques tertiaires
Tescou	Formations molassiques tertiaires

Tableau 17 – Géologie de surface des bassins.

3.6.17. Évaluation du débit instantané des petits cours d'eau non instrumentés

Afin d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydraulique de la nappe et d'optimiser les phases de calage du modèle, une campagne de mesure des cours d'eau non instrumentés a été organisé en mars 2014.

Cette campagne concerne les affluents de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron. L'objectif de cette campagne était de pouvoir disposer d'un ordre de grandeur du débit instantané de ces cours d'eau, afin de valider les simulations de débits réalisés sur ces cours d'eau avec le logiciel GARDENIA.

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 mené à effectuer des jaugeages selon la méthode dite du flotteur qui consiste à mesurer les vitesses dans la tranche superficielle des écoulements sur les 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. En plus de la détermination du débit, la hauteur d'eau et la largeur des cours d'eau ont été mesurées.

L'Illustration 51 et le Tableau 18 synthétisent les résultats de cette campagne de mesures.

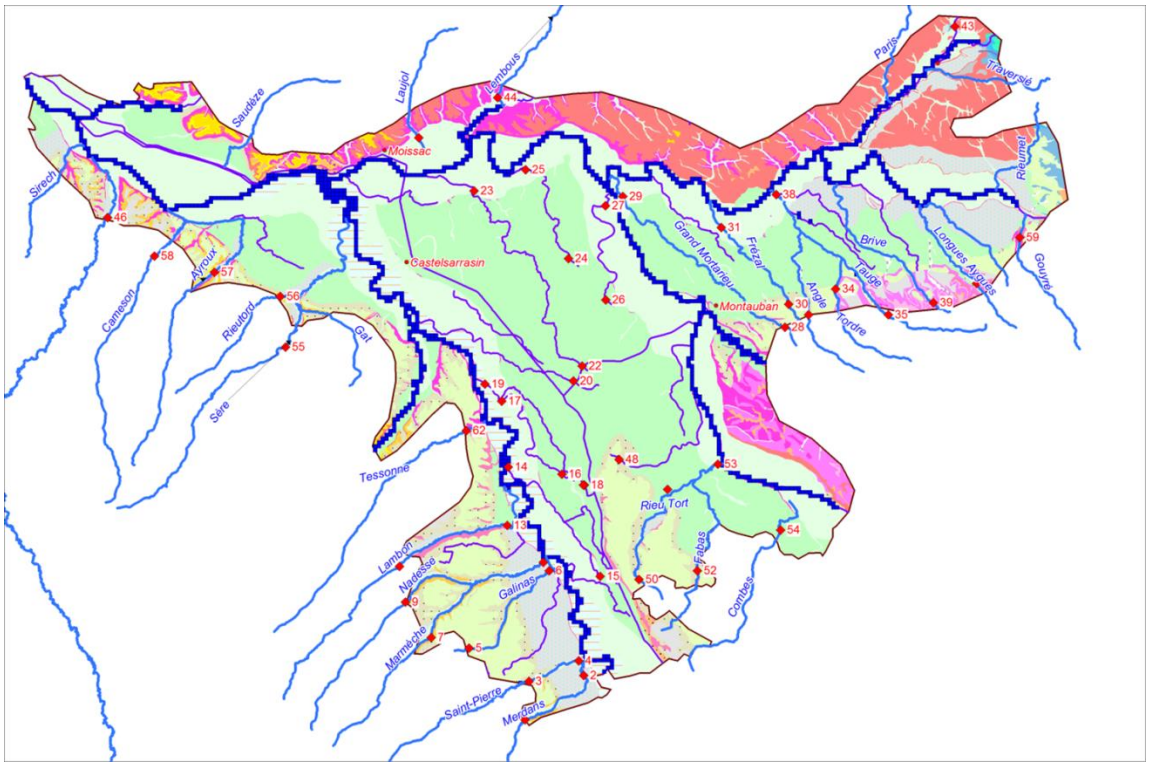


Illustration 51 – Localisation des 53 points de mesures de débit ponctuel (mi-mars 2014).

N° point	N° affluent	Nom du cours d'eau	Hauteur (m)	Largeur (m)	Altitude (m NGF)	Distance (m)	Temps (s)	Vitesse (m/s)	Débit (m3/s)
59	0	Gouyre	0.23	1.7	122	0.75	5	0.150	0.059
43	1	Candé	1.4	5.15	120	4.2	8	0.525	3.785
41	5	Longues Aygues	0.08	1.1	139	2.9	4.1	0.707	0.062
39	7	Brive Amont	0.11	0.6	154	0.9	6	0.150	0.010
35	10	Tauge Amont	0.8	2	132	0.62	3.8	0.163	0.261
34	11	Tordre Amont	0.08	1.25	123	1.1	7.9	0.139	0.014
32	13	Angle Amont	0.3	2.1	128	0.7	7	0.100	0.063
38	14	Tauge Aval	0.3	5.3	79.93 (borne IGN)	2.7	6.1	0.443	0.704
30	16	Frézal Amont	0.1	0.9	130	1.05	7.6	0.138	0.012
31	16	Frézal Aval	0.31	1.55	80	0.85	3.8	0.224	0.107
28	18	Grand Mortarieu Amont	0.14	0.9	140	0.3	10	0.030	0.004
29	18	Grand Mortarieu Aval	0.51	1.7	80	1.1	2.75	0.400	0.347
54	21	Fronton - Rival	0.65	2.5	100	1.1	18.7	0.059	0.096
52	23	Fabas - Margasse	0.15	2.7	-	0.95	6	0.158	0.064
50	24	Rieu Tort Amont	0.25	1.15	140	0.25	22	0.011	0.003
51	24	Rieu Tort Intermédiaire	0.14	2.4	103	0.8	3.2	0.250	0.084
53	25	Rieu Tort Aval	0.47	6.4	95	1.22	8.5	0.144	0.432
48	27	Vergnet Amont	0.05	0.7	116	0.65	9	0.072	0.003
49	27	Vergnet Aval	0.38	2	90	2.2	10.5	0.210	0.159
26	31	Payrol Amont	0.16	1.15	100	0.2	26.5	0.008	0.001
27	31	Payrol Aval	0.34	3.2	75	1.4	5.5	0.255	0.277
24	34	Ginestet - Maribenne Amont	0.1	0.6	98	Pas de débit	-	-	0.000
25	34	Ginestet - Maribenne Aval	0.25	2.3	80	1	7.5	0.133	0.077
44	37	Lembous	0.75	2.8	70	1.6	8.6	0.186	0.391
45	40	Laujol - Bartac	0.27	3.7	70	1.35	4.8	0.281	0.281
22	42	Larone Amont	0.08	1.35	103	1.4	4	0.350	0.038
23	42	Larone Aval	0.31	3.4	70	2	28	0.071	0.075
1	45	Saint-Pierre Amont	0.66	4.1	140	0.6	13	0.046	0.125
2	45	Saint-Pierre Aval	0.35	3.4	106	0.95	8	0.119	0.141
3	46	Marguestaud Amont	0.56	3.75	-	1.1	4	0.275	0.578
4	46	Marguestaud Aval	0.5	8.4	107	0.9	2.3	0.391	1.643
5	49	Galinas - Pontarras Amont	0.11	0.55	165	0.25	4	0.063	0.004
6	49	Galinas - Pontarras Aval	0.36	2.8	104	0.95	8.8	0.108	0.109
7	50	Dère Amont	0.5	3.8	155	0.47	6.7	0.070	0.133
9	51	Nadesse Amont	0.37	2	162	0.75	5.22	0.144	0.106
11	52	Nadesse Aval	0.5	4.6	-	2.35	3.1	0.758	1.744
12	55	Lambon Amont	0.85	3.9	146	1.5	12	0.125	0.414
13	55	Lambon Aval	0.21	2.8	90	1.75	3.85	0.455	0.267
14	57	Tauris Aval	0.045	2.1	85	2.3	5.03	0.457	0.043
15	57	Tauris Amont	0.065	0.3	111	0.45	2.68	0.168	0.003
62	59	Tessonne	0.63	3.9	99	0.95	9.8	0.097	0.238
16	61	Sandrune - Pantagnac Amont	0.36	2.4	97	3.6	8.2	0.439	0.379
17	61	Sandrune - Pantagnac Intermédiaire	0.86	4.3	83	1.7	25	0.068	0.251
18	62	Garouille - Verdié Amont	0.2	1.8	96	0.2	37.47	0.005	0.002
18 bis	62	Fossé à côté Garouille - Verdié	0.2	0.7	109	0.8	2.1	0.381	0.053
19	63	Sandrune - Pantagnac Aval	0.85	3.3	76.5	6.05	13	0.465	1.305
20	65	Rafié - Méric Amont	0.06	1.2	104	1	3.87	0.258	0.019
21	65	Rafié - Méric Aval	-	1.5	-	Pas de débit	-	-	0.000
55	69	Sère	0.5	3.2	108	1.64	4.2	0.390	0.625
56	70	Rieutord	0.11	1.8	100	1.15	3.35	0.343	0.068
57	75	Ayroux	0.36	2.7	94	1.7	3.2	0.531	0.516
58	76	Camuson	0.34	1.8	-	1.2	2.35	0.511	0.313
46	79	Arrats Amont	2.3	16.4	60	4.35	19	0.229	8.636

Tableau 18 – Synthèse des mesures de débit ponctuel (mi-mars 2014).

3.7. PRÉLÈVEMENTS

Le modèle hydrodynamique nécessite de prendre en compte les débits prélevés à chaque pas de temps du modèle au droit des mailles concernées, aussi bien pour les eaux souterraines que pour les eaux superficielles.

Cela implique une connaissance la plus précise possible :

- de la géolocalisation précise des prélèvements (à l'échelle de la maille de 250 m) ;
- de la moyenne des débits prélevés par décade (pas de temps du modèle) ;
- des usages concernés (Alimentation en Eau Potable, industrie ou irrigation).

3.7.1. Croisement des données disponibles

Les données disponibles sur les prélèvements sont :

- les volumes annuels déclarés par les exploitants auprès de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (dans le cadre du calcul de la redevance).

  Ces prélèvements concernent les usages AEP, industrie et irrigation, aussi bien pour les ressources en eaux superficielles qu'en eaux souterraines. Les problèmes majeurs liés à cette base de données sont les suivants :

  - les points de prélèvements agricoles sont géolocalisés au niveau du centroïde de la commune. Cette précision est insuffisante pour le modèle construit sur la base de mailles carrées de 250 m de côté,
  - les données sont fournies en volumes annuels, ce qui implique un traitement complémentaire pour obtenir une ventilation des débits moyens par décade,
  - les faibles volumes (< 10 000 m^3/an) prélevés ne sont pas pris en compte,
  - pour la majorité des prélèvements agricoles, le code Agence du point d'eau n'est pas mis en correspondance avec l'identifiant national (code BSS). Il est de ce fait plus difficile d'identifier l'aquifère capté ;

- Les volumes et débits autorisés issues de la base de données de la DDT du Tarn-et-Garonne (base IRISCOPE).

  Ces données présentent le grand avantage de fournir la localisation précise des points de prélèvements. Cependant, les données de volumes et de débits associés sont des maxima autorisés et ne correspondent pas aux volumes réellement prélevés.

Le travail réalisé a donc consisté à croiser les deux fichiers Agence de l'Eau / DDT 82, afin d'aboutir à des données de volumes annuels réellement prélevés et précisément géolocalisés.

Le détail du travail de croisement des bases de données et les principales difficultés rencontrées sont exposés en Annexe 12.

3.7.2. Synthèse des volumes annuels prélevés

Période 2006 – 2012

Le total annuel des volumes déclarés sur la période 2006 à 2012 est présenté dans le Tableau 19.

		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Prélèvement	AEP	3 283 009	2 954 951	3 587 877	3 768 601	3 645 128	3 652 956	3 791 810
	IND	2 532 671	2 431 806	599 422	560 367	488 863	447 001	573 709
	IRR	12 679 998	9 870 068	10 711 134	12 811 262	9 569 245	10 594 572	9 702 673
Total PRLV ESO		**18 495 678**	**15 256 825**	**14 898 433**	**17 140 230**	**13 703 236**	**14 694 529**	**14 068 192**
Rejet	IND	155 516	155 516	155 516	155 516	155 516	155 516	155 516
Total Rejets ESO		155 516	155 516	155 516	155 516	155 516	155 516	155 516
Prélèvement	AEP	14 670 891	14 232 956	13 534 203	13 856 682	13 535 710	14 402 934	15 261 603
	IND	792 540	793 028	518 387	474 709	405 032	617 602	500 228
	IRR	44 444 050	29 971 085	31 601 939	43 813 246	34 323 228	41 869 653	29 304 204
Total PRLV ESU		**59 907 481**	**44 997 069**	**45 654 529**	**58 144 637**	**48 263 970**	**56 890 189**	**45 066 035**
Rejet	AEP	8 626 049	10 076 237	15 931 973	16 446 111	16 217 207	10 448 873	10 448 873
	IND	786 249	786 249	786 249	786 249	786 249	786 249	786 249
Total Rejets ESU		9 412 298	10 862 486	16 718 222	17 232 360	17 003 456	11 235 122	11 235 122
Prélèvement	AEP	17 953 900	17 187 907	17 122 080	17 625 283	17 180 838	18 055 890	19 053 413
	IND	3 325 211	3 224 834	1 117 809	1 035 076	893 895	1 064 603	1 073 937
	IRR	57 124 048	39 841 153	42 313 073	56 624 508	43 892 473	52 464 225	39 006 877
Total PRLV		**78 403 159**	**60 253 894**	**60 552 962**	**75 284 867**	**61 967 206**	**71 584 718**	**59 134 227**
Rejet	AEP	8 626 049	10 076 237	15 931 973	16 446 111	16 217 207	10 448 873	10 448 873
	IND	948 056	948 544	673 903	630 225	560 548	773 118	655 744
Total Rejets		9 574 105	11 024 781	16 605 876	17 076 336	16 777 755	11 221 991	11 104 617

	Golfech	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Prélèvement	IND	217 560 000	220 280 000	212 200 000	221 980 000	214 250 000	216 820 000	191 801 514
Rejet	IND	177 158 552	179 373 441	172 793 918	180 757 747	174 463 228	176 555 972	156 183 483
Total "prélevé"		**40 401 448**	**40 906 559**	**39 406 082**	**41 222 253**	**39 786 772**	**40 264 028**	**35 618 031**

Tableau 19 – Bilan des volumes annuéls prélevés sur la période 2006-2012.

La moyenne des prélèvements totaux annuels varie de 59 à 78 millions de m^3 dans la plaine alluviale du Tarn-et-Garonne. La répartition par usage (cf. Illustration 52) indique un usage agricole prépondérant (71 %), un usage pour l'eau potable secondaire (27 %) et un usage industriel très minoritaire (3 %).

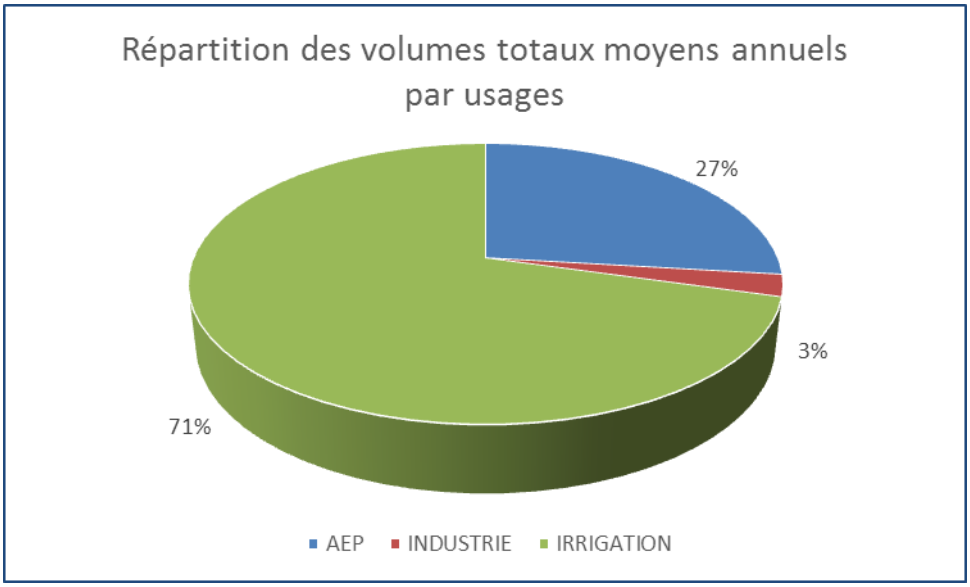


Illustration 52 – Répartition des volumes prélevés totaux (ESU et ESO) annuels par types d'usage.

Il convient de noter que ces chiffres ne tiennent pas compte des prélèvements réalisés dans le canal de Golfech pour le refroidissement des réacteurs de la centrale nucléaire. En effet, même si la plus grande partie des volumes prélevés sont restitués au canal, en moyenne, 40 millions de m^3/an s'évaporent dans les tours de refroidissement.

Par ailleurs, les rejets effectués dans les aquifères (usage industriel) et dans les cours d'eau (assainissement et industrie) ont été comptabilisés en tant que points d'injection dans le modèle hydrodynamique. Ils représentent un total de 10 à 17 millions de m^3/an.

Période 1996 – 2012

Le graphique de l'Illustration 53 montre l'évolution des prélèvements annuels totaux dans la plaine alluviale (en dehors des mouvements d'eau liés au canal de Golfech).

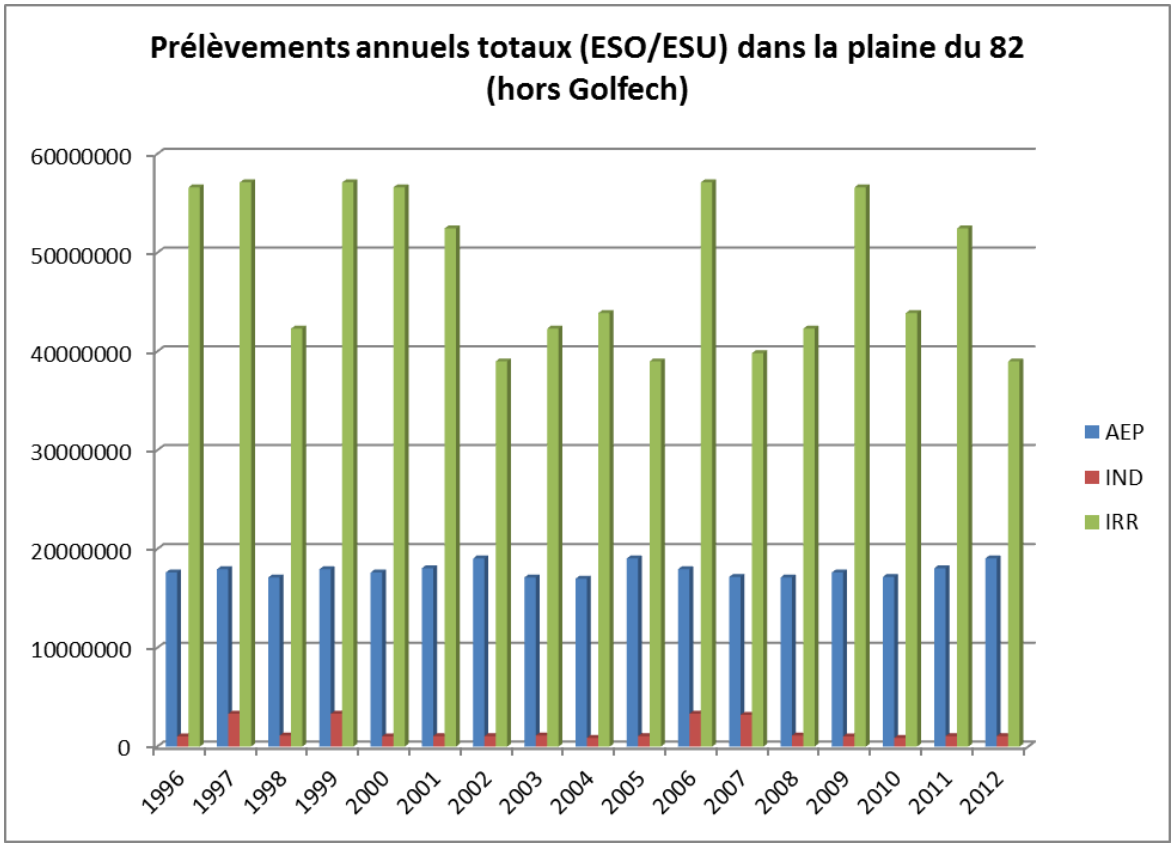


Illustration 53 – Évolution des prélèvements annuels totaux (ESO et ESU) par usages de 1996 à 2012 dans la plaine alluviale du Tarn-et-Garonne.

L'Illustration 54 présente la même évolution dans le temps pour les prélèvements dans les eaux souterraines uniquement.

Environ 70 % des prélèvements dans les aquifères sont destinés à l'irrigation. Ils varient de 14 à 18,5 millions de m^3/an. Les volumes varient fortement d'une année sur l'autre en fonction des conditions climatiques et des besoins des cultures. Une légère tendance à la baisse est observée depuis l'année 2000.

Les prélèvements pour l'eau potable sont très stables et s'élèvent à 3,5 millions de m^3/an environ, tandis que les prélèvements industriels peuvent varier fortement d'une année sur l'autre, de 0,5 à 2,5 millions de m^3/an.

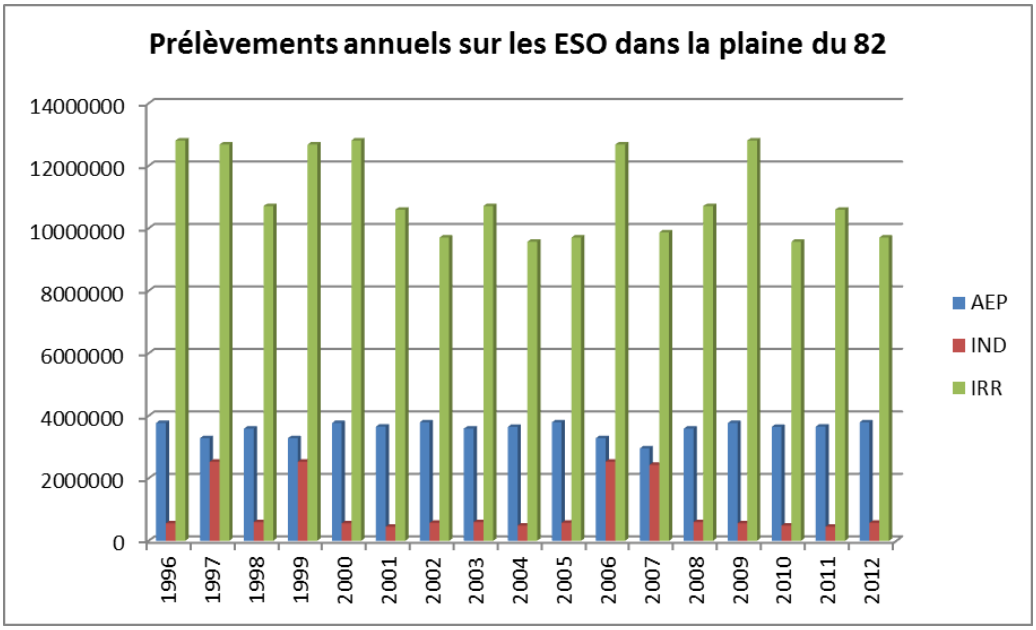


Illustration 54 – Évolution des prélèvements annuels dans les eaux souterraines de 1996 à 2012 dans la plaine alluviale du Tarn-et-Garonne.

L'Illustration 55 montre l'évolution des prélèvements des eaux superficielles (hors Golfech) de 1996 à fin 2012.

Les prélèvements agricoles représentent 65 à 75 % des volumes totaux et suivent une dynamique semblable aux prélèvements dans les eaux souterraines.

Les prélèvements pour la production d'eau potable représentent 25 à 35 % des volumes annuels et restent stables. Les prélèvements industriels sont faibles, de l'ordre de 1 % des volumes prélevés, et sont très stables dans le temps.

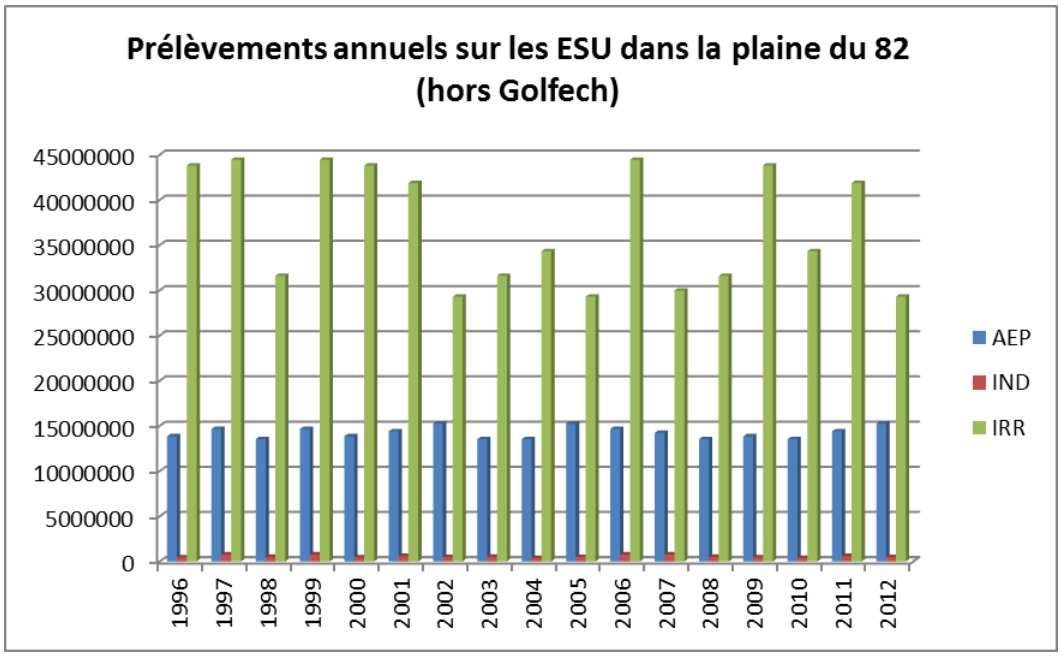


Illustration 55 - Évolution des prélèvements annuels des eaux superficielles de 1996 à 2012 dans la plaine alluviale du Tarn-et-Garonne.

3.7.3. Localisation des prélèvements

La carte de l'Illustration 56 montre la répartition des points de prélèvements sur les eaux souterraines, par types d'usages dans la plaine alluviale du Tarn-et-Garonne. Elle montre clairement la prédominance des prélèvements agricoles, concentrés plus particulièrement dans les alluvions de la basse plaine du Tarn et de la Garonne, ainsi que sur le nord de la basse terrasse centrale de la Garonne.

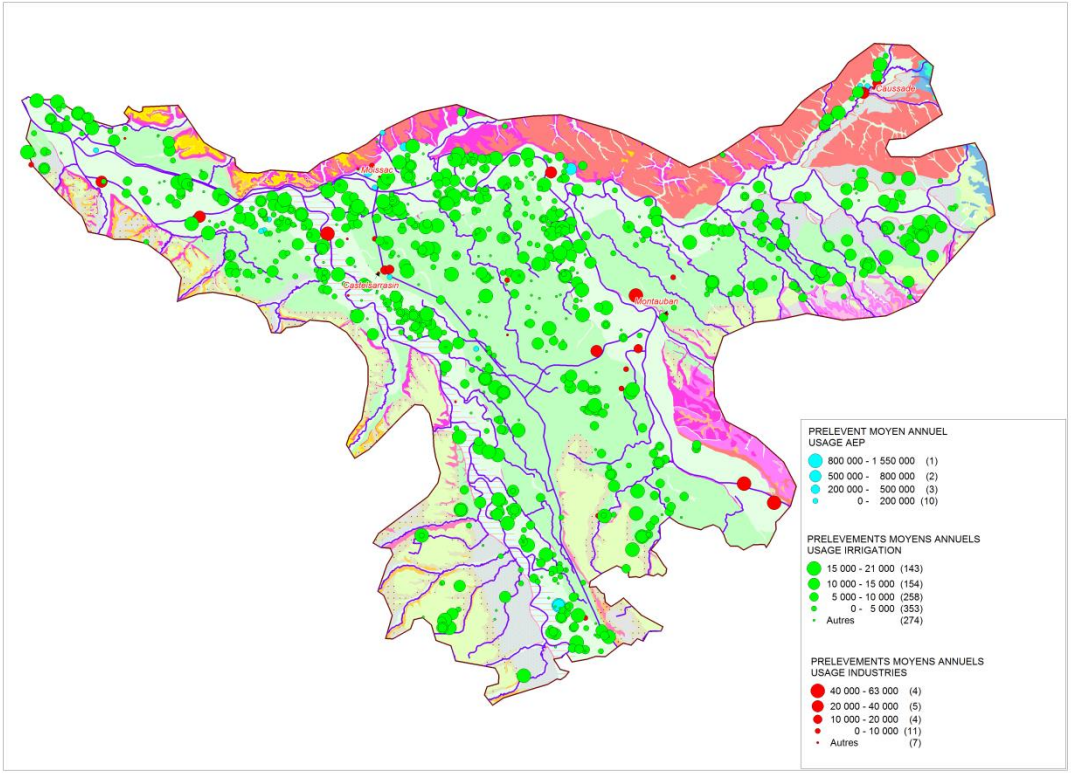


Illustration 56 – Carte de localisation des prélèvements dans les eaux souterraines – Moyenne interannuelle de 2006 à 2012 (Données AEAG et DDT 82, retraitées par le BRGM).

La carte de l'Illustration 57 monte la localisation des prélèvements sur les eaux superficielles. Là-encore, l'usage agricole est prépondérant et concerne principalement le Tarn, l'Aveyron et la Garonne.

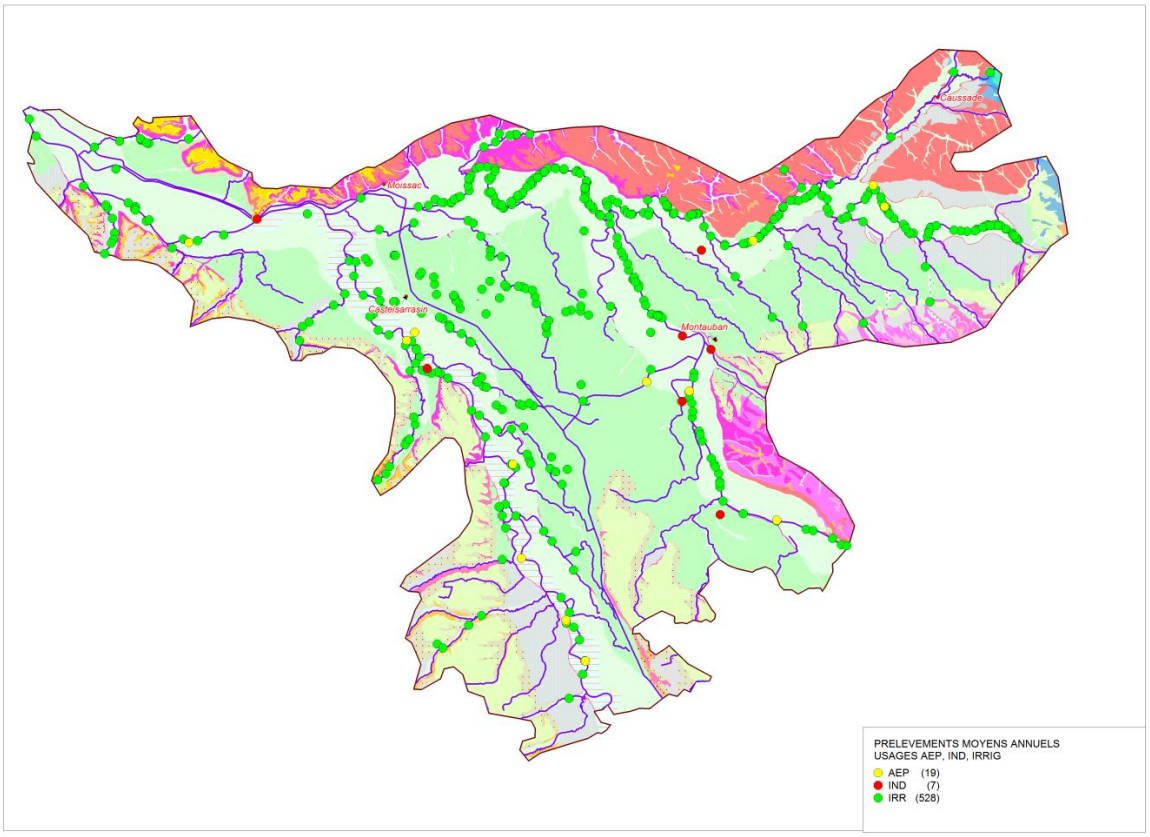


Illustration 57 – Carte de localisation des prélèvements des eaux superficielles – Moyenne interannuelle de 2006 à 2012 (Données AEAG et DDT 82, retraitées par le BRGM).

3.7.4. Ventilation temporelle des prélèvements

Une fois géolocalisés, les volumes annuels prélevés doivent être répartis sur les pas de temps du modèle (décade) et transformés en débits horaires (m^3/h, unité des débits du modèle).

La ventilation temporelle des prélèvements a été réalisée selon les règles suivantes (cf. Illustration 58) :

- pour l'AEP et l'industrie, usage homogène sur toute l'année, débit moyen constant sur les 36 décades ;
- pour l'irrigation, ventilation des volumes prélevés sur les 4 mois de l'année où l'arrosage des cultures est significatif, à savoir juin, juillet, août et septembre.

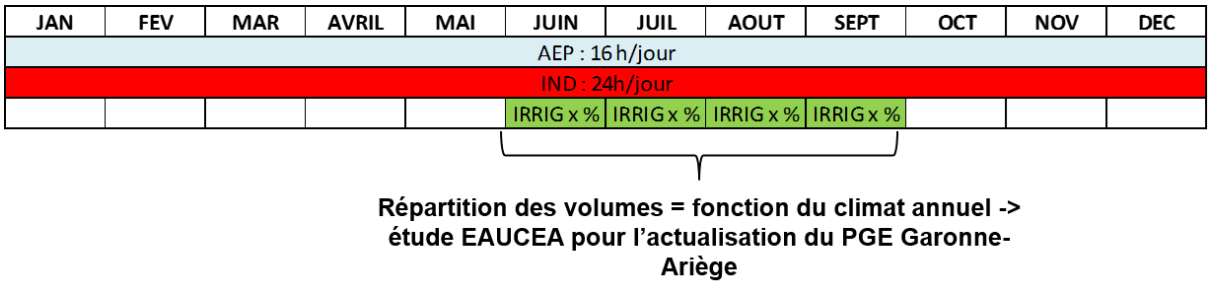


Illustration 58 – Ventilation des volumes prélevés sur une année.

Les facteurs de répartition entre les mois d'irrigation ont été définis à partir d'une étude réalisée par le bureau d'études EAUCEA dans le cadre de l'actualisation du Plan de Gestion de l'Étiage (PGE) Garonne-Ariège (EAUCEA, 2006). Les données transmises par EAUCEA portent sur les années 1991 à 2010 (cf. Tableau 20).

Année	Coefficient de répartition			
	Juin	Juillet	Août	Septembre
1991	0.064	0.471	0.446	0.019
1992	0.000	0.397	0.523	0.080
1993	0.000	0.324	0.676	0.000
1994	0.063	0.511	0.426	0.000
1995	0.176	0.289	0.502	0.033
1996	0.291	0.446	0.179	0.084
1997	0.088	0.488	0.306	0.118
1998	0.210	0.364	0.426	0.000
1999	0.287	0.418	0.266	0.029
2000	0.165	0.391	0.349	0.095
2001	0.197	0.296	0.406	0.102
2002	0.188	0.415	0.397	0.000
2003	0.094	0.503	0.387	0.016
2004	0.197	0.494	0.237	0.072
2005	0.088	0.597	0.288	0.027
2006	0.173	0.486	0.294	0.047
2007	0.000	0.510	0.364	0.126
2008	0.165	0.438	0.316	0.081
2009	0.132	0.441	0.340	0.087
2010	0.052	0.463	0.403	0.082
Moyenne	**0.131**	**0.437**	**0.377**	**0.055**

Tableau 20 – Coefficients de répartition temporelle des prélèvements agricoles (EAUCEA, 2006).

La répartition des prélèvements entre les mois d'irrigation varie d'une année sur l'autre, en fonction des séquences climatiques (pluies, température, ensoleillement) et des types de cultures (besoins en eau des plantes).

Sur la période 1991-2010, les prélèvements se font majoritairement sur les mois de juillet et août, la sollicitation étant généralement la plus importante en juillet (15 années sur 20). La pratique de l'irrigation est beaucoup moins importante sur les mois de juin et septembre.

Pour les deux dernières années durant lesquelles les prélèvements ont pu être recensés, à savoir, 2011 et 2012, leurs climats estivaux ont été comparés aux années étudiées par EAUCEA. Il en résulte que 2011 est similaire à 1998 et que 2012 est à rapprocher de l'année 1997, moyennant quelques ajustements (cf. Tableau 21).

Année	Coefficient de répartition			
	Juin	Juillet	Août	Septembre
2011	0.15	0.35	0.45	0.05
2012	0.08	0.62	0.20	0.10

Tableau 21 – Coefficients de répartition temporelle des prélèvements agricoles 2011- 2012.

3.7.5. Création des chroniques de prélèvements

Les fichiers de prélèvements utilisés dans le précédent modèle (1996 à 2005) montrent une surestimation des volumes par rapports aux données de prélèvements plus récentes (2006 à 2012). L'Illustration 59 met en évidence cette rupture dans les données.

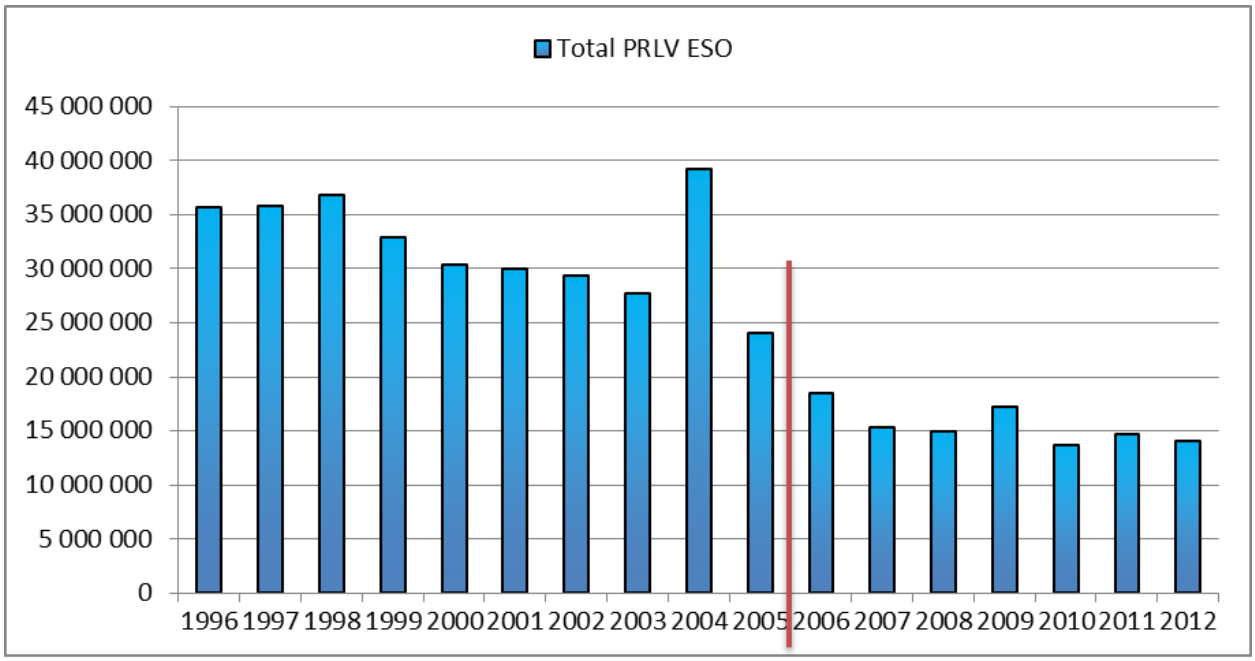


Illustration 59 – Évolution des prélèvements annuels quantifiés sur la période 1996-2012.

Cela s'explique par le fait que, pour la période 1996-2005, seuls les fichiers de volumes et débits autorisés fournis par la DDT 82 avaient pu être exploités. Faute de pouvoir retraiter les fichiers de l'Agence de l'Eau et afin de reconstituer au mieux les chroniques de prélèvements sur cette période, une méthodologie de rapprochement avec des années connues a été appliquée.

À partir des données de pluies et d'ETP décadaires collectées sur la période 1949-2015 sur la station de Montauban, les fréquences et les périodes de retour du cumul annuel des pluies efficaces a été réalisé, en utilisant un réservoir sol de type « réservoir sol progressif », avec une réserve égale à 50 mm (cf. Annexe 9 et chapitre 3.5.5).

Pour chacune des années de la période 1995-2005 et 2013-2015 a été identifiée l'année de la période 2006-2012 se rapprochant le plus en terme de statistiques climatiques.

Pour chacune des années de la période 1995-2005 et 2013-2015, les prélèvements appliqués dans le modèle sont ceux de l'année identifiée (cf. Tableau 22).

Année	Année correspondante
Initialisation Année moyenne	2009
1996	2009
1997	2006
1998	2008
1999	2006
2000	2009
2001	2011
2002	2009
2003	2008
2004	2010
2005	2009
2013	2009
2014	2010
2015	2011

Tableau 22 – Reconstitution des prélèvements pour les années 1996 à 2005.

Les données de débits horaires de prélèvements par décade sont ensuite intégrées dans le modèle hydrodynamique en valeur négative (injections en valeur positive).

Lorsque plusieurs points de prélèvements sont localisés sur la même maille, les débits sont additionnés.

3.7.6. Canal de Golfech

Le canal de Golfech est une dérivation court-circuitant la plus grande partie du débit de la Garonne, aménagée entre 1971 et 1973 dans un double objectif :

- alimenter une usine hydroélectrique, la Chute de Golfech ;
- fournir tout au long de l'année le volume d'eau de refroidissement nécessaire au fonctionnement d'une centrale nucléaire.

La prise d'eau se fait au niveau du barrage de Malause et la restitution à la Garonne se fait via le canal de fuite en aval de Golfech (cf. Illustration 60).

Afin de limiter l'impact de ces ouvrages sur la nappe alluviale, plusieurs aménagements ont été réalisés (cf. Morenon, 1974) :

- seize kilomètres de digues ont été construits autour du plan d'eau formé par la retenue de Malause. Des contre-canaux, dont le fond se situe de 2 à 3 m sous le terrain naturel, ont été creusés au-delà des digues pour régler le niveau de la nappe à son niveau moyen avant la construction du barrage et éviter l'inondation, notamment, de la plaine de Saint-Nicolas-de-la-Grave ;
- dans le tronçon de Garonne parallèle au canal de Golfech, six seuils ont été aménagés afin de maintenir le niveau de la nappe à un niveau compris entre l'étiage et le niveau moyen

d'avant l'aménagement (cf. chapitre 0). Le sixième seuil, situé juste après la confluence de la Garonne et du canal, est le plus souvent ennoyé ;

- Les parois du canal d'amenée sont étanches et celui-ci a été conçu très large et peu profond afin de ne pas atteindre le mur des alluvions. De plus, des drains ont été aménagés de manière à faciliter l'écoulement des eaux souterraines sous le radier ;
- le canal de fuite, non revêtu, est entièrement en déblai et creusé dans le substratum molassique. Un écran d'étanchéité et un contre-canal ont été aménagés afin d'éviter le drainage de la nappe.

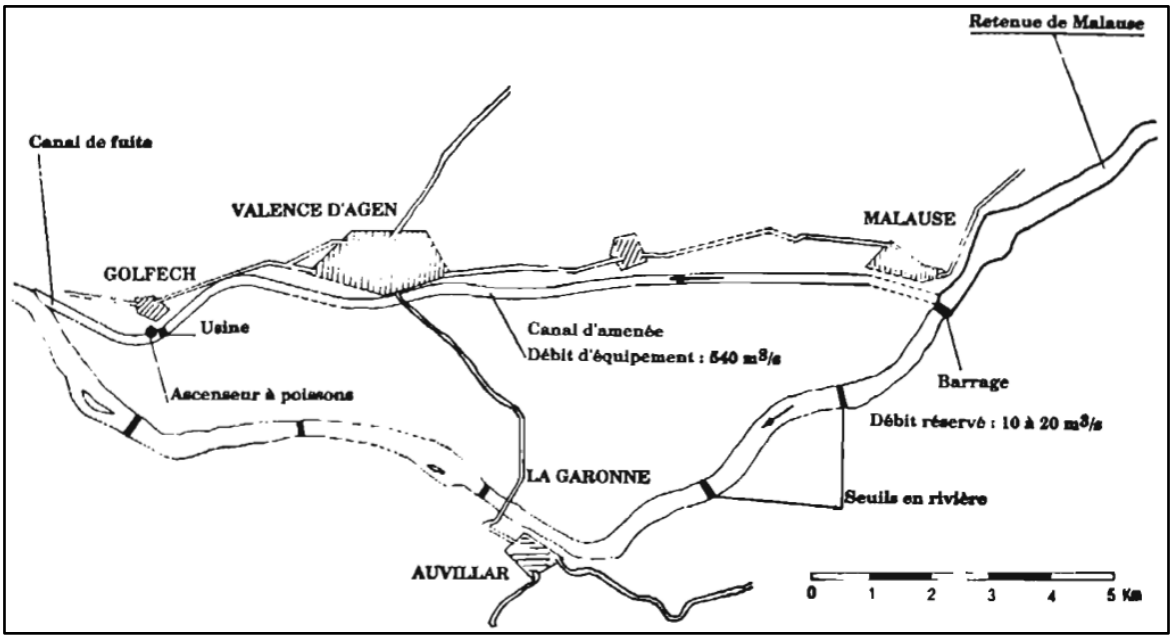


Illustration 60 – Plan d'ensemble de l'aménagement hydroélectrique de Golfech (Travade, 1992).

L'impact du canal de Golfech sur la nappe alluviale étant ainsi fortement limité, il n'a pas été intégré au réseau hydrographique (cf. chapitre 3.6.3). Cependant, étant donné qu'il dérive la plus grande partie du débit de la Garonne sur un tronçon d'environ 15 km, il convient de le prendre en compte sous la forme d'un point de prélèvement dans les eaux superficielles (au niveau du barrage de Malause) et d'un point d'injection (au niveau du confluent entre le canal de fuite et la Garonne).

Le schéma de décision intègre les données suivantes :

- débit maximal de la centrale hydroélectrique de Golfech :

  Q_{max} = 650 m^3/s (540 ou 600 m^3/s selon certaines sources)

- débit réservé au bras "naturel" de la Garonne entre Malause et Golfech :

  $Q_{réservé}$ = 10 m^3/s du 01/11 au 31/03

  $Q_{réservé}$ = 20 m^3/s du 01/04 au 31/10

- débit Garonne > 3500 m^3/s : Barrage de Malause « effacé ».

Cas non rencontré sur la période de modélisation (1995-2015) : débit maximal à Malause de 2 500 m^3/s enregistré en décembre 1996.

Ce qui nous permet de définir le débit prélevé à la Garonne au niveau du barrage de Malause :

- Si $Q_{Garonne\ amont\ barrage} - Q_{réservé} \leq 650\ m^3/s$, $Q_{entrée\ canal} = Q_{Garonne\ amont\ barrage} - Q_{réservé}$
- Si $Q_{Garonne\ amont\ barrage} - Q_{réservé} > 650\ m^3/s$, $Q_{entrée\ canal} = 650\ m^3/s$

Et le débit réinjecté dans la Garonne à la sortie du canal de fuite :

$$Q_{sortie\ canal} = Q_{entrée\ canal} - Q_{prélèvement\ centrale\ nucléaire} + Q_{réinjection\ centrale\ nucléaire}$$

Le débit dans la Garonne en aval immédiat du barrage de Malause est quant à lui ainsi égal au débit réservé.

La chronique de prélèvement du barrage de Malause et de réinjection de Golfech sont calculées après une première modélisation permettant de déterminer la chronique du débit de la Garonne à Malause.

Outre ces chroniques de prélèvement / réinjection, l'étude du fonctionnement du barrage de Malause et du canal de Golfech a permis d'ajouter au modèle hydrodynamique une série de potentiels imposés correspondant aux contre-canaux fixant le niveau de la nappe autour du plan d'eau de Saint-Nicolas-de-la-Grave (cf. chapitre 4.2.5).

3.7.7. Canal latéral à la Garonne

Le canal latéral à la Garonne, inauguré en 1856, ne dispose pas de parois étanches et est réputé fuyard. Le bureau d'études HYDRATEC a mesuré et évalué les infiltrations le long des différents biefs dans le cadre d'une étude (cf. HYDRATEC, 2007 et Illustration 61). Les résultats concernant les biefs du canal traversant le Tarn-et-Garonne sont présentés dans le Tableau 23.

N° Bief	Nom Bief	Longueur Bief (m)	Baisse niveau (cm/j)	Infiltration mesurée (L/s)	Infiltration estimée (L/s)	Infiltration modèle (L/s/km)
10	Lavache	18 486	1		42.79	2.47
11	Montech	2 003	1		4.64	2.07
12	Peyrets	798	1		1.85	2.51
13	Pellaborie	400	1		0.93	2.79
14	Escudiès	400	1		0.93	2.83
15	Pommiès	625	1		1.45	2.23
16	Escatalens	2 200	0	0	0.00	0.00
17	Saint-Martin	4 476	1		10.36	2.42
18	Prades	3 427	1		7.93	2.23
19	Castelsarrasin	2 257	1		5.22	2.31
20	Saint-Jean-des-Vignes	1 382	15	46	47.99	35.97
21	Verriers	446	1		1.03	2.02
22	Artel	469	10	12	10.86	23.41
23	Cacor	2 666	10	62	61.71	24.29
24	Grégonne	596	40	58	55.19	78.49
25	Moissac	583	80	113	107.96	207.29
26	Espagnettes	3 613	70	615	585.44	182.39
27	Petit Bézy	3 827	8	67	70.87	20.64
28	Braguel	5 711	8	111	105.76	24.91
29	Pommevic	1 550	1		3.59	2.27
30	Valence d'Agen	1 857	1		4.30	2.34
31	Lamagistère	6 349	10	140	146.97	22.32
32	Noble	6 882	1		15.93	5.17

Tableau 23 – Estimation des fuites du canal latéral à la Garonne dans le Tarn-et-Garonne.

L'infiltration est limitée dans toute la partie amont du trajet tarn-et-garonnais du canal latéral. Elle est plus conséquente entre Castelsarrasin et Valence d'Agen, et en particulier dans le secteur de Moissac, où elle dépasse sensiblement les 100 L/s/km.

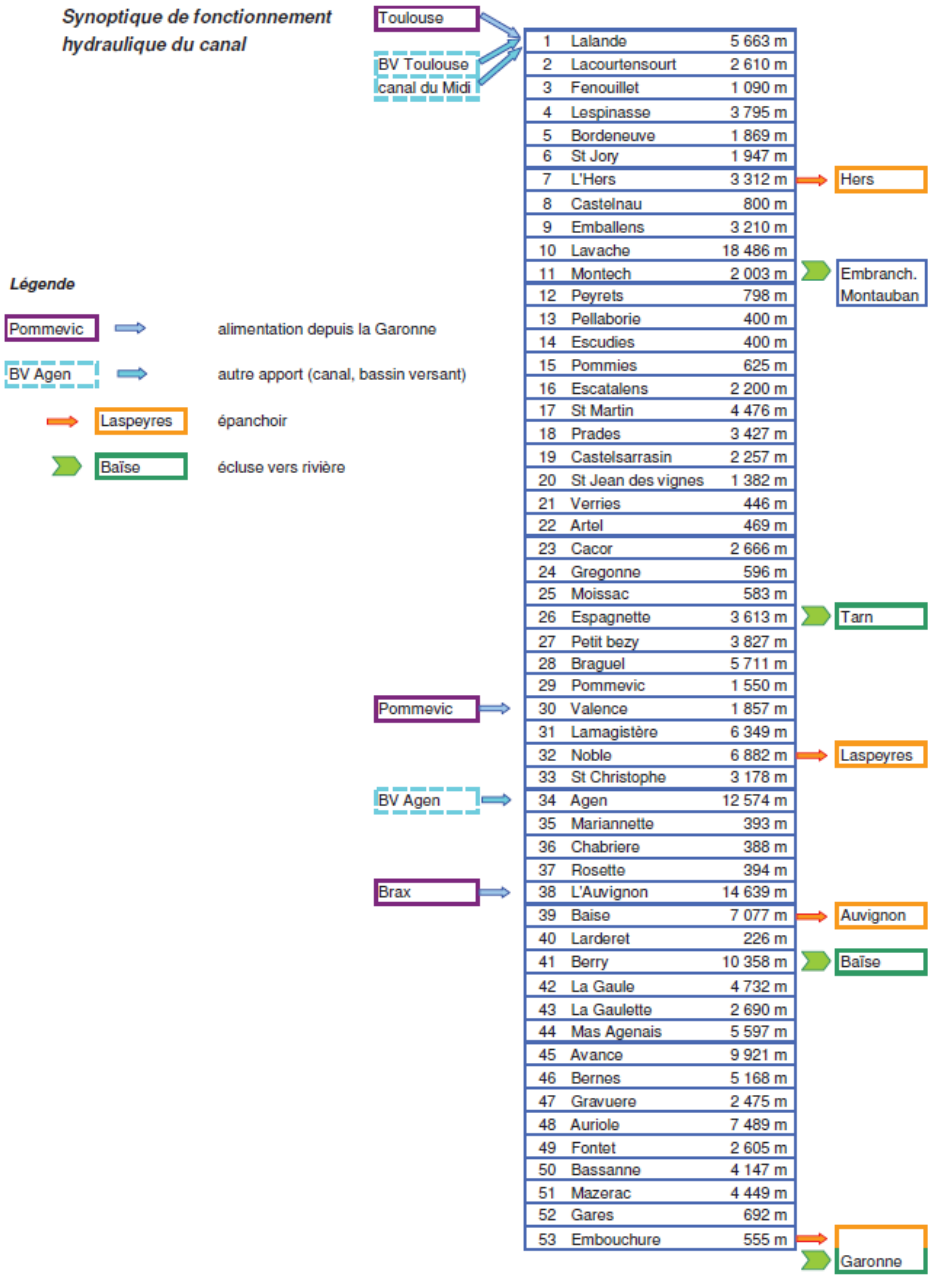


Illustration 61 – Synoptique de fonctionnement hydraulique du canal (HYDRATEC, 2007).

Les infiltrations ont été estimées dans le modèle hydrodynamique, en prenant en compte la longueur du tronçon de canal latéral traversant chaque maille l'interceptant (cf. Illustration 62).

Le débit d'injection a été considéré comme constant dans le temps et transformé en débit horaire (m^3/h, unité de débit du modèle).

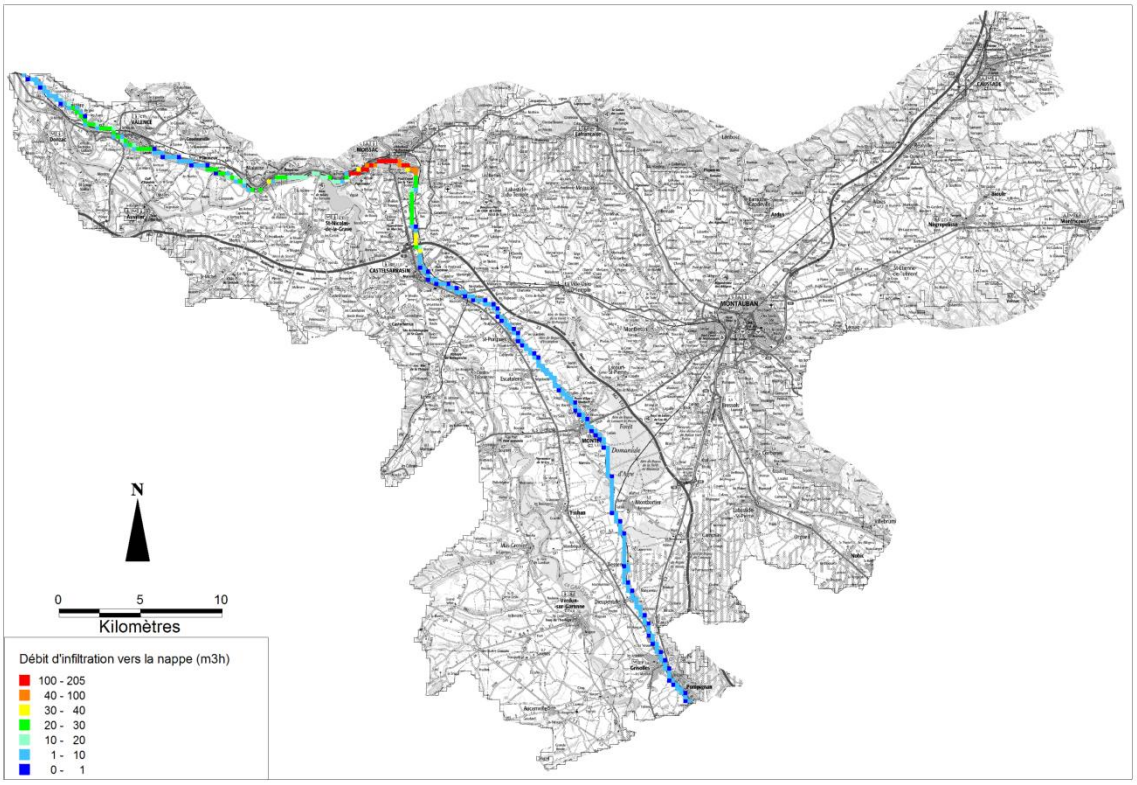


Illustration 62 – Débits de fuite du canal latéral injectés dans la nappe alluviale.

3.8. OBSERVATIONS

Les observations de terrain sont utilisées comme références dans la procédure de calage. Elles permettent d'ajuster les paramètres mal connus ou non facilement mesurables pour que le modèle hydrodynamique reflète au mieux ces observations (cf. chapitre 4.1).

La nature et le type de ces observations diffèrent :

- mesures ponctuelles (dans le temps et dans l'espace) du niveau piézométrique d'une nappe ou de la cote du fil d'eau d'une rivière (exutoire de la nappe) ;
- localisation d'une source, traduisant une émergence de nappe ;
- cartes piézométriques indiquant les niveaux de nappe, les directions et gradients d'écoulement, ainsi que les évolutions temporelles lorsque plusieurs cartes ont été levées au fil du temps ;
- chroniques de niveaux piézométriques, de débits et de niveaux des sources et rivières.

3.8.1. Carte piézométrique d'octobre 1996

Dans le cadre des premiers travaux de modélisation, une campagne de relevés piézométriques avait été réalisée en période de basses eaux souterraines, en octobre 1996, sur plus de 300 points de mesure. Ces données ont permis d'élaborer une carte piézométrique, présentée dans l'Illustration 63 et en Annexe 4.

Cette carte piézométrique a été utilisée comme référence pour le calage en régime permanent lors du premier modèle (cf. Gandolfi, 1997), la période des basses eaux 1996 étant considérée comme la fin d'une année hydrologique moyenne.

Pour cela, les 382 points ayant permis de tracer la carte piézométrique ont été intégrés dans le modèle en tant que mailles à historique, permettant la comparaison à la fin des calculs entre la valeur mesurée et la valeur modélisée.

Lors de la première actualisation du modèle (cf. Ghyselinck-Bardeau, 2007), cette carte a été utilisée :

- comme référence pour le calage en régime permanent ;
- pour définir la piézométrie initiale en régime transitoire.

Lors de cette seconde actualisation, elle a été utilisée uniquement pour définir la piézométrie initiale du modèle en régime transitoire au début de la phase de calage (cf. chapitre 3.4.1).

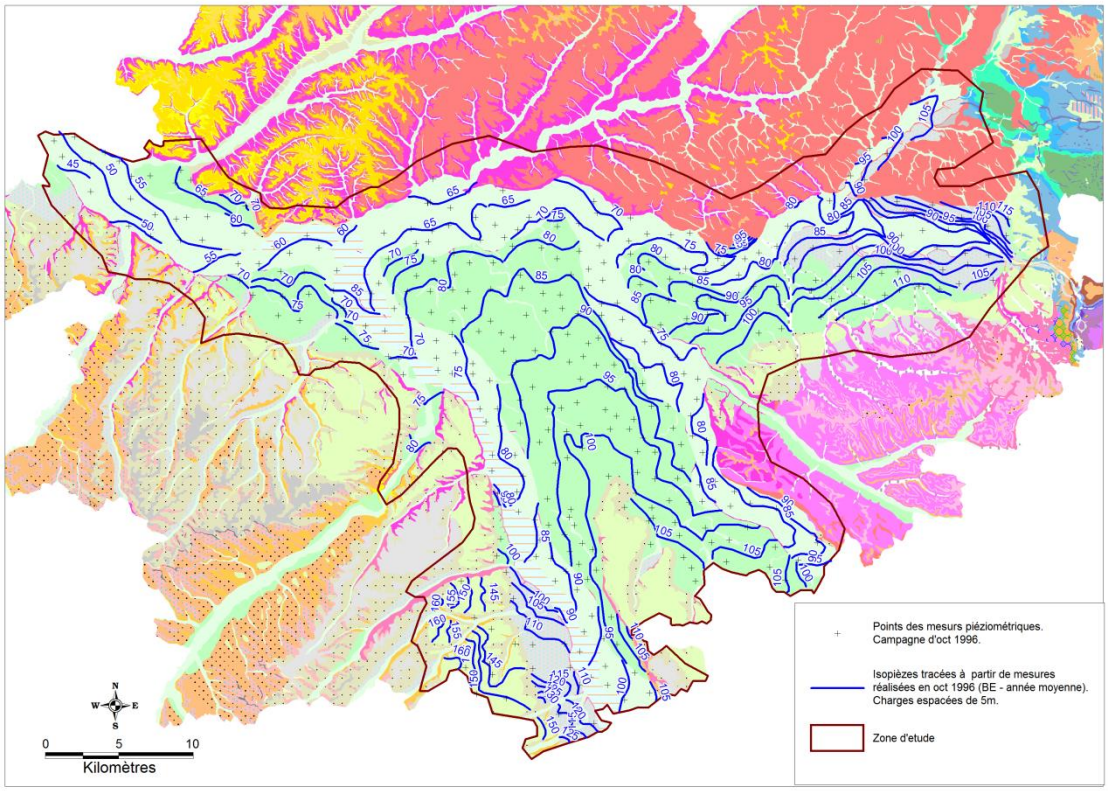


Illustration 63 – Carte piézométriques et ouvrages mesurés lors de la campagne d'octobre 1996.

3.8.2. Chroniques piézométriques

Lors de la construction du précédent modèle, le BRGM a identifié un réseau de 26 points. Dans le cadre de cette étude (cf. Ghyselinck-Bardeau, 2004), ces points ont fait l'objet de mesures manuelles bimestrielles entre février 2003 et septembre 2004 (fréquence adaptée au pas de temps du modèle).

Depuis la fin de ce projet, en 2007, la DDT 82 poursuit le suivi de 22 de ces ouvrages, dont 16 régulièrement. Une première campagne a été réalisée en juin 2008 et le suivi bimestriel a repris

en mai 2010. Les données récoltées pour cette étude prennent fin avec la campagne de mai 2013.

Par ailleurs, dans le cadre du Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS), le BRGM suit en continu 10 piézomètres captant la nappe alluviale dans la zone modélisée. Ce suivi a permis de tracer des chroniques décadaires commençant au début de la période de modélisation ou, à défaut, au début du suivi pour les dispositifs installés après octobre 1995.

Les 36 points de mesures ont été intégrés en tant que mailles à historique dans le modèle hydrodynamique, permettant la comparaison à la fin des calculs entre la chronique de mesures et la chronique modélisée.

L'Illustration 64 localise les différents points d'observation et le Tableau 24 précise les formations alluviales captées par les différents piézomètres.

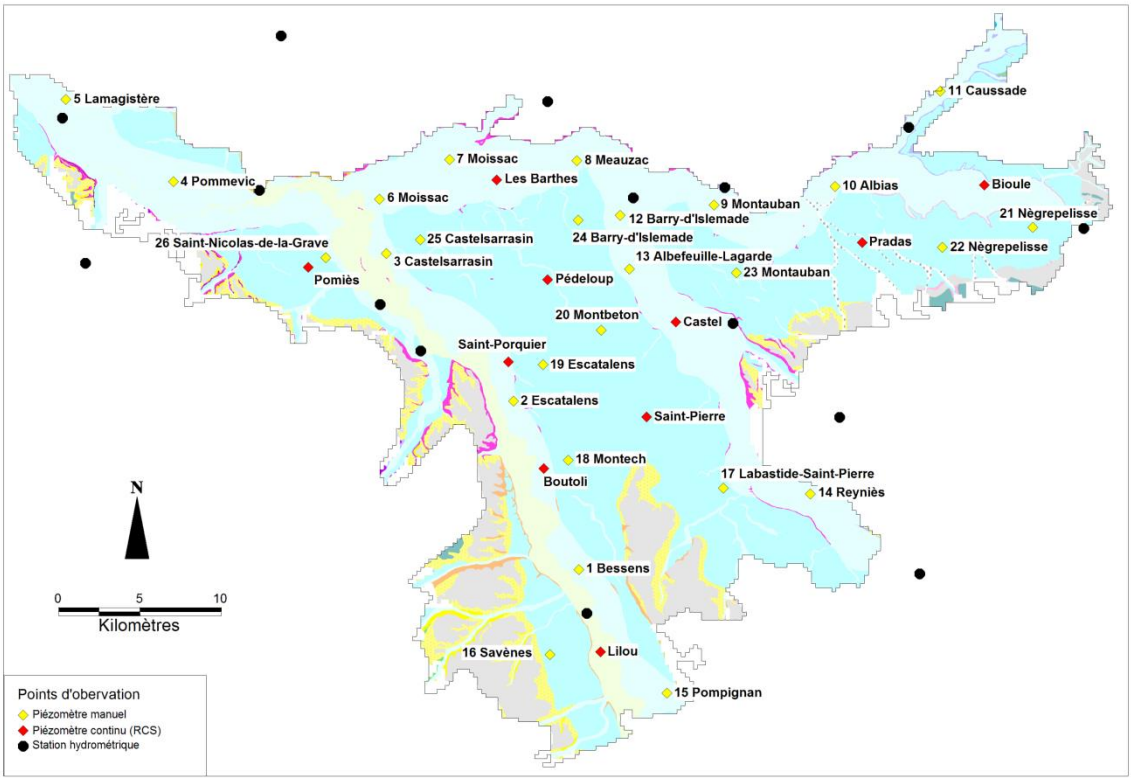


Illustration 64 – Carte de localisation des points d'observation : piézomètres et stations hydrométriques.

Nom piézomètre	Type de suivi	Terrasse alluviale captée
11 Caussade	Manuel	Basse Plaine Lère
Bioule	Automatique	Basse Plaine Aveyron
9 Montauban	Manuel	
10 Albias	Manuel	
Castel	Automatique	Basse Plaine Tarn amont
12 Barry-d'Islemade	Manuel	
13 Albefeuille-Lagarde	Manuel	
14 Reyniès	Manuel	
Les Barthes	Automatique	Basse Plaine Tarn aval
6 Moissac	Manuel	
7 Moissac	Manuel	
8 Meauzac	Manuel	
Boutoli	Automatique	Basse Plaine Garonne amont
Lilou	Automatique	
Saint-Porquier	Automatique	
1 Bessens	Manuel	
2 Escatalens	Manuel	
3 Castelsarrasin	Manuel	
15 Pompignan	Manuel	
4 Pommevic	Manuel	Basse Plaine Garonne aval
5 Lamagistère	Manuel	
Pradas	Automatique	Basse Terrasse Aveyron
21 Nègrepelisse	Manuel	
22 Nègrepelisse	Manuel	
23 Montauban	Manuel	
Pédeloup	Automatique	Basse Terrasse Tarn
Saint-Pierre	Automatique	
17 Labastide-Saint-Pierre	Manuel	
20 Montbeton	Manuel	
24 Barry-d'Islemade	Manuel	
16 Savènes	Manuel	Basse Terrasse Garonne amont
18 Montech	Manuel	
19 Escatalens	Manuel	
25 Castelsarrasin	Manuel	
Pomiès	Automatique	Basse Terrasse Garonne aval
26 Saint-Nicolas-de-la-Grave	Manuel	

Tableau 24 – Liste des piézomètres et terrasses alluviales captées.

3.8.3. Chroniques de débit et de hauteur des cours d'eau

Quinze stations de mesures du débit, dont onze mesurent également la hauteur d'eau ont été recensées dans la banque HYDRO (cf. chapitre 3.6.11, notamment Illustration 43 et Tableau 12).

Ces 15 points de mesures ont été intégrés en tant que mailles à historique dans le modèle hydrodynamique, permettant la comparaison à la fin des calculs entre la chronique de mesures et la chronique modélisée.

Neuf de ces stations ont servi à l'élaboration des chroniques de débit amont respectivement, de la Garonne, du Tarn, de l'Aveyron, de l'Arrats, de la Gimone, de la Barguelonne, du Lemboulas, de la Lère et du Tescou. En conséquence, les chroniques de débit moyen décadaire issues de la banque HYDRO seront comparées aux chroniques simulées à l'emplacement de ces stations (ou à la maille source du cours d'eau pour les stations hors zone modélisée), mais plutôt dans la perspective de détecter une erreur dans les données d'entrée que dans une perspective de calage.

Aucune donnée n'a été obtenue pour la période de modélisation pour les stations mesurant le débit de la Garonne à Malause et du Tarn à Montauban, mais ces deux points de mesures ont été conservés comme mailles à historique, notamment pour suivre l'évolution du débit de la Garonne à Malause, dans la perspective d'intégrer la dérivation de débit liée au canal de Golfech (cf. chapitre 3.7.6).

Les quatre dernières stations mesurant le débit des cours d'eau (la Garonne à Très-Cassés et à Lamagistère, le Tarn à Villemade et l'Aveyron à Loubéjac) permettront la comparaison proprement dite entre mesures et calculs. En particulier, la station de Lamagistère, située très près de l'exutoire du modèle, permettra de faire le bilan hydrologique et de vérifier si l'apport de la nappe alluviale au débit de la Garonne est correctement pris en compte en sortie de modèle.

Les onze stations de mesure du niveau d'eau ont quant à elles été utilisées pour caler les relations hauteur-débit, et en particulier les coefficients de rugosité (cf. chapitre 3.6.12). Elles serviront également de contrôle des données d'entrée dans la phase de calage de la modélisation hydrodynamique proprement dite.

3.8.4. Mesures ponctuelles du niveau des cours d'eau

Les deux campagnes de mesures de 204 cotes du fil d'eau, le long des 3 cours d'eau principaux (Garonne, Tarn, Aveyron) et des 9 cours d'eau secondaires les plus importants réalisées en avril et septembre 2015 ont été utilisées pour caler les paramètres du modèle liés au réseau hydrographique : cotes de fond et pente du lit, coefficient de rugosité, hauteur et facteur débit des seuils (cf. chapitre 3.6.10).

Ces 204 points de mesures ont donc été intégrés en tant que mailles à historique dans le modèle hydrodynamique, pendant la phase de calage des paramètres du réseau hydrographique.

4. Calage et résultats du modèle

4.1. PROCÉDURE DE CALAGE

4.1.1. Les objectifs du calage et les différentes étapes

Objectifs

Cette phase correspond à la recherche de l'ensemble des valeurs des paramètres permettant d'obtenir une bonne adéquation entre les observations disponibles et les valeurs calculées par le modèle, en charges hydrauliques et en débits pour les modèles d'écoulement souterrain.

Pour les modèles spatialisés, les paramètres à ajuster sont :

- les paramètres hydrodynamiques : charges hydrauliques initiales, perméabilités et coefficients d'emmagasinement des différentes formations ;
- les paramètres du réseau hydrographique : cote du fond et pente du lit des rivières, coefficients de rugosité, paramètres des lois de seuil, épaisseur et perméabilité de colmatage du lit et des berges ;
- les paramètres du sol (zone non saturée) : capacité de stockage, partition ruissellement/infiltration et temps de percolation, qui déterminent la recharge de la nappe.

Si le calage de ces paramètres s'avère insuffisant pour reproduire correctement l'hydrodynamique de la zone d'étude, la géométrie du modèle pourra également être intégrée au processus de calage, en particulier la cote du substratum, plus difficile à mesurer.

Le calage est une procédure itérative pendant laquelle on procède par « essais – erreurs ». Cette phase permet au modélisateur d'apprécier les réactions du modèle, d'identifier les secteurs critiques, de mesurer le poids relatif des différentes composantes hydrauliques, d'apprécier leurs interactions, et d'évaluer leur contribution au fonctionnement du système aquifère. Autant que possible, les paramètres sont modifiés par couches ou par grande zone.

La qualité du calage et son évolution sont appréciées visuellement par superposition des chroniques de charge et de débit mesurées et calculées.

Pour le modèle du Tarn-et-Garonne, la priorité assignée au calage, outre la bonne restitution des chroniques piézométriques et de débit des rivières, a été de s'assurer que les pompages en nappe étaient satisfaits, en particulier pendant les périodes d'irrigation.

Les débits de pompages étant affectés à une maille de 250 m de côté, celles-ci ne doivent donc pas être dénoyées au cours de la simulation. Le modèle maillé calcule un niveau piézométrique unique pour chaque maille, qui correspond à un niveau moyen.

Il ne reflète donc pas précisément l'évolution du niveau piézométrique à proximité immédiate de l'ouvrage de pompage, qui se caractérise par un cône de rabattement dont la forme est liée aux caractéristiques hydrodynamiques de la nappe (perméabilité, coefficient d'emmagasinement) et au débit de pompage : une perméabilité et un coefficient d'emmagasinement faibles ou un débit élevé vont augmenter la taille du cône de rabattement.

Les différentes étapes

En règle générale, le calage d'un modèle hydrodynamique se fait en deux étapes.

Une première phase de calage, dite en régime permanent, porte sur un état hydraulique stabilisé n'induisant ni stockage ni déstockage d'eau dans le système aquifère, c'est-à-dire sans contribution de la capacité d'emmagasinement du milieu souterrain. Cette phase de calage est par conséquent circonscrite à la seule distribution spatiale des perméabilités et des recharges.

Les objectifs de cette première étape sont de :

- valider la géométrie du modèle ;
- ajuster les choix et hypothèses du modèle conceptuel par des validations quantifiées ;
- vérifier la cohérence des données, nombreuses et indépendantes, qui régissent le comportement hydraulique du système aquifère (recharge, perméabilités, niveaux piézométriques, débits, …).

En pratique, le calage en régime permanent permet de dégrossir la distribution des perméabilités et de retranscrire les grandes directions d'écoulements par rapport à une carte piézométrique basée sur une campagne de mesures avec un nombre de points important. Elle fournit également un premier jeu de charges initiales nécessaires aux simulations en régime transitoire.

La phase de calage en régime transitoire constitue la seconde étape du processus. Elle permet d'affiner sensiblement la distribution des perméabilités et des recharges et de déterminer la distribution spatiale des coefficients d'emmagasinement dans les formations modélisées.

- **Régime permanent**

Pour le modèle du Tarn-et-Garonne, le calage en régime permanent porte sur la situation des basses eaux de l'année 1996. Ce calage, réalisé en 2007 dans la cadre de la précédente actualisation du modèle, a été réutilisé pour fournir les données hydrodynamiques initiales (charges, perméabilités, coefficients d'emmagasinement) du modèle en régime transitoire réalisé dans le cadre de cette étude, en adaptant les données à la nouvelle extension du modèle. Les semis de perméabilité et de coefficients d'emmagasinement ont par ailleurs été simplifiés, en les calquant sur la géologie, pour les premières simulations en régime transitoire (cf. chapitre 3.4).

Le modèle ne disposant que d'une seule couche réellement aquifère et l'objectif du travail étant de reproduire les variations annuelles dans la nappe alluviale, et en particulier les niveaux piézométriques pendant la période d'irrigation (juin-septembre), il n'est pas apparu pertinent de retravailler le calage en régime permanent une fois les premières simulations en régime transitoire réalisées.

En effet, ce sont les chroniques piézométriques qui ont permis d'effectuer l'essentiel du travail de calage des paramètres hydrodynamiques (perméabilités, coefficient d'emmagasinement) et hydroclimatiques (recharge). Les non satisfactions des débits de pompage en nappe ont quant à elles nécessité d'ajuster la géométrie du modèle (cote du substratum), les calages des paramètres hydrodynamiques et hydroclimatiques ne suffisant pas à satisfaire les débits prélevés.

- **Régime transitoire**

Le calage en régime transitoire a été mené sur trois périodes distinctes :

- **octobre 2005 à septembre 2012 :** pour l'essentiel de la phase de calage (paramètres géométriques, hydrodynamiques et de la zone non saturée).

  Cette période a été choisie car les volumes et débits prélevés en nappe y sont les mieux connus et la période recouvre différents contextes climatiques.

  La période d'initialisation avant la modélisation proprement dite couvre les trois années précédant le début de la modélisation (septembre 2002 à septembre 2005).

  Une fois un calage satisfaisant obtenu, la modélisation a été prolongé jusqu'à septembre 2015 ;

- **avril et septembre 2015 :** pour le calage des paramètres concernant le réseau hydrographique.

  Les deux campagnes de mesure réalisées en 2015 ont essentiellement permis de caler les cotes de fond et les pentes du lit des rivières, les coefficients de Manning-Strickler (pour les rivières ne disposant pas d'une station de mesure du débit et de la hauteur d'eau) et les paramètres des lois de seuil.

  Ce calage s'est réalisé dans un deuxième temps afin d'avoir déjà une bonne estimation des échanges nappe-rivière pour le calage des cours d'eau ;

- **octobre 1995 à septembre 2015 :** pour valider le calage sur la période réduite et apporter quelques corrections ponctuelles.

  Comme mentionné au chapitre 3.2, la modélisation proprement dite commence après trois années de simulation d'une année hydrologique moyenne. L'année du 1er octobre 2013 au 30 septembre 2014 a servi de référence en termes de climatologie (pluie, ETP) et de débits amont des rivières.

Le pas de temps des calculs hydrodynamiques est décadaire. Pour les calculs hydroclimatiques (calcul des flux de recharge et de ruissellement), le pas de temps est journalier afin de respecter le rythme circadien de la végétation (cf. chapitre 3.5.5).

Afin d'optimiser les temps de calcul, les simulations MARTHE ont été réalisées avec un pas de temps décadaire. Pour cela, les calculs hydroclimatiques ont été découplés des calculs hydrodynamiques. Les simulations ont été réalisées sous GARDENIA au pas de temps journalier pour chacune des zones de sol identifiées. Les chroniques de recharge journalière obtenues ont alors été sommées par décade afin de fournir les chroniques d'entrée de la modélisation MARTHE.

Le temps de calcul nécessaire pour les simulations en régime transitoire sur la période 1995-2015 est d'environ 2 h 30 sur un PC Intel Quadri-Core cadencé à 2.6GHz équipé de Windows 7 64 bits et de 8 Go de RAM.

Convergence numérique du modèle

La convergence des calculs itératifs est contrôlée par plusieurs critères, principalement les écarts de charge moyens et maximaux entre deux itérations successives et les débits résiduels d'erreur (global sur l'ensemble du modèle et ponctuel dans chacune des mailles). En pratique, l'état de convergence d'un modèle est principalement évalué par des indicateurs portant sur le bilan hydraulique des différentes couches, et plus particulièrement sur le déséquilibre de bilan dans chaque maille, chaque couche, et pour l'ensemble du modèle.

4.1.2. Paramètres de calage

Les paramètres de calage sont des paramètres complexes à mesurer, pour lesquels il n'est pas envisageable d'obtenir une valeur pour chaque maille du modèle. Il peut s'agir aussi de paramètres pour lesquels les données disponibles présentent une certaine incertitude, que le processus de calage sert à évaluer.

Paramètres hydrodynamiques

Les valeurs de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement des différentes formations, connues ponctuellement ou inconnues pour certaines formations, sont des valeurs essentielles à ajuster durant le calage.

La modification de la perméabilité va principalement affecter la vitesse d'écoulement et donc la cote de la charge hydraulique tandis que la variation du coefficient d'emmagasinement va modifier l'amplitude des variations de charges dans les chroniques piézométriques calculées.

Le semis des charges hydrauliques initiales (piézométrie initiale) a également été mis à jour pendant la procédure de calage, en utilisant le semis des charges hydrauliques calculées pour l'antépénultième pas de temps du modèle (basses eaux, au moment de la campagne de mesures de septembre 2015). En effet :

- chaque itération du calage permet de se rapprocher du niveau de la nappe observé, avec une meilleure prise en compte des paramètres hydrodynamiques que l'interpolation réalisée initialement ;
- d'une année sur l'autre, le niveau à l'étiage varie peu. On peut ainsi utiliser le niveau simulé pour les basses eaux 2015 comme niveau des basses eaux en début de simulation.

Recharge

Les paramètres de recharge, déterminés par grandes zones, doivent être ajustés pour permettre de restituer les débits des cours d'eau et les fluctuations piézométriques.

En particulier, l'ajustement du temps de transfert dans la zone non saturée, via le paramètre de la durée de ½ percolation (cf. chapitre 3.5.5), permet d'ajuster la forme des chroniques piézométriques :

- un transfert rapide dans la zone non saturée se traduira par des variations rapides du niveau piézométrique en réponse à de fortes précipitations (nombreux « pics ») ;
- un transfert plus lent se traduira quant à lui par une convolution des événements pluvieux et un « lissage » de la chronique piézométrique.

Réseau hydrographique et échanges nappe-rivière

Le calage des paramètres liés aux relations hauteur-débit des rivières (cotes de fond et pente du lit, coefficients de Manning-Strickler des rivières non instrumentées, hauteurs et facteurs débit des lois de seuil) a été réalisé en comparant les hauteurs et débits simulés pour la 2ème décade d'avril 2015 et la 1ère décade de septembre 2015 aux mesures des cotes de fils d'eau réalisées lors des campagnes de terrain correspondantes (cf. chapitres 3.6.12 et 0).

Les paramètres influençant les échanges nappe-rivière proprement dits, l'épaisseur et la perméabilité de colmatage du lit et des berges de la rivière, sont inconnus. La perméabilité du lit a été utilisée comme paramètre de calage pour restituer les fluctuations piézométriques observées sur les ouvrages situés en bordure de cours d'eau ainsi que les chroniques de débit des cours d'eau, notamment en étiage.

Paramètres géométriques

Malgré l'important travail de modélisation géologique réalisé (cf. chapitre 0), il subsiste des incertitudes importantes sur l'épaisseur des alluvions et donc la cote du substratum. Deux des sources d'incertitudes principales sont liées à la géométrie complexe des terrasses alluviales et à l'hypothèse forte que les forages réalisés dans les alluvions s'arrêtent au toit de la molasse et pas avant.

Ce paramètre étant clé pour déterminer la quantité d'eau disponible pour les prélèvements, il a fait l'objet d'un calage afin de satisfaire les pompages réalisés.

4.1.3. Données de calage

Les observations de terrain utilisées comme références de calage ont été décrites au chapitre 3.8. On distingue :

- les mesures ponctuelles :
  - nappe : carte piézométrique d'octobre 1996 (382 points de mesure),
  - rivières : mesures de la cote du fil de l'eau en avril puis septembre 2015 (204 points de mesure) ;
- les chroniques temporelles :
  - nappe : 36 chroniques piézométriques (10 en suivi automatique, 26 en suivi manuel),
  - rivières : 15 stations de mesure du débit (dont 4 permettant le calage) et 11 stations de mesure de la hauteur d'eau.

4.1.4. Déroulement du calage

La phase de calage est un travail de longue haleine qui a été mené par une équipe de modélisateurs, avec l'appui régulier du service de modélisation hydrodynamique de la Direction Eau, Environnement et Écotechnologie du BRGM, située à Orléans.

Ces regards « extérieurs » ont permis d'explorer des pistes de calage variées et de prendre du recul par rapport aux difficultés rencontrées au quotidien dans la manipulation des nombreux fichiers informatiques constituant le modèle. Un contact direct avec le concepteur du logiciel MARTHE a permis à la fois d'optimiser l'extraction des informations nombreuses fournies par le

logiciel et de bénéficier de ses conseils pour l'utilisation des derniers modules développés (lois de seuil dans les rivières notamment).

Les premiers essais de modélisation ont été réalisés en régime permanent, puis le travail de calage proprement dit a été rapidement abordé en régime transitoire. Afin de limiter les temps de calcul, les premières opérations de calage des paramètres géométriques et hydrodynamiques (cote du substratum, perméabilité et coefficient d'emmagasinement) ont été réalisées sur une année hydrologique (2006-2007) puis deux (2010-2012), soit 36 puis 72 pas de temps (décades). Bien que la nappe alluviale du Tarn-et-Garonne présente une faible inertie (temps de réaction assez court suite aux épisodes de recharge), il est vite apparu nécessaire d'étendre la simulation sur plusieurs années hydrologiques aux caractéristiques différentes. Ainsi, le calage des paramètres géométriques, hydrodynamiques et hydroclimatiques (temps de ½ percolation en particulier) ont été réalisés sur la période 2005-2012 (cf. chapitre 4.1.1).

Lorsque les valeurs de charges calculées ont commencé à se rapprocher de manière satisfaisante des valeurs observées, le calage a été étendu à la période 2005-2015. Les paramètres du réseau hydrographique ont alors été calés sur les états mesurés en avril et septembre 2015.

Une fois le calage finalisé, la modélisation a été réalisée sur l'intégralité de la période 1995-2015. Des ajustements ponctuels ont été réalisés pour reproduire les observations de la période 1995-2005.

Les principales difficultés rencontrées pendant la phase de calage ont été :

- une fraction considérable (jusqu'à 33 %) des prélèvements en nappe imposés dans le modèle sur la base du travail présenté au chapitre 3.7 ne pouvait être satisfaite en modifiant uniquement les paramètres hydrodynamiques du modèle (perméabilité et coefficient d'emmagasinement). L'Illustration 65 présente un résultat de modélisation où 118 pompages, soit 1/8 des ouvrages exploités, sont dénoyés dans le modèle alors que le prélèvement a pu être réalisé en pratique ;
- avant la refonte complète de la géométrie des cours d'eau, à partir des relevés de terrain d'avril puis septembre 2015, la position des rivières par rapport à la nappe alluviale était estimée de manière trop imprécise et provoquait des problèmes de débordements (sorties d'eau des mailles aquifères, cf. Illustration 66) en cas de surestimation de la cote de la rivière et de dénoyages (mailles à sec, cf. Illustration 67) en cas de sous-estimation de la cote du fil d'eau. La comparaison des valeurs estimées dans un premier temps et des relevés de terrain a montré un écart régulièrement pluri-métrique (cf. Illustration 68).

Les problèmes de dénoyage sont étroitement liés à l'épaisseur des alluvions issue du modèle géologique. L'épaisseur est faible et présente de fortes variations, entrainant des discontinuités hydrauliques, comme le montre la coupe de l'Illustration 69. Les alluvions y sont discontinues, peu épaisses et très pentues (notamment à l'ouest), amenant à des désaturations des mailles en aval des discontinuités. En effet, en amont de celles-ci, les effets de pente et la faible perméabilité de la molasse vont avoir tendance à faire déborder le niveau de la nappe. Ces débordements sont ensuite transférés au réseau hydrographique le plus proche, sans possibilité de réinfiltration dans la configuration utilisée du logiciel.

Ces problèmes ont été partiellement résolus par la modification de la cote du substratum durant la phase de calage (cf. chapitre 4.2.3).

L'important travail de révision du réseau hydrographique, décrit au chapitre 3.6 et basé sur les campagnes de terrain d'avril et septembre 2015, a quant à lui permis d'aboutir à une géométrie

fidèle à la réalité de terrain et de résoudre l'essentiel des problèmes soulevés initialement par les rivières.

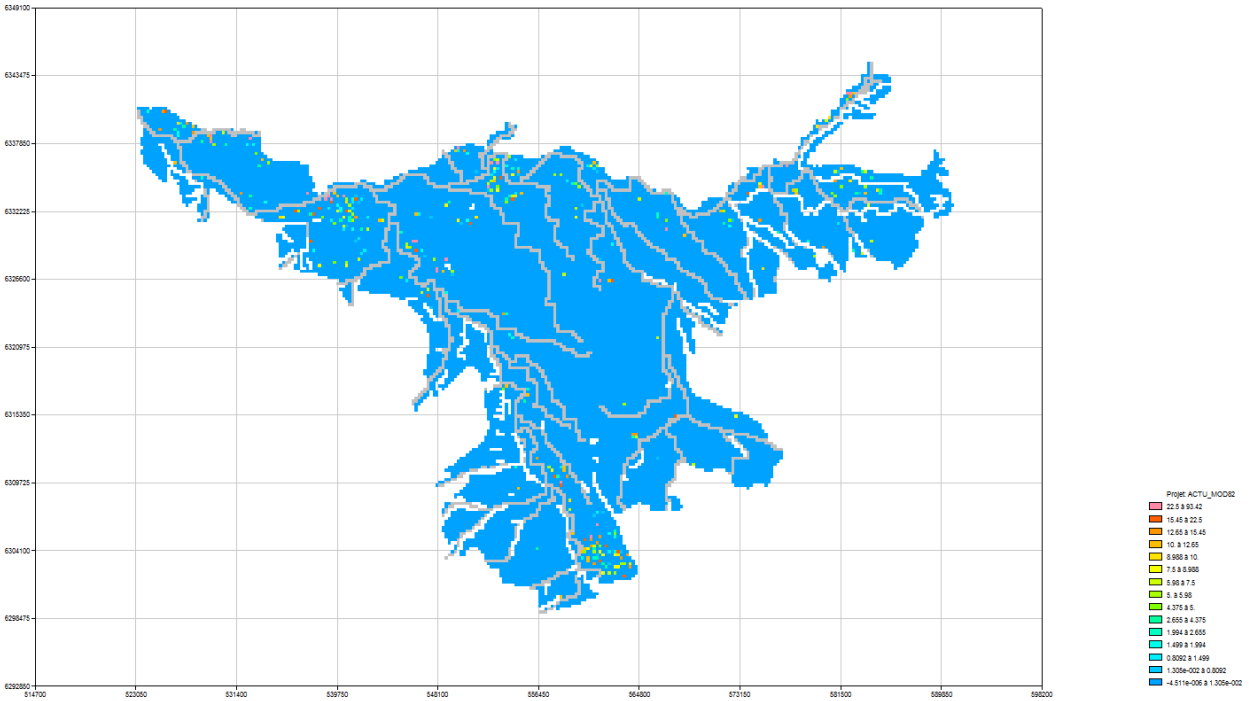


Illustration 65 – 118 pompages non satisfaits (pixels colorés).

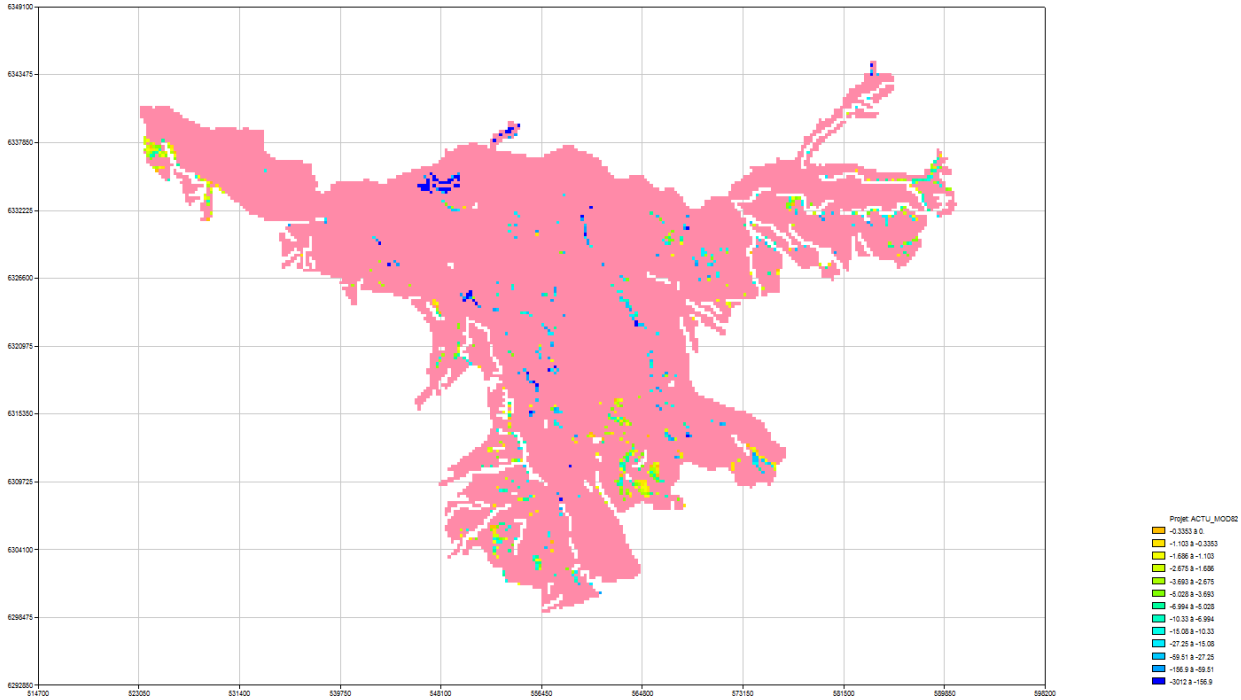


Illustration 66 – 802 mailles en débordement (pixels colorés).

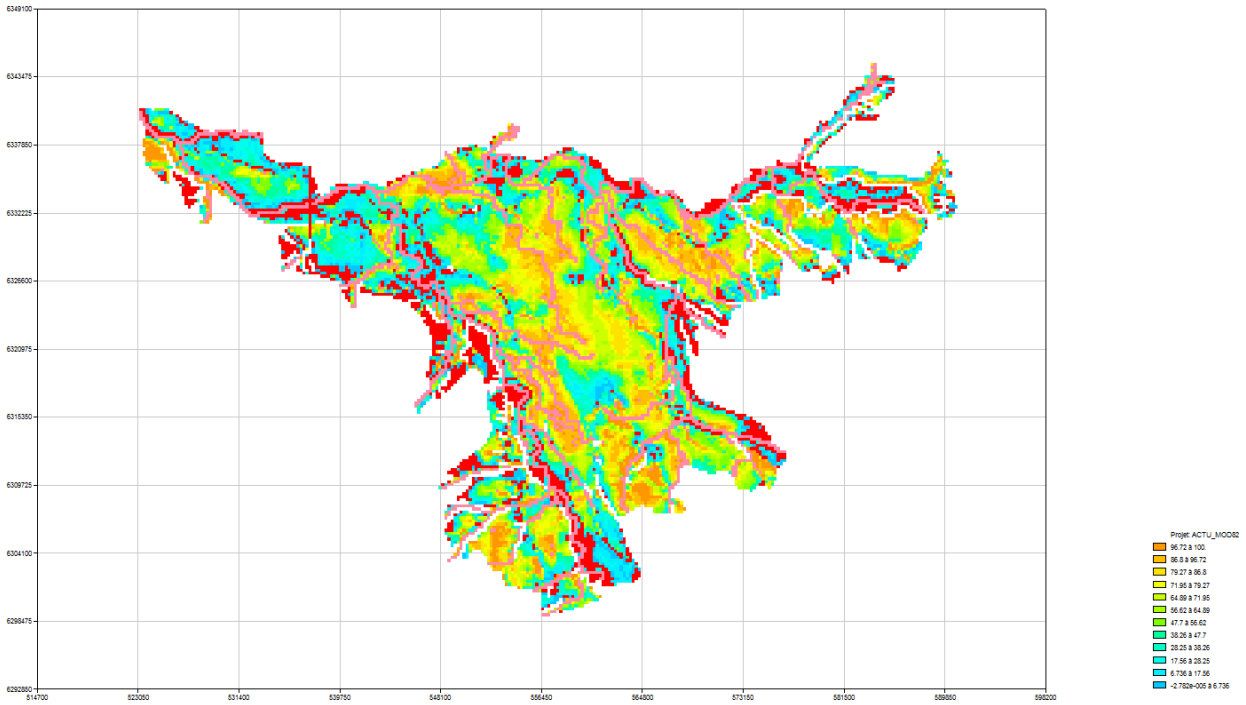


Illustration 67 – 2247 mailles quasi-dénoyées (pixels rouges).

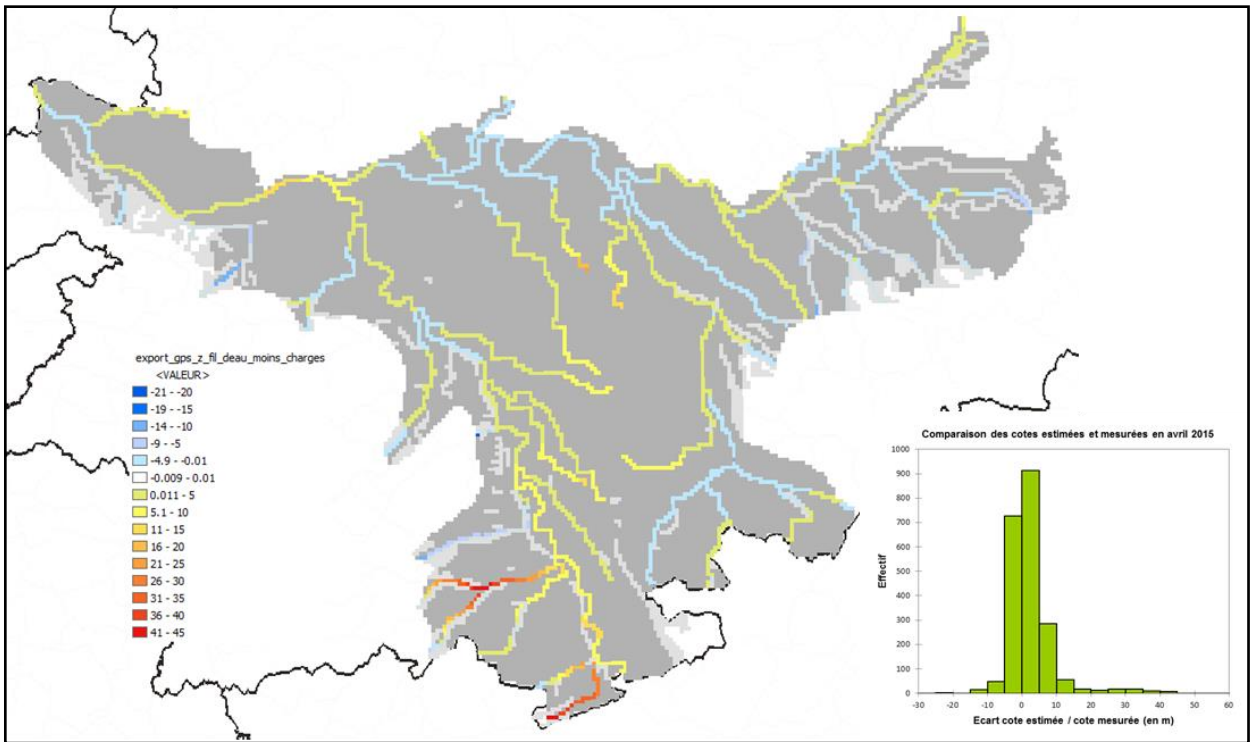


Illustration 68 – Comparaison cotes fils d'eau avant/après campagne d'avril 2015.

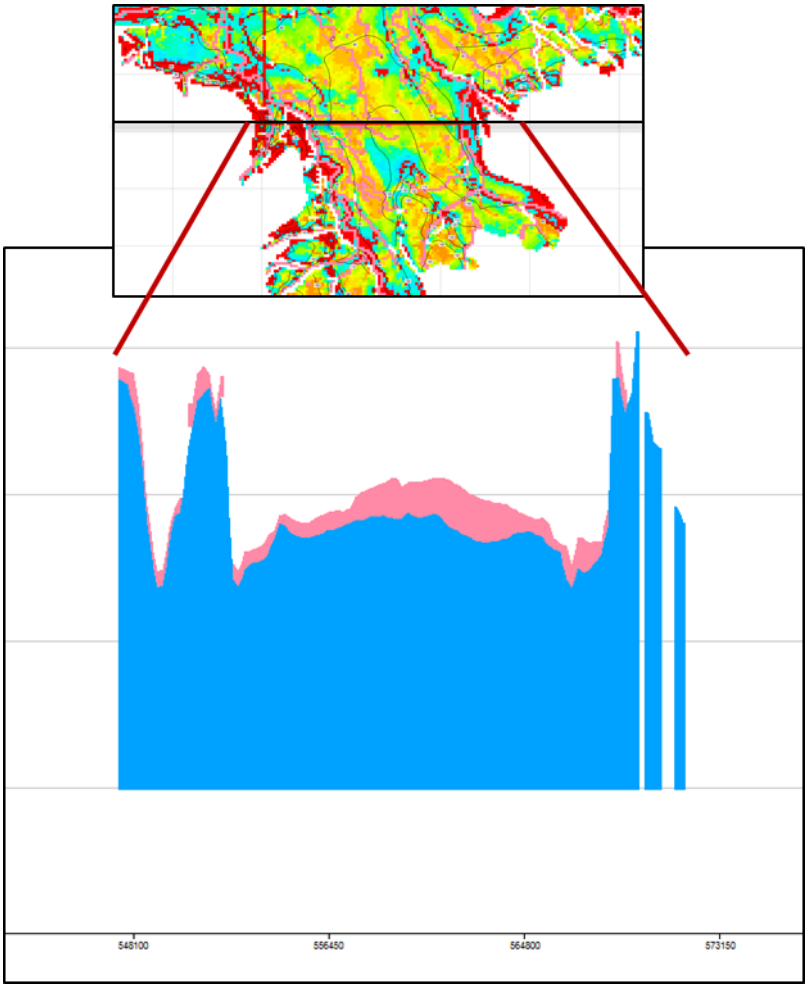


Illustration 69 – Coupe du modèle montrant la morphologie des alluvions sur les pentes.

4.2. CALAGE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES

4.2.1. Paramètres hydrodynamiques

Le calage a été conduit en travaillant initialement par zones calquées sur des entités hydrogéologiques jugées homogènes (les différentes terrasses alluviales).

En règle générale, pour une modélisation hydrodynamique, des valeurs uniformes sont affectées aux paramètres de calage de ces zones, ce qui permet d'aboutir à un modèle relativement simple en termes de distribution spatiale des paramètres hydrogéologiques. Une telle approche favorise la robustesse du modèle, notamment pour les simulations prévisionnelles ultérieures.

Dans le cas des terrasses alluviales du Tarn-et-Garonne, deux contraintes fortes ont conduit à une approche différente :

- les connaissances hydrogéologiques acquises dans le secteur d'étude mettent en évidence une forte hétérogénéité spatiale des propriétés hydrodynamiques à l'intérieur de chaque terrasse (cf. chapitre 3.4.2) ;

- l'objectif du modèle est de pouvoir fournir un outil d'aide à la gestion de la ressource en eaux souterraines basé sur un découpage de la zone modélisée en « casiers » gérés de manière indépendante les uns des autres.

En conséquence, une approche visant à discrétiser les grandes zones de perméabilité issues des connaissances géologiques et hydrogéologiques afin de restituer précisément la complexité des observations de terrain (chroniques piézométriques) a été adoptée.

Moins robuste car fortement dépendante de la qualité des observations, cette approche permet néanmoins de prendre en compte les hétérogénéités spatiales au sein d'une même terrasse afin d'adapter les calculs prévisionnels à chaque casier de gestion.

Perméabilités

Le processus de calage a abouti à la conception de zones avec 28 valeurs de perméabilité distinctes comprises entre 10^{-7} et 10^{-2} m/s (cf. Illustration 70).

Globalement, dans les basses plaines du Tarn et de la Garonne, les valeurs de perméabilité sont comprises entre 10^{-3} et 10^{-2} m/s. Dans la basse terrasse et dans la basse plaine de l'Aveyron, les perméabilités descendent jusqu'à 10^{-4}, voire 10^{-5} m/s, la fraction argileuse des alluvions étant vraisemblablement plus importante à ces endroits.

Dans les hauts niveaux de terrasses, encore plus altérés, et les zones où la molasse affleure, aucun point d'observation ne permet de caler la perméabilité. Les valeurs initiales respectives de 5.10^{-6} et 10^{-7} m/s ont donc été conservées.

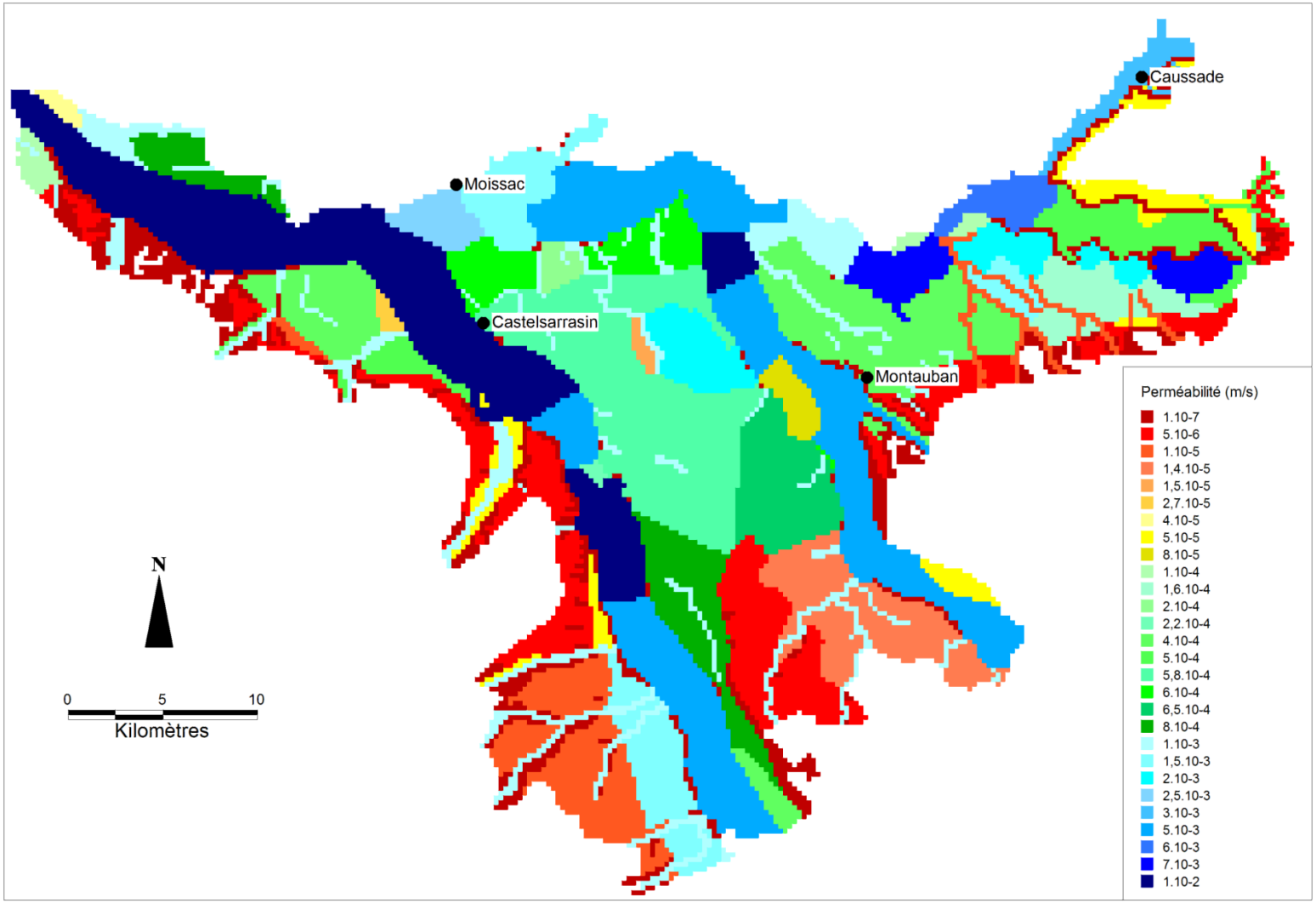


Illustration 70 – Carte des perméabilités de calage du modèle en régime transitoire.

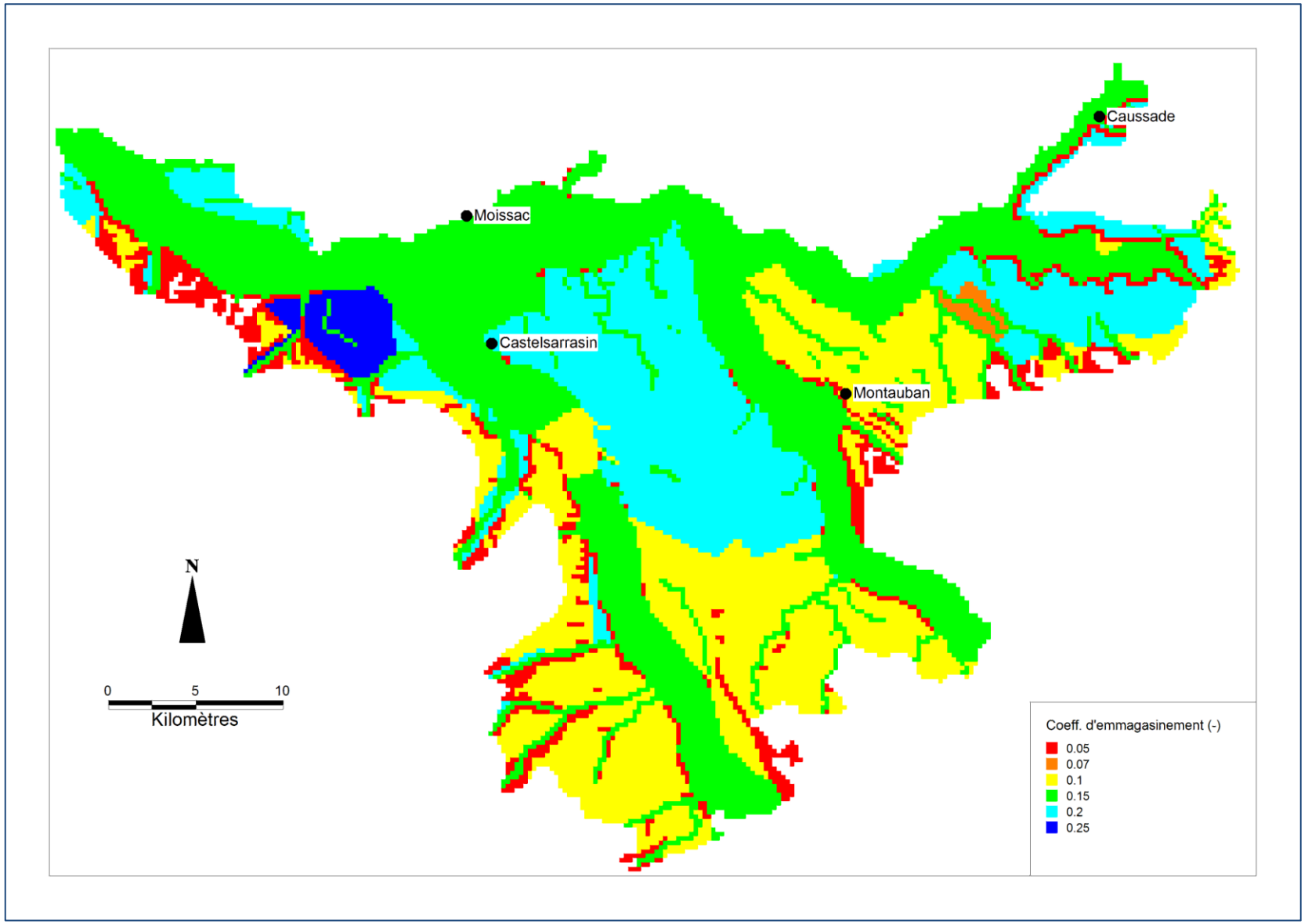


Illustration 71 – Carte des coefficients d'emmagasinement de calage en période transitoire.

Coefficients d'emmagasinement

Le processus de calage a abouti à la a abouti à la création de 6 zones de coefficient d'emmagasinement – ou porosité efficace (cf. Illustration 71).

Les valeurs attribuées à ces zones varient de 5 à 25 % : la valeur minimale de 5 % correspond aux zones d'affleurements des formations molassiques, les basses plaines présentent des porosités efficaces de 15 %, et les basses terrasses des valeurs variant de 10 à 20 %.

La plaine de Saint-Nicolas-de-la-Grave, située dans la basse terrasse de la Garonne, en rive gauche, au sud et à l'ouest de l'étendue d'eau formée par la retenue du barrage de Malause, présente le coefficient d'emmagasinement le plus fort (25 %).

4.2.2. Paramètres hydroclimatiques

Le calage des paramètres hydroclimatiques est venu compléter le calage des paramètres hydrodynamiques afin de reproduire les observations liées aux chroniques piézométriques.

Les choix détaillés au chapitre 3.5.5 n'ont pas été remis en cause, en particulier :

- utilisation d'une capacité du sol progressif plutôt qu'un modèle de type réserve utile ;
- réservoir sol vide en début de simulation (basses eaux / fin de la période d'irrigation) ;
- pas de ruissellement superficiel.

Les modifications de la capacité du sol progressif n'ont pas permis d'améliorer les simulations. La valeur initiale de 50 mm a donc été conservée sur l'ensemble de la zone modélisée.

Le seul paramètre ayant fait l'objet de modifications pendant la phase de calage est donc le temps de ½ percolation. La valeur initiale de 30 jours s'est avérée pertinente pour la plus grande partie de la zone modélisée (cf. Illustration 72).

Dans certaines zones, la rapidité des réactions aux événements pluvieux des piézomètres ont conduit à abaisser le temps de ½ percolation à 15 jours. Ces zones sont :

- la basse plaine et les terrasses de l'Aveyron, en amont du confluent avec la Lère ;
- les terrasses en rive gauche de la Garonne, en amont du confluent avec le Lambon ;
- la basse plaine du Tarn entre Montbeton et Montauban, autour du piézomètre « Castel ».

À l'inverse, dans la plaine de Saint-Nicolas-de-la-Grave, le niveau du piézomètre « Pomiès » varie plus lentement. Un récent contrôle de l'ouvrage n'ayant pas mis en évidence de colmatage, le temps de ½ percolation a été augmenté à 60 jours afin que la simulation reproduise les observations.

Cette zone avait déjà nécessité l'attribution d'un coefficient d'emmagasinement supérieur à celui observé dans le reste de la zone modélisée. Deux hypothèses sont envisageables :

- cette zone de basse terrasse de la Garonne, aux frontières bien définies (pas de continuité en amont et en aval, la basse terrasse est très peu développée en rive gauche de la Garonne) présente des caractéristiques pédologiques et lithologiques spécifiques ;

- bien que l'aménagement du barrage de Malause soit censé être neutre pour la nappe alluviale (cf. chapitre 3.7.6), les niveaux imposés par les contre-canaux en amont de la retenue contribuent à lisser les variations du niveau de la nappe.

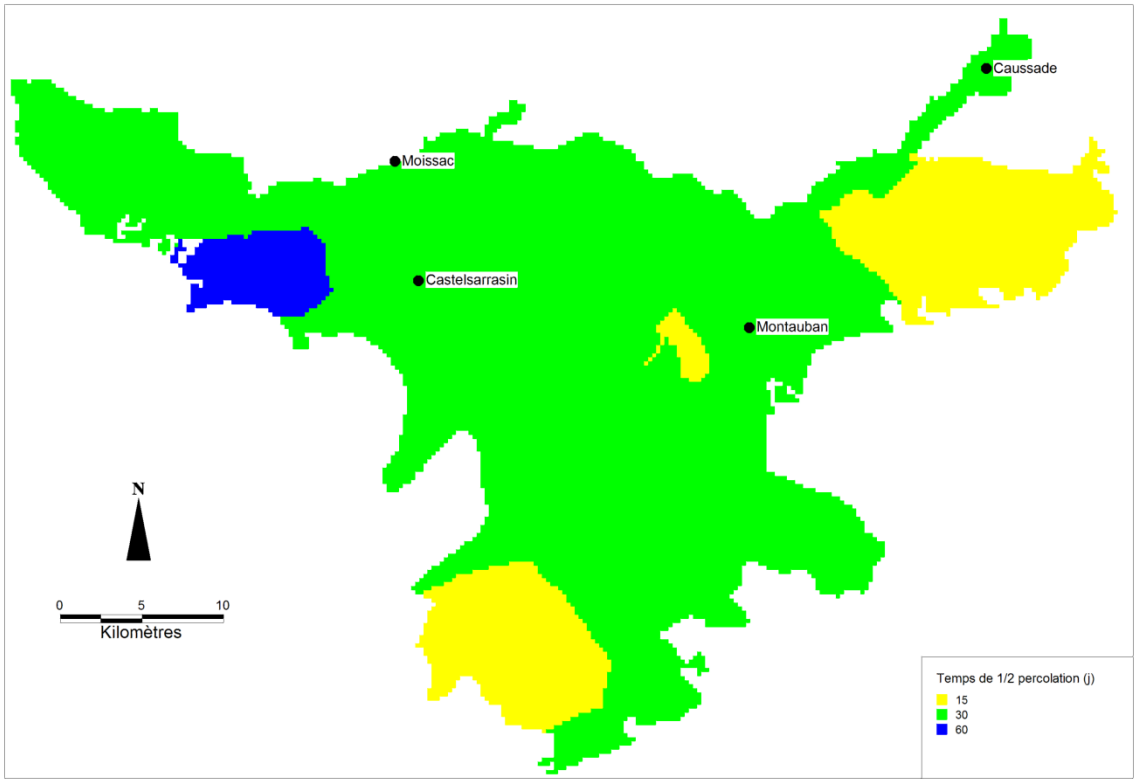


Illustration 72 – Carte des temps de ½ percolation de calage en période transitoire.

4.2.3. Paramètres géométriques

Les difficultés liées aux pompages non satisfaits, aux débordements et au dénoyage de certaines zones du modèle (cf. chapitre 4.1.4) n'ont pas été résolues par le calage des paramètres hydrodynamiques et hydroclimatiques. Elles sont liées à la géométrie complexe des terrasses alluviales et à l'hypothèse forte que les forages réalisés dans les alluvions s'arrêtent au toit de la molasse et pas avant.

Afin, en particulier, de satisfaire les pompages effectivement réalisés dans la nappe entre 2006 et 2012, il a donc été nécessaire de considérer la cote du substratum des alluvions issues du modèle géologique comme un paramètre de calage.

Dans un premier temps, un abaissement de la cote du substratum sur l'ensemble de la zone modélisée a été réalisé. Dix valeurs d'abaissement, de 1 à 10 m, ont été testées (cf. Illustration 73 et Illustration 74). La rupture de pente se situant autour de 4 m, c'est cette valeur d'abaissement global qui a été retenue. Cette valeur coïncide avec les travaux réalisés dans le cadre de la précédente version du modèle.

La cote du substratum a ensuite été calée de manière locale afin de satisfaire les pompages réalisés entre 2006 et 2012 (cf. Illustration 75). En pratique, des allers-retours entre le calage des paramètres hydrodynamiques et le calage de la cote du substratum ont été nécessaires.

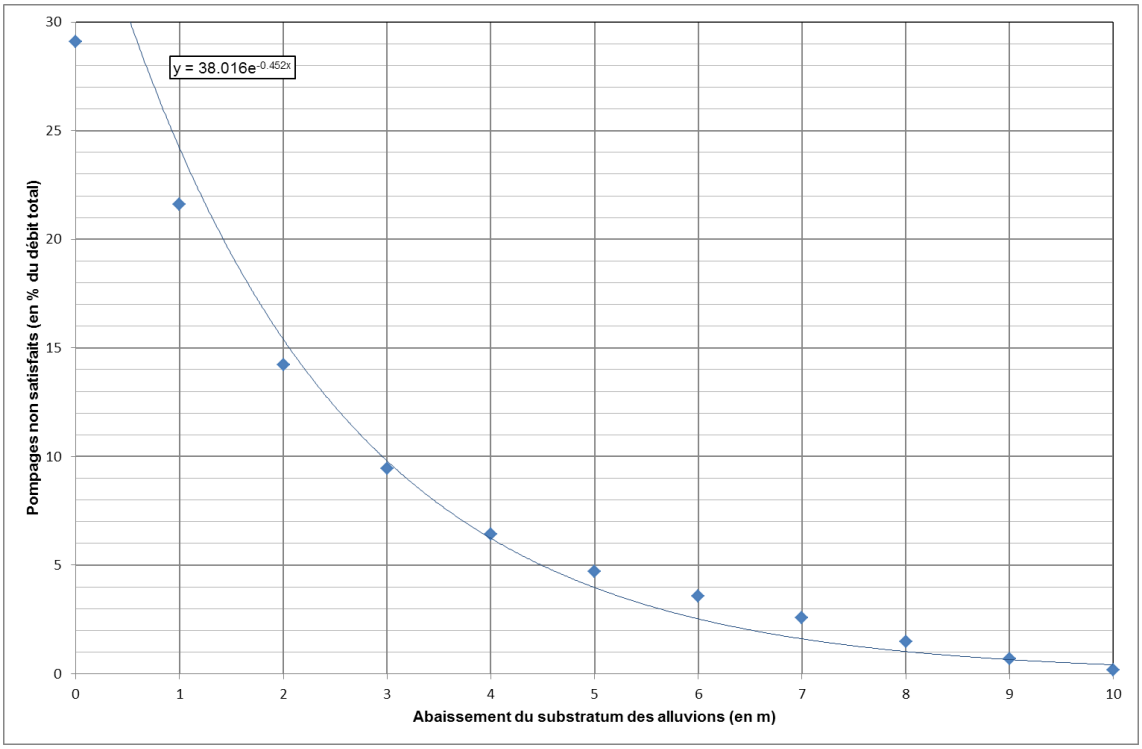


Illustration 73 – Proportion de pompages non satisfaits en fonction de l'épaisseur des alluvions.

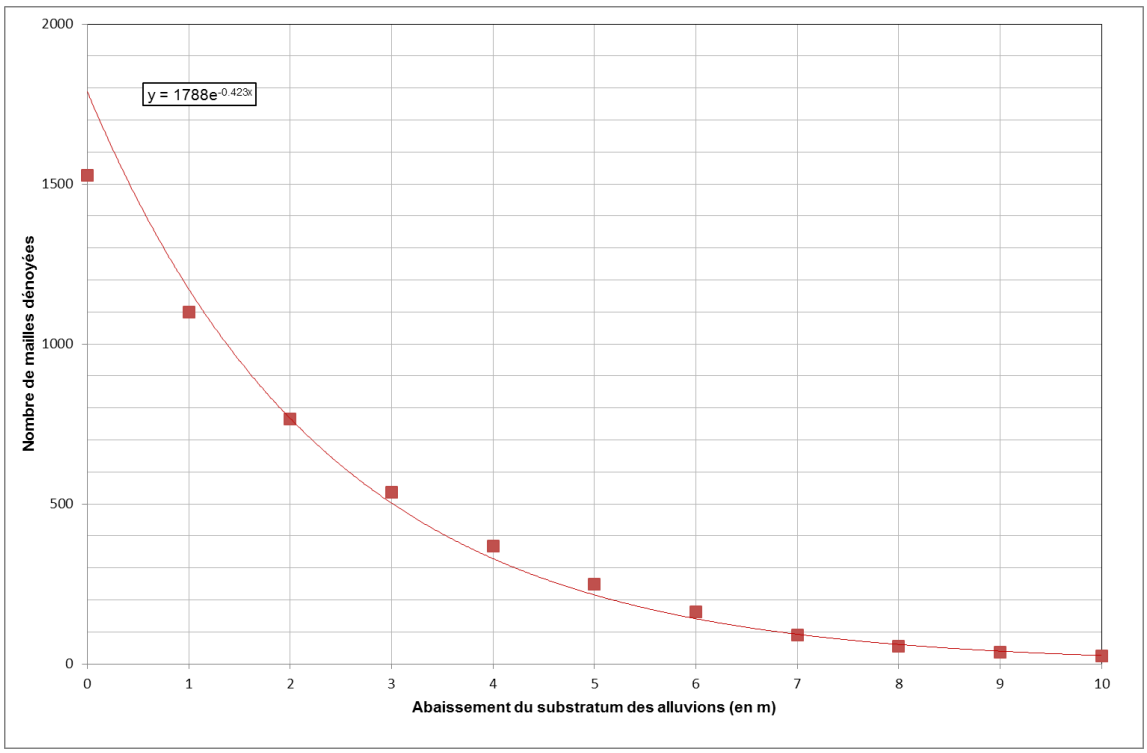


Illustration 74 – Nombre de mailles dénoyées en fonction de l'épaisseur des alluvions.

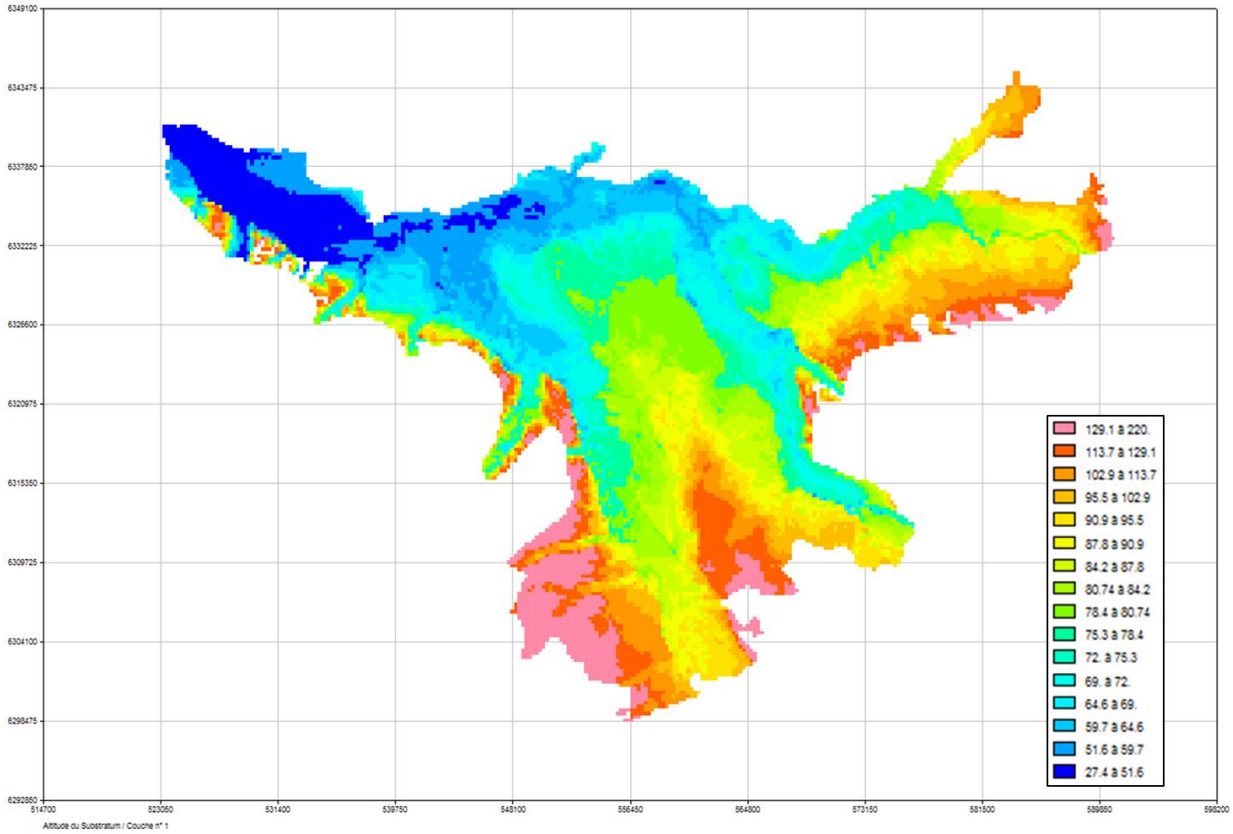


Illustration 75 – Cote du substratum des alluvions issue du calage en régime transitoire.

4.2.4. Paramètres hydrographiques

Paramètres des lois hauteur-débit

Une fois les paramètres géométriques, hydrodynamiques et hydroclimatiques calés sur la période 2005-2012, la modélisation a été prolongée jusqu'en 2015 afin de caler les paramètres du réseau hydrographique sur les campagnes de mesures réalisées en avril et septembre 2015.

Ce calage nécessite de connaître précisément le débit des cours d'eau en avril et septembre 2015 sur toutes les mailles où des mesures de la cote du fil d'eau ont été réalisées. Les paramètres des lois hauteur-débit ont ainsi pu être calés grâce à la connaissance de deux états distincts (hautes eaux hors crue et basses eaux 2015).

Cinq paramètres ont ainsi été calés :

- la hauteur des seuils et le facteur débit de la loi de seuil, pour les tronçons de rivière concernés (cf. chapitre 0) ;
- le coefficient de rugosité dans les cours d'eau ayant fait l'objet de mesures de terrain mais ne disposant pas d'une station de mesure de la hauteur d'eau (Arrats, Gimone, Ayroux, Lambon, Sère) (cf. chapitre 3.6.12);
- la cote de fond et la pente du lit dans les tronçons de rivières ayant fait l'objet de mesures de terrain et régis par une loi de Manning-Strickler (cf. Illustration 76 et Illustration 77).

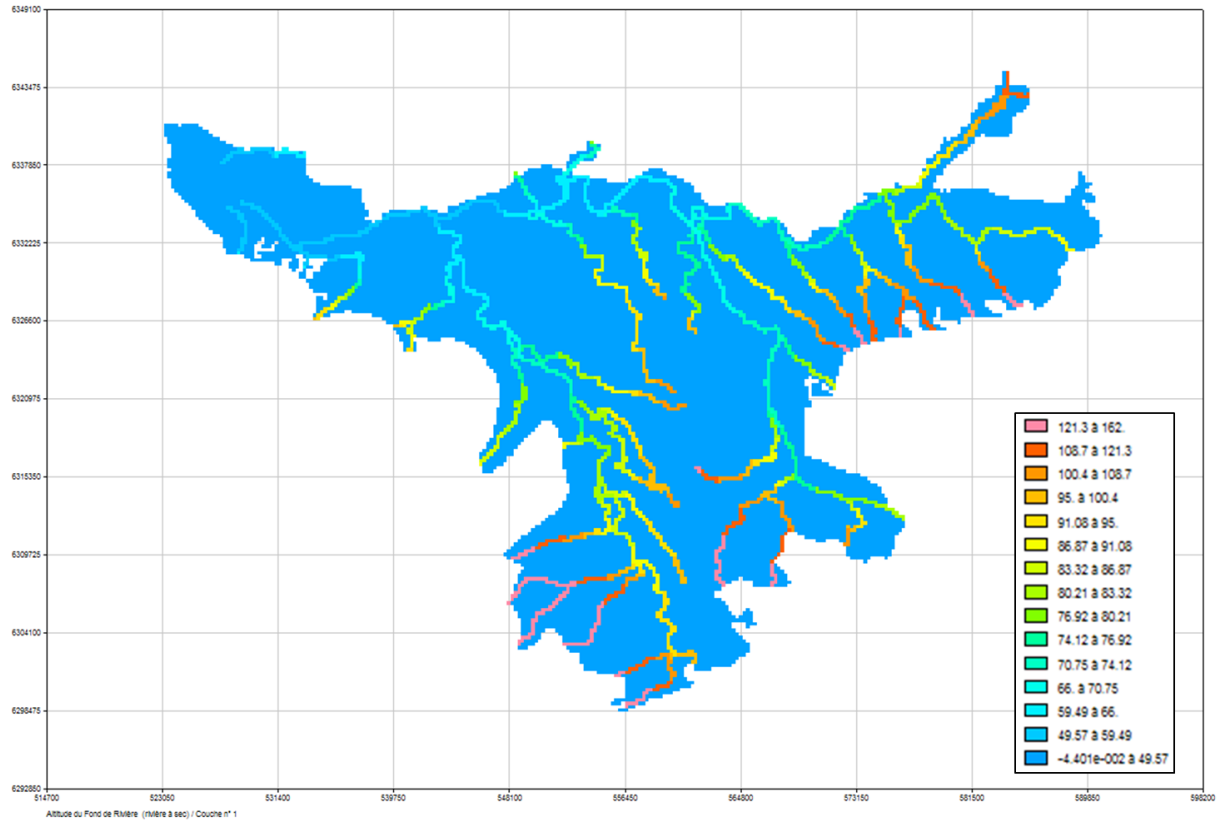


Illustration 76 – Cotes de fond du lit des rivières après calage.

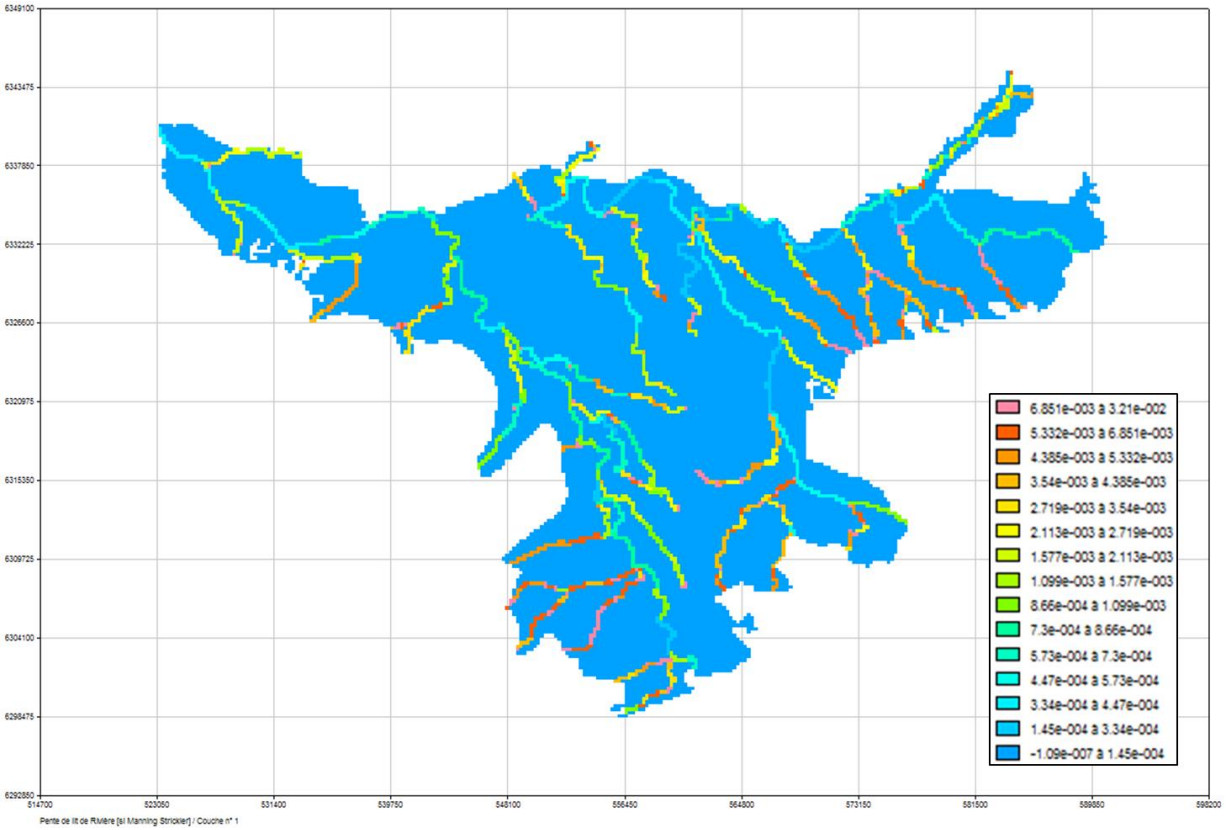


Illustration 77 – Pente du lit des rivières après calage.

Un ajustement du coefficient de rugosité sur les rivières prenant naissance dans le sud de la plaine alluviale entre Tarn et Garonne (Fronton - Rival, Fabas - Margasse, Rieu Tort, Vergnet, Tauris, Sandrune - Pantagnac et Garouille - Verdié) s'est avéré nécessaire. En effet, le coefficient de 0,1 imposé initialement créait de trop fortes variations et entraînait localement une divergence des calculs. Sa valeur a donc été abaissée à 0,06 sur ces cours d'eau secondaires non instrumentés et non mesurés.

Paramètres des échanges nappe-rivière

Dans le logiciel MARTHE (cf. Annexe 10), les échanges nappe-rivière sont conditionnés dans chaque maille rivière du modèle par :

- le niveau piézométrique (niveau de la nappe) ;
- le niveau d'eau dans la rivière ;
- la géométrie du tronçon de rivière : longueur, largeur, cote de fond ;
- la perméabilité (K_R) et l'épaisseur (e_R) de colmatage du lit et des berges de la rivière.

La géométrie des rivières ayant été définie (longueur, largeur) ou calée (cote de fond) au préalable, des essais de calage de la perméabilité et de l'épaisseur de colmatage du lit et des berges ont été réalisés afin d'ajuster l'influence du niveau des rivières sur les piézomètres situés à proximité de celles-ci : plus le rapport K_R/e_R est élevé, plus le débit d'échange entre la nappe et la rivière sera élevé et plus les chroniques de niveaux de la rivière et de la nappe seront similaires dans l'amplitude et la synchronisation des variations.

Parmi les piézomètres suivis automatiquement, pour lesquels le nombre et la fréquence de mesures sont suffisants, « Lilou » et « Boutoli » sont proches de la Garonne. La modélisation réalisée dans un premier temps avec un fil d'eau constant a mis en évidence que le niveau de la nappe mesuré par ces ouvrages était conditionné par les fluctuations du niveau d'eau dans la Garonne.

Les essais de calage de la perméabilité et de l'épaisseur de colmatage du lit et des berges dans cette zone (Garonne amont) n'ont pas été concluants, les modifications introduites localement créant des problèmes de divergence numérique. Les variations simulées sur le piézomètre « Lilou », le plus proche de la Garonne, étant néanmoins relativement conformes aux observations, les paramètres choisis initialement (cf. chapitre 3.6.14) ont donc été conservés.

4.2.5. Cas particulier de la retenue de Malause

La prise en compte du barrage de Malause a nécessité d'autres adaptations que la définition des paramètres de la loi de seuil sur les tronçons de rivière concernés (cf. chapitre 0). En effet, afin de limiter l'impact de la retenue sur la nappe alluviale, des digues d'encagement et des contre-canaux ont été aménagés en amont de la retenue (cf. chapitre 3.7.6).

Afin de prendre en compte ces aménagements, les modifications suivantes ont été apportées à la modélisation de la zone :

- le niveau de la nappe a été fixé par la création de mailles à potentiel imposé sur les 46 mailles de la Garonne (38) et du Tarn (8) en amont du barrage de Malause où les contre-canaux sont présents ;

- le niveau imposé de la nappe (cf. Illustration 78) a été déterminé par interpolation linéaire sur la longueur des tronçons de rivière entre :
  - le niveau de la Garonne et du Tarn à l'endroit où débutent les contre-canaux, soit 64,5 m NGF (niveau imposé par le barrage de Malause) ;
  - le niveau de la Garonne immédiatement en aval du barrage de Malause, soit 56,1 m NGF (niveau imposé par le seuil n°1 de Golfech) ;
- la perméabilité de colmatage a été abaissée à 10^{-7} m/s et l'épaisseur de colmatage augmentée à 1 m pour refléter la présence des digues d'encagement et limiter le drainage de la rivière par les contre-canaux.

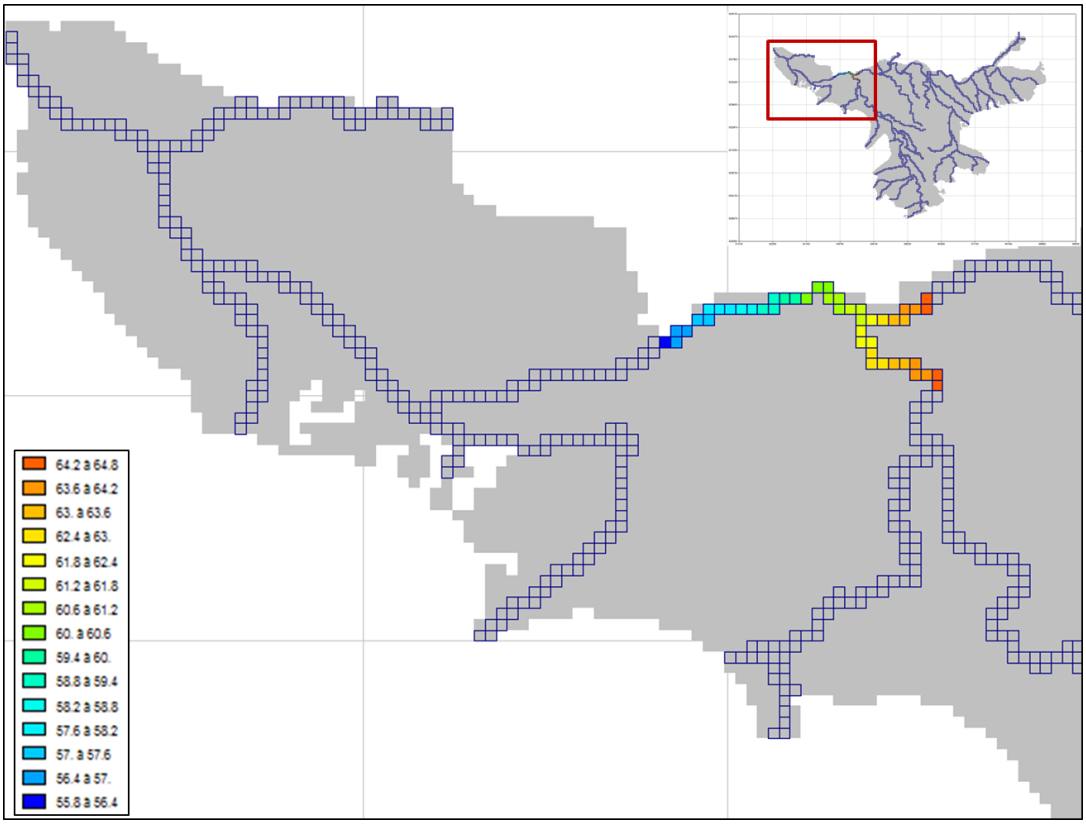


Illustration 78 – Niveaux de la nappe alluviale imposés par les contre-canaux de Malause.

4.2.6. Charges et débits initiaux

La piézométrie initiale a été ajustée à chaque itération du modèle en raison des éléments présentés au chapitre 4.1.2. Le semis de charges hydrauliques simulé pour début septembre 2015 a ainsi été utilisé comme semis de charges initiales dans la simulation suivante.

Les niveaux à l'étiage variant peu, à l'échelle de l'ensemble du modèle, la carte piézométrique reste comparable à celle de 1996 (cf. Illustration 79 et Illustration 19). Dans certains secteurs, les écarts sont néanmoins supérieurs au mètre (cf. Illustration 80), avec des zones de sous-estimation initiale de la piézométrie (Garonne aval par exemple) et des zones de surestimation initiale (terrasse entre Tarn et Garonne notamment).

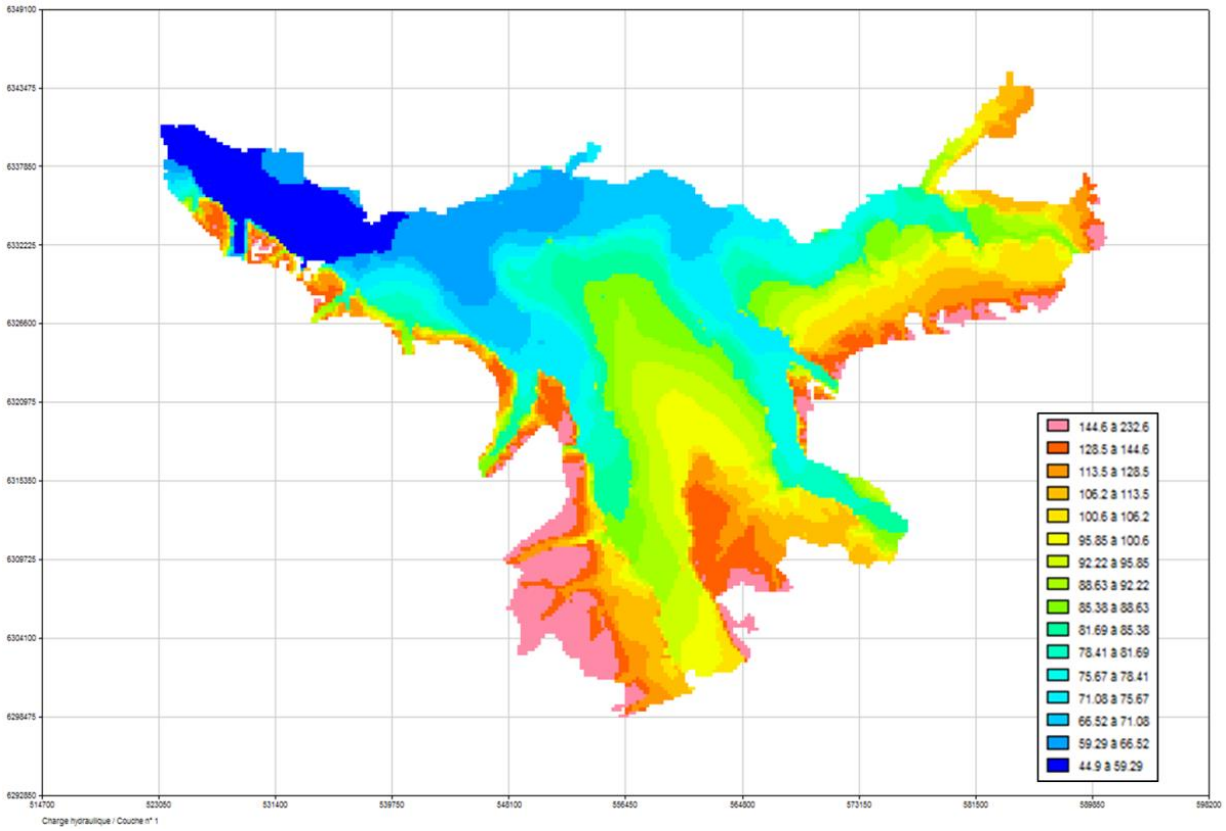


Illustration 79 – Charges hydrauliques initiales en fin de calage.

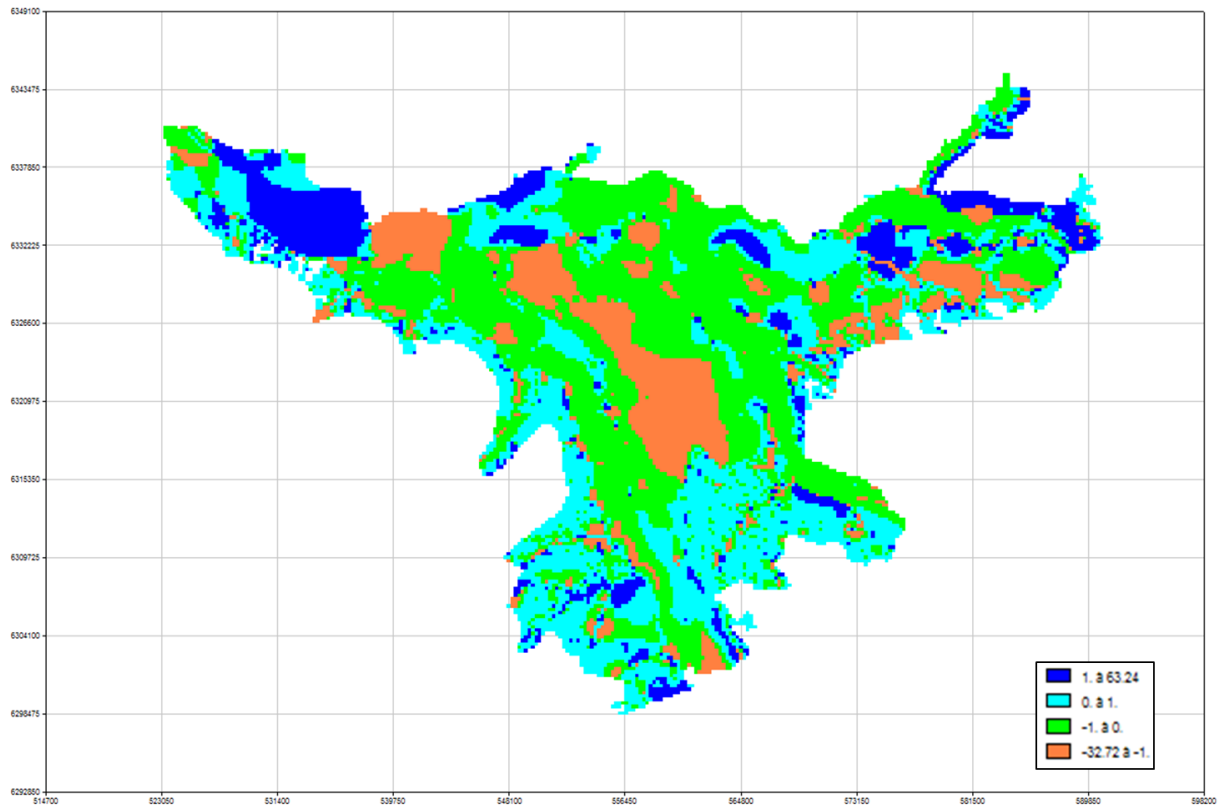


Illustration 80 – Écarts charges basses eaux simulées – charges 1996 interpolées.

De la même manière, le semis des débits initiaux dans chaque maille rivière, utilisé pour initialiser à la fois les débits et les hauteurs dans les cours d'eau (via les lois hauteur-débit définies), a été mis à jour à chaque itération du modèle. Comme pour les charges hydrauliques, l'antépénultième pas de temps du modèle (mesures basses eaux 2015) a été utilisé pour définir le nouveau semis des débits initiaux (cf. Illustration 81).

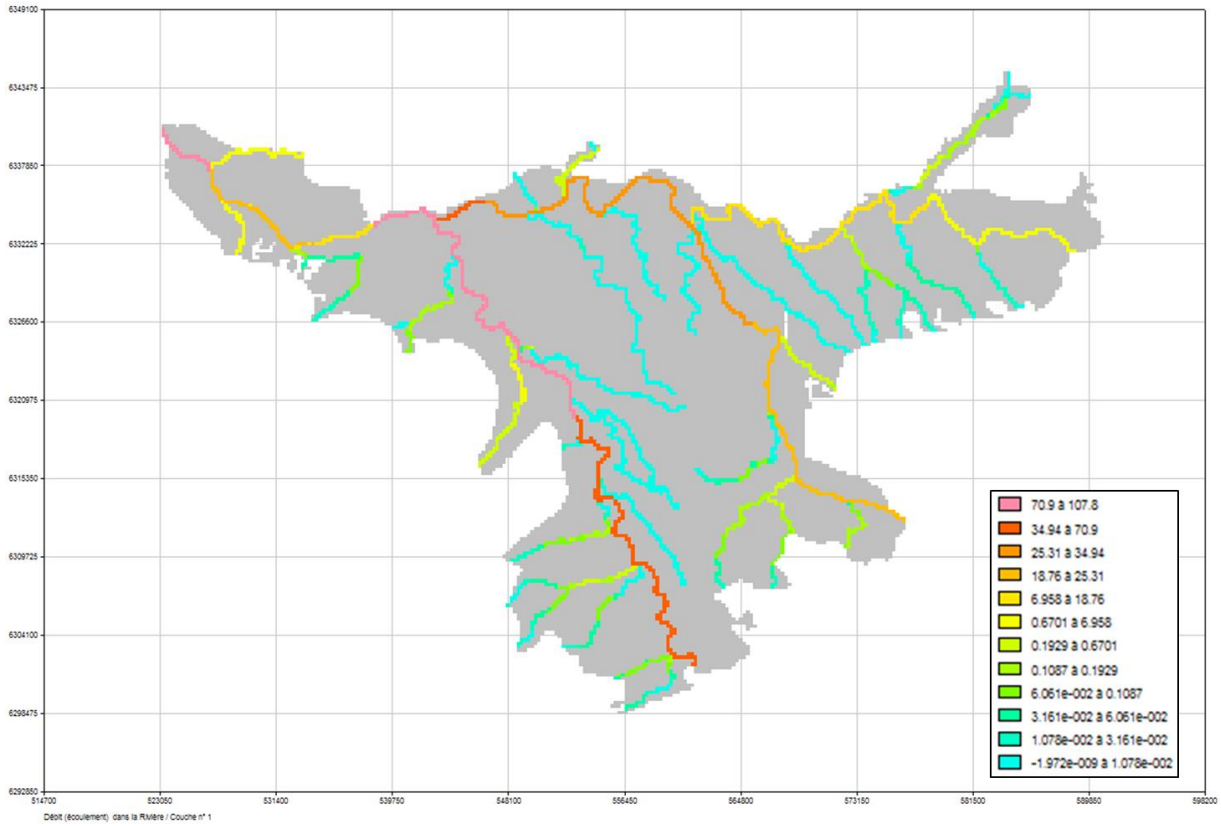


Illustration 81 – Débits initiaux des rivières en fin de calage.

Le fait de repartir à chaque itération du calage de semis de charge et de débit initiaux plus proches de l'état observé permet de diminuer le nombre de calculs nécessaires pour atteindre la précision souhaitée en début de simulation, accélérant le temps nécessaire pour la simulation. L'importance de la période d'initialisation de trois ans diminue également au fur et à mesure qu'on se rapproche d'un état initial conforme aux observations.

4.3. RÉSULTATS DU CALAGE

4.3.1. Calage en régime permanent

Le temps de simulation pour le régime permanent est de 2 minutes. La convergence numérique globale du modèle est bonne avec une valeur de $4{,}2.10^{-2}$ % d'erreur.

Le calage en régime permanent s'effectue selon deux méthodologies : par comparaison visuelle des cartes piézométriques ou par analyse du diagramme de dispersion.

Cartes piézométriques

La carte piézométrique calculée en régime permanent et la carte piézométrique observée, réalisée à partir des mesures de terrain sont superposées pour une comparaison visuelle (cf. Illustration 82).

Pour rappel, la carte piézométrique de référence est celle d'octobre 1996, c'est-à-dire en période de basses eaux d'une année correspondant à une quadriennale humide.

Les deux séries d'isopièzes tracées (tous les 5 m) sont relativement proches.

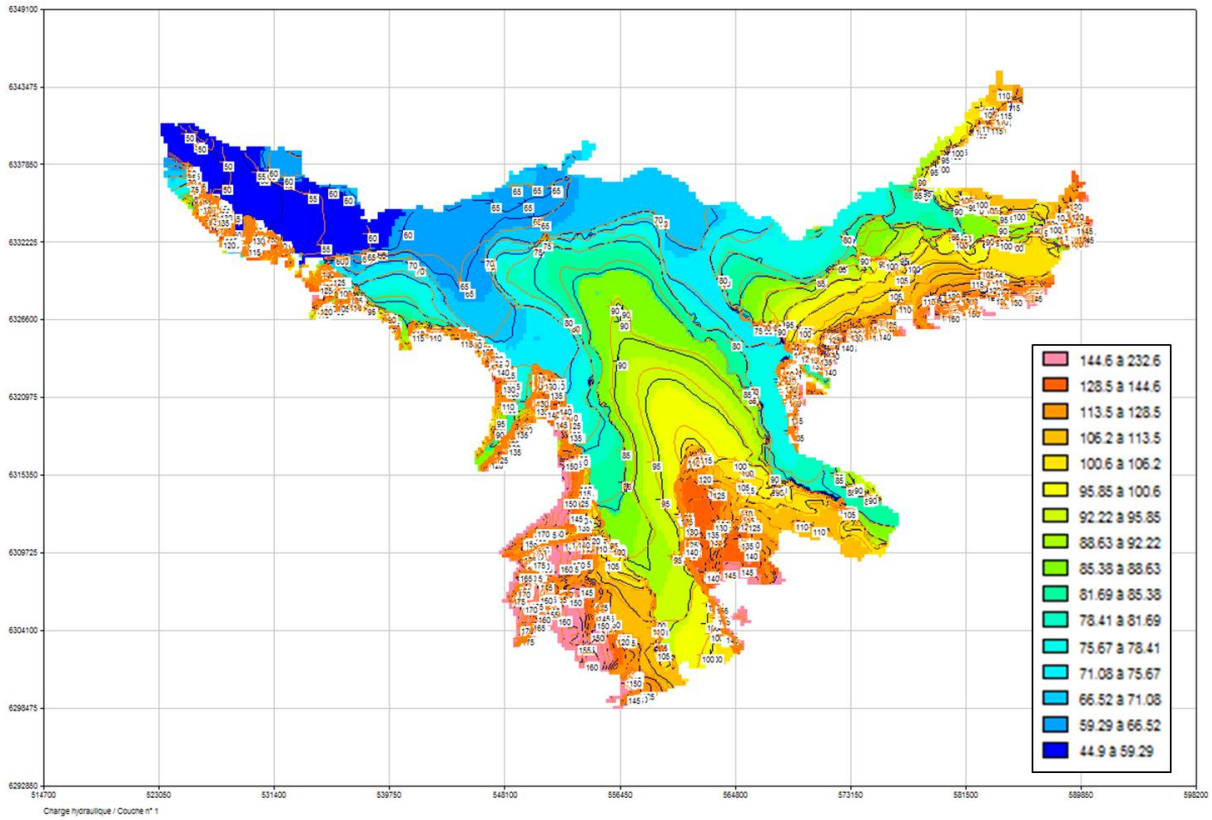


Illustration 82 – Comparaison entre la carte piézométrique observée en octobre 1996 et la carte piézométrique calculée à cette même période.

Diagrammes de dispersion

En réalisant un diagramme de dispersion qui permet de comparer les charges simulées (en coordonnées) avec les cotes piézométriques mesurées (en abscisses). Le diagramme final est présenté dans l'Illustration 83, avec un zoom sur l'intervalle 40-120 m qui concentre l'essentiel des points de mesure dans l'Illustration 84.

La droite y = x est la droite de correspondance parfaite entre les charges calculée et mesurée. Les droites y = x +/- 5 m correspondent à l'intervalle de confiance de plus ou moins 5 m par rapport à la droite de calage idéal.

Pour obtenir un calage en régime permanent satisfaisant, la très grande majorité des points du diagramme de dispersion doit se retrouver entre les deux droites de l'intervalle de confiance à +/- 5 m.

90 % des points, soit 331 des 369 points de mesure pour lesquels il existe une simulation de la charge, se situent dans l'intervalle de confiance à +/- 5 m défini.

La droite de régression linéaire met en évidence une corrélation entre mesures et simulation très proche de la droite y = x.

La moyenne des erreurs est de -0,70 m, une valeur proche de 0 confirmant un calage sans biais. L'écart-type est quant à lui de 3,17 m.

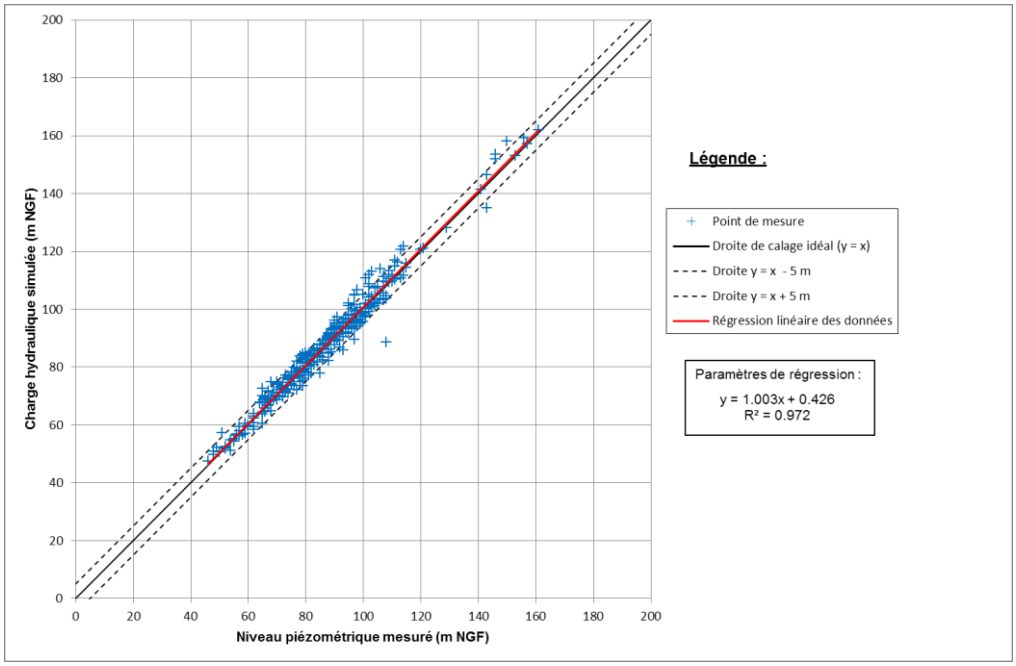


Illustration 83 – Diagramme de dispersion charges mesurées / simulées en régime permanent.

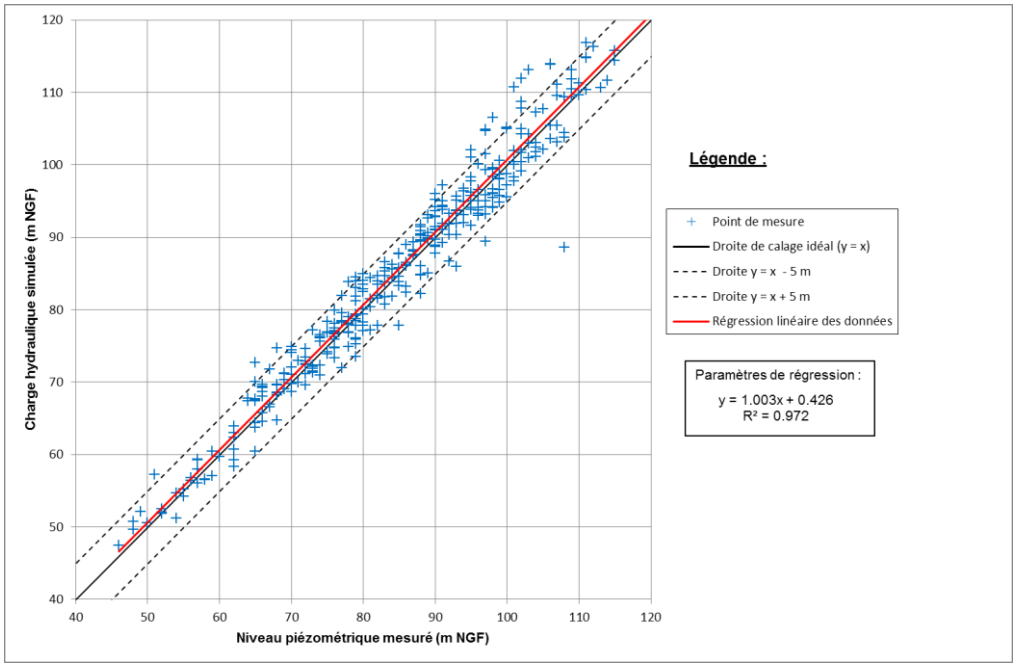


Illustration 84 – Diagramme de dispersion régime permanent - Zoom sur l'intervalle h = 40 à 120 m .

4.3.2. Calage en régime transitoire : piézométrie

Pour rappel, le calage en régime transitoire a été réalisé dans un premier temps sur la période d'octobre 2005 à septembre 2012, pour laquelle les prélèvements en nappe étaient les mieux connus. Il a ensuite été étendu à la période 1995-2015, avec des ajustements mineurs dans cette seconde phase.

Carte piézométrique d'octobre 1996

Une fois le calage en régime transitoire achevé, les mesures réalisées pendant la campagne piézométrique conduite du 1er octobre au 21 novembre 1996 ont été comparés à la charge piézométrique calculée pour la dernière décade du mois d'octobre 1996, correspondant au milieu de la campagne de mesures.

Les diagrammes de dispersion associés sont présentés dans l'Illustration 85 et l'Illustration 86. Ils mettent en évidence une corrélation entre niveaux mesurés et simulés comparable à celle obtenue en régime permanent, où le calage est spécifiquement orienté dans cet objectif.

87 % des points, soit 328 des 377 points de mesure pour lesquels il existe une simulation de la charge, se situent dans l'intervalle de confiance à +/- 5 m défini.

La moyenne des erreurs est de +0,47 m et l'écart-type est de 3,47 m.

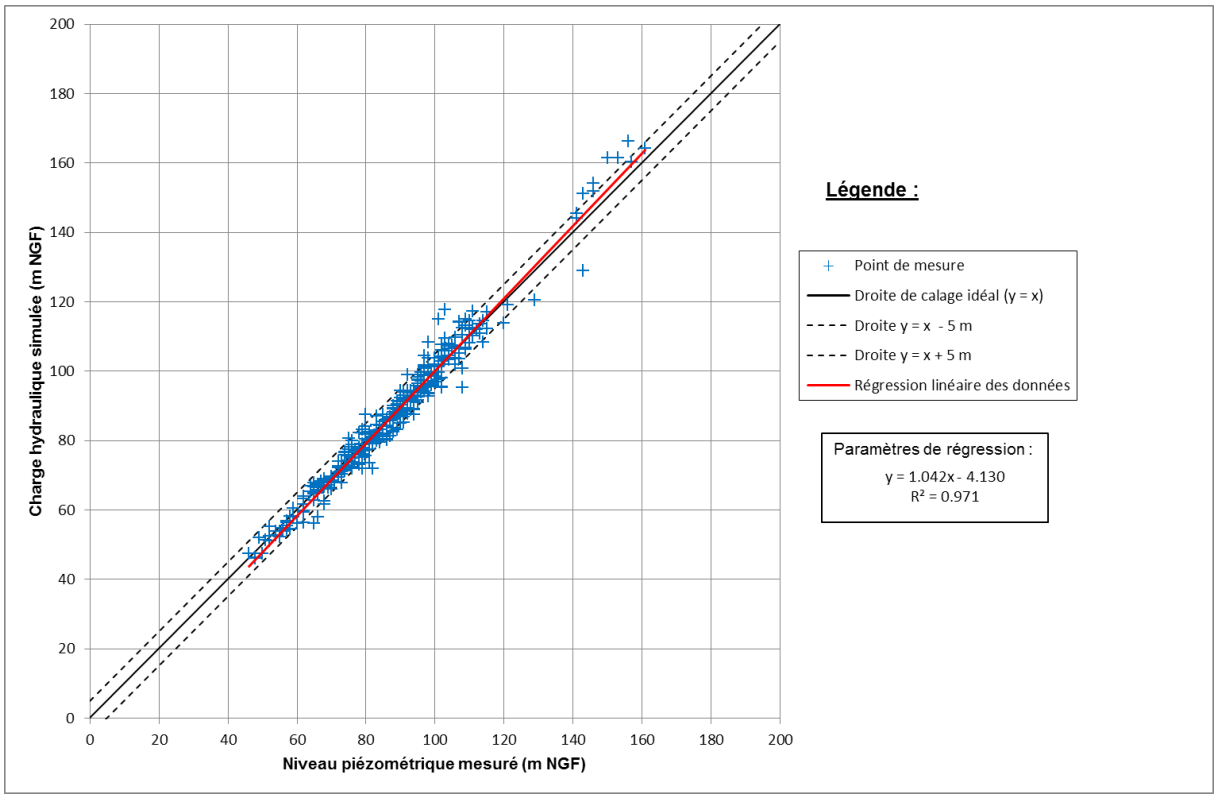


Illustration 85 – Diagramme de dispersion charges mesurées / simulées en régime transitoire (octobre 1996).

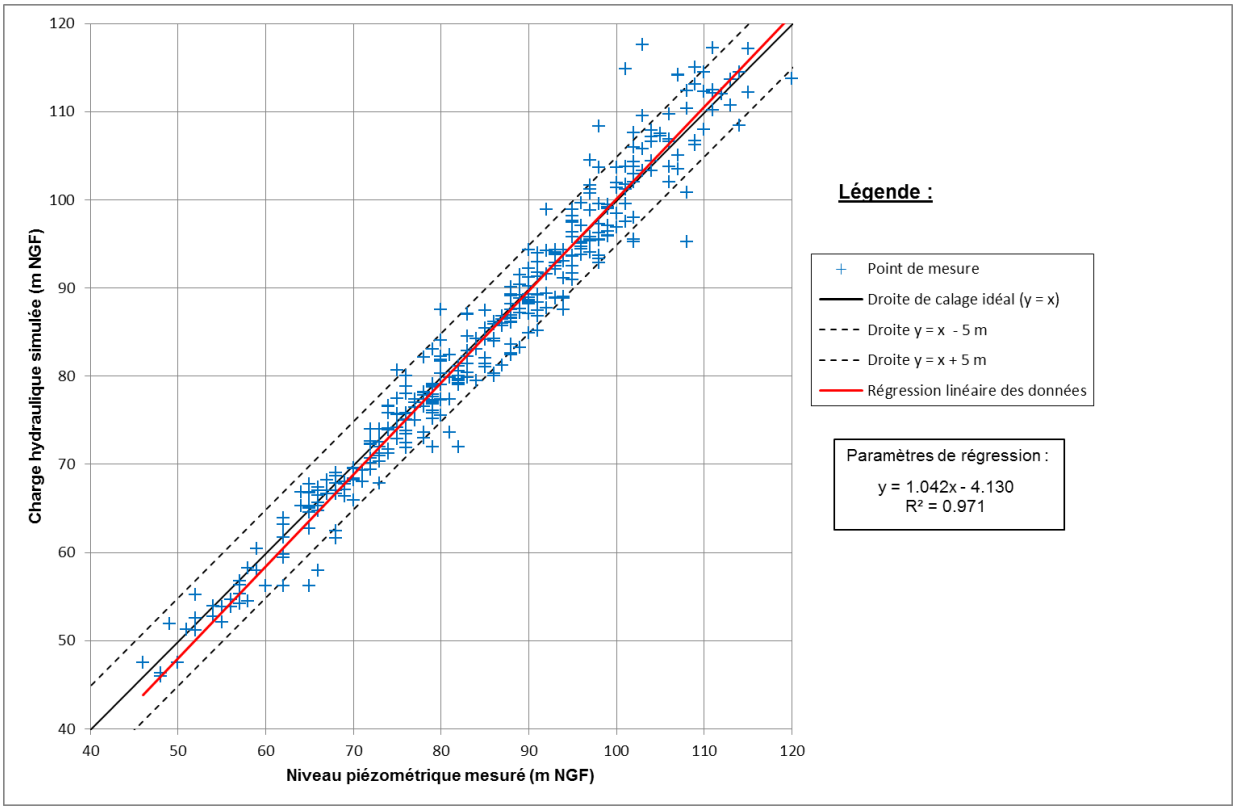


Illustration 86 – Diagramme de dispersion régime transitoire - Zoom sur l'intervalle h = 40 à 120 m.

Chroniques piézométriques

Le calage du modèle a visé à faire correspondre aux mieux les chroniques simulées avec les chroniques mesurées sur :

- les 10 piézomètres suivis de manière automatique dans le cadre du Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS) ;
- les 26 piézomètres suivis manuellement dans le cadre de ce projet.

Le processus de calage s'est attelé à reproduire le plus fidèlement possible ces différentes chroniques, en s'attachant en priorité sur celles pour lesquels le plus de mesures étaient disponibles : les 10 piézomètres du RCS puis, parmi les 26 piézomètres suivis manuellement, les 16 pour lesquels le suivi a été plus régulier.

Les chroniques des 10 piézomètres du RCS sont présentées dans les illustrations suivantes (Illustration 87, Illustration 88, Illustration 89 et Illustration 90). L'ensemble des 36 chroniques est présenté en Annexe 13.

Afin de faciliter la comparaison des chroniques, elles sont toutes présentées avec la même échelle verticale (amplitude de 5 m).

- **Chroniques dans les basses terrasses**

L'amplitude des fluctuations piézométriques est dépendante de chaque terrasse : 1 m pour Pomiès en rive gauche de la Garonne (cf. chapitre 4.2.2), 2 m pour Pédeloup et Saint-Pierre entre Tarn et Garonne et 3 m pour Pradas en rive gauche de l'Aveyron.

Les séquences de hautes eaux et de basses eaux sont synchrones et les gammes d'amplitude du signal sont très proches pour Pomiès et Saint-Pierre.

Le calage du piézomètre Pradas ne restitue pas complètement les réponses très rapides aux événements pluvieux, malgré un temps de ½ percolation plus faible dans cette zone.

Dans le cas de Pédeloup, si le calage est satisfaisant sur les années 2010-2015, la simulation ne parvient pas à reproduire fidèlement les premières années de la chronique, avec une sous-estimation des niveaux comprise entre 0,5 et 1 m.

- **Chroniques dans la basse plaine de la Garonne**

Ces chroniques n'ont pu être calées qu'une fois les lois hauteur-débit correctement définies dans les rivières. C'est en particulier vrai pour Lilou, situé dans les alluvions récentes de la Garonne, et, dans une moindre mesure, pour Boutoli.

Globalement, l'amplitude des fluctuations piézométriques est plus importante que pour les piézomètres situés dans les basses terrasses. Elle est comprise entre 3 et 4 m sur les trois ouvrages.

La chronique simulée de Saint-Porquier est fidèle aux observations à partir de 2002. Une sous-estimation des niveaux hauts (de 1 à 1,5 m) est observée avant cette date.

Pour Lilou, les importantes et rapides fluctuations liées au lien étroit avec le niveau de la Garonne sont correctement simulées. Le niveau d'étiage est sous-estimé d'environ 0,5 m.

Dans le cas de Boutoli, les fluctuations saisonnières sont correctement représentées à l'exception des fortes remontées du niveau (2000, 2004, 2014). Par contre, le niveau d'étiage est surestimé d'environ 1 m.

Contrairement aux mesures des cotes du fil d'eau des rivières réalisées en 2015, le géoréférencement des piézomètres n'a pas été fait avec une précision centimétrique sur l'altitude. Cela peut expliquer les écarts sur les niveaux à l'étiage constatés sur Lilou et Boutoli. Ce travail de géoréférencement précis a été effectué sur tout le Réseau de Contrôle et de Suivi (RCS) du BRGM dans l'ancienne région Midi-Pyrénées lors de la campagne semestrielle de fin 2016 mais les résultats n'étaient pas disponibles au moment de la rédaction de ce rapport.

- **Chroniques dans les basses plaines du Tarn et de l'Aveyron**

Le comportement de ces trois ouvrages est similaire : des fluctuations saisonnières comprises entre 1,5 et 2 m au maximum et une très bonne corrélation des chroniques mesurées et simulées.

Les piézomètres situés dans la basse plaine du Tarn (Castel et Les Barthes) présentent le plus souvent des variations saisonnières moins marquées que le piézomètre situé dans la basse plaine de l'Aveyron (Bioule).

Contrairement, aux ouvrages situés dans la basse plaine de la Garonne, les fluctuations piézométriques sont plus limitées. Une explication réside dans le fait que le niveau du Tarn et de l'Aveyron est le plus souvent contrôlé par une succession de seuils dans le Tarn-et-Garonne.

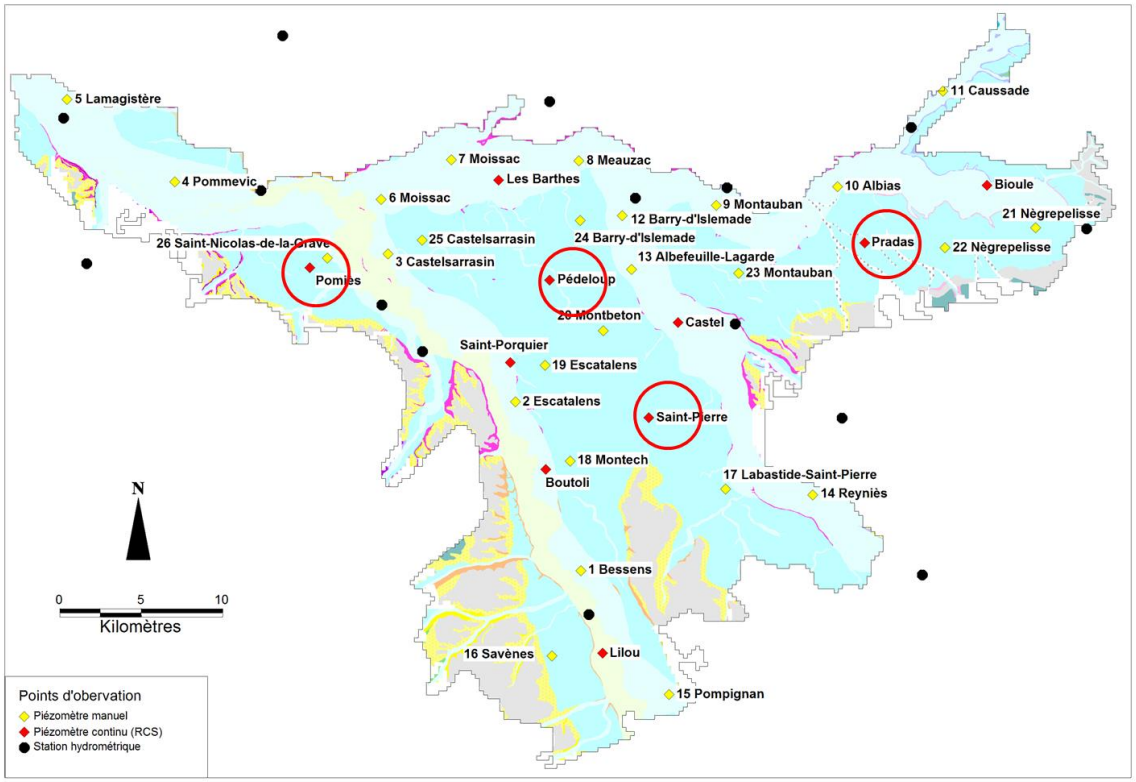


Illustration 87 – Localisation des piézomètres RCS dans les basses terrasses.

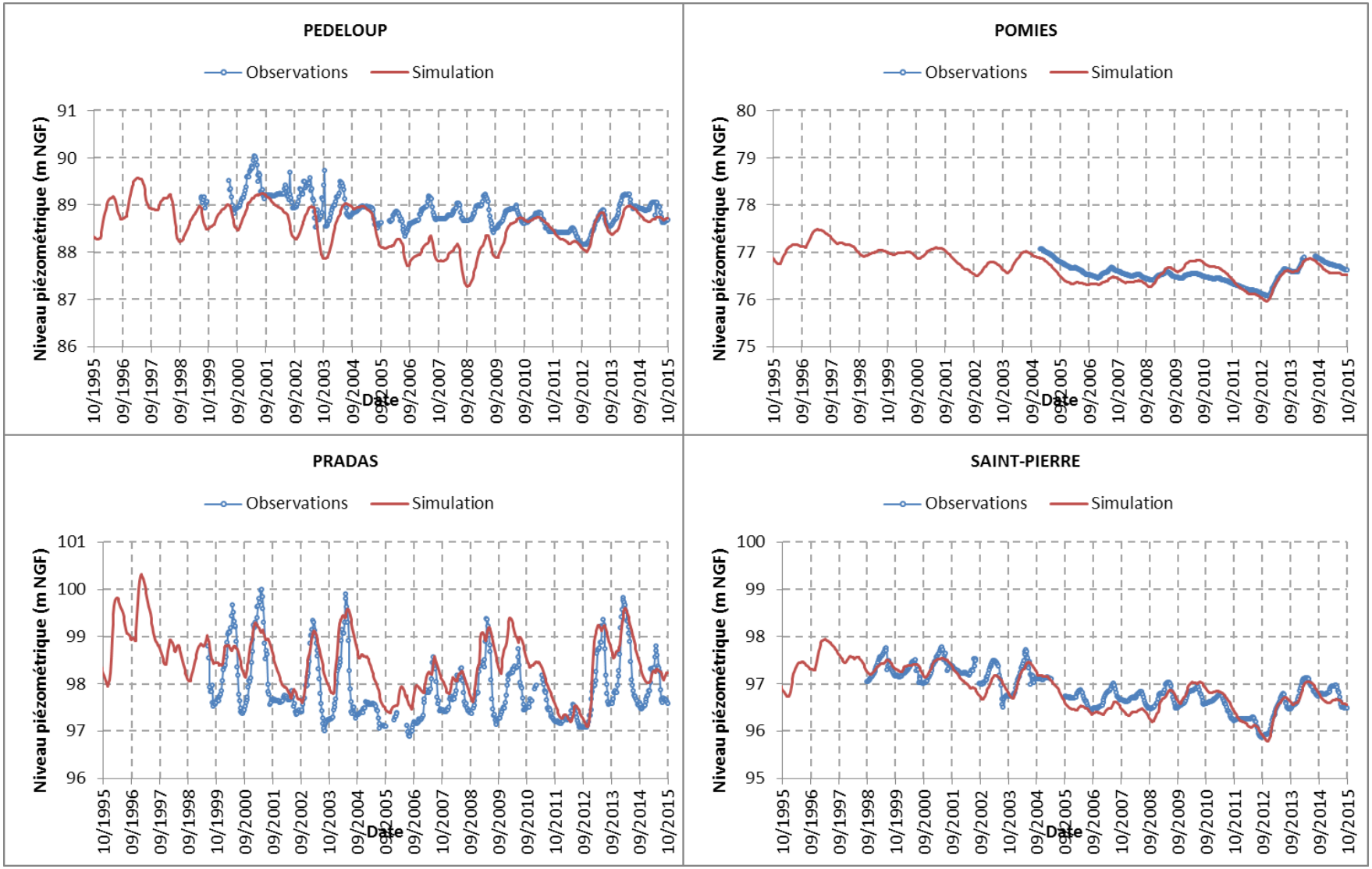


Illustration 88 – Chroniques piézométriques dans les basses terrasses (piézomètres RCS).

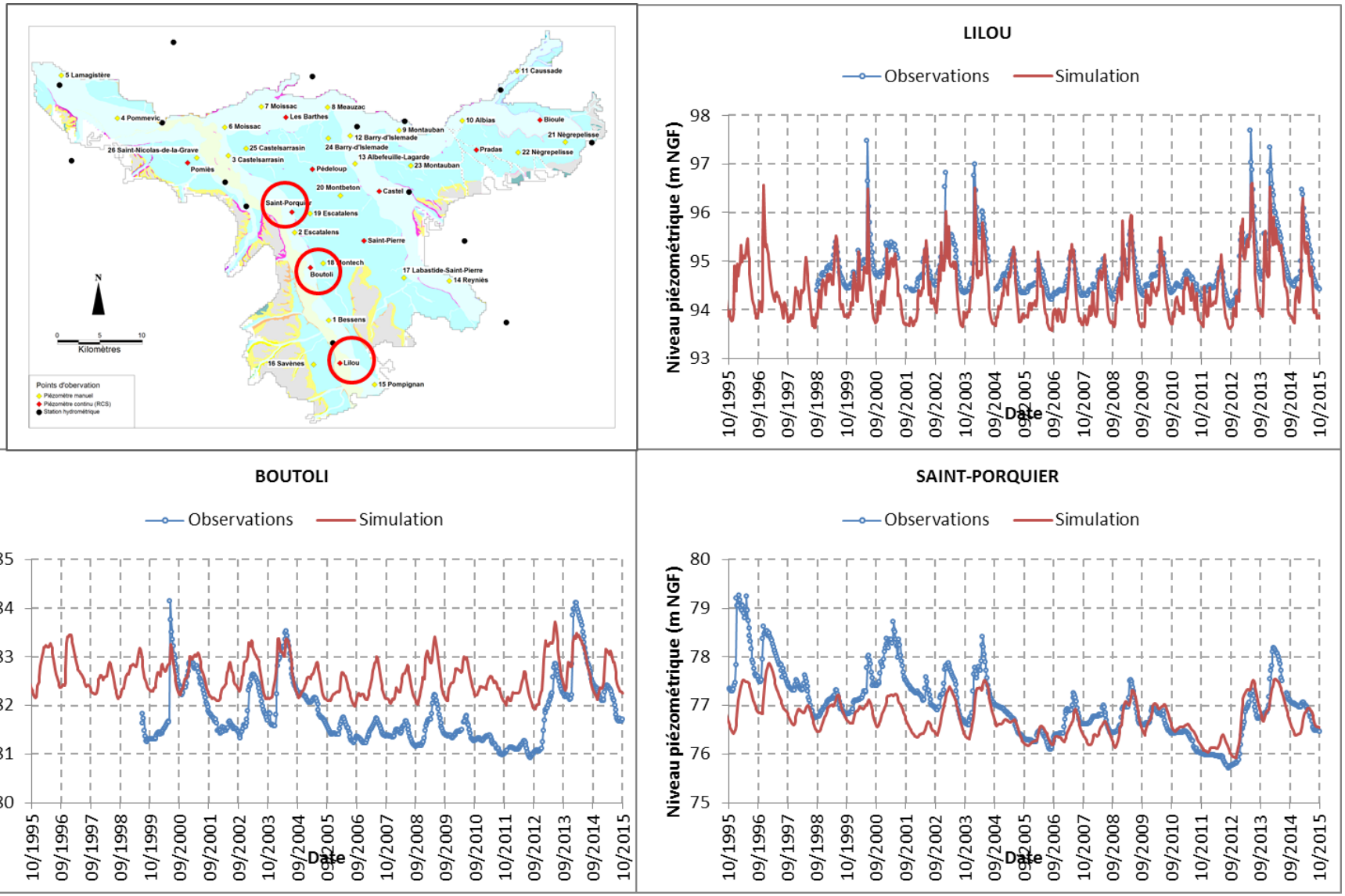


Illustration 89 – Chroniques piézométriques dans la basse plaine de la Garonne (piézomètres RCS).

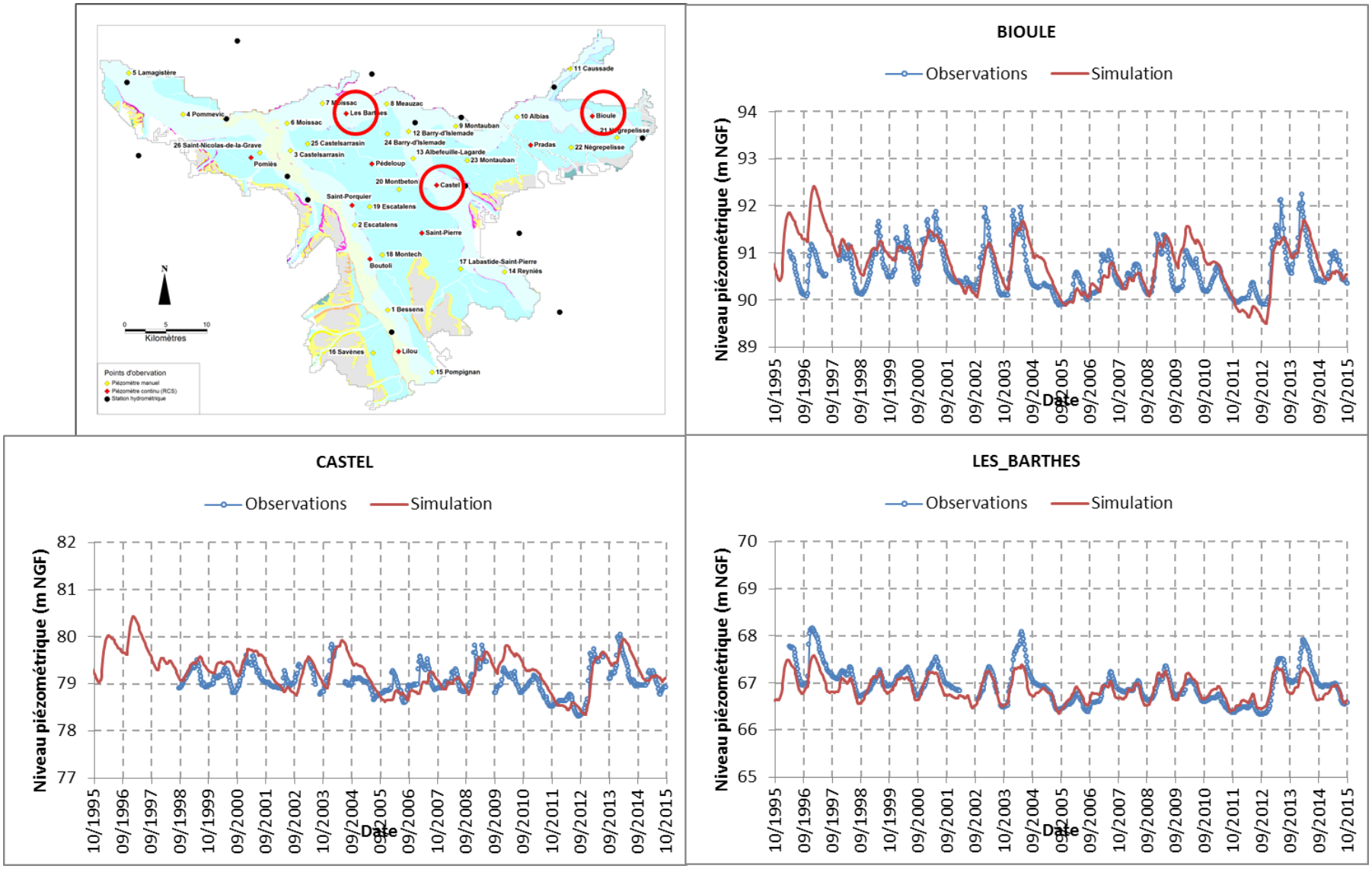


Illustration 90 – Chroniques piézométriques dans les basses plaines du Tarn et de l'Aveyron (piézomètres RCS).

- **Comparaison statistique des simulations et des observations**

Afin d'apprécier la qualité globale du calage, deux diagrammes de dispersion ont été construits afin de comparer les moyennes des charges hydrauliques mesurées et simulées pour les 10 piézomètres du Réseau de Contrôle et Suivi (RCS). Le premier diagramme compare les moyennes globales (cf. Illustration 91) et le second les moyennes en période d'étiage (cf. Illustration 92).

Ils mettent en évidence un écart moyen entre mesures et simulation systématiquement infra-métrique. Les droites de régression linéaire, très proches de la droite y = x, montrent une très bonne corrélation entre mesures et simulation, que ce soit sur l'ensemble de la période modélisée ou plus spécifiquement pendant les étiages.

Un histogramme de la moyenne des écarts entre données observées et simulées, intégrant également les piézomètres suivis manuellement, a été réalisé (cf. Illustration 93), ainsi qu'une brève analyse statistique (cf. Tableau 25).

Ils montrent qu'il n'y a ni surestimation, ni sous-estimation des niveaux calculés par le modèle par rapport aux niveaux observés. L'effort de calage prioritaire sur les piézomètres du RCS apparaît (moyenne des écarts plus proche de 0 ; écart-type et écarts maximaux plus petits).

Ce résultat est principalement la conséquence du calage difficile de deux piézomètres, Pz4 – Pommevic et Pz11 – Caussade.

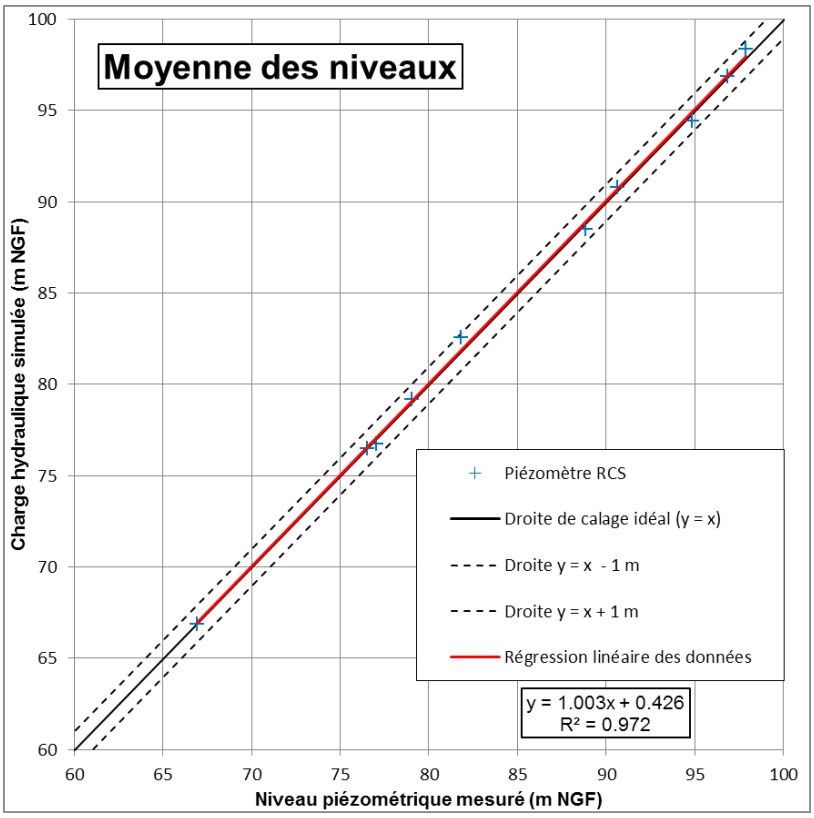


Illustration 91 – Diagramme de dispersion moyenne des niveaux mesurés / moyenne des niveaux simulés.

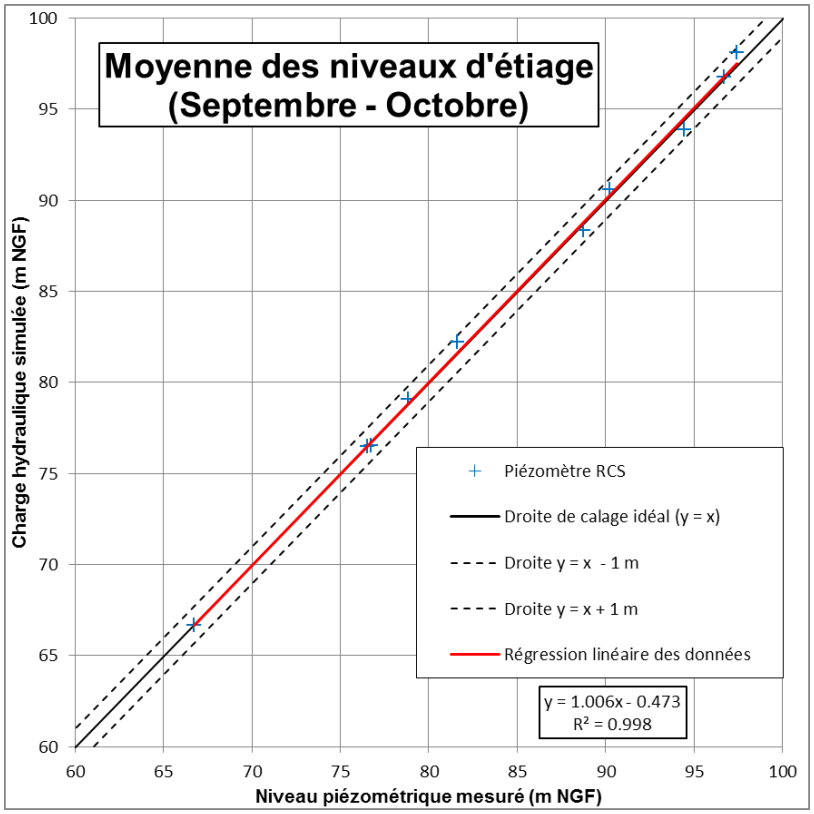


Illustration 92 – Diagramme de dispersion moyenne des niveaux mesurés / moyenne des niveaux simulés en période d'étiage (septembre – octobre).

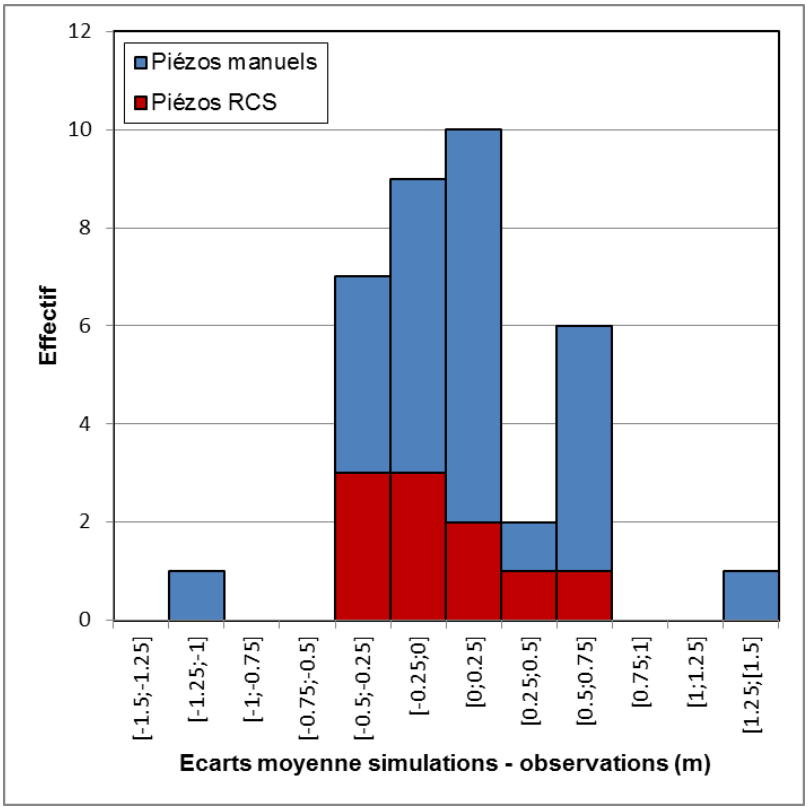


Illustration 93 – Histogramme de distribution de la moyenne des écarts de calage.

	Piézomètres RCS (10)	Piézomètres manuels (26)	Total (36 piézomètres)
Moyenne des écarts	0.03	0.11	0.09
Ecart-type	0.34	0.46	0.43
Ecart maximal <0	-0.41	-1.05	-1.05
Ecart maximal >0	0.73	1.40	1.40

Tableau 25 – Quantification des écarts entre données moyennes simulées et observées.

4.3.3. Calage en régime transitoire : hauteurs et débits des rivières

Le calage sur les chroniques de hauteurs et débits des rivières, est réalisé à partir des données recueillies sur les stations hydrométriques suivies par la DREAL Occitanie et mises en ligne dans la banque HYDRO (cf. chapitre 3.6.11).

Les chroniques de calage sont réalisées en comparant les chroniques de débits et de hauteurs journaliers observés, moyennés au pas de temps décadaire, avec les chroniques de débits et de hauteurs calculés par le modèle au même pas de temps décadaire.

Chroniques de débits des rivières

Comme expliqué au chapitre 0, les chroniques de débit de neuf stations ont été utilisées pour déterminer les chroniques de débit amont à l'entrée dans le modèle des cours d'eau suivants : Garonne, Tarn, Aveyron, Arrats, Gimone, Barguelonne, Lemboulas, Lère et Tescou.

Elles sont présentées en Annexe 14 mais, les données simulées étant basées sur les données mesurées, la corrélation entre les deux signaux est nécessairement excellente.

Les chroniques des quatre stations disposant de mesures de débit sur la période modélisée et n'ayant pas servi à élaborer les chroniques de débit amont sont présentées dans l'Illustration 95.

Les chroniques simulées sont toutes très bien calées sur les observations, illustrant une bonne propagation des débits dans les rivières à l'intérieur du modèle et donc une prise en compte des échanges entre la nappe et les rivières correcte du point de vue des cours d'eau.

Seule une légère sous-estimation des débits de crue de l'Aveyron à la station de Loubéjac est observable. Le débit à la station de Lamagistère, à l'exutoire du modèle, est lui remarquablement pris en compte.

Ce résultat est mis en valeur par le calcul du critère de Nash (cf. Nash et Sutcliffe, 1970) comparant les débits simulés (Q_{sim}) et les débits observés (Q_{obs}) :

$$Nash(Q) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Où $\overline{Q_{obs}}$est la moyenne des débits observés sur la période de simulation et n le nombre de pas de temps de la simulation.

Plus le critère est proche de 1, plus les résultats de la simulation sont proches des mesures.

Il a été calculé avec cinq variantes différentes (cf. Tableau 26) :

- un critère de Nash global sur les débits (Nash sur Q), qui rend compte de l'adéquation des débits simulés avec les débits observés, en donnant une importance plus particulière aux simulations sur les crues ;
- un critère de Nash global sur le log des débits (Nash sur Log(Q)), qui rend compte aussi de l'adéquation des débits calculés avec les débits observés, mais qui donne plus d'importance aux simulations sur les étiages ;
- un critère de Nash global sur la racine des débits (Nash sur √Q), qui est intermédiaire entre les deux critères précédents ;
- un critère de Nash sur les débits (Nash sur Q), appliqué uniquement sur les débits des périodes d'étiage (du 1er juillet au 31 octobre), avec un débit moyen d'étiage ;
- un critère de Nash sur les débits (Nash sur Q), appliqué uniquement sur les débits des périodes de hautes eaux (du 1er janvier au 31 mai), avec un débit moyen de hautes eaux.

Station Hydro.	Critère de Nash global			Critère de Nash sur Q à l'étiage (01/07-31/10)	Critère de Nash sur Q en Hautes Eaux (01/01-31/05)
	Sur Q	Sur √Q	Sur Log(Q)		
L'Aveyron à Loubéjac	0.985	0.988	0.977	0.927	0.978
Le Tarn à Villemade	0.979	0.980	0.978	0.959	0.966
La Garonne à St-Aignan	0.988	0.991	0.989	0.959	0.983
La Garonne à Lamagistère	0.993	0.995	0.995	0.983	0.986

Tableau 26 – Critères de Nash sur les débits des rivières.

Tous les critères calculés, qu'ils se focalisent sur les débits d'étiage ou les débits les plus importants ou qu'ils cherchent à représenter l'ensemble de la gamme de débits, mettent en évidence le très bon calage du modèle sur le débit des rivières.

Ces résultats s'expliquent par la faible contribution relative de la nappe alluviale au débit des cours d'eau dans le Tarn-et-Garonne. En ôtant la somme des prélèvements en rivière à la somme des débits amont à l'entrée des cours d'eau dans le modèle, on obtient un débit qui, comparé au débit simulé de la Garonne à Lamagistère, permet d'évaluer la contribution de la nappe alluviale au débit de la Garonne à l'exutoire du modèle (cf. Illustration 94).

Cette contribution s'élève en moyenne à 3,3 %. Elle est proportionnellement plus forte en période d'étiage, où elle atteint régulièrement 8 % à 10 %.

Ces chiffres incluent la contribution liée aux débordements de la nappe générant du ruissellement. Une partie de ces débordements correspond aux résurgences de la nappe en bordure des terrasses alluviales, mais la plus grande partie est due aux contraintes liées au maillage que l'on a assimilé au ruissellement réel (cf. chapitres 3.5.5 et 4.3.4) En étudiant uniquement la somme des échanges nappe-rivière calculée par le logiciel MARTHE, on écarte ces débordements. La contribution de la nappe est alors de 2,5 % en moyenne, et de l'ordre de 7 à 9 % en période d'étiage.

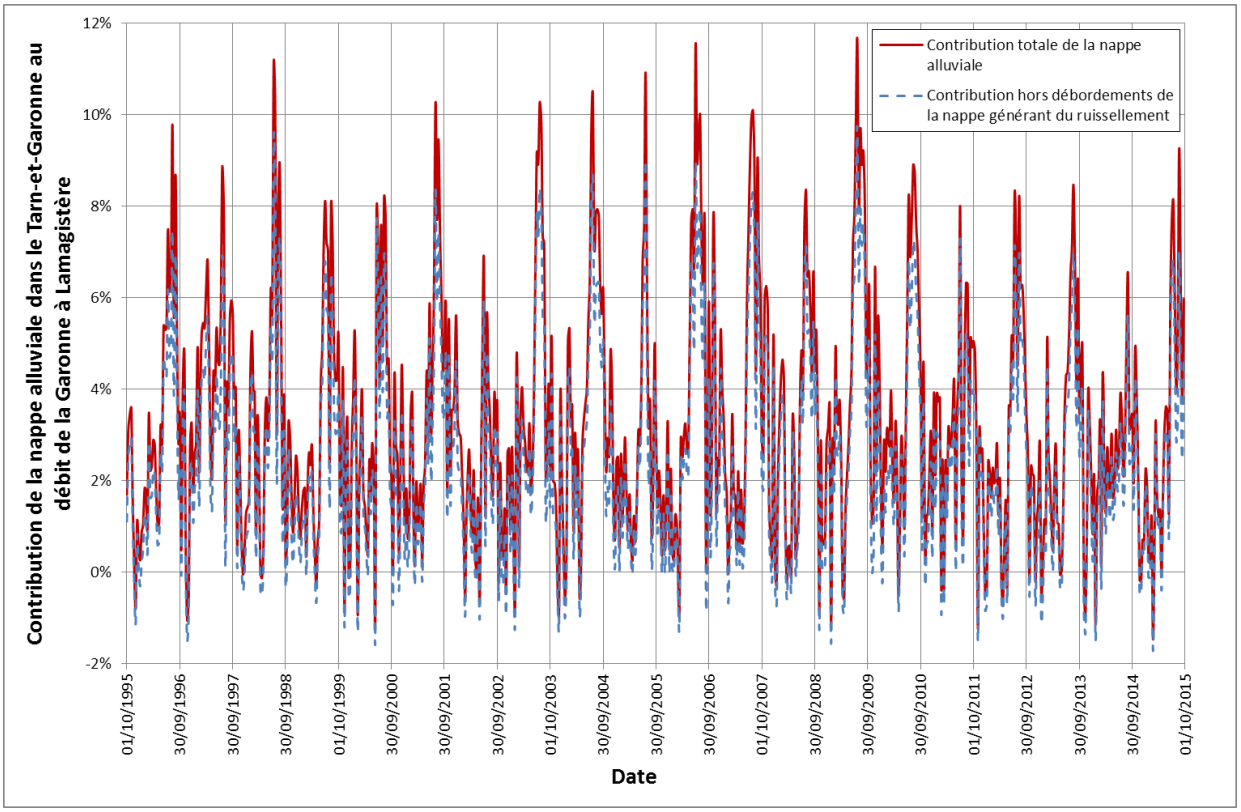


Illustration 94 – Contribution de la nappe alluviale au débit de la Garonne à Lamagistère.

Chroniques de hauteurs d'eau dans les rivières

Pour les 11 stations hydrométriques disposant d'une chronique de hauteur et de débit, le coefficient de rugosité, la cote de fond et la pente du lit ont été calés à partir de la relation de Manning-Strickler et des deux chroniques.
L'ensemble des chroniques est présentée en

Annexe 15 et une sélection de quatre chroniques est présentée dans l'Illustration 96.

Le calage est généralement très bon, avec des fluctuations synchrones et des niveaux correctement représentés à deux nuances près :

- les niveaux lors des périodes de crue sont généralement sous-estimés, et ce, d'autant plus que la crue est forte ;
- il n'a pas toujours été possible de caler parfaitement le niveau d'étiage, en particulier pour la Garonne à Lamagistère et la Barguelonne (écart de 35 - 40 cm).

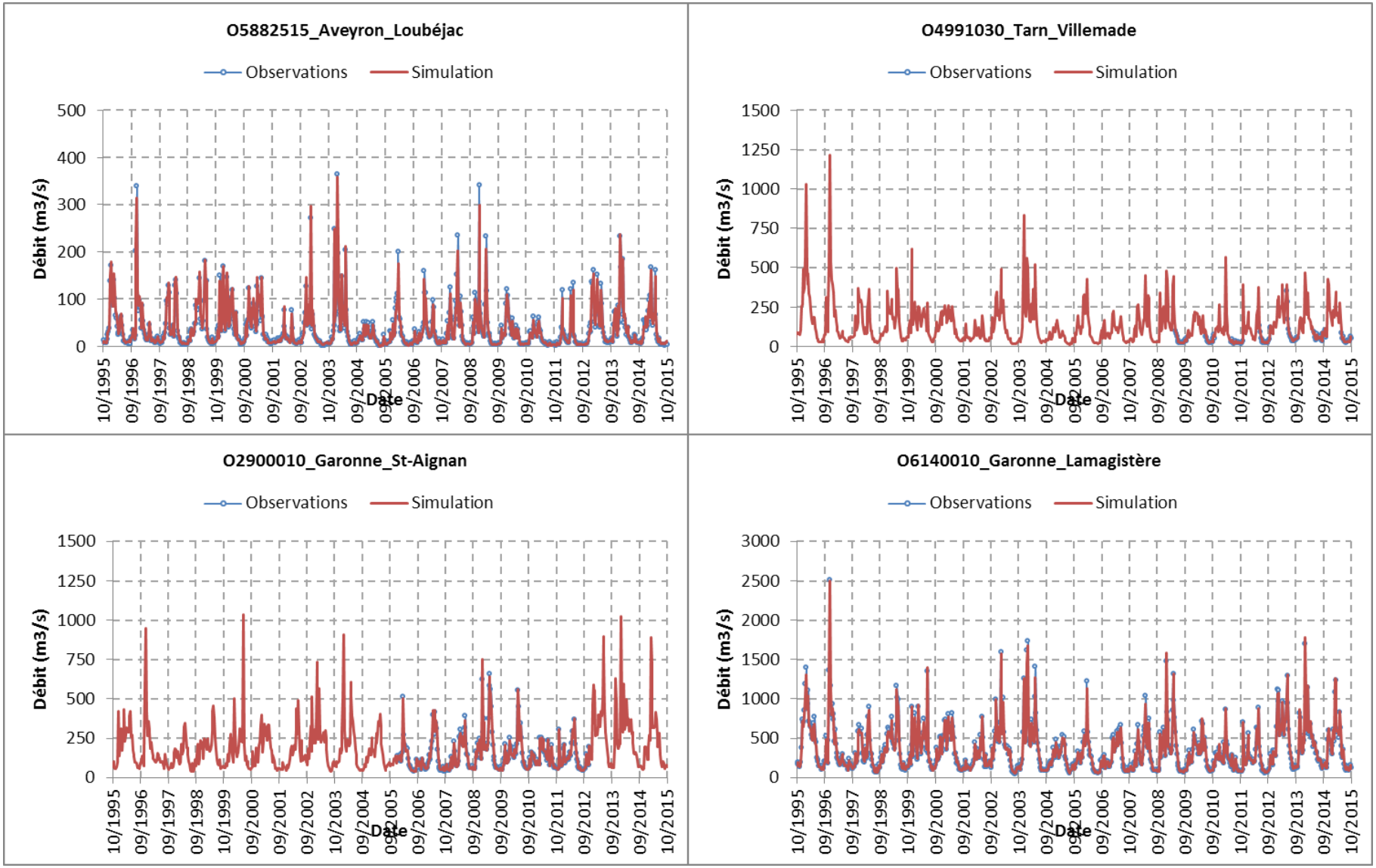


Illustration 95 – Chroniques de débit des rivières, hors stations à l'entrée du modèle.

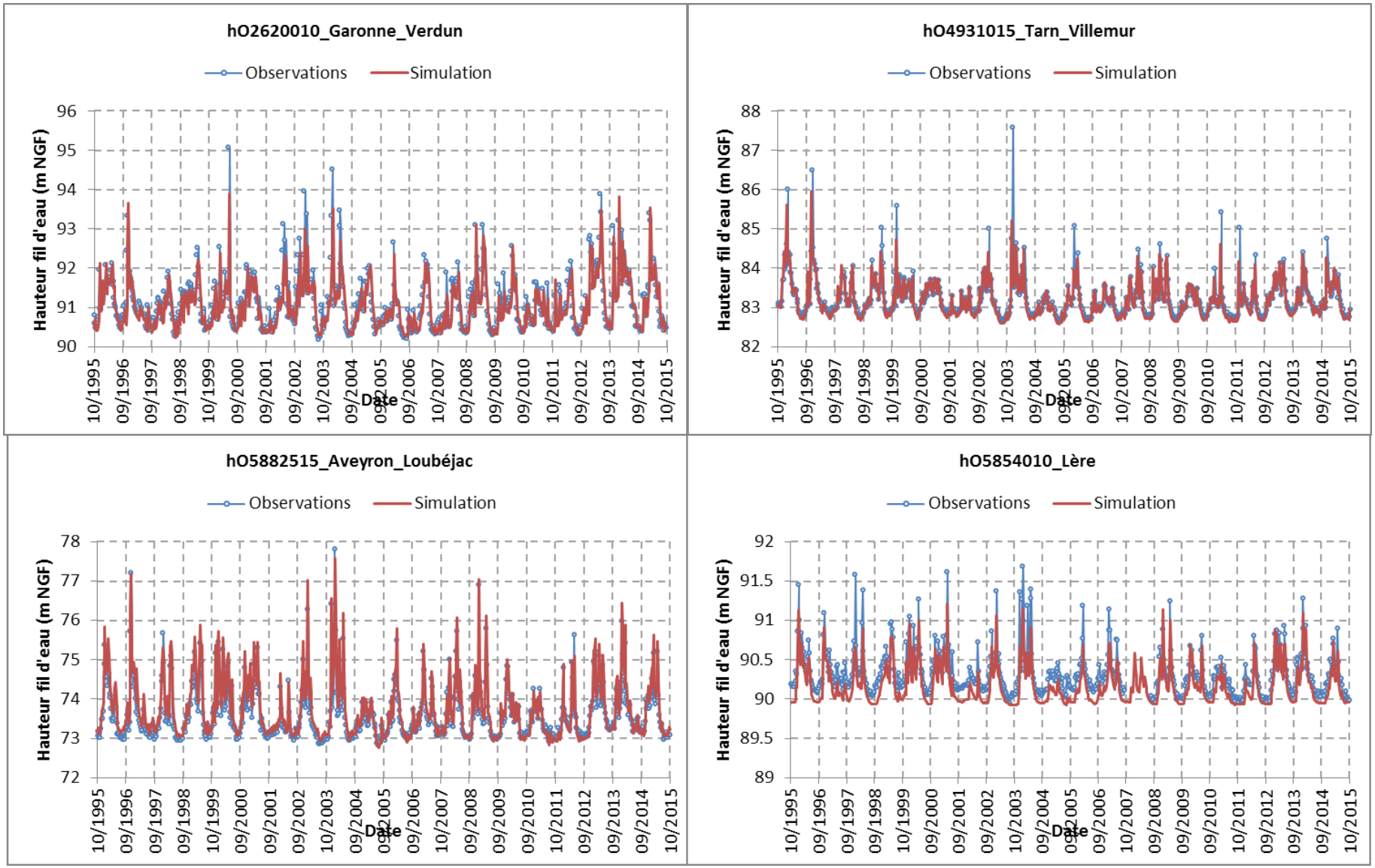


Illustration 96 – Sélection de chroniques de hauteurs des rivières.

Campagnes de mesures d'avril et septembre 2015

Les mesures de la cote du fil d'eau des 12 principales rivières de la zone modélisée (cf. chapitre 3.6.10) réalisées en avril et en septembre 2015 ont été comparées aux cotes du fil d'eau calculées dans les mailles rivières associées pour la deuxième décade du mois d'avril 2015 et la première décade du mois de septembre 2015, correspondant aux dates des campagnes de mesures.

Les diagrammes de dispersion associés sont présentés dans l'Illustration 97 et l'Illustration 98. Ils mettent en évidence une très bonne corrélation entre niveaux mesurés et simulés.

Pour la campagne de hautes eaux (avril 2015), 87 % des points, soit 178 des 204 points de mesure, se situent dans l'intervalle de confiance à +/- 0,3 m défini. La moyenne des erreurs est de -0,08 m et l'écart-type est de 0,22 m.

Pour la campagne de basses eaux (septembre 2015), 98 % des points, soit 199 des 204 points de mesure, se situent dans l'intervalle de confiance à +/- 0,3 m défini. La moyenne des erreurs est de -0,01 m et l'écart-type est de 0,09 m.

Cette différence s'explique par le fait que, en cas de difficulté à caler correctement les deux niveaux, c'est généralement la cote en basses eaux qui a été privilégiée.

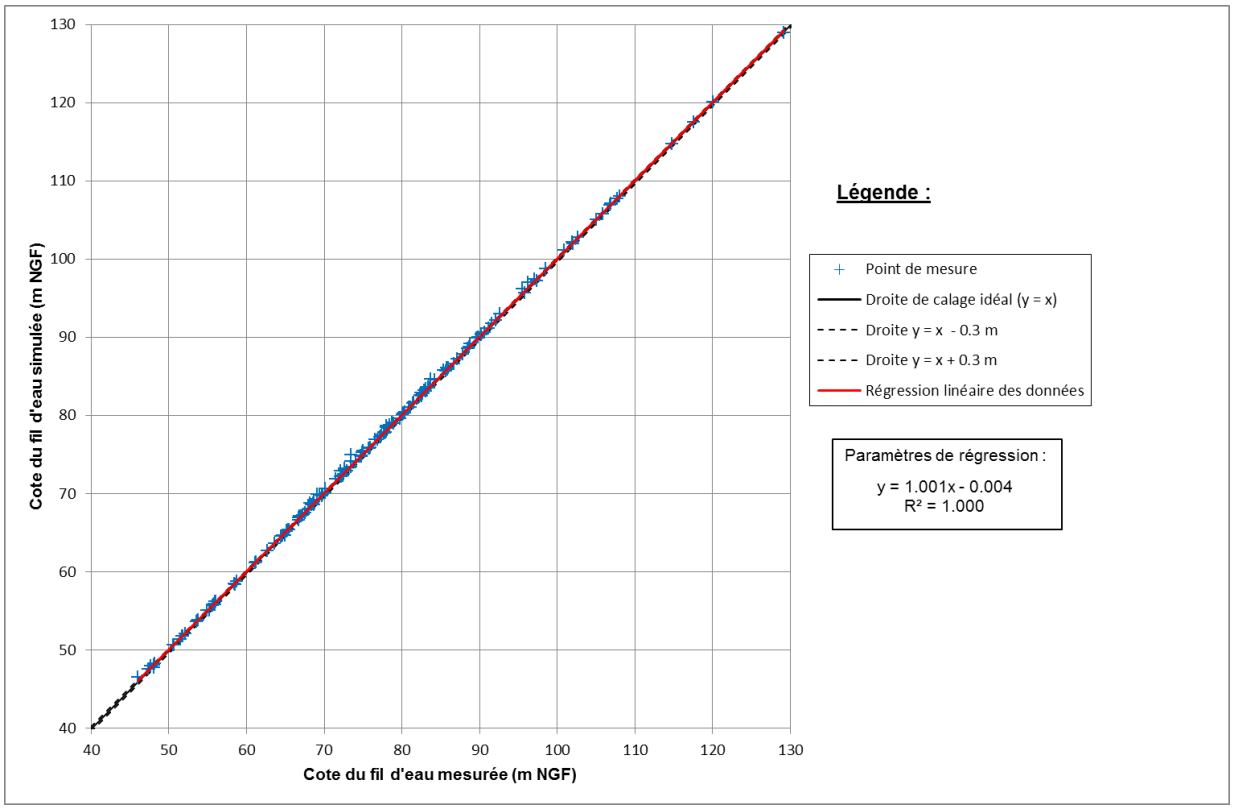


Illustration 97 – Diagramme de dispersion – Cote du fil d'eau des rivières – Avril 2015.

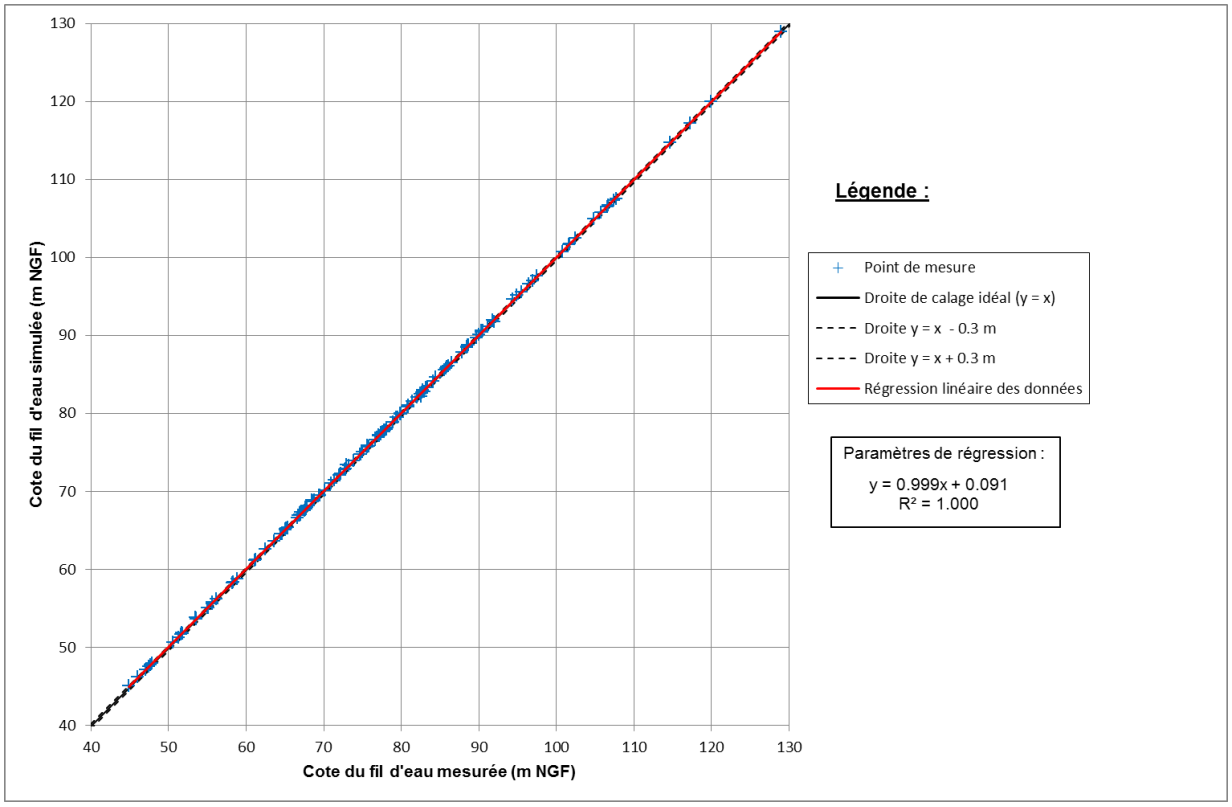


Illustration 98 – Diagramme de dispersion – Cote du fil d'eau des rivières – Septembre 2015.

4.3.4. Bilan hydrologique du modèle

Les différents éléments du bilan (entrées et sorties du système) sont présentés en volumes annuels pour les années allant de 1995-1996 à 2014-2015 dans le Tableau 27 (les années débutent au 1er octobre). Ils intègrent les deux couches du modèle (alluvions et molasses).

Année	Apport par infiltration pluviale (m^3)	Apport amont des vallées alluviales du Tarn et de la Garonne (m^3)	Apport infiltrations du Canal Latéral à la Garonne (m^3)	Apport par réinjection (forage à Castelsarrasin) (m^3)	Prélèvements (m^3)	Débordements (m^3)	Alimentation des contre-canaux de Malause (m^3)	Alimentation des rivières (m^3)	Stockage (m^3)
1995-1996	343 353 008	9 303 807	38 935 611	155 916	-17 283 741	-93 858 714	-49 231 038	-189 836 499	41 681 601
1996-1997	331 463 769	9 278 387	38 829 230	155 490	-18 197 144	-101 515 492	-49 497 974	-204 333 513	6 279 307
1997-1998	170 480 742	9 278 387	38 829 230	155 490	-15 392 025	-60 590 149	-46 190 946	-143 492 578	-46 875 636
1998-1999	276 950 431	9 278 387	38 829 230	155 490	-18 160 160	-77 036 647	-47 678 906	-156 359 323	25 828 491
1999-2000	221 129 934	9 303 807	38 935 611	155 916	-17 661 971	-70 590 650	-47 245 675	-153 762 453	-19 703 348
2000-2001	302 502 455	9 278 387	38 829 230	155 490	-14 857 051	-85 927 007	-48 325 269	-177 111 620	24 570 964
2001-2002	99 507 789	9 278 387	38 829 230	155 490	-17 212 656	-43 928 330	-44 632 148	-104 771 667	-62 762 276
2002-2003	256 612 914	9 278 387	38 829 230	155 490	-15 013 795	-74 521 480	-47 739 065	-158 894 391	8 670 584
2003-2004	334 687 662	9 303 807	38 935 611	155 916	-13 843 946	-91 860 836	-49 569 722	-181 417 258	46 352 751
2004-2005	101 716 498	9 278 387	38 829 230	155 490	-17 221 554	-47 224 682	-44 763 380	-112 022 834	-71 182 210
2005-2006	179 072 815	9 278 387	38 829 230	155 490	-18 197 144	-49 252 404	-45 420 757	-108 447 860	5 987 255
2006-2007	245 917 416	9 278 387	38 829 230	155 490	-15 440 829	-65 076 197	-47 204 284	-149 001 267	17 514 836
2007-2008	165 548 466	9 303 807	38 935 611	155 916	-15 295 276	-52 868 908	-45 922 142	-124 752 135	-24 872 191
2008-2009	306 235 142	9 278 387	38 829 230	155 490	-17 234 934	-82 140 826	-48 450 258	-168 440 747	38 206 548
2009-2010	279 119 610	9 278 387	38 829 230	155 490	-13 869 655	-79 383 163	-47 772 072	-171 778 989	14 547 650
2010-2011	119 066 096	9 278 387	38 829 230	155 490	-14 806 687	-48 278 014	-45 161 590	-118 600 496	-59 163 139
2011-2012	101 983 786	9 303 807	38 935 611	155 916	-14 121 093	-38 461 180	-44 494 409	-88 455 458	-35 035 773
2012-2013	374 708 862	9 278 387	38 829 230	155 490	-17 281 633	-90 632 580	-49 552 232	-168 704 408	96 837 585
2013-2014	257 731 879	9 278 387	38 829 230	155 490	-13 869 655	-82 384 271	-48 267 516	-167 058 349	-5 615 378
2014-2015	171 091 443	9 278 387	38 829 230	155 490	-14 806 687	-55 638 755	-45 908 961	-123 946 297	-20 901 534
Moyenne	**231 944 036**	**9 284 742**	**38 855 825**	**155 597**	**-15 988 382**	**-69 558 514**	**-47 151 417**	**-148 559 407**	

Tableau 27 – Tableau des éléments du bilan hydrologique du modèle calé, en m^3/an, de 1995 à 2015.

Ces mêmes résultats sont présentés sous forme d'histogrammes en m^3 et en % des volumes totaux dans l'Illustration 99 et l'Illustration 100. Le détail des éléments du bilan est présenté en Annexe 16.

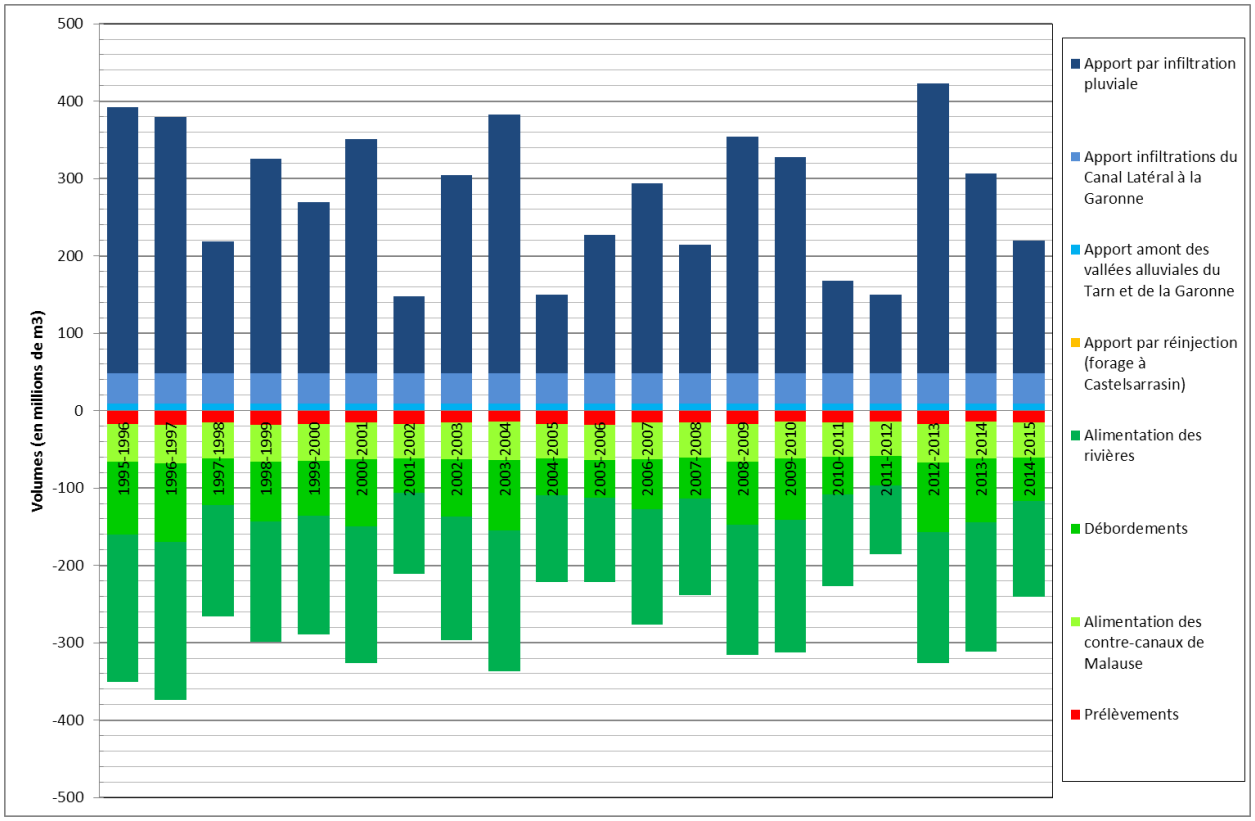


Illustration 99 – Histogramme des éléments des bilans hydrologiques annuels (en millions de m³).

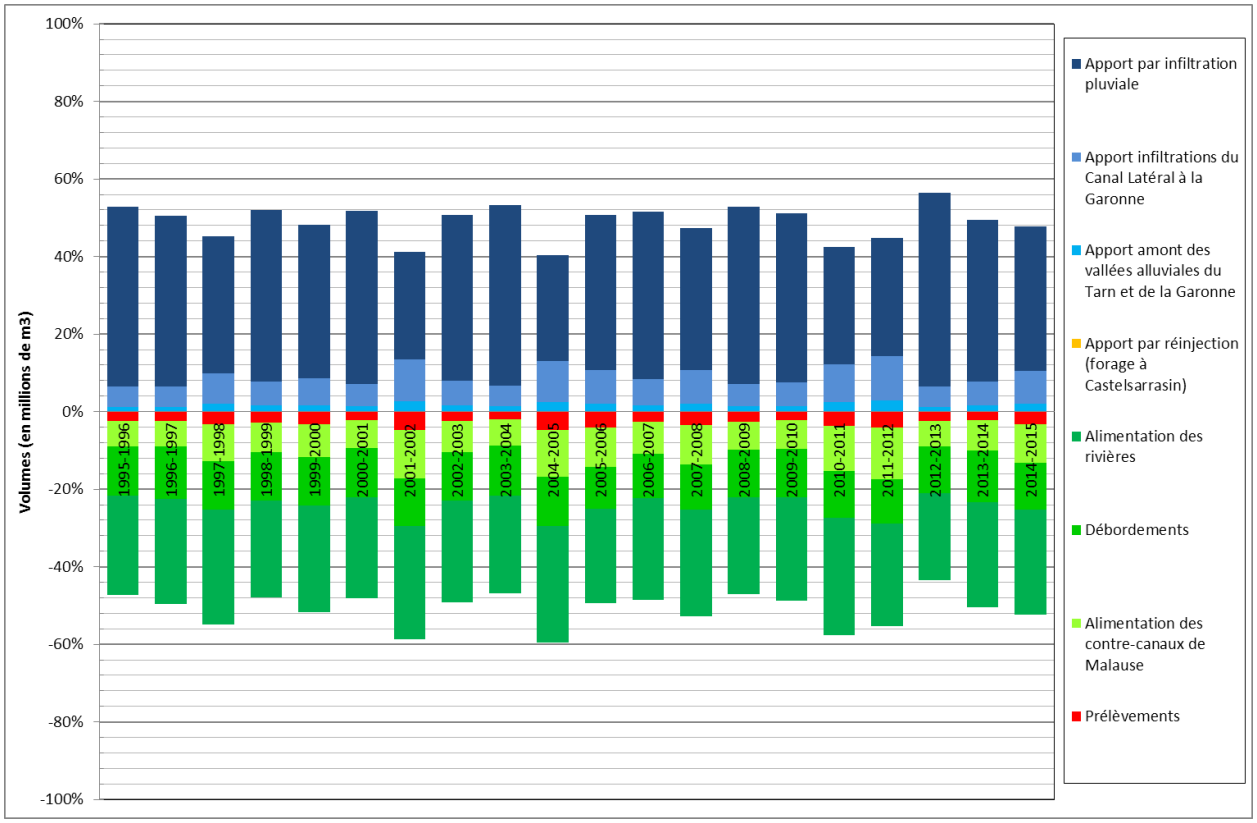


Illustration 100 - Histogramme des éléments des bilans hydrologiques annuels (en %).

Dans le bilan hydrologique, les éléments positifs correspondent aux volumes d'eau entrant dans le système (aquifère alluvial modélisé). Il s'agit de :

- l'apport par infiltration de la pluie (recharge de la nappe) ;
- l'apport par la continuité de la nappe alluviale aux limites amont de la zone modélisée (alluvions du Tarn et de la Garonne) ;
- l'apport par les infiltrations dues aux fuites du canal latéral à la Garonne ;
- l'apport lié à la réinjection d'eau dans un forage à usage industriel à Castelsarrasin (volume plus anecdotique).

Les éléments négatifs correspondent aux volumes d'eau sortant du système. Il s'agit :

- des débordements de la nappe donnant naissance aux cours d'eau autochtones, intégrés explicitement dans le réseau hydrographique ou non ;
- du drainage de la nappe par les rivières et les contre-canaux construits autour de la retenue de Malause ;
- des prélèvements dans la nappe pour les différents usages (AEP, industrie, irrigation).

Éléments positifs du bilan

- **Apport par infiltration pluviale**

Entre 1995 et 2015, la recharge de la nappe représente entre 27,5 % (en 2004-2005) et 50 % (en 2012-2013) du bilan hydrologique, pour une moyenne de 40 %.

L'année 2012-2013 a donc été particulièrement favorable au remplissage des stocks souterrains, comme le confirme l'Illustration 108, avec un stockage positif de 98 millions de m^3. Il s'agit de l'année la plus humide sur le plan des eaux souterraines pour la période modélisée.

Les années 1995-1996, 2003-2004 et 2008-2009 sont également marquées par une forte contribution de la recharge (autour de 46 %) et un stockage fortement positif (40 à 50 millions de m^3).

À l'inverse, les résultats de la modélisation mettent en évidence l'année 2004-2005 comme année de sécheresse pour les eaux souterraines, avec un minimum de recharge observé (27,5 %) sur la période modélisée et un stockage fortement négatif (-70 millions de m^3).

Les années 2001-2002 et 2010-2011 sont également sèches, avec une recharge comprise entre 28 et 30 % du bilan hydrologique et un stockage négatif de l'ordre de -60 millions de m^3.

- **Autres apports**

Les autres apports sont constants dans le temps. Ce sont, par volumes décroissants :

- l'infiltration liée aux fuites du canal latéral à la Garonne : 39 millions de m^3, soit 5 à 11,5 % du bilan hydrologique ;
- l'apport par continuité de l'aquifère alluvial aux bordures amont du modèle dans les plaines du Tarn et de la Garonne : 9,3 millions de m^3, soit 1 à 3 % du bilan hydrologique ;
- l'apport par le forage de réinjection à Castelsarrasin : 0,1 million de m^3, soit moins de 0,1 % du bilan hydrologique.

Leur contribution relative totale varie de 6,5 à 14,5 %, avec une moyenne de 9 %, suivant les variations des autres termes du bilan (recharge et alimentation des rivières en particulier).

Éléments négatifs du bilan

- **Drainage de la nappe par les rivières**

La contribution au bilan hydrologique du drainage de la nappe par les cours d'eau varie de 22,5 % en 2012-2013 à 30 % en 2010-2011. En volume, le drainage représente de 90 (en 2011-2012) à 202 (en 1996-1997) millions de m^3.

En intégrant le volume drainé dans les contre-canaux, pompé et réinjecté dans le plan d'eau de Saint-Nicolas-de-la-Grave, on atteint une contribution au bilan hydrologique comprise entre 29 % (en 2012-2013) et 42 % (en 2004-2005). En volume, le drainage représente alors de 134 (en 2011-2012) à 252 (en 1996-1997) millions de m^3.

La plupart du temps, les différentes rivières drainent la nappe alluviale (cf. Illustration 101, période de débit moyen de la Garonne). Les débits négatifs (en bleu) correspondent au drainage de la nappe tandis que les débits positifs (jaune à rouge) représentent les zones d'alimentation de la nappe par les rivières. Au niveau de la retenue en amont du barrage de Malause, c'est le plan d'eau qui alimente la nappe, même si ces apports sont en pratique fortement limités par la présence des contre-canaux.

En période de crue, la relation s'inverse et les cours d'eau alimentent alors la nappe alluviale (cf. Illustration 102). C'est le cas pour l'ensemble du tracé de la Garonne et une partie du tracé du Tarn et de l'Aveyron. Pour ces deux cours d'eau, l'encaissement du lit et le conditionnement du niveau par les différents seuils ne permet pas l'alimentation de la nappe sur certains tronçons.

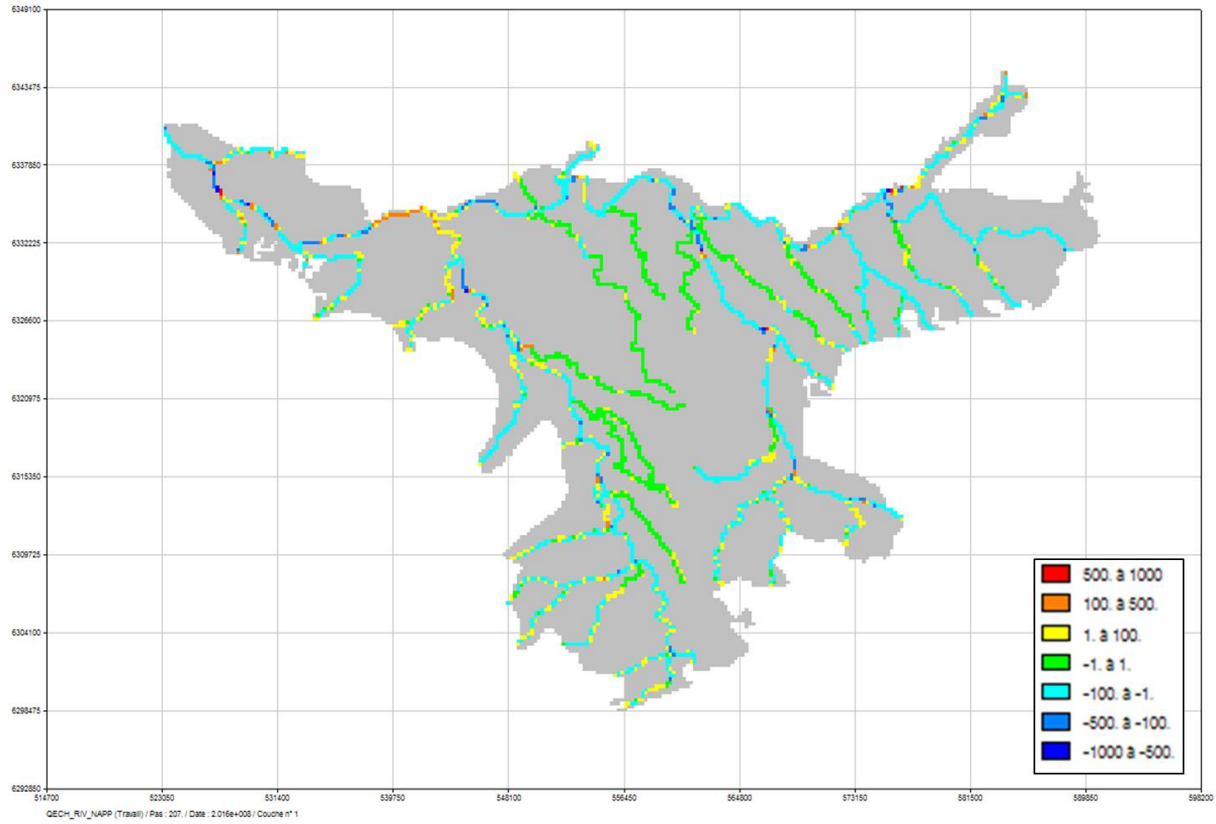


Illustration 101 – Échanges rivière -> nappe (en m³/h) – Mai 2008 (débit moyen).

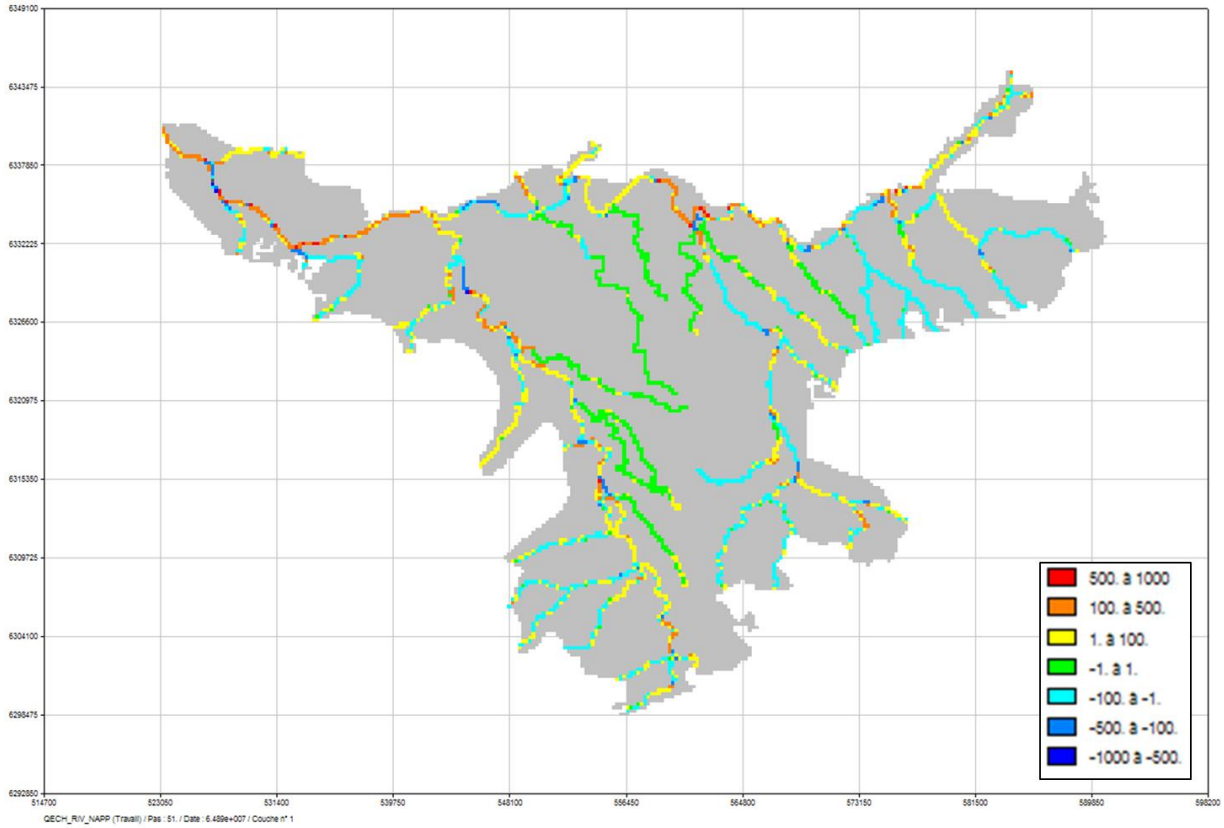


Illustration 102 – Échanges rivière -> nappe (en m³/h) – Janvier 2004 (crue).

- **Débordements de la nappe**

Les débordements de la nappe forment une composante stable du bilan hydrologique (entre 11 et 13 %), bien que leur volume varie fortement (de 38 à 99 millions de m^3). Ils sont fonction de la recharge, avec une corrélation positive : les débordements sont d'autant plus importants que la recharge est forte. En cumul, le ratio de débordements par rapport à la recharge se stabilise rapidement autour de 30 % (cf. Illustration 103).

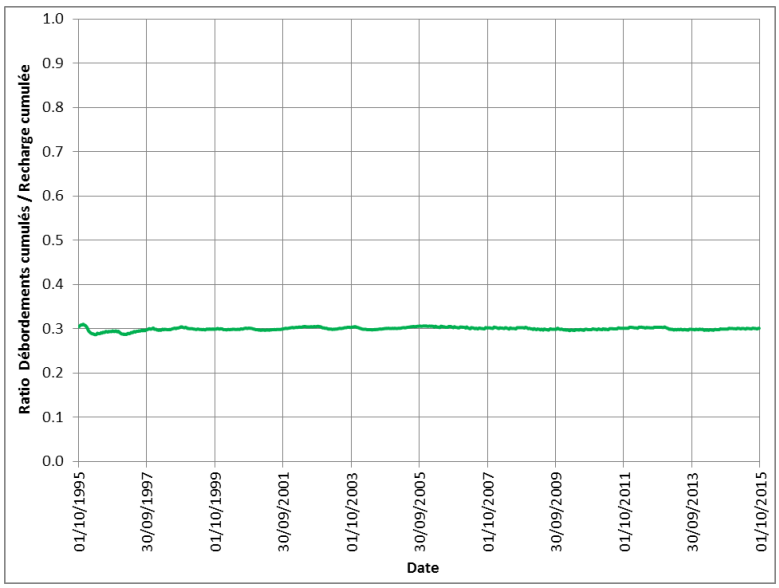


Illustration 103 – Ratio débordements cumulés / recharge cumulée.

Les débordements se situent essentiellement en bordure de la zone modélisée, où la topographie est plus accentuée (cf. Illustration 104). La modélisation maillée implique qu'une seule valeur du niveau piézométrique est retenue pour un carré de 250 m de côté dont la cote topographique est la valeur moyenne du MNT à 25 m. Les fortes variations de la topographie et de la piézométrie d'une maille à l'autre créent donc ces débordements.

D'autres débordements sont observés au contact entre différentes terrasses. C'est le cas dans les vallées de la Lère et de l'Aveyron amont, où la molasse affleure entre la basse plaine et les terrasses plus anciennes. C'est également le cas au contact entre la basse plaine et la basse terrasse du Tarn, au sud-ouest du piézomètre « Castel ». Cette zone a été particulièrement délicate à modéliser. Elle est traversée d'ouest en est par le canal de Montech et du nord au sud par le coteau séparant la basse plaine du Tarn de la basse terrasse.

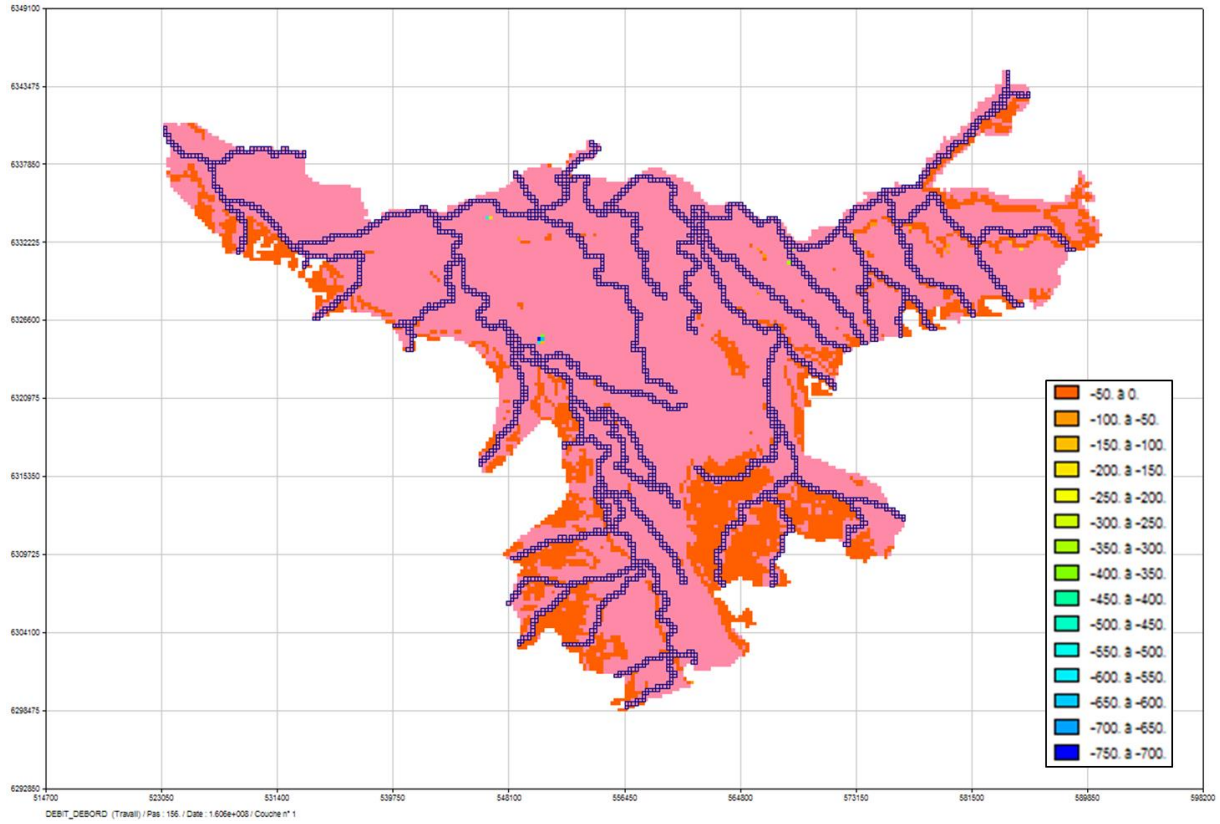


Illustration 104 – Maximum de débordements (3ème décade janvier 1997).

- **Prélèvements en nappe**

Les prélèvements ne représentent qu'une faible fraction du bilan hydrologique, comprise entre 2 et 5 %. En valeur absolue, ils sont compris entre 13,8 et 18,2 millions de m^3.

Sur la période où ils ont été plus précisément évalués (2006 à 2012), leur contribution au bilan hydrologique est plus élevée (de 3,4 à 4,2 %) lors des années sèches (2005-2006, 2007-2008, 2010-2011 et 2011-2012) que lors des années humides (entre 2,2 et 2,7 % pour 2006-2007, 2008-2009 et 2009-2010). Cette observation est cohérente avec un besoin d'apport d'eau anthropique plus important lors des années plus sèches.

Mailles désaturées

Les mailles désaturées (teneur en eau $<10^{-3}$ %) sont les zones où l'aquifère alluvial ne contient pas d'eau mobilisable. Le niveau piézométrique se situe alors sous le mur des alluvions, dans la formation molassique sous-jacente. L'Illustration 105 présente la carte du maximum de désaturations pendant la période modélisée.

Comme pour les problèmes de débordement, ce phénomène peut s'expliquer par :

- des problèmes de géométrie : mailles trop grandes pour représenter correctement le gradient de charge dans les zones de fort dénivelé ;
- des limites entre les terrasses alluviales où la molasse affleure, créant une discontinuité de la nappe alluviale. Les débordements engendrés au niveau de ces discontinuités sont transférés au réseau hydrographique (contrainte du logiciel) et non pas réinfiltrés dans la terrasse suivante, créant ponctuellement des désaturations en aval.

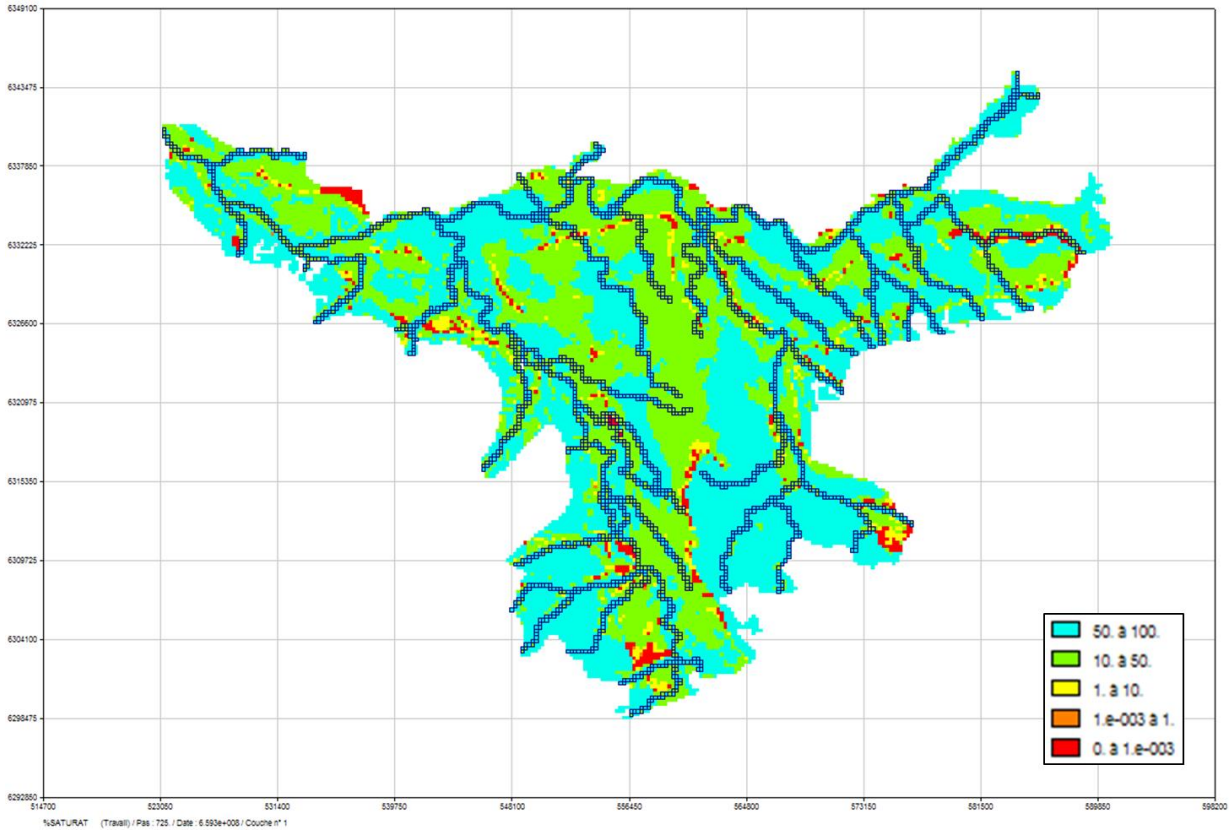


Illustration 105 – Maximum de désaturations (2ème décade novembre 2012).

Échanges avec les formations molassiques sous-jacentes

Le Tableau 27 présente le bilan global du modèle, intégrant les deux couches du modèle : formations alluviales et molassiques.

Les éléments du bilan hydrologique décrits dans les paragraphes précédents concernent la couche affleurante du modèle, soit les différentes formations composant la nappe alluviale, à quelques affleurements ponctuels des formations molassiques près.

Le logiciel MARTHE permet, en plus du bilan global, de réaliser des bilans par zones. Cette fonction permet de déterminer les échanges entre l'aquifère alluvial et les molasses sous-jacentes, ainsi que le stockage d'eau dans chaque formation (cf. paragraphe suivant).

L'Illustration 106 présente les échanges décadaires de la formation molassique vers la nappe alluviale sur la période de modélisation. L'Illustration 107 synthétise les échanges à l'échelle annuelle.

Les échanges se font systématiquement dans le sens d'une alimentation de la nappe alluviale par les formations molassiques sous-jacentes. Ils sont néanmoins limités et particulièrement stables d'une année à l'autre : entre 3,0 et 3,8 millions de m^3/an, ce qui représente de 0,4 à 1,1 % du bilan hydrologique des échanges dans le compartiment superficiel.

En période de forte recharge ou de crue, le débit d'alimentation de la nappe alluviale par les formations molassiques diminue fortement : 150 à 250 m^3/h contre 350 à 450 m^3/h le reste du temps.

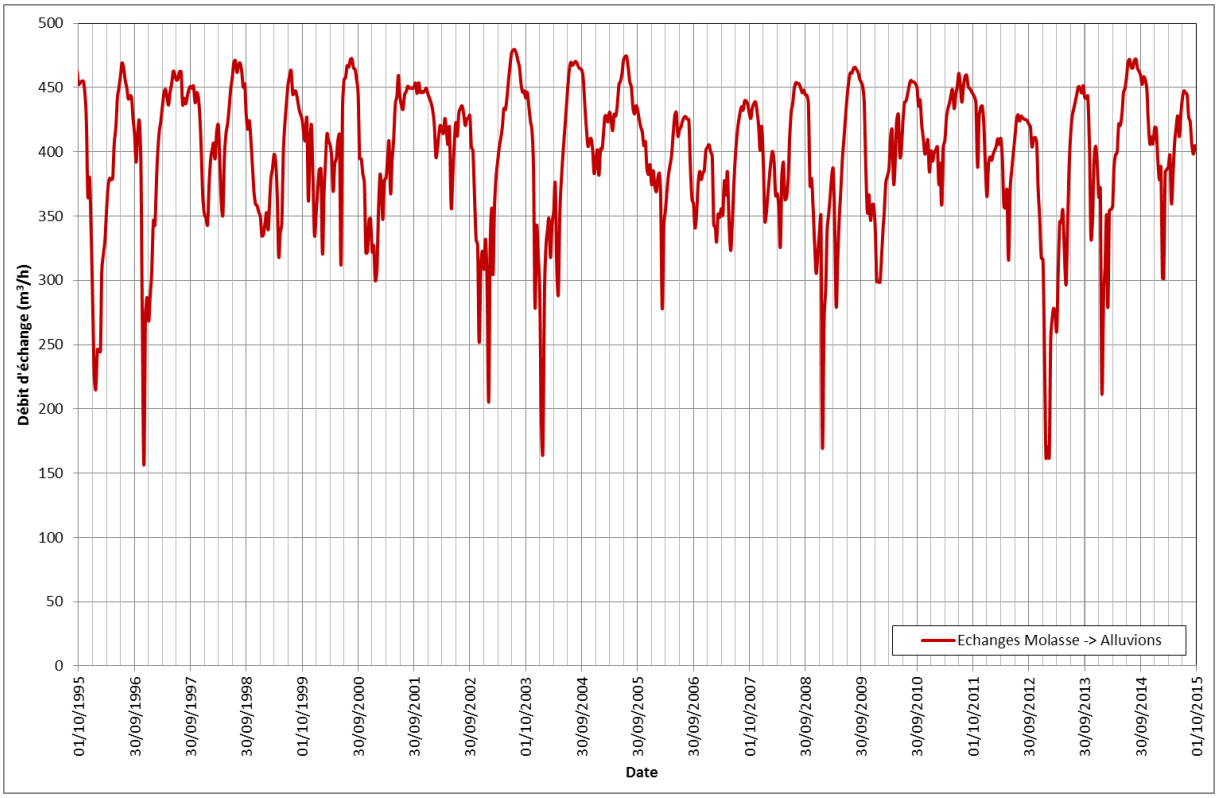


Illustration 106 – Échanges décadaires Molasse -> Alluvions (en m³/h).

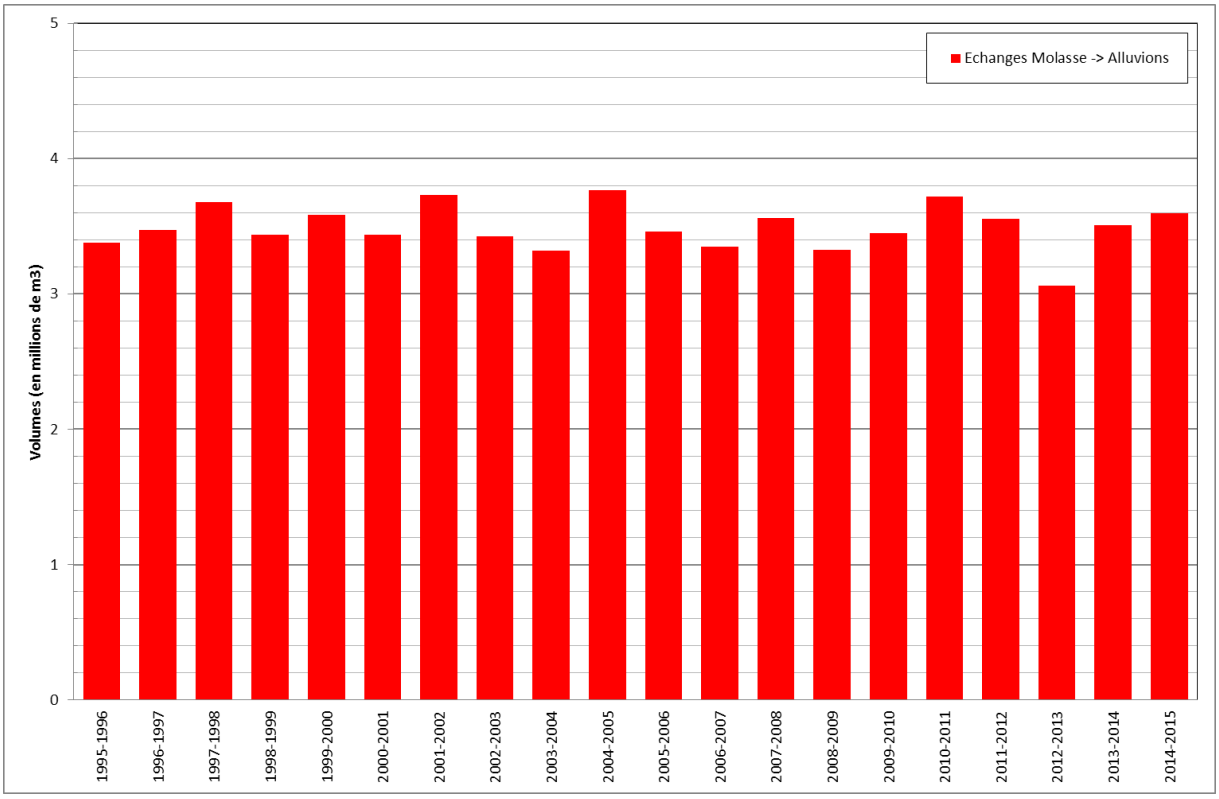


Illustration 107 – Échanges annuels Molasse -> Alluvions (en millions de m³).

Stockage de la nappe alluviale

La différence entre le somme des éléments positifs et la somme des éléments négatifs du bilan correspond au stockage de la zone modélisée. Celui-ci peut être positif et, dans ce cas, la zone modélisée accumule de l'eau. Il peut aussi être négatif et, dans ce cas, les formations représentées restituent de l'eau aux autres compartiments (les différentes composantes du bilan hydrologique superficiel).

À l'échelle de l'ensemble du modèle (cf. Illustration 108), le stock varie de -71 millions de m^3 en 2004-2005 (année sèche) à +97 millions de m^3 en 2012-2013 (année humide).

Globalement, sur les 20 années de modélisation, il n'existe pas de tendance globale au stockage ou au déstockage des volumes d'eau présents dans l'aquifère alluvial.

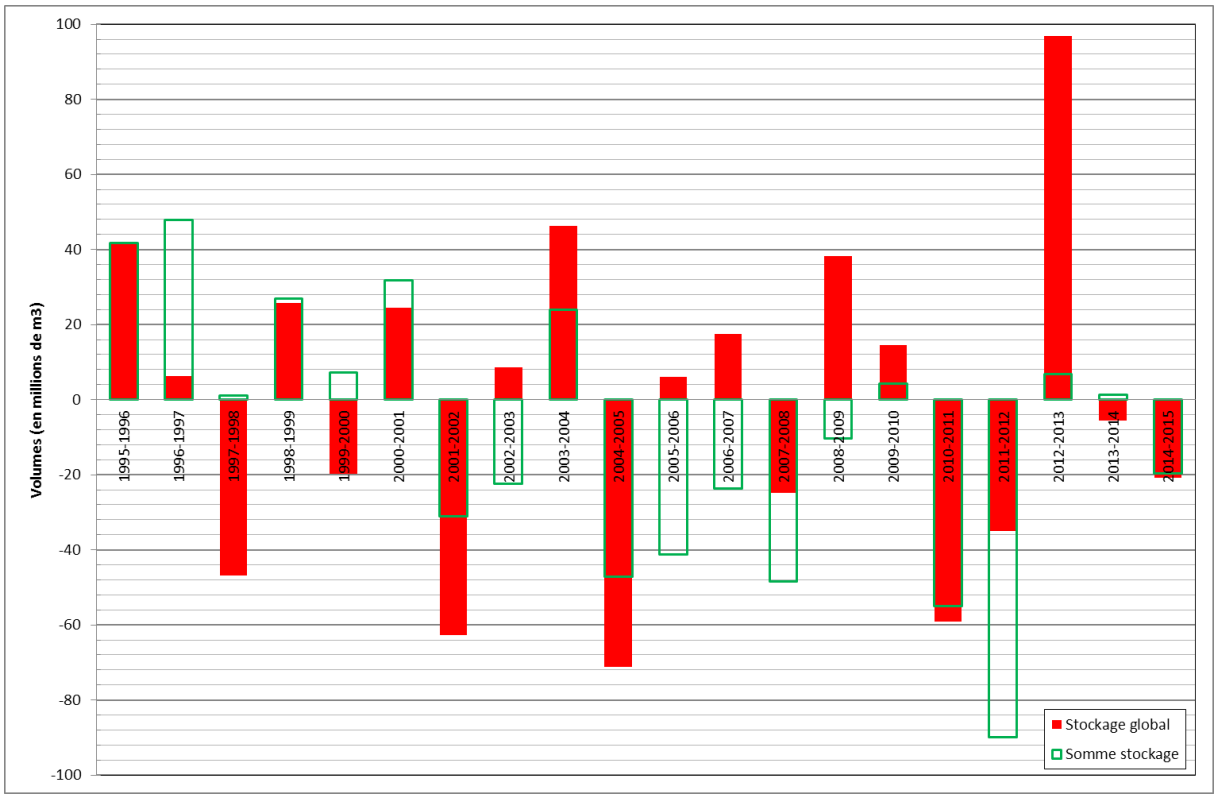


Illustration 108 – Histogramme de l'évolution du stockage de la zone modélisée (en millions de m³).

Le bilan par zones permet de détailler le stockage dans la nappe alluviale (cf. Illustration 109) du stockage dans la molasse (cf. Illustration 110).

Le stockage dans la molasse reste limité (-1,7 à +2,3 millions de m^3) comparé au stockage dans la nappe alluviale (-69,5 à +94,5 millions de m^3). La proportion n'est cependant pas toujours négligeable lors des années hydrologiques où le stock total varie peu (6 % en 2005-2006).

Les paramètres hydrodynamiques choisis pour représenter les formations molassiques expliquent la faible quantité d'eau et sa faible mobilité : perméabilité de 10^{-7} m/s, coefficient d'emmagasinement de 5 % (quand le niveau piézométrique est dans la molasse) et coefficient d'emmagasinement spécifique de 10^{-5} m^{-1} (quand la molasse est saturée en eau).

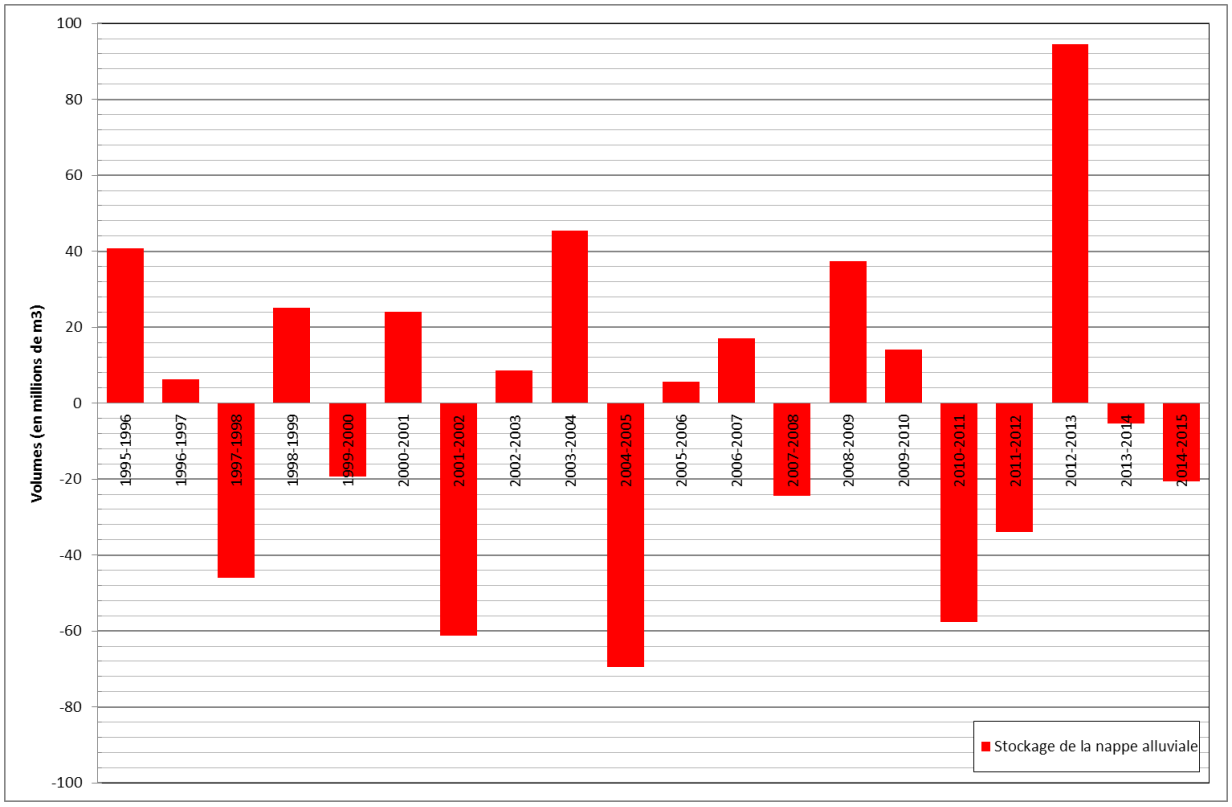


Illustration 109 – Histogramme de l'évolution du stockage de la nappe alluviale (en millions de m³).

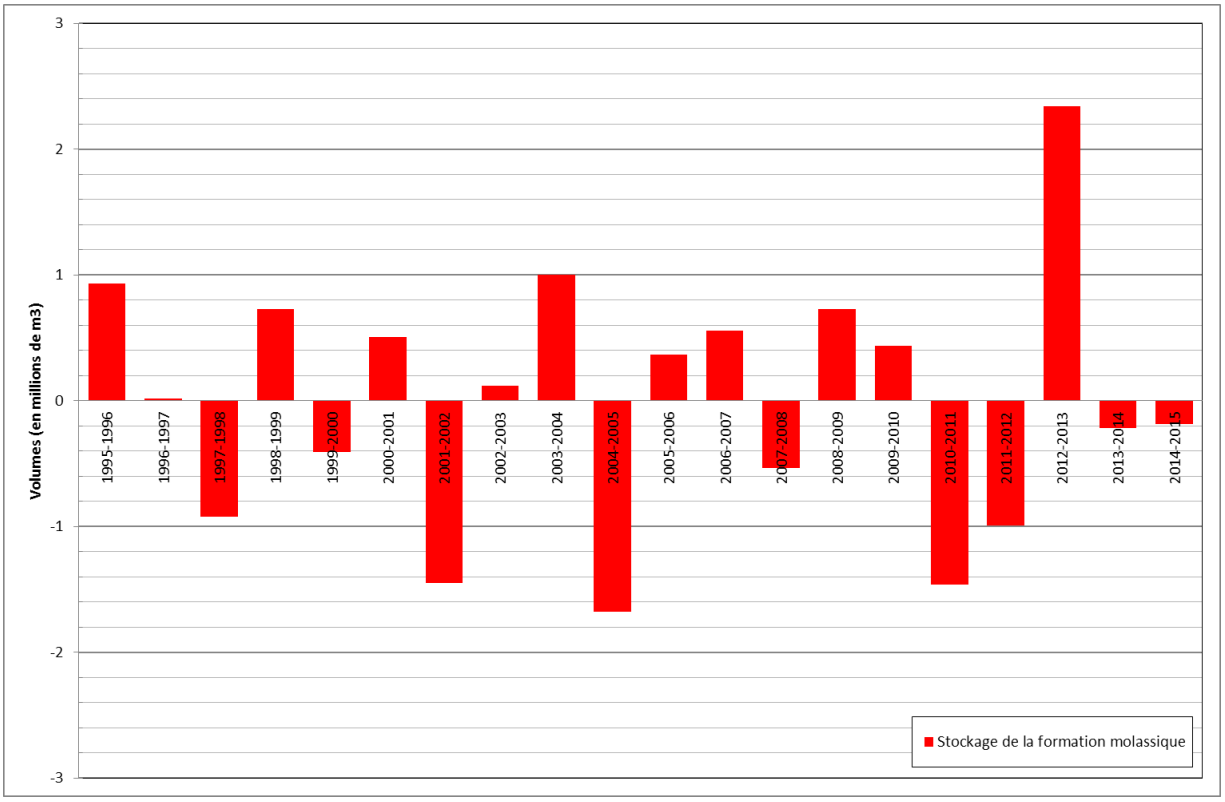


Illustration 110 – Histogramme de l'évolution du stockage de la molasse modélisée (en millions de m³).

Ainsi, l'évolution du stockage de l'ensemble de la zone modélisée reflète bien l'évolution du stockage de la nappe alluviale.

Bilan hydrologique synthétique

La synthèse des éléments du bilan est présentée dans le schéma de l'Illustration 111 ci-après.

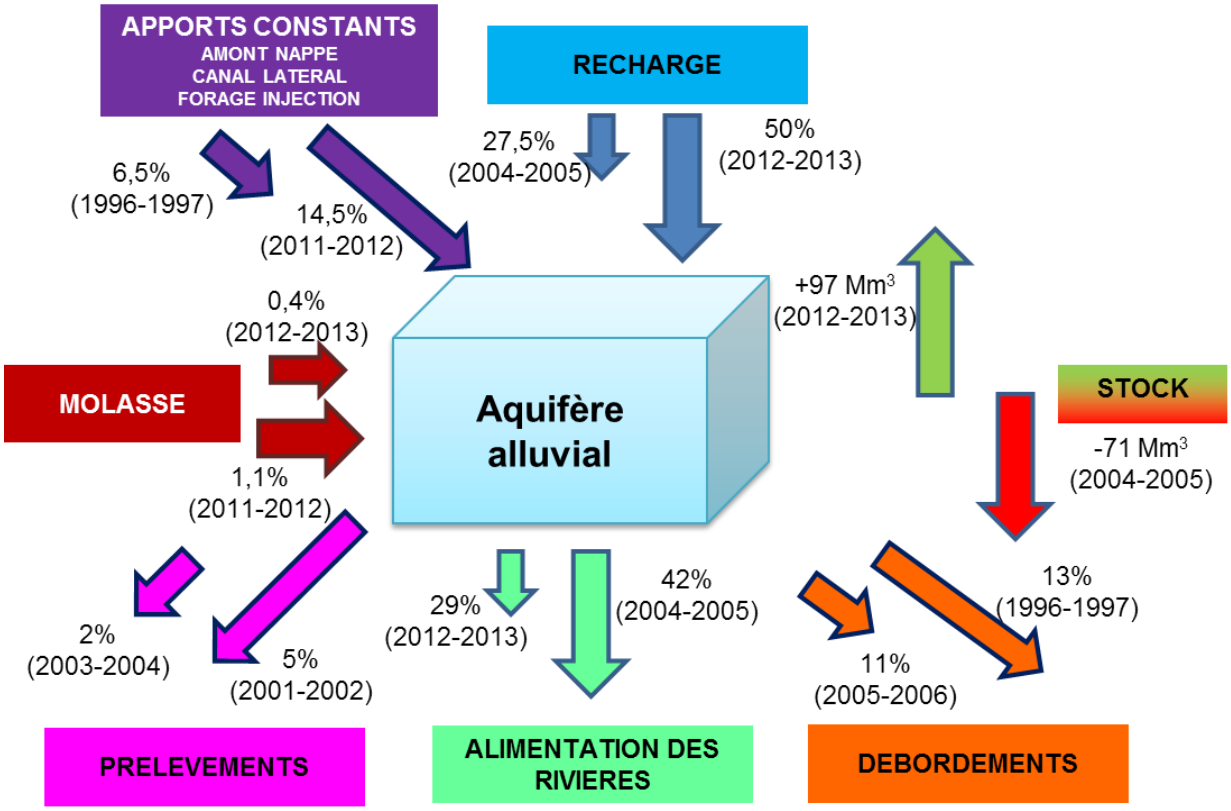


Illustration 111 – Schéma de synthèse du bilan hydrologique sur la période 1995-2015.

5. Analyse critique du modèle

5.1. AMÉLIORATIONS APPORTÉES AU MODÈLE PRÉ-EXISTANT

Le travail d'actualisation du modèle de la nappe alluviale dans le Tarn-et-Garonne a permis d'apporter plusieurs améliorations au modèle en régime transitoire réalisé entre 2005 et 2007, qui était lui-même une évolution du modèle en régime permanent de 1996.

- **Pas de temps**

  La version précédente du modèle utilisait un pas de temps de deux mois. La nouvelle version du modèle fonctionne avec un pas de temps décadaire, afin de mieux prendre en compte les variations du niveau de la nappe. Les prélèvements pour l'irrigation sont également mieux ventilés sur la période estivale (ratios mensuels), là où ils étaient constants sur l'ensemble de la période d'irrigation auparavant.

- **Modèle géologique**

  Dans l'optique d'estimer les réserves en eau souterraine disponibles, l'épaisseur des formations alluviales est un paramètre clé de la modélisation. Afin d'améliorer la connaissance de ce paramètre, un travail de synthèse des forages existants et une modélisation géologique ont permis de modéliser au mieux des connaissances actuelles la cote du mur des alluvions.

  Malheureusement, la complexité de la géométrie des terrasses alluviales associée à des données de forages ne permettant pas de toujours estimer correctement le toit des formations molassiques ont montré que les connaissances du sous-sol étaient encore trop limitées pour que le modèle géologique soit directement transposable dans le modèle hydrodynamique.

- **Hydroclimatologie :**

  La version précédente du modèle calculait la recharge avec un schéma de type « réserve utile » et des chroniques climatiques décadaires intégrées sur le pas de temps bimestriel. L'actualisation du modèle a permis d'affiner le calcul de la recharge en utilisant le couplage avec le logiciel GARDENIA afin de simuler de manière plus réaliste l'infiltration des eaux dans le sol jusqu'à la nappe. Pour cela, un schéma de type « réservoir sol progressif » a été utilisé, ainsi que des chroniques journalières, plus adaptées au rythme circadien de la végétation.

- **Réseau hydrographique :**

  Dans la version précédente du modèle, le réseau hydrographique principal était représenté par une série de mailles à potentiel imposé. Autrement dit, le niveau des rivières était fixe. De plus, l'estimation de la cote du fil de l'eau reposait sur un nombre de points de mesure limités (17).

  L'actualisation du modèle a permis d'améliorer considérablement la prise en compte du réseau hydrographique :

  - estimation de la cote de fond des rivières principales (Garonne, Tarn, Aveyron, Lère) grâce à de nombreux profils bathymétriques historiques ;
  - mesures de la cote du fil de l'eau en 204 points sur les 12 cours d'eau principaux et estimation à partir de la carte IGN 1/25 000 pour les cours d'eau mineurs ;

- construction de chroniques de débit amont pour les cours d'eau non instrumentés à l'aide de mesures de débits ponctuels, de comparaisons avec des bassins versants de référence et d'une modélisation pluie-débit avec GARDENIA ;
- prise en compte des variations de la hauteur d'eau en fonction du débit par l'introduction de relations de Manning-Strickler ;
- prise en compte des aménagements hydrauliques impactant fortement le niveau des rivières (barrages, seuils, canaux) grâce à un tout récent développement de MARTHE prenant en compte ce type de loi hauteur-débit.

- **Prélèvements en nappe et en rivière :**

  La version précédente du modèle se basait sur les volumes prélevés pour l'AEP et l'industrie, avec une géolocalisation imprécise, et sur les débits autorisés pour l'irrigation, répartis uniformément sur les 4 mois de la période d'irrigation.

  L'actualisation du modèle, via un travail exhaustif pour faire concorder les différentes bases de données existantes, a permis de géolocaliser précisément les prélèvements réellement effectués pour les 3 usages sur la période 2006-2012.

  Une étude réalisée par EAUCEA a également permis de ventiler les prélèvements agricoles de manière plus réaliste sur les 4 mois d'irrigation.

Une partie de cet important travail a pu être réalisé grâce à la participation du BRGM au projet de recherche REGARD (Modélisation des Ressources en Eau sur le bassin de la GARonne : interaction entre les composantes naturelles et anthropiques et apport de la téléDétection).

Le partenariat établi dans le cadre de ce projet avec différents laboratoires toulousains a permis de mutualiser des données. C'est ainsi qu'ont pu être récupérées :

- les chroniques climatiques journalières de la station de Montauban, grâce au CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) ;
- des données sur le réseau hydrographique (certains profils bathymétriques, résultats de modélisation hydrologique), grâce à l'IMFT (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse) ;
- des calculs de recharge réalisés à partir des modèles de l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) prenant en compte les cultures réalisées sur chaque parcelle, les besoins en eau associés et les stratégies d'irrigation développées.

De plus, une partie du travail réalisé sur la modélisation de la nappe alluviale du Tarn-et-Garonne a été faite dans le cadre du projet REGARD, dont l'objectif, outre le partage des données, était de contribuer à améliorer les modèles des différentes composantes du cycle de l'eau développés dans chacun des laboratoires partenaires.

5.2. LIMITES DU MODÈLE ACTUEL

Malgré les nombreux travaux réalisés, plusieurs axes d'améliorations futures existent afin d'améliorer le modèle hydrodynamique de la nappe alluviale dans le Tarn-et-Garonne.

- **Hydroclimatologie :**

  L'estimation de la recharge sur la zone modélisée reste difficile. L'essentiel de l'eau sortant du modèle au niveau de l'exutoire (la Garonne vers Lamagistère) provient des débits à l'entrée dans le modèle des principaux cours d'eau (Garonne, Tarn, Aveyron), le Tarn-et-Garonne ne représentant qu'une fraction des bassins versants associés à ces cours d'eau.

En conséquence, les paramètres associés au sol (capacité de stockage, répartition ruissellement/infiltration, temps de transfert vers la zone saturée) restent liés à un calage local.

Le travail avec l'INRA aurait permis d'améliorer la connaissance des dynamiques dans cette zone non saturée, en particulier les quantités d'eau consommées par les plantes, les stratégies précises des irrigants, les éventuelles ré-infiltrations d'eau d'irrigation non consommée par la végétation. Malheureusement, l'INRA ne disposait des informations précises que sur une petite partie de la zone modélisée (vallée de l'Aveyron).

- **Géométrie du mur des alluvions :**

  La modélisation géologique et sa transposition dans le modèle hydrodynamique ont montré que les connaissances de la géométrie des formations alluviales restaient insuffisantes. Or, ce paramètre détermine directement la quantité d'eau disponible dans la nappe alluviale.

- **Coefficient d'emmagasinement / porosité efficace :**

  Ce paramètre, estimé à partir de mesures ponctuelles et de connaissances bibliographiques, est un paramètre de calage secondaire. Son influence s'observe essentiellement sur l'amplitude des variations piézométriques, là où la perméabilité influence directement le niveau. Afin de le caler précisément, il faudrait donc disposer de nombreuses chroniques de suivi automatique du niveau piézométrique.

  Or, la porosité efficace contribue également à déterminer la quantité d'eau disponible dans la nappe alluviale.

  Si, à l'échelle de l'ensemble de la zone modélisée, les connaissances de la géologie du secteur permettent d'avoir une estimation moyenne correcte, à l'échelle plus restreinte d'un casier hydrogéologique, une hétérogénéité locale peut modifier sensiblement la réserve en eau souterraine.

  L'installation de points de suivi automatique du niveau de la nappe supplémentaires permettrait de remédier en partie à ce problème.

6. Délimitation de la nappe d'accompagnement

6.1. NOTION DE NAPPE D'ACCOMPAGNEMENT

La notion de nappe d'accompagnement n'est pas clairement définie dans les textes règlementaires. Elle est pourtant l'objet permettant de définir des règles de gestion de la ressource en eau et des règles de tarification associées.

La question de la définition de ce terme a été abordée par le BRGM dans le rapport n° R-38586-FR (cf. Collin et Daum, 1995).

A partir de ces travaux et réflexions, la définition suivante de la nappe d'accompagnement peut être proposée :

Nappe(s) souterraines(s) en connexion hydraulique avec le cours d'eau et dans laquelle un prélèvement est susceptible d'avoir un impact (direct ou indirect) sur le débit de celui-ci, avant la fin de l'étiage.

6.2. MÉTHODE DE DÉLIMITATION

Il existe plusieurs méthodes permettant d'aboutir à la délimitation du contour de la nappe d'accompagnement. Celles-ci sont détaillées dans le rapport BRGM RR-38586-FR. Il convient néanmoins de rappeler qu'au-delà des méthodes de calcul, la forme et l'extension de la nappe d'accompagnement dépend avant tout des choix de gestion adoptés :

- Quel impact des prélèvements d'eau souterraine sur le débit des cours d'eau est acceptable ?
- Quel manque à gagner pour l'alimentation des débits d'étiage des cours d'eau est tolérable ?
- Quelles sont les pratiques d'irrigation (durée, intensité) ?

6.2.1. Méthode de Theis simplifiée

Une des méthodes les plus utilisées et les plus faciles à mettre en œuvre est l'adaptation de la formule de Theis et de Darcy.

La nappe d'accompagnement est la zone où tout pompage aura un minimum d'impact relatif sur la rivière. Le choix du seuil d'impact d'un prélèvement en nappe sur le débit de la rivière et d'un temps « t » au bout duquel l'impact se manifestera permettra de délimiter la nappe d'accompagnement.

Ces paramètres, le seuil d'impact et le temps « t » au bout duquel l'impact se manifestera doivent donc être estimés.

Dans cette méthode, la limite de la nappe d'accompagnement, sera située à une distance r de la rivière, définie par la relation suivante :

$$r = \frac{\sqrt{4Tt}}{Str}$$

Avec :

T : transmissivité en m²/s

t : variable de temps

S : coefficient d'emmagasinement

t_r : temps réduit, correspondant au seuil d'impact choisi (cf. tableau de l'Annexe 17)

L'extrait du rapport BRGM RR-38586-FR détaillant les principes de cette méthode est disponible en Annexe 17.

Cette méthode est intéressante car elle permet de délimiter une nappe d'accompagnement sans passer par une modélisation hydrodynamique, qui nécessite un grand jeu de données d'entrée, pouvant être longues à capitaliser, et une phase de conception et de calage relativement complexe.

L'inconvénient est qu'elle nécessite de connaître la transmissivité (T) et le coefficient d'emmagasinement (S) de l'aquifère alluvial, affectés à des zones homogènes. En l'absence de données bibliographiques ou de terrain, les zones de T et de S élaborées peuvent être de grande dimension et les valeurs affectées assez éloignées de la réalité de terrain. Or, la distance ou largeur de la nappe d'accompagnement sera directement impactée par ces paramètres.

Dans le cas où un modèle hydrodynamique maillé existe, les zones et les valeurs de T et de S issues du calage peuvent être utilisées pour délimiter la nappe d'accompagnement avec la méthode de Theis.

6.2.2. Méthode des trajectoires inverses

L'autre méthode pouvant être utilisée est l'utilisation du modèle hydrodynamique maillé. Lorsque le modèle est calé en régime transitoire, il est possible de simuler la charge hydraulique et les débits échangés entre mailles aquifères et avec les mailles rivières à n'importe quel endroit du modèle et pour tous types de scenarii de recharge.

Pour tracer le contour de la nappe d'accompagnement, une des techniques utilisée est celle des trajectoires inverses : grâce au modèle de transfert de solutés du logiciel MARTHE, des particules fictives sont injectées dans chacune des mailles rivières étudiées. Le modèle va calculer la position de la particule à chaque pas de temps, en remontant dans le temps (origine de la particule). Cela permet de connaître le cheminement de la particule en fonctionnement naturel de la nappe, en prenant éventuellement en compte d'éventuels pompages pré-existants. Le contour ainsi identifié est appelé « isochrone à t jours » en fonction du temps d'impact « t » choisi (ex : isochrone à 90 jours).

Cette méthode propose une approche différente de celle présentée par Collin et Daum. En effet, elle ne détermine pas si un pompage soustrait directement ou indirectement de l'eau au cours d'eau sur le temps d'impact choisi. Elle ne nécessite donc pas la définition d'un seuil d'impact.

Ainsi, un pompage situé à l'extérieur de la zone définie par l'isochrone à « t » jours, mais dont le débit délimite une zone d'appel partiellement située à l'intérieur de l'isochrone, soutirera de l'eau au cours d'eau sur le temps « t ». Cette méthode sous-estime donc légèrement l'extension de la nappe d'accompagnement.

6.3. NAPPE D'ACCOMPAGNEMENT DE LA GARONNE, DU TARN ET DE L'AVEYRON

La nappe d'accompagnement en vigueur dans le département de Tarn-et-Garonne est celle délimitée en 1996 lors des premiers travaux de modélisation. Les calculs ont été réalisés à partir de la méthode de Theis simplifiée, puis adaptés au contexte géologique. Au final, la nappe d'accompagnement adoptée est très proche de l'emprise des alluvions de la basse plaine de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron. Elle s'étend également à la vallée de la Lère.

Les critères utilisés étaient les suivants :

- seuil d'impact sur le débit des rivières : 1 à 5 % ;
- durée de l'impact (temps nécessaire pour qu'un prélèvement en nappe commence à influencer le débit en rivière) : 90 jours ;
- transmissivité : $2{,}5.10^{-3}$ m²/s pour toute la basse plaine ;
- coefficient d'emmagasinement : 4% pour toute la basse plaine.

Étant donné l'emprise importante de la nappe d'accompagnement calculée à partie d'un seuil d'impact de 1 % et de 5 %, il a été décidé de restreindre majoritairement cette nappe aux limites de la basse plaine.

La carte de l'Illustration 112 montre la délimitation de la nappe d'accompagnement de 1996, ainsi que les transmissivités de calage (probablement utilisées pour le calcul).

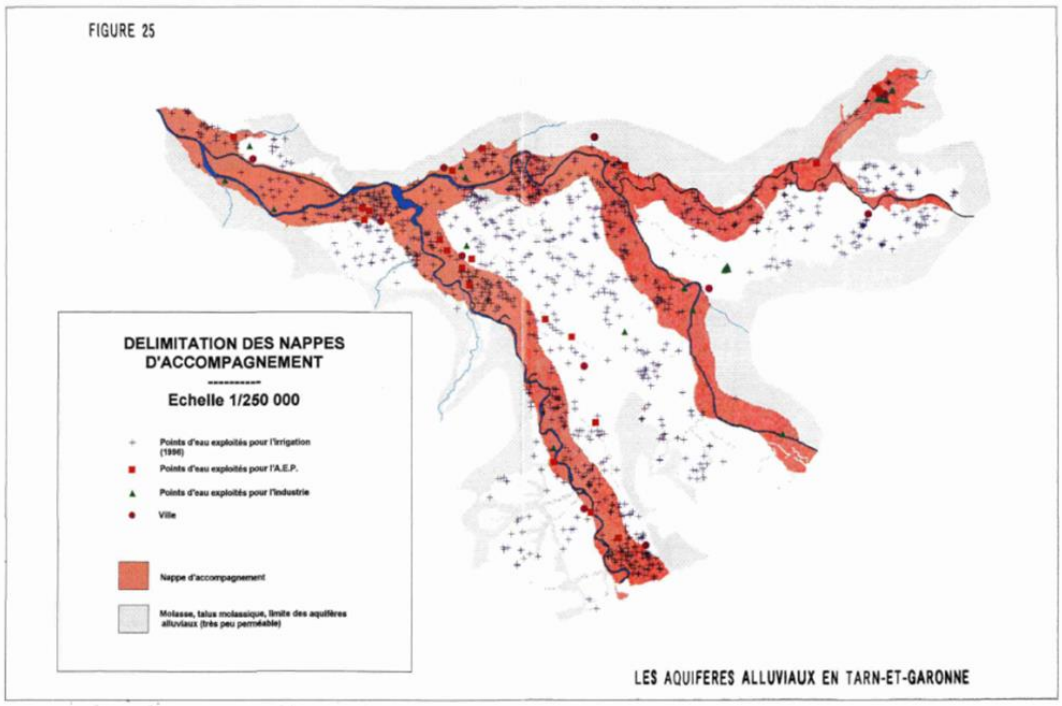


Illustration 112 – Carte de l'emprise de la nappe d'accompagnement définie en 1996 (cf. Gandolfi, 1997).

Il a été demandé au BRGM de procéder à une nouvelle délimitation de la nappe d'accompagnement à partir des résultats du nouveau modèle.

Les deux méthodes présentées ont été utilisées.

6.3.1. Méthode de Theis (Darcy)

Les paramètres suivants ont été utilisés :

- seuil utilisé : 5,65 % (du débit de la rivière) ;
- durée d'impact : 90 jours ;
- transmissivité = perméabilités des zones de calage du nouveau modèle multipliée par l'épaisseur moyenne par zone de perméabilité (issue de la géométrie du modèle) ;
- coefficient d'emmagasinement : valeurs et zones de calage du dernier modèle.

Le contour obtenu est présenté dans l'Illustration 113.

La nappe d'accompagnement présente une largeur importante, variant de 1 100 m dans la plaine de l'Aveyron amont, à 5 300 m dans la zone de confluence du Tarn et de la Garonne. Son contour dépasse largement l'emprise de la basse plaine. Or, il paraît peu probable que des prélèvements effectués sur la basse terrasse impactent le débit des cours d'eau dans un délai inférieur à 90 jours. La géomorphologie en terrasses étagées empêche un soutirage direct de l'eau de la rivière à partir de pompages réalisés dans la basse terrasse. Néanmoins, l'eau pompée de cette nappe peut constituer un manque à gagner pour le soutien d'étiage de la Garonne, mais l'impact de celui-ci reste négligeable.

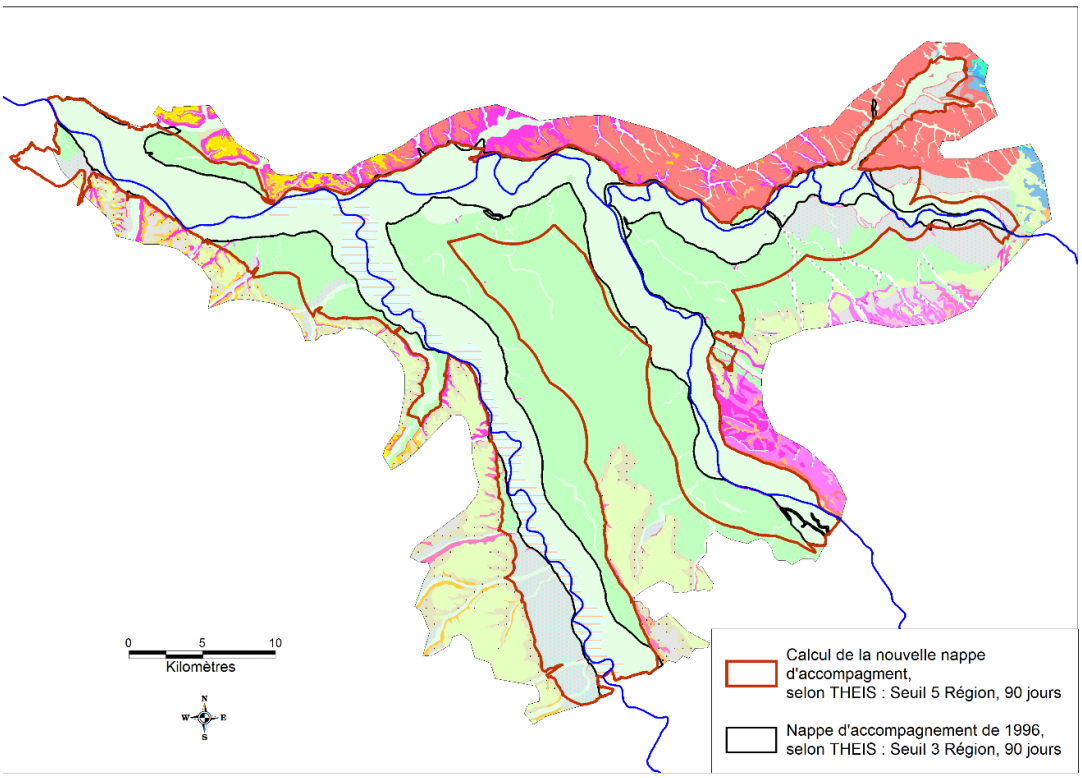


Illustration 113 – Carte de délimitation de la nappe d'accompagnement avec le méthode de Theis, à partir des données de calage du nouveau modèle.

6.3.2. Méthode des trajectoires inverses – Réseau hydrographique fixe

Une présentation des résultats issus d'une version du modèle fonctionnant uniquement avec un réseau hydrographique fixe a été faite le 27 juillet 2015 dans les locaux de la DDT 82.

Dans ce cadre, les paramètres utilisés pour calculer le trajet inverse des particules, depuis la rivière vers la nappe, étaient les suivants :

- temps de parcours de particules : environ 90 jours (3 mois) ;
- conditions hydrologiques : 3 scenarii climatiques retenus : décennale sèche (2008), année moyenne (1972) et décennale humide (1961) et 2 périodes : hautes eaux (février-avril) et basses eaux (juillet-septembre) ;
- porosité efficace = coefficient d'emmagasinement ;
- pas de pompages en nappe et en rivière.

Le résultat obtenu est présenté dans les cartes de l'Illustration 114 et l'Illustration 115.

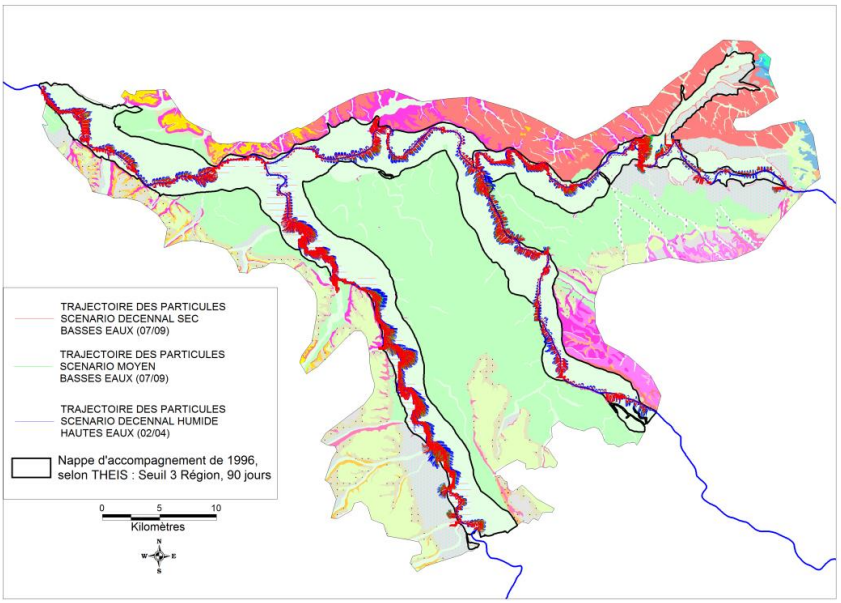


Illustration 114 – Isochrones à 90 j pour trois scenarii climatiques (modèle 2015).

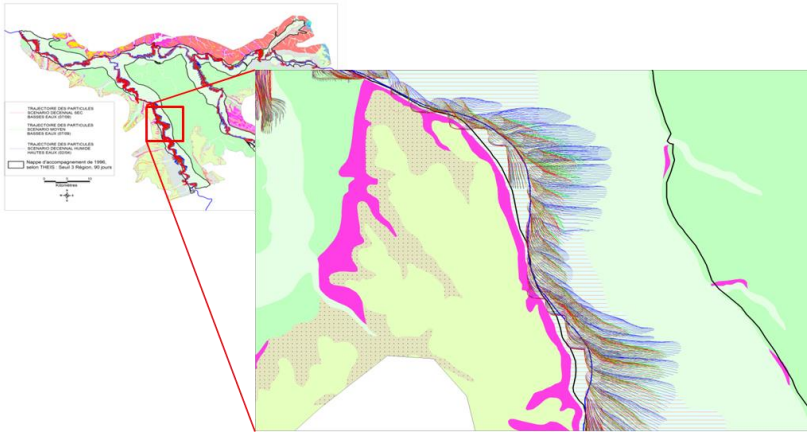


Illustration 115 - Isochrones à 90 j pour trois scenarii climatiques (modèle 2015) – Zoom sur le secteur d'Escatalens (rouge : décennal sec, vert : moyen, bleu : décennal humide).

La nappe d'accompagnement délimitée par ces isochrones est beaucoup plus étroite que celle calculée avec la méthode de Theis. Ce résultat est limité par le fait que, dans cette version du modèle, le calcul des trajectoires inverses ne prenait pas en compte :

- les variations du niveau des cours d'eau : le niveau, constant, correspondait à celui d'avril 2015 (hautes eaux hors crue) ;
- les pompages en nappe et en rivière.

6.3.3. Méthode des trajectoires inverses – Réseau hydrographique dynamique

Une fois le modèle calé avec un réseau hydrographique dynamique représentant le battement saisonnier du niveau des cours d'eau, le calcul par la méthode des trajectoires inverses a été refait, en se basant non plus sur des isochrones à 90 jours, mais sur des isochrones couvrant l'ensemble de la période d'irrigation (soit 4 mois, en période de basses eaux).

Les nouveaux paramètres utilisés pour calculer le trajet inverse des particules, depuis la rivière vers la nappe, sont les suivants :

- temps de parcours de particules : 122 jours, soit les 4 mois d'irrigation (juin à septembre) ;
- conditions hydrologiques : 3 scenarii climatiques retenus parmi les 20 années de modélisation (1995-2015) : décennale sèche (2008), année moyenne (2014) et quinquennale humide (2004, pas d'année plus humide sur la période modélisée) ;
- porosité efficace = coefficient d'emmagasinement ;
- pompages en nappe et en rivière identiques à ceux de la simulation calée sur la période 1995-2015.

Le résultat obtenu est présenté dans l'Illustration 116.

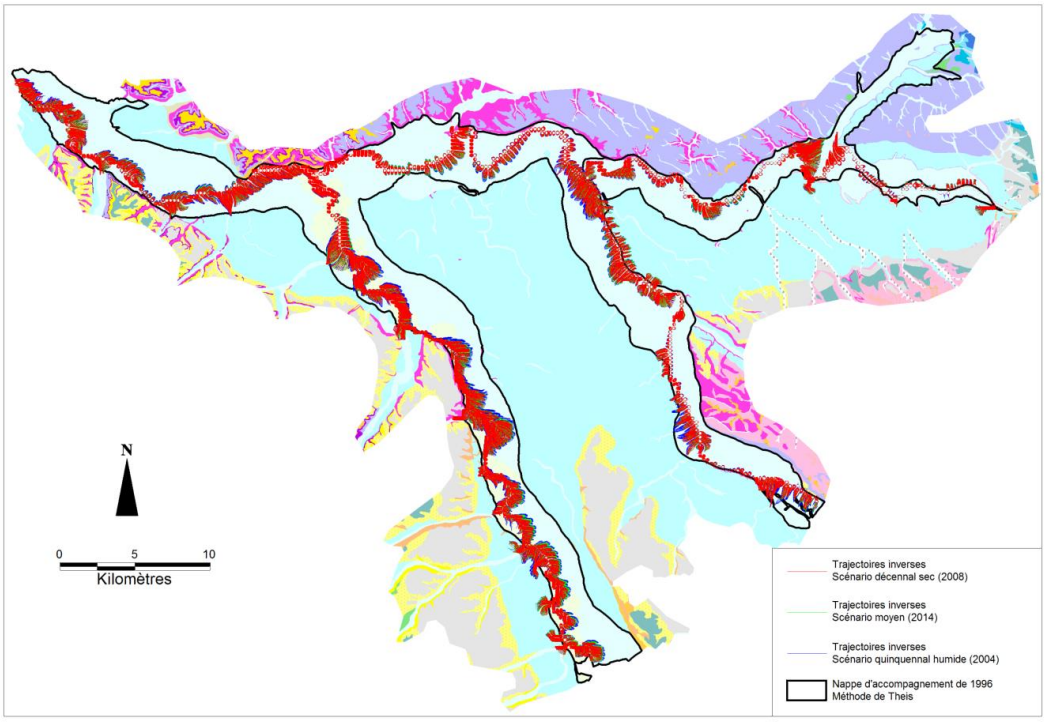


Illustration 116 – Isochrones à 122 j pour trois scenarii climatiques.

L'extension de la courbe enveloppe délimitée par les isochrones varie peu d'un scénario climatique à l'autre. Plus la recharge est forte, plus la nappe d'accompagnement s'élargit, mais dans des proportions limitées (cf. Illustration 117).

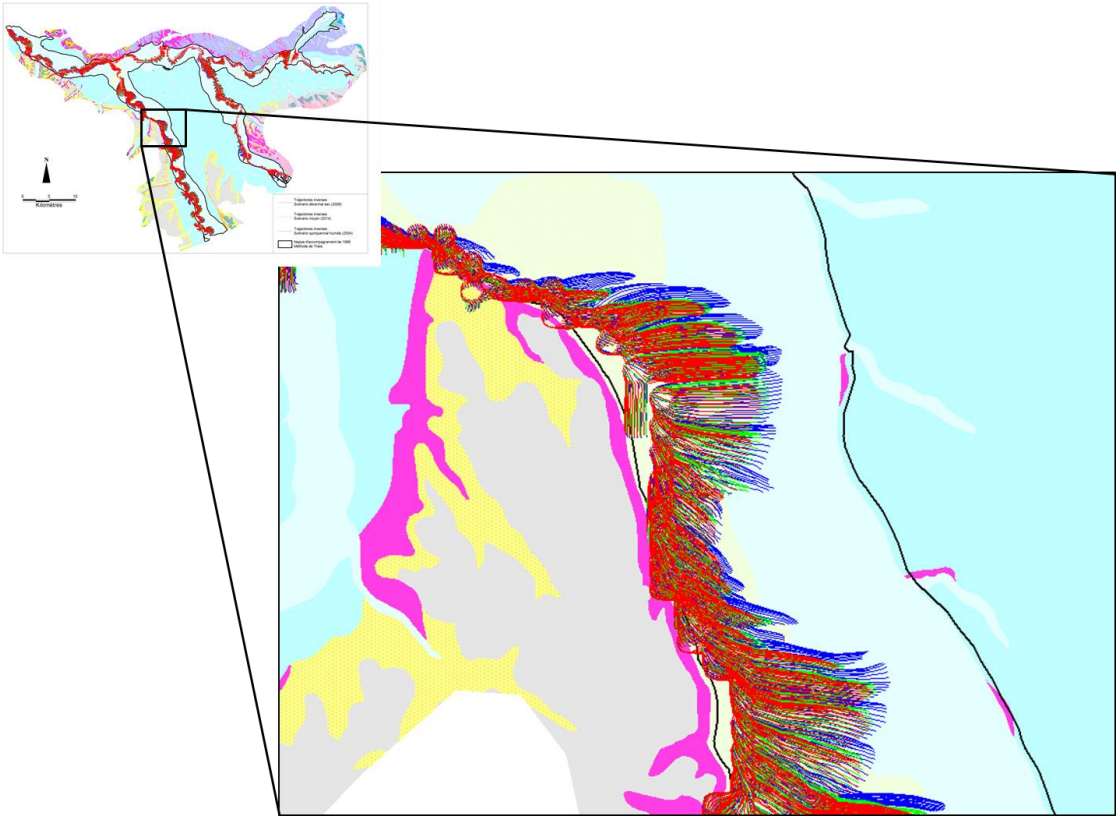


Illustration 117 – Isochrones à 122 j pour trois scenarii climatiques – Zoom sur le secteur d'Escatalens (rouge : décennal sec, vert : moyen, bleu : quinquennal humide).

La porosité efficace est un paramètre clé pour le traçage des isochrones car elle définit la quantité d'eau mobilisable dans chaque maille. En nappe libre, elle est assimilée au coefficient d'emmagasinement (cf. chapitre 1.2.1). En pratique, les méthodes d'évaluation de ces paramètres (traçage pour la porosité efficace, essai de pompage pour le coefficient d'emmagasinement) sont très différentes et peuvent donc donner des résultats distincts. De plus, le coefficient d'emmagasinement est un paramètre de calage secondaire du modèle hydrodynamique (cf. Barthélemy et Seguin, 2016).

Une analyse de sensibilité a donc été menée sur ce paramètre, pour le scenario climatique correspondant à une année moyenne (2014). Trois simulations ont été réalisées avec les semis suivants de porosité efficace :

- Porosité efficace = coefficient d'emmagasinement + 5 points (non modifié pour molasse) ;
- Porosité efficace = coefficient d'emmagasinement ;
- Porosité efficace = Max(coefficient d'emmagasinement - 5 points ; 5 %).

Ainsi, pour l'essentiel de la basse plaine et des alluvions récentes de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron, le coefficient d'emmagasinement a été calé à 15 % (cf. Illustration 71). Dans les trois simulations successives, la porosité efficace sera donc de 20 %, 15 % et 10 %. Ces trois valeurs couvrent une gamme correspondant aux propriétés des alluvions récentes et de la basse plaine (cf. Tableau 1 et chapitre 2.2).

Les résultats sont présentés dans l'Illustration 118.

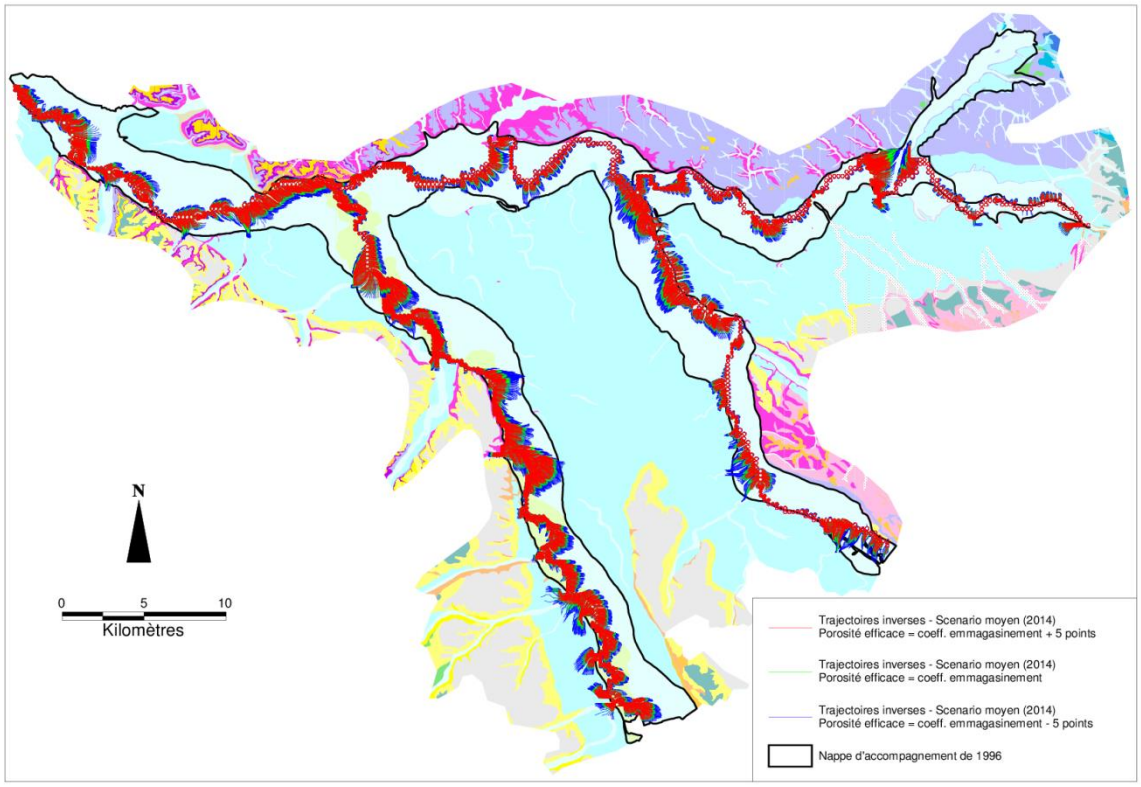


Illustration 118 – Analyse de la sensibilité de la porosité efficace sur les isochrones à 122 j.

L'extension de la zone délimitée par les isochrones est d'autant plus importante que la porosité efficace est faible (et donc la vitesse de Darcy forte). Ce paramètre impacte plus la superficie de la nappe d'accompagnement que la recharge annuelle.

Néanmoins, ces variations restent limitées par rapport à la variation de l'extension de la zone délimitée par les isochrones le long du linéaire des cours d'eau.

En effet, l'extension de la nappe d'accompagnement est liée au débit des échanges nappe-rivière (cf. Illustration 119). Plus la rivière draine la nappe (débits les plus fortement négatifs sur l'illustration), plus la nappe d'accompagnement sera étendue. Ces conditions d'échanges sont liées à la géométrie de l'aquifère et en particulier à l'affleurement des formations molassiques peu perméables, soit sous le cours d'eau, soit sur les coteaux le bordant immédiatement à certains endroits.

Cet affleurement des formations molassiques entre les terrasses entraîne parfois un affleurement de la nappe. Cette eau peut s'infiltrer à nouveau dans la terrasse sous-jacente, mais cette possibilité n'est pas offerte par le logiciel MARTHE, qui transfert directement cette eau au réseau hydrographique. Ces quantités d'eau ne peuvent donc pas être prises en compte dans le calcul des trajectoires inverses.

La nappe d'accompagnement ainsi délimitée reste plus étroite que celle définie en 1996 sur un critère géologique. Sa largeur varie de 200 m (essentiellement vallées de l'Aveyron et du Tarn) à 2 000 m sur une partie du tronçon de la Garonne en amont du confluent avec le Tarn.

Cependant, dans les zones où la géométrie des terrasses alluviales ne bloque pas le tracé des trajectoires inverses, l'extension maximale de la courbe enveloppe des isochrones correspond approximativement à l'extension de la basse plaine.

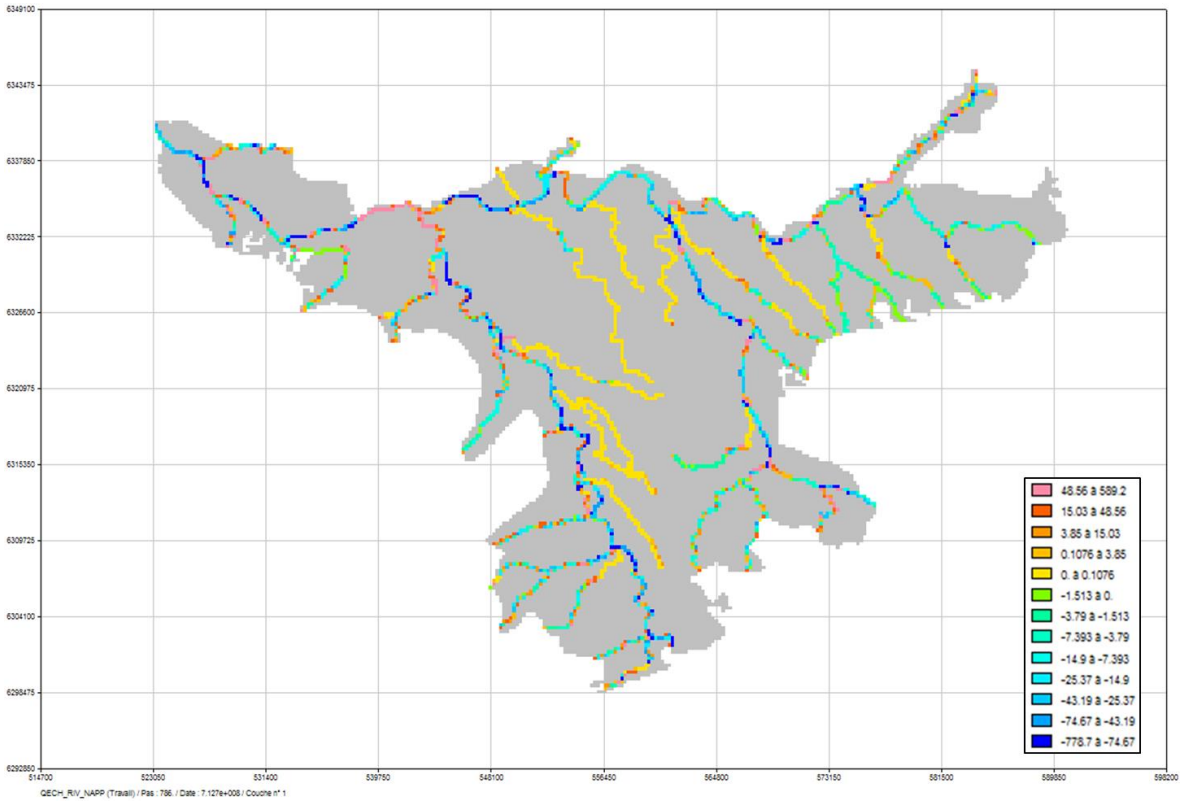


Illustration 119 – Échanges rivière -> nappe simulés au 1er août 2014.

6.3.4. Synthèse

Les travaux de délimitation de la nappe d'accompagnement peuvent être synthétisés par les éléments suivants :

- comme pour la nappe d'accompagnement de 1996, la nouvelle application de la méthode de Theis (avec les paramètres de calage du nouveau modèle) surévalue considérablement l'emprise de la nappe d'accompagnement, qui s'étendrait alors bien au-delà de la basse plaine. Il a donc été décidé de ne pas tenir compte de cette méthode dans la délimitation finale ;
- *a contrario*, la méthode des trajectoires inverses délimite une courbe enveloppe recouvrant la basse plaine dans ses zones d'extension maximale mais sous-évalue l'emprise de la nappe d'accompagnement dans certaines zones du fait de la géométrie des terrasses alluviales et des limites liées à la dimension des mailles du modèle ;
- l'approche naturaliste qui consiste à utiliser l'emprise des alluvions de la basse plaine comme nappe d'accompagnement a été adoptée en 1996. Elle est toujours pertinente car elle constitue un bon compromis entre l'application de la méthode des trajectoires inverses et la prise en compte de ses limites sur la zone d'étude.

La nappe d'accompagnement délimitée en 1996 est donc conservée.

Au confluent des cours d'eau principaux (Garonne, Tarn, Aveyron) et de certains cours d'eau secondaires, les isochrones sortent de l'enveloppe constituée par la basse plaine du cours d'eau principal considéré.

Les particules d'eau associées à ces isochrones transitant par les nappes d'accompagnement de ces cours d'eau secondaires, ces zones ne sont pas intégrées aux nappes d'accompagnement des cours d'eau principaux.

7. Casiers hydrogéologiques et réseau de suivi piézométrique

7.1. ANCIENS CASIERS HYDROGÉOLOGIQUES

Lors du premier modèle hydrodynamique réalisé en 1996, un outil de gestion des prélèvements agricoles a été élaboré. Il avait pour vocation de valoriser les résultats du modèle, par le biais d'une application facile à utiliser. L'échelle des mailles étant peu adaptée à ce type d'exercice, un découpage de l'aquifère alluvial a été réalisé sur les critères suivants :

- géologie et géomorphologie ;
- crêtes piézométriques et sens d'écoulement ;
- caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère ;
- densité des prélèvements.

Les 58 casiers hydrogéologiques ainsi définis sont présentés dans la carte de l'Illustration 120.

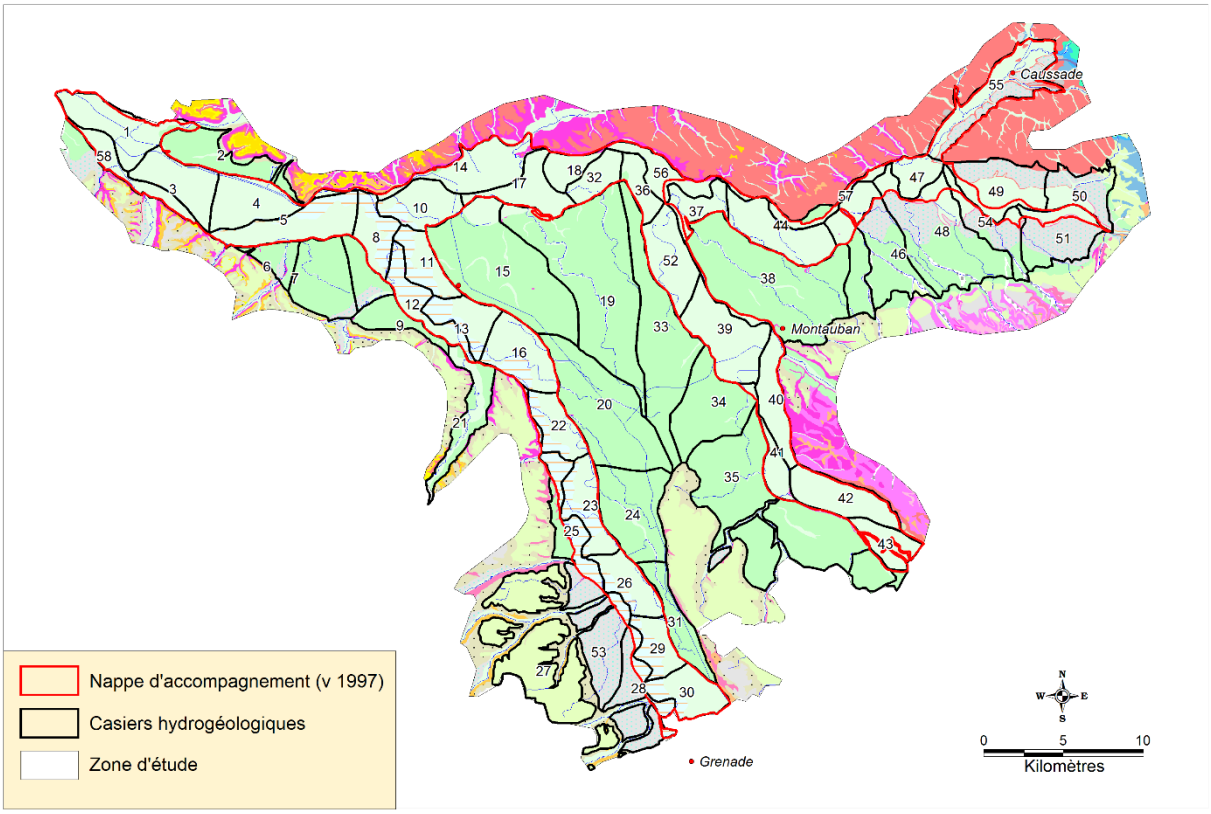


Illustration 120 – Carte des 58 casiers hydrogéologiques définis en 1996.

7.2. NOUVEAUX CASIERS HYDROGÉOLOGIQUES

Avec le développement d'un nouvel outil destiné à appuyer les organismes uniques dans la gestion des prélèvements agricoles, il est apparu opportun de revoir le contour des casiers hydrogéologiques afin de :

- diminuer le nombre de casiers, dans un souci de simplification de la gestion des prélèvements ;
- prendre en compte les critères hydrogéologiques et réglementaires ;
- proposer un réseau de suivi quantitatif permettant de caractériser l'évolution du niveau piézométrique dans ces nouveaux casiers.

Le travail de découpage a abouti à la création de **21 casiers hydrogéologiques** (cf. Illustration 121). **L'emprise de la nappe d'accompagnement ne fait pas partie des nouveaux casiers définis** dans la mesure où les règles de gestion des prélèvements sont déjà fixées par ailleurs (volumes prélevables). Ceux-ci ont été découpés en tenant compte des critères suivants :

- géologie et géomorphologie ;
- crêtes piézométriques et sens d'écoulement ;
- caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère ;
- contour des périmètres élémentaires (et des Organismes Uniques en charge de ces périmètres) ;
- densité des points de prélèvements agricoles.

Le tableau récapitulatif des casiers avec les périmètres élémentaires et les organismes uniques associés est présenté en Annexe 18. Un tableau y précise également le nombre de points de prélèvements par casier.

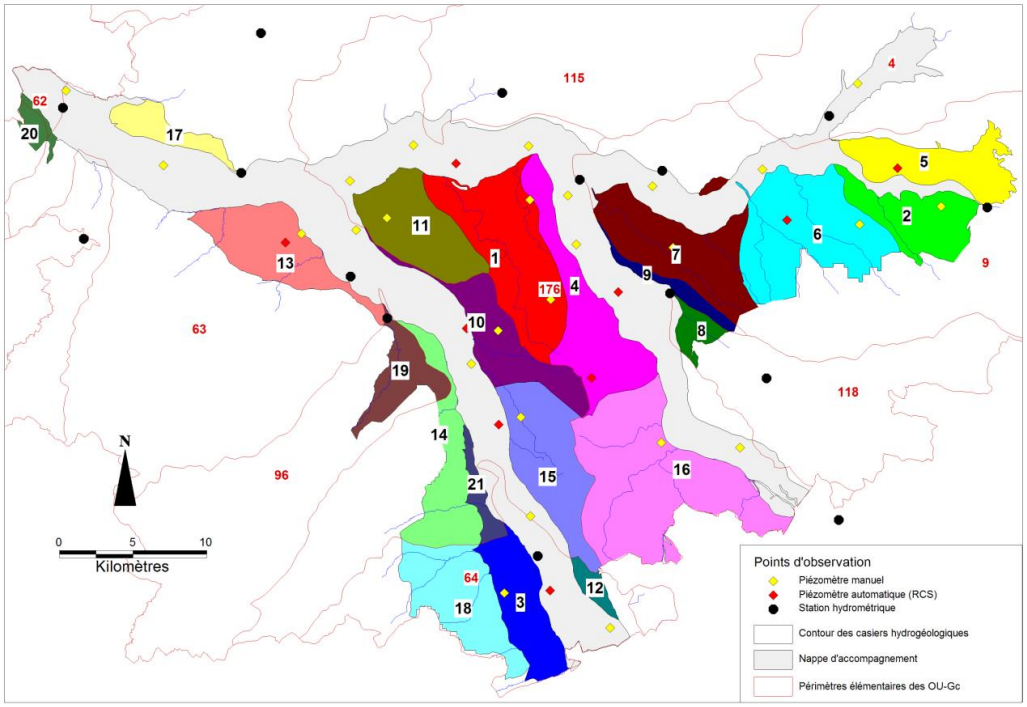


Illustration 121 – Carte des 21 casiers hydrogéologiques et du réseau de suivi associé.

7.3. RÉSEAU DE SUIVI QUANTITATIF

La gestion fine et équitable de la ressource en eau de la plaine alluviale du Tarn-et-Garonne passe par la mise en place d'un réseau d'observation adapté. Aussi, il a été proposé de définir au moins un point de suivi piézométrique par casier hydrogéologique. Les piézomètres déjà suivis dans le cadre du Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS quantitatif) par le BRGM ont été conservés en priorité. Ces ouvrages présentent en effet des chroniques de 20 à 30 ans de données et sont voués à être pérennisés.

Pour les autres casiers, les ouvrages suivis manuellement (mesure bimestrielle) dans le cadre du précédent projet de modélisation du BRGM puis par la DDT 82 ont été privilégiés (cf. chapitre 3.8.2).

Au final, le réseau piézométrique proposé est le suivant :

- **5 casiers suivis par des piézomètres du RCS (n°1, 4, 5, 6 et 13).**

  Ces 5 piézomètres du RCS sont équipés de sondes de pressions avec enregistreurs et télétransmission. Les données sont bancarisées bimensuellement par le BRGM dans ADES. Aucune action particulière n'est à prévoir pour ces points ;

- **7 casiers suivis par des ouvrages mesurés manuellement (n°2, 3, 7, 10, 11, 15 et 16).**

  Ces points, situés à l'intérieur du casier, doivent être équipés d'une sonde de pression avec télétransmission, et les données bancarisées dans ADES, selon le protocole en vigueur ;

- **9 casiers sans point de suivi identifié à ce jour (n°8, 9, 12,14, 17, 18, 19, 20 et 21).**

  Une reconnaissance de terrain doit être organisée pour sélectionner des points de suivi pertinents et représentatifs. Ces ouvrages devront ensuite être équipés de sondes de pression avec télétransmission et bancarisation des données dans ADES.

Dans l'attente de ces travaux, certains casiers peuvent se voir affecter des points de suivi voisins :

- casier n° 9 : Pz 23 – Montauban
- casier n° 12 : Pz 15 – Pompignan
- casiers n° 14, 18 et 21 : Pz 16 – Savènes
- casiers n° 17 et 20 : Pz 5 – Lamagistère
- casier n° 8 : aucun prélèvement en nappe dans ce casier correspondant aux hautes terrasses du Tarn, une zone où la perméabilité est faible.
- casier n° 19 : aucun prélèvement en nappe dans ce casier correspondant à la vallée de la Gimone, où les prélèvements se font uniquement dans le cours d'eau, dont le débit est soutenu par le système Neste.a

La carte de l'Illustration 122 montre la répartition des points de prélèvements sur les 21 casiers hydrogéologiques. La couleur des points et des casiers est fonction de l'organisme unique (OU-Gc) en charge de ces périmètres.

Les cartes des classes de volumes prélevés par casiers et par usages sont présentées en Annexe 19.

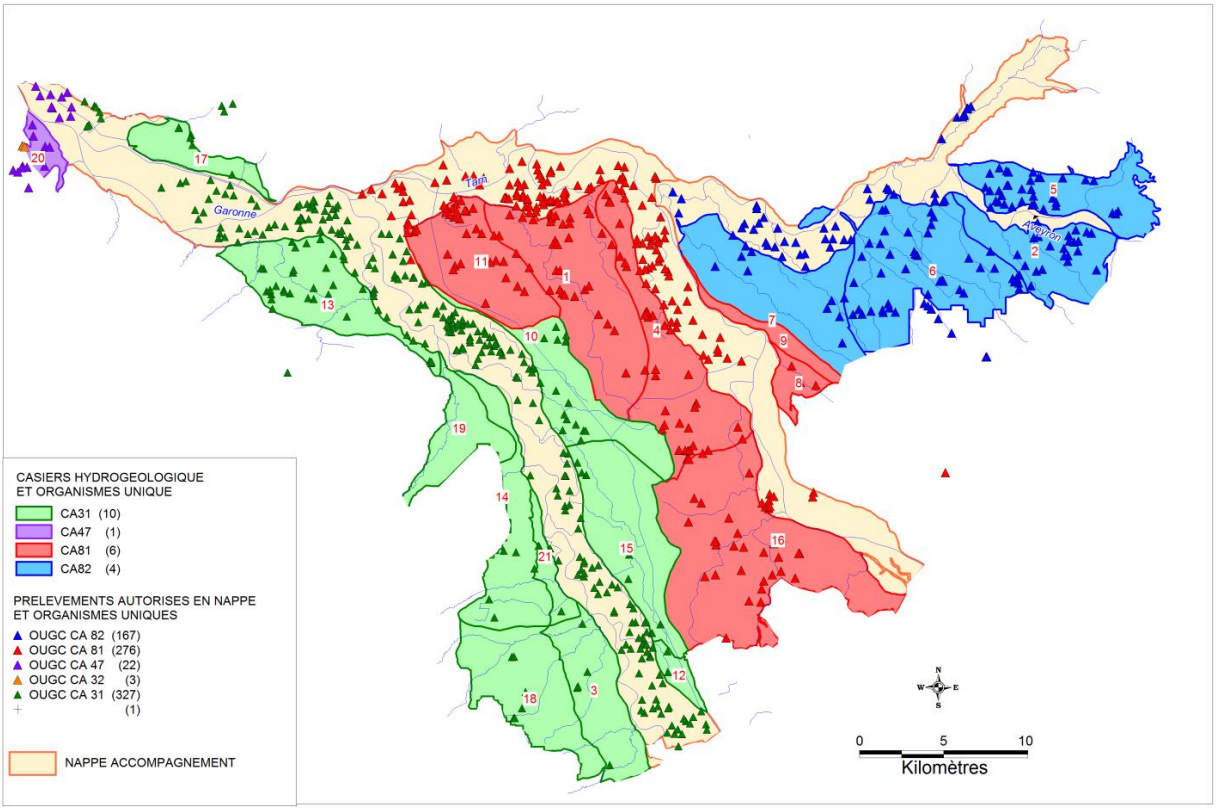


Illustration 122 – Carte des casiers hydrogéologiques colorés par OU-Gc et des prélèvements agricoles (autorisés en 2015 sur les eaux souterraines).

8. Outil de gestion des prélèvements

8.1. CALCUL DES VOLUMES PRÉLEVABLES ADMISSIBLES

8.1.1. Méthodologie

Le calcul des Volumes Prélevables Admissibles (VPA) est réalisé à partir du modèle hydrodynamique maillé calé, intégrant les prélèvements réalisés jusqu'au début de la période d'irrigation pour laquelle on souhaite déterminer les VPA.

L'état final du modèle (état au 01/10/2015) est utilisé comme état initial pour une simulation en deux temps :

- simulation d'une année hydrologique moyenne (2013-2014) répétée trois fois pour retrouver un état de basses eaux « moyen » (l'année 2014-2015 ayant été une année au-delà de la décennale sèche) ;
- simulation des scenarii climatiques correspondant à différentes années hydrologiques et donc différentes conditions de recharge de la nappe.

L'Illustration 123 représente schématiquement l'enchaînement chronologique de la modélisation.

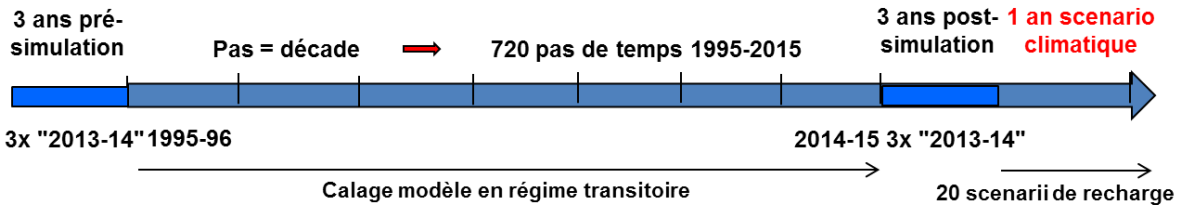


Illustration 123 – Schéma chronologique de la modélisation.

Les différentes méthodologies d'estimation des VPA dans les aquifères à nappe libre ont été recensées et analysées dans le rapport BRGM RP-64615-FR (cf. Arnaud, 2016). La méthode retenue pour la nappe alluviale dans le Tarn-et-Garonne est celle utilisée pour la nappe alluviale de l'Ariège et de l'Hers Vif, détaillée dans le rapport BRGM RP-57184-FR (cf. Saplairoles et Buscarlet, 2009).

Cette méthodologie est basée sur la définition d'une charge hydraulique (ou niveau piézométrique) de référence. Le calcul du VPA dans chaque maille du modèle est réalisé en soustrayant la charge hydraulique de référence à la charge hydraulique du scenario climatique étudié afin de déterminer la hauteur d'eau disponible pour les prélèvements (cf. Illustration 124).

La charge hydraulique de référence correspond donc au niveau piézométrique au-dessous duquel il n'est pas acceptable de descendre, pour la préservation du stock aquifère et l'alimentation du débit d'étiage des cours d'eau associés.

Ainsi, dans le cas de la nappe alluviale de l'Ariège, l'état piézométrique de référence a été choisi pour que la simulation associée respecte les Débits Objectifs d'Etiage (DOE) de l'Ariège et de l'Hers Vif.

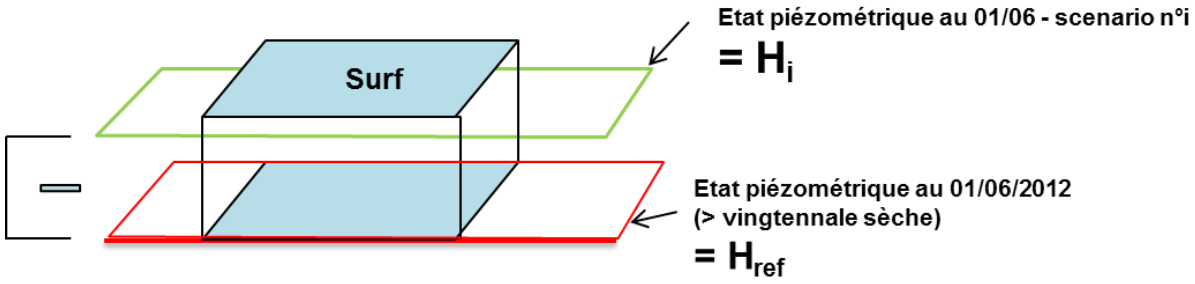


Illustration 124 – Schéma présentant le principe de calcul des VPA à l'échelle des mailles du modèle.

Les DOE sont déterminés par le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) 2016-2021 (cf. Comité de Bassin Adour-Garonne, 2016). Pour le modèle de la nappe alluviale du Tarn-et-Garonne, trois valeurs sont à retenir :

- 85 m^3/s pour la Garonne à Lamagistère (station n°O6140010),
- 25 m^3/s pour le Tarn à Moissac (pas de station suivie),
- 4 m^3/s pour l'Aveyron à Loubéjac (station n°O5882510).

Cependant, contrairement au modèle de la nappe alluviale de l'Ariège et de l'Hers Vif, le modèle de la nappe alluviale dans le Tarn-et-Garonne se situe nettement plus en aval des bassins versants des cours d'eaux principaux (Garonne, Tarn, Aveyron). Ainsi, l'Illustration 94 montrait que, en période d'étiage, la nappe alluviale dans le Tarn-et-Garonne ne contribuait qu'à 8 à 10 % du débit à l'exutoire du modèle. 90 à 92 % du débit de la Garonne à Lamagistère est assuré par les débits des cours d'eau imposés à l'entrée du modèle.

Dans ce contexte, il n'apparaît donc pas pertinent de lier la définition de l'état piézométrique de référence aux DOE des principaux cours d'eau. Celui-ci a donc été défini en se basant sur une année sèche pour lesquels les prélèvements sont relativement bien connus et ont pu être satisfaits.

La date retenue pour la détermination de l'état piézométrique de référence est le 1er juin. Cette date correspond au début de la période d'irrigation et donc au moment où il convient de déterminer quel volume pourra être prélevé. De plus, cet état correspond généralement au début de la période de transition des hautes eaux vers les basses eaux.

L'Illustration 125 met en évidence, pour les piézomètres du RCS, l'évolution « moyenne » du niveau piézométrique sur une année hydrologique : pour chaque décade, le niveau moyen de cette décade a été rapporté au niveau moyen annuel.

Ainsi, la date du 1er juin correspond généralement au début de la période de baisse des niveaux piézométriques. Pour les piézomètres des basses plaines du Tarn et de l'Aveyron (Bioule, Castel, Les Barthes) et le piézomètre Pradas, la transition hautes eaux – basses eaux commence plutôt au début du mois de mai.

L'état de référence choisi dans le cadre de cette étude correspond donc au 1er juin d'une année à la période de retour supérieure à la vingtennale sèche (2011-2012) :

- le 1er juin correspond au début de la période d'irrigation ;
- l'état choisi correspond à l'état de la nappe simulé par le modèle (prenant en compte les prélèvements des années précédentes et les prélèvements AEP et industriels de l'année en cours) ;

- l'année 2011-2012 a été choisie car elle correspond à une des années les plus sèches, sans représenter le cas le plus extrême, et une année où les prélèvements ont pu être plus précisément évalués (période 2006-2012).

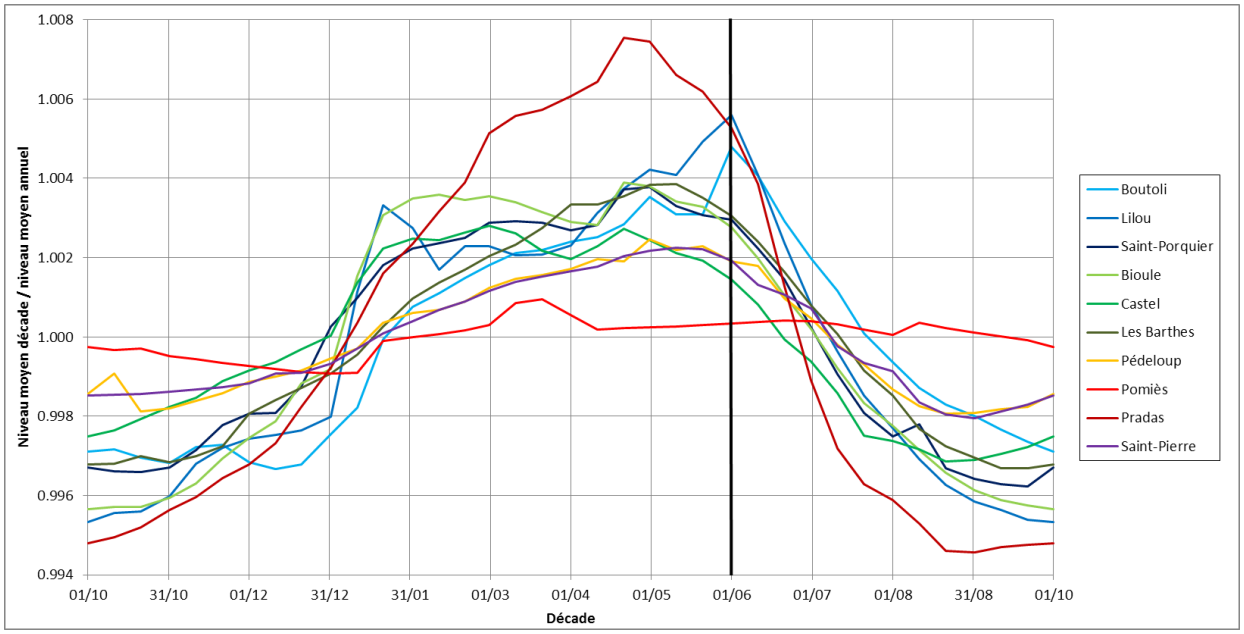


Illustration 125 – Évolution des niveaux décadaires moyens des piézomètres du RCS sur une année hydrologique.

La hauteur d'eau disponible est ensuite transformée en volume par la relation suivante :

VPA maille = (H_i - H_{ref}) x Surface maille x Porosité efficace

Avec :

H_i = Charge hydraulique au 1er juin du scenario climatique « i » (en m NGF)

H_{ref} = Charge hydraulique de référence = charge modélisée au 01/06/2012 (en m NGF)

Surface maille = 250 x 250 = 62 500 m² pour le modèle du Tarn-et-Garonne

Porosité efficace = coefficient d'emmagasinement (cf. chapitre 1.2.1, 3.4.3 et 4.2.1)

Chaque maille du modèle s'étant vu assigner un numéro de casier (mailles de la nappe d'accompagnement et mailles où affleurent la molasse exceptées), les VPA de chaque maille sont ensuite intégrés à l'échelle du casier pour déterminer son propre VPA.

8.1.2. Détermination des scenarii climatiques

L'objectif étant de créer un outil de gestion des prélèvements qui valorise et simplifie les résultats du modèle hydrodynamique, il n'est pas souhaitable de simuler chaque année du futur en temps réel avec le modèle. Il est donc proposé de simuler un panel de scenarii climatiques qui couvre la gamme des intensités de recharge observées depuis 1949. Cette date correspond au début de l'enregistrement de la pluviométrie à la station de Montauban, la station présentant la chronique la plus longue du département et utilisée pour le calcul de la recharge dans le modèle hydrodynamique.

Pour ce faire, les fréquences et périodes de retour des cumuls décadaires de pluie efficace sur chaque année hydrologique (du 1er octobre au 30 septembre et du 1er octobre au 31 mai, soit entre deux périodes d'irrigation) pour la période de 1949 à 2015 ont été calculées. Les cumuls journaliers des paramètres climatiques, utilisés pour la modélisation hydrodynamique (cf. chapitre 3.5.5), n'ont pas été mis à profit dans ce travail statistique pour deux raisons :

- les données climatiques journalières n'ont été acquises que pour la période 1990-2015 ;
- le calcul statistique à partir des données journalières aurait contraint à utiliser des données journalières dans l'outil de gestion présenté au chapitre 8.2. Autrement dit, son utilisation aurait nécessité l'acquisition, chaque année, d'environ 10 fois plus de données auprès de Météo France.

Conformément au calcul réalisé dans le modèle hydrodynamique, la pluie efficace a été évaluée avec un schéma de type « réservoir sol progressif », la valeur de 50 mm étant conservée comme capacité de stockage du sol. Pour cela, les formules définissant la pluie efficace et l'évapotranspiration réelle, présentées en Annexe 9, ont été utilisées. Ces formules permettent de définir, par intégration, la quantité d'eau dans le réservoir sol et la pluie efficace à chaque pas de temps (cf.

Annexe 20).

La répartition entre ruissellement et infiltration étant considérée comme stable, la recharge de la nappe est assimilée à la pluie efficace, à ce ratio et au temps de transfert près (temps de ½ percolation).

Le graphique de l'Illustration 126 montre l'évolution du cumul annuel (par année hydrologique) de la recharge de 1949 à 2015. Certaines années se démarquent par leur caractère humide extrême comme 1992-1993 et 1993-1994 avec un cumul de pluie efficace atteignant 420 à 460 mm. À l'inverse, les années 2001-2002 et 2011-2012, présentent des cumuls de pluie efficace extrêmement faibles, de l'ordre de 35 à 40 mm.

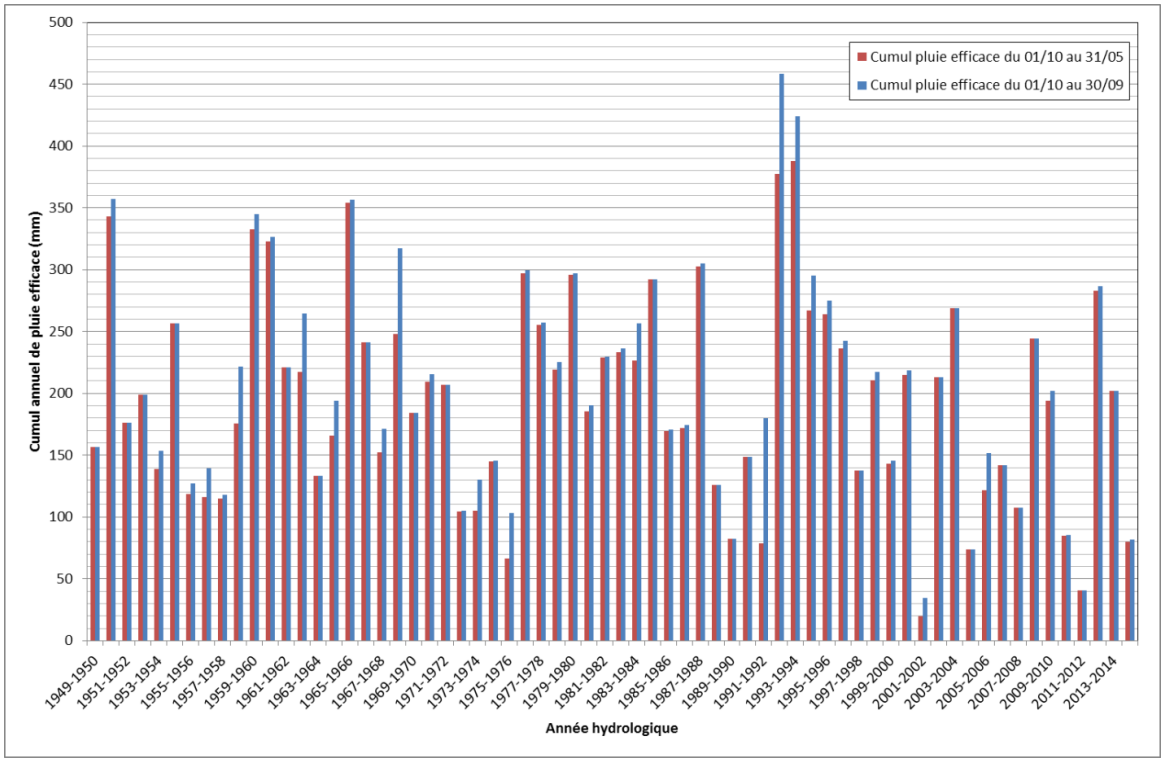


Illustration 126 – Évolution du cumul annuel de pluie efficace de 1949 à 2015 (station de Montauban).

Les mêmes calculs de fréquence réalisés sur chaque décade et la reconstitution d'années fictives montrent que les cumuls annuels de pluie efficace des années reconstituées sont trop extrêmes. **Il a donc été jugé plus pertinent d'utiliser des séquences de pluie efficace réelles (années réelles) pour effectuer les simulations du modèle.**

Les périodes de retour retenues les simulations sont les suivantes :

- année de cumul de pluie efficace minimal ;
- vingtennale sèche ;
- décennale sèche ;
- quinquennale sèche ;
- moyenne ;
- quinquennale humide ;
- décennale humide ;

- année de cumul de pluie efficace maximal.

Pour une période de retour donnée, trois années aux fréquences proches ont été sélectionnées. Elles ont toutes été testées dans le modèle et les plus pertinentes ont été conservées.

L'ensemble des cumuls de pluie efficace à la station de Montauban depuis 1949, sur l'année hydrologique complète (du 01/10 au 30/09) et sur la période non irriguée (du 01/10 au 31/05), et les périodes de retour associées sont présentées en Annexe 21.

Les années retenues sont présentées dans le Tableau 28.

	N° scénario	Année hydrologique	Pluie efficace annuelle (mm)	Pluie efficace octobre-mai (mm)	Période de retour (ans)
Mini	1	2001-2002	34.5	19.9	132.00
Vingtennale sèche	2	1975-1976	103.4	66.6	26.40
	3	2004-2005	74.0	73.6	18.86
	4	1991-1992	179.7	78.6	14.67
Décennale sèche	5	1989-1990	82.4	82.4	10.15
	6	2010-2011	85.4	85.0	8.80
	7	1972-1973	104.8	104.8	7.76
Quinquennale sèche	8	1956-1957	139.2	116.2	5.28
	9	1955-1956	127.2	118.5	4.89
	10	2005-2006	151.6	121.8	4.55
Moyenne	11	2009-2010	202.0	193.9	2.03
	12	1952-1953	198.8	198.8	2.03
	13	2013-2014	201.8	201.7	2.10
Quinquennale humide	14	1995-1996	274.9	263.9	4.89
	15	1994-1995	295.5	266.9	5.28
	16	2003-2004	268.6	268.6	5.74
Décennale humide	17	1976-1977	299.3	297.0	8.80
	18	1987-1988	305.2	302.8	10.15
	19	1960-1961	326.8	322.5	12.00
Maxi	20	1992-1993	458.1	377.7	44.00

Tableau 28 – Années retenues, cumuls de pluie efficace et périodes de retour correspondantes.

Chacun des 20 scénarii climatiques identifiés a été simulé dans le modèle, du début de l'année hydrologique (1er octobre) au début de la période d'irrigation (1er juin), afin de déterminer l'état piézométrique nécessaire au calcul des VPA.

Les données climatiques journalières n'ayant été acquises que pour la période 1990-2015, les 20 scenarii climatiques ont été simulés avec les données climatiques décadaires, disponibles sur l'ensemble de la période 1949-2015. Cette utilisation des données décadaires conduit à sous-estimer la pluie efficace dans le calcul des scenarii climatiques par rapport aux données utilisées pour le calage de la modélisation (cf. chapitre 3.5.5).

Les débits amont des rivières sont également modifiés pour chaque scénario climatique, en utilisant les chroniques décadaires existantes pour les scenarii reproduisant une année hydrologique comprise entre 1995-1996 et 2014-2015. Pour les scenarii reproduisant une climatologie antérieure, les chroniques de débit amont des cours d'eau non équipés n'ont pas été simulées et calées. De plus, pour les cours d'eau équipés, les chroniques de débit ne sont pas disponibles pour les années les plus anciennes (début des mesures en 1972 pour la Garonne, en 1970 pour le Tarn et en 1989 pour l'Aveyron). Une équivalence avec l'année

climatique la plus proche a donc été établie pour les années antérieures à 1995-1996. Elle est récapitulée dans le Tableau 29.

	N° scénario	Année hydrologique	Chronique débits amont
Mini	1	2001-2002	2001-2002
Vingtennale sèche	2	1975-1976	2004-2005
	3	2004-2005	2004-2005
	4	1991-1992	2014-2015
Décennale sèche	5	1989-1990	2010-2011
	6	2010-2011	2010-2011
	7	1972-1973	2007-2008
Quinquennale sèche	8	1956-1957	2005-2006
	9	1955-1956	2005-2006
	10	2005-2006	2005-2006
Moyenne	11	2009-2010	2009-2010
	12	1952-1953	2013-2014
	13	2013-2014	2013-2014
Quinquennale humide	14	1995-1996	1995-1996
	15	1994-1995	2003-2004
	16	2003-2004	2003-2004
Décennale humide	17	1976-1977	2012-2013
	18	1987-1988	2012-2013
	19	1960-1961	2012-2013
Maxi	20	1992-1993	2012-2013

Tableau 29 – Équivalences années climatiques / chroniques de débit amont utilisée.

Pour chaque scenario, les prélèvements en nappe pour l'AEP et l'industrie appliqués sur la période modélisée (du 1er octobre au 31 mai) correspondent à ceux de l'année 2012, la dernière année pour laquelle les prélèvements ont été récoltés et géolocalisés.

Les prélèvements en rivière correspondent à ceux affectés à l'année hydrologique équivalente utilisée pour la chronique de débits amont.

Les VPA ont ensuite été calculés sur chacune des mailles du modèle, selon la méthodologie présentée dans l'Illustration 127.

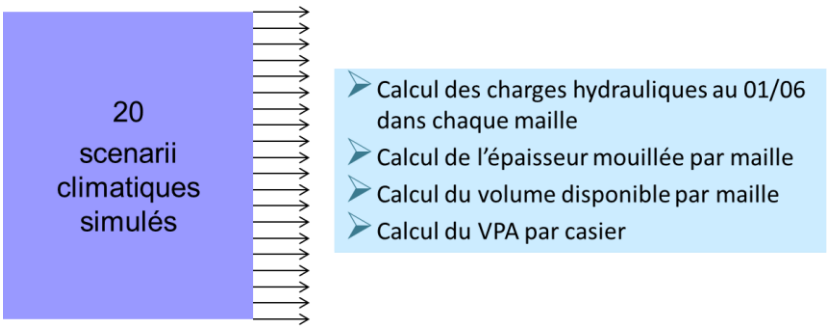


Illustration 127 – Étapes de calcul des VPA à l'échelle des mailles du modèle.

Les résultats de chacune des trois simulations associées à une période de retour donnée ont été analysés afin de retenir la simulation la plus pertinente. La répartition des précipitations au cours de l'année hydrologique peut en effet modifier sensiblement les VPA alors que le cumul annuel de pluie efficace est similaire (cas des scenarii 8 et 15).

Au final, 8 années réelles ont été retenues pour effectuer les simulations (cf. Tableau 30). Elles correspondent aux années les plus proches de la période de retour à laquelle elles sont associées.

Scénario	Année
Min	2001-02
Vingtennale sèche	2004-05
Décennale sèche	1989-90
Quinquennale sèche	1955-56
Moyenne	1952-53
Quinquennale humide	1995-96
Décennale humide	1987-88
Max	1992-93

Tableau 30 – Années réelles retenues pour le calcul des VPA.

8.1.3. Analyse des épaisseurs d'eau disponible

L'Annexe 22 présente de manière cartographique, pour chacun des 8 scenarii retenus, la différence de la charge hydraulique simulée au 1er juin avec la charge hydraulique de référence au 1er juin 2012.

Ces cartes permettent de visualiser les zones pour lesquelles les épaisseurs d'eau disponible vont être plus importantes (casiers n° 7 et 15 par exemple) ou plus restreintes (casier n° 17 par exemple).

Le Tableau 31 synthétise ces résultats par casiers.

Période de retour	Min	Vingtennale sèche	Décennale sèche	Quinquennale sèche	Moyenne	Quinquennale humide	Décennale humide	Max
Année de référence	2001-02	2004-05	1989-90	1955-56	1952-53	1995-96	1987-88	1992-93
N° scénario	1	3	5	9	12	14	18	20
Casier 1	0.23	0.48	0.50	0.66	1.04	1.28	1.31	1.53
Casier 2	-0.14	0.10	0.19	0.36	0.60	0.82	1.03	1.03
Casier 3	-0.22	0.20	0.34	0.65	0.93	1.24	1.66	1.56
Casier 4	0.18	0.42	0.44	0.60	0.95	1.18	1.22	1.41
Casier 5	-0.02	0.17	0.22	0.35	0.57	0.78	0.92	0.95
Casier 6	0.08	0.42	0.48	0.72	1.15	1.46	1.66	1.72
Casier 7	0.24	0.66	0.71	1.00	1.65	2.04	2.13	2.25
Casier 8	-0.08	0.11	0.12	0.26	0.55	0.70	1.06	1.10
Casier 9	0.14	0.55	0.58	0.83	1.24	1.49	1.60	1.64
Casier 10	0.20	0.47	0.48	0.65	1.03	1.25	1.29	1.50
Casier 11	0.15	0.40	0.42	0.59	0.94	1.18	1.24	1.39
Casier 12	-0.06	0.38	0.46	0.76	1.50	1.82	2.06	2.09
Casier 13	0.14	0.34	0.34	0.48	0.76	0.93	0.96	1.12
Casier 14	0.07	0.42	0.44	0.65	1.06	1.30	1.44	1.56
Casier 15	0.12	0.53	0.56	0.82	1.39	1.73	1.87	2.06
Casier 16	-0.04	0.17	0.22	0.33	0.48	0.62	0.69	0.69
Casier 17	-0.94	-0.67	-0.23	-0.04	0.22	0.53	0.84	0.74
Casier 18	0.00	0.28	0.35	0.53	0.80	1.04	1.22	1.25
Casier 19	0.12	0.30	0.30	0.44	0.77	0.94	1.03	1.13
Casier 20	0.04	0.25	0.25	0.39	0.68	0.87	0.98	1.05
Casier 21	-0.22	-0.04	-0.01	0.14	0.36	0.57	0.86	0.77
TOTAL	**0.05**	**0.34**	**0.39**	**0.57**	**0.92**	**1.16**	**1.29**	**1.38**

Tableau 31 – Différence de charge moyenne par casier (en m) entre la charge simulée au 1er juin et la charge de référence au 1er juin 2012.

Sur l'ensemble des 21 casiers, l'épaisseur d'eau disponible moyenne varie donc de quelques centimètres (recharge minimale) à près d'1,40 m (recharge maximale) suivant le scénario climatique retenu.

Pour certains casiers et les scenarii les plus secs (8 casiers pour la recharge minimale, casiers n° 17 et 21 pour les vingtennale et décennale sèche, casier n° 17 pour la quinquennale sèche) le niveau moyen de la nappe au 1er juin est inférieur au niveau de référence au 1er juin 2012. Le déficit en eau par rapport au niveau de référence est particulièrement marqué pour la bordure nord-est du casier n° 17, situé en limite de modèle, au contact avec la molasse.

Ce résultat était attendu pour le scénario de recharge minimale, correspondant à une année plus sèche que l'année de référence (2011-2012). Pour les casiers n° 17 et 21 et les scenarii allant de la vingtennale sèche à la quinquennale sèche, l'explication est moins immédiate. Faute d'observations dans ces deux zones sans piézomètre, il n'est pas possible de conclure sur l'existence de conditions hydrologiques locales particulières en 2001-2002, qui pourraient expliquer ces résultats.

Le calcul des VPA a donc été adapté pour le scénario de recharge minimale et les scenarii de la vingtennale à la quinquennale sèche pour le casier n° 17. Dans les mailles où le niveau simulé au 1er juin est inférieur à la charge de référence, le volume prélevable de cette maille a été considéré comme nul.

8.1.4. VPA calculés – Réseau hydrographique fixe

Les VPA présentés dans ce paragraphe sont ceux qui ont été exposés le 27 juillet 2015 dans les locaux de la DDT 82. Ils ont été calculés avec une version du modèle fonctionnant avec un réseau hydrographique fixe et une recharge décadaire.

De plus, les simulations de chaque scénario climatique n'intégraient pas les prélèvements pour l'AEP et l'industrie réalisés avant le début de la période d'irrigation.

Enfin, l'acquisition des données climatiques sur les années 2013-2014 et 2014-2015 et le passage au schéma « réservoir sol progressif » pour calculer les cumuls de pluies efficaces, afin de mettre en conformité l'outil et la modélisation hydrodynamique, ont entraîné une modification des scenarii étudiés.

Les VPA calculés dans chaque maille du modèle ont été intégrés à l'échelle des 21 nouveaux casiers hydrogéologiques. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 32.

L'Annexe 23 présente les VPA de manière cartographique pour 3 scenarii de recharge.

L'Annexe 24 présente une comparaison des VPA aux demandes de prélèvements agricoles sommées par casiers.

Période de retour	Min	Vingtennale sèche	Décennale sèche	Quinquennale sèche	Moyenne	Quinquennale humide	Décennale humide	Max
Année de référence	2001-02	2004-2005	1973-74	1963-64	2013-14	2012-13	1960-61	1992-93
N° scénario	1	1b	2	7	8	11	15	17
Casier 1	1 744 818	4 507 418	5 796 258	6 821 003	11 470 116	14 597 721	16 163 607	17 942 124
Casier 2	193 489	982 413	1 783 956	2 213 332	3 776 647	5 234 567	5 251 617	6 127 097
Casier 3	142 103	351 101	1 376 359	2 032 555	2 764 885	4 220 394	3 701 308	4 662 794
Casier 4	1 418 193	3 451 196	4 438 780	5 206 893	8 711 019	11 071 176	12 192 374	13 400 635
Casier 5	323 179	1 374 016	2 017 414	2 496 538	4 249 726	5 686 898	5 725 080	6 583 944
Casier 6	775 183	2 846 017	4 110 572	4 995 992	8 374 537	10 970 091	10 889 488	12 366 771
Casier 7	181 858	1 643 460	2 748 084	3 580 755	6 129 514	7 805 042	7 184 787	8 315 115
Casier 8	59 921	135 844	193 466	231 842	370 804	480 945	499 968	568 440
Casier 9	40 312	253 483	392 309	492 263	811 428	1 059 303	1 027 588	1 172 763
Casier 10	1 214 854	2 721 884	3 445 272	4 019 503	6 571 788	8 255 494	8 952 664	9 870 686
Casier 11	847 927	2 383 495	3 185 356	3 816 843	6 580 719	8 514 282	9 357 689	10 422 050
Casier 12	48 226	190 582	294 467	351 524	633 235	803 223	886 697	927 466
Casier 13	2 753 492	3 868 397	4 224 765	4 548 761	6 407 084	7 473 172	8 493 233	9 195 548
Casier 14	470 770	1 257 797	1 748 588	2 109 627	3 386 589	4 326 692	4 456 306	5 029 637
Casier 15	717 058	2 264 319	3 272 971	3 982 405	6 783 854	8 946 053	9 466 916	10 696 793
Casier 16	407 331	1 384 281	2 600 560	3 294 732	4 961 804	6 468 599	5 990 544	7 114 524
Casier 17	44 978	81 133	857 721	1 460 247	1 931 897	3 694 473	2 302 159	3 946 890
Casier 18	888 503	1 327 106	1 898 875	2 706 688	4 004 228	5 156 141	5 101 431	5 866 978
Casier 19	207 467	562 816	785 066	944 920	1 548 509	2 002 064	2 079 331	2 360 446
Casier 20	68 105	232 466	343 893	424 452	719 044	952 779	981 692	1 125 981
Casier 21	36 369	138 359	246 954	324 577	522 067	707 563	671 841	788 466
TOTAL	12 584 135	31 957 584	45 761 686	56 055 453	90 709 493	118 426 667	121 376 320	138 485 149

Tableau 32 – Résultats des VPA par casier (en m^3/an) calculés pour chacun des 8 scenarii climatiques identifiés (modèle 2015).

Sur le panel des années étudiées, le total des volumes autorisés (pour tous les casiers) varie de 2,4 (en 2007) à 6,2 millions de m^3 par an. Les volumes disponibles pour l'irrigation (VPA moins les prélèvements pour l'AEP et l'industrie) varient de 12 (en 2001-2002) à 120,8 millions de m^3/an. Cependant, à l'échelle des casiers, les résultats sont plus contrastés et certaines demandent ne peuvent pas être satisfaites pour les années de recharge les plus sèches.

Les années de recharge « minimale » et de période de retour « vingtennale sèche » présentent des VPA qui ne satisfont pas les demandes exprimées sur 4 casiers hydrogéologiques situés sur des niveaux de basse terrasse de la Garonne.

Dans la carte de l'Illustration 128, les volumes destinés à l'AEP et à l'industrie ont été soustraits aux VPA pour un scenario d'année minimale (soit 2001-2002). Ce volume restant est ensuite comparé aux demandes de prélèvements agricoles cumulées par casier. Les casiers n° 17 et 20, situés sur la basse terrasse de la Garonne aval sont largement déficitaires et un coefficient de réduction important (71 % pour le casier n° 20 et 81 % pour le casier n° 17) doit être appliqué aux demandes de prélèvement agricoles pour ne pas descendre en-dessous du niveau piézométrique de référence choisi. Un coefficient de réduction de 44 % doit également être appliqué sur le casier n° 21 en année minimale et une réduction plus réduite, de l'ordre de 15 à 20 % est nécessaire sur les casiers n° 3 et 12, situés dans la basse terrasse de la Garonne amont.

Les mêmes calculs ont été réalisés pour une recharge de période de retour vingtennale sèche. Cette fois, seuls les casiers n° 17 et 20 sont concernés par des coefficients de réduction.

Pour toutes les autres années de recharge plus humide (de la décennale sèche à l'année de recharge maximale jamais observée), les demandes de prélèvements agricoles actuelles peuvent être satisfaites sur tous les casiers.

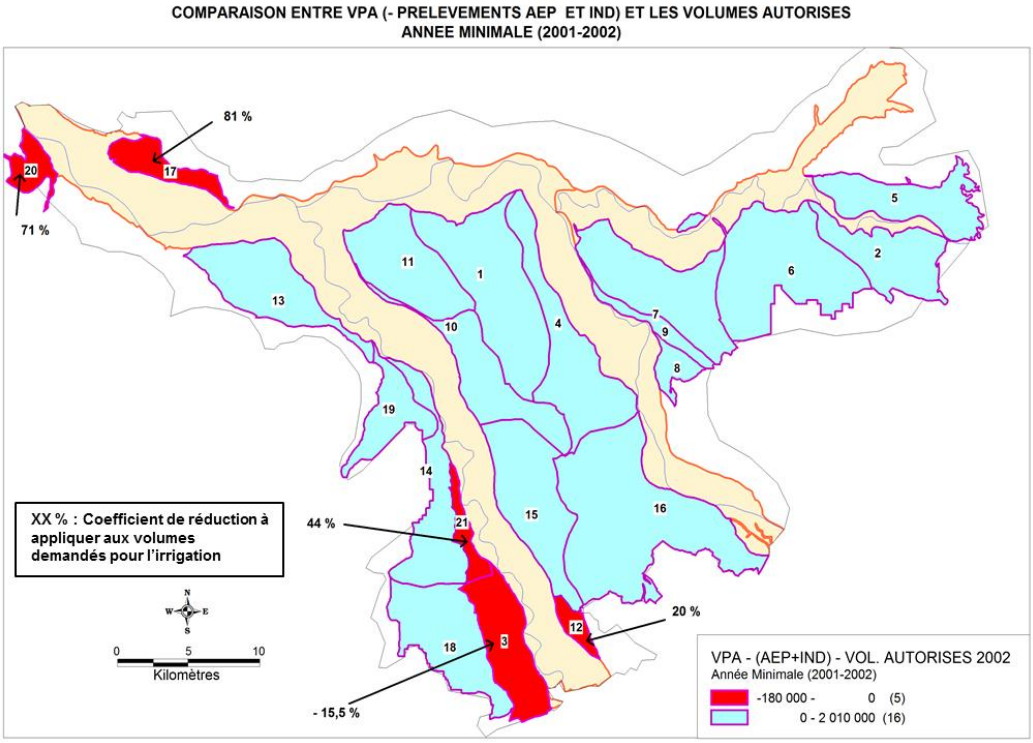


Illustration 128 – Carte de comparaison des VPA et des demandes de prélèvements agricoles pour l'année de recharge minimale.

8.1.5. VPA calculés – Réseau hydrographique dynamique

Les VPA présentés dans ce paragraphe ont été calculés avec la dernière version du modèle calé, prenant donc en compte, par rapport aux résultats du paragraphe précédent :

- un réseau hydrographique dynamique représentant le battement saisonnier du niveau des cours d'eau ;
- une recharge calculée à partir de données climatiques journalières ;
- un modèle prolongé sur les années 2013-2014 et 2014-2015 ;
- des scenarii climatiques prenant en compte les pompages pour l'AEP et l'industrie ;
- des scenarii climatiques basés sur le cumul de la pluie efficace du 1er octobre au 31mai (au lieu du 1er octobre au 30 septembre) et un schéma de type « réservoir sol progressif », conforme à celui utilisé dans le modèle hydrodynamique.

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 33.

Période de retour	Min	Vingtennale sèche	Décennale sèche	Quinquennale sèche	Moyenne	Quinquennale humide	Décennale humide	Max
Année de référence	2001-02	2004-05	1989-90	1955-56	1952-53	1995-96	1987-88	1992-93
N° scénario	1	3	5	9	12	14	18	20
Casier 1	2 729 629	5 594 331	5 744 944	7 654 565	11 981 417	14 711 697	15 052 610	17 656 573
Casier 2	253 426	468 015	881 673	1 764 329	2 950 176	4 001 279	5 098 422	5 035 775
Casier 3	104 331	564 135	947 990	1 856 453	2 665 110	3 520 909	4 784 553	4 502 275
Casier 4	1 740 892	3 803 700	3 993 197	5 458 479	8 573 697	10 722 210	11 047 543	12 737 598
Casier 5	203 439	831 507	1 024 223	1 612 198	2 622 986	3 556 953	4 186 708	4 315 569
Casier 6	1 062 311	3 202 564	3 555 158	5 275 558	8 454 707	10 645 507	12 047 977	12 572 787
Casier 7	1 429 161	3 175 198	3 475 016	4 944 703	8 153 805	10 187 798	10 653 604	11 245 794
Casier 8	41 263	31 988	29 000	92 767	240 269	307 391	517 160	537 498
Casier 9	152 239	393 027	408 242	591 055	891 330	1 077 870	1 163 280	1 188 402
Casier 10	1 390 349	2 972 123	3 027 198	4 098 706	6 508 388	7 913 894	8 165 908	9 455 488
Casier 11	1 130 434	2 719 991	2 867 273	3 966 045	6 305 325	7 903 170	8 280 900	9 358 083
Casier 12	44 251	178 549	216 714	356 616	700 852	852 429	967 604	977 883
Casier 13	1 660 775	2 742 488	2 751 147	3 719 640	5 943 821	7 162 597	7 353 663	8 745 742
Casier 14	447 363	1 229 811	1 246 828	1 871 840	3 103 821	3 795 573	4 258 970	4 597 764
Casier 15	1 121 531	2 736 983	2 867 968	4 171 043	6 998 413	8 658 388	9 257 026	10 328 368
Casier 16	562 596	1 866 051	2 273 975	3 445 649	5 090 354	6 468 339	7 250 671	7 364 675
Casier 17	52 042	296 894	442 702	709 143	610 917	1 427 620	2 244 146	1 972 325
Casier 18	344 000	1 095 834	1 351 606	2 066 438	3 121 269	4 021 322	4 780 678	4 929 722
Casier 19	269 743	595 823	604 750	897 780	1 617 406	1 986 219	2 219 161	2 389 061
Casier 20	118 898	272 608	267 887	421 051	721 824	917 066	1 030 046	1 109 247
Casier 21	31 967	39 292	49 676	165 129	362 073	514 892	698 615	672 574
TOTAL	14 890 639	34 810 912	38 027 164	55 139 184	87 617 959	110 353 123	121 059 244	131 693 201

Tableau 33 – Résultats des VPA par casier (en m³/an) calculés pour chacun des 8 scenarii climatiques identifiés (modèle 2016).

Les résultats sont globalement similaires aux résultats présentés au chapitre 8.1.3 (écart moyen de 7,7 %). En détaillant par casier, on constate que l'amélioration de la modélisation conduit à réviser à la baisse les réserves en eau disponibles dans les casiers n° 2, 5, 8, 13, 17, 18 et 21 et à la hausse dans les casiers n° 1, 7, 9 et 16.

En comparant, sur la période 2006-2012 (sans associer chaque année au scénario climatique correspondant), les demandes de prélèvements agricoles cumulées par casier aux VPA, les réductions maximales suivantes seraient à appliquer :

- scénario minimal : 83 % au casier n° 17, 63 % au casier n° 21, 56 % au casier n° 5, 40 % au casier n° 2 et 22 % au casier n° ;.
- scénario « vingtennale sèche » : 55 % au casier n° 21 et 4 % au casier n° 17 ;
- scénario « décennale sèche » : 43 % au casier n° 21.

Pour toutes les autres années de recharge plus humide (de la quinquennale sèche à l'année de recharge maximale jamais observée), les demandes de prélèvements agricoles actuelles peuvent être satisfaites sur tous les casiers.

Au final, comme mis en évidence par le chapitre 8.1.3, les casiers n° 17 et 21 apparaissent comme le plus sujet à besoin de régulation en cas d'année particulièrement sèche.

Situé en rive droite de la Garonne au niveau du canal de Golfech, le casier n° 17 bénéficie d'une faible aire d'alimentation, les formations molassiques affleurant immédiatement au nord. L'apport latéral d'eau à la nappe alluviale par ces formations n'a pas été pris en compte dans le modèle, considéré comme négligeable du fait de la faible perméabilité et du faible coefficient d'emmagasinement attribués à la molasse (cf. chapitre 4.3.4). Localement, cet apport est peut-être plus important mais il n'a pas pu être quantifié. L'absence de piézomètre dans cette zone n'a pas permis de caler le modèle aussi finement qu'à d'autres endroits.

Le casier n° 21 se situe quant à lui dans la basse terrasse en rive gauche de la Garonne, au niveau de la commune de Mas-Grenier. Contrairement au casier n° 17, il est alimenté en amont par les moyennes et hautes terrasses du casier n° 14 mais ce secteur est également mal connu, faute de piézomètre dans cette zone.

8.1.6. Test de prélèvement des VPA

Pour chacun des 8 scenarii retenus, la période d'irrigation du 1er juin au 1er octobre a été simulée en pompant le volume prélevable calculé dans chaque maille et en utilisant les données climatiques de la station de Montauban et les débits amont des rivières des années correspondantes (cf. Tableau 29). Les prélèvements ont été ventilés sur les quatre mois d'irrigation suivant la moyenne calculée par EAUCEA (cf. Tableau 20).

L'Annexe 25 présente de manière cartographique, pour chacun des 8 scenarii retenus, la différence de la charge hydraulique simulée au 1er octobre après prélèvement des VPA avec la charge hydraulique simulée au 1er octobre 2012.

Ces cartes permettent de visualiser les zones pour lesquelles le prélèvement du VPA calculé entraîne un niveau au 1er octobre sensiblement inférieur au niveau simulé au 1er octobre 2012. C'est notamment le cas pour le confluent Tarn-Garonne, la limite entre basse et moyenne/haute terrasse en rive droite de la Garonne (marquée par un affleurement de molasse) et la bordure nord-est du casier n° 17.

Le Tableau 34 synthétise ces résultats par casiers.

À l'échelle des 21 casiers, l'écart moyen entre le niveau simulé après le prélèvement des VPA et le niveau au 1er octobre de l'année de référence est compris entre 2 et 18 cm suivant le scénario climatique.

Période de retour	Min	Vingtennale sèche	Décennale sèche	Quinquennale sèche	Moyenne	Quinquennale humide	Décennale humide	Max	Niveau le plus abaissé	Ecart moyen 8 scenarii
Année de référence	2001-02	2004-05	1989-90	1955-56	1952-53	1995-96	1987-88	1992-93		
N° scénario	1	3	5	9	12	14	18	20		
Casier 1	-0.04	-0.10	-0.10	-0.10	-0.11	-0.11	-0.11	-0.04	**-0.11**	**-0.09**
Casier 2	-0.02	-0.07	-0.07	-0.01	-0.06	0.00	-0.02	0.18	**-0.07**	**-0.01**
Casier 3	-0.12	-0.30	-0.29	-0.18	-0.21	-0.14	-0.15	0.18	**-0.30**	**-0.15**
Casier 4	-0.04	-0.10	-0.10	-0.09	-0.10	-0.09	-0.09	-0.02	**-0.10**	**-0.08**
Casier 5	-0.01	-0.07	-0.06	-0.05	-0.08	-0.07	-0.08	0.04	**-0.08**	**-0.05**
Casier 6	-0.07	-0.14	-0.15	-0.13	-0.16	-0.15	-0.16	-0.01	**-0.16**	**-0.12**
Casier 7	-0.17	-0.28	-0.29	-0.27	-0.30	-0.30	-0.29	-0.15	**-0.30**	**-0.26**
Casier 8	-0.10	-0.13	-0.13	-0.11	-0.12	-0.06	-0.12	-0.01	**-0.13**	**-0.10**
Casier 9	-0.19	-0.27	-0.27	-0.26	-0.28	-0.28	-0.28	-0.15	**-0.28**	**-0.25**
Casier 10	-0.10	-0.17	-0.17	-0.16	-0.16	-0.15	-0.14	-0.06	**-0.17**	**-0.14**
Casier 11	-0.17	-0.24	-0.24	-0.24	-0.26	-0.27	-0.27	-0.19	**-0.27**	**-0.24**
Casier 12	-0.26	-0.35	-0.39	-0.34	-0.14	-0.12	0.01	0.32	**-0.39**	**-0.16**
Casier 13	-0.06	-0.11	-0.12	-0.09	-0.09	-0.07	-0.06	0.03	**-0.12**	**-0.07**
Casier 14	-0.14	-0.23	-0.23	-0.18	-0.21	-0.19	-0.19	-0.07	**-0.23**	**-0.18**
Casier 15	-0.25	-0.36	-0.37	-0.35	-0.33	-0.32	-0.28	-0.09	**-0.37**	**-0.29**
Casier 16	-0.14	-0.18	-0.18	-0.17	-0.19	-0.19	-0.19	-0.09	**-0.19**	**-0.17**
Casier 17	-0.31	-0.51	-0.48	-0.19	-0.37	-0.07	0.00	0.68	**-0.51**	**-0.16**
Casier 18	-0.08	-0.16	-0.16	-0.13	-0.15	-0.12	-0.14	0.01	**-0.16**	**-0.11**
Casier 19	-0.08	-0.15	-0.13	-0.14	-0.15	-0.15	-0.15	-0.08	**-0.15**	**-0.13**
Casier 20	-0.05	-0.12	-0.13	-0.09	-0.09	-0.09	-0.10	-0.01	**-0.13**	**-0.08**
Casier 21	0.03	0.00	0.00	0.04	-0.01	0.02	-0.03	0.23	**-0.03**	**0.04**
TOTAL	**-0.11**	**-0.18**	**-0.18**	**-0.16**	**-0.18**	**-0.16**	**-0.16**	**-0.02**	**-0.18**	**-0.14**

Tableau 34 – Différence de charge moyenne par casier (en m) entre la charge simulée au 1er octobre et la charge simulée au 1er octobre 2012.

Sur certains casiers (n° 7, 9, 11, 12, 15 et 17 en particulier), l'écart est néanmoins plus conséquent, notamment pour les scenarii les plus secs. Ainsi, en vingtennale ou décennale sèche, il atteint 50 cm pour le casier n° 17.

Les variations d'un scénario à l'autre s'expliquent par l'utilisation des données climatiques réelles et donc par l'existence (ou non) d'une recharge estivale de la nappe différente de celle de l'été 2012.

Les variations d'un casier à l'autre s'expliquent quant à elles par l'hétérogénéité des paramètres hydrodynamiques (perméabilités, coefficients d'emmagasinement) de la nappe alluviale.

En conclusion, le calage du modèle permet des prédictions correctes à l'échelle de l'ensemble de la nappe alluviale dans le Tarn-et-Garonne ainsi que dans les zones équipées de piézomètres suivis en continu (casiers n° 1, 4, 5, 6 et 13). Dans certains secteurs actuellement dépourvus de mesures piézométriques, la prédiction s'avère beaucoup moins fiable, notamment dans le cas des scenarii les plus secs où l'épaisseur d'eau disponible est limitée.

Le casier n° 17 est emblématique des limites actuelles de l'exploitation du modèle et illustre la nécessité de se doter d'au moins un ouvrage de suivi continu du niveau de la nappe par casier.

8.2. ADAPTATION DE L'OUTIL DE GESTION DES PRÉLÈVEMENTS

8.2.1. Fonctionnalités disponibles

L'outil de gestion est basé sur un fichier EXCEL existant, développé pour gérer les prélèvements agricoles à partir des résultats d'une modélisation hydrodynamique dans plusieurs départements du bassin de la Garonne (Ariège, Haute-Garonne, Lot-et-Garonne et Tarn-et-Garonne).

L'outil a été adapté aux demandes de la DDT 82, à savoir une gestion en trois temps (cf. Illustration 129) :

- **point à fin janvier :**

  les VPA sont calculés sur la base de la recharge du 1er octobre au 31 janvier de l'année hydrologique en cours et une estimation de la recharge du 1er février au 31 mai ;

- **point à fin mars :**

  les VPA sont calculés sur la base de la recharge du 1er octobre au 31 mars de l'année hydrologique en cours et une estimation de la recharge du 1er avril au 31 mai ;

- **vérification à début juin :**

  les VPA sont calculés sur la base de la recharge du 1er octobre au 31 mai de l'année hydrologique en cours.

Illustration 129 – Page d'accueil de l'outil EXCEL.

L'outil permet également de visualiser, pour les ouvrages suivis dans le cadre du Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS) :

- les chroniques piézométriques (cf. Illustration 130) ;
- la période de retour correspondant au niveau piézométrique actuel (cf. Illustration 131).

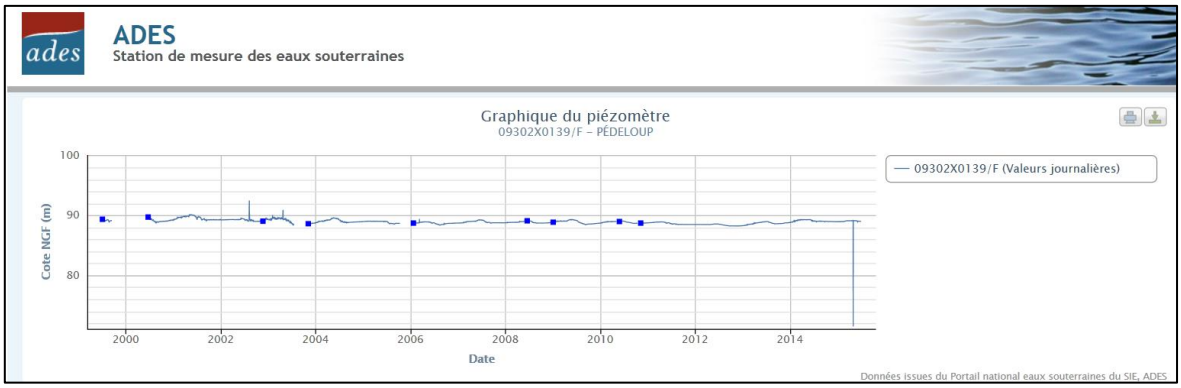


Illustration 130 – Exemple de chronique piézométrique.

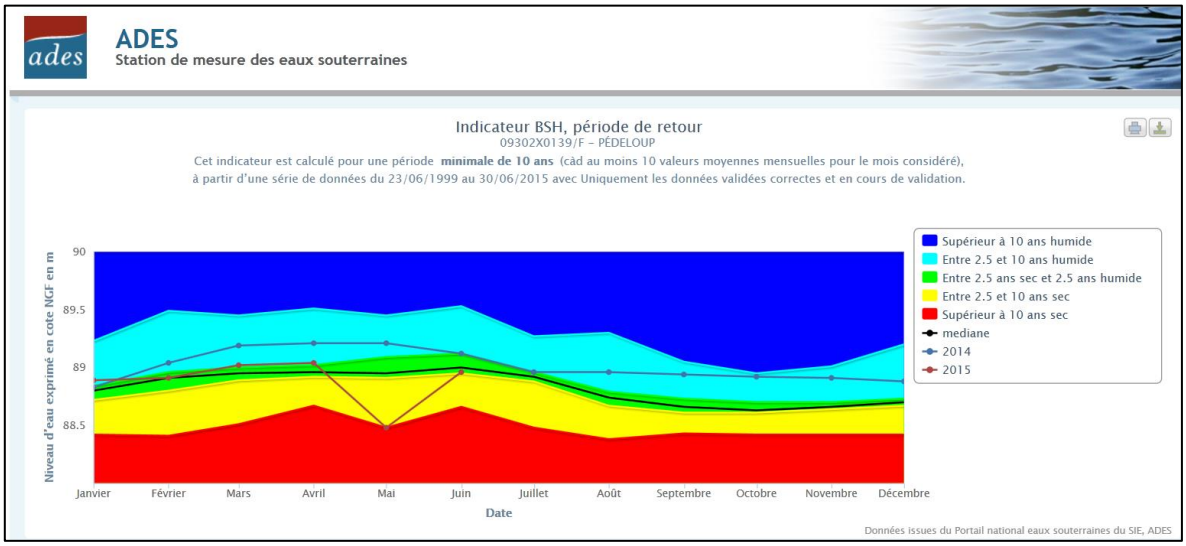


Illustration 131 – Exemple de chronique piézométrique indiquant la période de retour (indcateur BSH).

8.2.2. Données d'entrée

Les données nécessaires au fonctionnement de l'outil sont :

- les chroniques décadaires de pluie et d'ETP à la station de Montauban pour l'année en cours (du 1er octobre au 31 janvier, 31 mars ou 31 mai suivant le mode de gestion choisi (cf. Illustration 132) ;
- les demandes de prélèvements pour l'AEP, l'industrie et l'irrigation pour l'année en cours (cf. Illustration 133).

Données Météo France : station n° 82121002 (Montauban)

Décade	Pluie (mm)	ETP (mm)	Réservoir sol (mm)	Recharge (mm)	Somme Recharge
01/10	9.9	21.6	0.0	0.0	
11/10	2.2	20.1	0.0	0.0	
21/10	0	13.4	0.0	0.0	
01/11	11.5	7.4	4.1	0.0	
11/11	23.6	5.7	20.7	1.3	
21/11	22.9	9.3	30.6	3.7	
01/12	12	3.5	35.4	3.7	
11/12	7.2	2.9	37.4	2.3	
21/12	16.3	2.9	42.2	8.6	
01/01	3.8	1.9	42.7	1.4	
11/01	11.6	3.5	44.6	6.2	
21/01	25.5	6.7	47.4	16.0	43.2
01/02	1.8	7	42.3	0.0	
11/02	27.3	10.3	45.9	13.3	
21/02	30.4	9.3	48.2	18.8	
01/03	15.5	15.3	48.2	0.2	
11/03	8	18.8	37.7	0.0	
21/03	19.6	21.8	35.6	0.0	75.5
01/04	1.4	32.2	13.9	0.0	
11/04	37	35.6	15.2	0.1	
21/04	52.4	33.8	29.8	4.0	
01/05	17.7	39.5	15.0	0.0	
11/05	14	43	5.3	0.0	
21/05	0.4	50.2	0.8	0.0	79.7

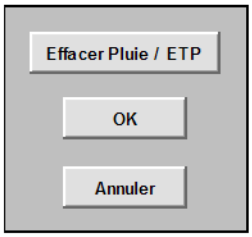


Illustration 132 – Données climatiques décadaires rentrées dans l'outil EXCEL.

N° BSS (BRGM)	N° AEAG	N° MISE (CA/DDT	Commune	Nom point de prélèvement ou Exploitant	X_L93 (m)	Y_L93 (m)	N° Zone	Volume demandé (m3)	VPA (m3)	Réduction (%)
	A82001001		ALBEFEUILLE-LAGARDE	GARRIGUES VINCENT	562 260	6 330 430	0	20 000		
	A82001004		ALBEFEUILLE-LAGARDE	E.A.R.L. DE FLAMARENC	561 368	6 330 431	0	39 202		
	A82001005		ALBEFEUILLE-LAGARDE	E.A.R.L. DE FLAMARENC	561 369	6 330 432	0	22 795		
	A82001006		ALBEFEUILLE-LAGARDE	E.A.R.L. DES HERBONNES	562 640	6 329 830	0	11 791		
	A82001013		ALBEFEUILLE-LAGARDE	MARTY CHRISTIAN	560 441	6 329 752	0	10 113		
	A82001015		ALBEFEUILLE-LAGARDE	MARTY CHRISTIAN	561 652	6 329 792	0	11 060		
	A82001016		ALBEFEUILLE-LAGARDE	MARTY CHRISTIAN	560 152	6 329 694	0	9 982		
	A82001019		MONTBETON	S.C.E.A. LES VERGERS DE SAINT LAURENT	562 413	6 327 369	0	9 300		
	A82001022		ALBEFEUILLE-LAGARDE	S.C.E.A. LES VERGERS DE SAINT LAURENT	562 073	6 327 882	0	10 530		
	A82001027		ALBEFEUILLE-LAGARDE	E.A.R.L. DES ROUGETS	560 930	6 329 500	0	12 050		
	A82001028		ALBEFEUILLE-LAGARDE	GARRIGUES VINCENT	561 877	6 329 360	0	21 000		
	A82002004		ALBIAS	E.A.R.L. LOU CASTAGNE	574 733	6 332 053	6	10 196		
	A82002019		ALBIAS	PREVOT JEAN MARCEL	575 283	6 334 227	6	49 767		
	A82002021		ALBIAS	E.A.R.L. DU VERGER THIBAUT	573 852	6 333 932	0	7 600		
	A82002026		ALBIAS	E.A.R.L. DELTEMPS	573 707	6 334 556	0	50 239		
	A82002028		ALBIAS	E.A.R.L. LOU CASTAGNE	574 597	6 333 296	6	11 005		

Illustration 133 – Exemple de fichier source pour les prélèvements pour l'irrigation.

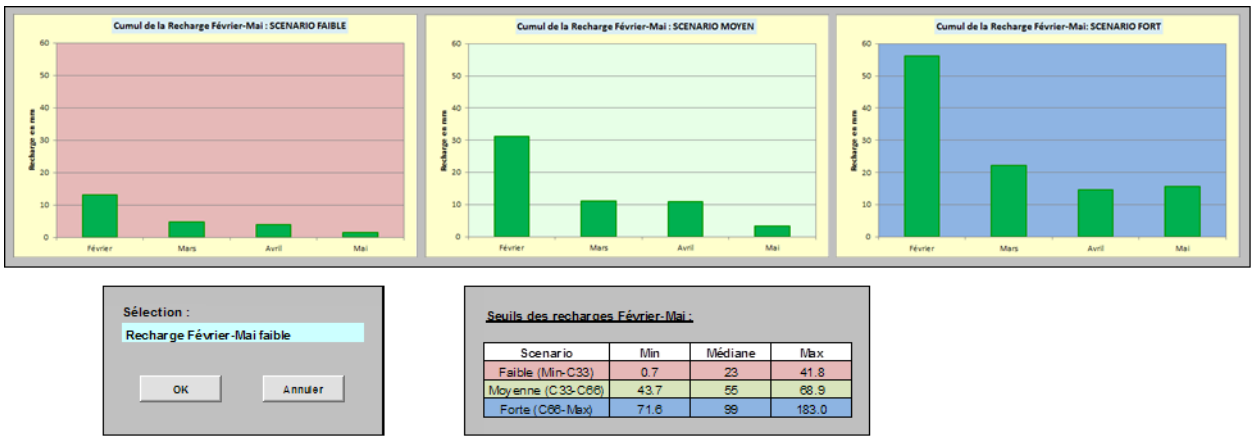
8.2.3. Détermination du scénario climatique et des VPA appliqués

À partir des données climatiques décadaires entrées, l'outil calcule la recharge de l'année hydrologique en cours avec un schéma de type « réservoir sol progressif » et une capacité de stockage du sol de 50 mm (cf. Illustration 132).

Le modèle hydrodynamique utilise des données climatiques journalières en entrée sur les 20 années de simulation, mais les données climatiques décadaires ont dû être utilisées pour les scenarii climatiques antérieurs à 1990 et l'utilisation de données journalières dans l'outil nécessiterait l'acquisition auprès de Météo France d'environ dix fois plus de données chaque année (cf. chapitre 8.1.2).

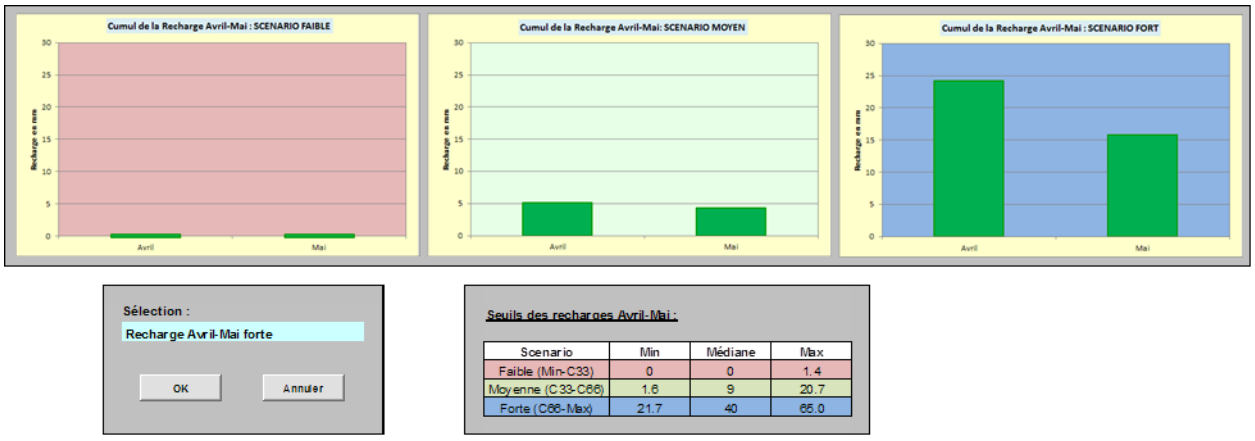
Dans le cas d'un point à fin janvier ou fin mars, trois scenarii de recharge (faible, moyen, fort) pour la période février-mai (cf. Illustration 134) ou avril-mai (cf. Illustration 135) sont proposés afin de compléter la recharge de l'année hydrologique avant le début de la période d'irrigation.

Les valeurs de recharge février-mai et avril-mai associées à chacun des trois scenarii ont été déterminées par l'étude des données de recharge de 1949 à 2015 à la station de Montauban sur ces deux périodes (cf. Annexe 26).



Scenario	Min	Médiane	Max
Faible (Min-C33)	0.7	23	41.8
Moyenne (C33-C66)	43.7	55	68.9
Forte (C66-Max)	71.6	99	183.0

Illustration 134 – Graphiques des scenarii de recharge Février-Mai.



Scenario	Min	Médiane	Max
Faible (Min-C33)	0	0	1.4
Moyenne (C33-C66)	1.6	9	20.7
Forte (C66-Max)	21.7	40	65.0

Illustration 135 – Graphiques des scenarii de recharge Avril-Mai.

L'étude des données de recharge de 1949 à 2015 à la station de Montauban a également permis de déterminer les seuils de recharge octobre-mai à attribuer à chacun des 8 scenarii climatiques identifiés (cf. Tableau 35).

Période de retour	Scenario VPA	Min	Max (inclus)
Mini	1	0	60
Vingtennale sèche	2	60	80
Décennale sèche	3	80	115
Quinquennale sèche	4	115	190
Moyenne	5	190	260
Quinquennale humide	6	260	296
Décennale humide	7	296	370
Maxi	8	370	500

Tableau 35 – Seuils de recharge octobre-mai associés à chaque scenario climatique.

La recharge du 1er octobre au 31 mai de l'année hydrologique en cours, calculée à partir des données climatologiques et éventuellement partiellement estimée, est alors comparée à ces seuils.

L'année hydrologique en cours est rattachée au scénario correspondant, pour lequel les VPA par casier ont été définis (cf. Tableau 32).

8.2.4. Consultation des résultats

Une fois le scénario climatique et les VPA associés déterminés, l'outil de gestion permet de consulter les résultats pour chacun des 21 casiers hydrogéologiques (cf. Illustration 136).

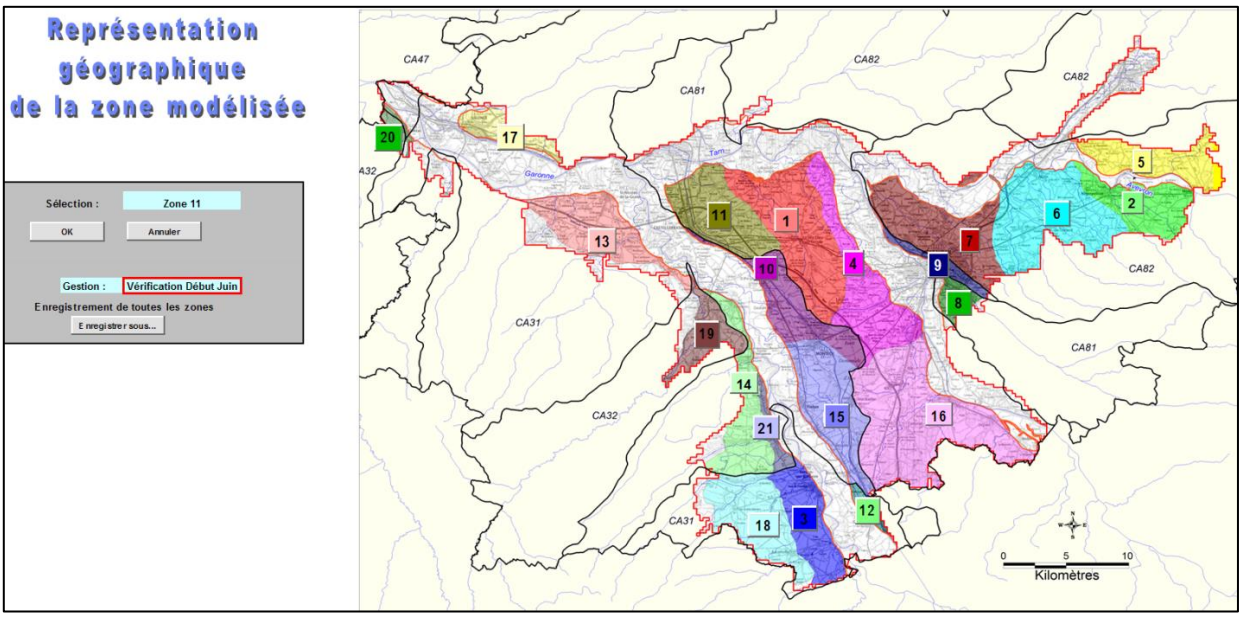


Illustration 136 – Choix du casier pour lequel on souhaite connaître les résultats de la simulation de gestion.

Les résultats sont présentés sous la forme d'un tableau synthétique, récapitulant les options de gestion choisies, les prélèvements sollicités, le VPA et un éventuel coefficient de réduction à appliquer aux prélèvements agricoles (cf. Illustration 137).

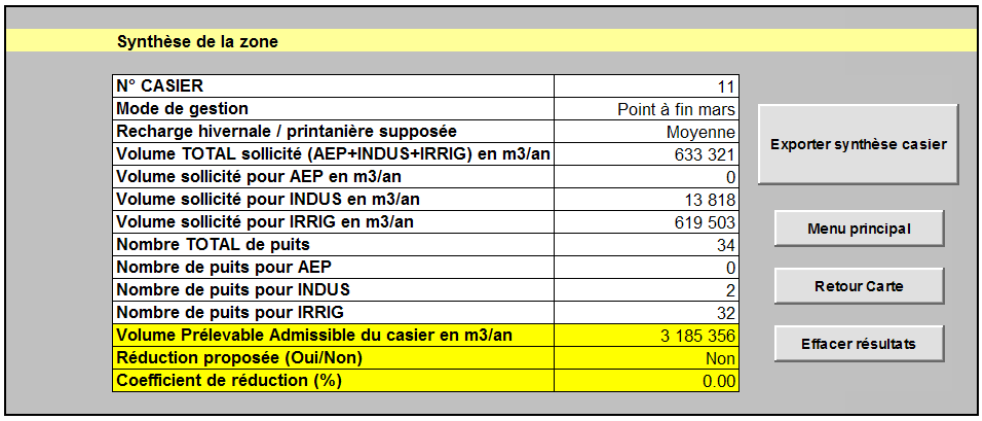


Illustration 137 – Résultats de la simulation de gestion pour un des casiers.

La liste des ouvrages du casier sollicité, avec le récapitulatif des informations disponibles et l'éventuel coefficient de réduction à applique pour les prélèvements agricoles sont également mentionnés dans l'onglet de restitution des résultats (cf. Illustration 138).

Liste des ouvrages de la zone

IRRIGATION							
N° BSS (BRGM)	N° AEAG	N° MISE (CA/DDT)	Commune	Nom point de prélèvement ou Exploitant	Volume demandé (m3)	VPA (m3)	Réduction (%)
	A82030023		CASTELSARRASIN	E.A.R.L. LE CHATEAU	6420	6420	0.00
	A82033017		CASTELSARRASIN	MAGNETTO PATRICE	6650	6650	0.00
	A82033055		CASTELSARRASIN	BOVINO MARC	14400	14400	0.00
	A82033062		CASTELSARRASIN	FURLAN MARLENE	12000	12000	0.00
	A82033079		CASTELSARRASIN	LECOURT GISELE	6630	6630	0.00
	A82033126		CASTELSARRASIN	MARTY JEANINE	18938	18938	0.00
	A82033127		CASTELSARRASIN	MAYANOBE MARTHE	2371	2371	0.00
	A82033132		CASTELSARRASIN	E.A.R.L. GANZA	15160	15160	0.00
	A82033153		CASTELSARRASIN	G.A.E.C. DE BEAUBRIERES	2655	2655	0.00
	A82033159		CASTELSARRASIN	ARBIA MICHEL	22320	22320	0.00
	A82033170		CASTELSARRASIN	PALUE JOEL	25200	25200	0.00
	A82033172		CASTELSARRASIN	PALUE JOEL	3810	3810	0.00
	A82033183		CASTELSARRASIN	E.A.R.L. DE LA TRAVERSE	20000	20000	0.00
	A82033186		CASTELSARRASIN	BAZELY JEANINE	7222	7222	0.00
	A82033189		CASTELSARRASIN	BROUILLET JOEL	544	544	0.00
	A82033191		CASTELSARRASIN	DUCONS CHRISTIAN	30770	30770	0.00
	A82033199		CASTELSARRASIN	PARIE LIONEL	12368	12368	0.00
	A82033205		CASTELSARRASIN	PRADES PATRICK	1278	1278	0.00
	A82033206		CASTELSARRASIN		1278	1278	0.00
	A82033244		CASTELSARRASIN	STEFANELLO MARYSE	8594	8594	0.00
	A82033270		CASTELSARRASIN	S.C.E.A. LES GRANDES	92000	92000	0.00
	A82033271		CASTELSARRASIN	S.C.E.A. LES GRANGES	93000	93000	0.00
	A82033272		CASTELSARRASIN	MAYANOBE MARTHE	21322	21322	0.00
	A82033277		CASTELSARRASIN	E.A.R.L. GANZA	15190	15190	0.00
	A82033451		CASTELSARRASIN		11573	11573	0.00
	A82033452		CASTELSARRASIN	E.A.R.L. DE VACQUIES	19485	19485	0.00
	A82033453		CASTELSARRASIN		18020	18020	0.00
	A82033458		CASTELSARRASIN	S.C.E.A. DE BORIOS	3070	3070	0.00
	A82033461		CASTELSARRASIN		9575	9575	0.00
	A82033466		CASTELSARRASIN		90260	90260	0.00
	A82033471		CASTELSARRASIN		5080	5080	0.00
	A82112077		CASTELSARRASIN	ARBIA MICHEL	22320	22320	0.00

INDUSTRIE				
N° BSS (BRGM)	N° AEAG	N° GIDIC (ICPE)	Commune	Nom point de prélèvement ou Exploitant
	I82033116 PP_INERIS_1	068.02805	CASTELSARRASIN CASTELSARRASIN	S.A. Fourment Christian Et Fils Labeyrie Traiteur Surgelés

AEP				
N° BSS (BRGM)	N° AEAG	N° SISE (ARS)	Commune	Nom point de prélèvement ou Exploitant

Illustration 138 – Synthèse des prélèvements dans la zone choisie.

8.2.5. Notice d'utilisation de l'outil de gestion

L'outil de gestion des prélèvements agricoles dans le Tarn-et-Garonne est livré avec une notice d'utilisation, ayant fait l'objet de la note BRGM **MPY 16081** (Le Cointe et Bardeau, 2016).

9. Conclusions

Les services de la Police de l'Eau de Tarn-et-Garonne ont souhaité améliorer l'outil de gestion des autorisations de prélèvements agricoles utilisé depuis 2007 et basé sur un modèle hydrodynamique de la nappe alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron en régime transitoire perfectible.

L'objectif de cette étude était de pouvoir :

- améliorer certains paramètres du modèle préexistant en particulier le calcul de la recharge via un couplage avec le logiciel GARDENIA, la prise en compte d'un réseau hydrographique dynamique et une meilleure évaluation spatiale et temporelle des prélèvements ;
- ajuster si besoin l'extension de la nappe d'accompagnement de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron ;
- mettre à jour l'outil de détermination des volumes prélevables admissibles en fonction de la recharge annuelle à partir de la nouvelle version du modèle, d'un schéma de gestion revu et d'un redécoupage des zones de gestion.

Pour cela, une modélisation en régime transitoire a été réalisée avec le logiciel MARTHE sur 720 pas de temps décadaires, soit 20 ans de simulation, à partir d'un maillage de 250 m de côté. Cette modélisation a permis de valider le contour de la nappe d'accompagnement défini en 1996.

Un nouvel outil de gestion a ensuite été développé, sur le principe d'une utilisation en trois temps :

- une première consultation à la fin du mois de janvier, au moment du dépôt des demandes d'autorisation annuelle de prélèvement ;
- une deuxième consultation à la fin du mois de mars, avant la publication des arrêtés d'autorisation annuelle de prélèvement ;
- une dernière au début du mois de juin, permettant d'anticiper des restrictions potentielles liées à une modification du scénario climatique annuel entre fin mars et le début de la période d'irrigation.

Le découpage de la plaine alluviale en 58 unités de gestion a été revu. 21 casiers hydrogéologiques ont été dessinées en fonction de paramètres scientifiques (géologie, géomorphologie, caractéristiques hydrodynamiques et sens d'écoulement) et administratifs (contour des périmètres élémentaires gérés par les Organismes Uniques).

Hormis sur certains casiers et pour les scenarii climatiques les plus secs, les volumes disponibles sont suffisants pour satisfaire les demandes de prélèvements actuelles.

Afin d'améliorer la gestion équitable de la ressource en eau de la plaine alluviale du Tarn-et-Garonne, il a été proposé de mettre en place un réseau d'observation adapté et de définir au moins un point de suivi automatique du niveau piézométrique par casier hydrogéologique.

Actuellement, 5 casiers disposent d'un ouvrage suivi automatiquement par le BRGM dans le cadre du Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS quantitatif). 7 autres casiers disposent d'un piézomètre identifié, suivi manuellement, et dont l'équipement pourra éventuellement se faire

après un diagnostic. Pour, les 9 derniers casiers, un ouvrage doit être identifié ou foré, puis équipé.

Une fois ce réseau en place et plusieurs années de mesures bancarisées, le modèle permettra d'affiner la détermination des volumes prélevables admissibles dans chaque casier en associant à chaque scénario climatique, un niveau piézométrique de référence dans l'ouvrage suivi.

10. Bibliographie

Ancey Ch. (2015). Hydraulique à surface libre : crues, vagues et ruptures de barrage. Phénomènes de propagation, outils de simulations, applications. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Arnaud L. (2016). Estimation des volumes prélevables dans les aquifères à nappe libre : retour d'expériences sur les méthodes utilisées, identification des problèmes rencontrés, recommandations. Rapport BRGM/RP-64615-FR.

Barthélemy Y., Seguin J.J. (2016). Modélisation maillée des écoulements souterrains – Principes, démarche et recommandations. Version 2. Rapport BRGM/RP-62549-FR.

Baume J.P., Belaud G., Vion P.Y. (2013). Hydraulique pour le génie rural. UMR Gestion de l'Eau, Acteurs Usages (G-eau).

Bourgine B. (1995). Logiciels géostatistiques de GDM – Manuel de l'utilisateur. Rapport BRGM/R-37842.

Bourgine B. (1995). Logiciels géostatistiques de GDM – Cas d'étude. Rapport BRGM/R-37843.

Bourgine B., Capdeville J.P., Razin P., Sourisseau B., Vairon J. (1997). Outil de gestion des systèmes aquifères du Sud du bassin Adour-Garonne – Concept géologique et hydrogéologique. Rapport BRGM/R-39538.

Caballero Y., Noilhan J. (2003). Étude d'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin Adour Garonne. Étude réalisée par l'Agence de l'eau Adour Garonne et Météo France.

Cavaillé A. (1950). Les sols de Tarn-et-Garonne. Le Tarn-et-Garonne agricole, revue mensuelle.

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

Collin J.J., Daum J.R. (1995). Méthodes d'évaluation de l'impact des prélèvements réalisés dans les nappes d'accompagnement sur les eaux superficielles associées. Rapport BRGM/R-38586.

Comité de Bassin Adour-Garonne (2016). Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du Bassin Adour-Garonne – SDAGE 2016-2021 – Un nouvel élan pour l'eau.

Croiset N., Wuilleumier A., Bessière H., Gresselin F. (2013). Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 2 : Construction et calage du modèle hydrogéologique. Rapport BRGM/RP-62648-FR.

de Marsily G. (1981). Hydrogéologie quantitative, Masson.

De Oliveira Nascimento N. (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Thèse de doctorat École Nationale des Ponts et Chaussées – CERGRENE.

Degoutte G. (2012). Hydraulique, dynamique et morphologie fluviales appliquées au diagnostic, à l'aménagement et à la gestion des rivières. École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.

Descoubet Ch. (2007). Rapport d'étude sur l'impact quantitatif de l'opération de réalimentation des ruisseaux Candé et Lère par le lac des Falquettes (amont de Caussade). Bureau d'études Sols et Eaux.

Douez O., Bichot F., Petit L. (2011). Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du modèle Jurassique de Poitou-Charentes. Rapport BRGM/RP-59288-FR.

Eaucéa (2007). Assistance au SMEAG – PGE de la vallée de la Garonne et du bassin de l'Ariège. Lot n°2 – volet eau / environnement / agronomie / économies d'eau. Actualisation et nouveaux développements du modèle du PGE Garonne – Ariège.

Edijatno, Michel C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, Vol. 2, pp. 113-121.

Galharague J. (1985). Alimentation aux limites de la nappe infra-molassique – Nappe libre des calcaires jurassiques dans le Nord du département de Tarn-et-Garonne – Mesures de débit effectuées sur les principes émergences. Rapport BRGM/85-MPY-HY.

Gandolfi J.M., Danneville L., Petit V., Tilloloy F. (1997). Connaissance, évaluation et protection des aquifères alluviaux de Tarn-et-Garonne (82). Rapport BRGM/R-39543.

Ghyselinck-Bardeau M. (2004). Étude des aquifères alluviaux du Tarn-et-Garonne – Modélisation nappe-rivière en régime transitoire (Garonne, Tarn et Aveyron) – Rapport intermédiaire – Année 2. Rapport BRGM/RP-53207-FR.

Ghyselinck-Bardeau M. (2004). Étude des aquifères alluviaux du Tarn-et-Garonne – Modélisation nappe-rivière en régime transitoire (Garonne, Tarn et Aveyron) – Rapport final – Année 2. Rapport BRGM/RP-53406-FR.

Ghyselinck-Bardeau M. (2007). Gestion des systèmes 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 final. Rapport BRGM/RP-55315-FR.

Ghyselinck-Bardeau M., Castagnac C. (2007). Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne – Modélisation de la nappe alluviale de la Garonne dans le département de Haute-Garonne – Rapport final – Année 1. Rapport BRGM/RP-55877.

Hiez G. (1977). L'homogénéité des données pluviométriques. *Cahiers de l'ORSTOM – Série Hydrologie*, Vol. XIV, n°2, pp. 129-172.

Hineux T. (2013). Modélisation géologique des terrasses alluviales du Tarn-et-Garonne. Mémoire du Master 2 Hydrogéologie et Transferts de l'Université de Poitiers.

Hydratec (2007). Étude de définition d'une stratégie d'aide à la décision pour l'optimisation de la gestion de l'eau sur le canal de Garonne. Rapport définitif.

Le Cointe P., Bardeau M. (2016). Notice d'utilisation – Outil de gestion de la nappe alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron – Département du Tarn-et-Garonne. Note BRGM MPY 16081.

Le Guellanf F. (2014). Actualisation du modèle hydrodynamique du Tarn-et-Garonne. Mémoire du Master 2 Agrosciences – Hydrogéologie, Sol et Environnement de l'Université d'Avignon.

Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (2004). Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature Eau. Sondage, forage, création de puits ou d'ouvrage souterrain non domestique exécuté en vue de la recherche, de la surveillance ou d'un prélèvement d'eau souterraine.

Morenon E., Scherrer A., Ruby P., Bossy G. (1974). Chute de Golfech sur la Garonne. Moyens mis en œuvre pour éviter les répercussions de l'aménagement sur la nappe alluviale. Société Hydrotechnique de France. *XIII*^{èmes} *journées de l'Hydraulique* (Paris, 1974).

Nash J.E., Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology,* Vol. 10, Issue 3, pp. 282-290.

Pédron N, Pinault J.L. (2005). Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine – Gestion intégrée des nappes alluviales – Module 5 – Année 2. Rapport BRGM/RP-53814-FR.

Perrin C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat Institut National Polytechnique de Grenoble – CEMAGREF.

Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, Vol. 279, Issues 1-4, pp. 275-289.

Roux J.C., Ouvrage collectif sous la direction de (2006). Aquifères et eaux souterraines en France. BRGM Editions.

Saplairoles M. (2005). Étude des aquifères alluviaux du Tarn-et-Garonne – Présentation de l'outil de gestion issu de la modélisation en régime transitoire. Rapport BRGM/RP-54309-FR.

Saplairoles M., Buscarlet E. (2009). Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne – Modélisation de la nappe alluviale de l'Ariège et de l'Hers Vif – Année 3. Rapport BRGM/RP-57184-FR.

Soulé J.C. (1976). Études préliminaires à des captages d'eau par forages dans les calcaires jurassiques et crétacés du Bas-Quercy (82). Rapport BRGM/76-SGN-491-MPY.

Soulé J.C. (1978). Évaluation des Ressources Hydrauliques de la France. État des connaissances et synthèse hydrogéologique du département de Tarn-et-Garonne. Rapport BRGM/78-SGN-070-MPY.

Soulé J.C. (1980). Étude hydrogéologique de l'impact du projet de décharge de la Villedieu-du-Temple (82). Rapport BRGM/80-SGN-294-MPY.

Thiéry D. (1990). Logiciel MARTHE – Modélisation d'Aquifère par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Écoulements. Rapport BRGM/R-32210.

Thiéry D. (2012). Code MARTHE 7.4 : Couplage Nappe-Rivières et Nappe-Drains. Bilans Hydroclimatiques, Note technique BRGM NT EAU 2004/19, 3ème édition.

Thiéry D. (2014). Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, mise à jour : Mai 2015.

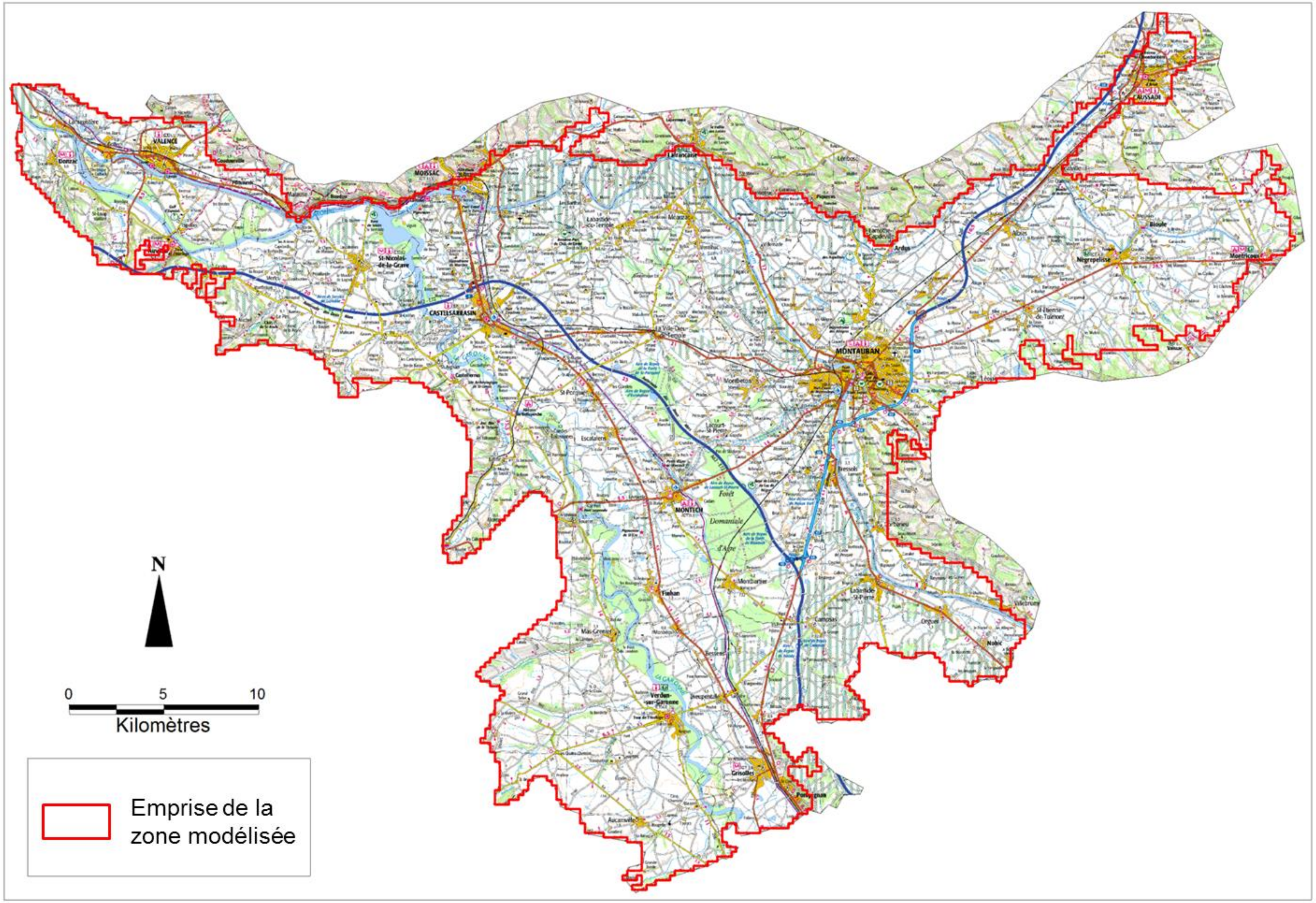
Thiéry D. (2015). Code de calcul MARTHE – Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes – Notice d'utilisation de la version 7.5. Rapport BRGM/RP-64554-FR.

Travade F., Larinier M., Trivellato D., Dartiguelongue J. (1992). Conception d'un ascenseur à poissons adapté à l'alose (*Alosa alosa*) sur un grand cours d'eau : l'ascenseur de Golfech sur la Garonne. *Hydroécologie appliquée.* Tome 4, Vol. 1, pp. 91.119.

Wuilleumier A., Allanic C., Boudet M., Bourgine B., Croiset N., Machard de Gramont H., Pannet P., Tourlière B. Dugué O. (2013). Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 1 : Collecte des données, synthèse hydrogéologique et construction du modèle géologique. Rapport BRGM/RP62002-FR.

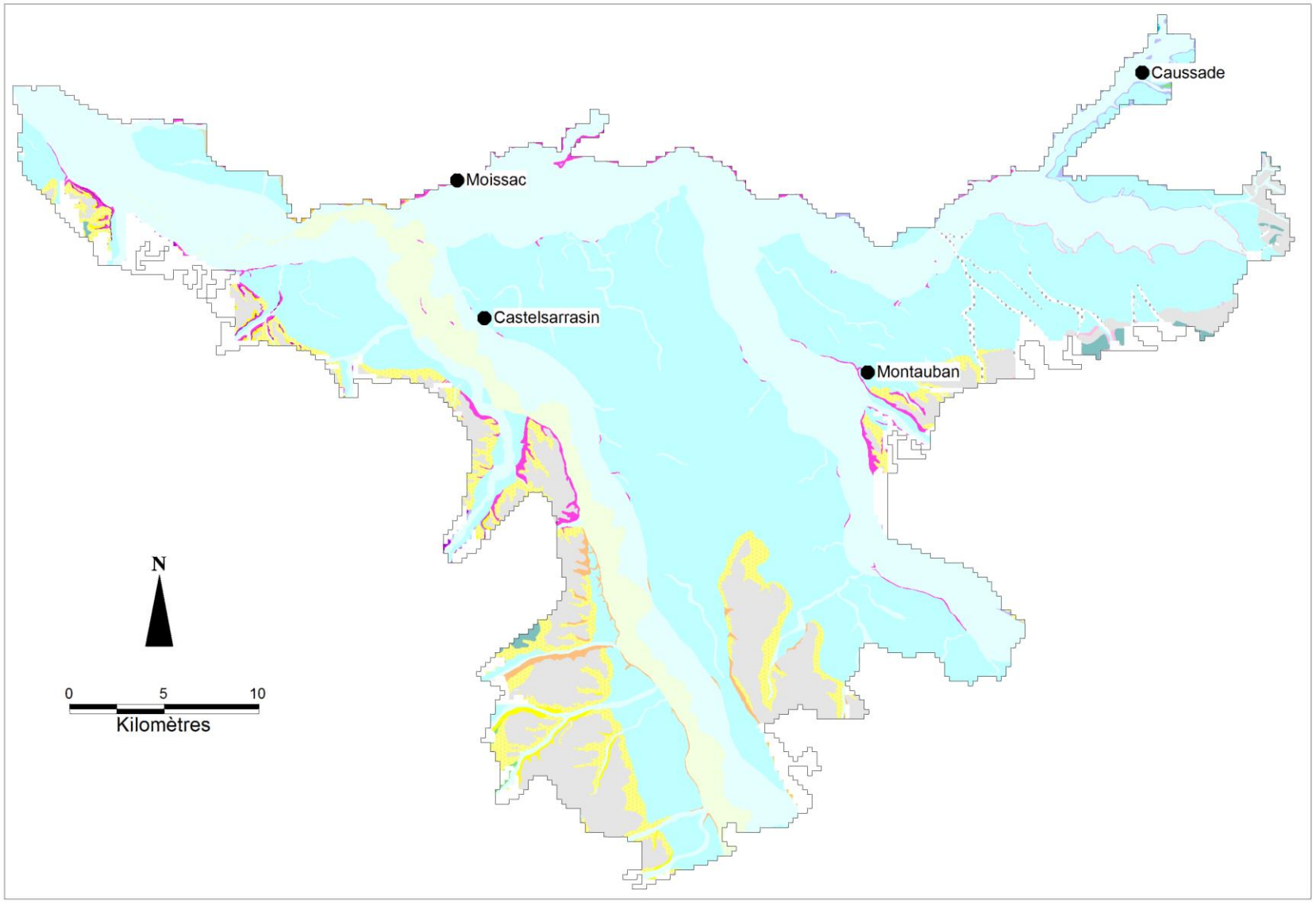
Annexe 1

Carte de la zone modélisée


N
0
5
10
Kilomètres
Emprise de la zone modélisée

Annexe 2

Carte géologique harmonisée à 1/50 000 dans le secteur de la plaine alluviale du Tarn-et-Garonne

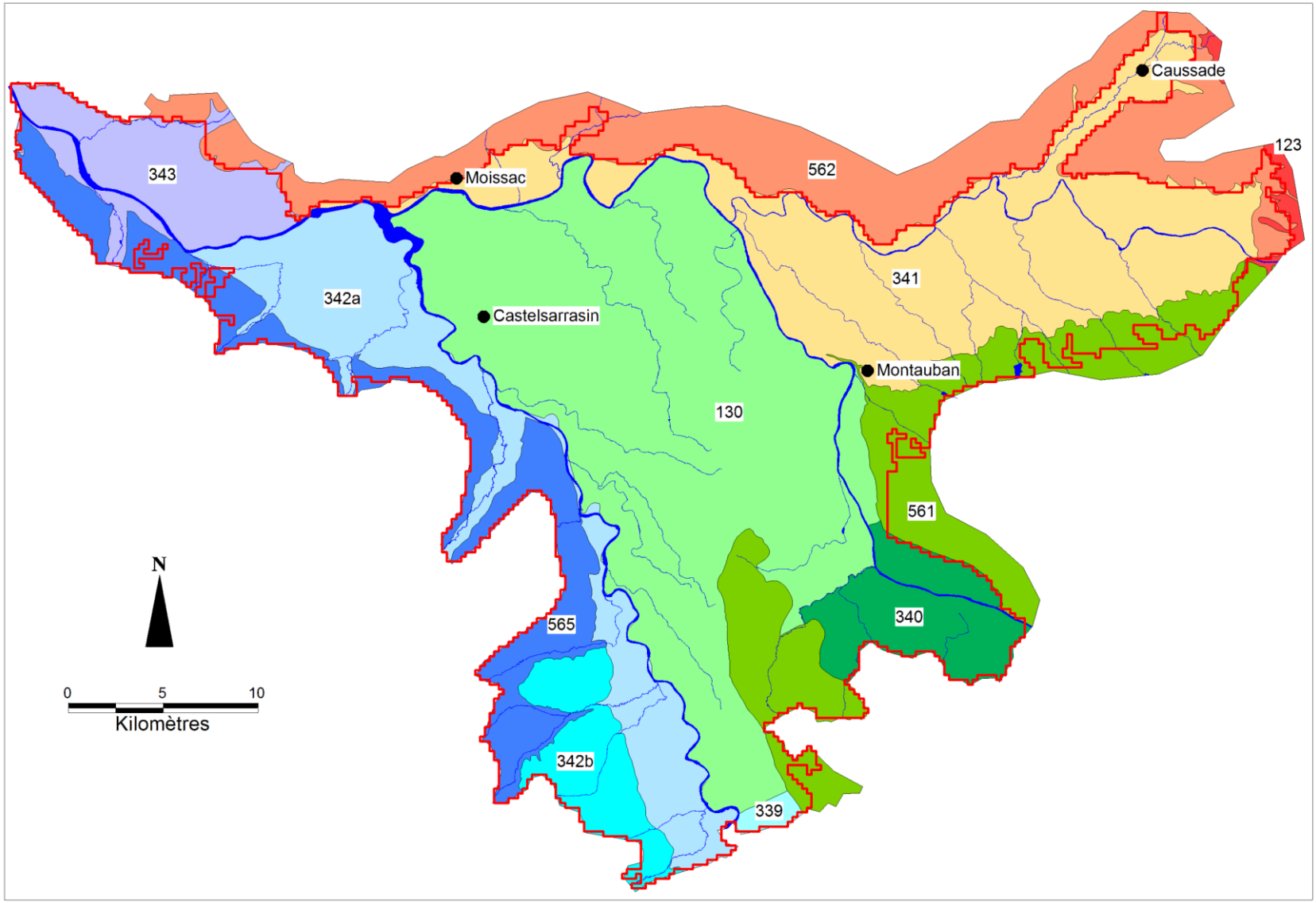

Caussade
Moissac
Castelsarrasin
Montauban
N
0
5
10
Kilomètres

Description des formations géologiques :

- Jurassique moyen, Bajocien supérieur à Bathonien. Formation de Cajarc, Membres de Larnagol, de la Bouye et de Saint-Chels : calcaires oolitiques et alternances marno-calcaires
- Holocène. Colluvions argilo-sableuses à limoneuses, tardiglaciaires à actuelles, issues des formations fluviatiles et molassiques. Altérites limono-argileuses
- Pléistocène supérieur. Alluvions würmiennes des terrasses inférieures de la Garonne et de l'Adour : galets, graviers et sables
- Jurassique moyen, Bathonien terminal à Callovien basal? Formation de Rocamadour, Membres de Marcilhac et de Cabrerets : calcaires micritiques
- Oligocène inférieur, Rupélien moyen. Ensemble D: Molasses de Fayssac. Grès de la Sauzière. Molasse et poudingues de Saint-Martin-de-Casselvi, de Cambon, le Faget, sous les calcaires du "régime" de Briatexte. Niveaux argilo-calcaires rouges intercalés
- Rupélien : Stampien inférieur. Molasses de l'Agenais inférieures : grès tendres, silts et argiles carbonatées micacées
- Pléistocène moyen. Alluvions rissiennes des terrasses moyennes : galets siliceux et limons
- Jurassique supérieur, Oxfordien? Formation de Saint-Géry : calcaires oolitiques massifs
- Rupélien : Stampien supérieur. Molasses de l'Agenais supérieures : grès tendres et argiles carbonatées silteuses jaunâtres
- Holocène. Alluvions fluviatiles actuelles et récentes d'âge compris entre 11430 - 0 BP : sables micacés, argiles tourbeuses et silteuses grises
- Jurassique supérieur, Oxfordien? Formation de Vers, Membre des calcaires à Astarte : calcaires micritiques
- Oligocène inférieur à supérieur, Rupélien supérieur à Chattien basal. Ensemble E : argiles molassiques, grès et poudingues de Vors et Gradille encaissant les calcaires de Donnazac. Argiles et molasses sur le Calcaire de Saint-Martin-de-Casselvi
- Pléistocène inférieur terminal. Alluvions des niveaux supérieurs datées du Günz : galets siliceux, argile rubéfiée
- Holocène. Alluvions des bas niveaux de la Garonne, du Tarn, de l'Agout, de l'Arize, de l'Ariège, de l'Hers, de l'Aveyron: galets, graviers, sables
- Quaternaire indifférencié. Formations résiduelles de pente issues de la molasse : formations colluviales argilo-limoneuses décalcifiées, ocre ou ocre-rouge
- Quaternaire indifférencié. Solifluxions, colluvions et éboulis issus des formations molassiques et des alluvions quaternaires
- Holocène. Alluvions du lit majeur de la Garonne : alluvions actuelles sableuses
- Aquitanien. Molasses indifférenciées et marnes
- Aquitanien inférieur. Calcaire blanc de l'Agenais : calcaires lacustres blancs
- Burdigalien inférieur et moyen. Molasses indifférenciées et marnes
- Rupélien. Calcaire de Nérac : calcaires lacustres beiges à ocres, parfois rosâtres
- Quaternaire récent à actuel. Formations colluviales ; colluvions-alluvions de fonds de vallons

Annexe 3

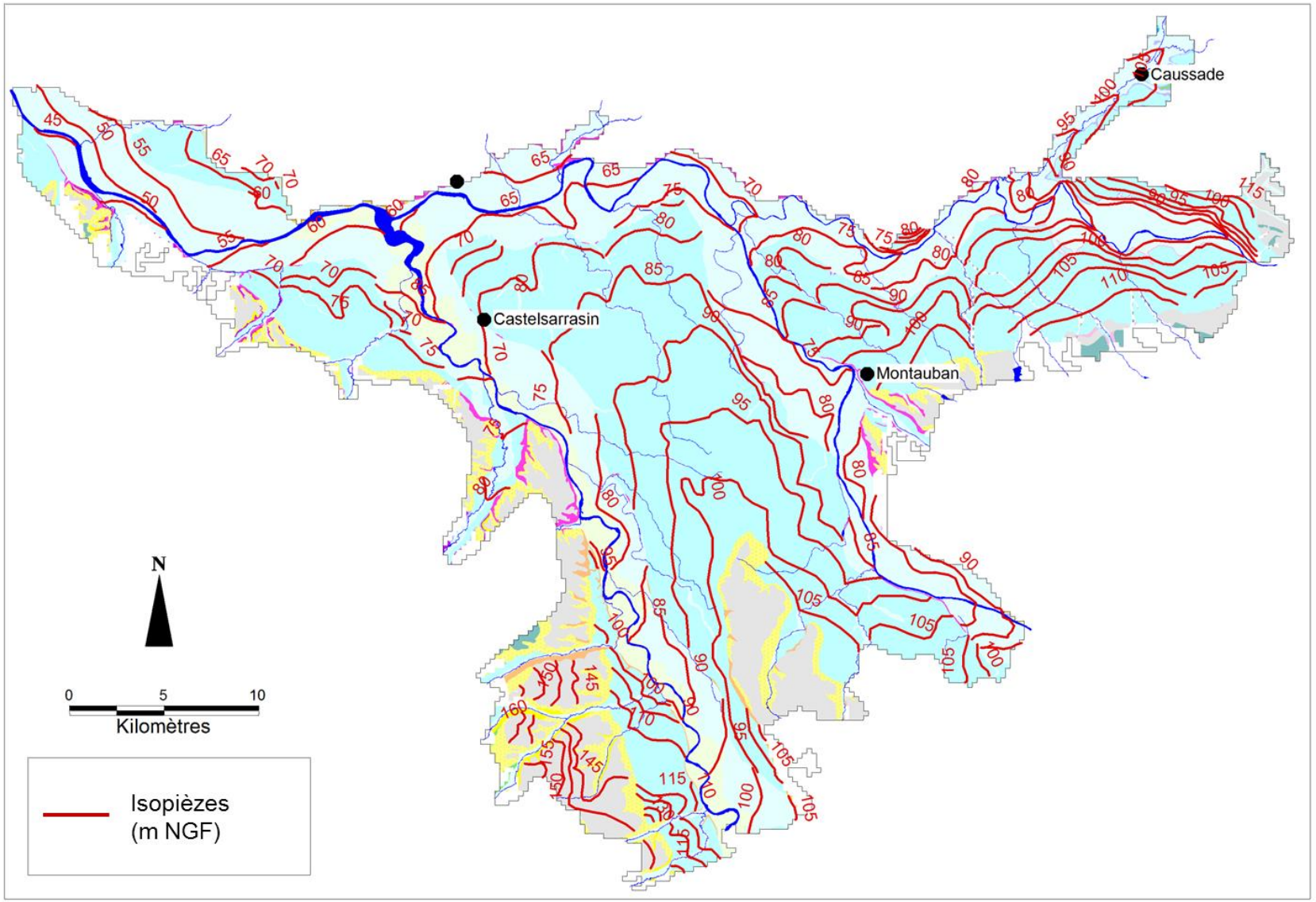
Carte des systèmes aquifères, selon la BDRHF Version 1


Caussade
123
562
343
Moissac
341
342a
Castelsarrasin
Montauban
130
561
N
565
340
0
5
10
Kilomètres
342b
339

Code	Nom entité	Type nappe	Description
123	LIMOGNE	Nappe libre	Aquifère karstique d'âge jurassique moyen et supérieur (Causse de Limogne) entre Lot et Aveyron.
130	PLAINE DE LA GARONNE ET DU TARN	Nappe libre	Aquifère alluvial d'âge quaternaire de l'interfluve Garonne-Tarn (alluvions actuelles, alluvions récentes ou basses plaines, alluvions anciennes ou basses terrasses).
339	GARONNE RIVE DROITE	Nappe libre	Aquifère alluvial de l'Hers mort, du Girou, et de la rive droite de la Garonne de la confluence de l'Ariège à la confluence de la Save.
340	TARN ET AGOUT	Nappe libre	Aquifère alluvial d'âge quaternaire du Tarn et de ses affluents l'Agout et le Dadou.
341	AVEYRON ET TARN	Nappe libre	Aquifère alluvial d'âge quaternaire de l'interfluve Aveyron-Tarn.
342a	GARONNE MOYENNE / BASSE PLAINE ET BASSE TERRASSE	Nappe libre	Aquifère alluvial de la rive gauche de la Garonne et de la Save entre Grenade et Moissac.
342b	GARONNE MOYENNE / MOYENNE TERRASSE	Nappe libre	Aquifère alluvial de la rive gauche de la Garonne et de la Save entre Grenade et Muret.
343	GARONNE MOYENNE AVAL	Nappe libre	Aquifère alluvial de la Garonne en aval des villes d'Auvillar et de Malause entre la confluence du Tarn et la confluence du Lot.
561	ALBIGEOIS ET TOULOUSAIN	Nappe captive	Domaine sans grand aquifère individualisé, constitué par des formations sédimentaires tertiaires.
562	AGENAIS ET QUERCY	Nappe captive	Domaine sans grand système aquifère individualisé, constitué par des formations sédimentaires d'âge kimméridgien à miocène.
565	ARMAGNAC	Nappe captive	Domaine sans grand aquifère individualisé, constitué par des formations sédimentaires tertiaires.

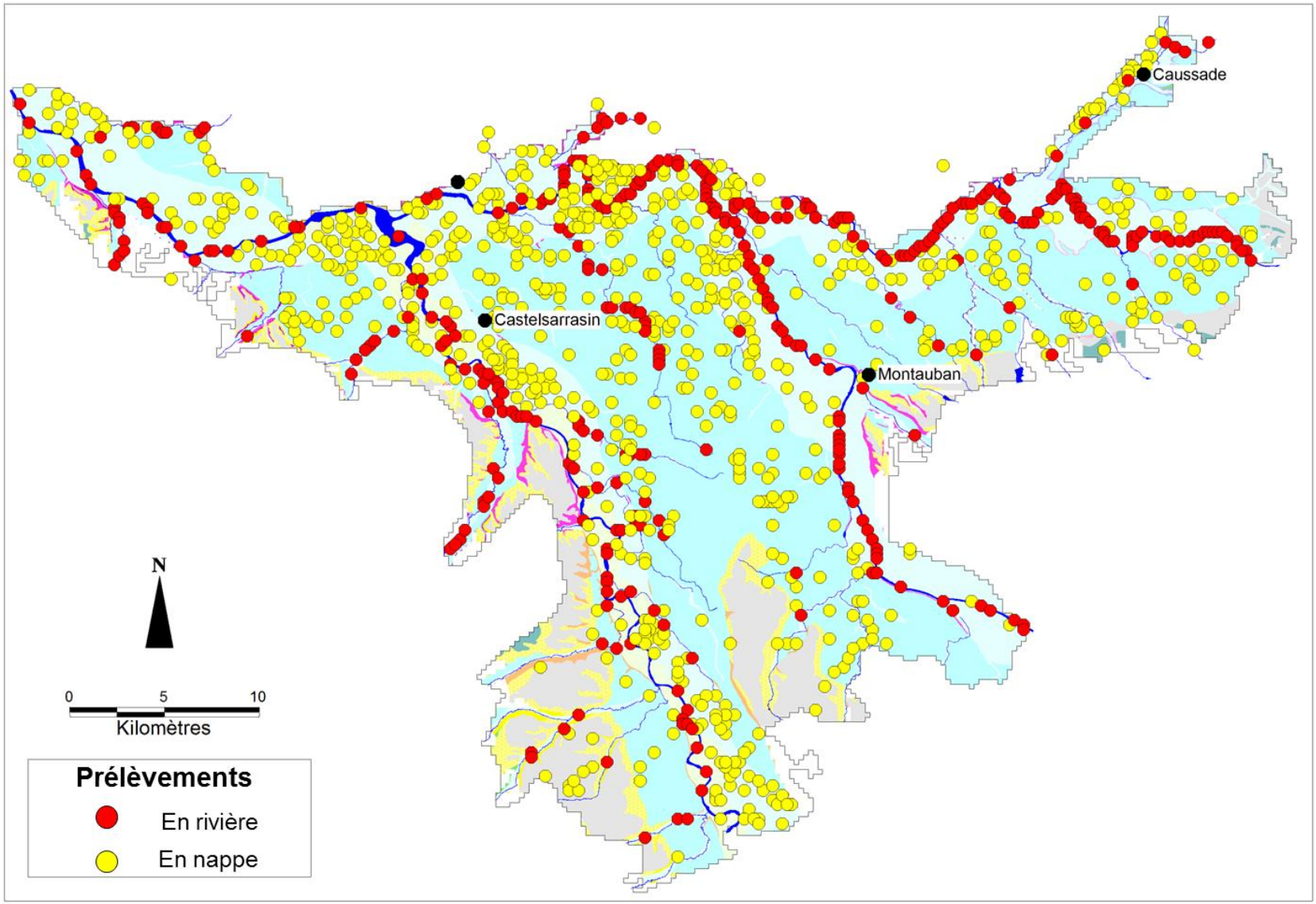
Annexe 4

Carte piézométrique de la nappe alluviale – Octobre 1996, basses eaux


Caussade
Castelsarrasin
Montauban
N
0
5
10
Kilomètres
Isopièzes
(m NGF)

Annexe 5

Carte des points de prélèvements des eaux de surface et souterraines (années 2006 à 2012)


Caussade
Castelsarrasin
Montauban
N
0
5
10
Kilomètres
Prélèvements
En rivière
En nappe

Annexe 6

Présentation du logiciel MARTHE (Modélisation d'Aquifères avec maillage Rectangulaire, Transport et HydrodynamiquE)

DOMAINE D'APPLICATION

Conçue et réalisée au groupe BRGM pour la modélisation hydrodynamique et hydrodispersive des écoulements souterrains en milieu poreux, la chaîne de logiciels MARTHE est destinée à modéliser les problèmes d'écoulement rencontrés dans des contextes variés :

- ***Gestion des ressources aquifères :***
  - Évaluation des termes du bilan hydraulique d'un système aquifère : recharge par infiltration pluviale, apports latéraux par les bassins versants, circulations souterraines et flux associés, fluctuations annuelles, stockages-déstockages saisonniers...
  - Impacts hydrodynamiques d'aménagements existants ou à créer : pompages, irrigation, drainage, gravières, bassins d'infiltration...
  - Gestion et optimisation de champs captants.

- ***Génie civil :***
  - Assèchement de fouilles.
  - Effets hydrauliques de parois étanches.
  - Travaux souterrains (métros, parking, tunnels...).

- ***Environnement :***
  - Infiltration d'un polluant en zone non saturée, percolation jusqu'à la nappe, puis migration souterraine.
  - Simulation du panache de pollution s'échappant d'une zone contaminée : trajectoires, vitesses de déplacement, concentrations atteintes à l'aval.
  - Modélisation de scénarios hydrauliques de confinement ou de décontamination.
  - Impacts de décharges domestiques et industrielles sur les eaux souterraines.
  - Etude du confinement de stockages souterrains.

- ***Exploitation minière :***
  - Calcul de débits d'exhaures miniers et des rabattements associés.

REFERENCES

Au cours des 20 dernières années, MARTHE a été utilisé pour modéliser plus de 250 contextes aquifères répartis dans une vingtaine de pays, sur des financements français, nationaux et internationaux.

STRUCTURE DU LOGICIEL

Au module de calcul hydrodynamique et hydrodispersif (MARTHE proprement dit), sont associés des modules de préparation, gestion et représentation graphique des données et des résultats de modélisation. Ces modules sont centralisés dans l'interface WinMarthe.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Le domaine à modéliser est discrétisé selon un maillage rectangulaire de type "écossais" : chaque ligne et chaque colonne de mailles a une largeur constante, mais l'utilisateur est libre d'adapter la largeur de chacune de ces lignes et colonnes en fonction des hétérogénéités locales, de la densité des informations disponibles et de la précision recherchée. Il est en outre possible d'affiner localement le maillage par des sous-maillages emboîtés (gigognes).

Les mailles du modèle sont automatiquement associées à des coordonnées géographiques (norme « Semis » élaborée au BRGM), ce qui permet de superposer les données initiales et les résultats des simulations à des fonds cartographiques préalablement digitalisés. Les données peuvent être définies maille par maille, ou bien par zones, par couches ou globalement pour tout le maillage. Toutes les données sont stockées dans des fichiers texte.

Les résultats de modélisation sont édités dans des fichiers texte. Ils peuvent être édités et représentés graphiquement. Les débits calculés (débits aux potentiels imposés, débits résiduels de convergence…) peuvent être présentés maille par maille, ou bien par zones, par couches, ou encore pour tout le modèle.

La convergence des calculs est contrôlée par plusieurs critères : écarts de charge (moyen et maximal entre deux itérations successives) et débits résiduels d'erreur (global sur l'ensemble du modèle, et ponctuel dans chacune des mailles).

Calcul des écoulements

Les calculs hydrodynamiques sont effectués selon une méthode aux volumes finis. Plusieurs algorithmes de résolution par gradients conjugués sont proposés (gradients conjugués avec pré-conditionnement de Choleski, méthode Eisenstat…).

Calcul du transport

Selon le type de problème posé (dominance de la convection ou de la dispersion), l'utilisateur peut choisir entre quatre techniques de calcul pour optimiser le schéma de transport mis en œuvre :

- méthode TVD (Total Variation Diminishing) à limiteur de flux ;
- volumes finis ;
- méthode des caractéristiques (MOC) utilisant des particules ;
- méthode des déplacements aléatoires (Random Walk), dite aussi méthode des particules.

Le transport en nappe est simulé sous ses composantes advective, diffusive et dispersive. Plusieurs options sont proposées pour le transport réactif :

- décroissance exponentielle de l'effluent en fonction du temps ;
- dégradation en chaîne ;
- facteur de retard avec coefficient de partage Kd (phénomènes d'adsorption-désorption) ;
- prise en compte de la double porosité (avec cinétique ou en équilibre) ;
- isothermes de Freundlich ou de Langmuir.

Interactions géochimiques

Les interactions physico-chimiques entre eau, effluents et matrice peuvent être simulées par couplage entre MARTHE et un modèle chimique "dédié" au contexte géochimique d'écoulement.

MARTHE permet de simuler de nombreux types d'écoulement, en zones saturées et non saturées, en milieux monophasiques et diphasiques. Plusieurs niveaux d'utilisation sont distingués.

- ***Hydrodynamique classique :***
  - Maillages 2D (en plan, en coupe verticale, en coordonnées cylindriques) ou 3D.
  - Aquifères monocouches ou multicouches (empilement d'aquifères séparés par des épontes semi-perméables).
  - Nappes libres, captives ou semi-captives en régime hydraulique permanent ou transitoire.
  - Prise en compte de discontinuités telles que plans d'eau à surface libre (lacs, gravières), assèchements locaux de nappe (et remise en eau), y compris en aquifères multicouches, débordements de nappe (cours d'eau, sources, drains), parois étanches (palplanches, ...).
  - Couplage avec un réseau hydrographique.
  - Bilan hydroclimatique couplé.
  - Anisotropies horizontale et verticale des perméabilités.
  - Calcul de trajectoires (directes et inverses) en régime hydraulique permanent ou transitoire.

- ***Transport hydrodispersif :***
  - Migration hydro-dispersive d'un effluent dans la nappe et la zone non saturée.

- ***Zone Non Saturée, Densité, Température :***
  - Traitement continu de la zone saturée et de la zone non saturée.
  - Effets densitaires induits par des salinités et/ou des températures hétérogènes.
  - Transferts d'énergie ;
  - Prise en compte des variations de viscosité avec la température.

- ***Calage automatique, Optimisation :***
  - Calage automatique du modèle, selon des zones homogènes ou maille par maille.
  - Analyse de sensibilité aux paramètres de calage.

- ***Utilisations spéciales :***
  - Fractures verticales par transmissivités équivalentes ; Réseaux de galeries.
  - Transport avec interactions physico-chimiques entre eau, effluents et matrice poreuse.
  - Écoulements diphasiques : eau douce et eau salée, eau et air, eau et "huile".
  - Écoulements de gaz.
  - Prise en compte du développement de la végétation.

Annexe 7

Méthodologie et résultats du modèle géologique

1. Approche méthodologique

Cette première étape va consister à expliciter les objectifs de cette modélisation ainsi que de décrire ces principales étapes.

Objectifs et principes

Cette étude part du postulat que la molasse représente une couche imperméable sur laquelle reposent les aquifères contenus dans les alluvions. Le but de cette partie est donc de créer une représentation de la géométrie de l'interface alluvions / molasse par l'intermédiaire d'un logiciel de modélisation géologique. Le résultat sera intégré au modèle hydrodynamique sous la forme de deux semis représentant le toit et le mur des alluvions. Cette étape est d'autant plus indispensable que le travail effectué se fait en régime transitoire, donc la précision de la géométrie du sol est indispensable pour établir un sens d'écoulement et une puissance de l'aquifère cohérente avec la réalité.

Méthodologie

La méthodologie de modélisation est synthétisée dans le Tableau A7-1.

Récupération des données géologiques	**Extraction des données factuelles** - Extraction des données de la BSS ayant des informations sur la géologie du sol - Récupération de la carte géologique assemblée de la zone d'étude - Mise en forme dans une base de données Access avec intégration du référentiel géologique - Recherche et intégration de données sur la géologie des sols via rapport BRGM et ICSP (Installations Classés et Sites et sols Pollués)
	Analyse des données - Mise en évidence des zones sans données géologique - Définitions de 40 points théoriques pour la mise en place de sondage - Contact avec mairies et particuliers des communes concernées pour déterminer l'emplacement des sondages. - Contact avec la société de sondage et établissement d'un planning - Etablissement des DICT
Construction du modèle géologique via GDM / Multilayer	**Mise en forme des données** - Intégration des données toits et murs des formations - Définition de la pile stratigraphique - Contrôle de cohérence entre les données - Codage des données
	Création du modèle - Intégration du MNT 250m et de la carte géologique - Création des limites d'extension - Interpolation des épaisseurs toits/murs - Choix des paramètres de calcul - Calcul du modèle transitoire - Ajout de points de contrainte - Création du modèle final

Tableau A7-1– Déroulement de la méthologie appliquée pour le modèle géologique

2. Conception de la base de données des sols

Référentiel géologique

Avant de créer la base de données des sols, il faut organiser les différentes formations en fonction des objectifs du modèle (cf. Tableau A7-2).

Les quatre principales terrasses alluviales (basse plaine, basse, moyenne et haute terrasses) se sont vues attribuer cinq à six différentes descriptions permettant de tenir compte des variations de leur nature (sol argileux, limoneux ou sableux).

Les alluvions actuelles ne possèdent qu'une seule description en raison de leur relative homogénéité, conséquence de leur âge plus récent.

Les différents types de molasse ont été regroupés sous un seul code pour le modèle, étant donné que cette couche est considérée comme très peu perméable (10^{-7} m/s). Il en est de même pour les formations calcaires, qui ne font pas partie des aquifères modélisés.

Les formations « divers » correspondent à des éléments secondaires, comme la terre végétale ou le remblai, qui ne sont pas représentatifs de la nature des alluvions mais qui sont présentes sur certains sondages.

Ce référentiel est tiré de la géologie du Tarn et Garonne décrite dans les ouvrages de référence (notice géologique). Il faut remarquer qu'il a été ajouté des niveaux argileux plus ou moins compacts pour la basse plaine et les basse et moyenne terrasses. Ces niveaux, non référencés dans les ouvrages, ont été identifiés sur les sondages contenus dans la BSS.

Il a été établi différents niveaux pour chaque grand ensemble alluvionnaire, afin de pouvoir les intégrer à la base Access, puis au modèle géologique, et enfin dans le modèle hydrogéologique. Ces ensembles étant plus ou moins argileux ou sableux, ils auront donc des perméabilités et transmissivités différentes.

Ce référentiel permet de construire la carte synthétique présentée dans l'Illustration A7-1.

Formations géologiques	CODE pour modèle	Descriptions	CORRESPONDANCES
Basse Plaine (B.P)	1AL	Séquence argilo-limoneuse de la première terrasse	Fy2 (984); Fy1, Fy (983, 984))
	1AS	Passée sableuse dans 1AL	Fy2 (984); Fy1, Fy (983, 984))
	1C	Passée sableuse à la base des 1SG (chenalisation ou altération)	Fy2 (984); Fy1, Fy (983, 984))
	1SA	Passée argileuse dans 1SA	Fy2 (984); Fy1, Fy (983, 984))
	ARBP	Niveau argileux plus ou moins compact de la BP	
	1SG	Séquence sablo-graveleuse de la première terrasse	Fy2 (984); Fy1, Fy (983, 984))
Basse Terrasse (B.T)	2AL	Séquence argilo-limoneuse de la deuxième terrasse	Fx (983;984)
	2AS	Passée sableuse dans 2AL	Fx (983;984)
	2C	Passée sableuse à la base des 2SG (chenalisation ou altération)	Fx (983;984)
	2SA	Passée argileuse dans 2SA	Fx (983;984)
	ARBT	Niveau argileux plus ou moins compact de la BT	
	2SG	Séquence sablo-graveleuse de la deuxième terrasse	Fx (983;984)
Moyenne Terrasse (M.T)	3AL	Séquence argilo-limoneuse de la troisième terrasse	Fw (983); Fvw (984)
	3AS	Passée sableuse dans 3AL	Fw (983); Fvw (984)
	3C	Passée sableuse à la base des 3SG (chenalisation ou altération)	Fw (983); Fvw (984)
	3SA	Passée argileuse dans 3SA	Fw (983); Fvw (984)
	2ARMT	Niveau argileux plus ou moins compact de la MT	
	3SG	Séquence sablo-graveleuse de la troisième terrasse	Fw (983); Fvw (984)
Haute Terrasse (H.T)	4AL	Séquence argilo-limoneuse de la quatrième terrasse	Fv (983)
	4AS	Passée sableuse dans 4AL	Fv (983)
	4C	Passée sableuse à la base des 4SG (chenalisation ou altération)	Fv (983)
	4SA	Passée argileuse dans 4SA	Fv (983)
	4SG	Séquence sablo-graveleuse de la quatrième terrasse	Fv (983)

Formations géologiques	CODE pour modèle	Descriptions	CORRESPONDANCES
Alluvions actuelles (A.L)	0AL	Alluvions actuelles	
Rivières secondaires	AMAL	Alluvions modernes argilo-limoneuses	Fz2, Fz1, Fz (983;984)
	AMAS	Passée sableuse dans AMAL	Fz2, Fz1, Fz (983;984)
	AMC	Passée sableuse à la base des AMSG (chenalisation ou altération)	Fz2, Fz1, Fz (983;984)
	AMSA	Passée argileuse dans AMSG	Fz2, Fz1, Fz (983;984)
	AMSG	Alluvions modernes sablo-graveleuses	Fz2, Fz1, Fz (983;984)
	AMTO	Tourbes dans les alluvions modernes	sans objet
	ARRS	Niveau argileux plus ou moins compact des rivières secondaires	
Substratum (SUB)	CALC	Calcaires des formations molassiques	m2;m1;g2-3 (983);g2, g2d, g2c, g2b, g2a (984)
Molasse (MOLA)	MOLA	Argiles et marnes des formations molassiques	m2;m1;g2-3 (983);g2, g2d, g2c, g2b, g2a (984)
	MOLA	Argile et sable mélangés	m2;m1;g2-3 (983);g2, g2d, g2c, g2b, g2a (984)
	MOLA	Molasse	Argile et sable mélangés, Calcaires, marnes, grès, silts
	MOLA	Sables et grès des formations molassiques	m2;m1;g2-3 (983);g2, g2d, g2c, g2b, g2a (984)
	MOLA	Molasse non décrite considérée par défaut comme imperméable	m2;m1;g2-3 (983);g2, g2d, g2c, g2b, g2a (984)
Divers	SILT	Silts des formations molassiques	m2;m1;g2-3 (983);g2, g2d, g2c, g2b, g2a (984)
	COL	Colluvions	Colluvions, formations de pente
	MUR	Maçonnerie	X
	PLAT	Formations résiduelles de plateau	m-gRe (983, 984)
	PROF	Formations situées sous la Molasses, toutes lithos confondues	Toutes lithos
	REMB	Remblai	Remblai
	SCH	Schiste	Schiste
	TV	Terre végétale	
	UNDEF		Non connu ou non défini
	VID	Vide ou cavité	

Tableau A7-2 – Référentiel géologique construit pour le modèle géologique

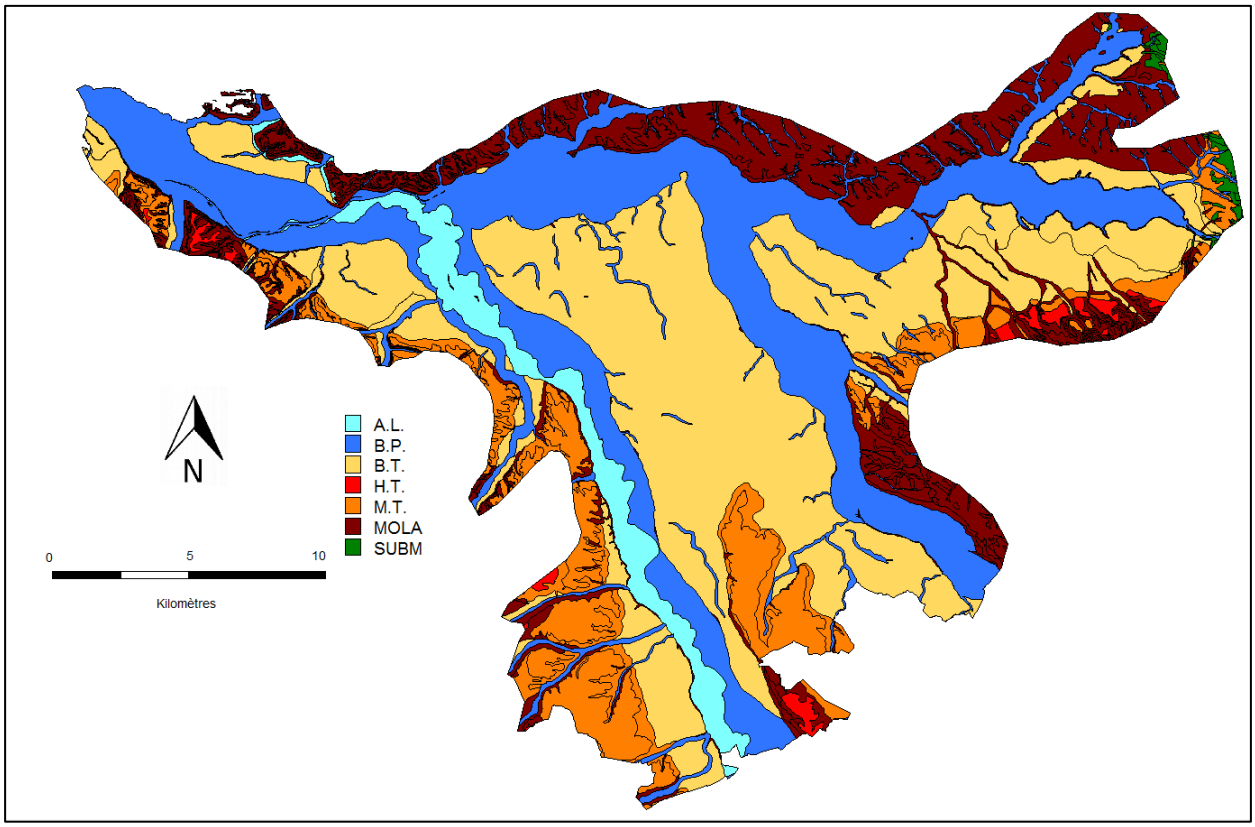


Illustration A7-1 – Géologie de surface de la plaine alluvialle du Tarn et Garonne

Base de données

A l'origine la BSS (Banque de Données du Sous-Sol) contenait 1250 points possédant des informations sur la géologie des sols de la zone d'étude.

Un tri manuel des données a permis d'éliminer tous les sondages n'ayant pas de coupe géologique exploitables (absence de coupe, données non précises ou aberrantes). Ce tri a permis d'identifier 1133 sondages exploitables (cf. Illustration A7-2), dont 930 atteignent les formations molassiques (cf. Illustration A7-3).

Ces 930 forages utilisables représentent une densité moyenne d'un sondage pour 83 ha, ou un sondage pour 18 mailles (mailles carrées de 250 m de côté). Ils ne suffisent donc pas à déterminer une épaisseur d'alluvions dans chaque maille du modèle hydrodynamique.

De plus, les sondages ne sont pas uniformément répartis dans la plaine alluviale mais se concentrent surtout sur les axes routiers majeurs (autoroute, nationale) et dans les grandes agglomérations. Il y a donc une forte concentration de sondages dans certaines zones tandis que d'autres en sont dépourvus.

Des données complémentaires sur la zone d'étude ont donc été recherchées dans la documentation existante au BRGM : l'inventaire des ICSP (Installations Classées et Sites Pollués) a permis de trouver un sondage supplémentaire et de précédentes études BRGM dans le Tarn-et-Garonne ont permis de rajouter 7 points.

Ces données apparaissant toujours insuffisantes pour l'élaboration du modèle géologique, une campagne de sondages complémentaires dans la zone d'étude a été réalisée.

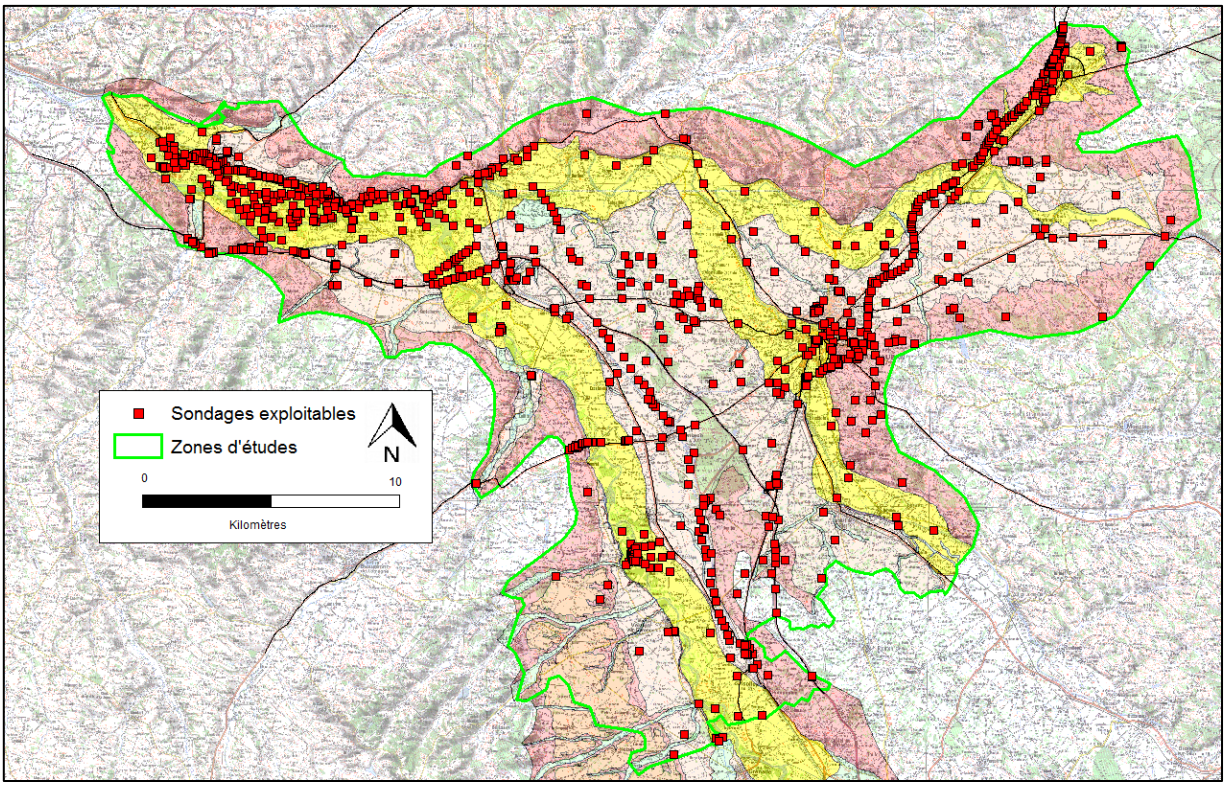


Illustration A7-2 – Sondages exploitables pour la modélisation

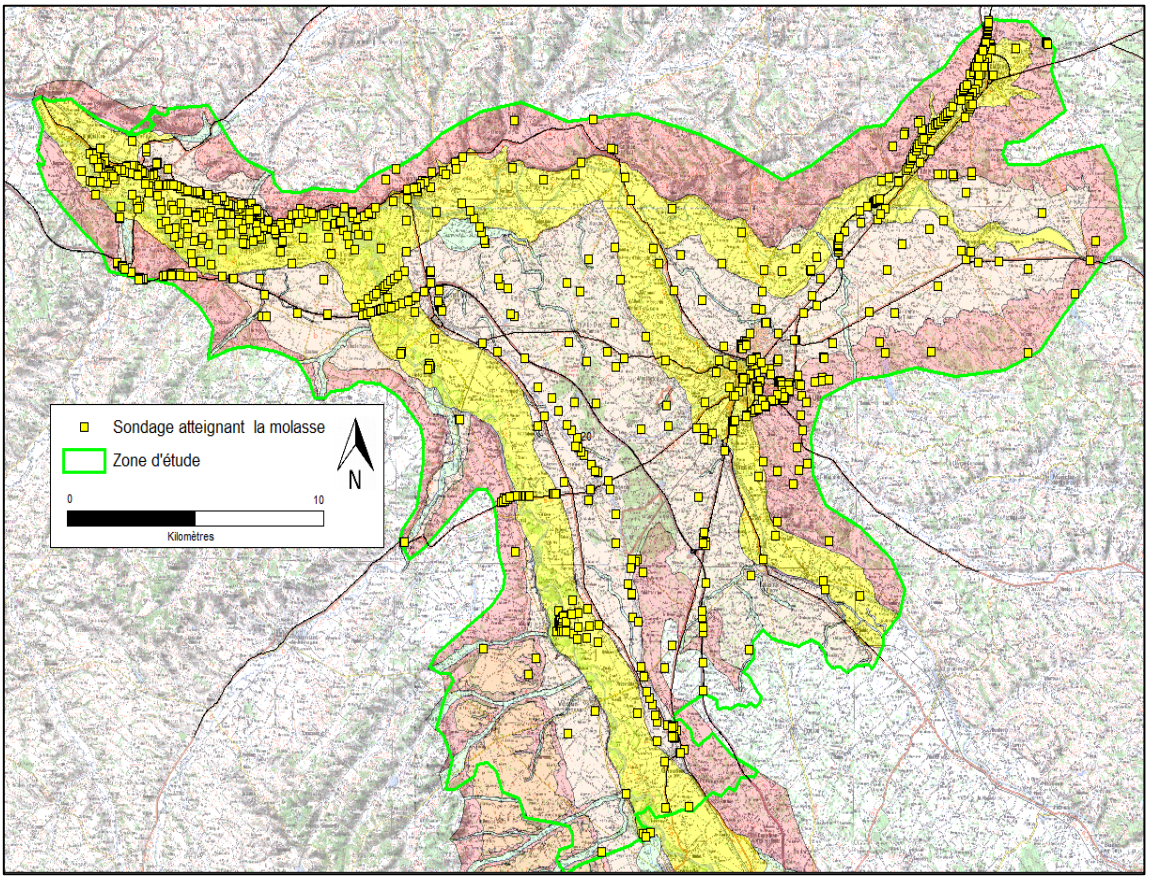


Illustration A7-3 – Sondages atteignant la molasse

Campagne de sondages

Une cartographie des zones sans information (cf. Illustration A7-4) a été réalisée pour déterminer le nombre et l'emplacement des sondages complémentaires à réaliser. Ces emplacements ont été définis en fonction de trois paramètres :

- L'absence de données ;
- La représentativité du lieu et son accès ;
- La collaboration des propriétaires de la parcelle concernée.

Vingt-neuf communes du Tarn-et-Garonne ont été sollicitées pour la réalisation d'un total de 39 sondages répartis sur leurs territoires. Deux sondages n'ont finalement pu être effectués (refus de la commune ou du propriétaire de la parcelle). Les 37 sondages réalisés sont présentés dans l'Illustration A7-5.

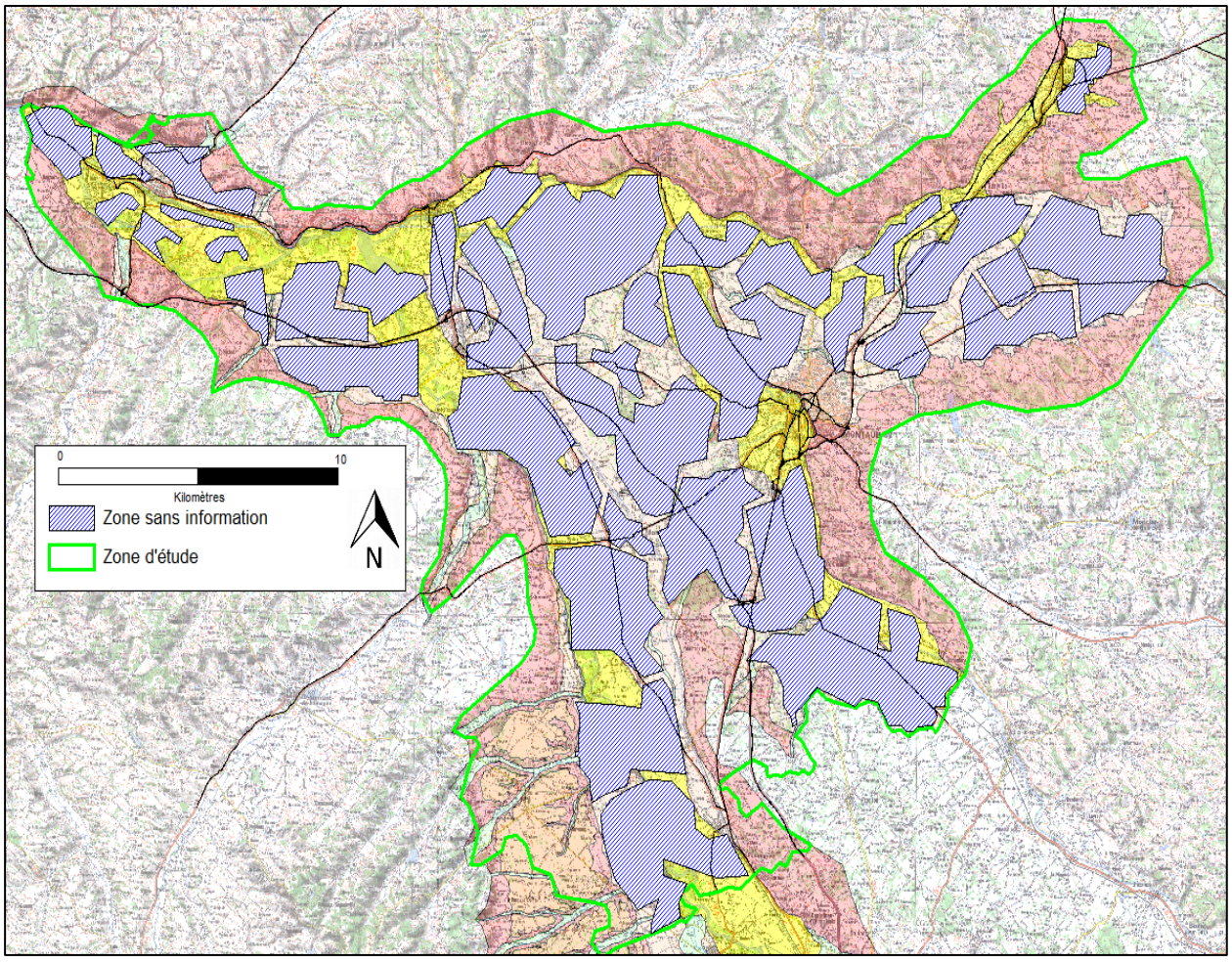


Illustration A7-4 – Carte des zones sans information géologique

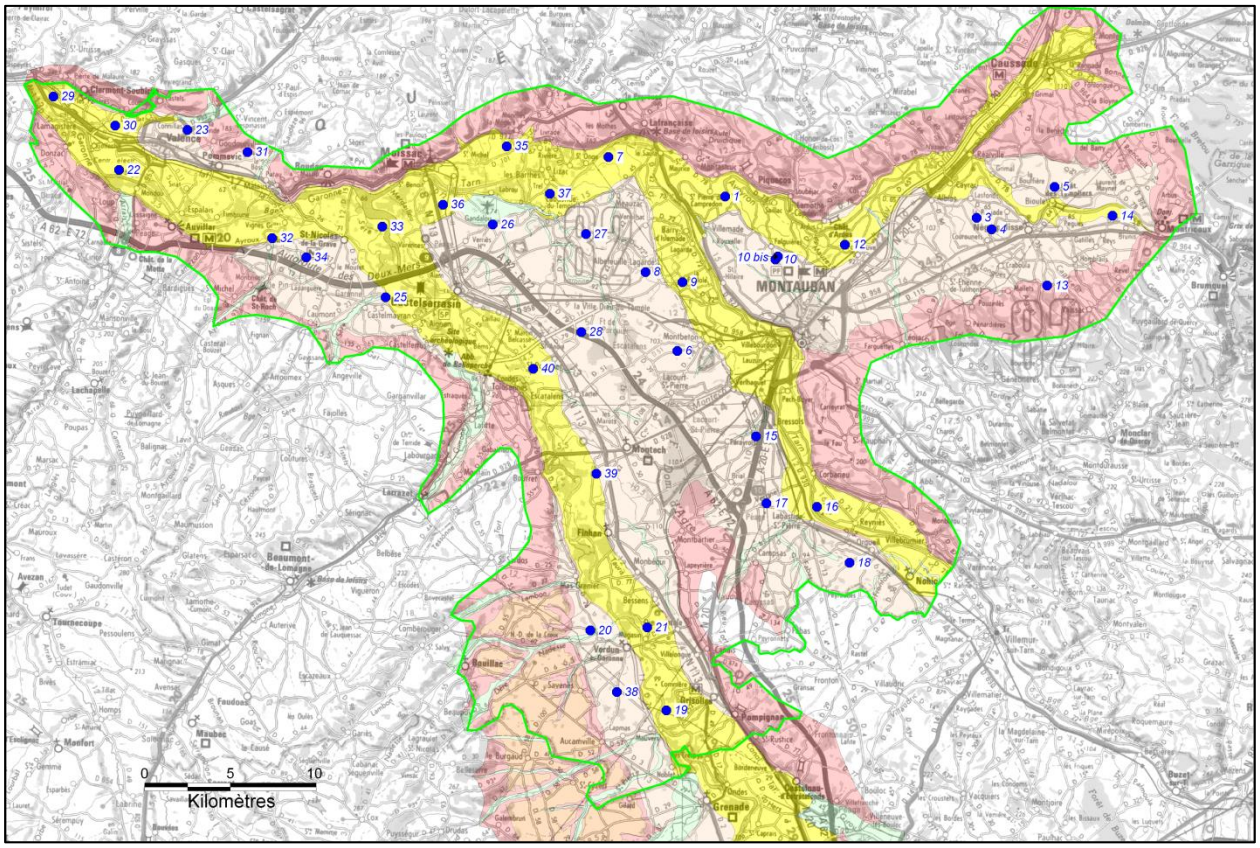


Illustration A7-5 – Localisation des sondages réalisés

La société GINGER CEBTP a été mandatée pour cette mission. La technique utilisée est celle du pénétromètre statique. Elle consiste à enfoncer une tige rigide dans le sol et observer par le moyen de capteurs la résistance du matériau traversé. Cette résistance permet de déterminer la nature du sol. Cette méthode est rapide, simple, précise (de l'ordre de la dizaine de centimètres) et peu onéreuse. Elle est toutefois compliquée à utiliser dans les milieux trop résistants comme les graves et nécessite le passage au pénétromètre dynamique pour traverser ces formations.

Une première campagne de sondages au pénétromètre statique lourd de type PAGANI 200kN a été réalisé du 17 au 21 juin 2013. Le Tableau A7-3 et le Tableau A7-4 résument cette campagne.

Suite à des refus dans les formations graveleuses six autres essais au pénétromètre dynamique ou stato-dynamique ont été effectués ultérieurement.

En complément, certains points étant impossibles d'accès ou n'ayant pas permis d'atteindre le substratum molassique, GINGER a fourni au BRGM dix points extraits de sa base de données (cf. Tableau A7-5).

ID	ville	Profondeur du substratum molassique (en m/TN)	
1	VILLEMADE		4.80
3	ALBIAS		5.45
4	NEGREPELISSE	NR	
5	BIOULE		5.60
6	MONTBETON	RG	> 6.08
7	MEAUZAC		8.65
8	LA VILLE-DIEU-DU-TEMPLE	RG	> 5.81
9	ALBEFEUILLE-LAGARDE		4.65
10	MONTAUBAN		5.70
10bis	MONTAUBAN		5.50
12	MONTAUBAN	RG	> 4.31
13	NEGREPELISSE		9.50
14	NEGREPELISSE	RG	> 4.69
15	BRESSOLS		4.00
16	CORBARIEU		5.70
17	LABASTIDE-SAINT-PIERRE		3.90
18	ORGUEIL		5.75
19	GRISOLLES		3.90
20	VERDUN-SUR-GARONNE	RG	> 4.00
21	VERDUN-SUR-GARONNE	RG	> 2.80
22	GOLFECH	NR	
23	VALENCE	NR	
25	CASTELMAYRAN	NR	
26	CASTELSARRASIN	RG	> 4.96
27	LABASTIDE-DU-TEMPLE	(RG)	4.20 ou > 5.00
28	SAINT-PORQUIER	RG	> 3.86
29	LAMAGISTERE	RG	> 4.45
30	GOLFECH		6.00
31	GOUDOURVILLE		15.00
32	MERLES	NR	
33	SAINT-NICOLAS-DE-LA-GRAVE	RG	> 4.16
34	SAINT-NICOLAS-DE-LA-GRAVE	RG	> 3.28
35	MOISSAC	RG	> 6.55
36	MOISSAC		7.70
37	LES BARTHES	RG	> 4.60
38	VERDUN-SUR-GARONNE		7.40 (+/- 20 cm)
39	MONTECH	RG	> 2.50
40	SAINT-PORQUIER		6.80

Tableau A7-3 – Résultats bruts de la campagne de sondages

Type de sondage		Quantité
PD	**Essai au pénétromètre dynamique type DPSH-B** Norme NF EN ISO 22476-2	4
CPT	**Essai au pénétromètre statique lourd de type PAGANI 200 kN** Norme NF P94-113	32
PSD	**Essai au pénétromètre stato-dynamique lourd de 200 kN**	2

Tableau A7-4 – Types et nombres de sondages effectués

ID	ville	Profondeur du substratum molassique (en m/TN)	Distance au point ID (m)
6	MONTBETON	9.60	1 000 Sud-Est
12	MONTAUBAN	7.00	1 550 Est
13	NEGREPELISSE	9.50	2 350 Nord
20	VERDUN-SUR-GARONNE	7.40	580 Sud
22	GOLFECH	9.60	1 200 Nord-Est
26	CASTELSARRASIN	9.20 (PR1) / 4.40 (PR2)	250 Sud (PR1) / 515 Ouest (PR2)
27	LABASTIDE-DU-TEMPLE	11.00	600 Nord
28	SAINT-PORQUIER	8.80	815 Sud-Ouest
37	LES BARTHES	8.00	570 Nord
39	MONTECH	5.40	2 000 Nord

Tableau A7-5 – Sondages déjà présents dans la base de données GINGER

L'Illustration A7-6 présente des photographies du camion contenant le pénétromètre dynamique prises lors de la campagne de sondages.

Illustration A7-6 – Camion contenant le pénétromètre dynamique

3. Conception du modèle

Intégration de la base Access

Les outils utilisés pour la modélisation géologique sont GDM (Geological Database Management) et Multilayer, deux logiciels développés par le BRGM.

Dans un premier temps la base de données établie sous Access a été intégrée dans GDM, via une interface dédiée permettant d'importer les données et de les associer à des paramètres du modèle géologique (toit, mur…).

GDM permet également de vérifier la présence de doublons dans la base de données et de les corriger ou de les supprimer.

La pile stratigraphique

La pile stratigraphique intégrée dans le modèle est présentée dans l'Illustration A7-7. Elle définit dans le logiciel les différents étages et leur enchaînement séquentiel, afin de gérer correctement les zones de contact entre les différentes formations.

Un contrôle de cohérence des sondages permet de vérifier l'enchaînement stratigraphique. En cas d'incohérence avec la pile définie au préalable, le sondage est vérifié et, au besoin, corrigé manuellement.

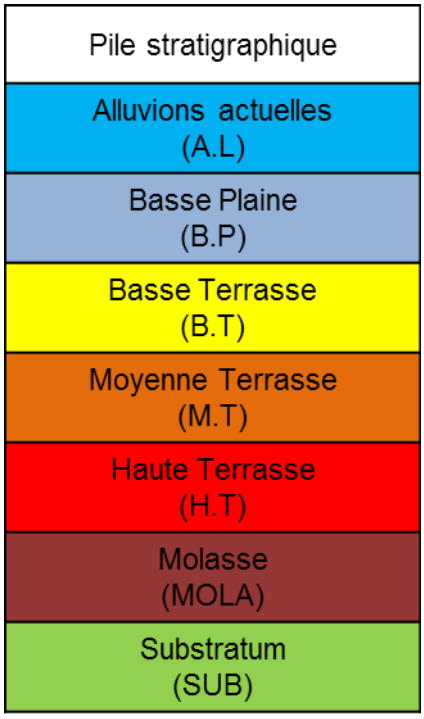


Illustration A7-7 – Pile stratigraphique du modèle géologique

Le MNT (Modèle Numérique de Terrain)

Le MNT correspond à la moyenne des altitudes topographiques (Z) d'une région pour un maillage donné. Le travail est effectué à partir du MNT 250m, le maillage étant identique à celui du modèle hydrodynamique.

Un contrôle de cohérence entre la cote topographique de chaque sondage et la cote donnée par le MNT pour la maille contenant le sondage a été effectué en prenant en compte les éléments suivants :

- La cote topographique de chaque sondage correspond à une valeur ponctuelle alors que le MNT correspond à une moyenne sur une surface carrée de 250 m de côté (62 500 m²).
- La précision de la cote topographique de chaque sondage dépend de sa méthode de détermination (courbes de niveau carte IGN, GPS plus ou moins précis…).
- Le sondage doit avoir été correctement localisé en coordonnées planes (X,Y).

En raison de ces contraintes, la cote topographique des sondages n'a été corrigée que si l'écart avec le MNT dépassait 5 m dans les plaines, et au cas par cas, en augmentant la tolérance, dans les zones à fort dénivelé. Ce travail a également permis de mettre en évidence la mauvaise localisation d'une dizaine de points BSS.

La carte géologique

L'intégration de la carte géologique de la zone d'étude dans le modèle permet de vérifier la cohérence entre la première formation rencontrée lors des sondages et celle affleurant d'après la carte géologique.

La carte géologique permet ensuite de définir l'extension des formations dans le logiciel. De nouveaux tests de cohérence avec les sondages ont été effectués.

Seuil de fusion et seuil de détection des inégalités

Ces deux seuils doivent être définis avant de lancer la modélisation sous Multilayer (cf. Illustration A7-8) :

- Le seuil de fusion détermine la distance en-deçà de laquelle deux sondages trop proches sont fusionnés en un seul point de données (cf. Illustration A7-9).
- Le seuil de détection des inégalités non respecté, qui ne peut être inférieur à Delta/2, Delta étant la différence maximale entre 2 données distantes du seuil de fusion (D).

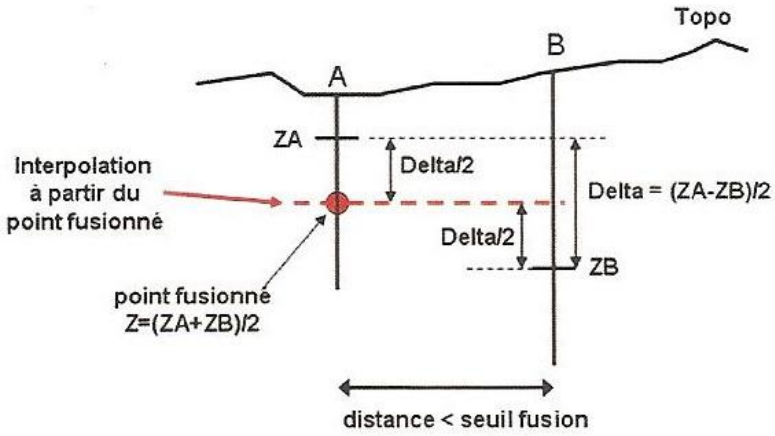


Illustration A7-8 - Seuil et distance de fusion

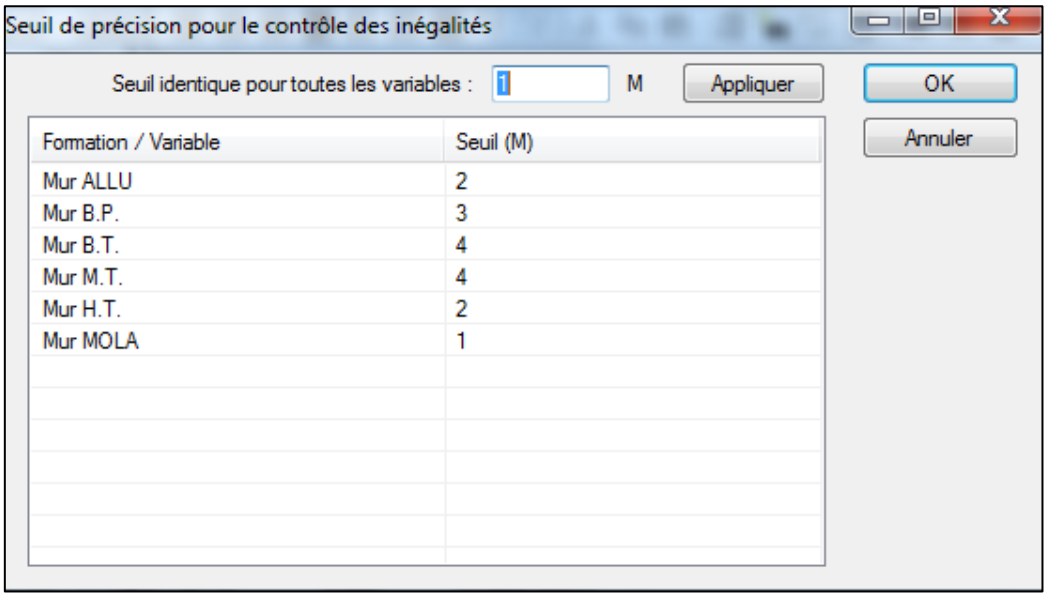


Illustration A7-9 – Seuils de fusion choisis pour le modèle

Contrainte d'inégalité

Dans chaque formation géologique, les contraintes non respectées sont identifiées par le logiciel Multilayer. Chaque point ou limite d'extension en cause doit être corrigé par l'insertion d'un point de contrainte.

Ces points de contrainte imposent une épaisseur pour la formation concernée et doivent donc être soigneusement définis sous peine de créer d'autres inégalités dans le modèle.

Après correction de ces contraintes d'inégalité, l'interpolation de Multilayer permet de déterminer les cotes du toit, du mur et l'épaisseur de chaque formation pour chaque maille du modèle.

Intégration des points de contrainte

Une fois l'interpolation réalisée, sa cohérence avec la connaissance géologique de la zone doit être évaluée, en particulier dans les zones où les données sont peu nombreuses, ce qui dégrade l'estimation des cotes et épaisseurs. En l'absence complète de données, le modèle impose une épaisseur par défaut d'un mètre pour chaque formation.

Des points de contrainte ont donc été ajoutés pour imposer l'épaisseur des différentes formations alluviales en certains endroits, en tenant comptes des paramètres suivants :

- La profondeur des sondages les plus proches ;
- La topographie de la zone issue du MNT 250m ;
- Les puits proches contenus dans la BSS et dépourvus de coupe géologique. En effet la plupart des puits creusés pour des raisons domestiques ou agricoles a été foré dans les alluvions. Pour des raisons pratiques, leur base se situe au toit de la molasse, formation à la fois plus dure à creuser et très peu perméable. La profondeur de ces puits donne donc l'épaisseur probable des alluvions à cet endroit.

Au total, 1091 points de contrainte ont été ajoutés de cette manière avant une nouvelle interpolation.

Modèle géologique

La carte de l'épaisseur des formations alluviales issue du modèle géologique est présentée dans l'Illustration A7-10.

Les zones en blanc correspondent à l'affleurement des formations molassiques, qui constituent le substratum de la nappe alluviale. Leur épaisseur n'a pas été modélisée car elle n'est pas utilisée dans le modèle hydrodynamique.

L'épaisseur des formations alluviales est la plus grande au centre de la zone d'étude (entre Montauban et Montech), dans la basse terrasse, et à l'O-SO (zones de Saint-Nicolas-de-la-Grave et Verdun-sur-Garonne), dans la moyenne terrasse.

L'épaisseur des formations alluviales varie de un à vingt mètres. Cette variabilité est cohérente avec les épaisseurs rencontrées dans d'autres grands ensembles de terrasse.

L'épaisseur des formations alluviales est fortement influencée par la topographie, la proximité avec les formations molassiques et les rivières entaillant ces alluvions.

Les résultats de la modélisation géologique doivent cependant être relativisés en raison du nombre de sondages insuffisant pour une interpolation optimale et du nombre important de points de contraintes ajoutés pour assurer la cohérence du modèle. Le modèle pourrait être significativement amélioré en ajoutant des points de mesures :

- en réalisant des campagnes de sondages supplémentaires,
- en recensant tous les puits, déclarés ou non, et en mesurant leur profondeur, assimilée à celle du toit de la molasse.

La carte de l'épaisseur des alluvions obtenue par la modélisation géologique est utilisée pour définir l'altitude du mur des alluvions dans le modèle hydrodynamique.

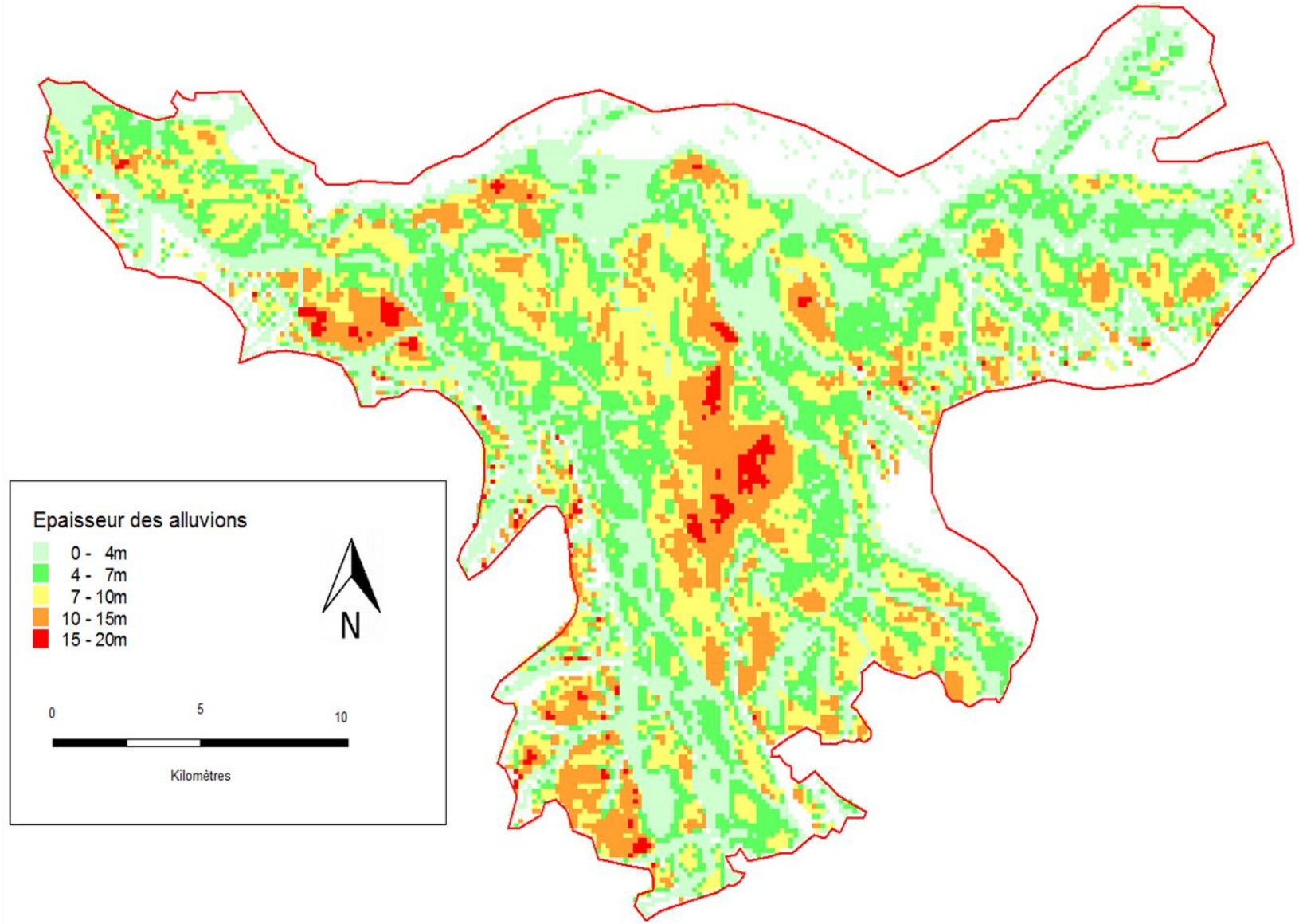


Illustration A7-10 – Carte de l'épaisseur des alluvions modélisées sous GDM / Multilayer

Annexe 8

Fiche climatique de la station de Montauban (82221002) – Source MétéoFrance

METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

FICHE CLIMATOLOGIQUE

Statistiques 1981−2010 et records

MONTAUBAN (82)

Indicatif : 82121002, alt : 106m, lat : 44°01'36"N, lon : 01°22'36"E

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
La température la plus élevée (°C)													Records établis sur la période du 01−01−1885 au 21−06−2015
	18.5	23.6	28.0	30.3	35.5	38.9	40.0	41.8	36.2	32.0	24.8	19.4	**41.8**
Date	25−1995	24−1990	14−1888	30−2005	12−1888	22−2003	30−1983	04−2003	06−1895	03−1985	02−2011	05−2006	**2003**
Température maximale (moyenne en °C)													
	9.2	11.4	15.1	17.7	21.8	25.5	28.3	28.1	24.8	19.8	13.1	9.5	**18.7**
Température moyenne (moyenne en °C)													
	5.6	6.8	9.8	12.3	16.2	19.8	22.2	22.0	18.7	14.7	9.2	6.0	**13.6**
Température minimale (moyenne en °C)													
	1.9	2.2	4.5	6.9	10.7	14.1	16.2	15.9	12.6	9.6	5.3	2.6	**8.6**
La température la plus basse (°C)													Records établis sur la période du 01−01−1885 au 21−06−2015
	−20.0	−18.0	−9.3	−3.0	−1.0	2.0	6.0	3.0	1.0	−3.2	−9.4	−11.0	**−20.0**
Date	16−1985	04−1963	01−2005	15−1887	01−1960	16−1892	08−1978	19−1888	22−1977	25−2003	29−1890	31−1887	**1985**
Nombre moyen de jours avec													
Tx >= 30°C	.	.	.	0.0	0.9	6.1	11.3	10.4	3.5	0.2	.	.	**32.4**
Tx >= 25°C	.	.	0.3	1.7	8.1	16.1	23.3	23.5	15.0	3.6	.	.	**91.5**
Tx <= 0°C	1.2	0.1	.	.	.	.	.	.	.	.	0.1	0.8	**2.2**
Tn <= 0°C	10.8	9.5	4.2	0.4	.	.	.	.	.	0.4	4.3	9.6	**39.2**
Tn <= −5°C	1.9	0.8	0.2	.	.	.	.	.	.	.	0.4	1.3	**4.6**
Tn <= −10°C	0.3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.1	**0.4**
Tn : Température minimale, Tx : Température maximale													
La hauteur quotidienne maximale de précipitations (mm)													Records établis sur la période du 01−12−1874 au 21−06−2015
	77.5	92.5	45.0	50.2	73.0	67.8	69.4	84.0	73.8	116.8	66.5	52.5	**116.8**
Date	29−1936	28−1935	16−1988	26−1909	28−1957	04−2002	23−1988	20−1944	04−1959	26−1886	05−1935	04−1931	**1886**
Hauteur de précipitations (moyenne en mm)													
	56.5	54.9	50.0	75.1	72.7	64.8	45.1	50.5	60.7	61.2	58.7	61.7	**711.9**
Nombre moyen de jours avec													
Rr >= 1 mm	10.2	8.4	8.7	10.2	9.8	7.3	5.7	6.8	6.7	8.7	9.6	10.0	**102.0**
Rr >= 5 mm	3.9	3.6	3.5	5.0	5.0	3.8	2.5	3.1	3.4	4.2	3.9	3.9	**45.8**
Rr >= 10 mm	1.3	1.5	1.2	2.4	2.5	1.8	1.4	1.6	2.0	1.9	1.8	1.7	**21.1**
Rr : Hauteur quotidienne de précipitations													

Page 1/2

Edité le : 28/06/2015 dans l'état de la base

N.B.: La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues en l'état ou sous forme de produits dérivés est strictement interdite sans l'accord de METEO−FRANCE

METEO−FRANCE − Direction de la Production
42 avenue Gaspard Coriolis 31057 Toulouse Cedex
https://donneespubliques.meteofrance.fr

METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

FICHE CLIMATOLOGIQUE

Statistiques 1981−2010 et records

MONTAUBAN (82)

Indicatif : 82121002, alt : 106m, lat : 44°01'36"N, lon : 01°22'36"E

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Degrés Jours Unifiés (moyenne en °C)													
	385.9	316.4	254.4	171.3	72.7	18.3	2.2	3.0	27.7	112.0	264.4	370.6	**1998.9**
Rayonnement global (moyenne en J/cm²)													
Données non disponibles													
Durée d'insolation (moyenne en heures)													
	87.4	117.5	177.2	187.0	217.5	239.4	263.6	251.4	209.2	149.8	88.7	77.5	**2066.1**
Nombre moyen de jours avec fraction d'insolation													
= 0 %	8.7	4.2	3.3	2.6	2.3	1.3	0.9	0.7	1.4	3.0	6.8	9.3	**44.2**
<= 20 %	15.8	11.3	10.0	8.6	8.2	6.6	5.0	4.7	6.0	10.5	15.0	16.4	**117.9**
>= 80 %	4.5	5.9	9.2	6.8	7.1	8.2	10.1	10.1	10.5	6.7	3.9	3.5	**86.2**
Evapotranspiration potentielle (ETP Penman moyenne en mm)													
	12.1	24.2	59.9	85.7	117.5	139.2	152.7	133.5	83.3	44.6	16.8	9.9	**879.4**
La rafale maximale de vent (m/s) — Records établis sur la période du 01−04−1990 au 21−06−2015													
	29.0	30.0	28.0	28.0	26.0	37.0	29.4	24.0	27.0	28.1	26.0	31.0	**37.0**
Date	24−2009	26−2003	07−1991	14−2003	06−1997	19−2006	27−2013	28−2003	07−2010	19−2012	11−1995	27−1999	**2006**
Vitesse du vent moyenné sur 10 mn (moyenne en m/s) — Statistiques établies sur la période 1990−2010													
	2.1	2.4	2.6	2.7	2.4	2.4	2.4	2.2	2.0	2.1	2.0	2.1	**2.3**
Nombre moyen de jours avec rafales — Statistiques établies sur la période 1990−2010													
>= 16 m/s	2.1	2.7	3.1	3.8	1.4	1.1	1.3	1.3	1.1	1.8	1.5	2.3	**23.4**
>= 28 m/s	0.1	0.1	0.1	0.1	.	0.1	.	.	.	0.1	.	0.1	**0.4**
16 m/s = 58 km/h, 28 m/s = 100 km/h													
Nombre moyen de jours avec brouillard / orage / grêle / neige													
Données non disponibles													

− : donnée manquante . : donnée égale à 0

Ces statistiques sont établies sur la période 1981−2010 sauf pour les paramètres suivants : vent (1990−2010), insolation (1991−2010), ETP (2001−2010).

Page 2/2

Edité le : 28/06/2015 dans l'état de la base

N.B.: La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues en l'état ou sous forme de produits dérivés est strictement interdite sans l'accord de METEO−FRANCE

METEO−FRANCE − Direction de la Production
42 avenue Gaspard Coriolis 31057 Toulouse Cedex
https://donneespubliques.meteofrance.fr

Annexe 9

Présentation du modèle GARDÉNIA (pluie-débit)

1. Fonctionnement du logiciel GARDÉNIA

GARDÉNIA (modèle Global À Réservoirs pour la simulation des DÉbits et des NIveaux Aquifères) est un modèle hydrologique global de bassins versants (Thiéry D., 2003). Il en réalise le bilan hydrologique à partir de chroniques de pluie et d'évapotranspiration potentielle (ETP), représentatives à l'échelle du bassin. Une fois calé sur les observations disponibles, le modèle permet de simuler l'évolution du débit à l'exutoire et/ou du niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente pour différentes chroniques de pluie et ETP (cf. Illustration A9-1).

Comme explicité sur l'Illustration A9-2, GARDÉNIA simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, ruissellement) par une succession de trois[4] réservoirs en cascade qui représentent respectivement :

- **les premières dizaines de centimètres du sol (zone racinaire) dans lesquelles se produit l'évapotranspiration ;**
- **une zone intermédiaire qui répartit en deux composantes la pluie efficace provenant du réservoir sus-jacent : ruissellement et infiltration de l'eau dans la ZNS ;**
- **une ou deux zones aquifères qui correspondent aux écoulements lents.**

Le modèle réalise un bilan entre les apports (précipitations) et les sorties (évapotranspiration ou écoulements) à chaque pas de temps.

Des prélèvements, injections, pertes ou apports de débits peuvent être introduits comme données d'entrée, sous forme de chroniques similaires à celles de la pluie et de l'ETP.

Les transferts d'un réservoir à l'autre sont régis par des lois simples, spécifiques à chaque réservoir (le tarissement des rivières et la baisse des niveaux de nappe sont rendus par des lois exponentielles décroissantes). Ces lois sont contrôlées par des paramètres (capacité de stockage du sol, temps de transfert, seuils de débordement, etc.) qui sont ajustés au cours d'une phase de calage semi-automatique (algorithme de Rosenbrook, 1960) afin d'assurer une bonne adéquation entre débits et/ou niveaux simulés et mesurés.

Les données nécessaires sont :

- des séries temporelles de données « d'entrée » du modèle : pluie et évapotranspiration ;
- une ou deux série(s) temporelle(s) de données d'observation - chroniques piézométriques et/ou chroniques de débit - non nécessairement continues, mais couvrant une période concomitante aux données d'entrée. La comparaison des « sorties » simulées par le modèle et des séries observées sur le terrain permet d'orienter et d'ajuster la phase de calage.

[4] Un quatrième réservoir souterrain peut être utilisé lorsque deux dynamiques distinctes d'écoulement des eaux souterraines coexistent dans le bassin versant étudié.

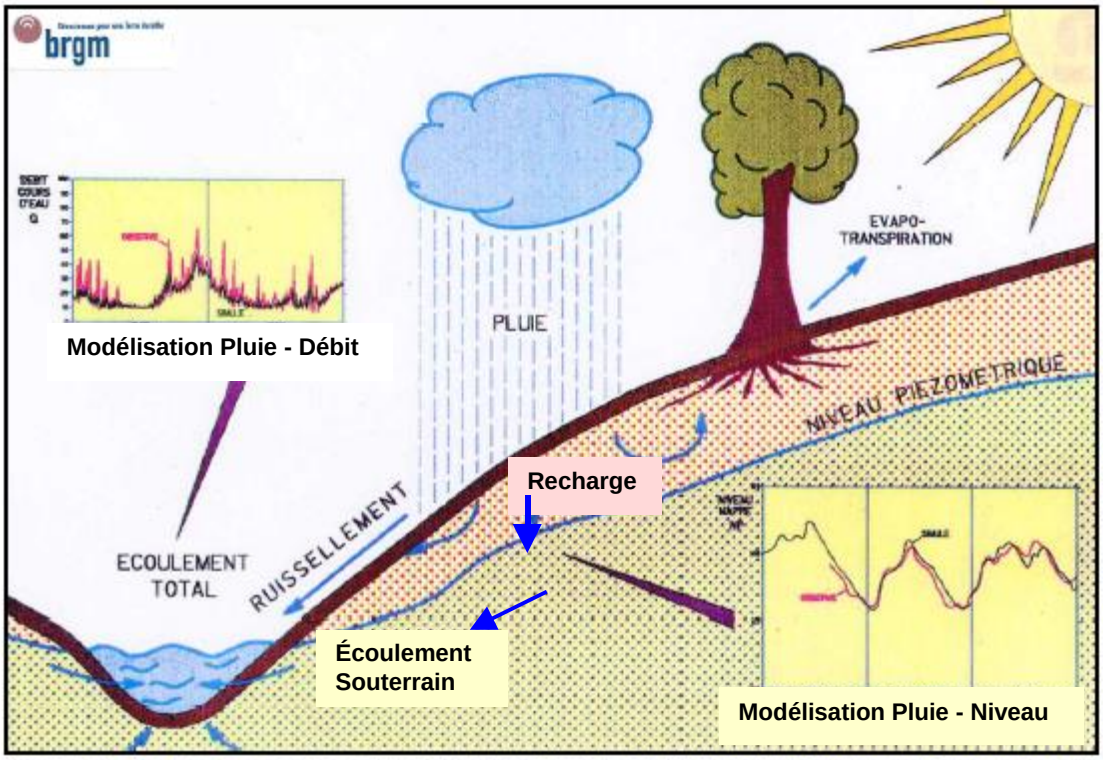


Illustration A9-1 – Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant

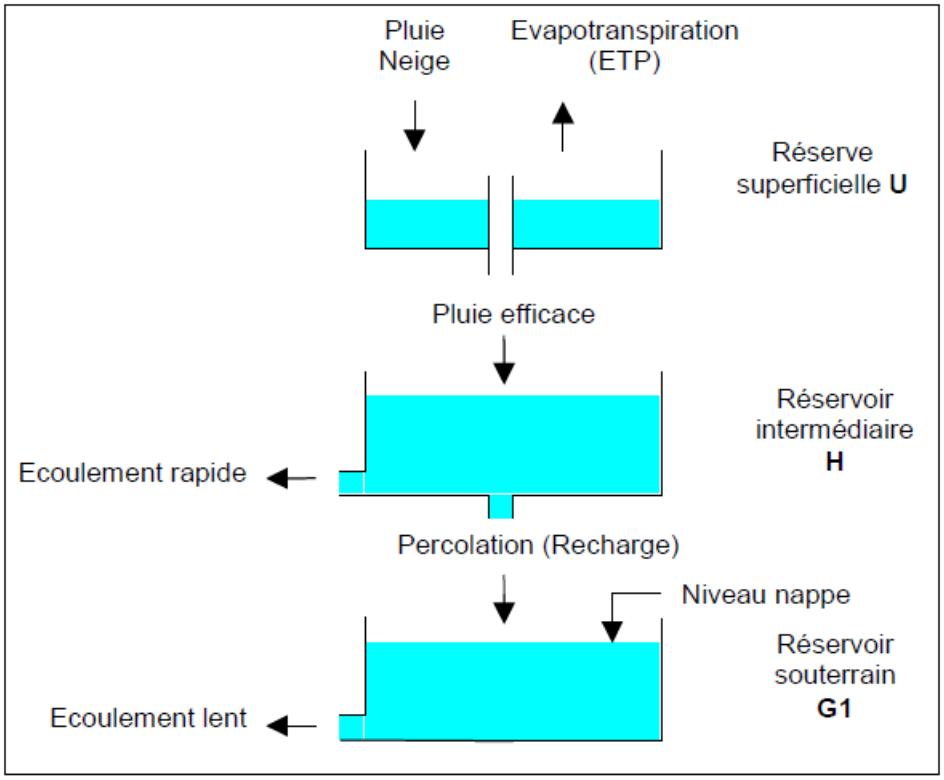


Illustration A9-2 – Schéma de bilan hydroclimatique GARDENIA complet

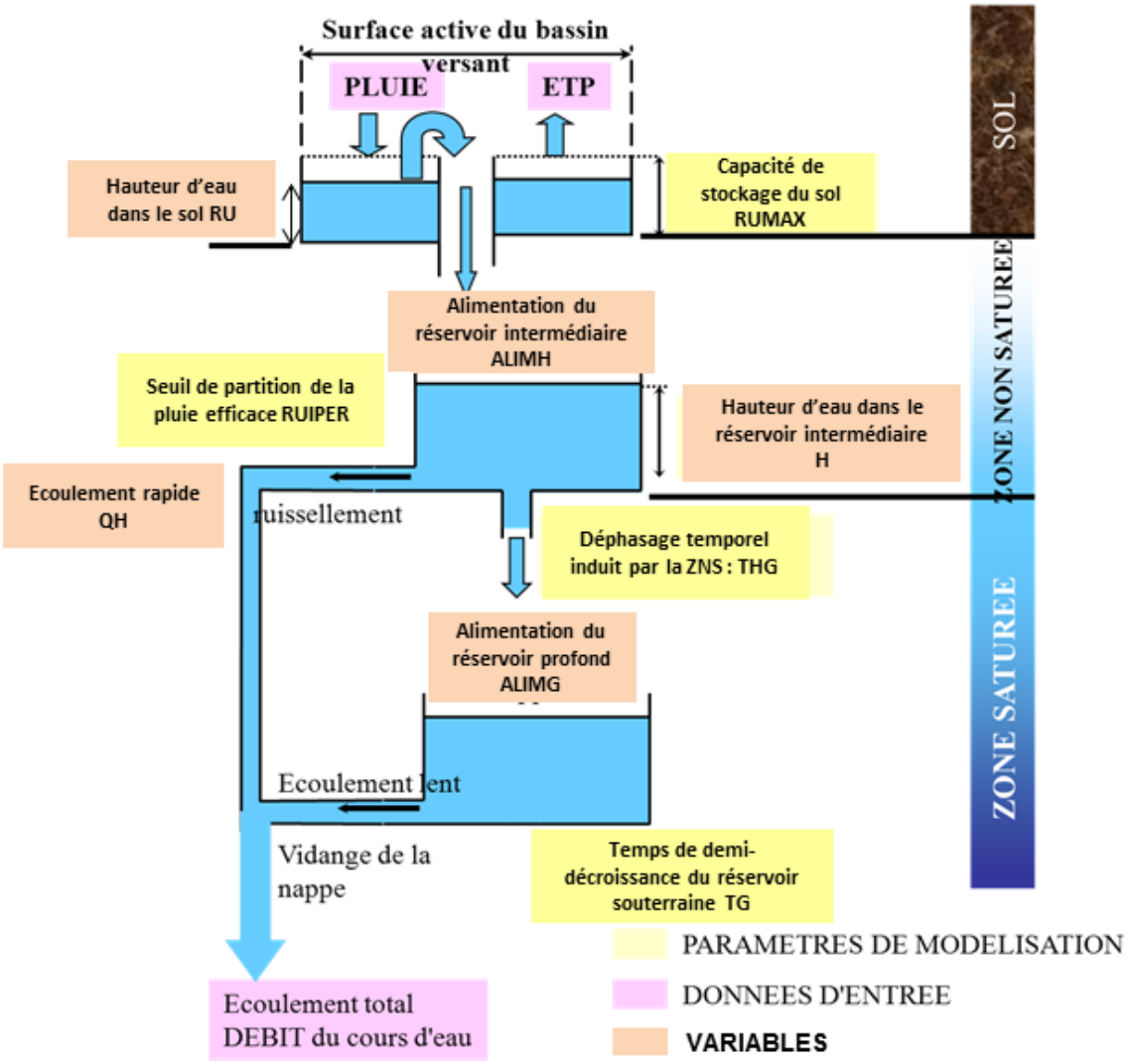


Illustration A9-3 – Schéma fonctionnel du modèle GARDENIA

L'Illustration A9-3 détaille les paramètres et variables du modèle. Un bilan est réalisé dans chaque réservoir. Les lois régissant la vidange de ces trois réservoirs sont présentées ci-dessous.

Bilan du réservoir superficiel

Deux schémas de réservoirs superficiels sont possibles :

- Un réservoir sol de type « réserve utile » qui fonctionne en « tout ou rien ».
- Un « réservoir sol progressif », avec des lois quadratiques fonction de l'état de remplissage de ce réservoir : c'est le schéma conseillé.

L'ETR est l'évapotranspiration réelle. La pluie efficace correspond à la variable ALIMH.

- **Réservoir sol de type « réserve utile »**

- Si la pluie est supérieure à l'ETP :

  - Pluie efficace = 0 tant que le réservoir n'est pas encore totalement rempli.
  - Pluie efficace = Pluie – ETP quand le réservoir sol devient totalement rempli.

- Si l'ETP est supérieure à la pluie :
  - ETR = (ETP – Pluie) tant que le réservoir sol n'est pas encore totalement vide.
  - ETR = 0 quand le réservoir sol devient vide.
  - Pluie efficace = 0

- **Réservoir sol « progressif »**

On note : Satur = Remplissage du réservoir / Capacité du réservoir :

- Si la pluie est supérieure à l'ETP :
  Pluie efficace = (Pluie - ETP) x Satur²

- Si l'ETP est supérieure à la pluie :
  ETR = (ETP - Pluie) x Satur x (2 - Satur)

Bilan du réservoir intermédiaire

Percolation dans le réservoir profond (recharge) – Loi exponentielle : ALIMG = H . dt / THG

Ecoulement rapide (ruissellement) – Loi non linéaire : QH = H . dt / (THG . RUIPER / H)

Les paramètres THG et RUIPER sont respectivement le temps de ½ percolation et la hauteur du réservoir pour laquelle la percolation est égale au ruissellement.

Bilan du réservoir profond

Ecoulement vers l'exutoire – Loi exponentielle : QG=G.dt/TG

Dans MARTHE, seuls les deux premiers réservoirs (sol et intermédiaire) sont utilisés. La percolation vers le réservoir profond correspond à la recharge de la nappe dans chaque maille aquifère du modèle tandis que le ruissellement est transféré vers le réseau hydrographique et rejoint le cours d'eau le plus proche.

2. Synthèse des données d'entrée et paramètres de modélisation

Les données d'entrées nécessaires à la modélisation sont donc :
- Chroniques de pluie ;
- Chroniques d'ETP.

Les chroniques de pluie et d'ETP doivent être disponibles pour l'ensemble de la période de modélisation et, *a minima*, au pas de temps du modèle hydrodynamique.

Si un zonage climatique a été constaté sur la zone d'étude, chaque zone devra disposer de ses chroniques de pluie et d'ETP représentatives de la zone.

Les paramètres de modélisation suivants doivent être définis avant la modélisation :

- La capacité de stockage du sol (RUMAX ou CAP_SOL_PROGR suivant la loi de vidange choisie) correspond à la hauteur d'eau maximale que le sol peut stocker.
- Le déficit initial du réservoir sol (DEFIC_SOL ou DEF_SOL_PROGR suivant la loi de vidange choisie) correspond à la hauteur d'eau présente dans le sol au début de la simulation. Pour une modélisation commençant en basses eaux, le réservoir sol sera considéré comme vide et le déficit initial sera donc égal à la capacité de stockage du sol.
- Le niveau d'équi Ruissellement/Percolation (RUIPER) correspond à la hauteur d'eau dans le réservoir intermédiaire pour laquelle l'infiltration et le ruissellement sont égaux.
- La durée de ½ percolation (T_DEMI_PERCOL / THG) correspond au temps nécessaire pour une ½ vidange du réservoir intermédiaire.
- La durée de ½ décroissance (TG) correspond au temps nécessaire pour une ½ vidange du réservoir souterrain.

Ces cinq paramètres pourront être calés afin de faire correspondre les chroniques de débits et niveaux piézométriques calculées avec les données observées.

Deux types de chroniques sont utilisés pour le calage des paramètres de sol :

- Chroniques piézométriques dans l'aquifère en relation avec le cours d'eau ;
- Chroniques de débits dans le cours d'eau.

En fonction de ces chroniques, différentes zones de sol pourront être identifiées, correspondant à un paramétrage différent.

3. Limites et incertitudes des modélisations GARDENIA

Incertitudes liées à l'appréciation de la validité du calage

Comment décider qu'une simulation est « satisfaisante » ?

Il est difficile de répondre à cette question de façon générale. Rappelons tout d'abord qu'un modèle n'est, au mieux, qu'une représentation acceptable de la relation entre ses entrées et ses sorties.

La qualité d'une simulation est essentiellement basée sur des appréciations visuelles, et son évaluation dépend à la fois du but qu'on s'est fixé, de l'appréciation de la fiabilité des données, du bilan des différents flux et de la vraisemblance des paramètres de calage.

Il est illusoire de rechercher un très bon calage si la qualité des données est douteuse.

Le calage est optimisé par le modèle, mais ce dernier ne peut pas prendre en compte l'ensemble des informations dont dispose l'hydrogéologue. En pratique, le calage dépend du modélisateur et de sa capacité à exploiter les performances numériques de l'ordinateur.

Incertitudes liées au choix de la durée de modélisation

Pour identifier le fonctionnement d'un système, il faut en avoir observé plusieurs cycles hydrologiques. Si cinq ou six ans sont amplement suffisants pour un petit bassin à fort ruissellement, il faut souvent dix à quinze années de mesure, voire quelquefois plus, pour identifier des fluctuations piézométriques pluriannuelles dans un bassin à forte inertie.

Il est en outre très souhaitable de disposer de chroniques de données contrastées, associées à des situations hydroclimatologiques et hydrauliques variées (hautes eaux, basses eaux).

La règle d'usage veut qu'un modèle ne puisse être considéré comme correctement calé avant que toutes ses composantes aient fonctionné plusieurs fois et produit des contributions significatives, conformes aux observations de terrain.

Les modèles de recharge ont été calés sur une période d'une vingtaine d'années couvrant des conditions climatiques variées. Des calages sur des périodes plus courtes peuvent conduire à de meilleurs coefficients d'ajustement mais ils se révèlent en général moins robustes sur de longues périodes.

Interprétation des paramètres et choix des paramètres initiaux

Malgré les performances des méthodes d'optimisation utilisées par GARDÉNIA, le choix des valeurs initiales des paramètres de calage est essentiel. Il peut parfois arriver que plusieurs jeux de paramètres produisent des simulations quasi-équivalentes (non-unicité du calage). C'est alors la connaissance hydrogéologique du terrain qui guide le choix du jeu de paramètres le plus pertinent. En tout état de cause, le résultat d'une modélisation ne peut être dissocié du contexte hydrogéologique du bassin étudié.

Annexe 10

Principe du réseau hydrographique dans MARTHE

(Extrait du rapport BRGM/RP-64554-FR)

Ce chapitre présente les fonctionnalités du réseau hydrographique (réseau de rivières) qui peuvent être pris en compte lors de la modélisation des hydrosystèmes dans MARTHE. Ces réseaux sont couplés à la nappe lors des calculs d'écoulement, de transport de masse et de transfert thermique. Le réseau hydrographique est également couplé au bilan hydroclimatique puisque c'est vers lui qu'est dirigé le ruissellement.

1. Présentation du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique, qui se superpose au maillage de surface, est composé d'un système arborescent de tronçons de rivières organisés en affluents (cf. Illustration A10-1).

Le réseau hydrographique est en contact uniquement avec la couche qui affleure localement.

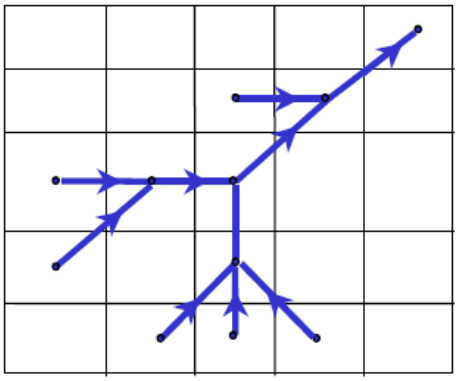


Illustration A10-1 – Réseau de rivières connecté au maillage du domaine

Chaque tronçon de rivière peut avoir :

- Un seul tronçon aval.
- Jusqu'à trois tronçons amont.

Un tronçon est décrit (cf. Illustration A10-2) par :

- Sa géométrie :
  - Longueur,
  - Largeur,
  - Altitude du fond du lit.

- Ses propriétés physiques :
  - Rugosité du lit et des berges,
  - Pente du lit,
  - Épaisseur du lit et des berges,
  - Perméabilité du lit et des berges.

- Son terme source :
  - Pompage ou injection dans le tronçon.

- Son état :
  - Niveau (absolu) de l'eau dans la rivière.

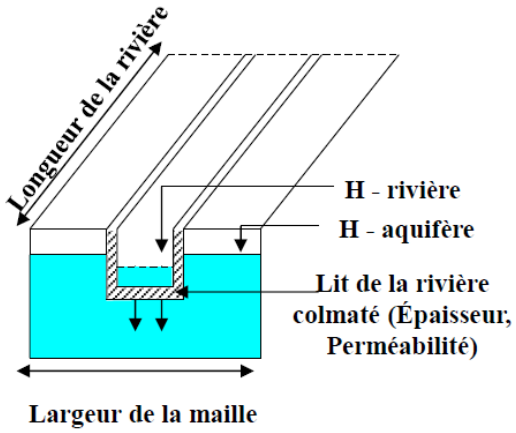


Illustration A10-2 – Géométrie d'un tronçon de rivière

2. Propagation du débit dans un tronçon de rivière

Comme le montre l'Illustration A10-3, le débit dans un tronçon de rivière résulte de l'équilibre de tous les termes de débits :

- Débit amont (Q_{AM}),
- Débit aval (Q_{AV}),
- Débit d'échange avec l'aquifère (Q_{ECH}),
- Débit de ruissellement et de débordement (Q_{RUIS}),
- Termes sources de débit (Q_{INJ})

Et, lorsque le routage est pris en compte, en régime transitoire :

- Débit de stockage (STO).

L'équation d'écoulement s'écrit comme suit :

$$Q_{AV} = Q_{AM} + Q_{ECH} + Q_{RUIS} + Q_{INJ} - \frac{dSTO}{dt} \quad (1)$$

où « dt **»** est la durée du pas de temps.

Dans le cas d'une section rectangulaire, le terme de stockage « STO » est le produit de la largeur du tronçon par la hauteur d'eau dans la rivière « H_{RL} ».

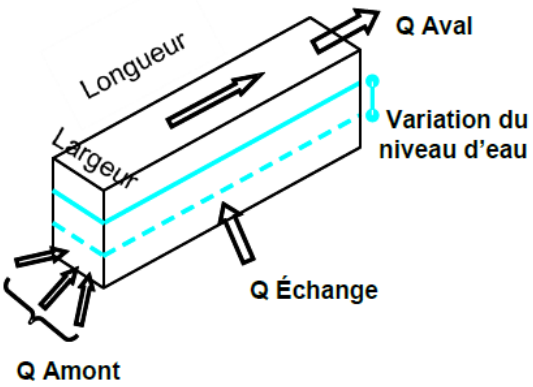


Illustration A10-3 – Bilan des débits dans un tronçon de rivière

La hauteur d'eau « H_{RL} » dans le tronçon est reliée au débit aval « Q_{AV} » du tronçon par la formule de Manning-Strickler :

$$Q_{AV} = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{Pente} \quad (2)$$

Où :

A = Section du tronçon = Largeur . H_{RL}
R = Rayon hydraulique = (Largeur . H_{RL}) / (Largeur + 2 H_{RL}) (3)
n = Coefficient de Manning-Strickler (traduisant la « rugosité »)
Pente = Pente du lit du cours d'eau
H_{RL} = Hauteur de l'eau au-dessus du lit

Si on introduit un seuil, c'est-à-dire un petit barrage, à l'aval du tronçon : on n'a plus une loi de Manning-Strickler, mais on a une loi de seuil de la forme suivante :

$$Q_{AV} = \mathrm{Larg} \cdot \mathrm{FactQ} \cdot \sqrt{2g} \cdot (H_{Riv} - H_{Seuil})^{Expos}$$

Avec :

FactQ = Facteur (sans unité) dont la valeur est théoriquement comprise entre 0,32 et 0,50 (Degoutte, 2012), par défaut égale à 0,40.
g = Accélération de la pesanteur = 9.81 $m.s^{-2}$ (à Paris).
Larg = Largeur du tronçon (m).
H_{Riv} = Hauteur d'eau au-dessus du fond dans le tronçon considéré (m).
H_{Seuil} = Hauteur au-dessus du fond, du seuil situé à l'aval du tronçon considéré (m).
Expos = Exposant : très généralement égal à 1,5 (sans dimension).

En combinant les équations (1), (2) et (3) on obtient une équation implicite qui donne le débit en aval du tronçon en fonction des débits des tronçons amont. Le débit dans tout le réseau hydrographique est alors obtenu par un processus itératif de manière optimale, en utilisant l'ordre de Strahler de chaque tronçon. Ce schéma de routage s'est avéré très efficace et a été comparé avec succès à une solution quasi-analytique de propagation d'onde de crue dans un canal, ainsi qu'avec des données observées de propagation de crue en Haute-Loire. Comme la méthode de calcul suppose qu'en chaque tronçon la surface libre a la même pente que le lit, l'approximation est d'autant meilleure que la pente du lit de la rivière n'est pas trop petite et que les variations de hauteur dans la rivière ne sont pas trop rapides, ce qui est généralement le cas dans les systèmes naturels.

3. Débit échangé entre un tronçon de rivière et l'aquifère

Selon la position relative du niveau d'eau dans la rivière et de la surface libre dans l'aquifère, un débit peut être échangé : depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère, ou réciproquement depuis l'aquifère vers la rivière. Le débit d'échange est contrôlé, d'une manière non linéaire, par le lit et les berges du cours d'eau en fonction de leur surface, épaisseur et perméabilité (cf. Illustration A10-4).

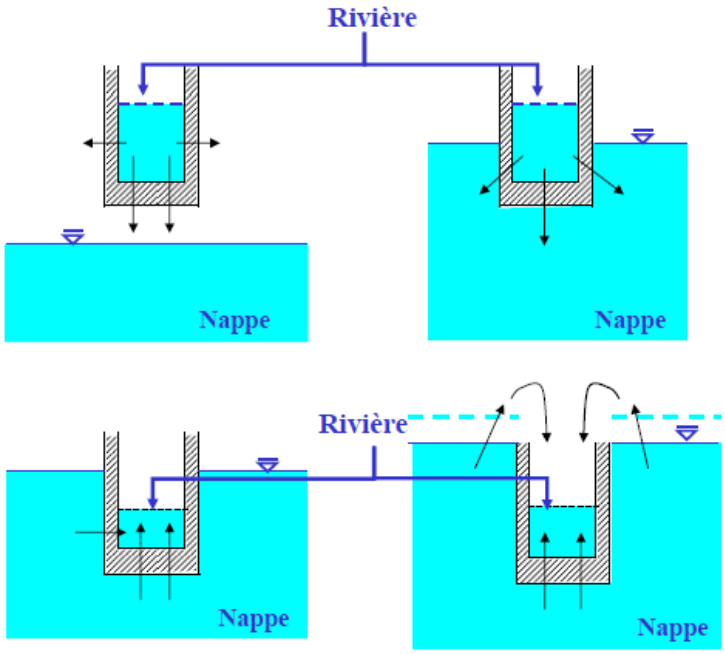


Illustration A10-4 – Différentes configutations d'échanges Nappe – Rivière

Trois situations sont possibles :

- Lorsque le niveau dans l'aquifère est inférieur à la base du lit de la rivière, le débit d'échange vers l'aquifère est un terme de percolation indépendant de ce niveau. En effet la nappe est « décrochée ». Le milieu n'est plus en charge ; il n'est plus saturé mais on considère qu'à la base du lit on est à la limite de saturation, donc avec une succion quasi nulle. La charge hydraulique à la base du lit est égale à l'altitude « Hf ». Équation (5)

- Lorsque le niveau dans l'aquifère est situé au-dessus de la base du lit de la rivière, le débit d'échange est le produit de la perméabilité du lit et des berges la surface d'échange, qui intègre les berges du fleuve, multiplié par la différence entre l'altitude de l'eau dans la rivière et la charge hydraulique dans l'aquifère, divisé par l'épaisseur du lit. Équation (6).

- Lorsque la charge hydraulique de l'aquifère est supérieure à la cote du sol et aussi supérieure au niveau d'eau dans la rivière : le débit d'échange (de la nappe vers la rivière) est augmenté d'un terme complémentaire de débordement de la nappe. Ce terme de débordement de nappe est appliqué à la surface complémentaire de la maille du domaine souterrain. Équation (7).

$$SURF_{Éch} = L \cdot \left[l + 2 \cdot \left(H_R - H_f \right) \right] \quad (4)$$

$$Q_{Percol} = SURF_{Éch} \cdot K_R \cdot \frac{(H_R - H_f)}{Épais} \quad (5)$$

$$Q_{Éch} = SURF_{Éch} \cdot K_R \cdot \frac{(H_R - H_N)}{Épais} \quad (6)$$

$$Q_{Débo} = (SURF_{Mail} - L \cdot l) \cdot K_R \cdot \frac{(H_N - H_{Topo})}{Épais} \quad (7)$$

Avec :

L = Longueur du tronçon de rivière
l = Largeur du tronçon de rivière
K_R = Perméabilité du lit et des berges
Épais = Épaisseur du lit (et des berges)
H_R = Altitude absolue de la surface libre de l'eau dans la rivière
H_N = Charge hydraulique (niveau piézométrique) de la nappe sous-jacente
H_f = Altitude du fond du lit de la rivière
H_{Topo} = Altitude de la surface topographique de la maille
$SURF_{Mail}$ = Superficie de la maille dans laquelle est situé le tronçon
$SURF_{Éch}$ = Superficie d'échange nappe-rivière
$Q_{Éch}$ = Débit d'échange de la rivière vers la nappe
Q_{Percol} = Débit de percolation de la rivière vers la nappe décrochée
$Q_{Débo}$ = Débit complémentaire de débordement de la nappe vers la rivière

Il apparaît donc que, dans le cas général, le débit d'échange dépend des variations d'eau dans la rivière. Considérant un niveau donné dans l'aquifère, le débit d'échange est plus élevé quand le débit de la rivière, et donc la hauteur d'eau dans la rivière, sont plus élevés. Le modèle peut donc être vérifié ou calibré à partir d'observations de variations de hauteur d'eau, ou de niveau d'eau, dans la rivière quand elles sont disponibles.

4. Organisation détaillée du réseau hydrographique et terminologie

Dans MARTHE, le réseau hydrographique est organisé en « affluents », eux-mêmes découpés en « tronçons » :

- Un « affluent » est un ensemble de tronçons en série, sans confluences ; par commodité un affluent réel peut être découpé en plusieurs affluents « au sens de MARTHE.
- Chaque affluent peut avoir jusqu'à 3 affluents amont. Il se jette dans **1** affluent aval au maximum.
- Si un affluent n'a pas d'affluent aval, son extrémité aval est un « exutoire ».
- Si un affluent n'a pas d'affluent amont, son extrémité amont est une « source ».
- Il peut y avoir autant d'exutoires et autant de sources qu'on le souhaite.
  Il peut y avoir plusieurs réseaux complètement indépendants (comme le seraient le réseau de la Seine et le réseau de la Loire dans un modèle régional).
- Chaque maille du domaine peut contenir au maximum un seul élément de réseau hydrographique.
- Le domaine aquifère modélisé peut être monocouche ou multicouche.
- Le réseau hydrographique concerne uniquement la couche qui affleure. Ce n'est pas forcément la couche n°1, par exemple en une maille où c'est la couche n°3 qui affleure.
- Dans la couche courante, les tronçons ou affluents voisins peuvent se situer dans les **8** mailles voisines (N, S, E, O, NE, NO, SE, SO) donc incluant les obliques.
  En multicouche, les tronçons voisins peuvent se situer dans la couche sus- ou sous-jacente, à condition qu'elle soit affleurante. Les 8 directions suivantes sont possibles : HN, HS, HE, HO pour le haut, et BN, BS, BE, BO pour le bas.
  (N = Nord ; S = Sud ; E = Est ; O = Ouest ; H = Haut ; B = Bas).
  Il y a donc au total jusqu'à 16 directions possibles.

5. Numérotation des éléments du réseau hydrographique

Un tronçon de rivière est défini par son « numéro d'affluent »et par son « numéro de tronçon ». Dans un affluent donné, les tronçons ont des numéros de tronçon croissants de l'amont à l'aval. C'est la manière d'indiquer à MARTHE le sens de parcours dans l'affluent. Ces numéros de tronçon n'ont pas besoin d'être continus. Ils doivent être croissants dans un même affluent, cependant des affluents différents peuvent contenir des éléments ayant le même numéro de tronçon.

Un numéro d'affluent peut être au maximum égal à 1000, puisqu'à partir de 1001 un numéro d'affluent correspond à un « Lac » et non pas à une rivière.

Pour la commodité de la modélisation, on peut découper un affluent (réel) en plusieurs affluents en série.

Le nombre de tronçons dans un même affluent n'est pas limité (le numéro maximal d'un tronçon est 999998).

Le nombre total de tronçons n'est pas limité.

Pour désigner un « élément de rivière » on utilise souvent dans ce document le terme « tronçon de rivière ». Un « tronçon de rivière » (c'est-à-dire un « élément de rivière ») est donc caractérisé par son « numéro d'affluent »et par son « numéro de tronçon ».

6. Arbre de branchement des affluents de rivière

L'« Arbre de branchement des affluents de rivière » permet de fixer les relations entre les affluents de rivière. Pour chaque affluent de rivière, il donne le numéro de son affluent aval.

Si un affluent n'a pas d'aval, c'est-à-dire si c'est un exutoire : par convention son affluent aval a le numéro « 0 ».

7. Lois Hauteur - Débit

Si on le souhaite, le code de calcul peut calculer dans chaque tronçon de rivière la hauteur d'eau à partir du débit : la relation utilisée est la loi de Manning-Strickler complète (ou simplifiée). Réciproquement, cette loi donne le débit d'écoulement à partir de la hauteur d'eau dans le tronçon de rivière. Pour une section donnée (et une forme donnée) la relation « Hauteur - débit » dépend de 2 paramètres :

- La pente du tronçon
- La rugosité du cours d'eau

À l'aval de certains tronçons, on peut introduire un seuil (c'est-à-dire un petit barrage). Le débit à l'aval du tronçon, c'est-à-dire le débit de surverse du seuil n'est *pas* donné par la loi de Manning-Strickler. Le débit à l'aval du tronçon dépend alors de la hauteur d'eau par rapport à la hauteur du seuil, ainsi que de 2 autres paramètres :

- Le facteur de débit de la loi de débit du seuil.
- L'exposant de la loi de débit du seuil.

8. Données d'entrée à définir

Champs de données à définir dans chaque maille contenant un tronçon de rivière :

- Longueur du tronçon de cours d'eau
- Largeur du tronçon de cours d'eau
- Altitude du fond de la rivière (rivière à sec)
- Épaisseur du lit de la rivière (en dessous du fond de la rivière)
- Perméabilité du lit de la rivière
- Altitude (absolue) de l'eau dans la rivière
- Débit d'Injection (ou de pompage) dans la rivière :
  Ce débit est positif s'il est injecté ; il est débit négatif s'il est pompé ;
  Un débit d'Injection égal à la valeur 9999 est utilisé pour imposer le niveau d'eau dans la rivière (uniquement si on a choisi un schéma avec une relation Hauteur – Débit).
- Débit amont (sources) dans la rivière (dans les « tronçons sources »)

Si les calculs sont en régime transitoire, il faut définir en plus :
- Débit (écoulement) initial à l'aval du tronçon
- Chronique de débit amont dans les tronçons sources

Si on a fixé une relation Hauteur-Débit par la relation de Manning-Strickler :
- Rugosité du lit de la rivière (de l'ordre de 0,02 [en m-1/3.s])
- Pente du lit de la rivière (adimensionnel ; de l'ordre de 1/100 à 1/1000).

Si on introduit un seuil à l'aval du tronçon, on a une relation Hauteur-Débit qui dépend des champs :
- Hauteur au-dessus du fond, du seuil situé à l'aval du tronçon (en unité utilisateur de charge hydraulique et d'altitude).
- Facteur de débit de la loi de débit du seuil : par défaut 0,4 (sans unité).
- Exposant de la loi de débit du seuil : par défaut 1,5 (sans unité).

Les unités utilisateur des données sont les suivantes :
- Longueurs, largeurs de tronçon : en unité utilisateur de coordonnées.
- Niveau de l'eau, profondeur, altitude du fond du lit, épaisseur de colmatage : en unité utilisateur de charge hydraulique et d'altitude.
- Débit : en unité utilisateur de débit de rivière (ou, par défaut en unité utilisateur de débit, si on n'a pas défini d'unité de débit de rivière).
- Perméabilité du lit et des berges : en unité utilisateur de perméabilité.
- Rugosité : en $m^{-1/3}.s$
- Pente : pas d'unité

Données globales caractérisant tout le réseau

- L'« Arbre de branchement » des affluents de rivière :
  C'est un fichier qui donne pour chaque affluent le numéro de l'affluent aval.
  Si un affluent n'a pas d'aval, c'est-à-dire si c'est un exutoire, on lui donne « 0 » comme numéro d'affluent aval.

Annexe 11

Modélisation des débits des cours d'eau non instrumentés (GARDENIA)

1. Généralités sur le calage

A l'issue du calage, le modèle fournit :

- Les différentes composantes de l'écoulement (évapotranspiration réelle, pluie efficace, ruissellement / écoulement superficiel, recharge de la nappe / écoulement souterrain…) ;
- Une représentation graphique permettant de comparer observation et simulation ;
- Des critères numériques d'évaluation de la qualité de l'ajustement.

La qualité de calage et son évolution sont appréciées visuellement par superposition des chroniques mesurées et calculées de débit, ainsi que par des critères numériques globaux. A l'issue du calage, on peut considérer que l'on dispose d'un jeu de paramètres représentatifs du bassin versant, sous réserve que les valeurs des paramètres soient hydrologiquement réalistes.

2. Paramètres hydrologiques, données d'entrée et données de calage

Les paramètres hydrologiques du modèle sont au nombre de neuf (cf. chapitre 3.5.5).

Les données d'entrée sont les précipitations, l'ETP et une chronique de débit sur le cours d'eau à modéliser. Les données de calage sont de deux types : données de débit et/ou niveaux piézométriques.

La période de modélisation commune aux différents bassins correspond aux années 1996-2013 (modélisation faite en 2014) avec une période de calage de six ans (début en 1990).

Pour chaque cours d'eau modélisé, une vérification préalable de la représentativité des données des stations météo a été réalisée. Elle a consisté à :

- Comparer l'attitude de la station météo avec l'altitude moyenne, minimum et maximum du bassin versant de référence étudié. Pour cela, le tracé des bassins versant des stations hydrométriques a été réalisé sur un logiciel SIG (ArcGIS), puis ces valeurs statistiques ont été calculées à l'aide du MNT 25 m.

- Comparer les valeurs minimum, moyenne et maximum des pluies annuelles moyennées sur le bassin versant sur la période 1981-2010 (données AURHELY) avec la moyenne interannuelle (si possible sur cette même période 1981-2010) de la station météo étudiée.

Les résultats sont présentés dans le Tableau A11-1.

BV					STATIONS METEO			AURHELY		
Nom BV	SURFACE BV Km²	Altitude min BV (m)	Altitude max BV (m)	Altitude moy BV (m)	Nom station météos	Altitude stations météos (m)	Moy annuelle sur 1981-2010	Min interannuel sur 1981-2010	Moy interannuelle sur 1981-2010	Max interannuel sur 1981-2010
La Garonne	13515.5	98.0191	3196	710.2648				942.4022256	620	1905
Le Tarn	9145.74	79.00531	1698.005	564.5155				1004.710584	589	2104
L'Arrats	610.977	61.9904	427.9816	186.7369	MAUVEZIN	170	659.61	713.0570033	635	859
La Gimone	781.863	87.00085	474.0047	200.011	MAUVEZIN	170	659.61	713.1794872	649	880
Ruisseau de Marguestaud	69.0819	126.0035	294.9825	199.9825	CADOURS	233		689.8169014	649	722
Ruisseau de Saint-Pierre	46.885	137.9968	280.9903	198.796	CADOURS	233		676.7826087	648	718
Ruisseau de Nadesse	19.5188	157.9857	294.9825	231.0662	CADOURS	233		716.65	707	730
Ruisseau de Dère	19.4225	163.0073	294.0074	233.1014	CADOURS	233		713.1176471	700	729
ruisseau de Pontarras	2.16563	157.0106	243.0115	175.4693	CADOURS	233		670	665	675
Le Lambon	37.8844	137.0218	284.013	215.1858	CADOURS	233		719.5641026	707	734
Ruisseau de Tessonne	39.9569	90.99863	274.9937	185.2215	CADOURS	233		709.3157895	684	732
La Sère	92.6906	90.99863	264.9992	180.2148	LAVIT	226		713.4395604	690	740
Le Rieutord	13.5494	96.99529	218.9761	159.3428	LAVIT	226		720.7857143	701	734
Le Tescou	299.553	87.00085	300.9792	185.3481	SALVAGNAC	190	683.59	774.5466667	738	806
ruisseau de rival	30.8019	106.9897	223.9977	158.5832	VILLEMETIER	115		712.3	701	720
Le Rieu Tort	3.08875	145.0173	204.0088	164.0944	VILLEMETIER	115		702.6666667	701	705
ruisseau la margasse	20.9727	108.9886	216.0021	156.0948	VILLEMETIER	115		703.3913043	695	710
L'Aveyron	4461	90.99863	1148.019	522.8707				953.4289556	752	1140
Ruisseau du Gouyre	24.7194	100.018	284.013	177.8719	VAISSAC	146	753.95	784.5416667	757	802
Ruisseau de Longues Aygues	10.4863	135.0229	225.9966	184.8143	VAISSAC	146	753.95	796.6666667	787	805
Ruisseau de la Brive	2.95438	135.9979	206.0077	174.7072	VAISSAC	146	753.95	792.3333333	787	795
Rivière la Lère	202.383	120.9819	392.9767	264.413	CAYLUS			857.3592233	765	926
Le Cande	70.7881	114.9853	341.0056	199.636	CAYLUS			810.3661972	764	852
Ruisseau de la Tauge	21.3375	120.9819	227.0204	175.2754	VAISSAC	146	753.95	802.3181818	787	811
Ruisseau du Tordre	10.8069	130.0013	221.0237	171.2666	VAISSAC	146	753.95	793.5	779	802
Ruisseau de l'Angle	9.54688	120.9819	221.9988	171.0926	VAISSAC	146	753.95	774.3	763	789
Le Grand Mortarieu	2.65125	122.0057	206.0077	159.3137	VAISSAC	146	753.95	746.3333333	738	751
Le Lemboulas	403	75.9826	331.9863	183.8427	DURFORT	145	751.95	782.8137255	712	854
Le Lembous	48.0162	75.9826	261.9765	154.2823	SAINT VINCENT	183	772	766.4423077	725	806
Ruisseau du Bartac	29.2213	77.98149	198.0122	142.3805	DURFORT	145	751.95	741.6666667	717	758
L'Ayroux	33.5756	98.0191	255.9799	180.6776	LAVIT	226		731.7647059	720	738
Ruisseau de Cameson	53.0331	55.01868	266.023	167.2443	LAVIT	226		719.4035088	693	740
Ruisseau de la Saudèze	21.2225	77.98149	194.0144	138.3879	DURFORT	145	751.95	721.5454545	711	734
La Barguelonne	526.46	65.98817	333.0101	189.1063	DURFORT	145	751.95	794.3719165	711	881

Tableau A11-1 – Synthèse de l'étude climatique des bassins versants

Le jeu de données validé pour chaque bassin versant de référence est présenté dans le Tableau A11-2.

Bassin Versant	Station Pluie	Station ETP	Débit disponible
AUSSONNELLE	CASTELGINEST (1984)	MONTAUBAN (1865)	1900 - 2015
TESCOU	SALVAGNAC (1966)	MONTAUBAN (1865)	1996 - 2015
ARRATS	MAUVEZIN (1970)	MONTAUBAN (1865)	1965 - 2010
LEMBOULAS	SAINT-VINCENT (1976)	MONTAUBAN (1865)	1968
GIMONE	MAUVEZIN (1970)	MONTAUBAN (1865)	1965 - 2011

Tableau A11-2 – Données sélectionnées pour les 5 BV de référence

3. Résultats du calage

Le Tableau A11-3 récapitule les paramètres utilisés pour chaque simulation : bassin versant de référence dont les paramètres sont réutilisés, superficie du bassin versant en amont du modèle, chroniques de pluie et d'ETP retenues.

N° affluent amont	Nom cours d'eau	Bassin Versant de référence	Superficie BV amont (km²)	Stations météo		Débit mi-mars 2014 (m3/s)	
				Chronique pluie	Chronique ETP	Mesure	Simulation
0	Aussonnelle	Aussonnelle	192.00	Castelginest	Montauban	**0.905**	0.656
1	Candé	Lemboulas	70.79	Puylaroque	Montauban	3.785	0.611
2	Lère	Lemboulas	202.38	Puylaroque	Montauban	**1.842**	1.739
5	Longues Aygues	Tescou	10.49	Vaissac	Montauban	0.062	0.022
7	Brive	Tescou	2.95	Vaissac	Montauban	0.010	0.006
10	Tauge	Tescou	21.34	Vaissac	Montauban	0.261	0.045
11	Tordre	Tescou	10.81	Vaissac	Montauban	0.014	0.023
13	Angle	Tescou	9.55	Vaissac	Montauban	0.063	0.020
18	Grand Mortarieu	Tescou	2.65	Vaissac	Montauban	0.004	0.006
21	Fronton - Rival	Aussonnelle	30.80	Villematier	Montauban	0.096	0.173
23	Fabas - Margasse	Aussonnelle	20.92	Villematier	Montauban	0.064	0.118
24	Rieu Tort	Aussonnelle	3.09	Villematier	Montauban	0.003	0.017
29	Tescou	Tescou	315.00	Salvagnac	Montauban	**1.531**	1.425
36	Lemboulas	Lemboulas	403.00	Saint-Vincent	Montauban	**2.926**	3.744
37	Lembous	Lemboulas	48.02	Durfort	Montauban	0.391	0.336
40	Laujol - Bartac	Lemboulas	22.22	Durfort	Montauban	0.281	0.156
45	Saint-Pierre	Gimone	46.89	Mauvezin	Montauban	0.125	0.214
46	Marguestaud	Gimone	69.08	Cadours	Montauban	0.578	0.291
49	Galinas - Pontarras	Gimone	2.17	Cadours	Montauban	0.004	0.009
50	Dère	Gimone	19.42	Cadours	Montauban	0.133	0.082
51	Nadesse	Gimone	19.52	Cadours	Montauban	0.106	0.082
55	Lambon	Gimone	37.88	Cadours	Montauban	0.414	0.152
59	Tessonne	Gimone	39.96	Cadours	Montauban	0.238	0.161
67	Gimone	Gimone	827.00	Mauvezin	Montauban	-	3.950
69	Sère	Arrats	92.69	Lavit	Montauban	0.625	0.717
70	Rieutord	Arrats	13.55	Lavit	Montauban	0.068	0.105
75	Ayroux	Arrats	33.58	Lavit	Montauban	0.516	0.260
76	Camuson	Arrats	53.03	Mauvezin	Montauban	0.313	0.390
79	Arrats	Arrats	620.00	Mauvezin	Montauban	**4.345**	4.679
81	Barguelonne	Lemboulas	526.46	Durfort	Montauban	**6.271**	3.590

Tableau A11-3 – Paramètres des simulations Gardenia et comparaison des résultats de la simulation avec les mesures ponctuelles de mi-mars 2014 (en rouge, BV de référence ; en gras, mesure station)

Les calages réalisés sur les cinq bassins versants sont de bonne qualité, avec un coefficient d'ajustement R compris entre 0,82 et 0,92 (cf. Illustration A11-1).

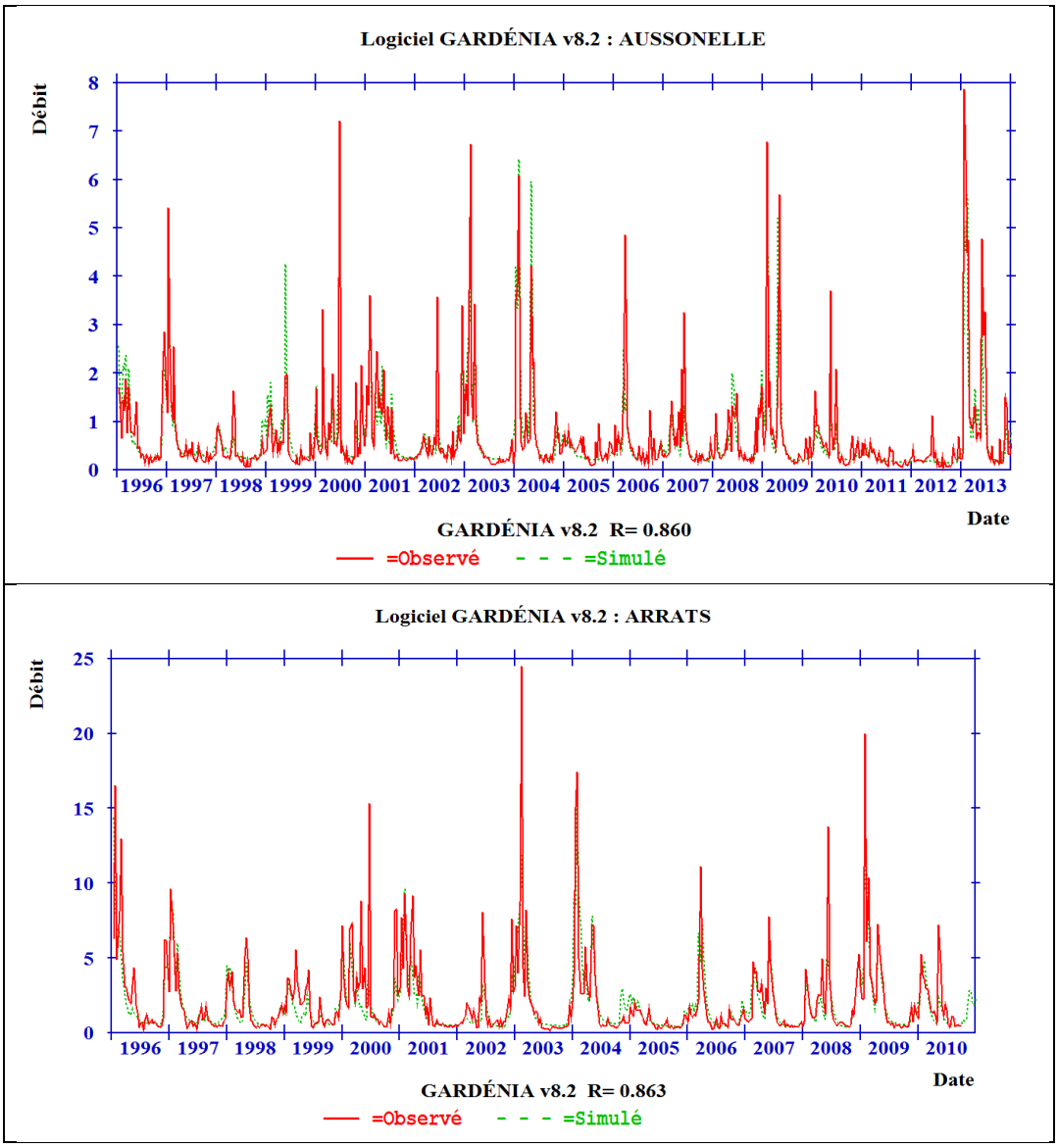
Ces données de calage sont utilisées pour les autres cours d'eau non instrumentés de la zone d'étude. La localisation de ces bassins est présentée dans l'Illustration A11-2.

Les chroniques de débits calculés pour quelques exemples de cours d'eau non instrumentés sont présentées dans l'Illustration A11-3.

Ces gammes de débits simulées sont validées à partir des données ponctuelles suivantes :

- Evaluation du débit instantané lors de la campagne de terrain de mars 2014 (cf. chapitre 3.6.17 et Tableau A11-3) ;
- Données ROCA et ONDES : mesures ponctuelles des assecs (source DDT et ONEMA).

A l'exception du Candé, le Tableau A11-3 met en évidence une simulation du débit décadaire moyen du même ordre de grandeur que les débits mesurés ponctuellement à la mi-mars 2014.



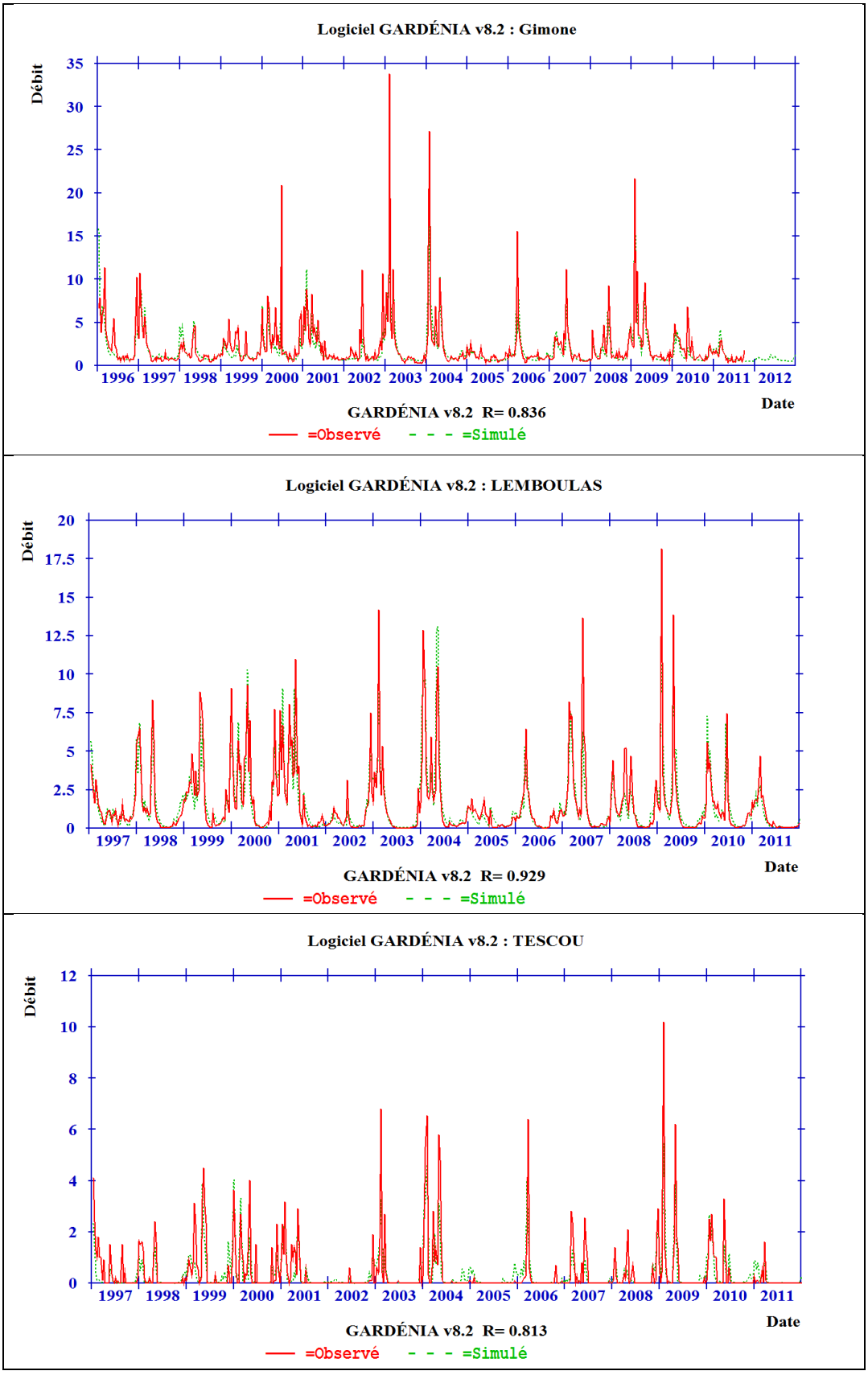


Illustration A11-1 – Chroniques de calage des stations des 5 BV de référence

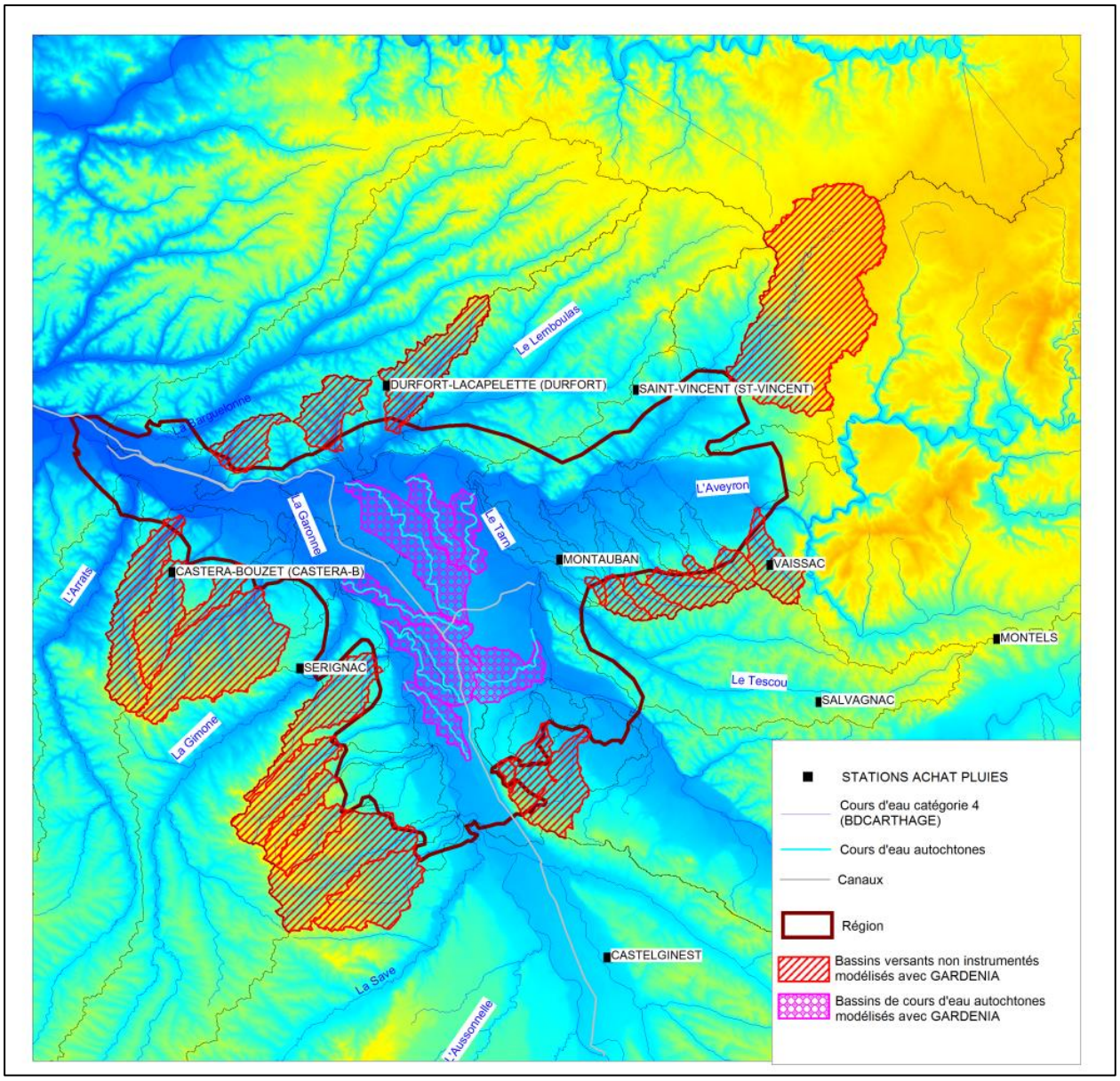
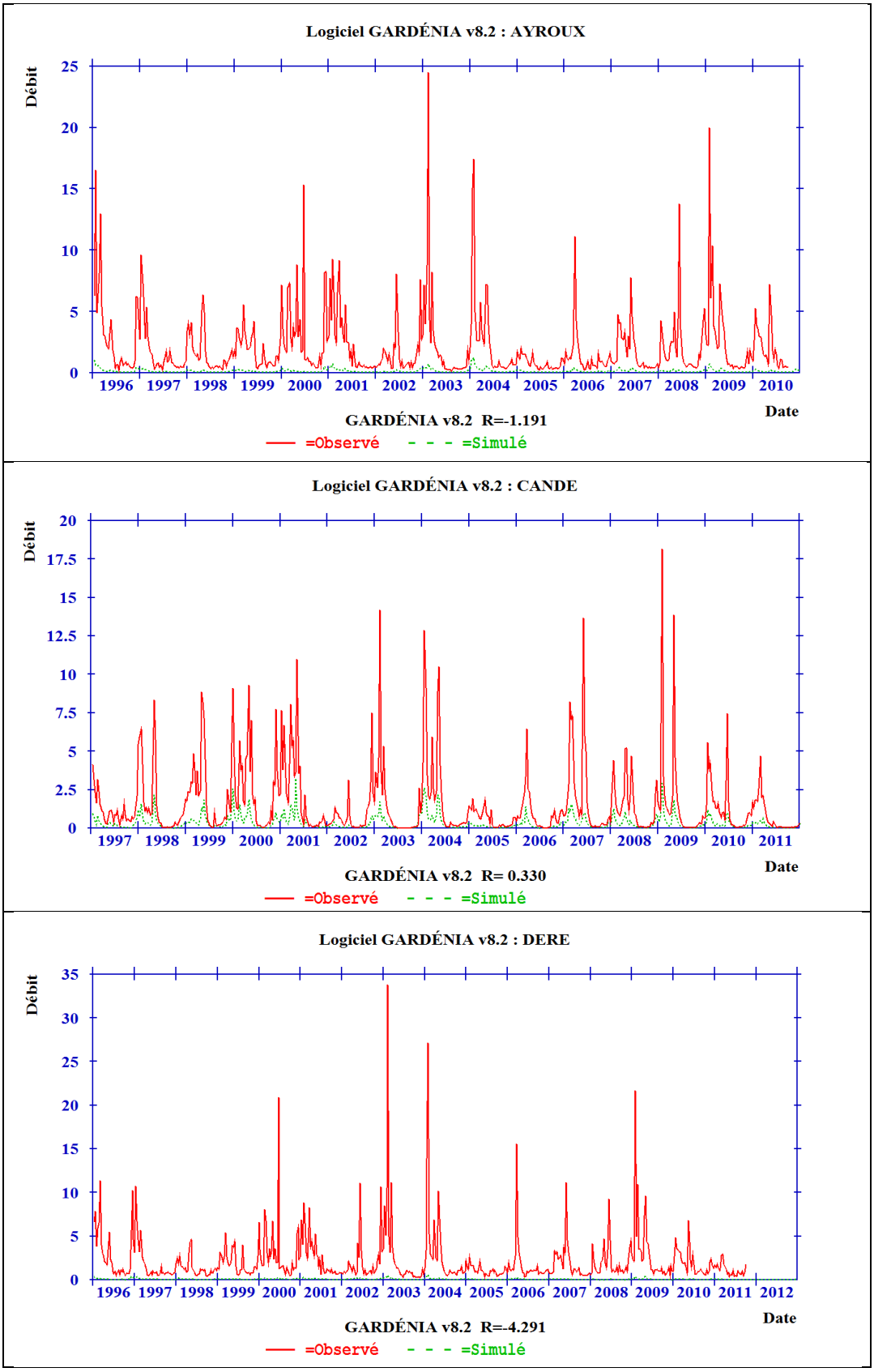


Illustration A11-2 – Carte de localisation des bassins versants non instrumentés, modélisés à partir de GARDENIA


Logiciel GARDÉNIA v8.2 : AYROUX
Débit
25
20
15
10
5
0
1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010
Date
GARDÉNIA v8.2 R=-1.191
=Observé
=Simulé
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : CANDE
Débit
20
17.5
15
12.5
10
7.5
5
2.5
0
1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011
Date
GARDÉNIA v8.2 R= 0.330
=Observé
=Simulé
Logiciel GARDÉNIA v8.2 : DERE
Débit
35
30
25
20
15
10
5
0
1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012
Date
GARDÉNIA v8.2 R=-4.291
=Observé
=Simulé

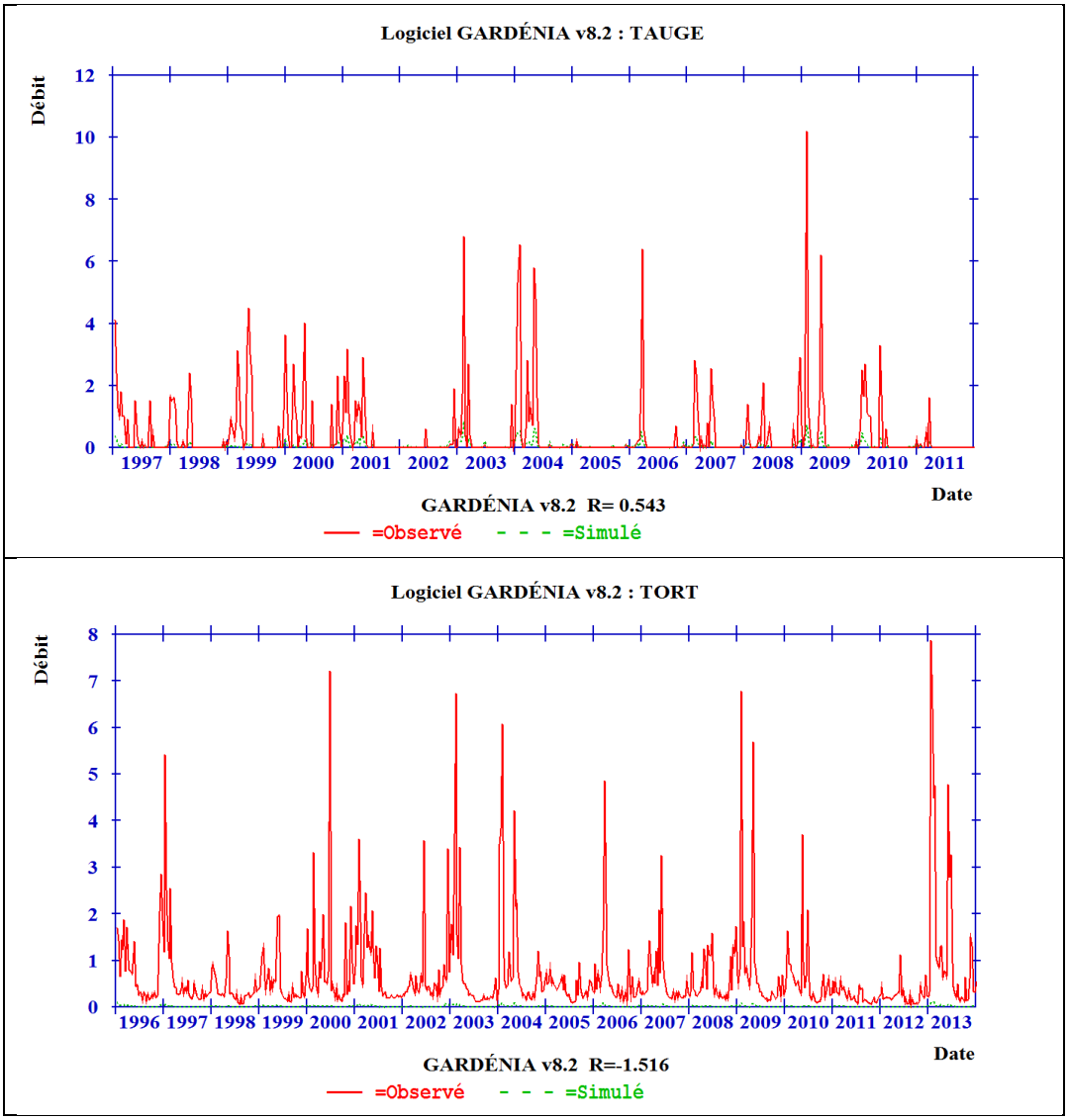


Illustration A11-3 – Chroniques de débits simulées pour quelques exemples de BV non instrumentés

Annexe 12

Traitement des fichiers de prélèvements des eaux souterraines et superficielles

1. Prélèvements en eaux souterraines

Les fichiers sources utilisés pour générer les données de prélèvement en nappe alluviale sont fonction des différents usages.

Usage « irrigation »

Les deux types de données utilisées sont :

- Les fichiers du service de la Police de l'Eau de la DDT de Tarn-et-Garonne : Ces fichiers comprennent les débits et volumes **autorisés** annuellement pour l'irrigation, par point d'eau, avec géolocalisation des points d'eau.

- Les fichiers de redevances de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (AEAG) : Ces fichiers contiennent les données des volumes **prélevés annuellement**, avec les points des prélèvements localisés au centroïde de la commune.

L'objectif est donc de faire correspondre les points d'eau géolocalisés des fichiers de la DDT avec les données de prélèvements réels de l'Agence de l'Eau. Pour cela, un premier croisement test a été effectué à partir de l'outil de croisement semi-automatique, développé sous ACCESS par le bureau d'études DIADEME, à la demande de l'AEAG et de la DDT. Cette base a été développée en travaillant sur l'année 2008.

Le BRGM a réalisé un test sur les années 2006 et 2007. Sur ces années, le taux de croisement automatique était très bas, de l'ordre de 20 %. Malgré un croisement semi-automatique, avec forçage de certains paramètres de croisement, le taux de résultats n'a pas dépassé 45 %. Le temps de croisement passé par année de prélèvement a été d'environ 2 jours.

Dans ces conditions et au vue des résultats peu satisfaisants, un croisement manuel a été réalisé pour les années 2006, 2007, 2009, 2010, 2011 et 2012. L'année 2008 avait été traitée de manière rigoureuse par le bureau d'études DIADEME avec de bons résultats de taux de croisement.

Avant le travail de croisement, un travail a été effectué sur chaque fichier source.

NB : Définition des sigles utilisés

CPT = Compteur

PP = Point de Prélèvement,

Napp : Prélèvement en nappe souterraine (selon les modalités définies par l'AEAG)

Fichiers de l'AEAG :

- Exclusion des PP situés en dehors du modèle.

- Requête à partir des tables « OPERATEURS_DESCRIPTIF », « CORRESP_COMPTEURS_POINTS », « POINTS_DESCRIPTIF » et « POINTS_VOLUMES » : une requête pour chaque année (car les liaisons entre CPT/redevable et PP peuvent changer d'une année sur l'autre) et seulement sur prélèvement déclarés en NAPP.

- Prise en compte du volume estimé au PP (nouveauté dans la base Agence) avec les règles de calculs suivantes :
  - si 1CPT/1PP : vol CPT = vol PP
  - si 1 PP/ plusieurs CPT : vol PP = ∑ vol CPT
  - si 1 CPT / plusieurs PP : vol PP = vol CPT / nb PP

Fichiers de la DDT 82 :

- Exclusion des PP situés en dehors du modèle.

Un travail de croisement entre les fichiers AEAG et les fichiers de la DDT 82 a ensuite été réalisé. Les champs ayant fait l'objet d'un rapprochement sont décrits dans le Tableau A12-1.

Fichiers D.D.T. 82	Fichiers de l'AEAG
Noms champs	Noms champs
Commune	Commune
Lieu-dit	Lieu-dit
Nom du propriétaire	Redevable
Cours d'eau	Code Cours d'eau

Tableau A12-1 – Croisement des champs entre les fichiers de prélèvements pour l'irrigation

Difficultés rencontrées :

- Certains PP des fichiers de la DDT 82 sont absents de la base AEAG (volumes < 10 000 m^3/an ou non déclarés) : ces prélèvements ne pourront pas être comptabilisés dans le modèle.

- La géolocalisation à partir du lieu-dit ou de l'adresse de l'intervenant implique des incertitudes.

- Une hypothèse de base a été utilisée pour réaliser ce travail : les PP IRR situés dans la zone d'affleurement des alluvions sont considérés comme des ouvrages prélevant en nappe alluviale (bien que l'information sur la profondeur des PP soit, la plupart du temps, absente).

Usage « AEP » (Alimentation en Eau Potable)

Les deux types de données utilisées sont :

- Le fichier issu du travail de mise en cohérence des bases de données de l'ARS, du BRGM et de l'AEAG, pour les 8 années étudiées.

- L'export de la base AEAG pour l'usage AEP, avec coordonnées des points de prélèvements.

Les fichiers de prélèvements ont en fait été générés à partir de l'export de l'AEAG, dans la mesure où le fichier de croisement du BRGM ne comprend pas les codes AEAG et où les fichiers d'export récupérés auprès de l'AEAG intègrent la géolocalisation des points.

Le travail de croisement a été réalisé de la façon suivante :

- Croisement des fichiers Agence « POINTS_DESCRIPTIF » et « POINTS_VOLUMES » via ACCESS.

- Rapide vérification avec le fichier mise en cohérence PP ARS/BSS/AEAG : tous les PP AEAG ne sont pas présents et inversement.

- Exclusion des PP situés en dehors du modèle.

- Exclusion des PP de profondeur supérieure à 50m et de ceux signalés en nappes captives (NAPC).

- Les PP dénommés « réalimentation de nappe » ont été considérés comme en eau superficielle (ESU).

Difficultés rencontrées :

Deux PP restent pour le moment géolocalisés au centroïde de la commune. Il s'agit en fait de points d'arrosages des espaces verts publics. Des éléments de localisation plus précis sont recherchés par l'AEAG.

Usage « industries »

Les deux types de données utilisées sont :

- Le fichier des prélèvements industriels annuels déclarés à l'AEAG.
- Les fichiers « Industries » de la DREAL. Ils sont de deux types :

    - Le fichier « INERIS » du Tarn-et-Garonne contient des informations sur :

        - Les volumes annuels prélevés en eaux de surface, eaux souterraines et réseau de distribution par établissement industriel ;
        - Le nom de l'établissement ;
        - La commune de l'établissement.

    - Le fichier « GEREP » du Tarn-et-Garonne, qui concerne les volumes d'eau transitant dans les stations d'épuration (industrielles) qui comprend les informations suivants :

        - Volumes en m3/an (année 2012) prélevés en eaux de surface, en eaux souterraines et en réseau (ainsi que les volumes rejetés en 2012) ;
        - Le nom de l'établissement ;
        - La commune de l'établissement ;
        - Les coordonnées X, Y de l'établissement.

Les rejets industriels dans les eaux souterraines ont également été comptabilisés en tant que débits d'injection dans le modèle.

Le travail de croisement des fichiers a consisté en :

- Croisement des fichiers Agence « POINTS_DESCRIPTIF » et « POINTS_VOLUMES » via ACCESS et comparaison avec fichiers INERIS et GEREP (eaux souterraines).

- X,Y géolocalisés au centroïde de la commune complétés à partir du lieu-dit ou des fichiers INERIS/GEREP.

- Ajout de 2 PP présents dans le fichier INERIS et absents du fichier AEAG (IPPINERIS_1 et 2 pour 2010-2011-2012).

- Exclusion des PP situés en dehors du modèle.

Difficultés rencontrées :

La géolocalisation à partir du lieu-dit ou de l'adresse de l'intervenant implique des incertitudes.

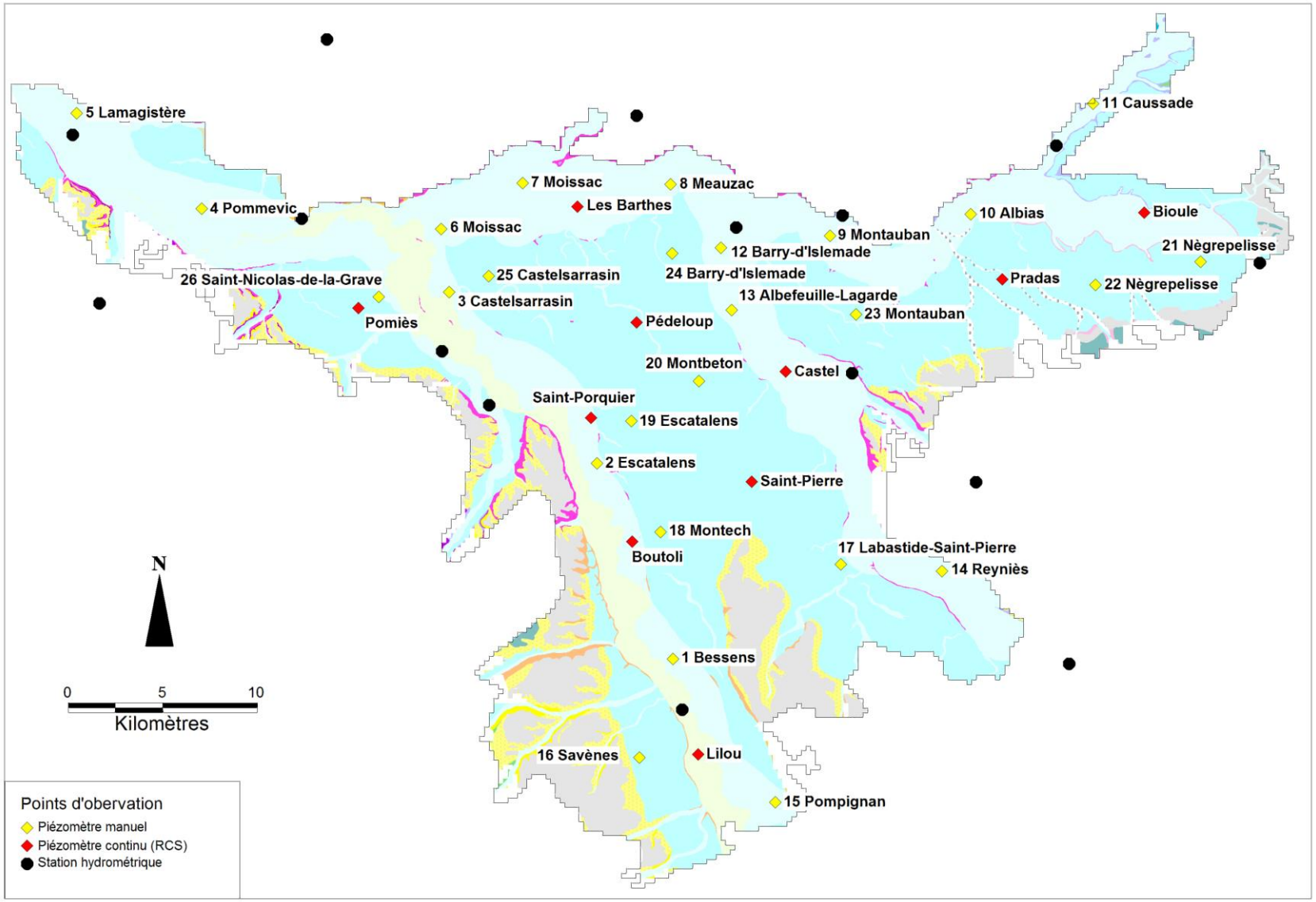
Cas particulier pour la centrale nucléaire de Golfech :

Le canal de Golfech n'étant pas représenté dans le réseau hydrographique du modèle, deux PP fictifs ont été créés, correspondant :

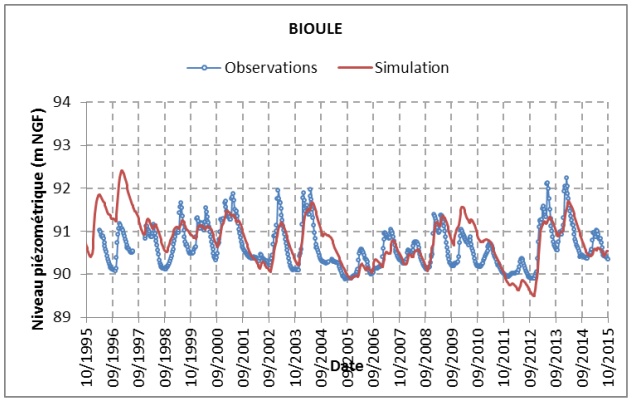
- Au volume prélevé dans le canal de Golfech pour le refroidissement, géolocalisé au niveau de la dérivation de la Garonne vers le canal de Golfech (barrage de Malause).
- Au volume rejeté dans le canal de Golfech après le refroidissement, géolocalisé au niveau de la confluence de la Garonne et du canal de Golfech.

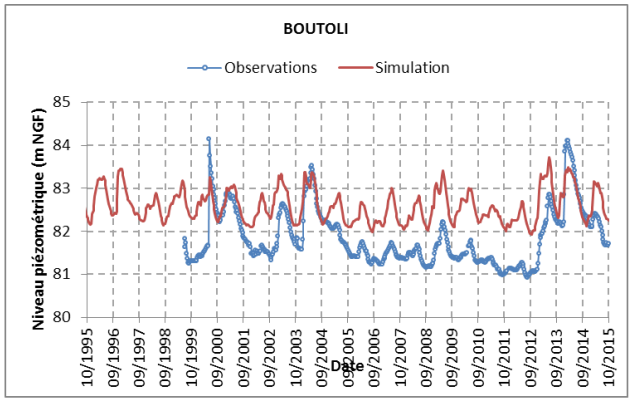
Annexe 13

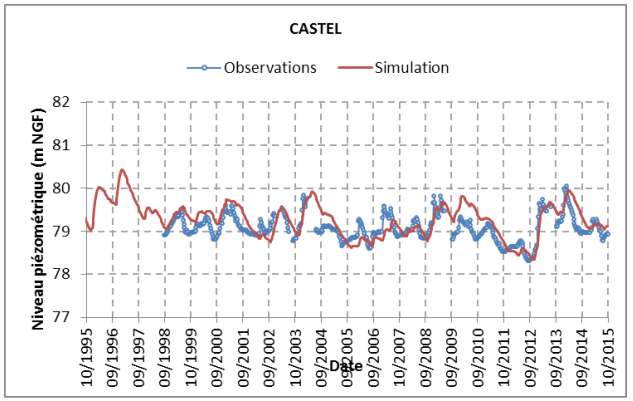
Chroniques de calage des niveaux piézométriques

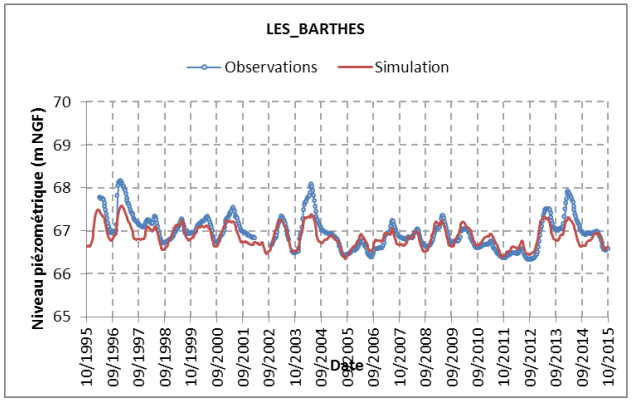

5 Lamagistère
11 Caussade
7 Moissac
8 Meauzac
Les Barthes
4 Pommevic
10 Albias
Bioule
6 Moissac
9 Montauban
12 Barry-d'Islemade
21 Nègrepelisse
25 Castelsarrasin
24 Barry-d'Islemade
26 Saint-Nicolas-de-la-Grave
Pradas
22 Nègrepelisse
3 Castelsarrasin
13 Albefeuille-Lagarde
Pomiès
Pédeloup
23 Montauban
20 Montbeton
Castel
Saint-Porquier
19 Escatalens
2 Escatalens
Saint-Pierre
18 Montech
Boutoli
17 Labastide-Saint-Pierre
14 Reyniès
N
1 Bessens
0
5
10
Kilomètres
16 Savènes
Lilou
15 Pompignan
Points d'obervation
Piézomètre manuel
Piézomètre continu (RCS)
Station hydrométrique

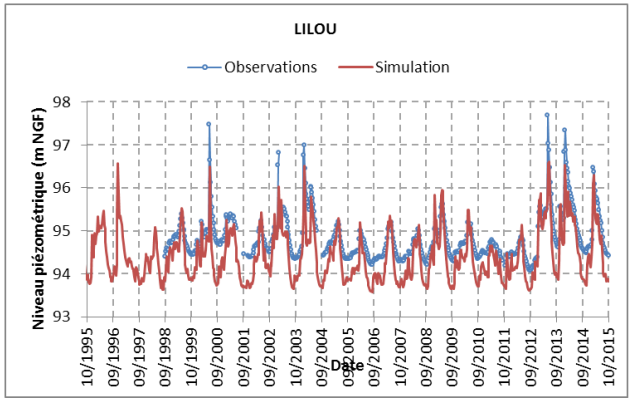
Piézomètres suivis en continu (réseau RCS de l'Onéma, géré par le BRGM)

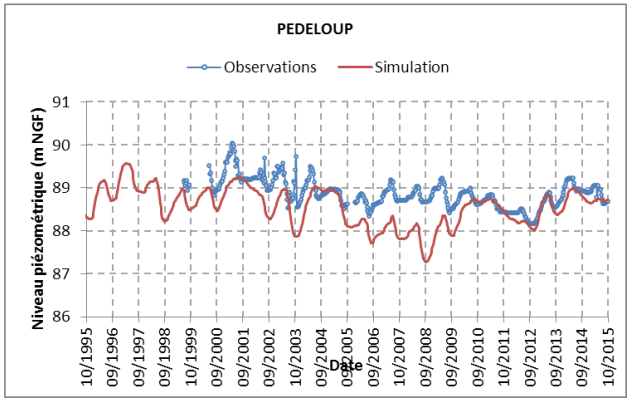


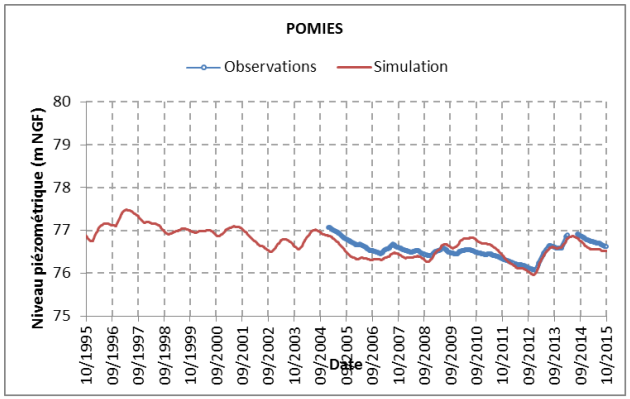


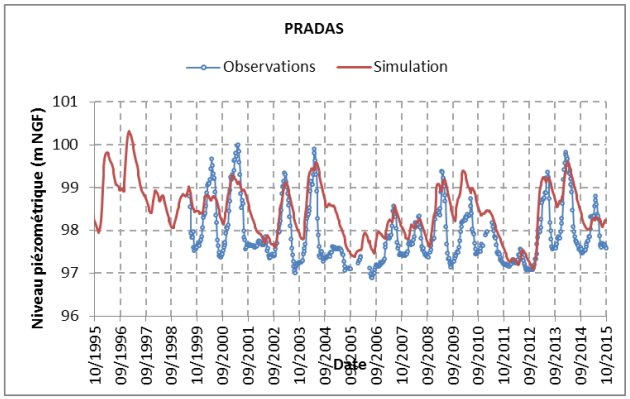


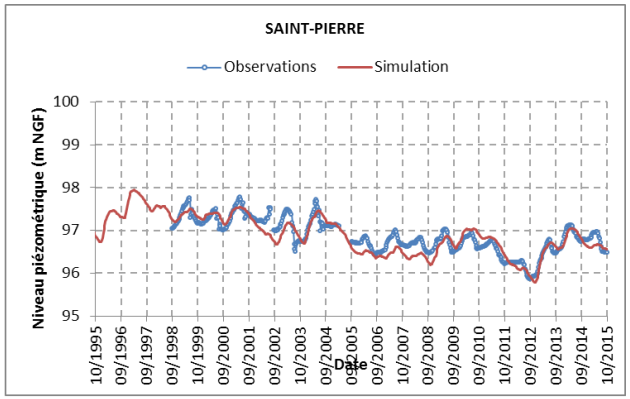


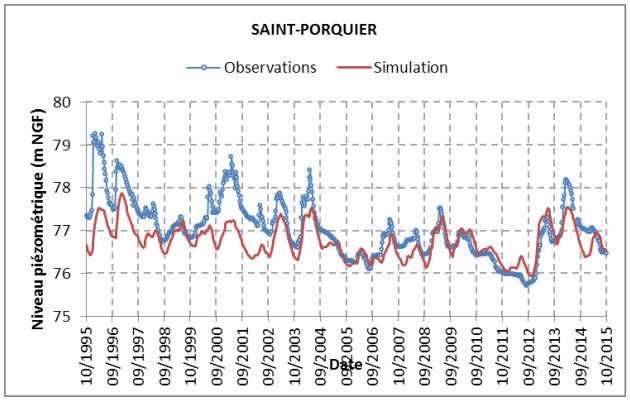




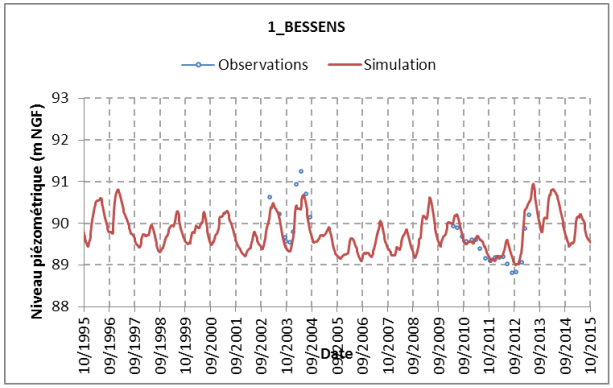

POMIES
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
80
79
78
77
76
75
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015
Date

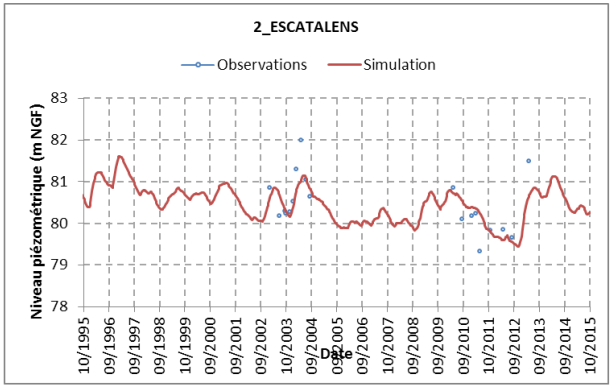

PRADAS
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
101
100
99
98
97
96
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015
Date

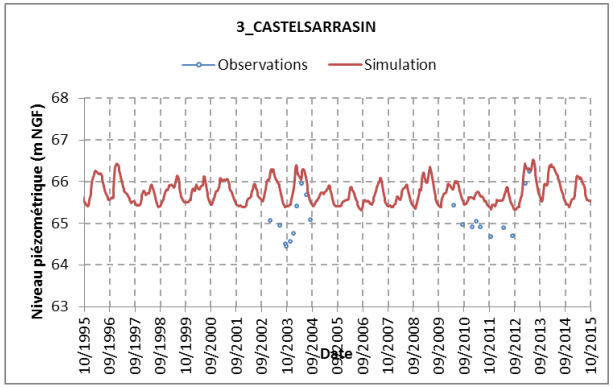

SAINT-PIERRE
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
100
99
98
97
96
95
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015
Date

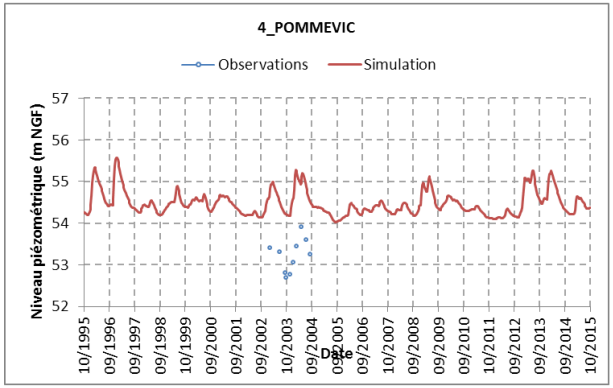

SAINT-PORQUIER
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
80
79
78
77
76
75
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015
Date

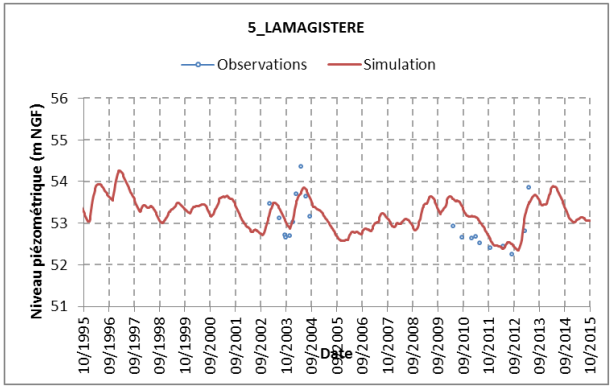
Piézomètres suivis manuellement (par le BRGM, puis par la DDT 82)

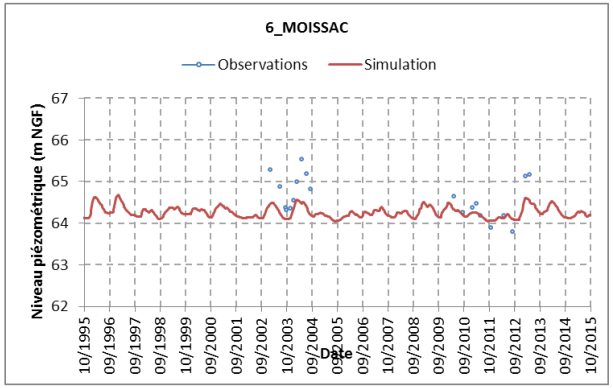


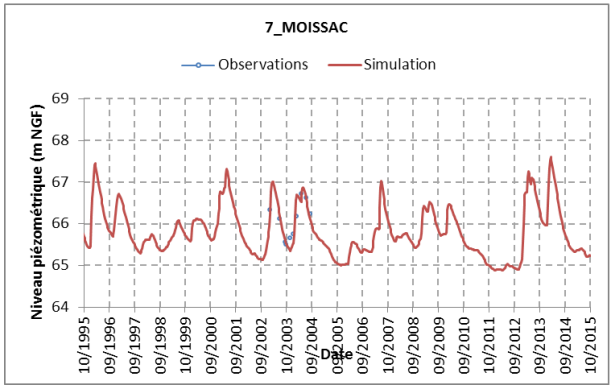


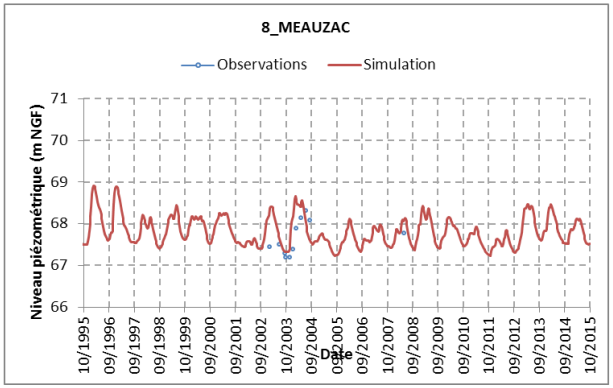


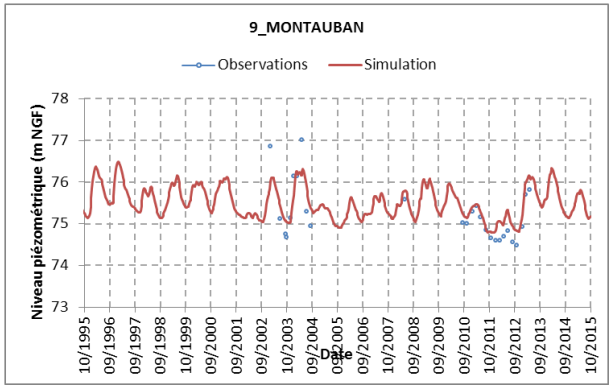


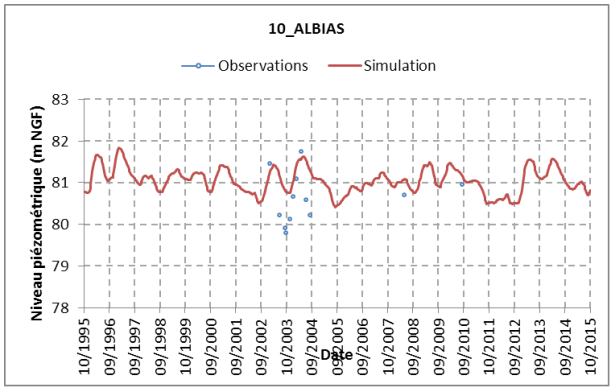


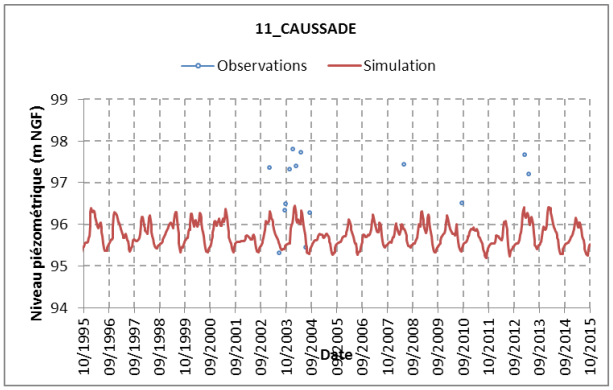


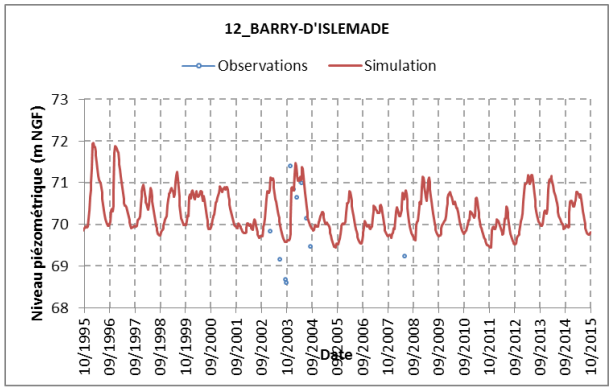


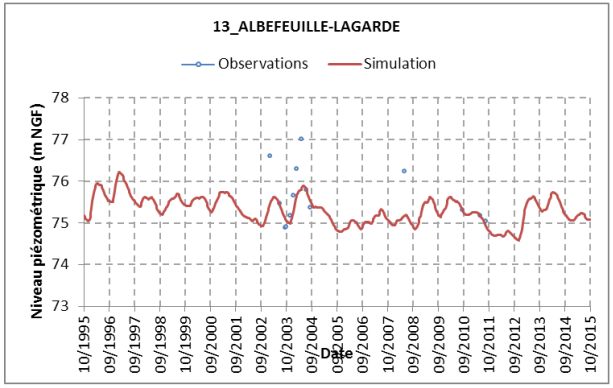


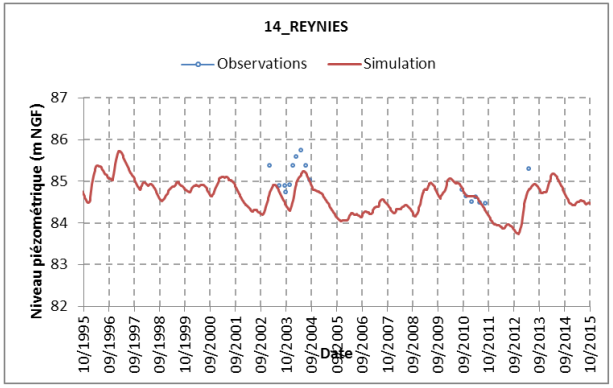


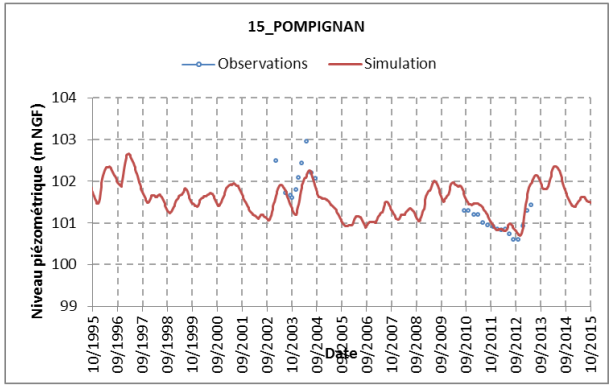

10_ALBIAS
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
Date

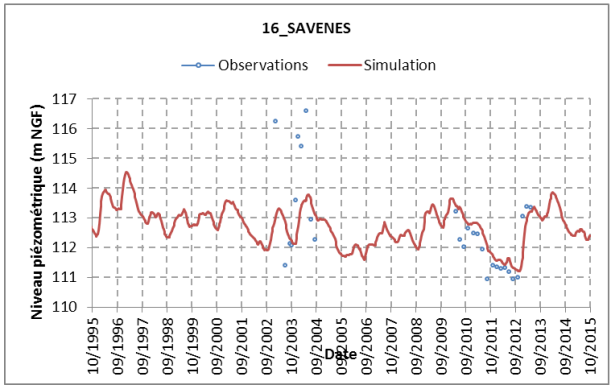

11_CAUSSADE
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
Date

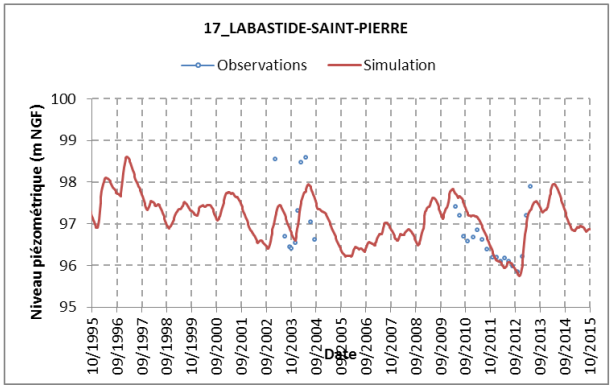

12_BARRY-D'ISLEMADE
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
Date

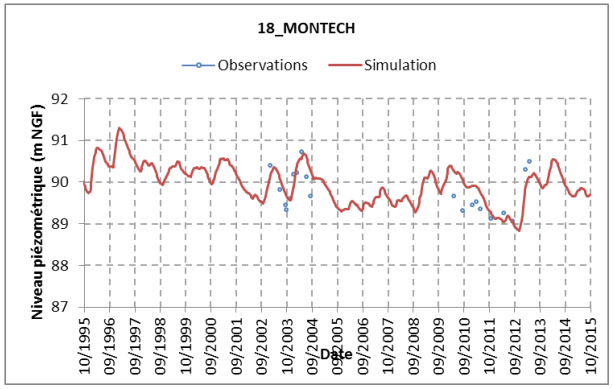

13_ALBEFEUILLE-LAGARDE
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
Date

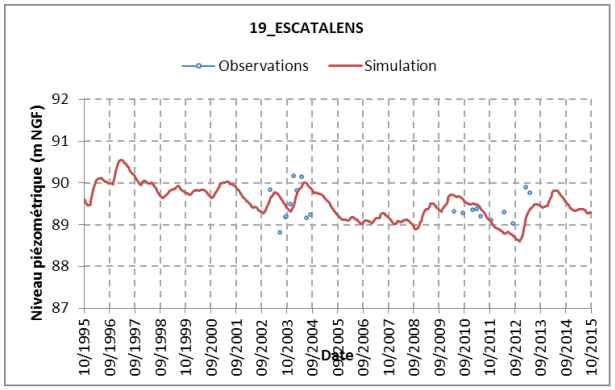

14_REYNIES
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
Date

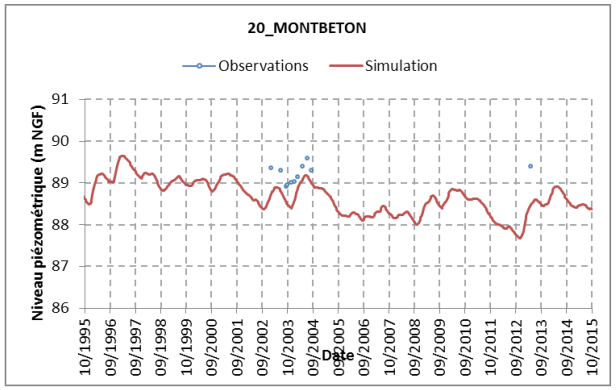

15_POMPIGNAN
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
Date

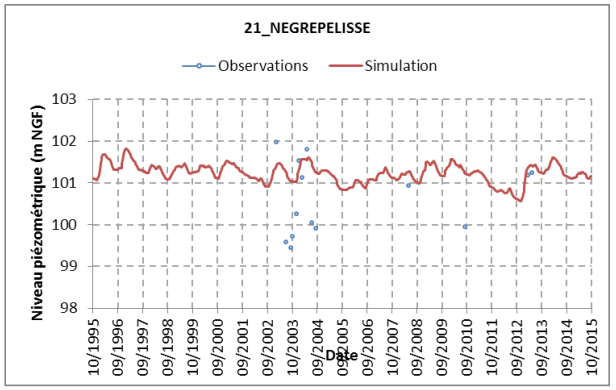

16_SAVENES
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
Date

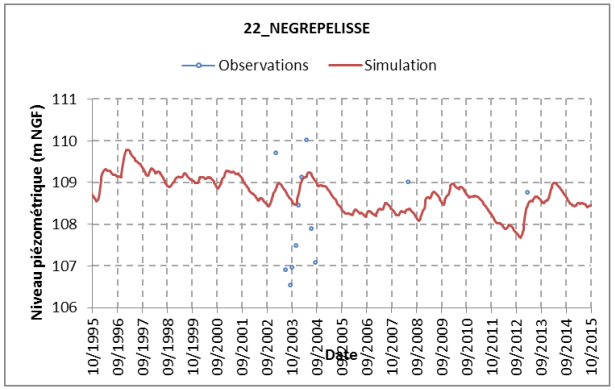

17_LABASTIDE-SAINT-PIERRE
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
Date

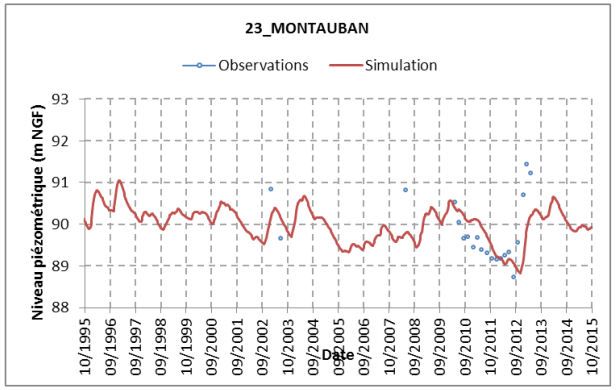

18_MONTECH
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
Date

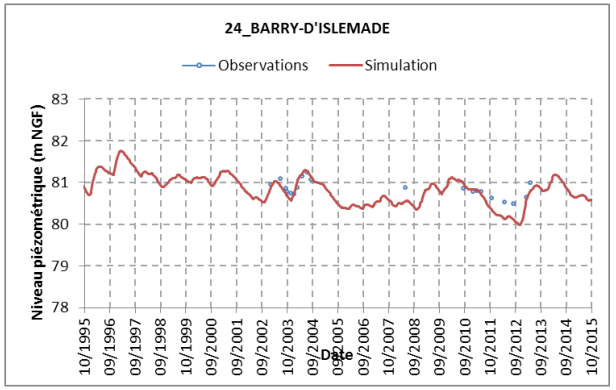

19_ESCATALENS
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
92
91
90
89
88
87
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015
Date

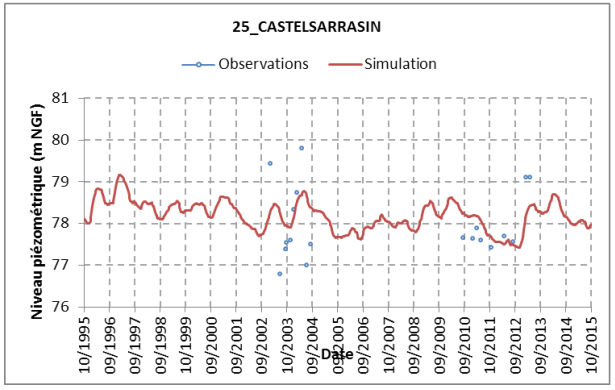

20_MONTBETON
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
91
90
89
88
87
86
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015
Date

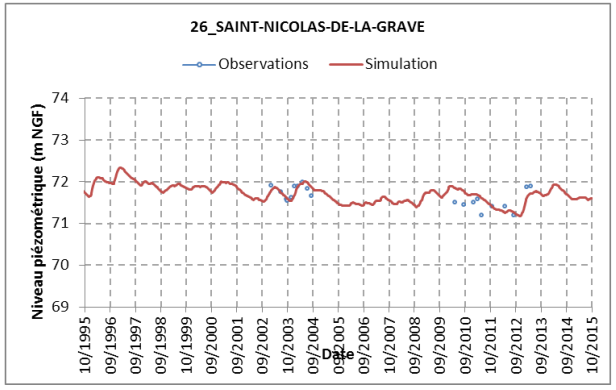

21_NEGREPELISSE
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
103
102
101
100
99
98
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015
Date


22_NEGREPELISSE
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
111
110
109
108
107
106
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015
Date


23_MONTAUBAN
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
93
92
91
90
89
88
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015
Date

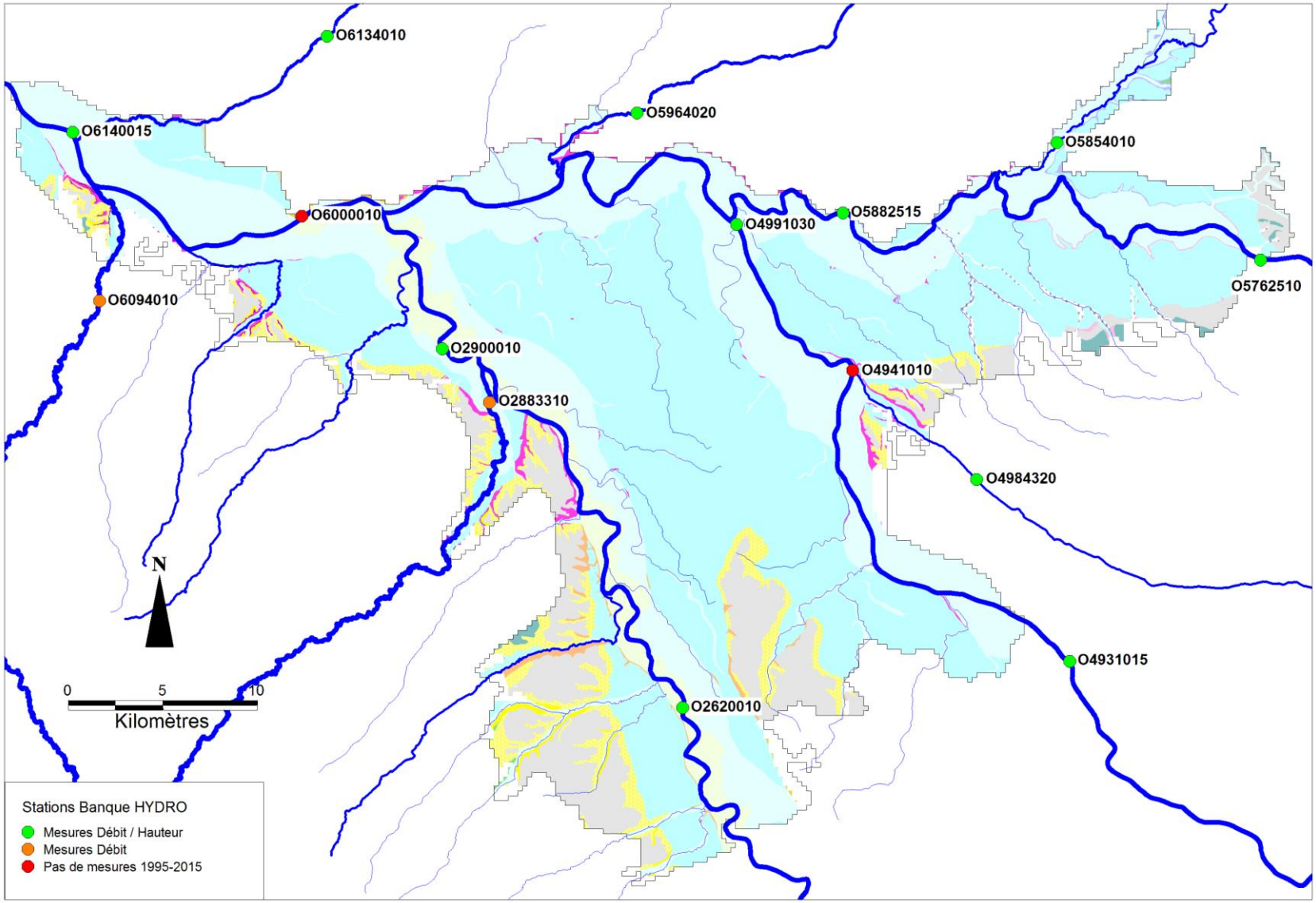

24_BARRY-D'ISLEMADE
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
83
82
81
80
79
78
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015
Date

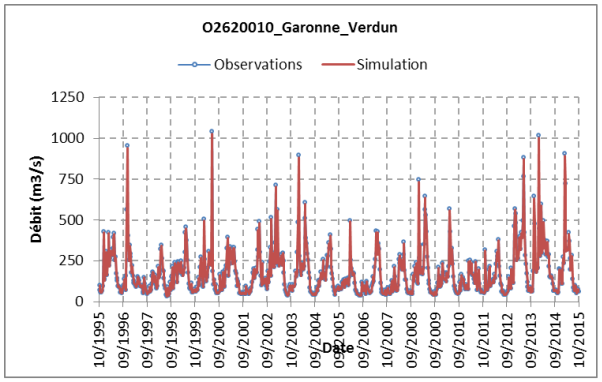

25_CASTELSARRASIN
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
81
80
79
78
77
76
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015
Date

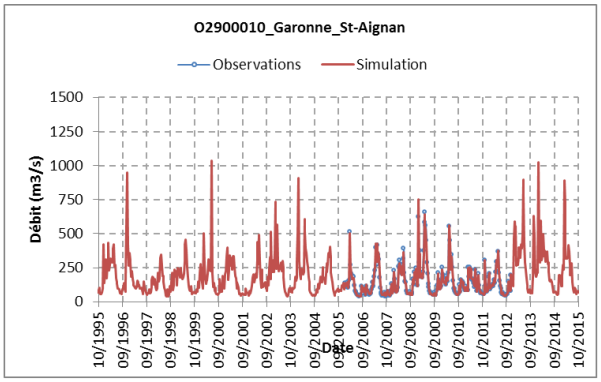

26_SAINT-NICOLAS-DE-LA-GRAVE
Observations
Simulation
Niveau piézométrique (m NGF)
74
73
72
71
70
69
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015
Date

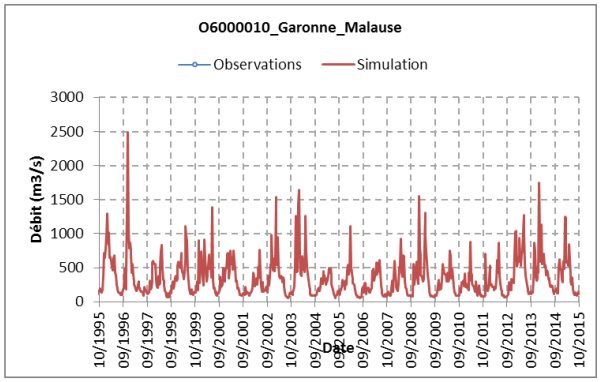
Annexe 14

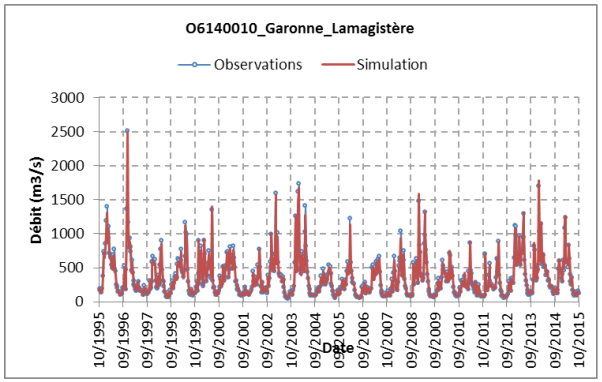
Chroniques de calage des débits en rivières

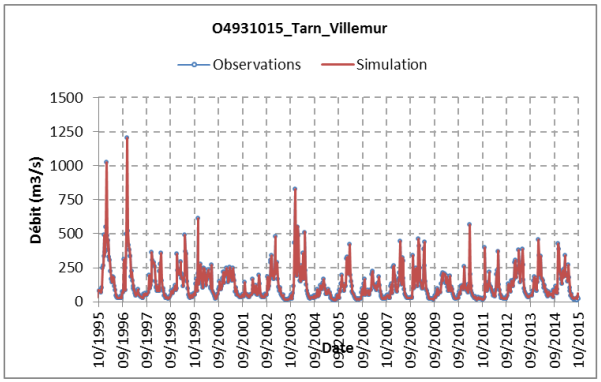

O6134010
O6140015
O5964020
O5854010
O6000010
O4991030
O5882515
O6094010
O5762510
O2900010
O4941010
O2883310
O4984320
N
0
5
10
Kilomètres
O4931015
O2620010
Stations Banque HYDRO
Mesures Débit / Hauteur
Mesures Débit
Pas de mesures 1995-2015

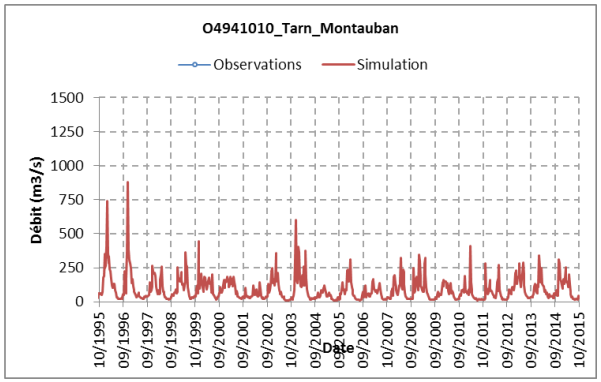

O2620010_Garonne_Verdun
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date

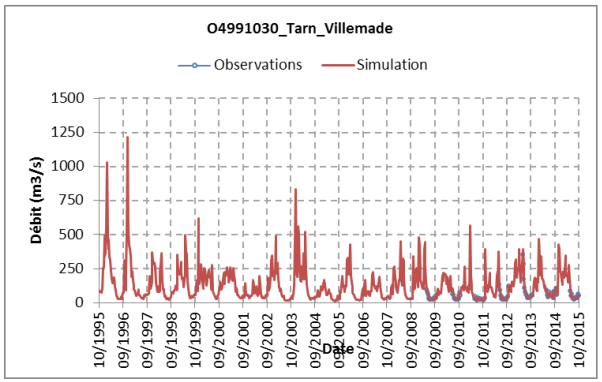

O2900010_Garonne_St-Aignan
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date

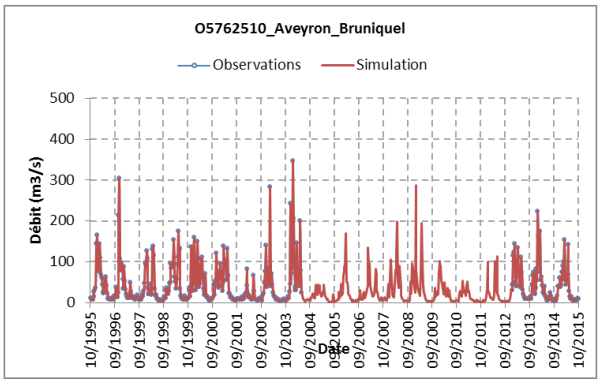

O6000010_Garonne_Malause
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date

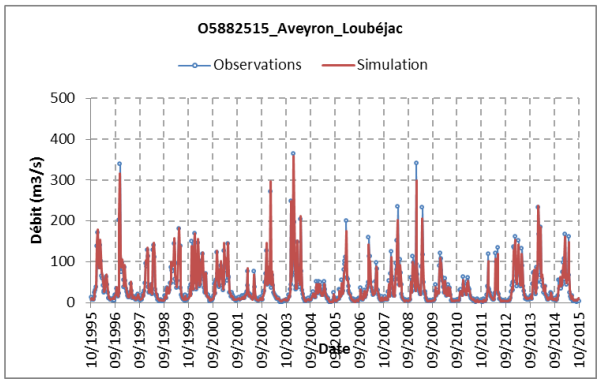

O6140010_Garonne_Lamagistère
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date

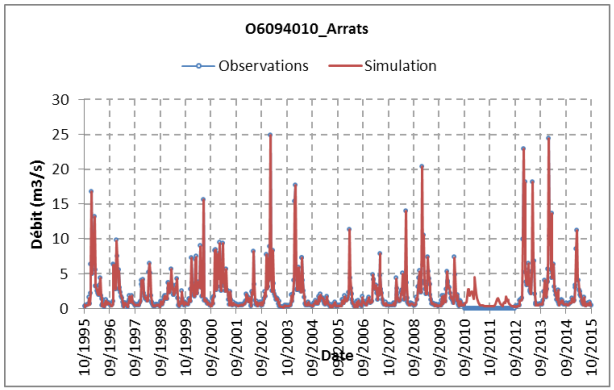

O4931015_Tarn_Villemur
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date

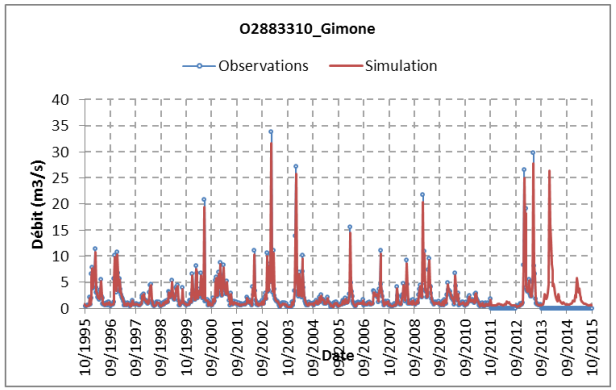

O4941010_Tarn_Montauban
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date

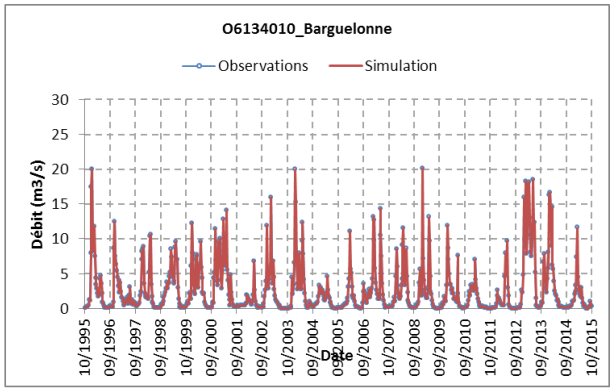

O4991030_Tarn_Villemade
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date

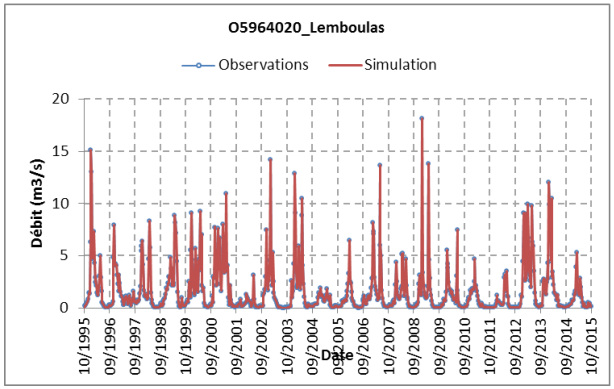

O5762510_Aveyron_Bruniquel
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date

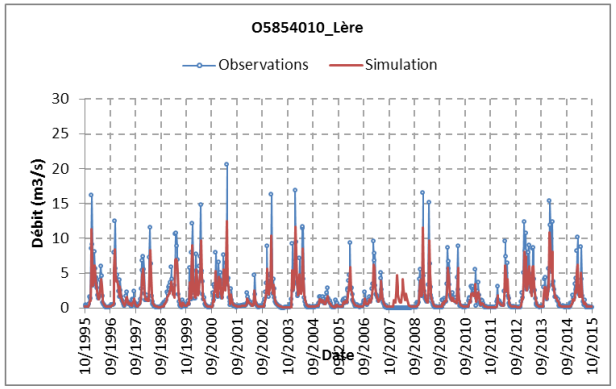

O5882515_Aveyron_Loubéjac
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date

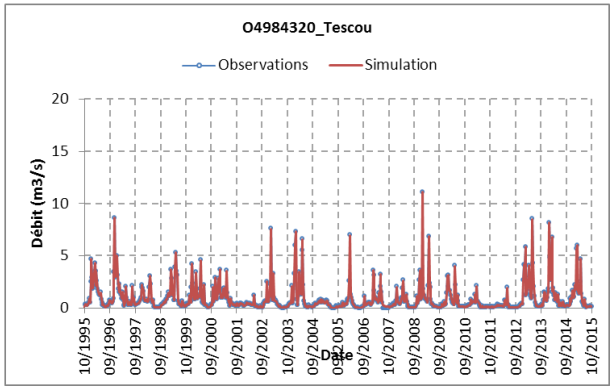

O6094010_Arrats
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date


O2883310_Gimone
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date


O6134010_Barguelonne
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date

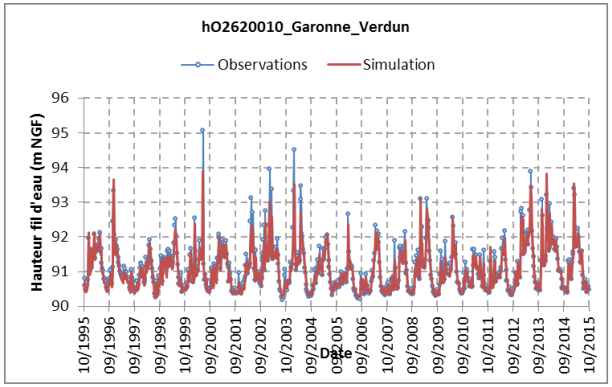

O5964020_Lemboulas
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date

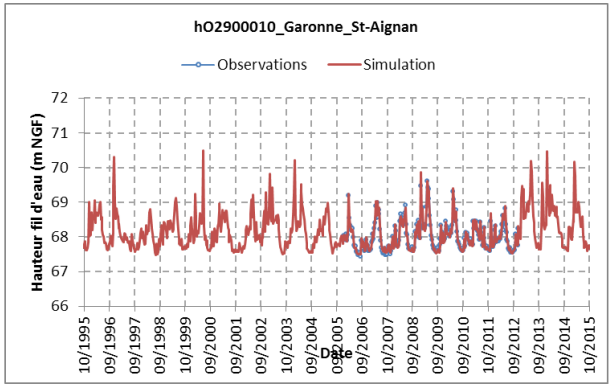

O5854010_Lère
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date

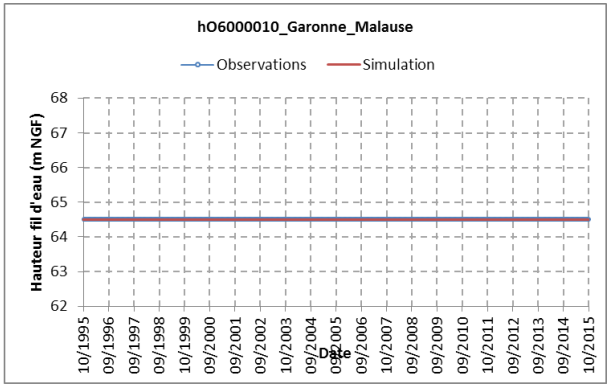

O4984320_Tescou
Observations
Simulation
Débit (m3/s)
Date

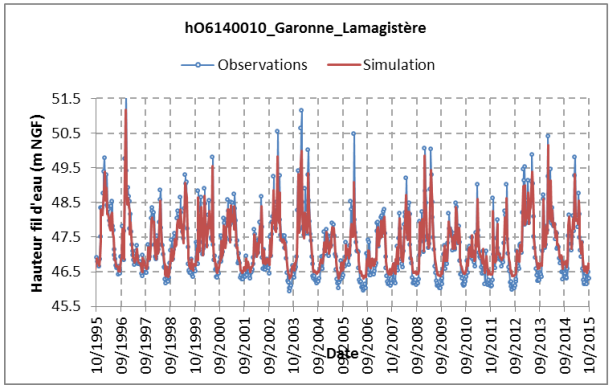
Annexe 15

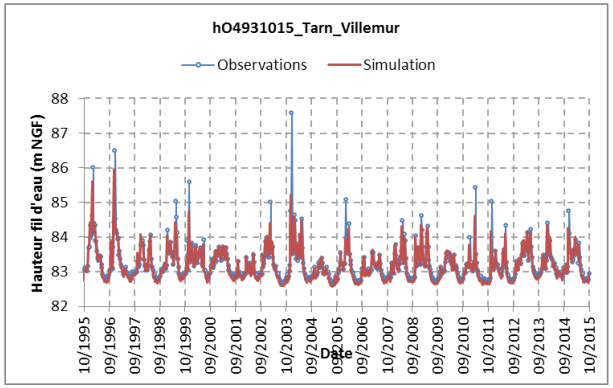
Chroniques de calage des hauteurs d’eau en rivières

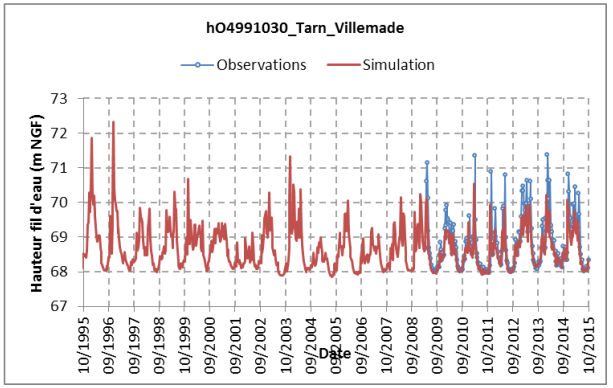

hO2620010_Garonne_Verdun
Observations
Simulation
Hauteur fil d'eau (m NGF)
Date

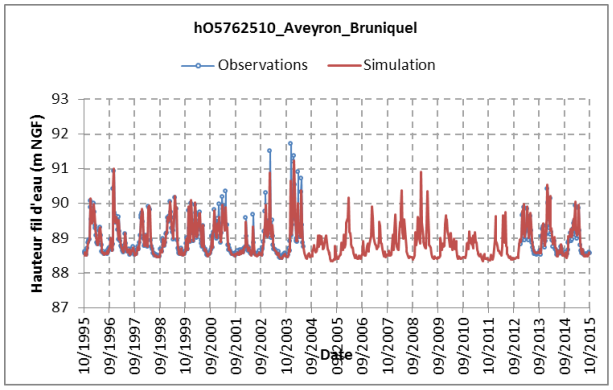

hO2900010_Garonne_St-Aignan
Observations
Simulation
Hauteur fil d'eau (m NGF)
Date

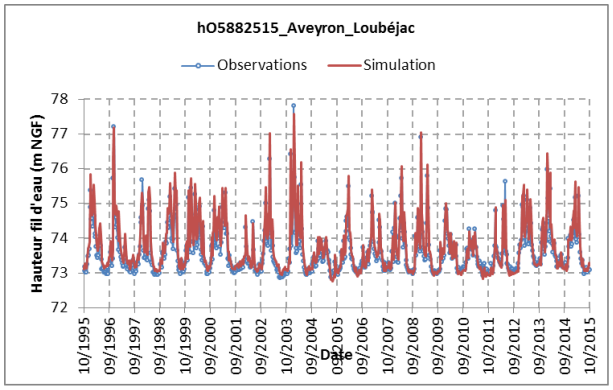

hO6000010_Garonne_Malause
Observations
Simulation
Hauteur fil d'eau (m NGF)
Date

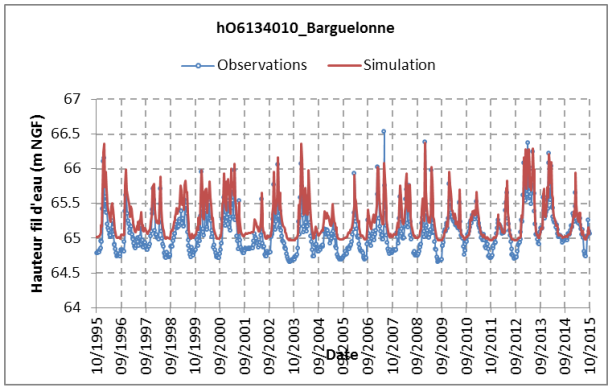

hO6140010_Garonne_Lamagistère
Observations
Simulation
Hauteur fil d'eau (m NGF)
Date

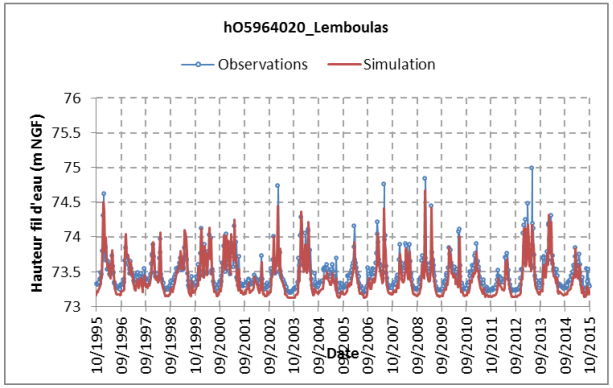

hO4931015_Tarn_Villemur
Observations
Simulation
Hauteur fil d'eau (m NGF)
Date

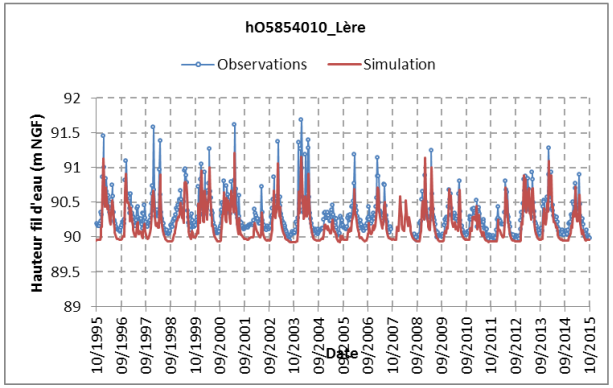

hO4991030_Tarn_Villemade
Observations
Simulation
Hauteur fil d'eau (m NGF)
Date

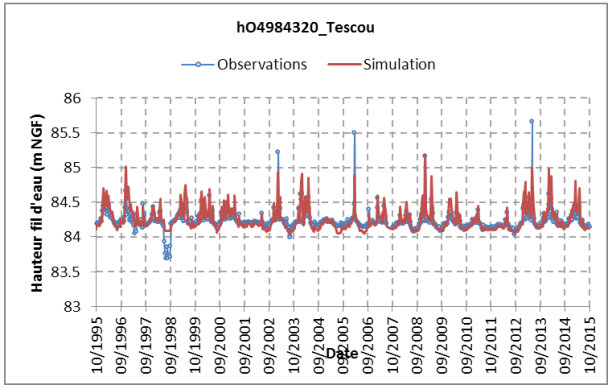

hO5762510_Aveyron_Bruniquel
Observations
Simulation
Hauteur fil d'eau (m NGF)
Date


hO5882515_Aveyron_Loubéjac
Observations
Simulation
Hauteur fil d'eau (m NGF)
Date


hO6134010_Barguelonne
Observations
Simulation
Hauteur fil d'eau (m NGF)
Date

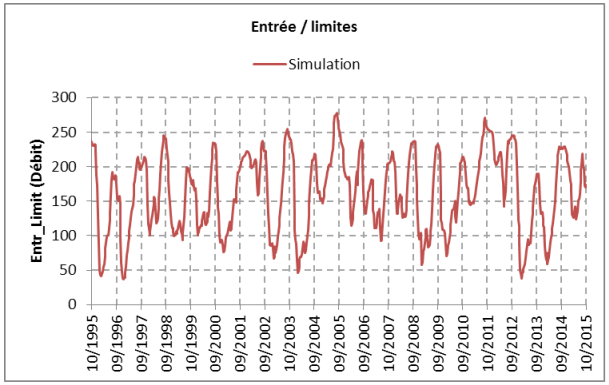

hO5964020_Lemboulas
Observations
Simulation
Hauteur fil d'eau (m NGF)
Date

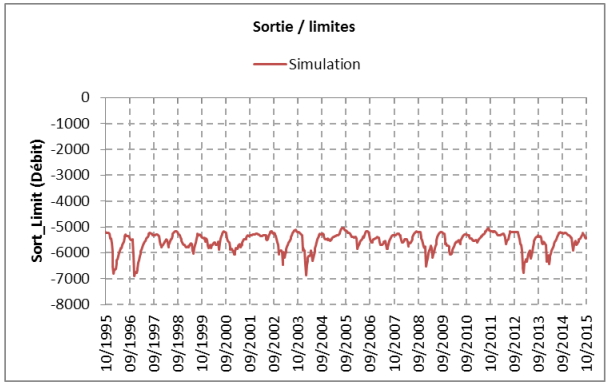

hO5854010_Lère
Observations
Simulation
Hauteur fil d'eau (m NGF)
Date

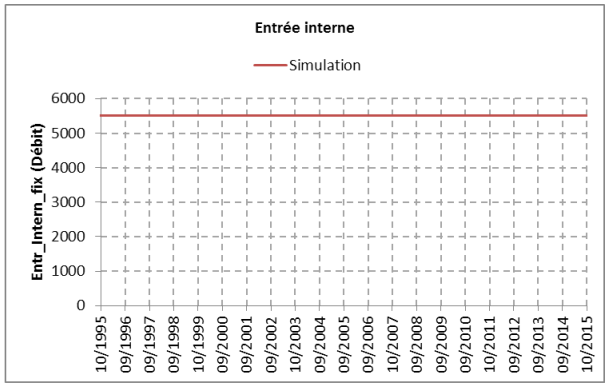

hO4984320_Tescou
Observations
Simulation
Hauteur fil d'eau (m NGF)
Date

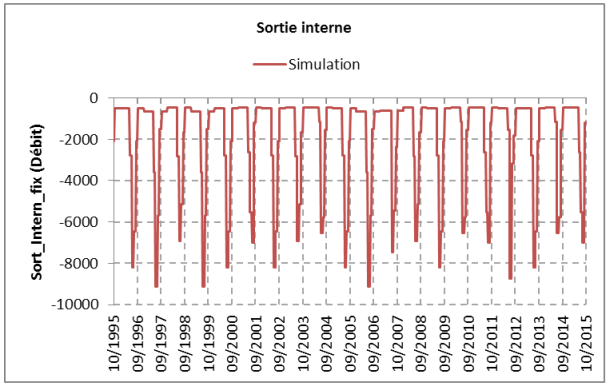
Annexe 16

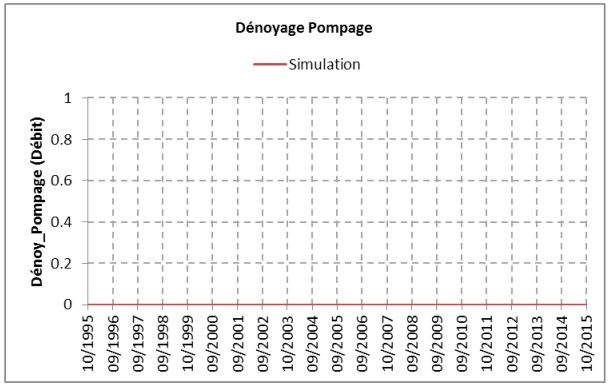
Composantes du bilan hydrologique

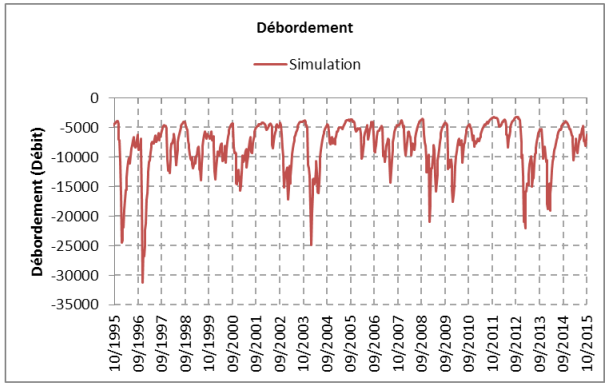

Entrée / limites
Simulation
Entr_Limit (Débit)
300
250
200
150
100
50
0
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

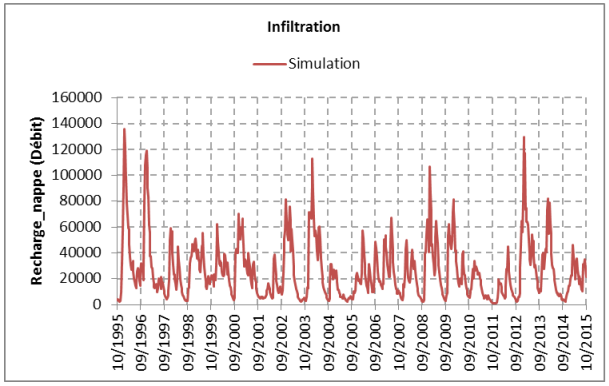

Sortie / limites
Simulation
Sort_Limit (Débit)
0
-1000
-2000
-3000
-4000
-5000
-6000
-7000
-8000
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

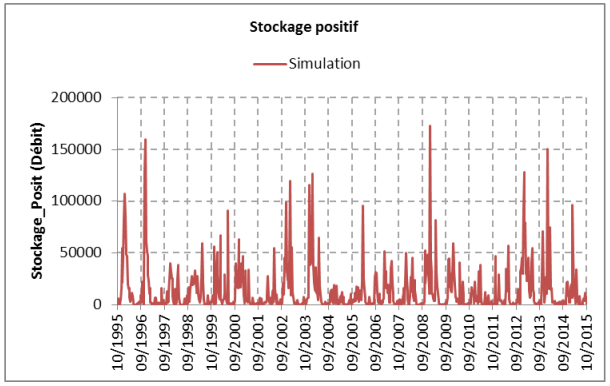

Entrée interne
Simulation
Entr_Intern_fix (Débit)
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

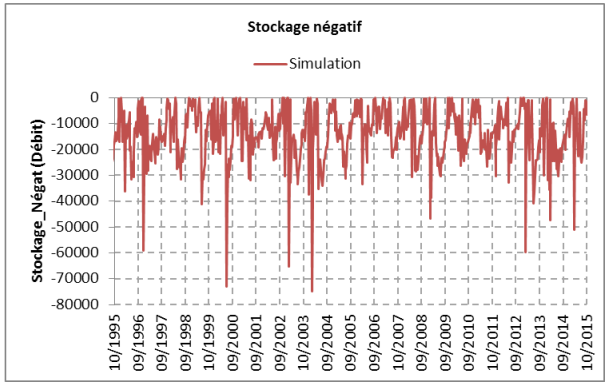

Sortie interne
Simulation
Sort_Intern_fix (Débit)
0
-2000
-4000
-6000
-8000
-10000
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

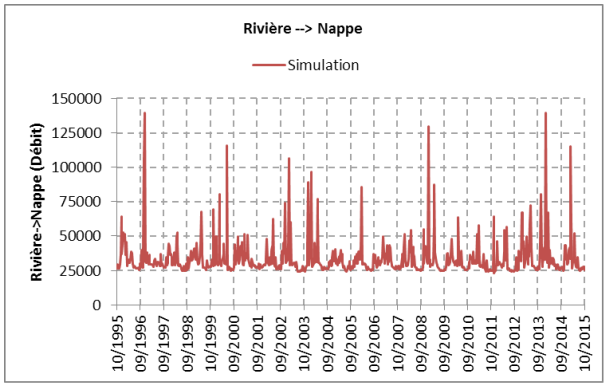

Dénoyage Pompage
Simulation
Dénoy_Pompage (Débit)
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

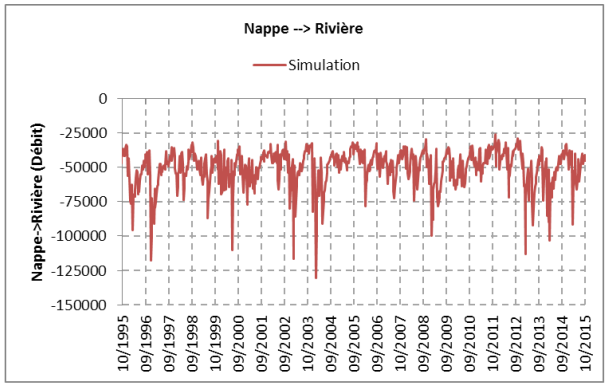

Débordement
Simulation
Débordement (Débit)
0
-5000
-10000
-15000
-20000
-25000
-30000
-35000
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

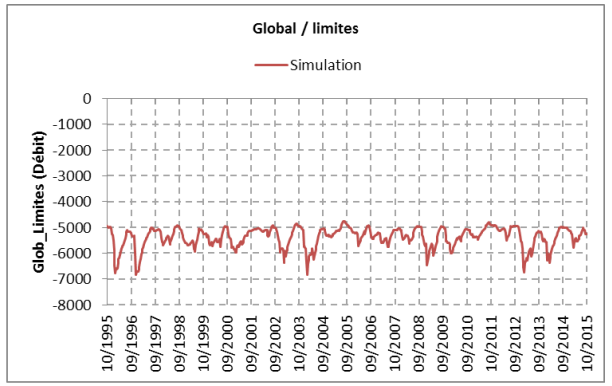

Infiltration
Simulation
Recharge_nappe (Débit)
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

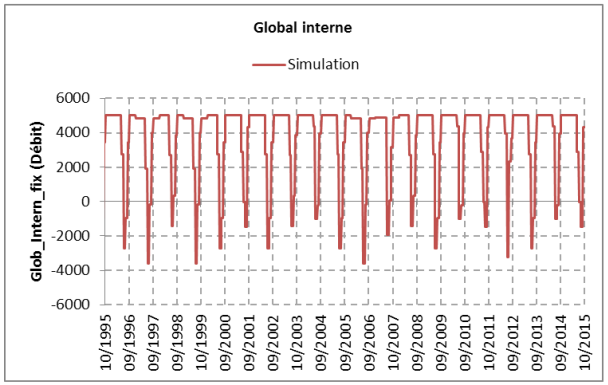

Stockage positif
Simulation
Stockage_Posit (Débit)
200000
150000
100000
50000
0
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

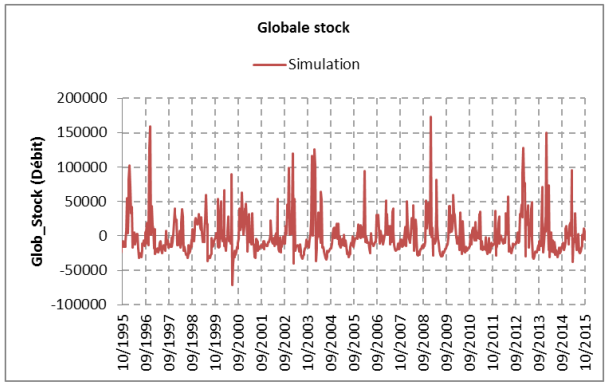

Stockage négatif
Simulation
Stockage_Négat (Débit)
0
-10000
-20000
-30000
-40000
-50000
-60000
-70000
-80000
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

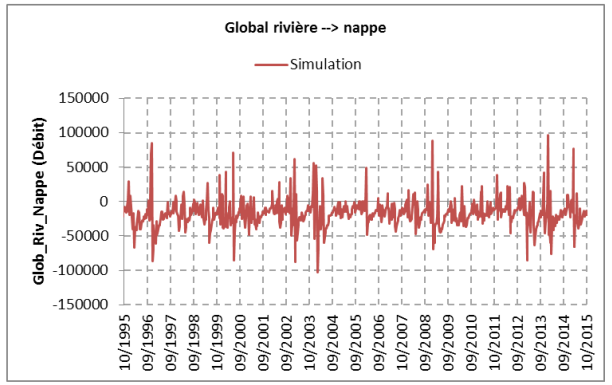

Rivière --> Nappe
Simulation
Rivière->Nappe (Débit)
150000
125000
100000
75000
50000
25000
0
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

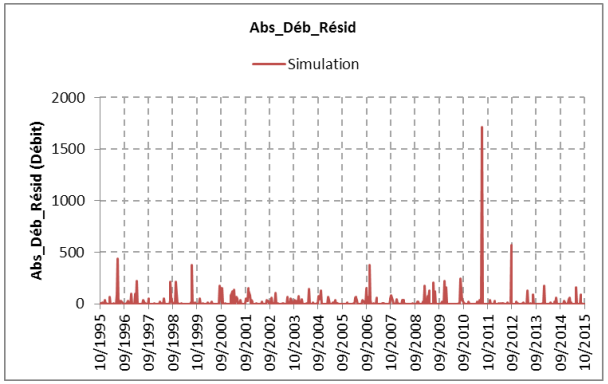

Nappe --> Rivière
Simulation
Nappe->Rivière (Débit)
0
-25000
-50000
-75000
-100000
-125000
-150000
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

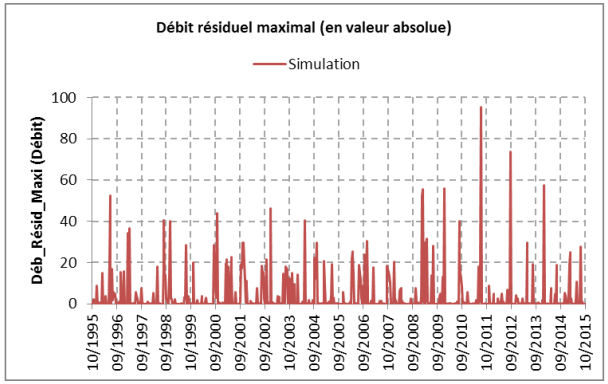

Global / limites
Simulation
Glob_Limites (Débit)
0
-1000
-2000
-3000
-4000
-5000
-6000
-7000
-8000
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

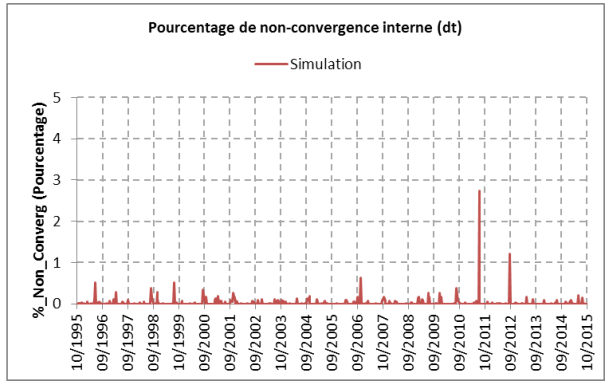

Global interne
Simulation
Glob_Intern_fix (Débit)
6000
4000
2000
0
-2000
-4000
-6000
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

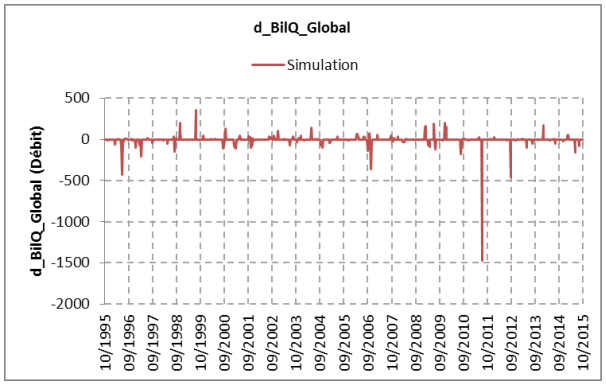

Globale stock
Simulation
Glob_Stock (Débit)
200000
150000
100000
50000
0
-50000
-100000
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

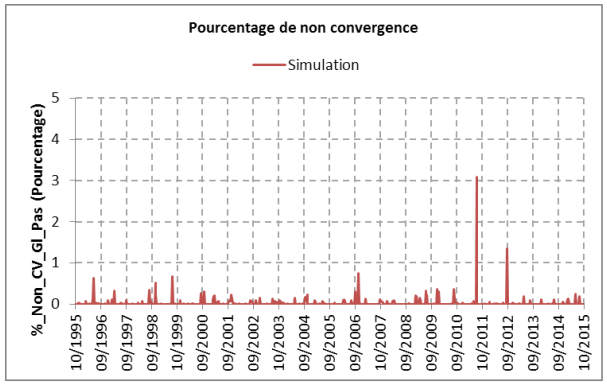

Global rivière --> nappe
Simulation
Glob_Riv_Nappe (Débit)
150000
100000
50000
0
-50000
-100000
-150000
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

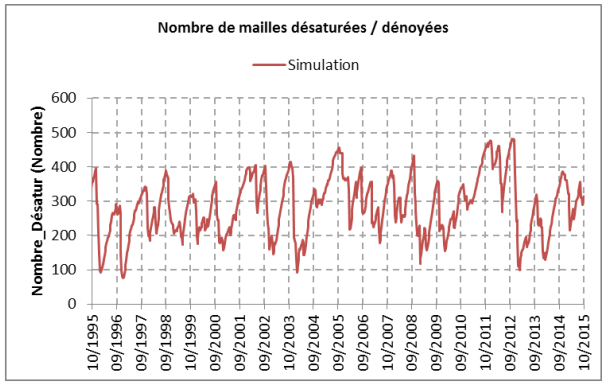

Abs_Déb_Résid
Simulation
Abs_Déb_Résid (Débit)
2000
1500
1000
500
0
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

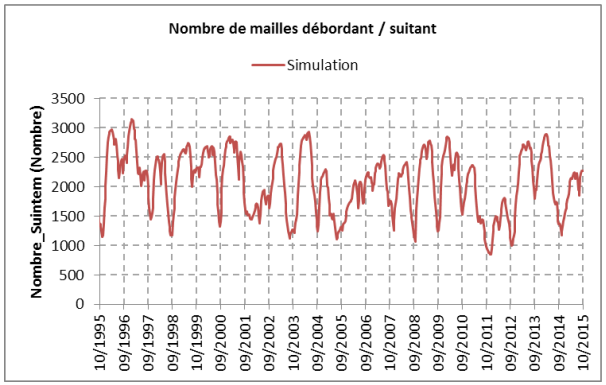

Débit résiduel maximal (en valeur absolue)
Simulation
Déb_Résid_Maxi (Débit)
100
80
60
40
20
0
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015


Pourcentage de non-convergence interne (dt)
Simulation
%_Non_Converg (Pourcentage)
5
4
3
2
1
0
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015


d_BilQ_Global
Simulation
d_BilQ_Global (Débit)
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015


Pourcentage de non convergence
Simulation
%_Non_CV_Gl_Pas (Pourcentage)
5
4
3
2
1
0
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015


Nombre de mailles désaturées / dénoyées
Simulation
Nombre_Désatur (Nombre)
600
500
400
300
200
100
0
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015


Nombre de mailles débordant / suitant
Simulation
Nombre_Suintem (Nombre)
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
10/1995
09/1996
09/1997
09/1998
10/1999
09/2000
09/2001
09/2002
10/2003
09/2004
09/2005
09/2006
10/2007
09/2008
09/2009
09/2010
10/2011
09/2012
09/2013
09/2014
10/2015

Annexe 17

Délimitation de la nappe d'accompagnement – Méthode de Theis simplifié et Darcy

2.4. FACTEURS DE NATURE HYDRODYNAMIQUE

Les différents facteurs de nature hydrodynamique qui interviennent dans les relations nappes/rivières sont :
- coefficient de perméabilité K, s'exprimant en m/s (dimension d'une vitesse)
- l'épaisseur de zone saturée h, en m
- la transmissivité T, égale au produit K x h. Pour un point donné, elle est constante dans le temps pour une nappe en charge (h constant). Pour une nappe libre elle peut varier en fonction de h.
- le coefficient d'emmagasinement total S (sans dimension). C'est le volume d'eau libéré par un prisme vertical d'aquifère, par section unité (1m²) et par baisse de pression unité (1 m). Pour une nappe libre il est égal à la porosité efficace. Pour une nappe en charge il est très inférieur à la porosité efficace, du fait du très faible coefficient de compressibilité de l'eau.
- les niveaux piézométriques de la nappe et le niveau de la rivière.
- le débit de la rivière, celui-ci étant fonction du niveau (et donc de la section) de la rivière.
- le temps

Si l'on considère un prélèvement dans la nappe (pompage dans un puits, forage ou tranchée) vont intervenir également :
- le débit de pompage
- la distance du point de prélèvement à la rivière
- la distance du point de prélèvement aux autres limites de la nappe (barrières imperméables ou limites d'alimentation)
- le temps

2.4.1. Effet d'un pompage sur une nappe supposée d'extension infinie

La nappe considérée est :
- homogène
- isotrope
- à surface piézométrique horizontale
- de transmissivité T et de coefficient d'emmagasinement S constants
- d'extension infinie

Un pompage à débit constant Q provoquera en tout point situé à une distance r du puits un rabattement (baisse de niveau) Δh qui est donné, en fonction du temps t, par la formule de Theis :

$$\Delta h = -\frac{Q}{4\Pi T} W(u) \qquad \text{avec } W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \qquad \text{et } u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

(le puits est considéré complet, c'est à dire qu'il traverse toute la nappe)

avec Q en m3/s
T en m2/s
r en mètres
t en secondes
La courbe $W(u) = f(u)$ est appelée la courbe de Theis.
L'équation symbolique du rabattement peut s'écrire $\Delta h = f(Q, r, t)$ t étant le temps écoulé depuis le début du pompage.

2.4.2. Effet de plusieurs pompages

Selon le principe de superposition des écoulements, l'effet de plusieurs pompages sera la somme des effets de chaque pompage.

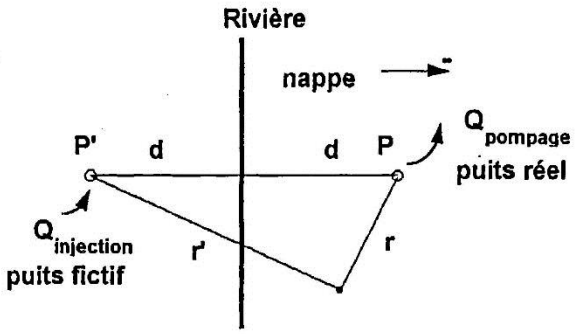
Si on considère n pompages, chacun ayant débuté à un temps t_i , avec un débit Q_i , le rabattement créé au bout d'un temps t par l'ensemble des forages, en un point d'observation situé à une distance r_i de chaque pompage sera donné par l'équation symbolique suivante :

$$\Delta h_n = \sum_1^n \Delta h_i = \sum_1^n f(Q_i, r_i, t - t_i)$$

2.4.3. Effet d'un pompage sur une nappe d'extension semi-infinie limitée par une rivière

Considérons un pompage à un débit Q situé à une distance d d'une rivière. La nappe est toujours supposée horizontale, de même niveau que la rivière, et limitée uniquement par celle-ci, c'est à dire d'extension semi-infinie.

Suivant le principe des images, l'effet de la présence de la rivière (limite de réalimentation) peut être remplacé par celui d'un puits fictif, symétrique du puits de pompage par rapport à la rivière et dans lequel on injecterait le même débit Q à partir du même temps que celui du début du pompage.



Le rabattement en un point situé à une distance r du puits de pompage et r' du puits fictif d'injection sera donné par (superposition des deux rabattements, le second étant négatif) :

$$\Delta h = \frac{Q}{4\Pi T}\left[W(u) - W(u')\right] \qquad \text{avec } W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u}\,du$$

$$\text{et } u = \frac{r^2 S}{4Tt} \qquad \text{et } u' = \frac{r'^2 S}{4Tt}$$

Le gradient hydraulique perpendiculaire à la rivière se calcule en dérivant l'expression ci-dessus dans cette direction. Ensuite par application de la loi de Darcy, et en intégrant le long de la rivière de -∞ à +∞, on peut calculer le flux soustrait à la rivière à un temps t.

Le rapport du débit instantané provenant de la rivière à un temps t au débit pompé est égal à :

$$\frac{q}{Q} = \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{d^2S}{4Tt}}\right)$$ erfc est la fonction-erreur complémentaire

De même on peut calculer le volume cumulé soustrait à la rivière entre les temps 0 (début du pompage) et un temps t, en intégrant l'expression précédente sur le temps. On obtient par rapport au volume pompé cumulé :

$$\frac{v}{V} = (1+2u)\ \text{erfc}\left(\sqrt{u}\right) - 2\sqrt{\frac{u}{\Pi}}.e^{-u}$$

Les valeurs de ces deux rapports qui croissent avec le temps (en débits instantanés et en volumes cumulés) ont été calculés en fonction de l'expression $\frac{4Tt}{Sd^2}$ appelée le temps réduit (sans dimension) et figurent dans le tableau suivant :

Temps réduit 4Tt / Sd²	% de débit instantané Qr /Qp	% de volume cumulé depuis début pompage	Temps réduit 4Tt / Sd²	% de débit instantané Qr /Qp	% de volume cumulé depuis début pompage
0.1	0.0	0.0	130	90.13	81.69
0.13	0.01	0.0	170	91.36	83.83
0.17	0.06	0.01	230	92.57	85.97
0.23	0.32	0.05	300	93.49	87.62
0.30	0.98	0.18	400	94.36	89.21
0.40	2.53	0.56	550	95.19	90.73
0.55	5.65	1.51	750	95.88	92.02
0.75	10.25	3.23	1 000	96.43	93.06
1	15.73	5.68	1 300	96.87	93.89
1.3	21.48	8.68	1 700	97.26	94.64
1.7	27.81	12.46	2 300	97.65	95.38
2.3	35.11	17.47	3 000	97.94	95.95
3.0	41.42	22.36	4 000	98.22	96.48
4.0	47.95	27.99	5 500	98.48	96.99
5.5	54.65	34.41	7 500	98.70	97.42
7.5	60.56	40.65	10 000	98.87	97.76
10	65.47	46.28	13 000	99.01	98.04
13	69.49	51.20	17 000	99.13	98.28
17	73.16	55.96	23 000	99.26	98.52
23	76.81	60.96	30 000	99.35	98.70
30	79.63	65.01	40 000	99.44	98.88
40	82.31	69.02	55 000	99.52	99.04
55	84.88	73.02	75 000	99.59	99.18
75	87.03	76.49	100 000	99.64	99.29
100	88.75	79.36			

REMARQUES IMPORTANTES :

Le tableau précédent, calculé par G. de Marsily en 1968 et déjà calculé par Collins en 1959 avec des unité américaines, permet de calculer les débits instantanés qui **quittent** la rivière (ou les volumes cumulés ayant quitté la rivière) au bout d'un temps t. Mais l'eau correspondante à ces débits (ou volumes) n'est pas encore parvenue au puits de pompage. Elle quitte seulement la rivière et va mettre un certain temps pour parvenir au puits, temps qui est fonction de la vitesse réelle des particules d'eau. Par conséquent les rapports exprimés ci-dessus **ne représentent pas un pourcentage d'eau de rivière dans l'eau pompée.** Cependant ils représentent bien un préjudice fait à la rivière, puisque cette eau lui est soustraite.

Il est à remarquer également que dans le cas théorique traité ci-dessus, c'est à dire relatif à une nappe horizontale de même niveau que la rivière, la notion de manque à gagner n'existe pas, car sans pompage la nappe n'alimente pas la rivière du fait de l'égalité des niveaux.

Par contre si on envisage le cas le plus fréquent rencontré dans la nature, c'est à dire la nappe alimentant la rivière (cf. paragraphe 2.4.8.), ces volumes cumulés d'eau ayant quitté réellement la rivière sont à distinguer du préjudice total fait à la rivière qui est représenté par la totalité du volume pompé, ce dernier comprenant également le volume qui ne parviendra pas à la rivière c'est à dire le manque à gagner.

2.4.4. Exemple de calcul du débit soustrait à une rivière par un pompage dans la nappe

Nous considérons toujours le cas théorique d'une rivière rectiligne et d'une nappe semi-infinie.

soit $T = 5 \times 10^{-4}$ m^2/s
et $S = 2 \times 10^{-2}$
les paramètres hydrauliques de la nappe

Supposons un pompage à débit constant Q, effectué dans un puits situé à une distance d = 100 m de la rivière, et débutant au temps zéro.

Au bout de 20 jours de pompage, le temps réduit $t_r = \frac{4Tt}{Sd^2}$ est égal à

$$\frac{4 \times 5 \times 10^{-4} \times 20 \times 86400}{2 \times 10^{-2} \times 100^2} = 17{,}28$$

Sur le tableau précédent on voit que le **débit instantané** qui est soustrait à la rivière au bout de 20 jours est alors égal (en arrondissant les chiffres) à 73 % du débit Q de pompage.

Si l'on considère des **volumes cumulés,** on voit qu'au bout de 20 jours un volume cumulé égal à 56% du volume pompé a quitté la rivière.

Annexe 18

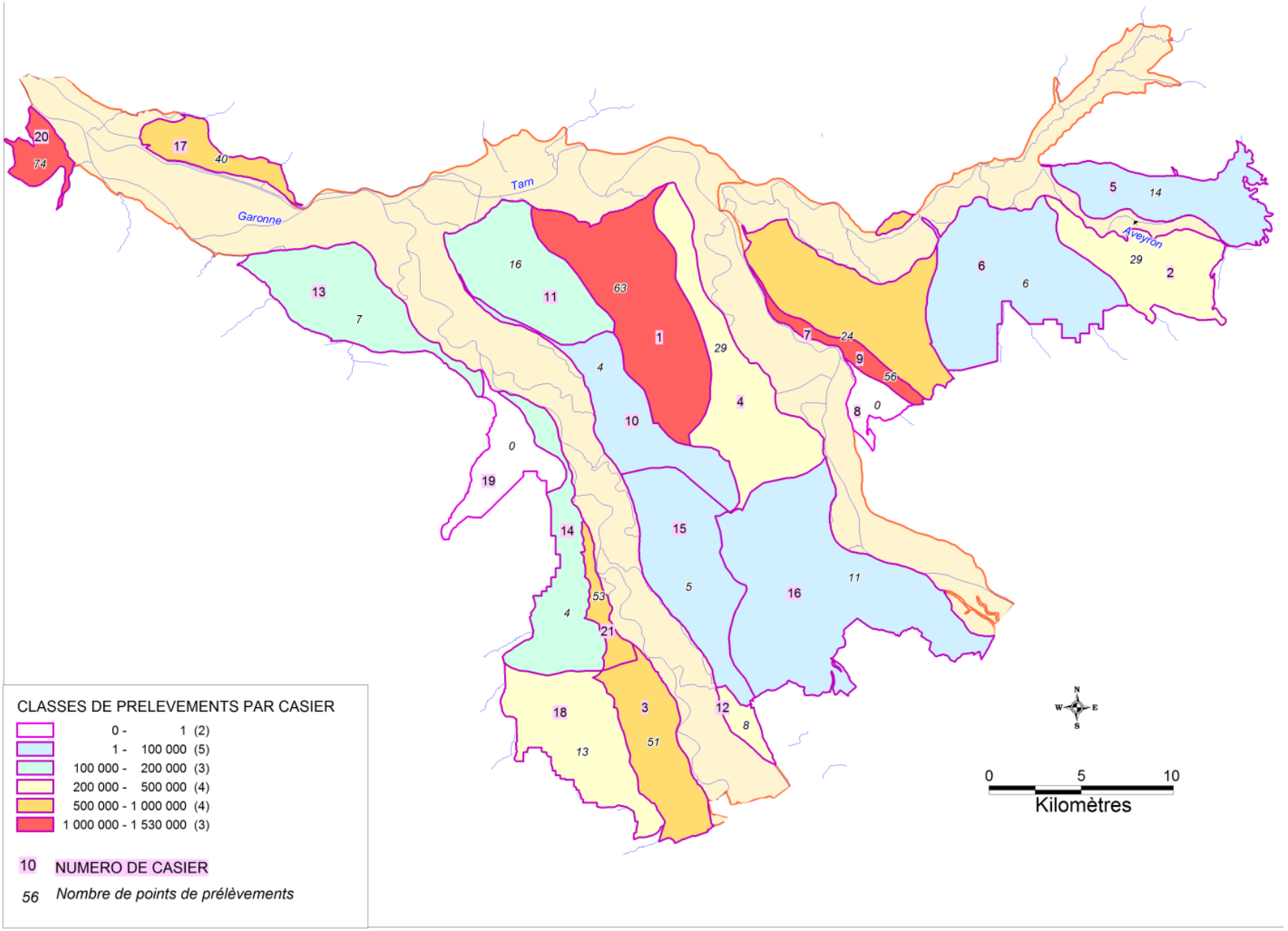
Tableau des 21 casiers hydrogéologiques

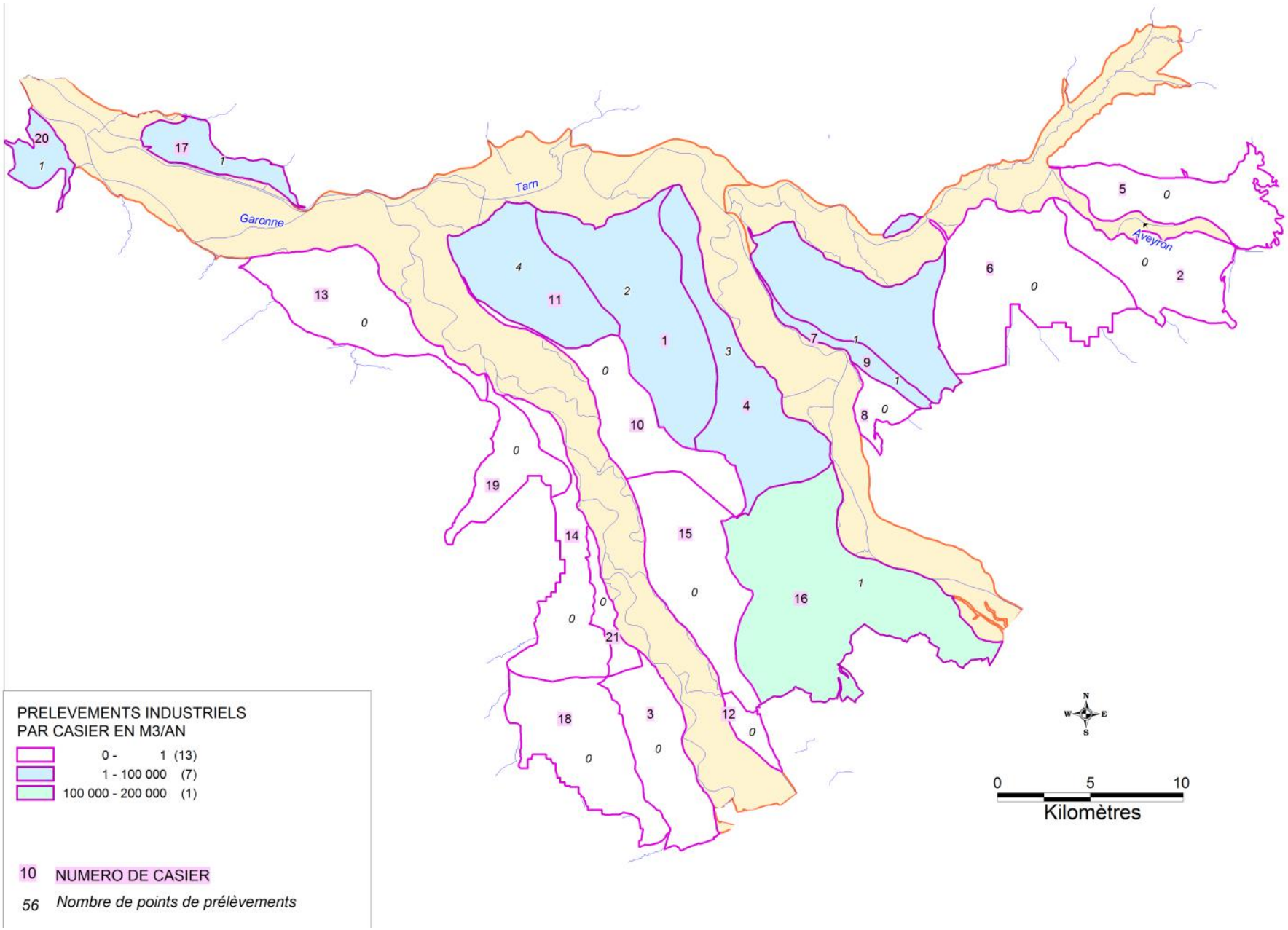
N° CASIER	NOM_CASIER	PIEZO_RCS_BSS	PIEZO_RCS_Libelle	PIEZO_MANUEL_BSS	PIEZO_MANUEL_Libelle	PIEZO_A_RECHERCHER	SURF_km2	ID_PE	PERIMETRE	LIBELLE	PERIMETRE ELEMENTAIRE	ORGANISME	ARRETE PREFECTORAL
1	TARN AVAL RIVE GAUCHE	09302X0139	PEDELOUP				59.1148	176	Tarn	Le Caussels	Tarn réalimenté (Tar	CA81	2013031_0020
2	AVEYRON AMONT RIVE GAUCHE				NEGREPELISSE - n°21		30.3959	9	Aveyron	L'Aveyron du confluent du Cérou au confluent de la Bonnette	Aveyron Aval	CA82	2013031_0018
3	BASSE TERRASSE GARONNE RIVE GAUCHE - PE n°64				SAVENES - n°16		29.2891	64	Garonne Amont	Le Touch du confluent de l'Ousseau (Riou Tort) au confluent de la Garonne	Garonne Amont	CA31	
4	TARN MOYEN RIVE GAUCHE	09307X0146	ST PIERRE				44.8815	176	Tarn	Le Caussels	Tarn réalimenté (Tar	CA81	2013031_0020
5	AVEYRON AMONT RIVE DROITE	09312X0063	BIOULE				31.4108	9	Aveyron	L'Aveyron du confluent du Cérou au confluent de la Bonnette	Aveyron Aval	CA82	2013031_0018
6	AVEYRON AMONT RIVE GAUCHE - AFFLUENTS TAUGE ET BRIVE	09311X0093	PRADAS				61.1572	9	Aveyron	L'Aveyron du confluent du Cérou au confluent de la Bonnette	Aveyron Aval	CA82	2013031_0018
7	CONFLUENCE TARN-AVEYRON PE n°9				MONTAUBAN - n°23		47.6791	9	Aveyron	L'Aveyron du confluent du Cérou au confluent de la Bonnette	Aveyron Aval	CA82	2013031_0018
8	CONFLUENCE TARN-AVEYRON PE n°118				MONTAUBAN - n°23		7.12003	118	Tarn	Le Tescou du confluent de la Rivierette au confluent du Tescounet	Tescou	CA81	2013031_0020
9	CONFLUENCE TARN-AVEYRON PE n°176				MONTAUBAN - n°23		7.72276	176	Tarn	Le Caussels	Tarn réalimenté (Tar	CA81	2013031_0020
10	BASSE TERRASSE DE LA GARONNE RIVE DROITE - RAFIE - PE n°63				ESCATALENS - n°19		31.5906	63	Garonne Amont	La Garonne du confluent du Lambon au confluent de la Tessonne	Garonne centrale	CA31	
11	BASSE TERRASSE DE LA GARONNE RIVE DROITE - RAFIE - PE n°176				CASTELSARRASIN - n°25		37.7282	176	Tarn	Le Caussels	Tarn réalimenté (Tar	CA81	2013031_0020
12	BASSE TERRASSE GARONNE RIVE DROITE - PE n°64				POMPIGNAN - n°15		4.94148	64	Garonne Amont	Le Touch du confluent de l'Ousseau (Riou Tort) au confluent de la Garonne	Garonne Amont	CA31	
13	BASSE TERRASSE GARONNE RIVE GAUCHE - RIEUTORD - PE n°63	09294X0256	POMIES				37.0742	63	Garonne Amont	La Garonne du confluent du Lambon au confluent de la Tessonne	Garonne centrale	CA31	
14	MOYENNE TERRASSE GARONNE RIVE GAUCHE - PE n°63	09306X0286	BOUTOLI			OUI. BOUTOLI PEU SATISF. PAS SUR MEME TERRASSE. PIEZO COMMUN POSSIBLE ENTRE CASIERS N°14, 19, 21 et 18	31.1328	63	Garonne Amont	La Garonne du confluent du Lambon au confluent de la Tessonne	Garonne centrale	CA31	
15	BASSE TERRASSE GARONNE RIVE DROITE PE n°63				MONTECH - n°18		43.0492	63	Garonne Amont	La Garonne du confluent du Lambon au confluent de la Tessonne	Garonne centrale	CA31	
16	TARN AMONT RIVE GAUCHE				LABASTIDE - n°17		91.2047	176	Tarn	Le Caussels	Tarn réalimenté (Tar	CA81	2013031_0020
17	BASSE TERRASSE GARONNE AVAL RIVE DROITE				POMMEVIC - n°4	OUI. POMMEVIC PEU SATISFAISANT. TROUVER SUR BASSE TERRASSE. PIEZO COMMUN POSSIBLE AVEC CASIER N°17 et 20	12.9803	63	Garonne Amont	La Garonne du confluent du Lambon au confluent de la Tessonne	Garonne centrale	CA31	
18	MOYENNE TERRASSE GARONNE RIVE GAUCHE - PE n°64				SAVENES - n°16	OUI. SAVENES PEU SATISF. PAS SUR MEME TERRASSE. PIEZO COMMUN POSSIBLE ENTRE CASIERS N°14, 19, 21 et 18	38.9241	64	Garonne Amont	Le Touch du confluent de l'Ousseau (Riou Tort) au confluent de la Garonne	Garonne Amont	CA31	
19	BASSE TERRASSE GARONNE RIVE GAUCHE - RIEUTORD - PE n°96				ESCATALENS - n°2	OUI. ESCATALENS PEU SATISF. PAS SUR MEME TERRASSE. PIEZO COMMUN POSSIBLE ENTRE CASIERS N°14, 19, 21 et 18	18.7244	160	Neste et Rivières de Gascogne	La Save du confluent de la Bernesse au confluent de la Bourdasse	Système Neste	CA31	2013031_003
20	BASSE TERRASSE GARONNE AVAL RIVE GAUCHE				POMMEVIC - n°4	OUI. POMMEVIC PEU SATISFAISANT. TROUVER SUR BASSE TERRASSE. PIEZO COMMUN POSSIBLE AVEC CASIER N°17 et 20	8.61618	95	Neste et Rivières de Gascogne	L'Auroue	Auroue	CA47	2013031_003
21	BASSE TERRASSE GARONNE RIVE GAUCHE - PE n°63				SAVENES - n°16		6.89866	63	Garonne Amont	La Garonne du confluent du Lambon au confluent de la Tessonne	Garonne centrale	CA31	

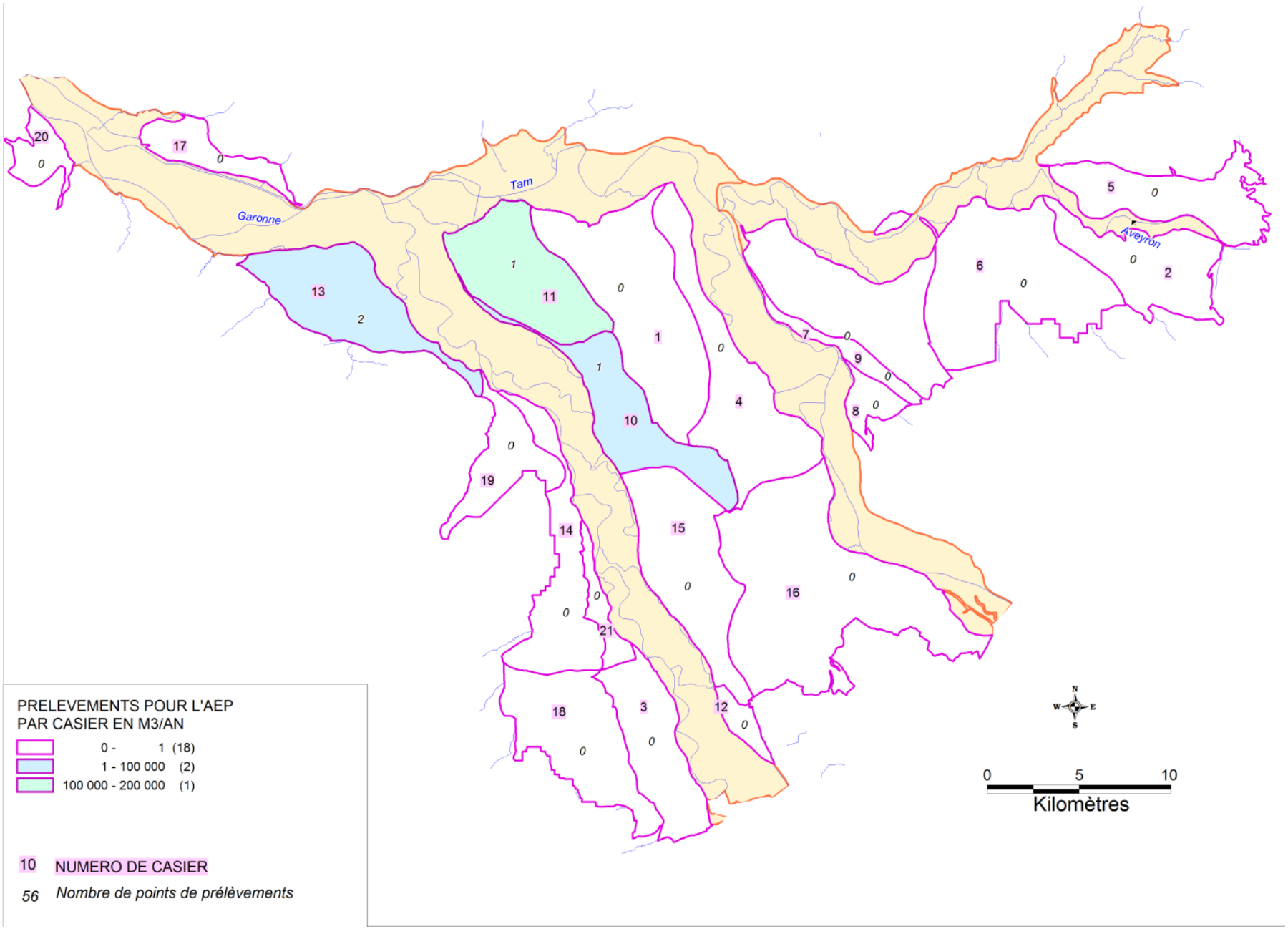
N° CASIER	NOM_CASIER	ID_PE	PERIMETRE	PERIMETRE ELEMENTAIRE	ORGANISME	ARRETE PREFECTORAL	SUM_PRELEV_ REEL_IRRI_M3	SUM_PRELEV_ REEL_IND_M3	SUM_PRELEV_ REEL_AEP_M3	NB_PP_IRRI	NB_PP_AEP	NB_PP_IND
1	TARN AVAL RIVE GAUCHE	176	Tarn	Tarn réalimenté (Tar	CA81	2013031_0020	1529690	75721,29	0	63	0	2
2	AVEYRON AMONT RIVE GAUCHE	9	Aveyron	Aveyron Aval	CA82	2013031_0018	477424	0	0	29	0	0
3	BASSE TERRASSE GARONNE RIVE GAUCHE - PE n°64	64	Garonne Amont	Garonne Amont	CA31		745925	0	0	51	0	0
4	TARN MOYEN RIVE GAUCHE	176	Tarn	Tarn réalimenté (Tar	CA81	2013031_0020	477551	28772,24	0	29	0	3
5	AVEYRON AMONT RIVE DROITE	9	Aveyron	Aveyron Aval	CA82	2013031_0018	54787	0	0	14	0	0
6	AVEYRON AMONT RIVE GAUCHE - AFFLUENTS TAUGE ET BRIVE	9	Aveyron	Aveyron Aval	CA82	2013031_0018	84729	0	0	6	0	0
7	CONFLUENCE TARN-AVEYRON PE n°9	9	Aveyron	Aveyron Aval	CA82	2013031_0018	549855	3952,75	0	24	0	1
8	CONFLUENCE TARN-AVEYRON PE n°118	118	Tarn	Tescou	CA81	2013031_0020	0	0	0	0	0	0
9	CONFLUENCE TARN-AVEYRON PE n°176	176	Tarn	Tarn réalimenté (Tar	CA81	2013031_0020	1180733	60621,71	0	56	0	1
10	BASSE TERRASSE DE LA GARONNE RIVE DROITE - RAFIE - PE n°63	63	Garonne Amont	Garonne centrale	CA31		37651	0	42996,57	4	1	0
11	BASSE TERRASSE DE LA GARONNE RIVE DROITE - RAFIE - PE n°176	176	Tarn	Tarn réalimenté (Tar	CA81	2013031_0020	142372	41784,07	138793	16	1	4
12	BASSE TERRASSE GARONNE RIVE DROITE - PE n°64	64	Garonne Amont	Garonne Amont	CA31		207409	0	0	8	0	0
13	BASSE TERRASSE GARONNE RIVE GAUCHE - RIEUTORD - PE n°63	63	Garonne Amont	Garonne centrale	CA31		104424	0	83812	7	2	0
14	MOYENNE TERRASSE GARONNE RIVE GAUCHE - PE n°63	63	Garonne Amont	Garonne centrale	CA31		105047	0	0	4	0	0
15	BASSE TERRASSE GARONNE RIVE DROITE PE n°63	63	Garonne Amont	Garonne centrale	CA31		50075	0	0	5	0	0
16	TARN AMONT RIVE GAUCHE	176	Tarn	Tarn réalimenté (Tar	CA81	2013031_0020	74999	122654,14	0	11	0	1
17	BASSE TERRASSE GARONNE AVAL RIVE DROITE	63	Garonne Amont	Garonne centrale	CA31		506574	8585	0	40	0	1
18	MOYENNE TERRASSE GARONNE RIVE GAUCHE - PE n°64	64	Garonne Amont	Garonne Amont	CA31		226123	0	0	13	0	0
19	BASSE TERRASSE GARONNE RIVE GAUCHE - RIEUTORD - PE n°96	160	Neste et Rivières de Gascogne	Système Neste	CA31	2013031_003	0	0	0	0	0	0
20	BASSE TERRASSE GARONNE AVAL RIVE GAUCHE	95	Neste et Rivières de Gascogne	Auroue	CA47	2013031_003	1065760	90	0	74	0	1
21	BASSE TERRASSE GARONNE RIVE GAUCHE - PE n°63	63	Garonne Amont	Garonne centrale	CA31		612837	0	0	53	0	0

Annexe 19

Classes des volumes annuels prélevés sur les eaux souterraines, par casier hydrogéologique et par usage (en m^3/an)


Garonne
Tarn
Aveyron
CLASSES DE PRELEVEMENTS PAR CASIER
0 - 1 (2)
1 - 100 000 (5)
100 000 - 200 000 (3)
200 000 - 500 000 (4)
500 000 - 1 000 000 (4)
1 000 000 - 1 530 000 (3)
10 NUMERO DE CASIER
56 Nombre de points de prélèvements
0 5 10
Kilomètres


Garonne
Tarn
Aveyron
PRELEVEMENTS INDUSTRIELS
PAR CASIER EN M3/AN
0 - 1 (13)
1 - 100 000 (7)
100 000 - 200 000 (1)
10 NUMERO DE CASIER
56 Nombre de points de prélèvements
0 5 10
Kilomètres


Garonne
Tarn
Aveyron
PRELEVEMENTS POUR L'AEP
PAR CASIER EN M3/AN
0 - 1 (18)
1 - 100 000 (2)
100 000 - 200 000 (1)
10 NUMERO DE CASIER
56 Nombre de points de prélèvements
0 5 10
Kilomètres

Annexe 20

Calcul de la pluie efficace et du niveau du réservoir sol progressif à chaque pas de temps par intégration (extrait de De Oliveira Nascimento, 1995)

Définitions de *Pn* (pluie efficace) et *En* (évapotranspiration réelle) :

- Si P ≥ ETP : *Pn* = P – ETP ; *En* = ETP.
- Si P < ETP : *Pn* = 0 ; *En* = ETP – P.

2.2.1 - Le réservoir-sol

Le réservoir-sol a une capacité maximale A, premier paramètre du modèle, et un niveau S, qui change selon l'action de P_n ou de E_n.

Si à l'entrée du modèle on considère un événement dP_n, l'excès de précipitation sera:

$$\left(\frac{S}{A}\right)^2 dP_n \qquad \text{(Eq. 2.1)}$$

et $\left[1-\left(\frac{S}{A}\right)^2\right]dP_n$ rentrera dans le réservoir-sol. Donc $dS=\left[1-\left(\frac{S}{A}\right)^2\right]dP_n$, et par intégration,

$$S_2=\frac{S_1+Aw_p}{1+(S_1/A)w_p} \text{ où } w_p=\tanh\left(\frac{P_n}{A}\right).$$

Si P_n = 0, l'évaporation E_n donnera lieu à l'action de l'évaporation réelle dans le réservoir-sol, selon la relation

$$\frac{S}{A}\left[2-\frac{S}{A}\right]dE_n \qquad \text{(Eq.2.2)}$$

et, donc, $dS=-\frac{S}{A}\left[2-\frac{S}{A}\right]dE_n$ et par intégration $S_2=S_1\frac{1-w_e}{1+[1-S/A]w_e}$ où

$$w_e=\tanh\left(\frac{E_n}{A}\right).$$

Les équations 2.1 et 2.2 gardent un rapport de symétrie (fig. 2.2).

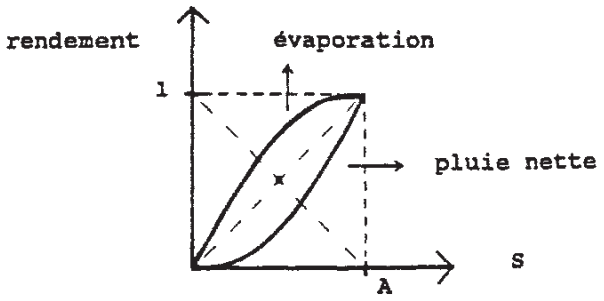


Fig. 2.2 - Rendements de la pluie et de l'évaporation (d'après EDIJATNO et MICHEL, 1989)

Annexe 21

Pluie efficace annuelle / octobre-mai et période de retour – Station de Montauban – 1949-2015

Année hydrologique	Pluie efficace octobre-mai (mm)	Rang	Fréquence	Période retour (ans)
2001-2002	19.9	1	0.008	132.00
2011-2012	40.9	2	0.023	44.00
1975-1976	***66.6***	***3***	***0.038***	***26.40***
2004-2005	73.6	4	0.053	18.86
1991-1992	***78.6***	***5***	***0.068***	***14.67***
2014-2015	79.7	6	0.083	12.00
1989-1990	**82.4**	**7**	**0.098**	**10.15**
2010-2011	**85.0**	**8**	**0.114**	**8.80**
1972-1973	104.8	9	0.129	7.76
1973-1974	***104.9***	***10***	***0.144***	***6.95***
2007-2008	107.6	11	0.159	6.29
1957-1958	114.8	12	0.174	5.74
1956-1957	116.2	13	0.189	5.28
1955-1956	**118.5**	**14**	**0.205**	**4.89**
2005-2006	121.8	15	0.220	4.55
1988-1989	**125.8**	**16**	**0.235**	**4.26**
1963-1964	133.6	17	0.250	4.00
1997-1998	137.3	18	0.265	3.77
1953-1954	138.8	19	0.280	3.57
2006-2007	141.7	20	0.295	3.38
1999-2000	143.1	21	0.311	3.22
1974-1975	145.1	22	0.326	3.07
1990-1991	148.5	23	0.341	2.93
1967-1968	152.0	24	0.356	2.81
1949-1950	156.7	25	0.371	2.69
1964-1965	165.6	26	0.386	2.59
1985-1986	169.5	27	0.402	2.49
1986-1987	172.2	28	0.417	2.40
1958-1959	175.8	29	0.432	2.32
1951-1952	176.2	30	0.447	2.24
1969-1970	184.3	31	0.462	2.16
1980-1981	185.3	32	0.477	2.10
2009-2010	193.9	33	0.492	2.03
1952-1953	198.8	34	0.508	2.03
2013-2014	201.7	35	0.523	2.10
1971-1972	207.0	36	0.538	2.16
1970-1971	209.6	37	0.553	2.24
1998-1999	210.5	38	0.568	2.32
2002-2003	212.8	39	0.583	2.40
2000-2001	215.1	40	0.598	2.49
1962-1963	217.5	41	0.614	2.59
1978-1979	219.2	42	0.629	2.69
1961-1962	220.8	43	0.644	2.81
1983-1984	226.7	44	0.659	2.93
1981-1982	229.1	45	0.674	3.07
1982-1983	233.5	46	0.689	3.22
1996-1997	236.6	47	0.705	3.38
1966-1967	241.3	48	0.720	3.57
2008-2009	244.0	49	0.735	3.77
1968-1969	***248.2***	***50***	***0.750***	***4.00***
1977-1978	255.3	51	0.765	4.26
1954-1955	256.4	52	0.780	4.55
1995-1996	263.9	53	0.795	4.89
1994-1995	266.9	54	0.811	5.28
2003-2004	**268.6**	**55**	**0.826**	**5.74**
2012-2013	283.2	56	0.841	6.29
1984-1985	292.2	57	0.856	6.95
1979-1980	295.9	58	0.871	7.76
1976-1977	**297.0**	**59**	**0.886**	**8.80**
1987-1988	302.8	60	0.902	10.15
1960-1961	322.5	61	0.917	12.00
1959-1960	332.5	62	0.932	14.67
1950-1951	342.9	63	0.947	18.86
1965-1966	353.9	64	0.962	26.40
1992-1993	377.7	65	0.977	44.00
1993-1994	387.7	66	0.992	132.00

Année hydrologique	Pluie efficace annuelle (mm)	Rang	Fréquence	Période retour (ans)
2001-2002	34.5	1	0.008	132.00
2011-2012	40.9	2	0.023	44.00
2004-2005	74.0	3	0.038	26.40
2014-2015	81.7	4	0.053	18.86
1989-1990	**82.4**	**5**	**0.068**	**14.67**
2010-2011	**85.4**	**6**	**0.083**	**12.00**
1975-1976	***103.4***	***7***	***0.098***	***10.15***
1972-1973	104.8	8	0.114	8.80
2007-2008	107.6	9	0.129	7.76
1957-1958	117.9	10	0.144	6.95
1988-1989	**125.8**	**11**	**0.159**	**6.29**
1955-1956	**127.2**	**12**	**0.174**	**5.74**
1973-1974	***130.5***	***13***	***0.189***	***5.28***
1963-1964	133.6	14	0.205	4.89
1997-1998	137.3	15	0.220	4.55
1956-1957	139.2	16	0.235	4.26
2006-2007	141.8	17	0.250	4.00
1974-1975	145.3	18	0.265	3.77
1999-2000	145.5	19	0.280	3.57
1990-1991	148.6	20	0.295	3.38
2005-2006	151.6	21	0.311	3.22
1953-1954	153.8	22	0.326	3.07
1949-1950	156.7	23	0.341	2.93
1985-1986	170.4	24	0.356	2.81
1967-1968	171.2	25	0.371	2.69
1986-1987	174.3	26	0.386	2.59
1951-1952	176.2	27	0.402	2.49
1991-1992	***179.7***	***28***	***0.417***	***2.40***
1969-1970	184.3	29	0.432	2.32
1980-1981	190.3	30	0.447	2.24
1964-1965	193.9	31	0.462	2.16
1952-1953	198.8	32	0.477	2.10
2013-2014	201.8	33	0.492	2.03
2009-2010	202.0	34	0.508	2.03
1971-1972	207.0	35	0.523	2.10
2002-2003	212.9	36	0.538	2.16
1970-1971	215.8	37	0.553	2.24
1998-1999	217.1	38	0.568	2.32
2000-2001	218.6	39	0.583	2.40
1961-1962	221.1	40	0.598	2.49
1958-1959	221.6	41	0.614	2.59
1978-1979	225.6	42	0.629	2.69
1981-1982	229.8	43	0.644	2.81
1982-1983	236.0	44	0.659	2.93
1966-1967	241.3	45	0.674	3.07
1996-1997	242.2	46	0.689	3.22
2008-2009	244.0	47	0.705	3.38
1954-1955	256.5	48	0.720	3.57
1983-1984	256.9	49	0.735	3.77
1977-1978	257.5	50	0.750	4.00
1962-1963	264.5	51	0.765	4.26
2003-2004	**268.6**	**52**	**0.780**	**4.55**
1995-1996	274.9	53	0.795	4.89
2012-2013	286.8	54	0.811	5.28
1984-1985	292.2	55	0.826	5.74
1994-1995	295.5	56	0.841	6.29
1979-1980	297.0	57	0.856	6.95
1976-1977	**299.3**	**58**	**0.871**	**7.76**
1987-1988	305.2	59	0.886	8.80
1968-1969	***317.6***	***60***	***0.902***	***10.15***
1960-1961	326.8	61	0.917	12.00
1959-1960	344.7	62	0.932	14.67
1965-1966	356.5	63	0.947	18.86
1950-1951	357.4	64	0.962	26.40
1993-1994	424.3	65	0.977	44.00
1992-1993	458.1	66	0.992	132.00

Annexe 22

Comparaison des charges au 01/06 à la charge de référence (01/06/2012) pour les 8 scenarii retenus

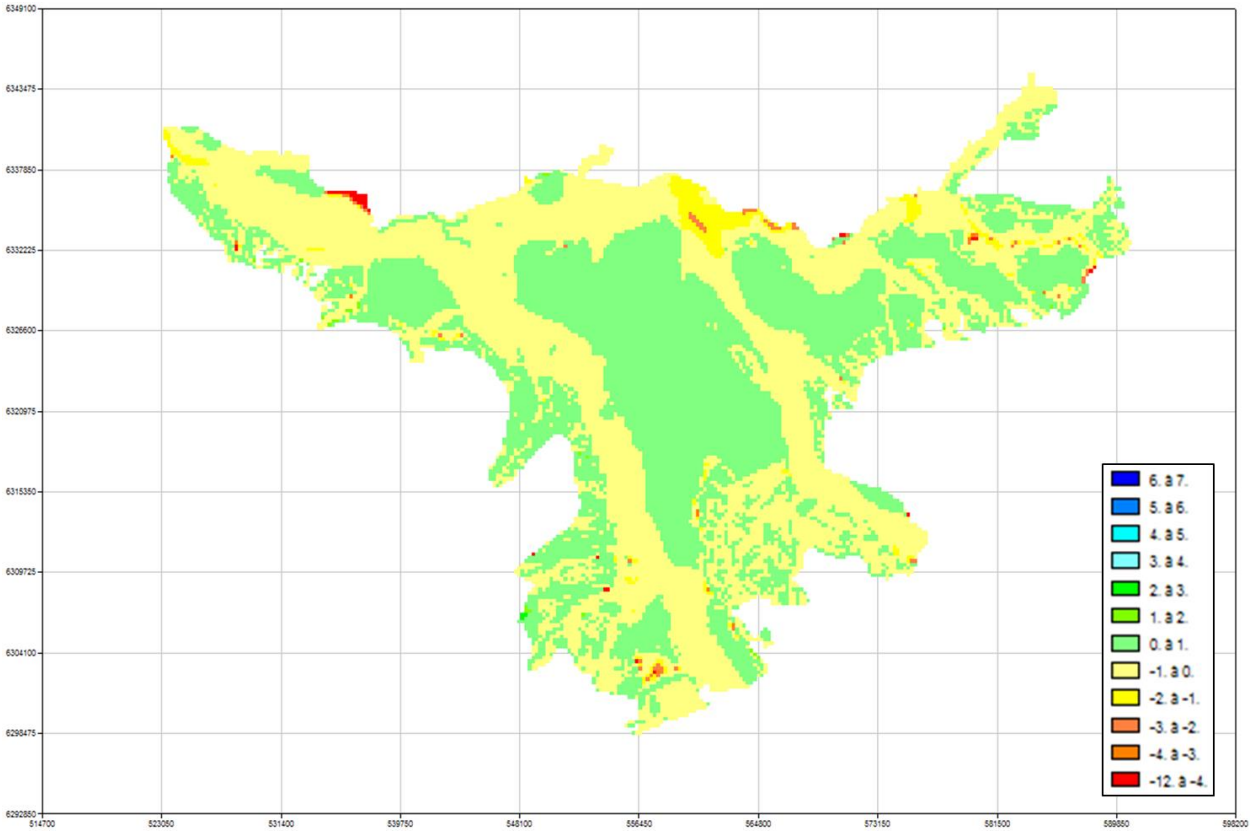


Illustration A22-1 – Scenario 1 – Recharge minimale – 2001-2002

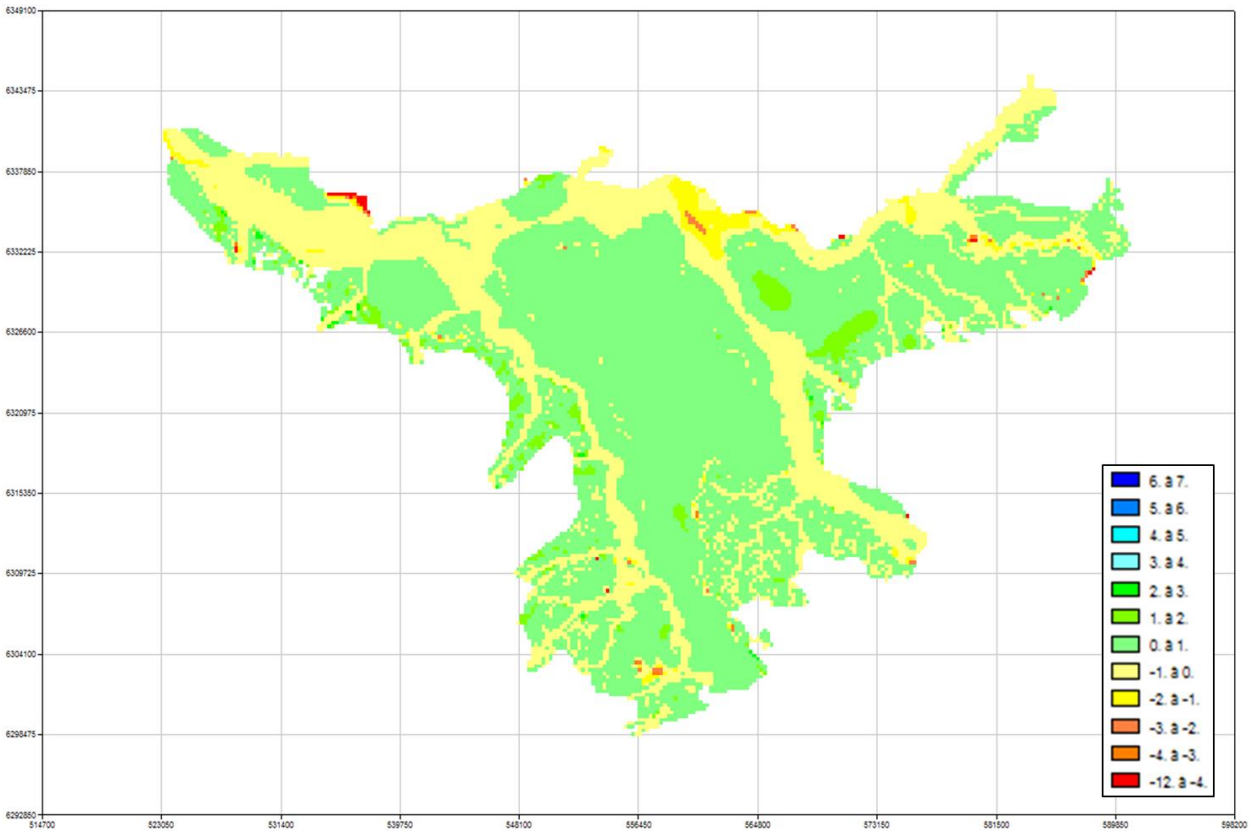


Illustration A22-2 – Scenario 3 – Vingtennale sèche – 2004-2005

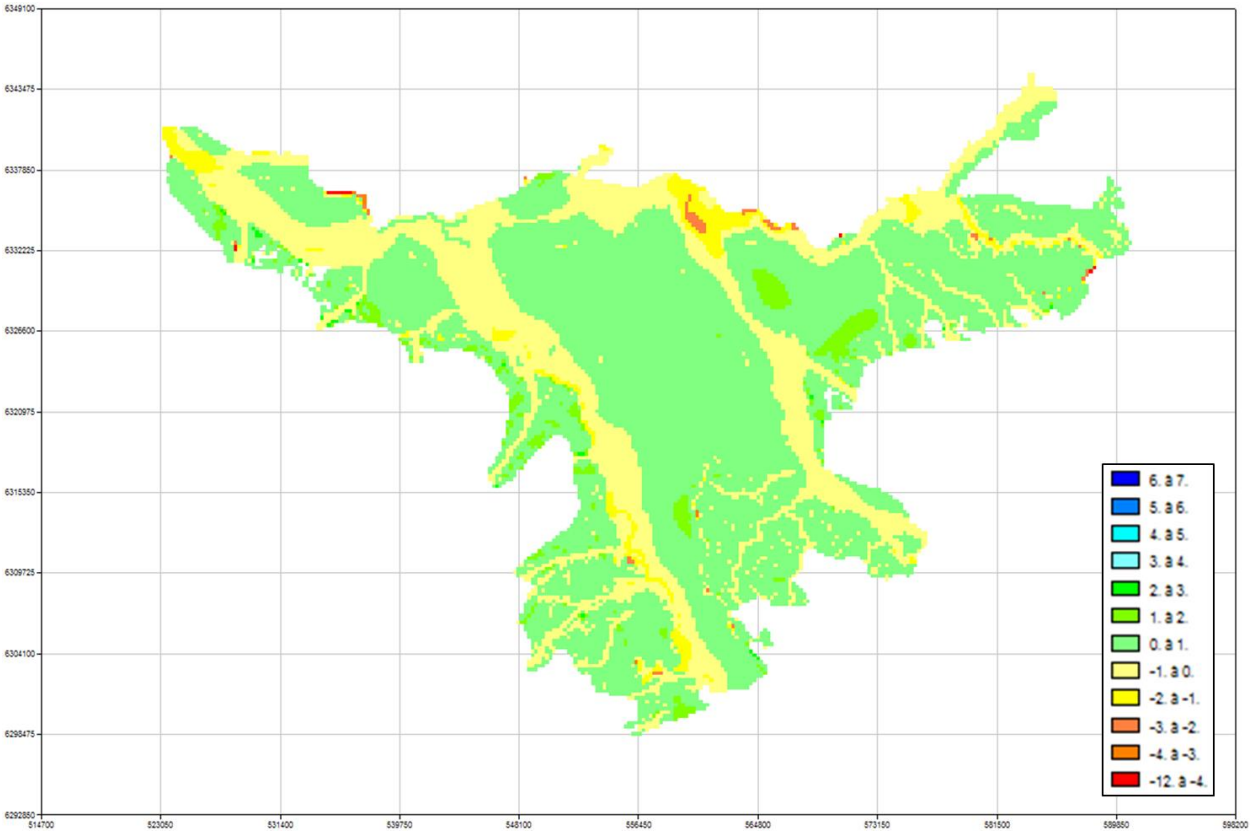


Illustration A22-3 – Scenario 5 – Décennale sèche – 1989-1990

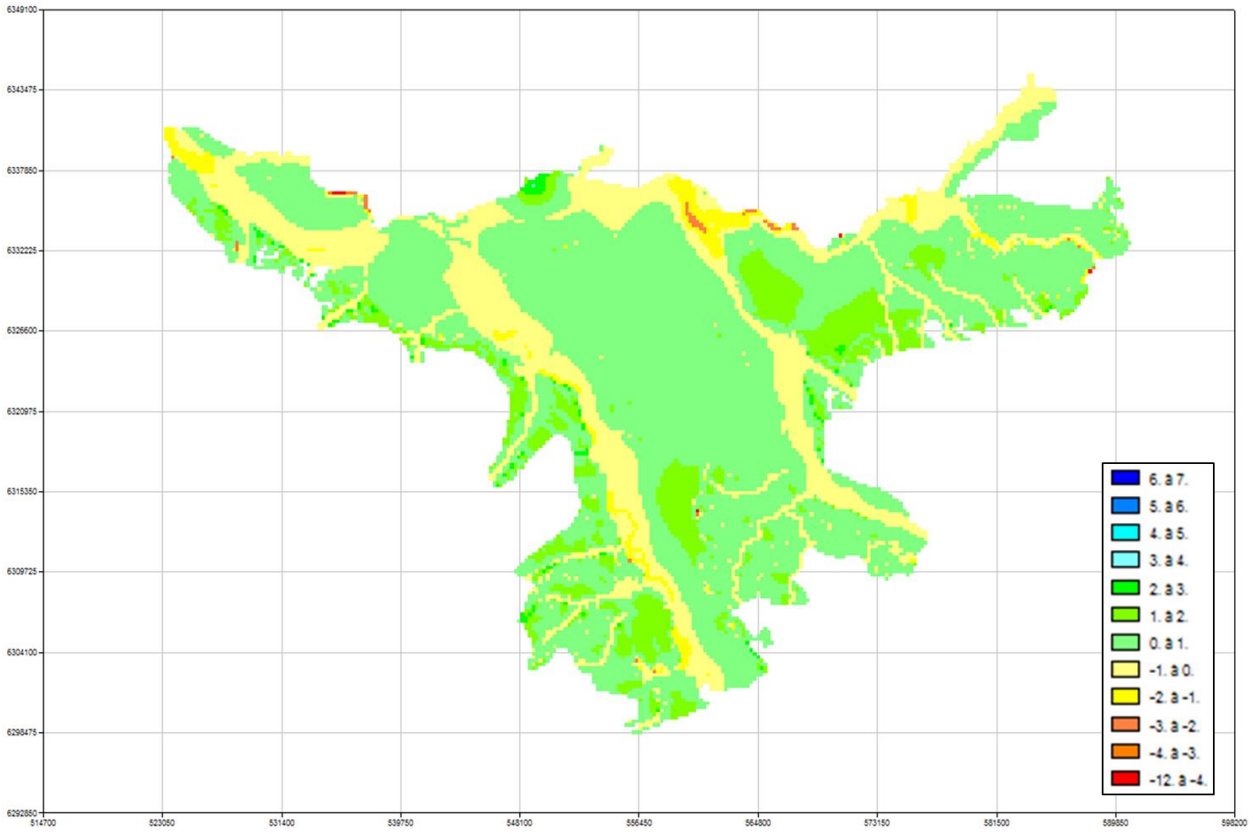


Illustration A22-4 – Scenario 9 – Quinquennale sèche – 1955-1956

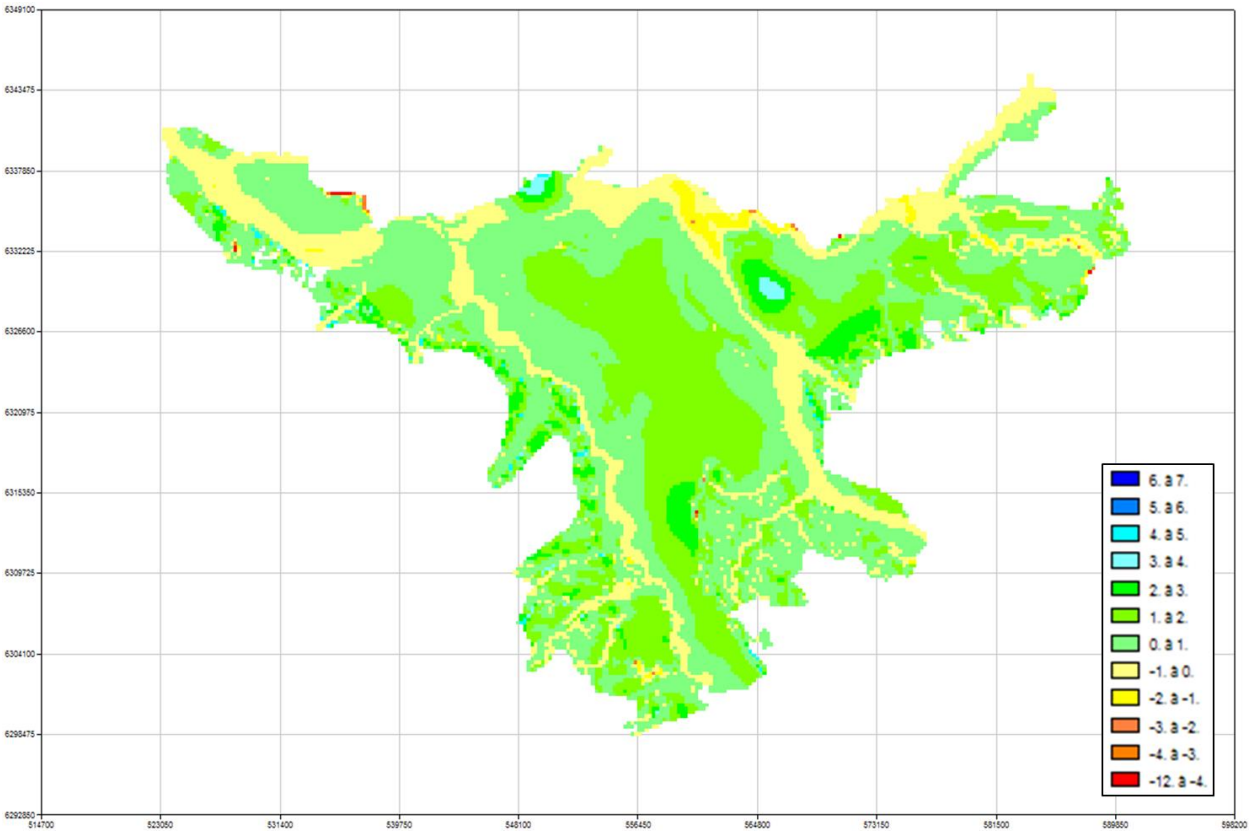


Illustration A22-5 – Scenario 12 – Recharge moyenne – 1952-1953

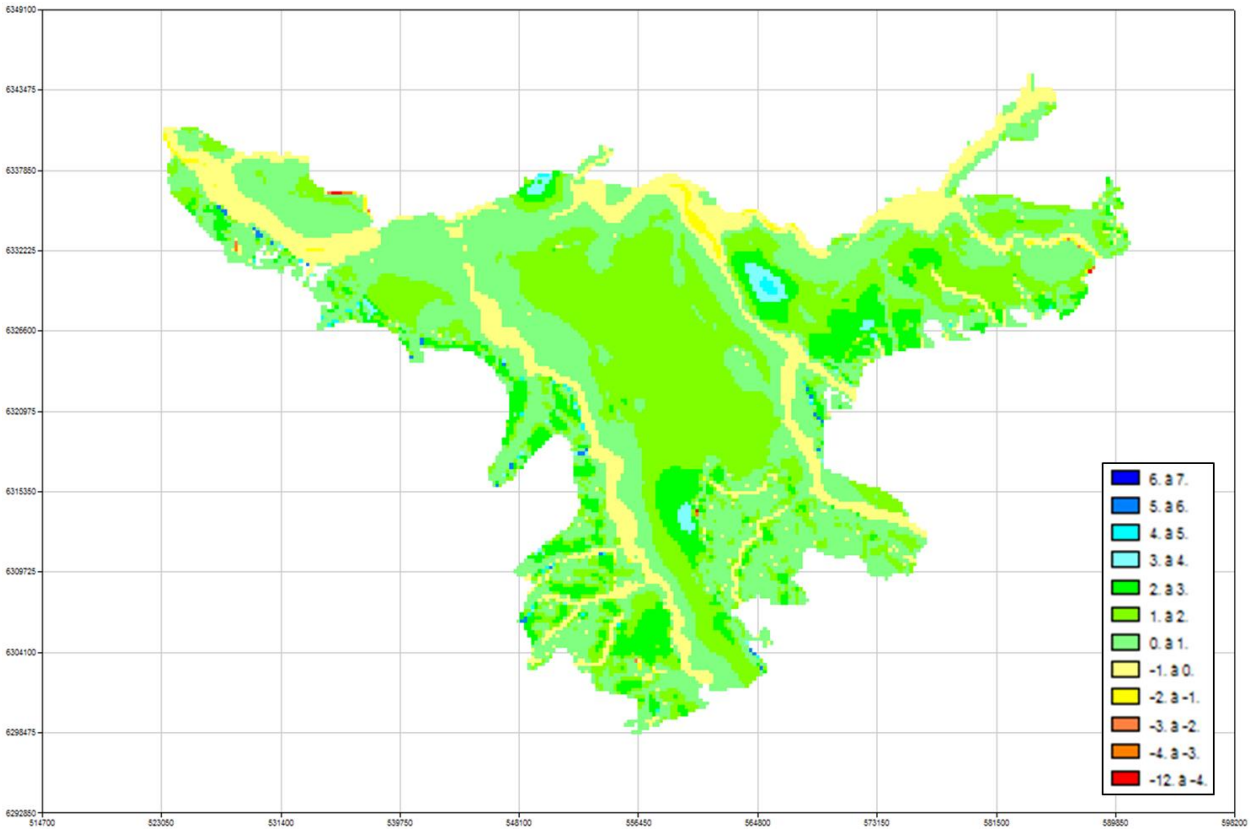


Illustration A22-6 – Scenario 14 – Quninquennale humide – 1995-1996

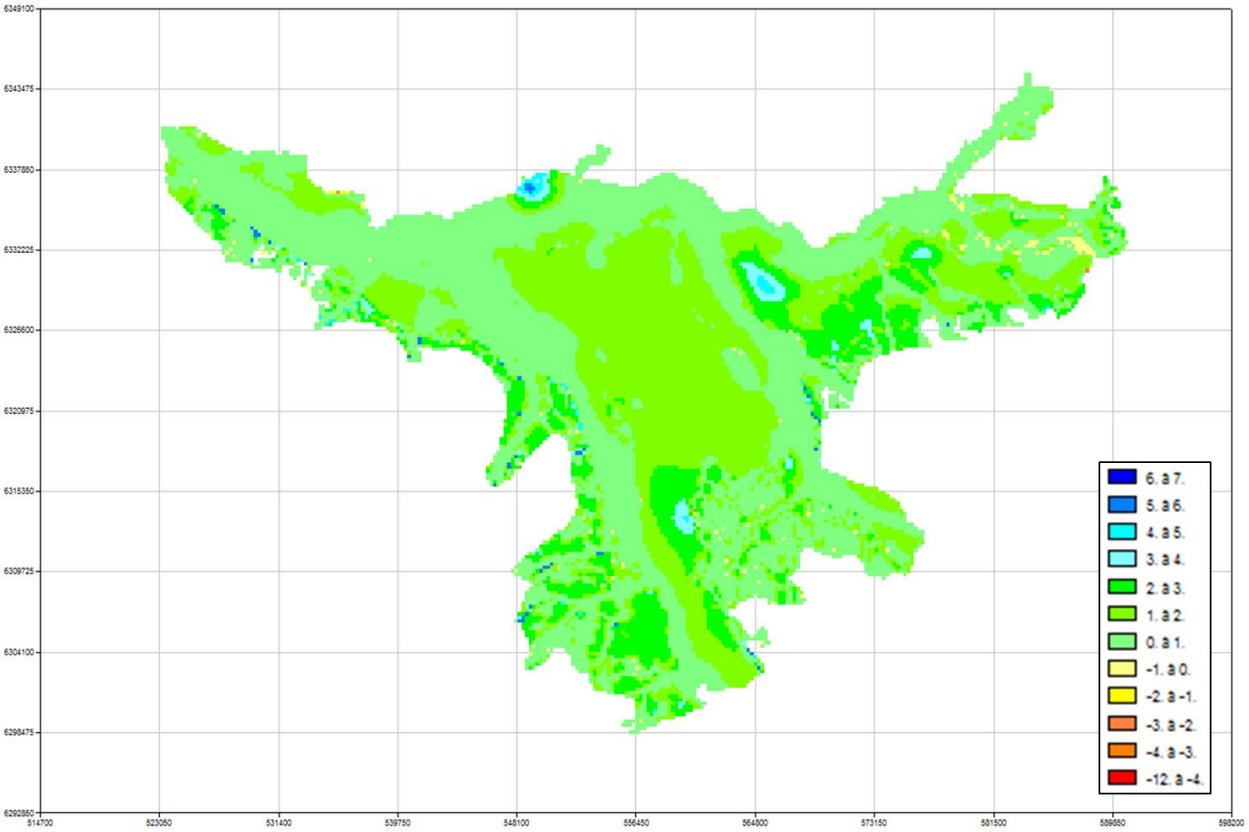


Illustration A22-7 – Scenario 18 – Décennale humide – 1987-1988

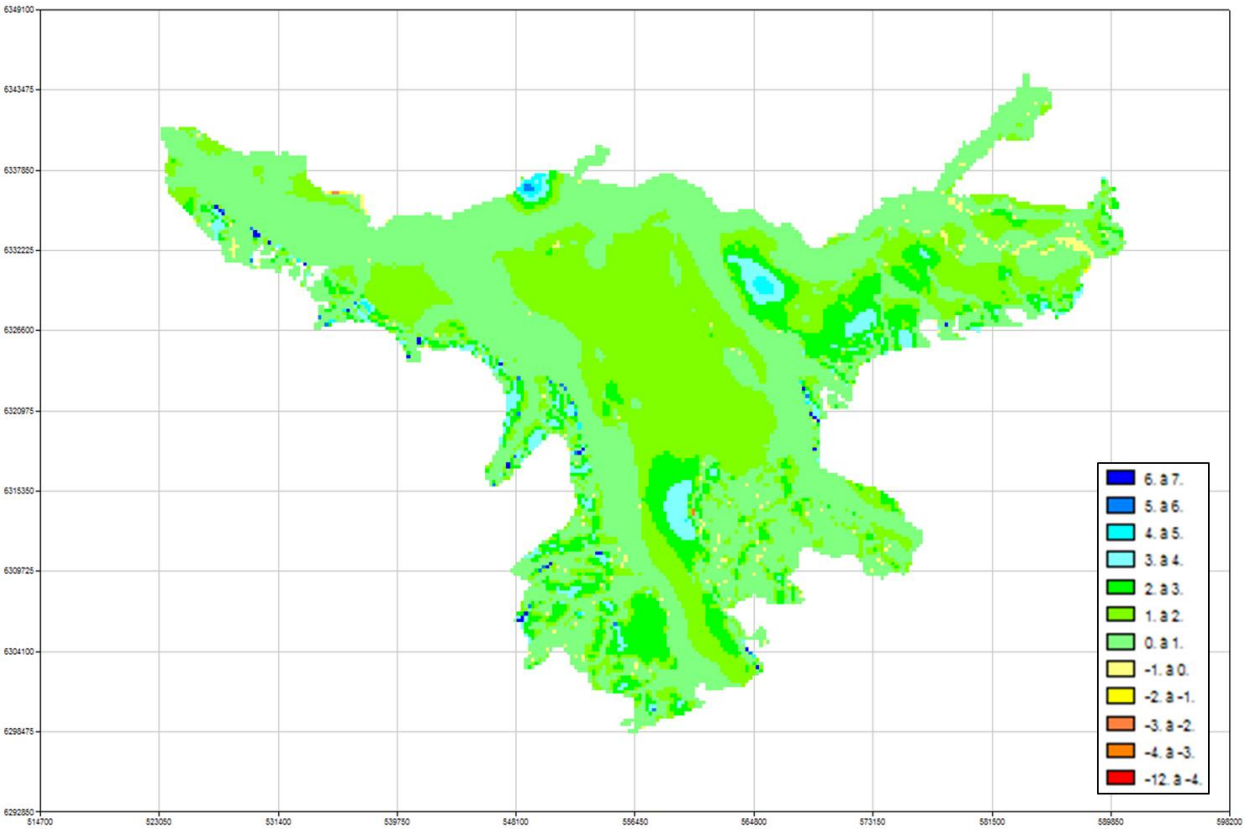
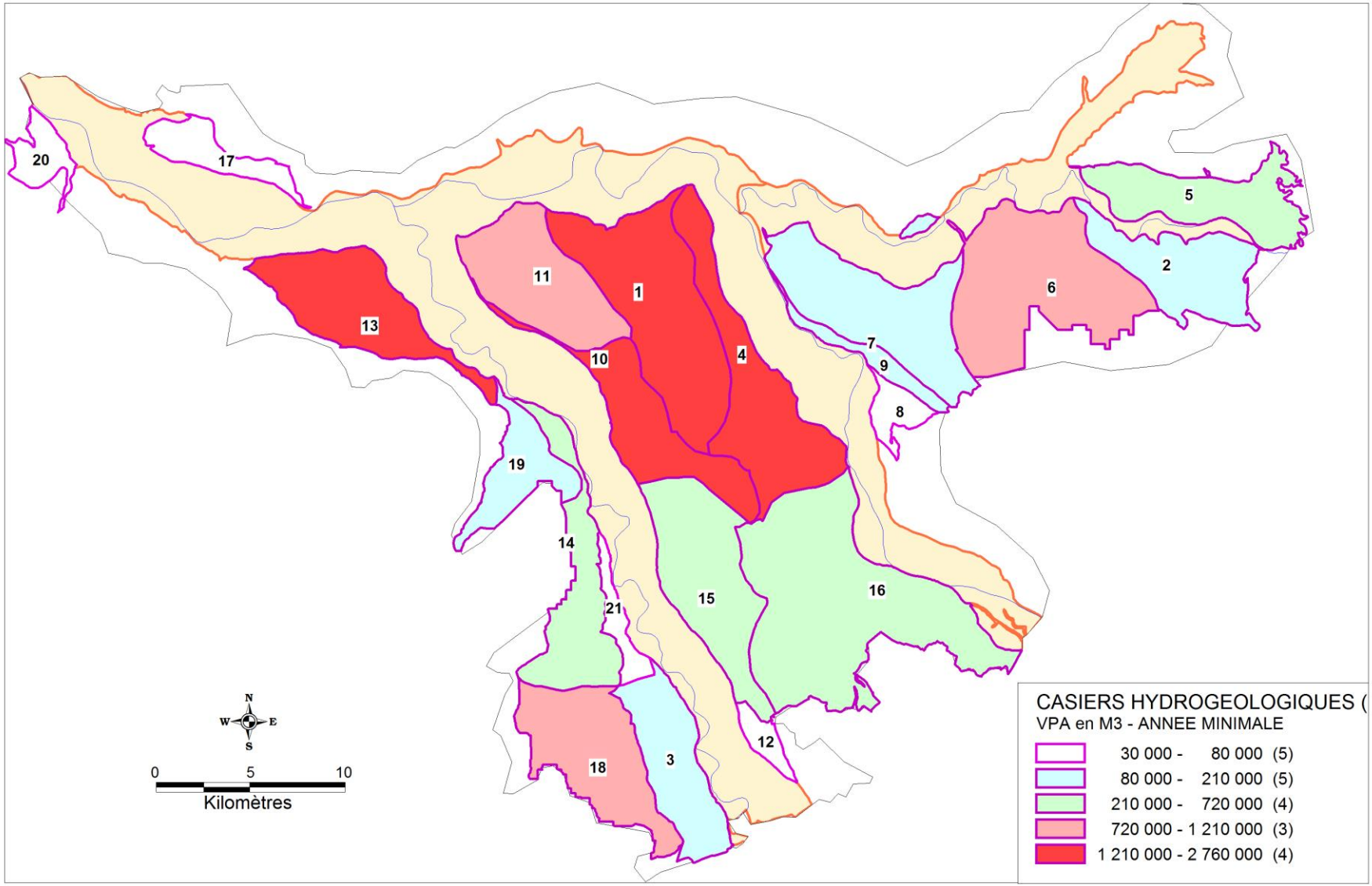


Illustration A22-8 – Scenario 20 – Recharge maximale – 1992-1993

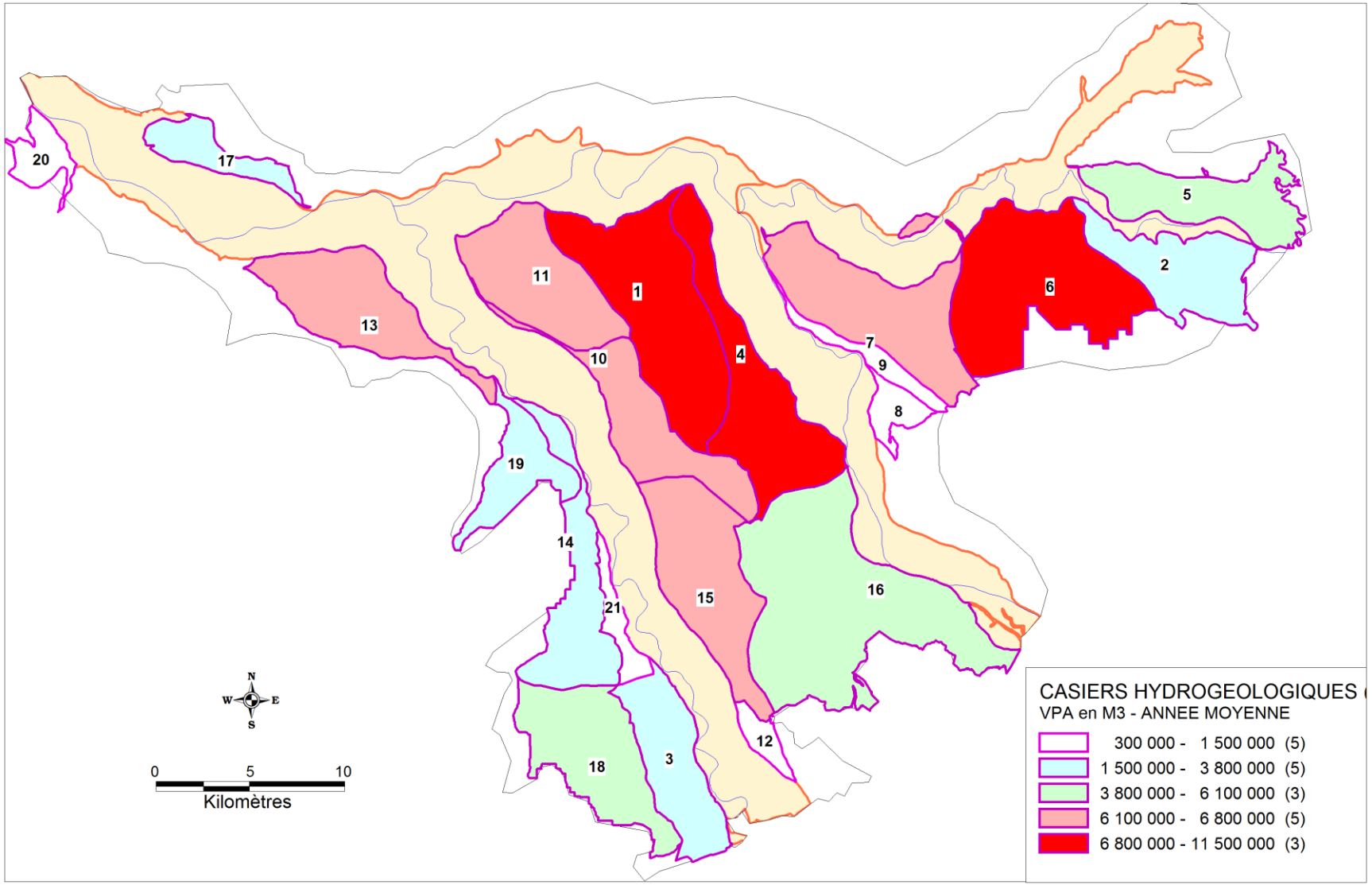
Annexe 23

Carte des VPA calculés par casier, pour différents scenarii de recharge

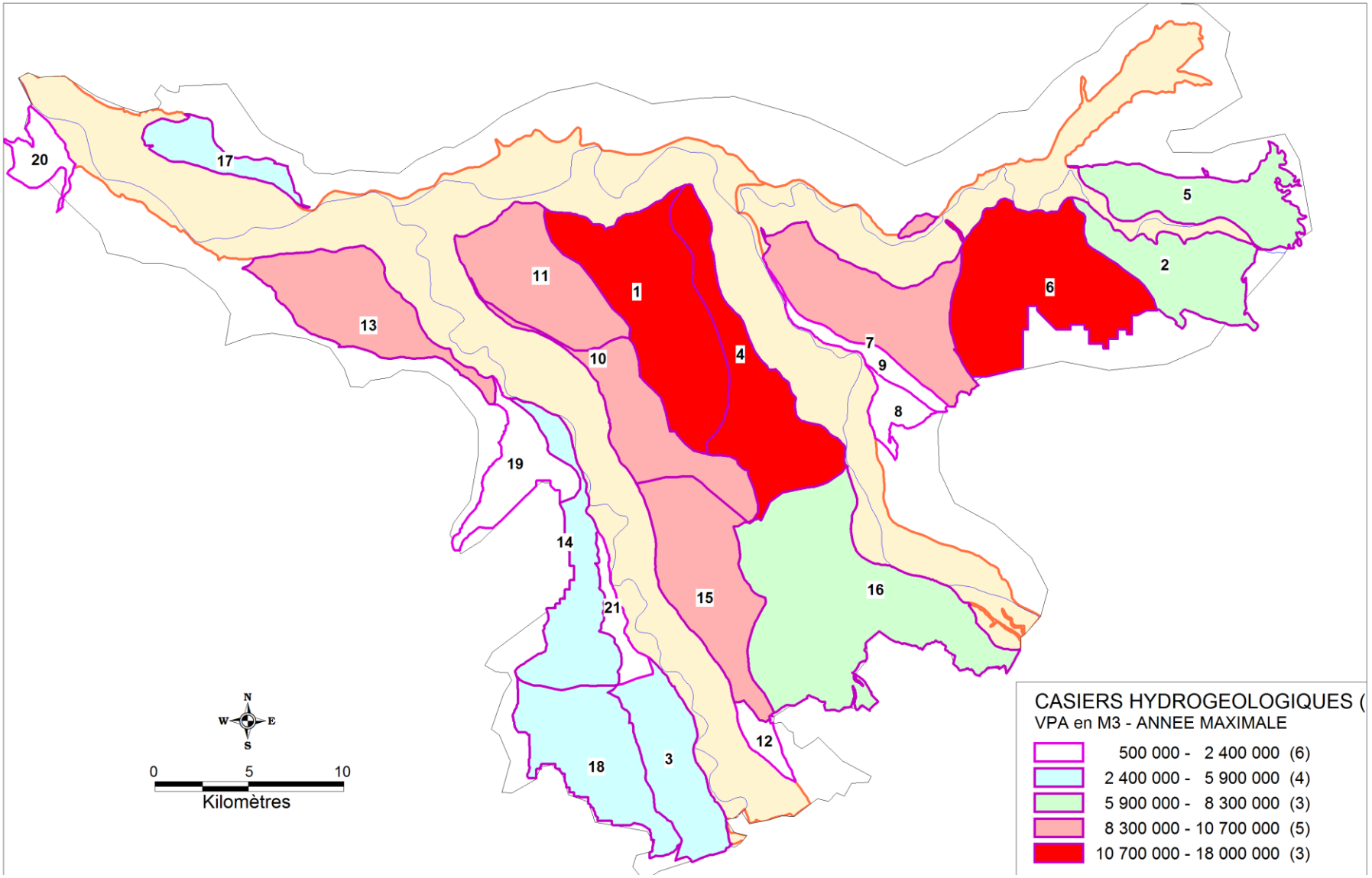
ANNEE DE RECHARGE MNIMALE (depuis 1949)



ANNEE DE RECHARGE MOYENNE (depuis 1949)



ANNEE DE RECHARGE MAXIMALE (depuis 1949)



Annexe 24

Tableaux des VPA calculés et comparaison avec les volumes demandés

Période de retour	Min						Vingtennale sèche					
Année de référence	2001-2002	2002	Moy sur 2006-2013		2001-2002		2004-2005	2005	Moy sur 2006-2013		2004-2005	
N° scénario	1 (VPA)	1 (AUTO)	PRELEV AEP+IND	VPA-(AEP+IND)	VdispoIRRIG-Vauto	Coeff. Réduction	1a (VPA)	1a (AUTO)	PRELEV AEP+IND	VPA-(AEP+IND)	VdispoIRRIG-Vauto	Coeff. Réduction
Casier 1	1 744 818	201 586	75 721	1 669 097	1 467 511	0%	4 507 418	201 666	75 721	4 431 697	4 230 031	0%
Casier 2	193 489	0	0	193 489	193 489	0%	982 413	0	0	982 413	982 413	0%
Casier 3	142 103	168 350	0	142 103	-26 247	16%	351 101	131 356	0	351 101	219 745	0%
Casier 4	1 418 193	0	28 772	1 389 421	1 389 421	0%	3 451 196	0	28 772	3 422 424	3 422 424	0%
Casier 5	323 179	0	0	323 179	323 179	0%	1 374 016	0	0	1 374 016	1 374 016	0%
Casier 6	775 183	0	0	775 183	775 183	0%	2 846 017	0	0	2 846 017	2 846 017	0%
Casier 7	181 858	0	3 953	177 905	177 905	0%	1 643 460	0	3 953	1 639 507	1 639 507	0%
Casier 8	59 921	6 400	0	59 921	53 521	0%	135 844	6 400	0	135 844	129 444	0%
Casier 9	80 530		60 622	19 908	19 908	0%	253 483		60 622	192 861	192 861	0%
Casier 10	1 214 854	311 125	42 997	1 171 857	860 732	0%	2 721 884	212 500	42 997	2 678 888	2 466 388	0%
Casier 11	847 927	0	180 577	667 350	667 350	0%	2 383 495	4	180 577	2 202 918	2 202 914	0%
Casier 12	48 226	60 125	0	48 226	-11 899	20%	190 582	61 111	0	190 582	129 471	0%
Casier 13	2 753 492	666 973	83 812	2 669 680	2 002 707	0%	3 868 397	591 173	83 812	3 784 585	3 193 412	0%
Casier 14	470 770	133 414	0	470 770	337 356	0%	1 257 797	116 294	0	1 257 797	1 141 503	0%
Casier 15	717 058	497 997	0	717 058	219 061	0%	2 264 319	454 907	0	2 264 319	1 809 412	0%
Casier 16	407 331	0	122 654	284 676	284 676	0%	1 384 281	0	122 654	1 261 627	1 261 627	0%
Casier 17	44 978	196 171	8 585	36 393	-159 778	81%	81 133	192 059	8 585	72 548	-119 511	62%
Casier 18	888 503	356 125	0	888 503	532 378	0%	1 327 106	377 409	0	1 327 106	949 697	0%
Casier 19	207 467		0	207 467	207 467	0%	562 816		0	562 816	562 816	0%
Casier 20	68 105	238 238	90	68 015	-170 223	71%	232 466	284 053	90	232 376	-51 677	18%
Casier 21	36 369	64 974	0	36 369	-28 605	44%	138 359	85 799	0	138 359	52 560	0%
TOTAL	12 624 353	2 901 478	607 783	12 016 570	9 115 092		31 957 584	2 714 731	607 783	31 349 801	28 635 070	

Période de retour	Décennale sèche					Quinquennale sèche					Moyenne				
Année de référence	2007-08	2008	Moy sur 2006-2013		2008	1997-98	2007	Moy sur 2006-2013		1998/2007	1971-72	2014	Moy sur 2006-2013		1972/2010
N° scénario	4 (VPA)	4 (AUTO)	PRELEV AEP+IND	VPA-(AEP+IND)	VdispoIRRIG-Vauto	5 (VPA)	5 (AUTO)	PRELEV AEP+IND	VPA-(AEP+IND)	VdispoIRRIG-Vauto	10	10 (AUTO)	PRELEV AEP+IND	VPA-(AEP+IND)	VdispoIRRIG-Vauto
Casier 1	5 796 258	27 499	75 721	5 720 537	5 693 038	6 821 003	27 500	75 721	6 745 282	6 717 782	11 470 116	709 090	75 721	11 394 394	10 685 304
Casier 2	1 783 956	349 180	0	1 783 956	1 434 776	2 213 332	0	0	2 213 332	2 213 332	3 776 647	360 300	0	3 776 647	3 416 347
Casier 3	1 376 359	103 701	0	1 376 359	1 272 658	2 032 555	186 850	0	2 032 555	1 845 705	2 764 885	251 725	0	2 764 885	2 513 160
Casier 4	4 438 780	0	28 772	4 410 007	4 410 007	5 206 893	0	28 772	5 178 121	5 178 121	8 711 019	555 200	28 772	8 682 247	8 127 047
Casier 5	2 017 414	97 111	0	2 017 414	1 920 303	2 496 538	0	0	2 496 538	2 496 538	4 249 726	502 760	0	4 249 726	3 746 966
Casier 6	4 110 572	417 611	0	4 110 572	3 692 961	4 995 992	0	0	4 995 992	4 995 992	8 374 537	840 229	0	8 374 537	7 534 308
Casier 7	2 748 084	35 010	3 953	2 744 131	2 709 121	3 580 755	0	3 953	3 576 803	3 576 803	6 129 514	88 000	3 953	6 125 562	6 037 562
Casier 8	193 466	0	0	193 466	193 466	231 842	6 400	0	231 842	225 442	370 804	6 950	0	370 804	363 854
Casier 9	392 309		60 622	331 688	331 688	492 263		60 622	431 641	431 641	811 428		60 622	750 806	750 806
Casier 10	3 445 272	142 489	42 997	3 402 275	3 259 786	4 019 503	234 994	42 997	3 976 507	3 741 513	6 571 788	222 266	42 997	6 528 792	6 306 526
Casier 11	3 185 356	0	180 577	3 004 779	3 004 779	3 816 843	0	180 577	3 636 266	3 636 266	6 580 719	846 540	180 577	6 400 142	5 553 602
Casier 12	294 467	35 688	0	294 467	258 779	351 524	46 295	0	351 524	305 229	633 235	8 937	0	633 235	624 298
Casier 13	4 224 765	414 556	83 812	4 140 953	3 726 397	4 548 761	543 125	83 812	4 464 949	3 921 824	6 407 084	503 322	83 812	6 323 272	5 819 950
Casier 14	1 748 588	82 589	0	1 748 588	1 665 999	2 109 627	82 539	0	2 109 627	2 027 088	3 386 589	83 114	0	3 386 589	3 303 475
Casier 15	3 272 971	172 693	0	3 272 971	3 100 278	3 982 405	444 907	0	3 982 405	3 537 498	6 783 854	76 810	0	6 783 854	6 707 044
Casier 16	2 600 560	0	122 654	2 477 906	2 477 906	3 294 732	0	122 654	3 172 077	3 172 077	4 961 804	525 340	122 654	4 839 150	4 313 810
Casier 17	857 721	138 330	8 585	849 136	710 806	1 460 247	154 985	8 585	1 451 662	1 296 677	1 931 897	181 594	8 585	1 923 312	1 741 718
Casier 18	1 898 875	178 699	0	1 898 875	1 720 176	2 706 688	324 684	0	2 706 688	2 382 004	4 004 228	101 750	0	4 004 228	3 902 478
Casier 19	785 066	246 656	0	785 066	538 410	944 920		0	944 920	944 920	1 548 509		0	1 548 509	1 548 509
Casier 20	343 893		90	343 803	343 803	424 452	263 228	90	424 362	161 134	719 044	306 636	90	718 954	412 318
Casier 21	246 954	73 331	0	246 954	173 623	324 577	85 799	0	324 577	238 778	522 067	74 970	0	522 067	447 097
TOTAL	**45 761 686**	**2 515 143**	**607 783**	**45 153 903**	**42 638 760**	**56 055 453**	**2 401 306**	**607 783**	**55 447 670**	**53 046 364**	**90 709 493**	**6 245 533**	**607 783**	**90 101 710**	**83 856 177**

Période de retour	Quinquennale humide					Décennale humide					Max
Année de référence	2003-04	2004	Moy sur 2006-2013		2004	1960-61	2004	Moy sur 2006-2013		1961/2004	1992-93
N° scénario	12 (VPA)	12 (AUTO)	PRELEV AEP+IND	VPA-(AEP+IND)	VdispoIRRIG-Vauto	15	15 (AUTO)	PRELEV AEP+IND	VPA-(AEP+IND)	VdispoIRRIG-Vauto	17
Casier 1	14 597 721	201 586	75 721	14 522 000	14 320 414	16 163 607	201 586	75 721	16 087 886	15 886 300	17 942 124
Casier 2	5 234 567	0	0	5 234 567	5 234 567	5 251 617	0	0	5 251 617	5 251 617	6 127 097
Casier 3	4 220 394	192 400	0	4 220 394	4 027 994	3 701 308	192 400	0	3 701 308	3 508 908	4 662 794
Casier 4	11 071 176	0	28 772	11 042 403	11 042 403	12 192 374	0	28 772	12 163 602	12 163 602	13 400 635
Casier 5	5 686 898	0	0	5 686 898	5 686 898	5 725 080	0	0	5 725 080	5 725 080	6 583 944
Casier 6	10 970 091	0	0	10 970 091	10 970 091	10 889 488	0	0	10 889 488	10 889 488	12 366 771
Casier 7	7 805 042	0	3 953	7 801 089	7 801 089	7 184 787	0	3 953	7 180 834	7 180 834	8 315 115
Casier 8	480 945	6 400	0	480 945	474 545	499 968	6 400	0	499 968	493 568	568 440
Casier 9	1 059 303		60 622	998 681	998 681	1 027 588		60 622	966 966	966 966	1 172 763
Casier 10	8 255 494	274 890	42 997	8 212 497	7 937 607	8 952 664	274 890	42 997	8 909 668	8 634 778	9 870 686
Casier 11	8 514 282	0	180 577	8 333 705	8 333 705	9 357 689	0	180 577	9 177 112	9 177 112	10 422 050
Casier 12	803 223	78 625	0	803 223	724 598	886 697	78 625	0	886 697	808 072	927 466
Casier 13	7 473 172	605 331	83 812	7 389 360	6 784 029	8 493 233	605 331	83 812	8 409 421	7 804 090	9 195 548
Casier 14	4 326 692	159 314	0	4 326 692	4 167 378	4 456 306	159 314	0	4 456 306	4 296 992	5 029 637
Casier 15	8 946 053	542 979	0	8 946 053	8 403 074	9 466 916	542 979	0	9 466 916	8 923 937	10 696 793
Casier 16	6 468 599	0	122 654	6 345 945	6 345 945	5 990 544	0	122 654	5 867 890	5 867 890	7 114 524
Casier 17	3 694 473	192 006	8 585	3 685 888	3 493 882	2 302 159	192 006	8 585	2 293 574	2 101 568	3 946 890
Casier 18	5 156 141	377 400	0	5 156 141	4 778 741	5 101 431	377 400	0	5 101 431	4 724 031	5 866 978
Casier 19	2 002 064		0	2 002 064	2 002 064	2 079 331		0	2 079 331	2 079 331	2 360 446
Casier 20	952 779	214 914	90	952 689	737 775	981 692	214 914	90	981 602	766 688	1 125 981
Casier 21	707 563	85 799	0	707 563	621 764	671 841	85 799	0	671 841	586 042	788 466
TOTAL	**118 426 667**	**2 931 644**	**607 783**	**117 818 884**	**114 887 240**	**121 376 320**	**2 931 644**	**607 783**	**120 768 537**	**117 836 893**	**138 485 149**

Annexe 25

Comparaison des charges au 01/10 à la charge au 01/10/2012 pour les 8 scenarii retenus

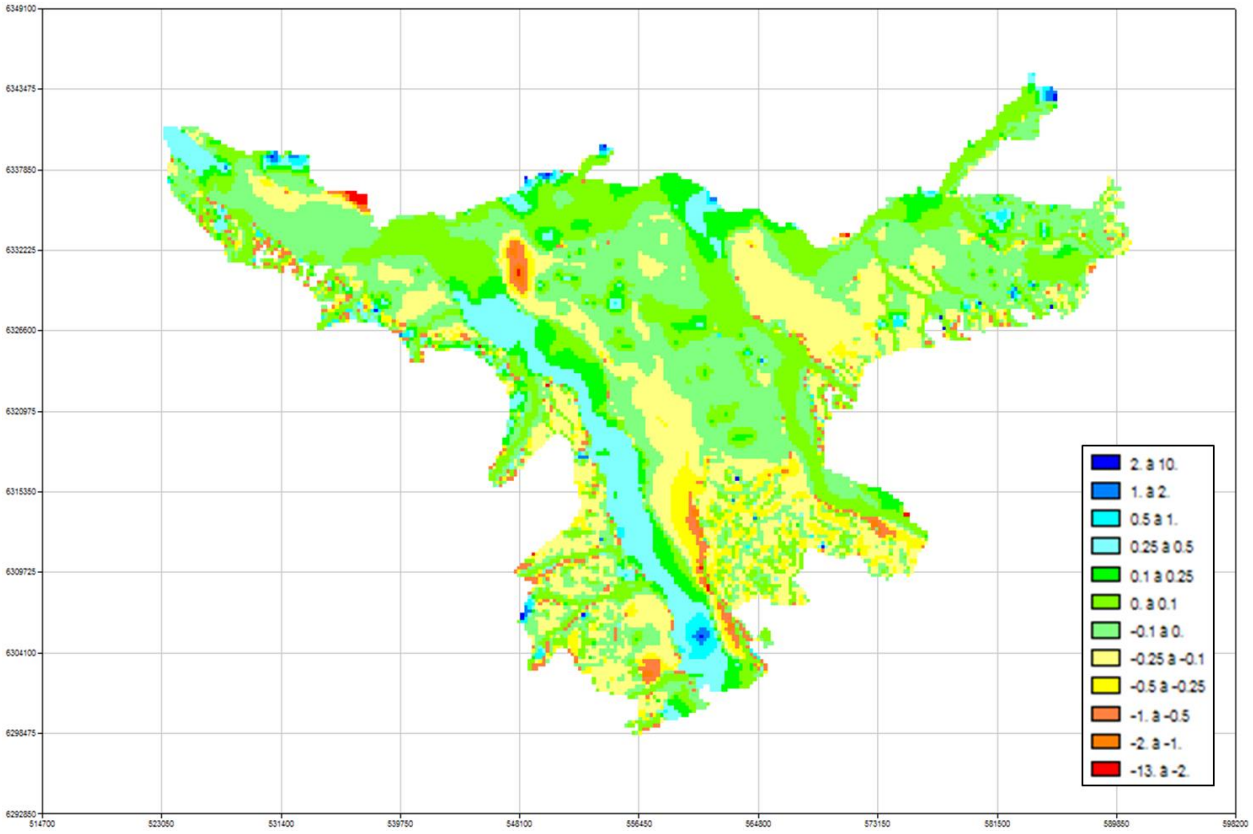


Illustration A25-1 – Scenario 1 – Recharge minimale – 2001-2002

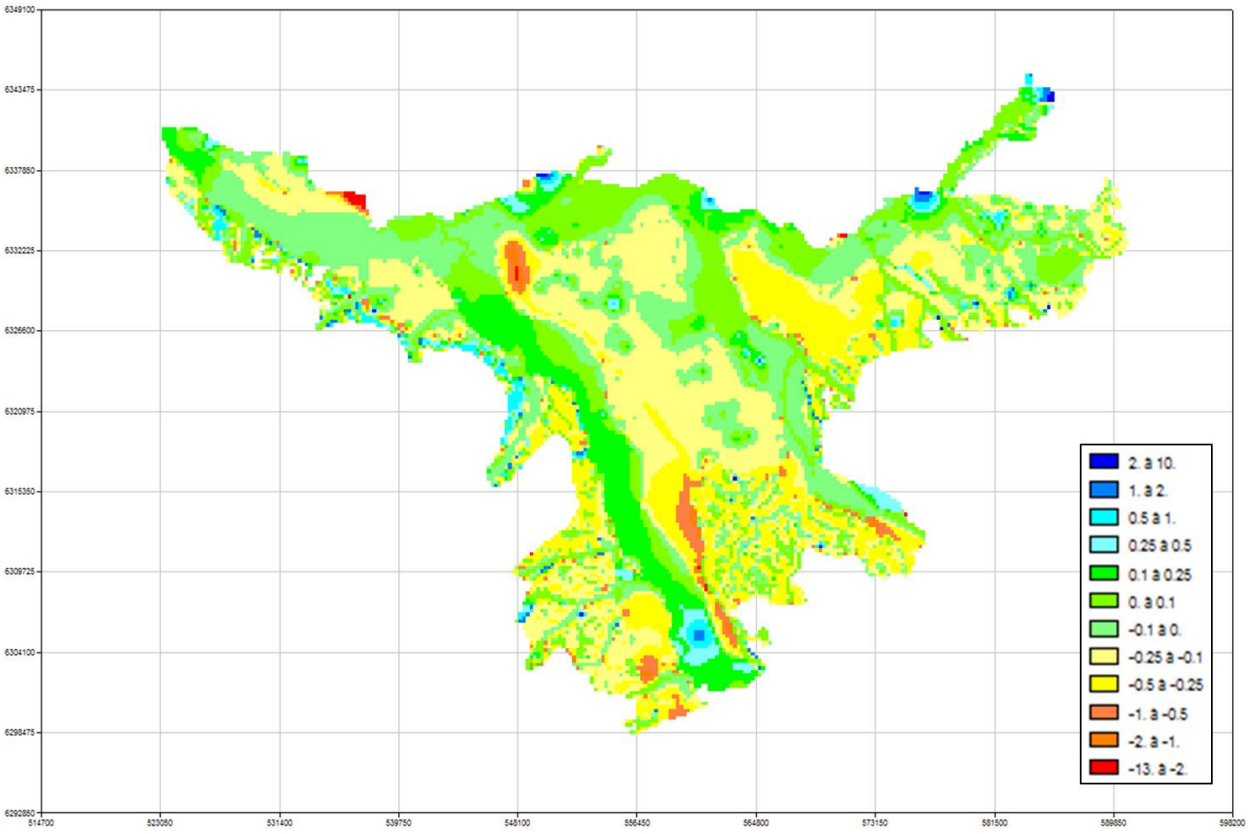


Illustration A25-2 – Scenario 3 – Vingtennale sèche – 2004-2005

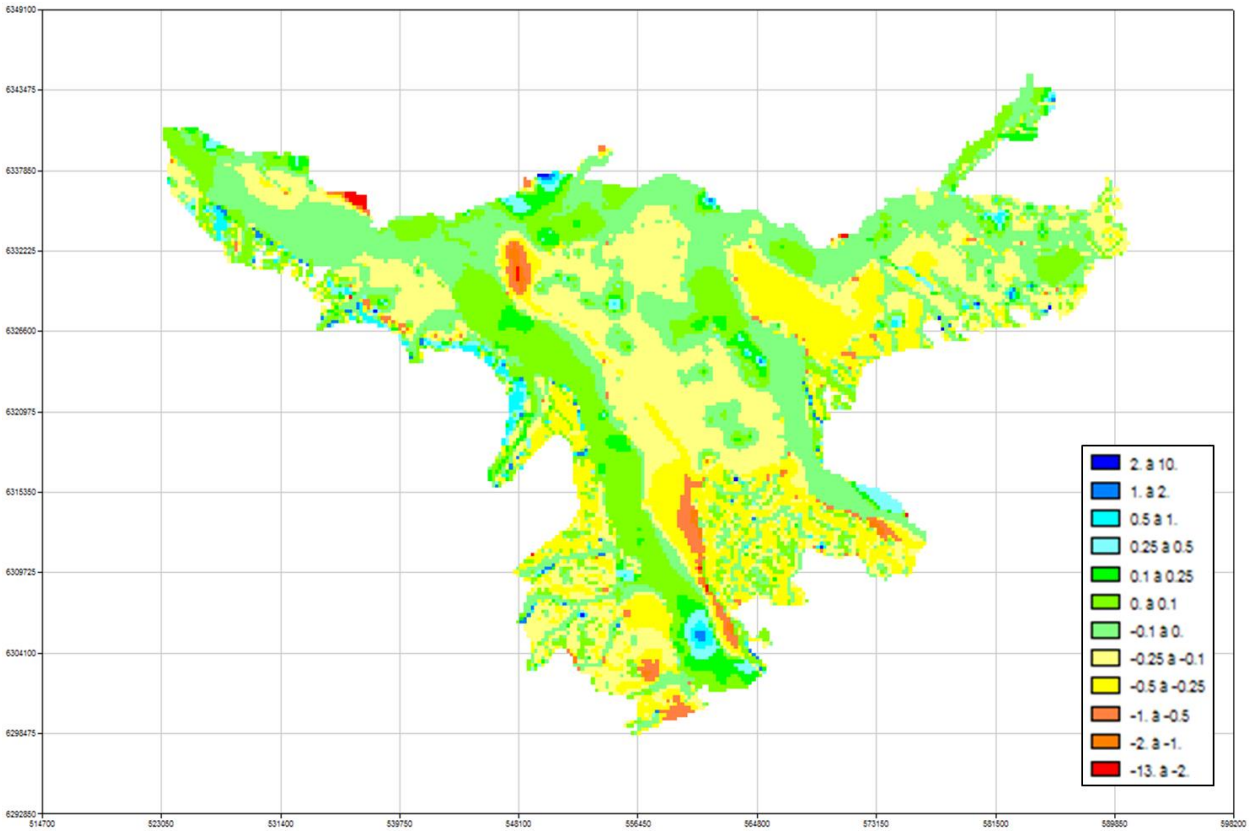


Illustration A25-3 – Scenario 5 – Décennale sèche – 1989-1990

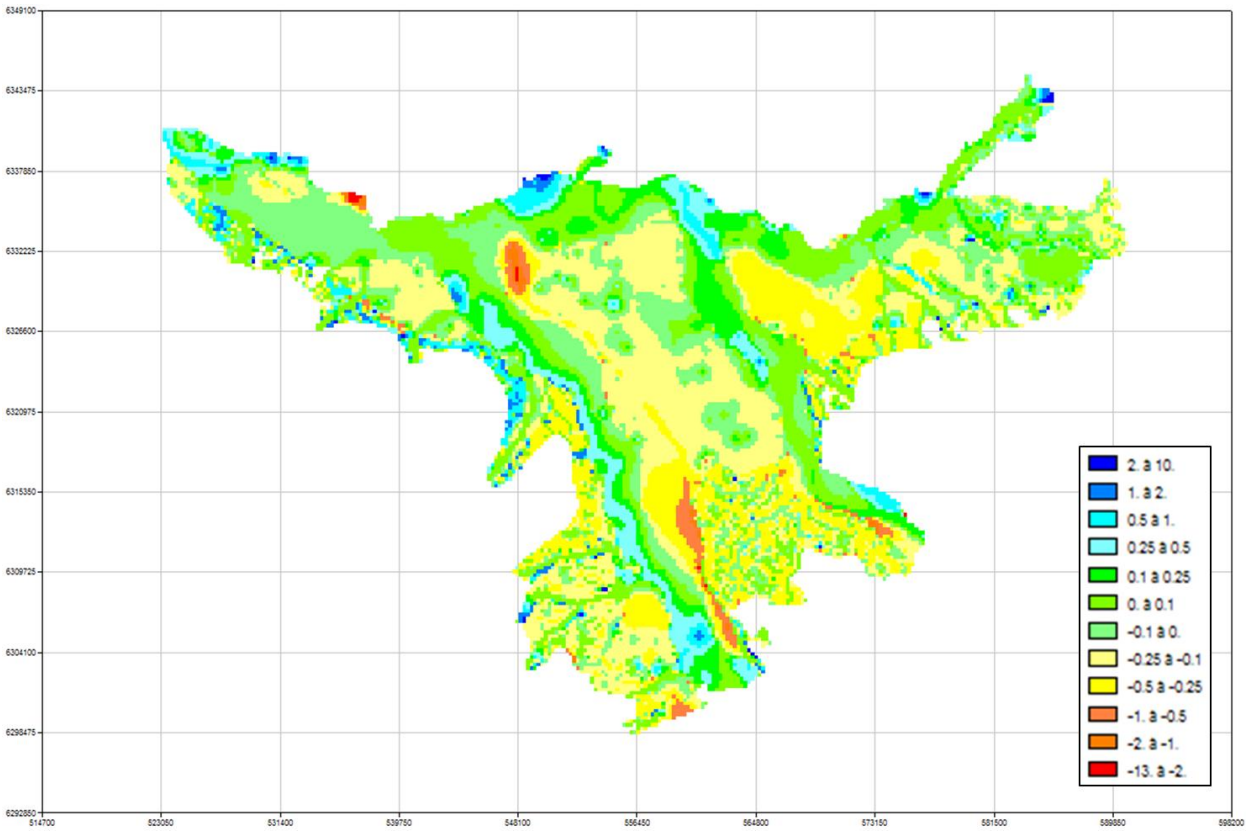


Illustration A25-4 – Scenario 9 – Quinquennale sèche – 1955-1956

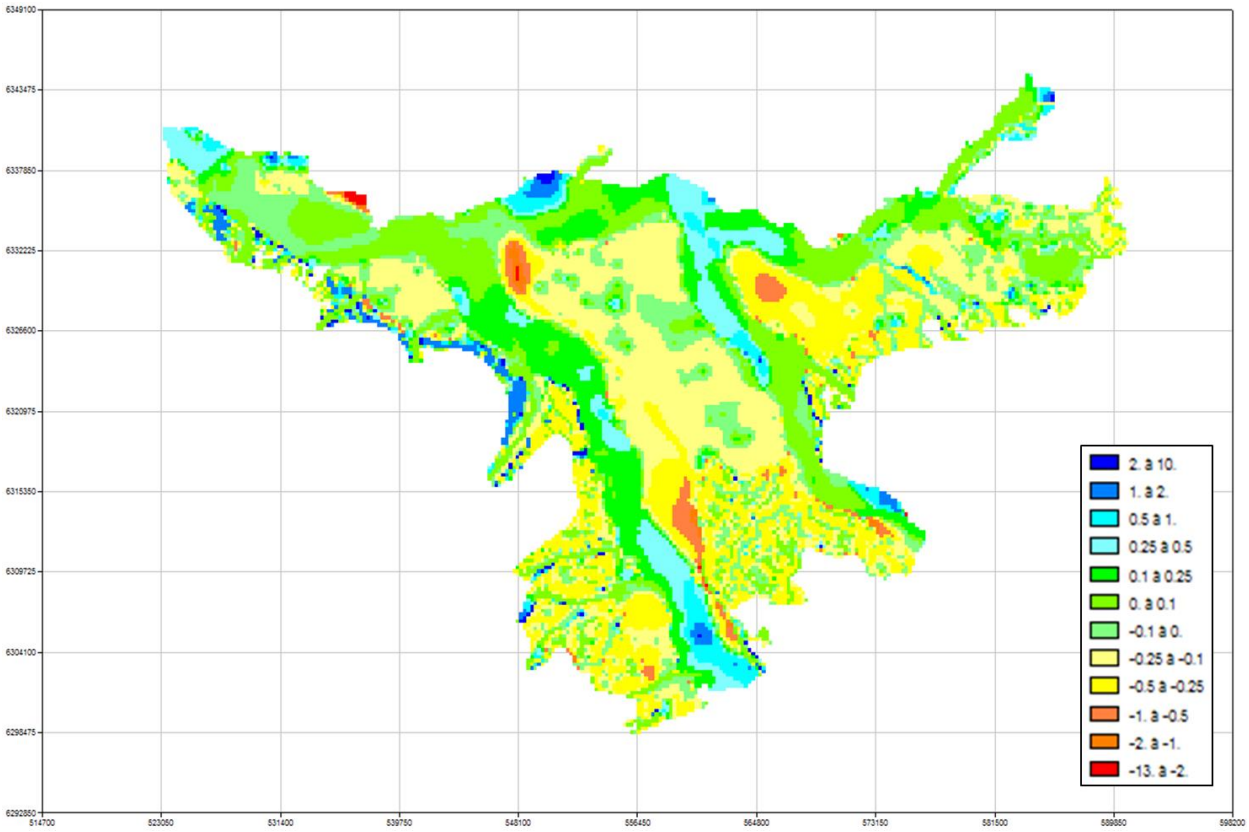


Illustration A25-5 – Scenario 12 – Recharge moyenne – 1952-1953

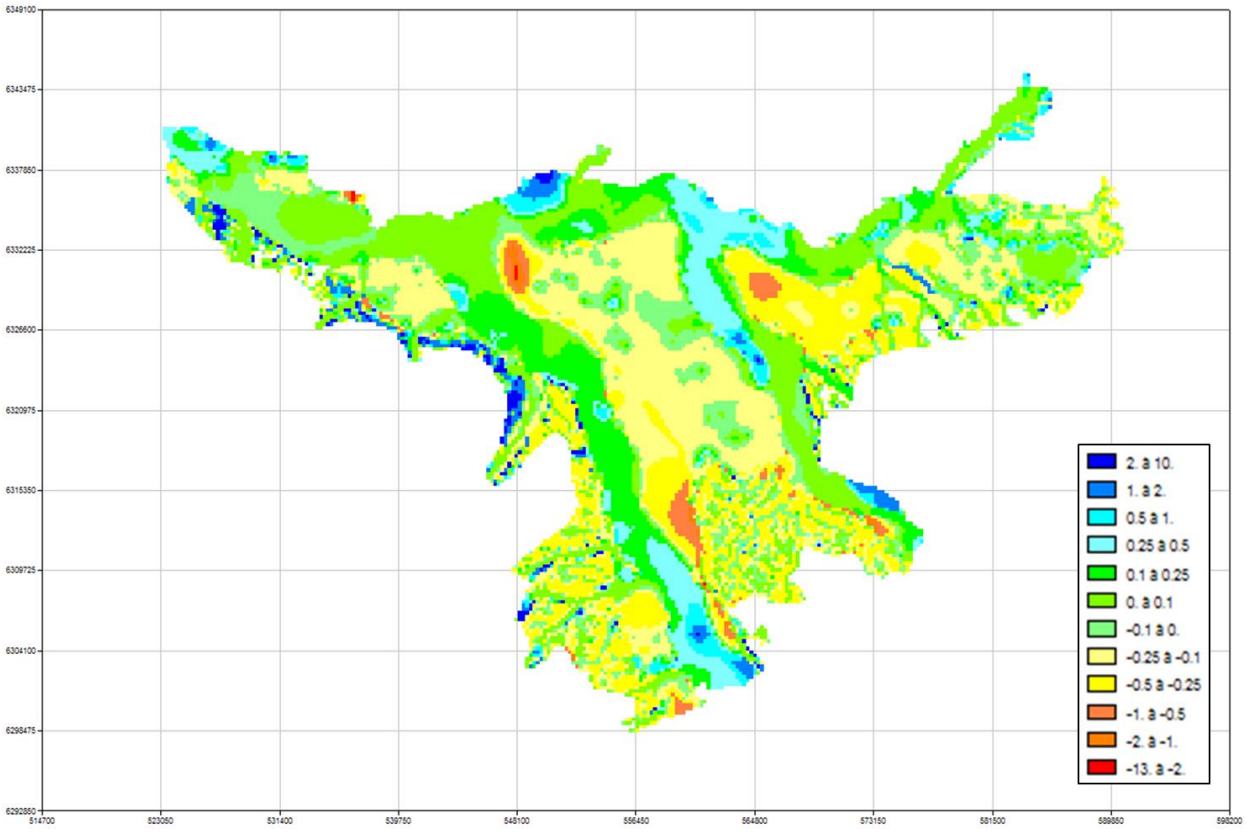


Illustration A25-6 – Scenario 14 – Quninquennale humide – 1995-1996

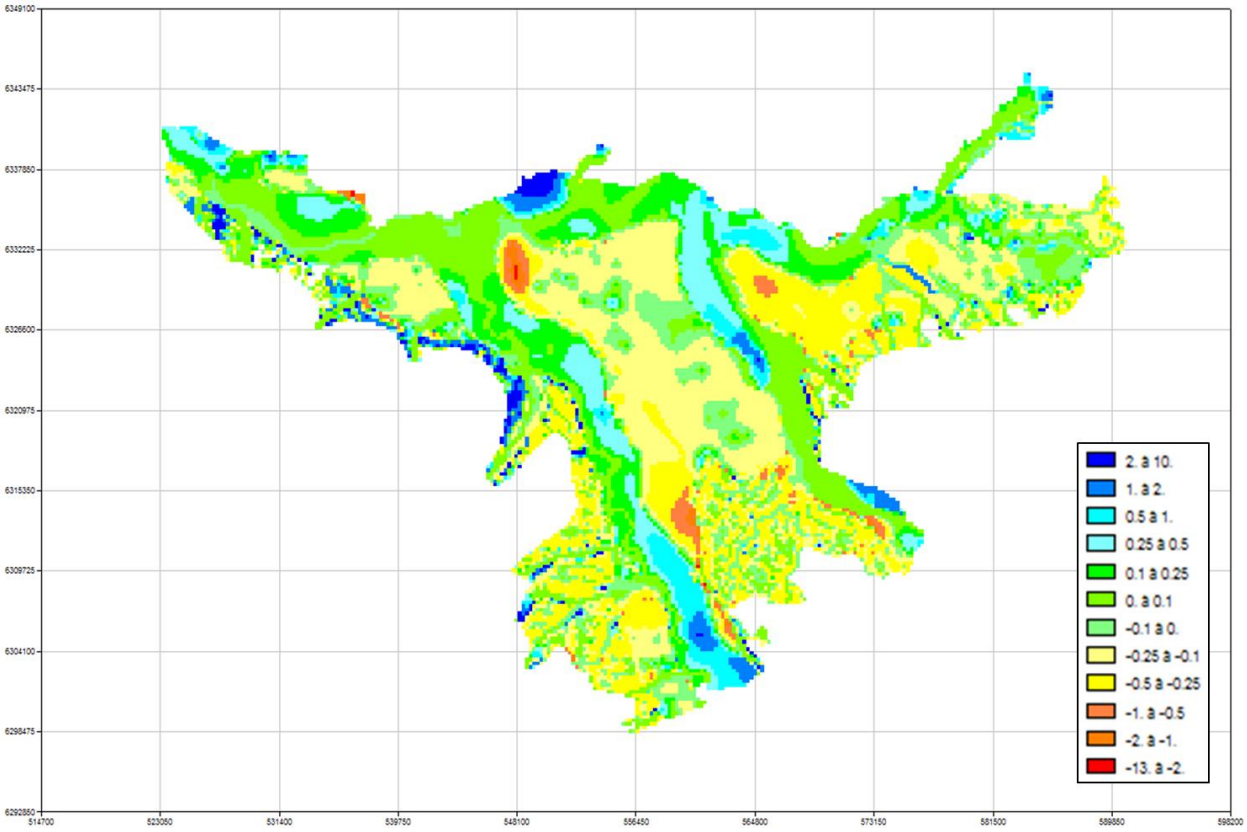


Illustration A25-7 – Scenario 18 – Décennale humide – 1987-1988

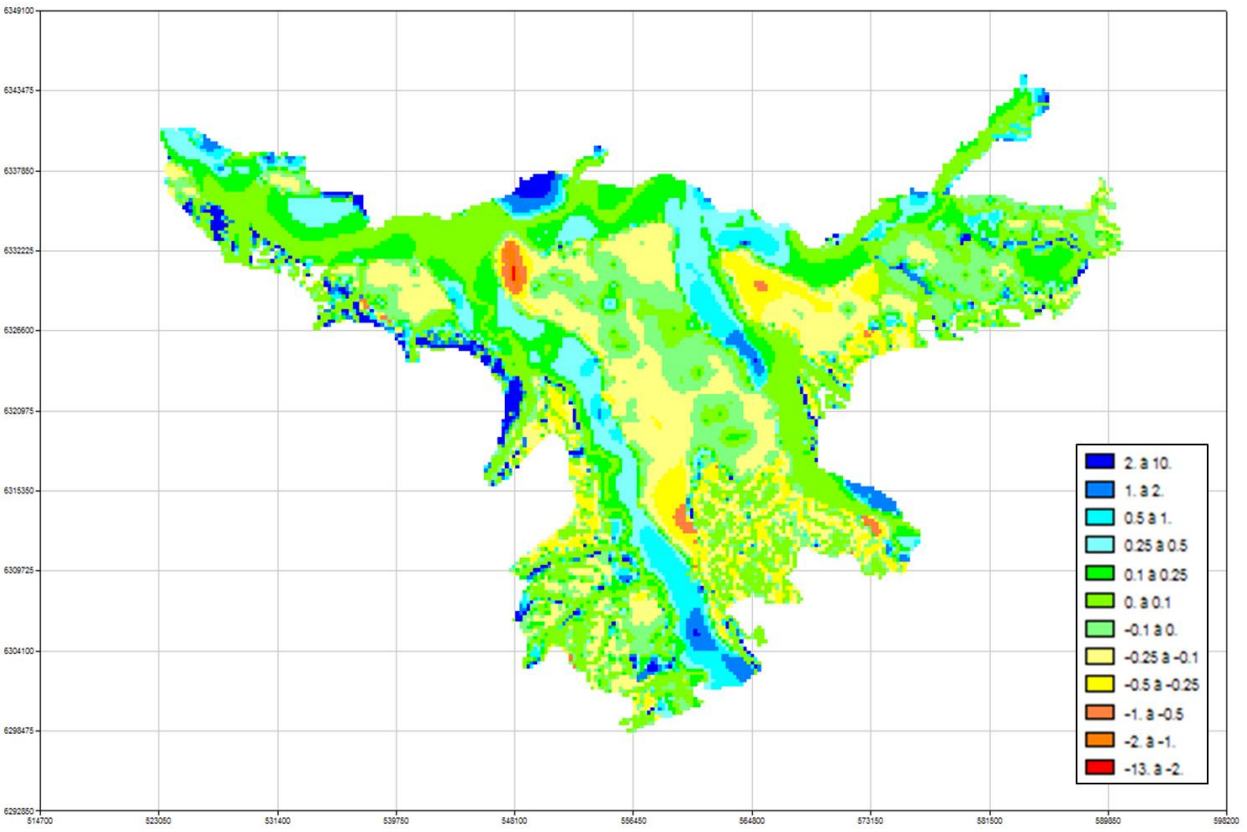


Illustration A25-8 – Scenario 20 – Recharge maximale – 1992-1993

Annexe 26

Etude statistique des recharges saisonnières – Station de Montauban – 1949-2015

Année hydrologique	Pluie efficace février-mai (mm)	Rang	Fréquence	Moy. Classe	Année hydrologique	Pluie efficace avril-mai (mm)	Rang	Fréquence	Moy. Classe
2004-2005	0.7	1	0.008		1966-1967	0.0	1	0.008	
1966-1967	1.6	2	0.023		1975-1976	0.0	2	0.023	
2011-2012	8.4	3	0.038		2010-2011	0.0	3	0.038	
1975-1976	8.9	4	0.053		1954-1955	0.0	4	0.053	
1952-1953	11.3	5	0.068		1959-1960	0.0	5	0.068	
1974-1975	12.4	6	0.083		2002-2003	0.0	6	0.083	
1991-1992	12.8	7	0.098		1981-1982	0.0	7	0.098	
1996-1997	14.1	8	0.114		2005-2006	0.0	8	0.114	
2001-2002	14.5	9	0.129		1962-1963	0.0	9	0.129	
2010-2011	17.0	10	0.144		1972-1973	0.0	10	0.144	
2009-2010	20.4	11	0.159		1952-1953	0.0	11	0.159	
2000-2001	26.8	12	0.174		2004-2005	0.0	12	0.174	
1955-1956	28.8	13	0.189		1996-1997	0.0	13	0.189	
1960-1961	29.0	14	0.205		1982-1983	0.1	14	0.205	
1964-1965	32.3	15	0.220		1974-1975	0.1	15	0.220	
1997-1998	33.4	16	0.235		1994-1995	0.2	16	0.235	
2014-2015	36.5	17	0.250		1989-1990	0.5	17	0.250	
2007-2008	37.9	18	0.265		2001-2002	0.6	18	0.265	
1990-1991	38.3	19	0.280		1991-1992	0.8	19	0.280	
1965-1966	40.3	20	0.295		1964-1965	0.8	20	0.295	
1954-1955	40.6	21	0.311	23.6	1971-1972	1.1	21	0.311	0.0
1980-1981	41.8	22	0.326	23.1	1951-1952	1.4	22	0.326	0.3
1959-1960	43.7	23	0.341		2009-2010	1.6	23	0.341	
1999-2000	45.3	24	0.356		1960-1961	1.8	24	0.356	
1958-1959	45.4	25	0.371		1979-1980	1.9	25	0.371	
1973-1974	47.7	26	0.386		1995-1996	2.2	26	0.386	
1961-1962	48.1	27	0.402		2013-2014	2.9	27	0.402	
1951-1952	51.2	28	0.417		2014-2015	4.1	28	0.417	
2002-2003	52.0	29	0.432		1949-1950	5.4	29	0.432	
2013-2014	52.2	30	0.447		1980-1981	5.4	30	0.447	
2008-2009	53.1	31	0.462		1955-1956	6.1	31	0.462	
1979-1980	53.8	32	0.477		1973-1974	6.7	32	0.477	
1981-1982	55.2	33	0.492		2011-2012	8.4	33	0.492	
1949-1950	55.6	34	0.508		1969-1970	8.9	34	0.508	
2003-2004	59.4	35	0.523		1963-1964	11.0	35	0.523	
1995-1996	59.5	36	0.538		1990-1991	11.1	36	0.538	
1989-1990	60.8	37	0.553		1965-1966	11.7	37	0.553	
1963-1964	62.5	38	0.568		1961-1962	13.2	38	0.568	
1967-1968	63.2	39	0.583		2000-2001	13.6	39	0.583	
1972-1973	64.2	40	0.598		1958-1959	16.9	40	0.598	
1992-1993	66.0	41	0.614		1978-1979	17.3	41	0.614	
1957-1958	68.4	42	0.629		1999-2000	17.3	42	0.629	
1985-1986	68.9	43	0.644	55.4	1950-1951	20.4	43	0.644	8.6
1982-1983	68.9	44	0.659	56.6	1984-1985	20.7	44	0.659	9.5
2005-2006	71.6	45	0.674		2012-2013	21.7	45	0.674	
1962-1963	73.3	46	0.689		2007-2008	23.4	46	0.689	
1998-1999	73.8	47	0.705		1957-1958	23.8	47	0.705	
1969-1970	74.0	48	0.720		1970-1971	24.5	48	0.720	
1956-1957	77.0	49	0.735		1967-1968	25.8	49	0.735	
1986-1987	86.4	50	0.750		1986-1987	27.2	50	0.750	
2012-2013	86.5	51	0.765		1997-1998	27.6	51	0.765	
1976-1977	94.5	52	0.780		1976-1977	28.6	52	0.780	
1971-1972	95.2	53	0.795		1985-1986	29.4	53	0.795	
1983-1984	95.8	54	0.811		2006-2007	30.7	54	0.811	
1970-1971	97.9	55	0.826		1993-1994	40.3	55	0.826	
1994-1995	99.6	56	0.841		2003-2004	41.5	56	0.841	
2006-2007	100.5	57	0.856		1956-1957	44.8	57	0.856	
1968-1969	103.4	58	0.871		2008-2009	48.0	58	0.871	
1978-1979	116.1	59	0.886		1998-1999	48.6	59	0.886	
1988-1989	120.8	60	0.902		1983-1984	48.9	60	0.902	
1953-1954	123.4	61	0.917		1968-1969	49.6	61	0.917	
1984-1985	140.7	62	0.932		1987-1988	53.3	62	0.932	
1993-1994	148.1	63	0.947		1988-1989	56.5	63	0.947	
1987-1988	162.3	64	0.962		1977-1978	59.5	64	0.962	
1950-1951	163.8	65	0.977	98.8	1953-1954	62.8	65	0.977	40.9
1977-1978	183.0	66	0.992	108.5	1992-1993	65.0	66	0.992	40.1

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 - **www.brgm.fr**

Direction Régionale Occitanie – Site de Toulouse
3, rue Marie Curie
BP 49
31527 – Ramonville-Saint-Agne – France
Tél. : 05 62 24 14 50