

Document public

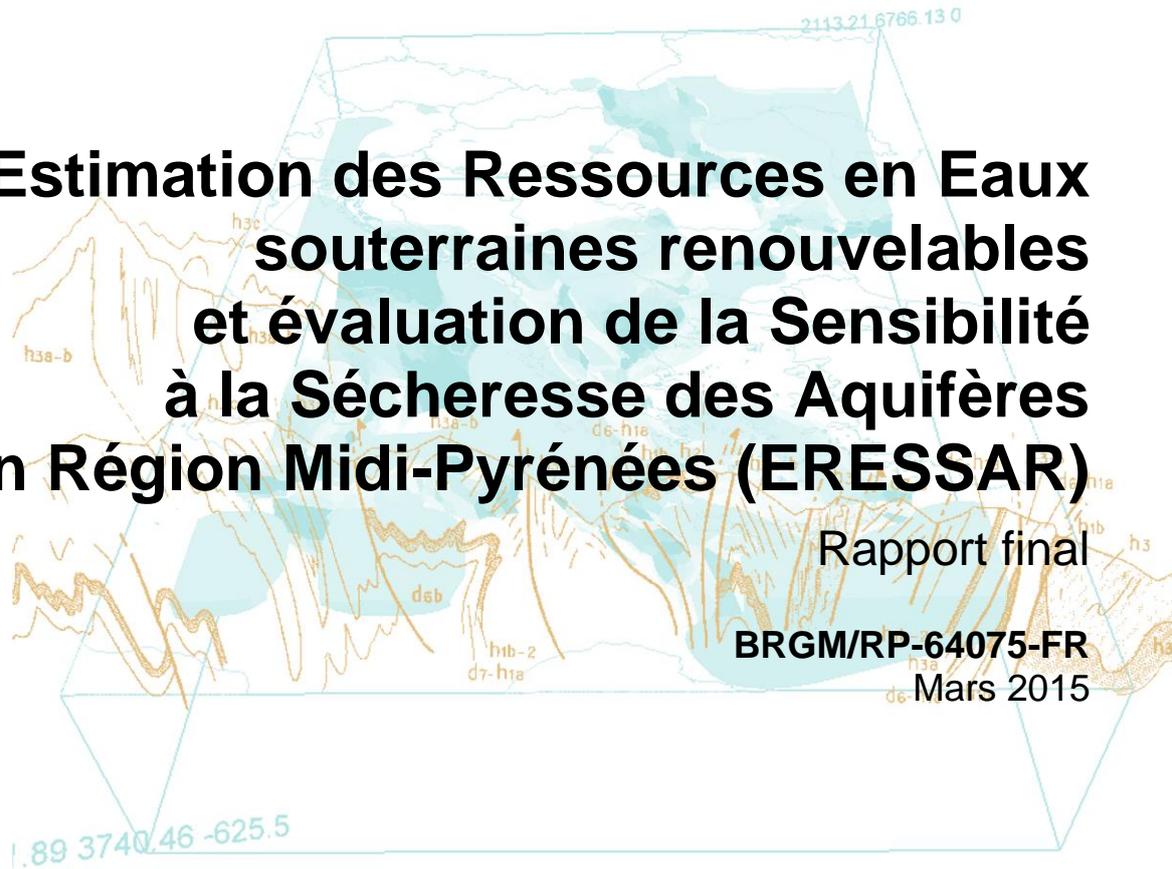


Estimation des Ressources en Eaux souterraines renouvelables et évaluation de la Sensibilité à la Sécheresse des Aquifères en Région Midi-Pyrénées (ERESSAR)

Rapport final

BRGM/RP-64075-FR

Mars 2015



Ce projet a été cofinancé par l'Union européenne.
L'Europe s'engage en Midi-Pyrénées avec le Fonds européen de développement régional.



Estimation des Ressources en Eaux souterraines renouvelables et évaluation de la Sensibilité à la Sécheresse des Aquifères en Région Midi-Pyrénées (ERESSAR)

Rapport final

BRGM/RP-64075-FR

Mars 2015

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM PSP10MPY04

M. Saplairoles, S. Béranger, J.M. Gandolfi, M.E. Bonnet, M. Thinon-Larminach

Avec la collaboration de
A. Grandemange, E. Poux

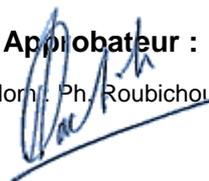
Vérificateur :

Nom : J.J. Seguin



Approbateur :

Nom : Ph. Roubichou



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 : Sécheresse, Ressource en eau souterraine renouvelable, Nappe libre, Aquifères poreux, Aquifères karstiques, Domaine de socle, BD LISA, Midi-Pyrénées.

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

Saplaïroles M., Béranger S., Gandolfi J.M., Bonnet M.E., Thinon-Larminach M. (2015) - Estimation des ressources en eaux souterraines renouvelables et évaluation de la sensibilité à la sécheresse des aquifères en région Midi-Pyrénées. Rapport final. BRGM/RP-64075-FR, 198 p., 166 ill., 17 annexes (hors texte).

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La sécheresse au sens stricte peut être définie comme un déficit important de précipitation par rapport à une moyenne, durant une période relativement longue (saison, années). Dans nos régions tempérées, ces événements ne sont pas rares et font partie de la variabilité du climat. Selon sa durée, son intensité et son extension géographique, elle peut avoir de graves conséquences sur la qualité de vie des populations et sur tous les secteurs économiques, notamment celui de l'agriculture en période d'irrigation.

La détermination de l'état quantitatif des masses d'eau s'inscrit dans l'objectif européen de la DCE visant à une gestion globale et durable de la ressource en eau. Dans ce cadre, l'évaluation de la sensibilité à la sécheresse de chaque entité hydrogéologique constitue un paramètre de gestion indispensable.

Le projet ERESSAR fait partie des modules F et G du programme pluriannuel ONGERE (**O**util d'aide à la décision pour la **G**estion durable des **R**essources en **E**au). Il est financé par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, la Région Midi-Pyrénées, les fonds européens (FEDER) et par le BRGM dans le cadre de ses opérations de service public.

Les objectifs de ce projet s'intègrent totalement aux orientations fondamentales du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin Adour-Garonne en vigueur sur la période 2010-2015. En effet, celles-ci mettent notamment l'accent sur les points suivants :

- gérer durablement les eaux souterraines, préserver et restaurer les fonctionnalités des milieux aquatiques et humides ;
- maîtriser la gestion quantitative de l'eau dans la perspective du changement climatique.

L'évaluation de la sensibilité à la sécheresse des principaux aquifères à nappe libre de la région Midi-Pyrénées est abordée par la mise en place de différentes approches méthodologiques en fonction du type de réservoir concerné (aquifères développés en milieux poreux, fissurés ou karstifiés et en domaine de socle).

Le travail réalisé a été entrepris à partir des chroniques piézométriques et/ou de débits (extraites de la base de données nationale ADES ou de la banque HYDRO) des points d'eau appartenant aux différents réseaux de suivi quantitatif existants en Midi-Pyrénées. Toutefois, dans le cadre des aquifères développés en domaine de socle, les importantes lacunes de données mises en évidence ont nécessité l'installation d'enregistreurs de niveaux d'eau sur 20 nouveaux points de suivi (forages et puits) répartis dans les 3 départements concernés par les formations de socle du Massif central (Lot, Aveyron et Tarn).

Plusieurs critères d'évaluation de la résistance à la sécheresse ont été développés rendant globalement compte de la dynamique de baisse des nappes en fonction des spécificités des différents types d'aquifères rencontrés en Midi-Pyrénées. Pour chaque aquifère, un indicateur de résistance intrinsèque à la sécheresse a ensuite été calculé en pondérant et en sommant les notes de résistance attribuées à chaque critère. En effet, ces différents indicateurs ont dû être adaptés, en termes de représentativité et de pondération notamment, aux caractéristiques propres de chaque type d'aquifère, mais aussi à leur niveau de connaissance et à la disponibilité des données les concernant.

Au final, une cartographie en classes de résistance à la sécheresse a été effectuée indépendamment pour chacun des trois types d'aquifères étudiés (poreux, de socle et karstique). Les cartographies ainsi élaborées doivent être interprétées non pas en tant que reflet d'une vulnérabilité ou d'une résistance absolue à la sécheresse mais en tant que construction d'une hiérarchie des aquifères vis-à-vis de leur sensibilité permettant de cibler les zones prioritaires en matière de gestion de la ressource.

Ces éléments donnent lieu d'envisager, selon les nappes, différentes modalités de gestion de crise en tenant compte de l'état de remplissage du réservoir aquifère au moment de l'amorce de la baisse des niveaux. En adjoignant à une vue statique des nappes (leur résistance intrinsèque à la sécheresse) une vue dynamique de la piézométrie des nappes à une date donnée, il ressort une information modulée sur l'état des ressources en eau sur la période considérée.

La mise en place d'un réseau régional spécifique à la problématique sécheresse est donc utilement associée à la cartographie de résistance à la sécheresse des différents aquifères considérés. Ainsi, 7 ouvrages représentatifs des aquifères développés en milieux poreux et 11 sources caractérisant des systèmes karstiques définis comme sensible à des périodes prolongées de déficit en eau ont été sélectionnés pour être intégrés au réseau sécheresse. L'ensemble de ces points de suivi appartient déjà à un réseau de suivi quantitatif de la région Midi-Pyrénées.

Concernant les aquifères de socle, l'approche proposée est différente des deux autres catégories d'aquifères étudiés dans le sens où il a été nécessaire d'acquérir des nouvelles données dans le cadre du projet. Ainsi, un suivi ayant deux objectifs distincts est proposé pour caractériser les aquifères de socle. Il s'agit de poursuivre l'acquisition de données sur 10 ouvrages disposant d'une chronique piézométriques exploitables avec pour objectif d'optimiser la caractérisation de la sensibilité à la sécheresse. En complément, il est fortement recommandé d'améliorer la connaissance du fonctionnement de ces aquifères composites par le suivi de 6 nouveaux ouvrages dans des secteurs actuellement dépourvus de toutes données.

En effet, la caractérisation de la sensibilité à la sécheresse nécessite, non seulement une bonne connaissance du fonctionnement hydrogéologique des aquifères et notamment une quantification de leur réserve à une échelle locale, mais aussi la disponibilité de chroniques de données suffisamment longues (piézométrie, débit des sources) à un pas de temps fin (jour). Certains secteurs, comme le domaine de socle, ou certains bassins hydrologiques de sources karstiques en sont actuellement dépourvus, ne permettant pas d'aborder cette thématique.

La mise en place d'un réseau spécifique à la sécheresse sur la région Midi-Pyrénées, liée à des actions d'amélioration des connaissances ciblées sur les zones le nécessitant devrait permettre à terme de mieux guider les décideurs sur une gestion anticipative vis-à-vis des événements extrêmes : occurrence d'une sécheresse, mais aussi à plus long terme sur les effets du changement climatique.

Sommaire

1. Introduction	15
2. Notions théoriques.....	19
2.1. TERME SÉCHERESSE : DÉFINITION ET CONSÉQUENCES.....	19
2.2. RESSOURCES EN EAU RENOUVELABLES ET STOCKS.....	19
2.3. FACTEURS INFLUENÇANT LA DYNAMIQUE D'UNE NAPPE	20
2.4. SENSIBILITÉ À LA SÉCHERESSE DES AQUIFÈRES.....	21
3. Aquifères étudiés et données utilisées.....	23
3.1. RÉFÉRENTIEL HYDROGÉOLOGIQUE FRANÇAIS BD LISA	23
3.1.1. Recensement des entités hydrogéologiques de niveau 3 en Midi-Pyrénées	24
3.1.2. Entités complémentaires de Midi-Pyrénées	26
3.2. DÉLIMITATION DES ENTITÉS ALLUVIONNAIRES SPÉCIFIQUES AU PROJET ERESSAR.....	27
3.2.1. Délimitation des entités alluvionnaires de la Garonne	29
3.2.2. Délimitation des entités alluvionnaires des affluents de la Garonne	30
3.2.3. Délimitation des autres entités alluvionnaires de Midi-Pyrénées	32
3.3. COLLECTE DES MESURES ACQUISES DANS LES DIFFÉRENTS RÉSEAUX DE SUIVI QUANTITATIF	34
3.3.1. Collecte des chroniques piézométriques exploitables	35
3.3.2. Collecte des données hydrométriques (sources et rivières)	36
3.4. ACQUISITION DES DONNÉES CLIMATIQUES (PRÉCIPITATIONS ET ETP).....	40
3.5. UNITÉS DE GESTION.....	44
4. Évaluation de la sensibilité à la sécheresse des aquifères poreux	47
4.1. TEMPS DE DEMI-DÉCROISSANCE	47
4.1.1. Aspects théoriques	47
4.1.2. Résultats obtenus à l'échelle du piézomètre	48
4.1.3. À l'échelle d'une entité BD-LISA de niveau 3	51
4.1.4. À l'échelle de la région Midi-Pyrénées	53
4.2. ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU RENOUVELABLE ET LEUR FLUCTUATION.....	58
4.2.1. Évaluation des ressources en eau renouvelable	58
4.2.2. Capacité régulatrice de l'aquifère	59
4.3. SUPERFICIE DE L'ENTITÉ AQUIFÈRE	59

4.4. UNITÉ DE GESTION ET DENSITÉ DE DRAINAGE	61
4.5. SYNTHÈSE DE RÉSULTATS.....	66
4.6. CARTOGRAPHIE DE RÉSISTANCE À LA SÉCHERESSE DES AQUIFÈRES POREUX.....	70
4.6.1. Quantification des critères.....	70
4.6.2. Pondérations des critères	75
4.6.3. Carte de la sensibilité à la sécheresse des aquifères poreux	78
4.7. UTILISATION DES RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DE LA LOI DE DÉCROISSANCE EXPONENTIELLE	80
4.7.1. Impact de la recharge hivernale et printanière sur le temps de demi- décroissance.....	80
4.7.2. Utilisation du calage de la loi de décroissance exponentielle à des fins prédictives	81
4.8. AUTRES TECHNIQUES D'ANALYSE DU SIGNAL COMPLÉMENTAIRES À LA LOI DE DÉCROISSANCE EXPONENTIELLE	81
4.8.1. Informations concernant les hauteurs piézométriques moyennes, minimales et maximales et leurs évolutions	82
4.8.2. Informations concernant l'évolution globale de la piézométrie.....	84
4.8.3. Informations concernant les dates d'occurrence des hautes eaux et basses eaux.....	85
5. Évaluation de la sensibilité à la sécheresse des aquifères en domaine de socle	87
5.1. STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES AQUIFÈRES DE SOCLE : RAPPELS	87
5.1.1. Concepts d'aquifères de socle	87
5.1.2. Notions sur la résistance à la sécheresse des aquifères de socle.....	89
5.2. LES FORMATIONS DE SOCLE EN MIDI-PYRÉNÉES.....	90
5.3. INDICATEURS DE SENSIBILITÉ À LA SÉCHERESSE DES AQUIFÈRES DE SOCLE : DIAGNOSTIC DES DONNÉES DISPONIBLES	92
5.3.1. Altérabilité des formations de socle.....	93
5.3.2. Présence et extension des aquifères	94
5.3.3. Localisation des horizons altéritiques.....	98
5.3.4. Débit des sources à l'étiage	98
5.3.5. Chronique piézométrique	101
5.3.6. Données hydrologiques	104
5.4. ANALYSE DES CRITÈRES PRIS EN COMPTE DANS LE CADRE DE LA PRÉSENTE ÉTUDE.....	107
5.4.1. Capacité des formations de socle à présenter un profil d'altération aquifère ..	107
5.4.2. Densité de drainage par bassin versant	107
5.4.3. Estimation de l'inertie des nappes.....	110
5.5. ANALYSES DES HYDROGRAMMES.....	116
5.5.1. Analyses statistique –Tempo	116

5.5.2. Décomposition des hydrogrammes	121
5.5.3. Conclusions sur l'apport de l'analyse des hydrogrammes	123
5.6. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS : ÉLABORATION DE LA CARTE DES INDICATEURS À LA SÉCHERESSE EN DOMAINE DE SOCLE	124
5.6.1. Choix et quantification des critères	124
5.6.2. Pondération des critères	127
5.6.3. Carte de la sensibilité des aquifères de socle à la sécheresse	128
5.6.4. Conclusions et perspectives	130
6. Évaluation de la sensibilité à la sécheresse des aquifères karstiques	131
6.1. SPÉCIFICITÉ DES AQUIFÈRES KARSTIQUES	131
6.1.1. Structure des aquifères karstiques	131
6.1.2. Différentes configurations de systèmes karstiques	131
6.1.3. Propriétés fondamentales des aquifères karstiques : notions d'évolution et de fonctionnalité	133
6.2. ENTITÉS KARSTIQUES DE MIDI-PYRÉNÉES	133
6.2.1. Les karsts de la bordure nord orientale du Bassin aquitain	135
6.2.2. Les karsts pyrénéens	141
6.3. MÉTHODES EMPLOYÉES	143
6.3.1. Élaboration de fiches descriptives	143
6.3.2. Analyse des hydrogrammes	144
6.3.3. Approche de modélisation globale à l'aide du logiciel TEMPO	148
6.4. ANALYSE DES CRITÈRES DE SÉLECTION POUR LES AQUIFÈRES KARSTIQUES	154
6.4.1. Superficie du bassin d'alimentation	154
6.4.2. Index de résistance à la sécheresse des aquifères karstiques	156
6.4.3. Maintien de l'effet des pluies efficaces sur les débits des sources	158
6.4.4. Durée d'influence de la composante lente dans le débit mesuré	159
6.4.5. Contribution relative de la composante lente au débit mesuré à l'exutoire en année sèche de référence	160
6.4.6. Rapport des volumes transitant par la réponse impulsionnelle lente en année sèche et en année humide	161
6.5. PONDÉRATIONS DES CRITÈRES	162
6.5.1. Analyse du critère superficie du bassin d'alimentation de la source	164
6.5.2. Analyse du critère IRSAK	166
6.5.3. Analyse du critère « maintien de l'effet des pluies efficaces sur le débit	167
6.5.4. Analyse du critère de durée d'influence de la composante lente dans le débit	168
6.5.5. Analyse du critère « Rapport des volumes de contribution de la composante lente au débit en année sèche et en année humide »	169
6.5.6. Analyse du critère « contribution de la composante RIL au débit en année sèche »	171

6.6. CARTOGRAPHIE DE RÉSISTANCE À LA SÉCHERESSE DES AQUIFÈRES KARSTIQUES.....	172
6.7. CONSOLIDATION DES RÉSULTATS SUR LES CRITÈRES DE SENSIBILITÉ À LA SECHERESSE.....	174
6.7.1. Volumes dynamiques.....	174
6.7.2. Pouvoir régulateur de l'aquifère	176
6.7.3. Retard à l'infiltration	177
6.7.4. Classification des systèmes karstiques	179
6.7.5. Développement du réseau de karstification des bassins hydrologiques des sources	181
7. Mise en place d'un réseau régional de suivi quantitatif spécifique à la problématique sécheresse	183
7.1. SURVEILLANCE DES AQUIFÈRES DÉVELOPPÉS EN MILIEUX POREUX	183
7.2. SURVEILLANCE DES AQUIFÈRES DE DOMAINE DE SOCLE	183
7.3. SURVEILLANCE DES AQUIFÈRES KARSTIQUES	187
8. Conclusions.....	191
9. Bibliographie	197

Liste des illustrations

Illustration 1 - Organigramme général du projet ERESSAR	17
Illustration 2 - Schéma des fonctions conductrices et capacitives d'un aquifère (d'après J. Margat, 1994 - « Gestion des eaux souterraines » - Note technique BRGM/EAU 009/94)	20
Illustration 3 - Répartition des entités hydrogéologiques de niveau 3 en Midi-Pyrénées en fonction des attributs du thème, de la nature, du milieu et de l'état.....	25
Illustration 4 - Entités alluvionnaires délimitées dans le cadre du projet ERESSAR	28
Illustration 5 - Découpage des entités alluviales pour les besoins du projet ERESSAR	33
Illustration 6 - Réseaux de suivi quantitatif des eaux souterraines en région Midi-Pyrénées.....	34
Illustration 7 - Localisation des 41 piézomètres sélectionnés dans le cadre du projet ERESSAR appartenant à un réseau de suivi quantitatif en Midi-Pyrénées	36
Illustration 8 - Distribution des piézomètres utilisés dans le projet ERESSAR par entités BD LISA ..	37
Illustration 9 - Distribution des sources utilisées dans le projet ERESSAR par entités BD LISA	39
Illustration 10 - Localisation des 54 sources appartenant à un réseau de suivi quantitatif sur la région Midi-Pyrénées	39
Illustration 11 - Liste des stations météorologiques sélectionnées	40
Illustration 12 - Localisation des stations météorologiques sélectionnées en fonction de leur situation au sein des grands ensembles hydrogéologiques de la région Midi-Pyrénées	41
Illustration 13 - Données climatiques acquises auprès de Météo France pour les besoins du projet ..	42

Illustration 14 - Pluie efficace calculée durant la période de recharge sur la période 1969 – 2012.....	43
Illustration 15 - Notes et coefficients attribués à chaque critère des facteurs opérationnels de la vulnérabilité des eaux souterraines en Midi-Pyrénées	45
Illustration 16 - Unités de gestion délimitées en Midi-Pyrénées.....	46
Illustration 17 - Étapes relatives au calage d'une chronique sur une loi de décroissance exponentielle et à l'exploitation des résultats	50
Illustration 18 - Étapes relatives à l'agglomération des données de calage d'une chronique piézométrique à l'échelle d'une entité BD-LISA	52
Illustration 19 - Tableau de correspondance entre les entités alluviales découpées dans le cadre du projet ERESSAR et les entités alluviales complémentaires de la BD LISA V0.....	53
Illustration 20 - Tableau de synthèse des temps de demi-décroissance moyens calculés pour chacun des 32 piézomètres. Statistiques associées calculées en fonction des entités alluviales concernées.	54
Illustration 21 - Temps de demi-décroissance évalués sur les terrasses alluviales du système Garonne	55
Illustration 22 - Temps de demi-décroissance moyens évalués sur les terrasses alluviales de l'Adour.....	56
Illustration 23 - Temps de demi-décroissance moyens des entités libres (hors entités alluviales).....	57
Illustration 24 - Ressource en eau renouvelable et réserve en eau pérenne	58
Illustration 25 - Superficie des entités alluviales (en km ²) étudiées dans ERESSAR	60
Illustration 26 - Superficie des entités alluviales traitées dans ERESSAR.....	61
Illustration 27 - Superposition des entités sédimentaires de milieux poreux considérées dans le cadre du projet ERESSAR et des catégories d'unité de gestion établies en Midi-Pyrénées	63
Illustration 28 - Superposition des entités alluviales sur les classes de perméabilité de la ZNS prises en compte pour la définition des unités de gestion.....	64
Illustration 29 - Densité de drainage des entités alluviales étudiées.....	65
Illustration 30 - Capacité régulatrice des aquifères alluviaux selon les deux hypothèses Ho moyen et Ho maximal.	66
Illustration 31 - Comparaison des résultats pour le critère capacité régulatrice des aquifères alluviaux selon les deux hypothèses (Ho max. ou Ho moyen)	67
Illustration 32 - Critère de la capacité régulatrice des aquifères poreux (hors alluvions) selon les deux hypothèses Ho moyen et Ho maximal.	67
Illustration 33 - Comparaison des résultats pour le critère capacité régulatrice des aquifères poreux selon les deux hypothèses (Ho max. ou Ho moyen)	67
Illustration 34 - Tableaux des résultats par piézomètre en fonction des critères pour les aquifères alluviaux	68
Illustration 35 - Tableaux des résultats par critère pour les aquifères alluviaux par entité	69
Illustration 36 - Tableaux des résultats par critère pour les aquifères poreux (hors alluvions) par piézomètre	69
Illustration 37 - Tableaux des résultats par critère pour les aquifères poreux (hors alluvions) par entité	69
Illustration 38 - Classement des aquifères alluviaux vis-à-vis du critère de superficie de l'aquifère	70
Illustration 39 - Aquifères alluviaux - Tableau des classes et des notes pour le critère de superficie de l'aquifère	70
Illustration 40 - Classement des aquifères alluviaux vis-à-vis du critère de capacité à l'infiltration	71

Illustration 41 - Aquifères alluviaux - Tableau des classes et des notes pour le critère de capacité à l'infiltration	71
Illustration 42 - Classement des aquifères alluviaux vis-à-vis du critère de temps de demi-décroissance	71
Illustration 43 - Aquifères alluviaux - Tableau des classes et des notes pour le critère de temps de demi-décroissance.....	72
Illustration 44 - Classement des aquifères alluviaux vis-à-vis du critère de ressources en eau renouvelable	72
Illustration 45 - Aquifères alluviaux - Tableau des classes et des notes pour le critère de ressources en eau renouvelable	72
Illustration 46 - Classement des aquifères alluviaux vis-à-vis du critère de capacité régulatrice des aquifères	73
Illustration 47 - Aquifères alluviaux - Tableau des classes et des notes pour le critère de capacité régulatrice des aquifères	73
Illustration 48 - Classement des aquifères poreux (hors alluvions) vis-à-vis du critère de capacité à l'infiltration	73
Illustration 49 - Aquifères poreux (hors alluvions) - Tableau des classes et des notes pour le critère de capacité à l'infiltration	74
Illustration 50 - Classement des aquifères poreux (hors alluvions) vis-à-vis du critère de temps de demi-décroissance.....	74
Illustration 51 - Aquifères poreux (hors alluvions) - Tableau des classes et des notes pour le critère de temps de demi-décroissance.....	74
Illustration 52 - Classement des aquifères poreux (hors alluvions) vis-à-vis du critère de capacité régulatrice des aquifères	75
Illustration 53 - Aquifères poreux (hors alluvions) - Tableau des classes et des notes pour le critère de capacité régulatrice des aquifères	75
Illustration 54 - Classement des aquifères alluviaux selon leur sensibilité à la sécheresse	76
Illustration 55 - Classement des aquifères poreux (hors alluvions) selon leur sensibilité à la sécheresse.....	76
Illustration 56 - Tableau de notation finale de la sensibilité à la sécheresse pour les aquifères alluviaux	77
Illustration 57 - Tableau de notation finale de la sensibilité à la sécheresse pour les aquifères poreux (hors alluvions)	77
Illustration 58 - Carte de la sensibilité à la sécheresse des aquifères poreux	79
Illustration 59 - Influence de la pluie et de la recharge sur le paramètres de calage de la loi de décroissance exponentielle - Exemple du piézomètre du Verdier	80
Illustration 60 - Arbre décisionnel de la sévérité de l'étiage de l'année n en fonction de la recharge hivernale et printanière de l'année n pour le piézomètre du Verdier.....	81
Illustration 61 - Hautes eaux sur le piézomètre de Ondes	82
Illustration 62 - Basses eaux sur le piézomètre de Ondes	82
Illustration 63 - Piézométrie moyenne sur le piézomètre de Ondes.....	83
Illustration 64 - Piézométrie minimale, maximale et moyenne sur les piézomètres de Ondes et de Saint-Porquier	83
Illustration 65 - Moyenne mobile équipondérée et tendance (Piézomètre de Ondes)	84
Illustration 66 - Chronique piézométrique (Piézomètre de Ondes)	84
Illustration 67 - Date d'occurrence de fin d'étiage (Piézomètre de Ondes).....	85

Illustration 68 - Date d'occurrence des hautes eaux (Piézomètre de Ondes).....	85
Illustration 69 - Modèle ancien d'aquifère de socle	87
Illustration 70 - Actuel modèle conceptuel d'aquifère de socle	88
Illustration 71 - Localisation des formations de socle en région Midi-Pyrénées	91
Illustration 72 - Altérabilité des formations de socle dans le massif des Pyrénées (programme POTAPYR).....	92
Illustration 73 - Codage de l'altérabilité des formations géologiques	94
Illustration 74 - Codage du potentiel aquifère des formations de socle du secteur Massif Central (POTAMAC).....	94
Illustration 75 - Carte d'altérabilité des formations de socle du secteur Massif Central (POTAMAC) ..	95
Illustration 76 - Potentiel aquifère des formations de socle sur le secteur Massif central (POTAMAC)	96
Illustration 77 - Carte simplifiée du potentiel aquifère du secteur Massif Central	97
Illustration 78 - Informations géologiques sur la présence d'altérites (source : BSS).....	99
Illustration 79 - Localisation des sources présentant un débit d'étiage sur le secteur Massif central.	100
Illustration 80 - Localisation des piézomètres retenus pour un suivi quantitatif de la nappe	103
Illustration 81 - Délimitation des bassins versants des stations hydrométriques	105
Illustration 82 - Superficie des bassins versants occupant le domaine de socle (%).....	106
Illustration 83 - Réseau hydrographique et bassin versant d'ordre 3 selon la BD Carthage	108
Illustration 84 - Distribution des densités de drainage par bassin versant	108
Illustration 85 - Carte de la densité de drainage par bassin versant d'ordre 3.....	109
Illustration 86 - Effet « mémoire » de l'aquifère en jours (auto-corrélogramme).....	111
Illustration 87 - Temps de demi-décroissance des aquifères calculés à partir de la loi de Maillet sur les chroniques piézométriques	111
Illustration 88 - Réaction de la nappe aux pluies efficaces : décalage du pic de réaction en jours	113
Illustration 89 - Maintien sur la nappe de l'effet de la pluie après son occurrence (jours)	113
Illustration 90 - Tableau synthétique des résultats sur l'estimation de l'inertie des nappes.....	114
Illustration 91 - Tableau de calcul du pouvoir régulateur de l'aquifère	115
Illustration 92 - Distribution du pouvoir régulateur de l'aquifère par piézomètre	115
Illustration 93 - Localisation des stations hydrométriques sélectionnées pour un traitement Tempo .	117
Illustration 94 - Localisation des stations hydrométriques pour décomposition de l'hydrogramme	122
Illustration 95 - Tableau de synthèse de la décomposition des hydrogramme	123
Illustration 96 - Critère « potentiel aquifère – tableau des notes	124
Illustration 97 - Critère « densité de drainage » - tableau des notes.....	125
Illustration 98 - Tableau de synthèse du critère « inertie de la nappe »	126
Illustration 99 - Critère « inertie de la nappe » - tableau des notes.....	127
Illustration 100 - Classement des aquifères représentés par les piézomètres vis-à-vis du critère « inertie de la nappe »	127
Illustration 101 - Carte de la sensibilité à la sécheresse des aquifères de socle	129
Illustration 102 - Représentation schématique d'un aquifère karstique (AERMC, 1999 et AERMC 1999 d'après Mangin A., 1975)	132
Illustration 103 - Configurations des systèmes karstiques (Marsaud B., 1997)	133
Illustration 104 - Principales entités karstiques de la région Midi-Pyrénées	134

Illustration 105 - Séries carbonatées du domaine karstique en Midi-Pyrénées	135
Illustration 106 - Tableau récapitulatif des unités aquifères représentées sur les Causses du Quercy et des sources karstiques suivies dans le cadre d'un réseau de mesure.....	136
Illustration 107 - Unités aquifères (BD LISA V0) des Causses du Quercy et sources karstiques suivies dans le cadre d'un réseau de mesure.....	137
Illustration 108 - Coupe hydrogéologique synthétique des Grands Causses.....	138
Illustration 109 - Tableau récapitulatif des unités aquifères représentées sur les Grands Causses et des sources karstiques suivies dans le cadre d'un réseau de mesure.....	139
Illustration 110 - Unités aquifères (BD LISA V0) des Grands Causses et sources karstiques suivies dans le cadre d'un réseau de mesure.....	140
Illustration 111 - Tableau récapitulatif des sources karstiques suivies dans le cadre d'un réseau de mesure dans le massif des Pyrénées	142
Illustration 112 - Unités aquifères (BD LISA V0) des Pyrénées et sources karstiques suivies dans le cadre d'un réseau de mesure	143
Illustration 113 - Interprétation des ruptures de pente de la droite représentative des débits classés	144
Illustration 114 - Différents cas de rupture de pente de la droite représentative des débits classés (en ordonnée pourcentage d'apparition des débits et en abscisse représentation des débits selon une échelle logarithmique)	145
Illustration 115 - Décomposition de la récession selon la méthode Mangin (1975)	146
Illustration 116 - Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975) - (i) paramètre d'infiltration et (k) pouvoir régulateur	148
Illustration 117 - Schéma de principe du modèle de transfert	149
Illustration 118 - Liste des stations météorologiques utilisées pour les modélisations TEMPO	150
Illustration 119 - Chroniques utilisées pour le calcul de l'ETP (période, paramètres, coeff. corrélation).....	151
Illustration 120 - Représentation dans le temps de la contribution au débit de la composante rapide et lente.....	153
Illustration 121 - Décomposition dans le temps des réponses impulsionnelles lentes et rapides	153
Illustration 122 - Tableau des résultats des paramètres et critères retenus par source pour les aquifères karstiques	155
Illustration 123 - Distribution de superficies des bassins d'alimentation des sources karstiques étudiées	156
Illustration 124 - Aquifères karstiques - Tableau des classes et des notes pour le critère de taille du bassin hydrologique de la source.....	156
Illustration 125 - Distribution des valeurs d'IRSAK calculées pour les sources karstiques étudiées ...	157
Illustration 126 - Aquifères karstiques - Tableau des classes et des notes pour le critère IRSAK	157
Illustration 127 - Maintien de l'effet de la pluie sur les débits (jours)	158
Illustration 128 - Aquifères karstiques - Tableau des classes et des notes pour le critère « Durée du maintien de l'effet de des pluies sur le débit»	158
Illustration 129 - Durée d'influence de la composante lente sur le débit mesuré à la source	159
Illustration 130 - Aquifères karstiques - Tableau des classes et des notes pour le critère « Durée de l'influence de la composante lente du débit total de la source».....	160
Illustration 131 - Pourcentage de contribution de la composante lente au débit des sources en année sèche.....	160

Illustration 132 -	Aquifères karstiques - Tableau des classes et des notes pour le critère « Contribution de la composante lente au débit totale de la source pour une année sèche»	161
Illustration 133 -	Rapport des volumes de la composante lente contribuant au débit calculés en année sèche sur ceux calculés en année humide	162
Illustration 134 -	Aquifères karstiques - Tableau des classes et des notes pour le critère « Rapport des volumes de la composante lente du débit-année sèche/humide»	162
Illustration 135 -	Classement des aquifères karstiques selon leur sensibilité à la sécheresse	163
Illustration 136 -	Tableau de notation finale par source de la sensibilité à la sécheresse pour les aquifères karstiques	164
Illustration 137 -	Comparaison du niveau de sensibilité des sources avec la superficie du bassin hydrologique des sources	165
Illustration 138 -	Corrélation entre la sensibilité à la sécheresse et la superficie des bassins hydrologiques	165
Illustration 139 -	Comparaison du niveau de sensibilité des sources avec le critère IRSAK	166
Illustration 140 -	Corrélation entre la sensibilité à la sécheresse et le critère IRSAK.....	166
Illustration 141 -	Comparaison du niveau de sensibilité des sources avec le critère « maintien de l'effet des pluies sur le débit des sources »	167
Illustration 142 -	Corrélation entre la sensibilité à la sécheresse et le critère « maintien de l'effet des pluies sur le débit des sources »	168
Illustration 143 -	Comparaison du niveau de sensibilité des sources avec le critère « fin d'influence des pluies sur la composante lente du débit».....	168
Illustration 144 -	Corrélation entre la sensibilité à la sécheresse et le critère « fin d'influence des pluies sur la composante lente du débit»	169
Illustration 145 -	Comparaison du niveau de sensibilité des sources avec le critère « rapport des volumes de la composante lente du débit (sec/humide)»	170
Illustration 146 -	Corrélation entre la sensibilité à la sécheresse et le critère « rapport des volumes de la composante lente du débit (sec/humide)»	170
Illustration 147 -	Comparaison du niveau de sensibilité des sources avec le critère « contribution de la composante RIL au débit en année sèche».....	171
Illustration 148 -	Corrélation entre la sensibilité à la sécheresse et le critère « contribution de la composante RIL au débit en année sèche».....	171
Illustration 149 -	Carte de la sensibilité à la sécheresse des aquifères karstiques (Grands Causses, Causse du Quercy, Monts de Lacaune)	173
Illustration 150 -	Carte de la sensibilité à la sécheresse des aquifères karstiques (Pyrénées).....	174
Illustration 151 -	Comparaison du niveau de sensibilité à la sécheresse avec le volume dynamique estimé pour 28 sources	175
Illustration 152 -	Graphe de corrélation entre la sensibilité des sources et leur volume dynamique .	176
Illustration 153 -	Comparaison du niveau de sensibilité à la sécheresse de 18 des sources étudiées avec le pouvoir régulateur de l'aquifère	176
Illustration 154 -	Corrélation de la sensibilité à la sécheresse de 18 des sources étudiées avec le pouvoir régulateur de l'aquifère	177
Illustration 155 -	Comparaison du niveau de sensibilité à la sécheresse de 18 des sources étudiées avec les valeurs du retard à l'infiltration	178
Illustration 156 -	Corrélation de la sensibilité à la sécheresse de 18 des sources étudiées avec le retard à l'infiltration	179

Illustration 157 - Classification des systèmes karstiques des 12 sources étudiées à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975).....	180
Illustration 158 - Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975) hors sources particulières (3)	181
Illustration 159 - Développement du réseau de karstification des bassins hydrologiques des sources	182
Illustration 160 - Corrélation de l'intensité du développement du réseau karstique avec la composante rapide de l'écoulement total (en année sèche).....	182
Illustration 161 - Répartition des points du réseau « sécheresse » pour les aquifères poreux.....	184
Illustration 162 - Liste des points d'eau sélectionnés pour le suivi quantitatif des aquifères poreux définis comme sensibles à la sécheresse.....	185
Illustration 163 - Répartition des points du réseau « sécheresse » pour les aquifères de socle	186
Illustration 164 - Liste des points d'eau sélectionnés pour le suivi quantitatif des aquifères karstiques définis comme sensibles à la sécheresse	188
Illustration 165 - Répartition des points du réseau « sécheresse » pour les aquifères karstiques dans la partie nord de la région Midi-Pyrénées	189
Illustration 166 - Répartition des points du réseau « sécheresse » pour les aquifères karstiques dans le secteur du massif des Pyrénées	190

1. Introduction

La sécheresse au sens strict peut être définie comme un déficit important de précipitation par rapport à une moyenne, durant une période relativement longue (saison, année). Dans nos régions tempérées, ces événements ne sont pas rares et font partie de la variabilité du climat.

Selon sa durée, son intensité et son extension géographique, elle peut avoir de graves conséquences sur la qualité de vie des populations et sur tous les secteurs économiques, notamment celui de l'agriculture en période d'irrigation.

Au cours de ces trente dernières années, la France a connu plusieurs épisodes de sécheresse. Ceux de 1976 et 2003 ont marqué les esprits, le premier avec la mise en place d'un « impôt sécheresse » et le second avec la canicule des mois de juillet et d'août dont les conséquences furent tragiques. Toutefois, de nombreuses autres périodes de déficit pluviométrique se sont fait ressentir partout dans l'hexagone. En particulier, si 2003 fut très médiatisée, les nappes d'eau souterraine ont pour autant été peu impactées (sécheresse estivale) en comparaison des années 2005 et 2006 où les niveaux d'eau des aquifères furent beaucoup plus critiques.

Durant ces épisodes, les réserves en eau des sols et des aquifères à nappe libre ont été diversement affectées suivant les régions et suivant les caractéristiques de la sécheresse, notamment sa date de déclenchement dans le cycle hydrologique (sécheresse hivernale, printanière ou estivale) et sa durée.

En effet, les sécheresses estivales ont généralement peu d'impact sur le niveau piézométrique des nappes libres. Par contre, des années consécutives caractérisées par un déficit modéré en pluie mais accompagnées de recharges hivernales insuffisantes peuvent avoir des impacts importants sur les eaux souterraines. Ce fut notamment le cas entre 1989 et le printemps 1992.

Ces différents épisodes secs ont révélé, en particulier ces dernières années, des secteurs plus fragiles que d'autres dans l'approvisionnement en eau des populations et des cultures et l'apparition de conflits d'usage. La canicule de 2003 et le déficit hydrique de 2005 ont eu un impact important sur la mobilisation nationale autour de l'importance des eaux souterraines et de leur rôle en été dans le soutien des débits des cours d'eau. En effet, de nombreuses rivières en relation avec les nappes n'ont plus été alimentées par celles-ci en raison de la baisse des niveaux, conduisant à une réduction de leur débit estival voire à un assèchement.

Le BRGM a ainsi été sollicité à de nombreuses occasions, au niveau national et régional, pour suivre l'évolution des nappes dont les niveaux piézométriques sont en baisse et pour recommander des mesures de préservation. Pour ce faire, il a été utile de mieux comprendre les facteurs influençant la dynamique de la nappe, notamment ceux qui ont un rôle prépondérant vis-à-vis de la sensibilité des aquifères à la sécheresse.

Par ailleurs, la détermination de l'état quantitatif des masses d'eau souterraine s'inscrit dans l'objectif européen de la DCE visant à une gestion globale et durable de la ressource en eau. Dans ce cadre, l'évaluation de la sensibilité à la sécheresse de chaque entité hydrogéologique constitue un paramètre de gestion indispensable.

L'objectif du projet est d'aboutir à la mise en évidence des aquifères les plus vulnérables dans leur fonction d'approvisionnement en eau et de soutien des écosystèmes (préservation d'un débit minimum aux émergences, soutien des cours d'eau, maintien des zones humides).

La répartition régionale des aquifères sensibles obtenue à des périodes prolongées de déficit en eau doit apporter des éléments pertinents pour la création d'un réseau de surveillance de l'état quantitatif des aquifères vulnérables à la sécheresse. En effet, la mise en œuvre d'une gestion raisonnée de la ressource en eau à l'échelle de Midi-Pyrénées implique de disposer de données d'évolution des niveaux d'eau et/ou des débits de sources, informations indispensables pour la compréhension du fonctionnement des aquifères et donc pour une meilleure gestion.

Le projet est structuré en trois thématiques principales en relation avec les trois principaux types d'aquifères libres représentés en Midi-Pyrénées, à savoir les aquifères poreux, karstiques et le domaine de socle. Les approches méthodologiques de ces 3 thématiques sont distinctes mais devant à terme aboutir à un résultat commun, à savoir la création d'un réseau spécifique permettant d'apporter une aide à la décision lors des périodes de déficit hydrique prolongé. L'organigramme de l'illustration 1 représente l'organisation générale du projet.

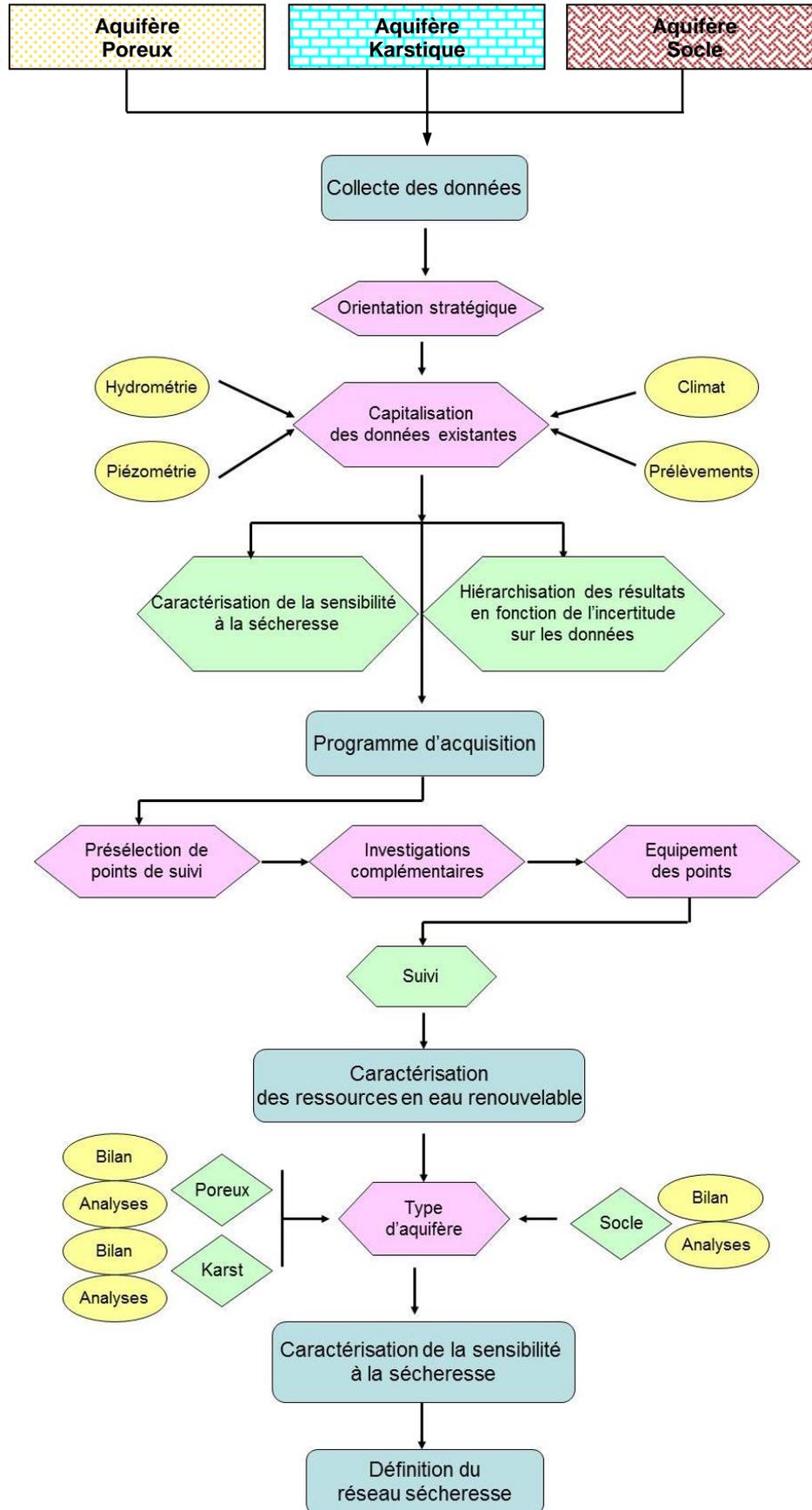


Illustration 1 - Organigramme général du projet ERESSAR.

2. Notions théoriques

2.1. SÉCHERESSE : DÉFINITION ET CONSÉQUENCES

En fonction du type de ressource affectée ou de l'activité économique impactée, plusieurs définitions peuvent être données au terme de sécheresse. Dans le cas présent, celle donnée par J.J. Collin *et al* (1994) sera reprise. Il s'agit de caractériser la sécheresse comme une déficience conjoncturelle significative des disponibilités naturelles en eau, pendant une durée assez longue (saisonnière, annuelle voire pluriannuelle) par rapport aux moyennes (au moins décennales) et sur une étendue assez vaste.

Une approche complète de la problématique liée au terme de sécheresse concerne les différentes réserves d'eau susceptibles d'être impactées, à savoir l'air, le sol, les cours d'eau (lacs et réservoirs inclus) et le sous-sol. Ainsi, suivant les parties de l'hydrosystème qui sont affectées il est possible de distinguer :

- la sécheresse du sol ou pédologique défini par l'épuisement des réserves utilisables par les plantes (c'est-à-dire lorsque la valeur du point de flétrissement permanent est atteinte pour un sol et un enracinement donné) ;
- la sécheresse hydrologique (ou des cours d'eau) correspondant à un déficit sensible des débits des cours d'eau par rapport aux normales saisonnières jusqu'au cas extrême où se produit l'assèchement des rivières pérennes ;
- la sécheresse hydrogéologique à considérer du point de vue de la sensibilité des eaux souterraines aux déficits d'apports et aux conséquences sur le régime naturel des nappes.

Sous une forme aggravée, la sécheresse affectera l'ensemble de l'hydrosystème, avec rupture des liaisons hydrauliques entre les différents composants du système : les nappes ne sont plus alimentées par les flux d'eau transitant dans la zone non saturée à partir du sol et elles-mêmes n'assurent plus le soutien du débit d'étiage des cours d'eau.

Dans le cas présent, c'est l'étude de la sécheresse hydrogéologique placée dans le cadre général de l'interdépendance eaux de surface - eaux souterraines (drainage naturel des nappes par les cours d'eau) qui est abordée dans la suite du rapport.

2.2. RESSOURCES EN EAU RENOUVELABLES ET STOCKS

La mise en place d'une gestion quantitative à l'échelle d'un aquifère a pour objectif de permettre une utilisation durable et maîtrisée de la réserve et de la ressource de façon à répondre à la demande en eau des différents usagers (AEP, Irrigation, Industries...), tout en évitant la surexploitation de la nappe.

La recherche d'une gestion optimale pour satisfaire au mieux tous les utilisateurs passe par la connaissance du fonctionnement de l'aquifère et des prélèvements effectués afin de pouvoir quantifier l'état de la ressource actuelle et à venir. Cette quantification implique d'aborder plusieurs notions importantes :

- la **ressource en eau renouvelable** appelée aussi **flux** d'écoulement moyen annuel représente pour une période déterminée l'alimentation totale de la nappe (infiltration par les précipitations, recharge par les cours d'eau, drainage descendant ou ascendant par les nappes supérieures ou inférieures, voire alimentation par les nappes adjacentes...) ;

- le **stock** (Illustration 2), correspond au volume d'eau contenu à un instant donné dans la zone saturée du réservoir. Il peut être évalué par l'intermédiaire du coefficient d'emmagasinement (la porosité efficace pour une nappe libre) ;
- la **réserve de la nappe** correspond à la ressource non renouvelable de la nappe, c'est-à-dire un stock déduction faite de la fraction renouvelable moyenne de la ressource (calculée sur une période de référence). La réserve permet de réguler les ressources renouvelables ;
- la **ressource renouvelable exploitable** correspond au volume maximal susceptible d'être prélevé dans l'aquifère d'une part, sans puiser dans les réserves permanentes et d'autre part, en préservant l'équilibre des écosystèmes (d'ordre physique : contraintes ou objectif de maintien de niveau d'eau, d'ordre chimique ou biologique : maintien de la qualité de l'eau...).

Dans une optique de gestion raisonnée, en moyenne, les prélèvements ne doivent pas excéder la ressource renouvelable.

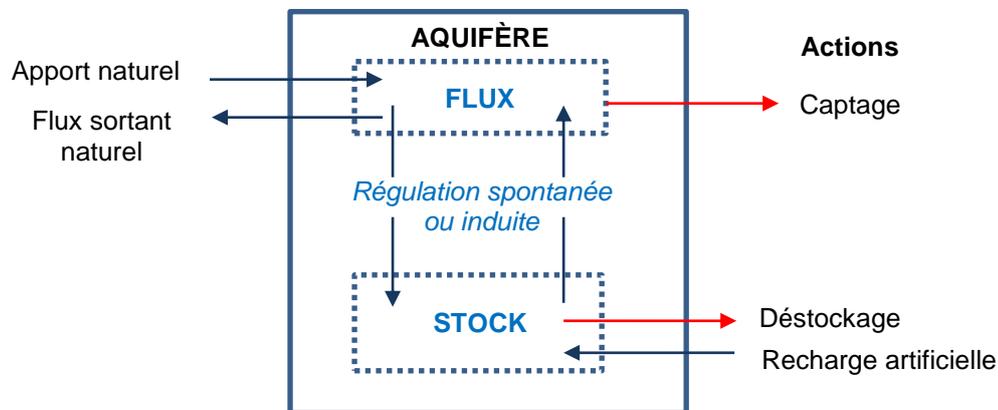


Illustration 2 - Schéma des fonctions conductrices et capacitive d'un aquifère (d'après J. Margat, 1994 - « Gestion des eaux souterraines » - Note technique BRGM/EAU 009/94).

Lorsqu'un aquifère n'est plus alimenté durant une période de temps assez longue, les niveaux de la nappe, en l'absence de prélèvements, vont baisser jusqu'à stabilisation à une cote correspondant au niveau d'exutoire de la nappe (cote minimale de la nappe ou niveau de base). Dans ce cas, la totalité de la ressource en eau renouvelable pourra avoir été drainée et le stock d'eau sollicité en partie (Seguin J.J. et Wuilleumier A. 2006).

2.3. FACTEURS INFLUENÇANT LA DYNAMIQUE D'UNE NAPPE

La compréhension de la dynamique des eaux souterraines se fait à partir de l'étude des variations des niveaux piézométriques qui constituent la variable la plus sensible aux modifications des conditions extérieures.

Tout régime de variations des niveaux piézométriques observées localement en un point de suivi est défini à la fois par :

- des **conditions passives liées aux caractéristiques physiques** du milieu aquifère et à la position du point de mesure considéré dans le système aquifère. Il s'agit notamment de caractériser les paramètres suivants :
 - la perméabilité (K) et le coefficient d'emmagasinement (S) de l'aquifère (paramètres hydrodynamiques variant spatialement),

- la géométrie de l'aquifère et en particulier son étendue (définie dans un cas simple par une longueur, L) et sa puissance (définie dans un cas simple par une épaisseur moyenne, E),
 - la position des limites et des conditions qui y prévalent.
- des **facteurs actifs constitués par les variations des flux entrants et sortants** aux limites du système aquifère et par les variations de niveau à ces limites ;

Les fluctuations de niveau d'une nappe résultent du rôle amortisseur du réservoir (fonction régulatrice d'un aquifère) entre les flux entrants globalement irréguliers et les flux sortants continus et plus réguliers (à charge peu variable).

Les flux entrants sont principalement issus des facteurs de recharge suivants :

- l'infiltration des précipitations (ne s'applique qu'aux aquifères à surface libre dont c'est le mode d'alimentation dominant),
- la drainance d'aquifères voisins ou superposés à potentiels hydrauliques plus élevés,
- l'infiltration d'eau superficielle (zone de pertes des eaux de surface notamment).

Les flux sortants, hors sollicitation de la nappe par pompage, sont conditionnés par la vidange des nappes à surface libre s'effectuant par différents exutoires à niveau peu variable :

- les émergences, soit par des exutoires visibles et plus ou moins localisés (sources ou aires d'émergence), soit par des écoulements diffus le long des cours d'eau drainant les aquifères. Ces flux restitués au cours d'eau (composante de leur débit de base) constituent la part la plus importante de décharge des nappes,
- les retours directs à l'atmosphère, via le sol (ascension capillaire) puis évapotranspiration constituant une forme d'émission spécifique aux nappes superficielles,
- la drainance d'aquifères voisins ou superposés.

2.4. SENSIBILITÉ À LA SÉCHERESSE DES AQUIFÈRES

La sensibilité des eaux souterraines à l'alimentation ou au déficit d'alimentation en eau météorique dépend d'une part, de la propriété des aquifères et d'autre part, de la période des précipitations. Selon que les nappes sont libres, et plus ou moins profondes, ou captives, elles réagissent de façon très différente aux variations des conditions hydro-météoriques et sont très inégalement réceptrices des apports directs.

En fonction des modalités d'alimentation et de restitution des aquifères par les émergences et par le drainage par les cours d'eau, les déficits pluviométriques ont des répercussions très inégales sur le régime des eaux souterraines.

En première approche, trois groupes d'aquifères ayant un degré de sensibilité à la sécheresse bien distinct peuvent être différenciés :

- les **aquifères captifs**, qui ne sont pas directement alimentés par des apports météoriques, ou les aquifères dont les niveaux sont soutenus par des conditions au potentiel imposé (cours d'eau, plan d'eau de surface). Ces aquifères sont, intrinsèquement, les moins sensibles au déficit d'alimentation en eau météorique ;

- les **aquifères étendus disposant de grandes réserves et d'une faible densité de drainage par les cours d'eau**. Ces aquifères, alimentés par les précipitations, ont une sensibilité intermédiaire à la sécheresse, de par leurs propriétés qui « temporisent » un déficit d'alimentation temporaire. Cependant, ces aquifères sont sensibles à des déficits de précipitations pluri-annuels ;
- les **aquifères libres, alimentés essentiellement par les précipitations, non soutenus aux limites et de faible réserve** sont les plus sensibles au déficit d'alimentation en eau météorique. Généralement peu épais et peu capacitifs, leurs propriétés ne permettent pas de temporiser un déficit de précipitations temporaire.

En France, en année « normale », les aquifères libres poreux sensibles à la sécheresse sont rechargés par infiltration des eaux météoriques hivernales. Sur une large partie de la région Midi-Pyrénées, les précipitations printanières contribuent également à cette recharge, comme en témoigne le calcul des pluies efficaces décadaires sur différentes stations météorologiques de la région. Cette saisonnalité dans l'alimentation conduit à distinguer deux types de déficit d'alimentation :

- un **déficit d'alimentation hivernal et printanier** entraînant une recharge inférieure à la moyenne, voire nulle ;
- un **déficit d'alimentation estival, éventuellement prolongé à l'automne**, qui entraîne un appauvrissement des réserves en eau du sol (sécheresse pédologique) et retarde l'efficacité des pluies hivernales du cycle suivant pour l'alimentation des aquifères, mais qui n'affecte pas réellement la ressource durant la période concernée par la sécheresse. Dans ce cas, la durée de la phase de décharge est augmentée et les baisses de niveau jusqu'à la phase de recharge suivante sont amplifiées.

Les systèmes karstiques à nappe libre alimentés principalement par les eaux météoriques sont, eux aussi, sensibles à la sécheresse, mais la saisonnalité des phases d'alimentation ne joue plus un rôle prépondérant. La structure du karst, en revanche, joue un rôle prépondérant.

Ainsi, l'évaluation de la sensibilité à la sécheresse des systèmes aquifères demande une méthode de travail adaptée à leur fonctionnement hydrodynamique et leur structure. Dans la suite de cette étude, les aquifères en milieu poreux, karstique, ou de socle seront donc traités de façon distincte.

3. Aquifères étudiés et données utilisées

3.1. RÉFÉRENTIEL HYDROGÉOLOGIQUE FRANÇAIS BD LISA

BD LISA (Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères) est le nouveau Référentiel Hydrogéologique Français. Il correspond à un découpage du territoire national en entités hydrogéologiques (formations géologiques aquifères ou non) délimitées à 3 niveaux de détail – national (niveau 1), régional (niveau 2) et local (niveau 3). Ce travail, débuté fin 2006, est actuellement finalisé et disponible librement au stade d'une version 0 (V0) depuis septembre 2013. La version 1 (V1) (annulant et remplaçant la version V0) sera disponible en septembre 2015.

Du point de vue de la nomenclature de la BD LISA, la région Midi-Pyrénées est concernée par les 5 thèmes identifiés dans le référentiel, correspondant aux 5 grands types de formations géologiques :

- **thème Alluvial** : ensemble des dépôts de plaine alluviale accompagnés des terrasses connectées hydrauliquement avec les cours d'eau ;
- **thème Sédimentaire** : ensemble des formations peu ou pas déformées, non métamorphosées des bassins sédimentaires ;
- **thème Socle** : formations magmatiques et métamorphiques ;
- **thème Volcanisme** : volcanisme tertiaire et quaternaire ayant conservé une géométrie, une morphologie et/ou une structure volcanique identifiable ;
- **thème Intensément plissé** : ensemble de formations géologiques récemment plissées appartenant aux massifs montagneux alpins, pyrénéens, languedociens et jurassiens.

Le **karst** n'est pas identifié comme un thème à part entière mais il est considéré comme un attribut des couches carbonatées délimitées dans les thèmes « Sédimentaire » et « Intensément plissé ».

Lors de la construction du référentiel dans sa version V0, la plupart des cartes géologiques départementales n'étaient pas harmonisées sur le thème alluvial, notamment en Midi-Pyrénées. De ce fait, les **formations alluviales** ont uniquement été extraites des cartes géologiques et intégrées dans la surcouche du référentiel (comme entités complémentaires) sans différenciation entre les différents types d'alluvions (Fz, Fy, Fx,...). Seulement deux types de formations alluviales ont été différenciés : les alluvions récentes identifiées comme entités complémentaires, et les alluvions anciennes rangées dans le thème sédimentaire du référentiel.

Une délimitation des principaux réservoirs alluviaux productifs du bassin Adour-Garonne est en cours de réalisation, et sera intégrée dans la version V1 de la BD LISA en 2015. Elle permettra de sensiblement améliorer la représentation du thème alluvial pour lequel un très grand nombre d'ouvrages, dont certains pour un usage d'eau potable, est concerné par cette ressource.

Dans le cadre du projet ERESSAR, en excluant les entités alluviales ayant fait l'objet d'un découpage spécifique détaillé dans le paragraphe 3.2, le travail effectué s'est appuyé sur les contours des différentes entités délimitées à un niveau de précision local (NV3), et présents dans le référentiel dans sa version V0.

3.1.1. Recensement des entités hydrogéologiques de niveau 3 en Midi-Pyrénées

La région Midi-Pyrénées est concernée par 312 entités hydrogéologiques de niveau 3 (NV3 ou échelle locale). Toutefois, 41 d'entre elles sont majoritairement localisées dans les régions limitrophes : Aquitaine, Auvergne, et Languedoc-Roussillon.

Ainsi, au sein des 271 entités hydrogéologiques présentes majoritairement en Midi-Pyrénées sont identifiées 55 unités imperméables, 97 unités semi-perméables, et 119 unités aquifères dont 18 unités sous couverture. Chaque entité a été caractérisée à partir des attributs suivants :

- le thème d'appartenance au référentiel (alluvial, sédimentaire, socle,...) ;
- la nature de l'entité (grand système aquifère, système aquifère, unité aquifère, grand domaine hydrogéologique, domaine hydrogéologique, unité semi-perméable, unité imperméable) ;
- l'état hydrodynamique de la nappe contenue dans le réservoir (libre, captive,...) ;
- le type de milieu (poreux, fissuré, karstique, à double porosité).

La répartition des entités de niveau 3 en fonction du thème, de la nature, du milieu et de l'état est donnée par les tableaux de l'illustration 3.

Thème		
Code	Nom du thème	Nombre d'entités
1	Alluvial	/
2	Sédimentaire	69
3	Socle	39
4	Intensément plissé	161
5	Volcanisme	2
Total		271

Nature		
Code	Nom du thème	Nombre d'entités
5	Unité aquifère	119
6	Unité semi-perméable	97
7	Unité imperméable	55

Milieu		
Code	Nom du thème	Nombre d'entités
1	Poreux	37
2	Fissuré	99
3	Karstique	8
4	Double porosité : matricielle et de fissure	9
5	Double porosité : karstique et de fissure	50
8	Double porosité : matricielle et karstique	13
X	Sans objet (unités imperméables)	55

État		
Code	Nom du thème	Nombre d'entités
1	Nappe captive	18
2	Nappe libre	165
3	A parties libres et captives	33
4	Alternativement libre puis captive	/
X	Sans Objet (unités imperméables)	55
Total		271

Illustration 3 - Répartition des entités hydrogéologiques de niveau 3 en Midi-Pyrénées en fonction des attributs du thème, de la nature, du milieu et de l'état.

Comme mentionné en introduction, le projet ERESSAR aborde uniquement les principaux aquifères à nappe libre de Midi-Pyrénées, avec différentes approches méthodologiques en fonction du type de réservoir concerné (milieu poreux, fissuré ou karstifié, domaine de socle). Les aquifères à nappe captive présentant intrinsèquement une résistance à la sécheresse élevée ont été écartés du cadre de la présente l'étude. En effet les nappes qu'ils contiennent ne sont pas directement soumises aux aléas climatiques. En Midi-Pyrénées, 18 entités hydrogéologiques de niveau 3 présentant cette spécificité sont recensées dans le référentiel.

De la même manière, les aquifères de très faibles extensions (superficie totale inférieure à 10 km²) n'ont pas été retenus dans le cadre de l'étude en raison de leur faible réserve induisant intrinsèquement une très faible résistance à la sécheresse. En Midi-Pyrénées, 35 entités présentent cette particularité. Les 55 unités « imperméables » (non aquifères), de fait, ne sont également pas concernées.

Ainsi, sur les 271 entités hydrogéologiques présentes majoritairement en Midi-Pyrénées, 163 concernent le projet ERESSAR.

Les entités de socle BD LISA sont au nombre de 39 (dont 1 de très faible extension). Depuis leur délimitation, un programme d'amélioration des connaissances sur ces formations a été réalisé (**POTAMAC**, **POTentialités Aquifères des formations de socle : secteur MAssif Central** (2008 -2010)). Il a notamment permis de hiérarchiser les formations de socle en fonction de leurs potentialités aquifères à partir des concepts d'altérabilité de ces formations. Ce paramètre joue un rôle prépondérant pour caractériser la résistance à la sécheresse de ces aquifères composites (altérites et horizon fissuré sous-jacent). La réalisation du programme POTAMAC a induit une délimitation des aquifères différentes de celle de la BD LISA V0 qui sera réactualisée en conséquence. C'est sur la base de cette délimitation POTAMAC que les indicateurs de résistance à la sécheresse seront établis.

Les entités du thème de l'intensément plissées (code 4) sont au nombre de 161 (dont 40 unités imperméables et 34 entités de très faibles extensions) et se situent exclusivement dans le massif des Pyrénées. Elles font actuellement l'objet d'un diagnostic du potentiel aquifère principalement sur le terrain en raison de l'absence quasi-totale de données synthétiques qui permettraient de les caractériser sur le plan hydrologique. Cette action d'amélioration des connaissances s'effectue dans le cadre du programme **POTAPYR** (2013-2016) (**POTentialités Aquifères des formations de la chaîne PYRénéenne**) qui s'achèvera en 2016.

En raison du déphasage entre le programme ERESSAR et le programme POTAPYR, les résultats liés à la résistance à la sécheresse des entités intensément plissées seront annexés en fin de programme POTAPYR, et ne sont donc pas traités dans le cadre du présent rapport.

3.1.2. Entités complémentaires de Midi-Pyrénées

Dans le modèle de gestion du référentiel, les entités sous recouvrement d'entités complémentaires sont considérées d'**ordre 1** comme des entités affleurantes.

Les **entités complémentaires** regroupent différents types d'entités qui ne permettent pas de respecter l'homogénéité du référentiel ou constituant des cas particuliers difficilement intégrables dans le cadre général du référentiel au stade de son développement dans sa version V0. Il s'agit des :

- systèmes alluvionnaires (transverses par rapport aux entités principales) ;
- dépôts fluvio-glaciaires ou morainiques, essentiellement situés dans le massif des Pyrénées ;
- formations superficielles (colluvions, éboulis...), hétérogènes et morcelées ;
- altérites cartographiées des zones de socle, qui font partie intégrante des aquifères composites de socle et seront donc traitées dans ce cadre ;
- bassin hydrologique des systèmes karstiques délimités par traçage.

Comme mentionné précédemment, il n'existe pas actuellement de différenciation entre les parties productives et non productives des **formations alluvionnaires récentes**. Ces systèmes très ramifiés ont été extraits des cartes géologiques à 1/50 000 et sont maintenus inchangés dans leurs contours aux 3 niveaux de représentation (NV1, NV2 ou NV3).

En l'état actuel du référentiel dans sa version V0, la délimitation des entités alluvionnaires complémentaires est établie à partir des polygones des formations alluvionnaires extraits des cartes géologiques à 1/50 000 découpés en fonction de l'extension de l'entité régionale (NV2) d'ordre relatif 1 sous-jacente. Cette représentation étant inadaptée aux besoins du projet ERESSAR, il a donc été nécessaire d'élaborer un nouveau découpage de ces formations permettant de répondre aux objectifs de la présente étude (cf. § 3.2).

Les entités karstiques présentes dans la surcouche du référentiel constituent une particularité de Midi-Pyrénées, et, afin de respecter une cohérence dans le découpage inter-régional (Aquitaine – Midi-Pyrénées), trois couches aquifères ont dû être distinguées au sein des formations du Jurassique moyen et supérieur Nord aquitain. En effet, il est noté l'existence de faciès peu perméables, particulièrement marqués en Lot-et-Garonne et Dordogne, entre ces différents niveaux aquifères. Toutefois, dans les Causses du Quercy en Midi-Pyrénées, des communications inter-couches existent localement à la faveur de fracturations, de la diminution de l'épaisseur de ces faciès peu perméables ou encore par les vallons qui entaillent les plateaux calcaires. Ainsi, parallèlement au découpage des formations du Jurassique moyen et supérieur, conformément à la méthodologie générale du thème sédimentaire, des unités de drainage karstique ont été délimitées sur la base de données de traçages réalisés dans le département du Lot. Cependant, s'agissant d'un découpage alternatif, ces unités karstiques ont été intégrées parmi les entités complémentaires (surcouche du référentiel).

La région Midi-Pyrénées est concernée par 103 entités complémentaires comprenant 23 entités karstiques, 1 entité de volcanisme et 79 entités alluvionnaires. Toutefois, parmi ces 103 entités, 12 d'entre elles sont majoritairement situées en dehors de Midi-Pyrénées, en région Languedoc-Roussillon ou Limousin.

Par ailleurs, comme pour les entités principales, les entités alluviales de très faibles extensions (superficie totale inférieure à 10 km²) n'ont pas été étudiées en raison de leur faible réserve induisant intrinsèquement une faible résistance à la sécheresse. En Midi-Pyrénées 30 de ces entités sont concernées par cette spécificité.

Ainsi, sur les 103 entités hydrogéologiques présentes majoritairement en Midi-Pyrénées, le projet ERESSAR concerne 61 d'entre elles dont 38 entités alluviales

3.2. DÉLIMITATION DES ENTITÉS ALLUVIONNAIRES SPÉCIFIQUE AU PROJET ERESSAR

La délimitation des entités alluvionnaires complémentaires de la BD LISA V0 étant inadaptée aux besoins du projet ERESSAR, un nouveau découpage s'est avéré nécessaire pour représenter les résultats obtenus sur la résistance à la sécheresse des aquifères alluviaux étudiés. S'agissant d'un travail mené à l'échelle de Midi-Pyrénées, le choix a été fait d'utiliser les contours de la carte géologique régionale élaborée dans le cadre du projet GARVEMIP (BRGM/RP-63650-FR). En effet, les contours des formations géologiques de cette carte sont ceux des cartes départementales harmonisées à 1/50 000, lissés et/ou adaptés à une lisibilité de représentation régionale (à 1/250 000).

Une sélection de plusieurs formations alluvionnaires en fonction des différentes terrasses identifiées (Fz, Fy, Fx, Fw) a été réalisée dans les 14 principales plaines alluviales présentes dans la région. En l'absence d'éléments plus pertinents en termes de délimitation des entités alluvionnaires lors de la réalisation du projet, les limites des systèmes aquifères de la BDRHF V1 ont été repris pour différencier des secteurs homogènes à partir des formations alluviales de la carte géologique régionale. Ainsi, 30 entités ou sous-entités alluvionnaires d'intérêt hydrogéologique ont été distinguées en Midi-Pyrénées. Le tableau de l'illustration 4 récapitule leurs principales caractéristiques et l'illustration 5 représente sous forme cartographique le découpage réalisé.

Code Projet	Appellation	Formations Géologiques	Nombre points de suivi
GAM1	Garonne Amont	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	1
GAM2	Garonne Amont	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	1
GAM3	Garonne Amont	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	1
NE1	Neste	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	1
NE2	Neste	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	0
NE3	Neste	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	0
GM1	Garonne Médiane	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	2
GM2	Garonne Médiane	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	2
GM3	Garonne Médiane	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	1
AHV1	Ariège/ Hers Vif	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	3
AHV2	Ariège / Hers Vif	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	1
GHM1	Garonne / Hers Mort	Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses inférieures attribuées au Würm (Fy)	0

AGD1	Agout / Dadou	Alluvions fluviatiles des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses inférieures attribuées au Würm (Fy)	1
TA1	Tarn	Fz : Alluvions fluviatiles des basses terrasses à actuel	3
TA2	Tarn	Fy : Alluvions fluviatiles des terrasses inférieures attribuées au Würm	0
TA3	Tarn	Fx : Alluvions fluviatiles des terrasses moyennes attribuées au Riss	0
TAV1	Tarn / Aveyron	Fz : Alluvions fluviatiles des basses terrasses à actuel	1
TAV2	Tarn / Aveyron	Fy : Alluvions fluviatiles des terrasses inférieures attribuées au Würm	1
CTG1	Complexe Tarn / Garonne	Fz : Alluvions fluviatiles des basses terrasses à actuel	2
CTG2	Complexe Tarn / Garonne	Fy : Alluvions fluviatiles des terrasses inférieures attribuées au Würm	3
GAV1	Garonne Aval	Fz : Alluvions fluviatiles des basses terrasses à actuel	4
GAV2	Garonne Aval	Fy : Alluvions fluviatiles des terrasses inférieures attribuées au Würm	1
GAV3	Garonne Aval	Fx : Alluvions fluviatiles des terrasses moyennes attribuées au Riss	0
LO1	Lot	Alluvions fluviatiles des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses moyennes attribuées au Riss	0
DO1	Dordogne	Alluvions fluviatiles des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses inférieures attribuées au Würm (Fy) ET des terrasses moyennes attribuées au Riss	0
AD1	Adour	Fz : Alluvions fluviatiles des basses terrasses à actuel	2
AD2	Adour	Fy : Alluvions fluviatiles des terrasses inférieures attribuées au Würm	2
AD3	Adour	Fx : Alluvions fluviatiles des terrasses moyennes attribuées au Riss	0
AD4	Adour	Fw : Alluvions fluviatiles des hautes terrasses attribuées au Mindel	0
ARR1	Arros	Alluvions fluviatiles des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses inférieures attribuées au Würm (Fy) ET des terrasses moyennes attribuées au Riss	0

Illustration 4 - Entités alluvionnaires délimitées dans le cadre du projet ERESSAR.

Malgré ce découpage optimisé en unités considérées comme globalement homogènes sur le plan hydrogéologique, il est important de noter qu'à une échelle plus fine, le fonctionnement des nappes alluviales est le plus souvent très varié fortement soumis aux hétérogénéités géologiques en termes de puissance et nature des formations, de perméabilités, de porosité, sans compter les relations complexes nappes/rivières et la présence de chenaux d'écoulement privilégiés, etc. À ce titre, le réseau de suivi quantitatif des nappes alluviales, bien que dense en Midi-Pyrénées, montre que le tiers des unités ainsi définies ne fait l'objet d'aucun suivi, et qu'un autre tiers est représenté par un seul ouvrage d'observation, limitant ainsi toute analyse de sensibilité des résultats obtenus.

3.2.1. Délimitation des entités alluvionnaires de la Garonne

Outre la distinction entre les différentes terrasses alluviales identifiées (Fz, Fy, Fx, Fw), le système Garonne a été subdivisé en 4 tronçons distincts en s'inspirant des limites de découpage du référentiel BDRHF V1 :

✓ *Entité Garonne Amont*

L'entité Garonne Amont, d'une superficie d'environ 100 km², est délimitée à l'amont par la zone de confluence avec la Neste et à l'aval par la zone de confluence avec le Salat. Ce système est donc encadré à l'amont par l'entité de la Neste et à l'aval par celle de la Garonne Médiane. Les limites de cette entité correspondent approximativement à celle du système 352a (BDRHF V1) en excluant les alluvions déposées par le Salat, très peu aquifères, non pris en compte dans le projet ERESSAR.

Au sein de cette entité, les alluvions se répartissent en trois terrasses emboîtées dont la plus ancienne est attribuée au Riss (Fx). Ces différentes terrasses sont en connexion hydraulique, la plus récente étant elle-même en relation avec la Garonne. Ainsi, l'entité Garonne Amont est subdivisée en 3 sous-entités correspondantes à la distinction des 3 terrasses en présence.

✓ *Entité Garonne Médiane*

L'entité Garonne Médiane se subdivise en 3 entités distinctes en lien avec la distinction de trois ensembles de terrasses alluviales étagées :

- l'entité des alluvions de la basse plaine de la Garonne Médiane, limitée au sud par l'entité Garonne Amont (confluence Garonne-Salat) et au nord par la Garonne à hauteur de Toulouse (traversée de la plaine par le fleuve qui fait office de limite de flux à potentiel imposé). La superficie de cette entité est d'environ 209 km² et elle intègre quasi exclusivement des alluvions récentes à actuelles (Fz) de la basse plaine de la Garonne. Les limites de cette entité correspondent approximativement à celle du système 131a (BDRHF V1) ;
- l'entité des alluvions des terrasses inférieures de la Garonne Médiane possédant les mêmes limites au sud que la précédente et qui s'étend plus au nord jusqu'à la confluence entre la rivière Save et la Garonne. La superficie de cette entité est d'environ 348 km² et elle intègre quasi exclusivement des alluvions des terrasses inférieures (Fy, datées du Würm) qui se distinguent généralement des alluvions plus récentes par une perméabilité moindre (dépôts argilo-graveleux et limons de surface en plus grande quantité). Les limites de cette entité correspondent approximativement à celle du système 131b (BDRHF V1) ;
- l'entité des alluvions des terrasses moyennes de la Garonne Médiane correspond aux dépôts des alluvions anciennes des terrasses moyennes de la rive gauche de la Garonne, limités au nord par la rivière Save. La superficie de cette entité est d'environ 235 km². Il s'agit de terrasses étagées, séparées de la terrasse inférieure, plus récente, par des talus molassiques. Ces terrasses sont compartimentées par les nombreuses rivières secondaires qui les traversent et sont généralement hydrauliquement indépendantes entre elles. Les limites de cette entité correspondent pour partie à celle du système 342b (BDRHF V1).

✓ *Entité Complexe Tarn / Garonne*

L'entité du complexe Tarn / Garonne, d'une superficie de 342 km², correspond aux formations alluviales de la basse plaine et des basses terrasses présentes à l'interfluve de ces deux cours d'eau. Ces dernières sont agencées en terrasses étagées, séparées par le substratum molassique tertiaire. Ainsi, l'entité du complexe Tarn / Garonne est subdivisée en 2 sous-entités correspondantes à la distinction des 2 terrasses en présence.

La basse terrasse forme un aquifère continu qui se déverse dans celui de la basse plaine. Ce déversement s'effectue par l'intermédiaire d'un talus à affleurement molassique et se traduit par une discontinuité de la surface piézométrique de la nappe alluviale.

D'une manière générale, cet ensemble aquifère sablo-graveleux se caractérise par des variations notables d'épaisseur et de lithologie et par la présence d'éléments fins, en plus ou moins grande proportion, entraînant d'importantes variations de perméabilité.

Les limites de cette entité correspondent approximativement à celle du système 130 (BDRHF V1).

✓ *Entité Garonne Aval*

L'entité Garonne Aval, d'une superficie totale de 454 km², se subdivise en 3 entités distinctes en lien avec la distinction de trois ensembles de terrasses alluviales étagées et compartimentées par de très nombreuses rivières secondaires.

Les limites de cette entité correspondent pour partie à celle du système 343 (BDRHF V1), sachant que l'entité est ici arbitrairement découpée aux limites de la région Midi-Pyrénées. La limite amont correspond approximativement à la zone de confluence de la Garonne et de la Save (soit les limites en aval des entités Garonne / Hers Mort et Garonne Médiane).

3.2.2. Délimitation des entités alluvionnaires des affluents de la Garonne

✓ *Entité Neste*

L'entité de la Neste, d'une superficie de 24,5 km², est constituée par les formations alluviales de la vallée de la Neste séparant les terrains du Crétacé supérieur de la zone nord-pyrénéenne des formations mio-pliocènes des Petites Pyrénées. Sa limite à l'aval correspond à la confluence avec la Garonne. Les limites de cette entité correspondent approximativement à celle du système 352b (BDRHF V1).

Les alluvions de cette entité se répartissent en trois terrasses agencées en terrasses étagées, la plus ancienne étant la plus haute dans la topographie. Ainsi, l'entité Neste est subdivisée en 3 sous-entités correspondantes à la distinction des 3 terrasses en présence.

✓ *Entité Ariège / Hers Vif*

L'entité de l'Ariège et de l'Hers Vif, d'environ 438 km² de superficie, est constituée essentiellement par les alluvions de la basse plaine et de la basse terrasse de l'Ariège et de l'Hers Vif. Sa limite à l'aval correspond à la confluence avec la Garonne. Les limites de cette entité correspondent approximativement à celle du système 132 (BDRHF V1).

Au sein de cette entité, les alluvions se répartissent en deux terrasses en connexion hydraulique, les plus récentes étant elles-mêmes en relation avec L'Ariège et avec l'Hers Vif. Ainsi, l'entité Ariège / Hers Vif est subdivisée en 2 sous-entités correspondantes à la distinction des 2 terrasses en présence.

✓ *Entité Garonne / Hers Mort*

L'entité de l'Hers Mort, d'environ 219 km² de superficie, est constituée par les alluvions récentes et par les alluvions des basses terrasses de l'Hers Mort et de la Garonne en rive droite, agencées en terrasses étagées. Contrairement aux autres entités, ces deux niveaux de terrasses n'ont pas été distingués dans le découpage de l'entité car constitués d'éléments de nature semblable.

Les limites de cette entité correspondent pour partie à celle du système 339 (BDRHF V1), en excluant les alluvions du Girou considérées comme très peu aquifères. Sa limite à l'aval correspond à la confluence de l'Hers avec la Garonne.

✓ *Entité Tarn*

L'entité du Tarn, d'une superficie totale d'environ 500 km², est constituée par les formations alluviales de la basse plaine, des basses terrasses, et des moyennes terrasses du Tarn. Celui-ci est généralement encaissé dans ses alluvions (15 à 20 m environ) et coule sur le substratum molassique affleurant sur ses berges. Les aquifères en rive droite et rive gauche sont de fait totalement déconnectés sur le plan hydraulique. Les terrasses sont étagées et généralement séparées par des talus molassiques parallèles à la vallée. De plus, elles sont morcelées transversalement par les rivières secondaires.

L'épaisseur totale des alluvions est de l'ordre de 5 à 7 m, mais seule la base des alluvions est constituée de graviers à très faible pourcentage d'argile, sur une épaisseur de l'ordre de 2 m.

Ainsi, l'entité Tarn est subdivisée en 3 sous-entités correspondantes à la distinction des 3 terrasses en présence. Les limites de cette entité correspondent pour partie à celle du système 340 (BDRHF V1) en excluant les alluvions de l'Agout et du Dadou délimitées par ailleurs.

✓ *Entité Agout / Dadou*

À l'instar de la description effectuée pour les alluvions du Tarn, l'entité de l'Agout et du Dadou, d'une superficie de 204 km², est constituée par des terrasses alluviales étagées relativement similaires à celle du Tarn mais d'extensions et de puissances moindres (épaisseur totale des alluvions estimée à environ 3 à 4 m). Ces dernières sont également encaissées dans leurs alluvions (environ 10 m pour l'Agout) et coulent aussi sur le substratum molassique affleurant sur les berges. Toutefois, ces deux niveaux de terrasses n'ont pas été distingués dans le découpage de l'entité Agout / Dadou car de trop faibles extensions unitairement.

Les limites de cette entité correspondent pour partie à celle du système 340 (BDRHF V1) en excluant les alluvions du Tarn délimitées précédemment.

✓ *Entité Tarn / Aveyron*

L'entité Tarn / Aveyron, d'une superficie de 210 km², correspond aux formations alluviales de la basse plaine et des basses terrasses présentes à l'interfluve de ces deux rivières. Ces dernières sont agencées en terrasses étagées, séparées par le substratum molassique tertiaire. Cette plaine alluviale est compartimentée par les rivières secondaires qui entaillent profondément les terrasses. Ainsi, l'entité Tarn / Aveyron est subdivisée en 2 sous-entités correspondantes à la distinction des 2 terrasses en présence.

Les limites de cette entité correspondent pour partie à celle du système 341 (BDRHF V1).

3.2.3. Délimitation des autres entités alluvionnaires de Midi-Pyrénées

✓ Entité Lot

L'entité du Lot, d'une superficie de 105 km², est constituée par les formations alluviales récentes et par les terrasses moyennes du Lot. Les alluvions modernes constituent le lit mineur de la rivière. Les terrasses ne sont pas emboîtées, mais étagées, et le substratum affleure sous forme de talus séparant les différents niveaux.

Les alluvions modernes sont de composition très variable. Elles présentent 1 à 1,5 m de limons de crue superposés à une grave à galets d'une puissance de 2 à 6 m, pouvant localement atteindre 20 m en remplissage d'anciens chenaux karstiques. Ces alluvions sont les seules qui puissent être en communication hydraulique naturelle avec le Lot mais elles ne le sont effectivement qu'en amont de Luzech. Dans ce secteur, le Lot draine ou alimente la nappe alluviale, suivant leurs états hydrauliques respectifs. En aval de Luzech, le Lot n'est pas en contact avec les alluvions ; la rivière coule directement sur le substratum calcaire qu'elle a sur-creusé.

✓ Entité Dordogne

L'entité Dordogne, d'une superficie de 91 km², est constituée par les formations alluviales récentes, celles des terrasses inférieures (uniquement présentes dans la partie amont de l'entité), et des terrasses moyennes de la Dordogne. Comme pour les alluvions du Lot, les terrasses sont étagées et le substratum affleure sous forme de talus séparant les différents niveaux.

✓ Entité Adour

L'entité de l'Adour, d'une superficie de 821 km², est constituée par les formations alluviales récentes (Fz), des terrasses inférieures (Fy, datées du Würm), des terrasses moyennes (Fx, datées du Riss), et des hautes terrasses (Fw, datées du Mindel, uniquement présentes dans la partie nord de l'entité). Au sein de cette entité, les alluvions sont agencées en terrasses emboîtées et reposent sur les formations imperméables de l'Eocène et du Pliocène (molasses et argiles à galets), sauf dans le secteur au Sud d'Ossun où elles reposent sur des formations imperméables allant de l'Albien au Maestrichtien (flyschs marneux, calcaires, gréseux ou ardoisiers). Ainsi, l'entité Adour est subdivisée en 4 sous-entités correspondantes à la distinction des 4 terrasses en présence.

Les limites de cette entité correspondent pour partie à celle du système 129 et à celle du système 348 (BDRHF V1).

✓ Entité Arros

L'entité de l'Arros, d'une superficie de 112 km², est assimilable au contexte de mise en place des formations alluviales décrites pour l'entité de l'Adour avec la présence d'alluvions récentes (Fz), des terrasses inférieures (Fy, datées du Würm), et des terrasses moyennes (Fx, datées du Riss). Toutefois, s'agissant d'une entité d'extension latérale réduite, les trois niveaux de terrasses n'ont pas été distingués dans le découpage de l'entité.

Sa limite à l'aval correspond à la zone de confluence avec l'Adour.

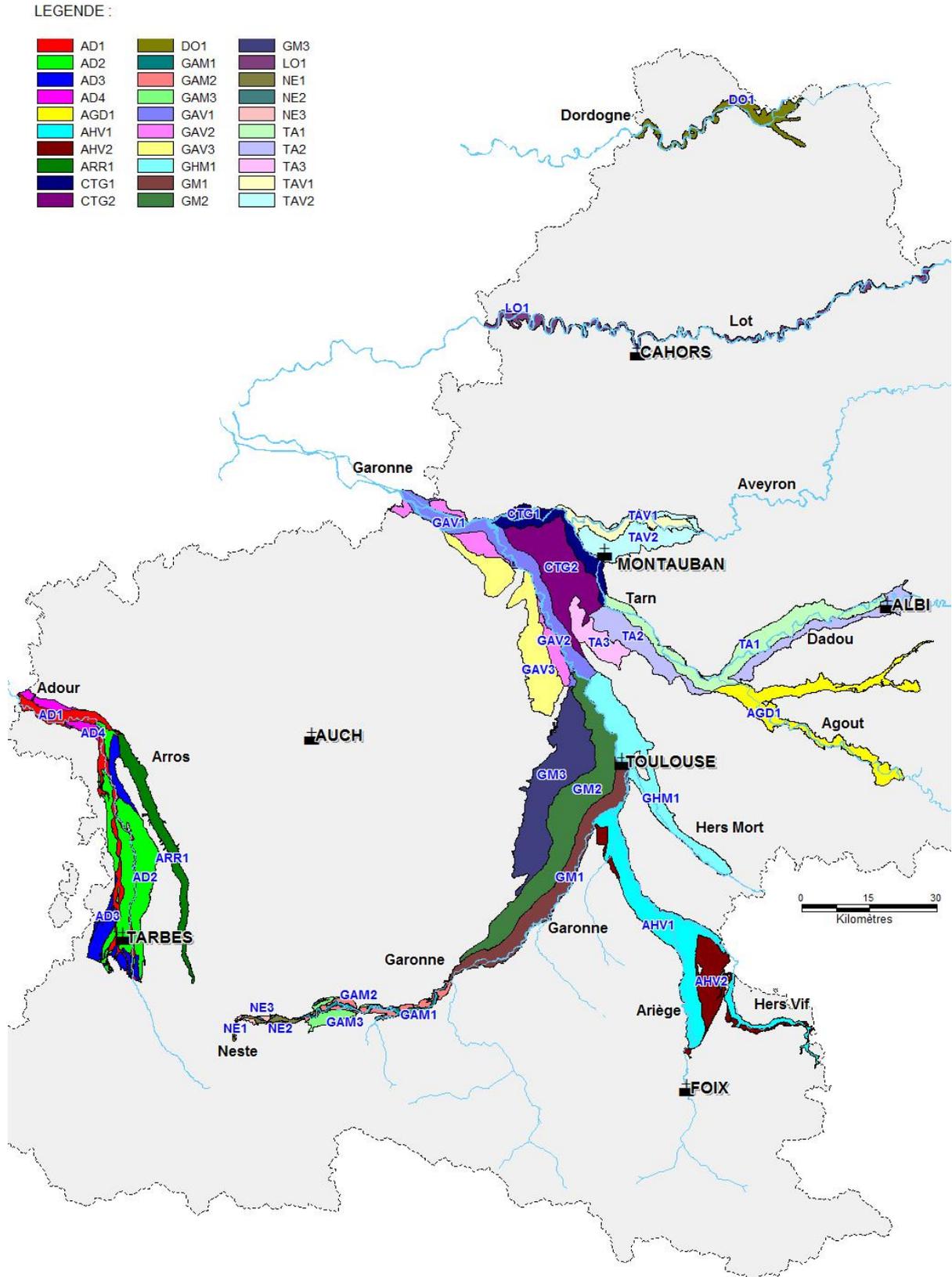


Illustration 5 - Découpage des entités alluviales pour les besoins du projet ERESSAR.

3.3. COLLECTE DES MESURES ACQUISES DANS LES DIFFÉRENTS RÉSEAUX DE SUIVI QUANTITATIF

Les chroniques piézométriques nécessaires au projet ont été extraites de la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES). Cette base de données rassemble sur un site internet public (www.ad.es.eaufrance.fr) des données quantitatives et qualitatives relatives à des points d'eaux souterraines appartenant à un réseau de suivi. Toutefois, outre les puits et les forages, ces réseaux sont également constitués de sources dont les mesures de hauteurs d'eau sont enregistrées au droit de stations hydrométriques, et ultérieurement converties en débits en s'appuyant sur les courbes de tarage. Les données relatives au suivi des sources ne sont pas stockées dans la banque ADES, mais disponibles à partir de la banque HYDRO (www.hydro.eaufrance.fr) gérée par la DREAL de Midi-Pyrénées.

Actuellement en Midi-Pyrénées, **6 réseaux unitaires de suivi quantitatif** des eaux souterraines, ayant des finalités de gestion bien distinctes, sont identifiés dans ADES. L'ensemble regroupe **275 points d'eau**. Le tableau de l'illustration 3 recense ces différents réseaux et le type d'ouvrages d'observation.

Le réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines du BRGM Midi-Pyrénées (0500000017 - RRESOUPBRGMMPY) a été mis en place en 1999 pour répondre aux exigences de la DCE. Financé par le MEEDDAT, le BRGM Midi-Pyrénées en assure la maîtrise d'œuvre et la maîtrise d'ouvrage. Actuellement, ce réseau est constitué de 44 piézomètres (+ 1 puits abandonné et remplacé en 2001), et 16 stations hydrométriques correspondant au suivi de sources.

Dénomination	Code Sandre	Puits ou Forages	Stations de jaugeage sources ou rivière	Total
Réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines du BRGM Midi-Pyrénées	0500000017	44	16	60
Réseau départemental de suivi quantitatif des eaux souterraines du Lot (46)	0500000013	4	6	10
Réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines du Parc des Grands Causses (12)	0500000015	0	32	32
Réseau départemental de suivi quantitatif des eaux souterraines du Gers (32)	0500000007	15	0	15
Réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines de l'agglomération toulousaine	0500000030	132	0	132
Réseau de suivi quantitatif des sources de la Région Midi-Pyrénées (DREAL)	0500000046	0	26	26

Illustration 6 - Réseaux de suivi quantitatif des eaux souterraines en région Midi-Pyrénées.

Le réseau départemental du Lot (0500000013 - RDESOU46) a été initié en 1976 sous maîtrise d'ouvrage de la DDT du Lot. Il a été repris en 2011 par le Conseil Général du Lot. Ce réseau a une double vocation de connaissance patrimoniale au titre de la DCE, et de gestion départementale. Il est constitué de 4 piézomètres et de 6 stations hydrométriques pour le suivi de sources.

Les suivis du réseau départemental du Gers (0500000007 - RDESOU32) ont démarré en 2002 sous maîtrise d'ouvrage du Conseil Général du Gers. Sur les 15 ouvrages intégrés, correspondant tous à des piézomètres, 10 ont pour vocation le suivi des eaux souterraines au titre de la DCE et seulement 5 ont une finalité de gestion départementale.

Le réseau du Parc des Grands Causses (0500000015 - RLESOUFGC), créé en 2000 sous maîtrise d'ouvrage du Syndicat Mixte du Parc Naturel Régional des Grands Causses, est exclusivement dédié au suivi des débits des principales sources du territoire du parc, soit 32 stations hydrométriques installées dans le département de l'Aveyron.

Le réseau régional de connaissance et de surveillance de l'évolution des débits des sources de la région Midi-Pyrénées (0500000046 - RRESOUPDIRENMPY) a été instauré en 2009 sous la maîtrise d'ouvrage de la DREAL Midi-Pyrénées. Ce réseau constitué de 26 stations hydrométriques en rivière (dont une située en Lot-et-Garonne) a pour objectif de donner une image de l'état quantitatif des masses d'eau de la région dans le cadre du RCS DCE.

Le réseau de surveillance quantitative des eaux souterraines de l'agglomération de Toulouse (0500000030 - RLESOUPTLS) était destiné au suivi piézométrique des nappes alluviales présentes sous la ville de Toulouse et ses communes avoisinantes. Les suivis effectués sur 132 points d'eau se sont déroulés entre 2004 et 2008 sous maîtrise d'ouvrage de la commune de Toulouse.

3.3.1. Collecte des chroniques piézométriques exploitables

L'étude de la sensibilité des nappes à la sécheresse se base en grande partie sur l'analyse des chroniques piézométriques afin de caractériser la dynamique de la nappe en fonction des apports naturels d'eau (précipitations principalement). Cette analyse nécessite l'obtention de chroniques fiables, suffisamment longues pour intégrer les événements extrêmes tels que les périodes de sécheresse prononcée, et à un pas de temps adapté aux données d'entrée (journalier).

Un export des chroniques piézométriques acquises sur les points de mesures des différents réseaux de Midi-Pyrénées a été réalisé en mai 2013 dans la banque ADES. Le réseau de l'agglomération toulousaine, doté de chroniques jugées insuffisamment longues et à un pas de temps inadapté, n'a pas été retenu dans le cadre de l'étude. Le diagnostic des 64 chroniques piézométriques recensées en Midi-Pyrénées conduit à en retenir 40 qui disposent de chroniques jugées exploitables dans le cadre du projet ERESSAR. Les points de mesure en nappes captives (principalement en Midi-Pyrénées : la nappe des sables infra-molassiques de l'Éocène inférieur et des calcaires du Jurassique), et les ouvrages présentant des chroniques de données trop courtes (démarrage en 2013 par exemple) ont été exclus du traitement.

Parmi les informations présentes dans ADES, le code de la masse d'eau souterraine concernée est associé à chacun des piézomètres ainsi que le code de l'ancien référentiel hydrogéologique français BDRHF V1. Dans le cadre du projet ERESSAR, l'identifiant de l'entité hydrogéologique de niveau 3 du référentiel BD LISA (version V0) a été attribué à chacun des 64 ouvrages recensés dans la banque ADES en Midi-Pyrénées.

Les 40 chroniques piézométriques exploitables concernent 7 entités hydrogéologiques BD LISA (représentées par 8 points de suivi), et 7 entités complémentaires alluviales (représentées par 32 points de suivi). L'illustration 7 indique la localisation des 40 points de suivi quantitatif utilisés dans le projet ERESSAR, et le tableau de l'illustration 8 représente la répartition de ces 40 piézomètres en fonction des entités BD LISA et des codes créés spécifiquement pour le projet pour la représentation des entités alluviales.

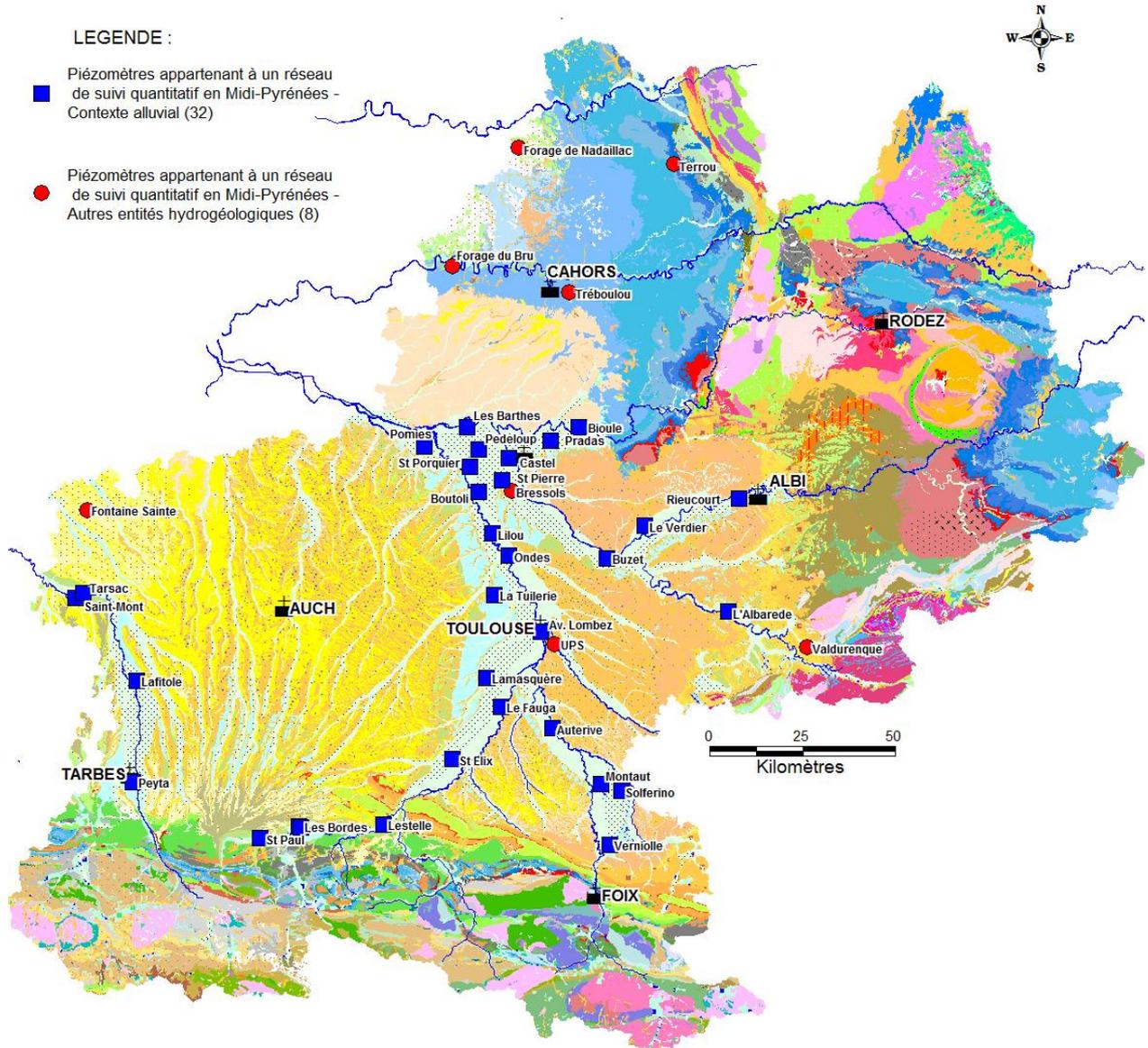


Illustration 7 - Localisation des 41 piézomètres sélectionnés dans le cadre du projet ERESSAR appartenant à un réseau de suivi quantitatif en Midi-Pyrénées.

3.3.2. Collecte des données hydrométriques (sources et rivières)

Un export des chroniques de débits a été effectué dans la banque HYDRO pour les 54 sources suivies dans le cadre des différents réseaux de surveillance quantitative en Midi-Pyrénées (RRESOUPBRGMMPY, RDESOU46 et RLESOUFGC). 14 d'entre elles disposent uniquement de mesures de hauteurs d'eau, les courbes de tarage n'ayant pas été établies pour la conversion des données en débits. Ainsi, l'analyse des débits à partir du logiciel TEMPO a pu être entreprise sur les 40 sources disposant de chroniques de mesures exploitables. À l'instar du travail effectué pour les piézomètres, chacune des 54 sources suivies a été rattachée à l'identifiant de l'entité hydrogéologique BD LISA de niveau 3 (version V0) à laquelle elle appartient. Le tableau de l'illustration 9 représente la répartition des 40 sources ayant pu être exploitées dans le projet ERESSAR en fonction des entités BD LISA concernées. Ainsi, le fonctionnement hydrogéologique de 17 de ces entités a pu être étudié à partir des chroniques de débits existantes. La carte de l'illustration 9 indique la répartition des 54 sources à l'échelle de la région en distinguant celles ayant fait l'objet d'une analyse des débits sous TEMPO.

Code BD-Lisa NV3	Appellation BD Lisa NV3	Code Projet ERESSAR (Alluvial)	CODE_BSS	Commune	Dénomination
040AF31	Formations alluviales complémentaires	AD1	09793X0003/F	SAINT-MONT	Saint-Mont
		AD1	09793X0011/F	TARSAC	Tarsac
		AD2	10065X0042/F	LAFITOLE	Lafitole
		AD2	10315X0112/F	LALOUBERE	Peyta
040AF35	Formations alluviales complémentaires	GAV2	09294X0256/F	SAINT-NICOLAS-DE-LA-GRAVE	Pomies
		CTG1	09301X0028/F	LES BARTHES	Les Barthes
		CTG1	09303X0185/F	MONTAUBAN	Castel
		GAV1	09306X0286/F	MONTECH	Boutoli
		TAV2	09311X0093/F	SAINT-ETIENNE-DE-TULMONT	Pradas
		TAV1	09312X0063/F	BIOULE	Bioule
		GAV1	09562X0170/F	VERDUN-SUR-GARONNE	Lilou
		GAV1	09567X0219/F	ONDES	Ondes
		TA1	09574X0030/F	RABASTENS	Le Verdier
		TA1	09577X0047/F	BUZET-SUR-TARN	Buzet
		GM1	09838D0727/F	TOULOUSE	Avenue de Lombez
		GM2	10092X0166/F	LAMASQUERE	Lamasquère
		GM1	10097X0224/F	LE FAUGA	Le Fauga
		GM2	10345X0199/F	SAINT-ELIX-LE-CHATEAU	St Elix
		AHV1	10351X0024/F	AUTERIVE	Auterive
		AHV1	10357X0021/F	MONTAUT	Montaut
		AHV2	10357X0213/F	MAZERES	Solferino
AHV1	10577X0159/F	VERNIOLLE	Verniolle		
040AF39	Formations alluviales complémentaires	CTG2	09302X0139/F	LA VILLE-DIEU-DU-TEMPLE	Pedeloup
		GAV1	09306X0091/F	SAINT-PORQUIER	St Porquier
		CTG1	09307X0146/F	LACOURT-SAINT-PIERRE	St Pierre
		TA1	09328X0126/F	TERSSAC	Rieucourt
040AF43	Formations alluviales complémentaires	AGD1	09857X0102/F	LALBAREDE	L'Albarede
040AG67	Formations alluviales complémentaires	NE1	10546X0026/F	SAINT-PAUL	St Paul
		GAM3	10548X0101/F	BORDES-DE-RIVIERE	Les Bordes
		GAM2	10548X0102/F	BORDES-DE-RIVIERE	Les Bordes
040AG99	Formations alluviales complémentaires	GAM1	10553X0026/F	LESTELLE-DE-SAINT-MARTORY	Lestelle
306AA01	Moyennes terrasses (sables, graviers et galets) Quaternaires du bassin Adour Garonne	GM3	09833C0249/F	DAUX	La Tuilerie
316AA01	Faluns, grès et sables du Langhien-Serravallien (Helvétien) du bassin aquitain	non concerné	09523X0032/F	ESTANG	Fontaine Sainte F1
322AA03	Molasses Oligo-Miocènes du bassin aquitain	non concerné	09845C1426/F	TOULOUSE	UPS
326AA05	Molasses Oligo-Eocènes du bassin aquitain	non concerné	09307X0136/F	BRESSOLS	Bressols
332AA01	Brèches et conglomérats de la Grèsigne, argiles à graviers de l'Albigeois et du Carmausin, et graviers d'Issel (Oligo-Eocène)	non concerné	09866X0074/F	CAUCALIERES	Valdurenque
348AA03	Calcaires, grès et sables du Turonien du nord du bassin aquitain	non concerné	08323X0205/F	PAYRIGNAC	PZ4 Nadaillac
356AB01	Calcaires du Kimméridgien du nord du bassin aquitain	non concerné	08565X0007/F	VIRE-SUR-LOT	Forage du Bru
		non concerné	08811X0055/F	FLAUJAC-POUJOLS	Tréboulou PZ4
362AA03	Calcaires, dolomies et anhydrite de l'Hettangien-Sinémurien	non concerné	08341X0031/F	RUEYRES	Terrou
			Sous MO BRGM		

Illustration 8 - Distribution des piézomètres utilisés dans le projet ERESSAR par entités BD LISA.

Code BD-Lisa NV3	Appellation BD Lisa NV3	Code BSS source	Commune	Appellation
352AA01	Calcaires et dolomies du Tithonien du bassin aquitain	08567X0027/HY	SAINT-MEDARD	Le Martinet
		08567X0028/HY	SAINT-MEDARD	Source de Font Vincent
358AE03	Calcaires micritiques et bioclastiques du Bathonien moyen à Oxfordien du nord du bassin aquitain	08091X0006/HY	LE BLAGOUR DE SOUILLAC	Blagour
		09052X0002/HY	PUYLAROCQUE	Candé
		09058X0022/HY	SAINT-ANTONIN-NOBLE-VAL	La Gourgue
358A02	Calcaires et dolomies de l'Aalénien au Tithonien dans le Causse de Massegras - Séverac - système des Grands Causses	08852X0006/HY	SAINT-SATURNIN-DE-LENNE	Source de Lestang
		08853X0007/HY	CAMPAGNAC	Source du Ruisseau de Serre
		08853X0024/HY	CAMPAGNAC	Duc
		08856X0065/HY	LAPANOUSE	Segala
		08857X0010/HY	SEVERAC-LE-CHÂTEAU	Exurgence de la Bastide
		08857X0013/HY	SEVERAC-LE-CHÂTEAU	Source de Cayrac (Massegras)
		08857X0030/HY	SEVERAC-LE-CHÂTEAU	Source de la Verlenque
358A10	Calcaires et dolomies de l'Aalénien au Tithonien dans le Causse du Larzac du système des Grands Causses	09098X0081/HY	ROQUE-SAINTE-MARGUERITE(LA)	Source de l'Esperelle
		09352X0048/HY	CREISSELS	Résurgence de Boundoulaou n°2
		09353X0002/HY	CREISSELS	Source Ladoux ou Résurgence Homède
		09356X0025/HY	TOURNEMIRE	Source du Brias, Balastièrre
		09357X0011/HY	SAINT-JEAN-ET-SAINT-PAUL	Résurgence Aiguebelle
		09365X0019/HY	NANT	Source du Durzon
		09613X0010/HY	SAINT-BEAULIZE	Exurgence de Sainte-Beaulize, Fousette
		09614X0003/HY	CORNUS	Source de la Gloriette, Exurgence de Lebredoux de Cornus
		09614X0036/GL	CORNUS	Source de la Sorgue du Larzac
358A11	Calcaires et dolomies de l'Aalénien au Tithonien dans le Causse du Comtal du système des Grands Causses	08605X0007/HY	MURET-LE-CHATEAU	Source des Bardels ou de Muret-le-Château
362AC01	Dolomies et calcaires de l'Hettangien au Carixien dans les causses de Séverac et de Massegras - système des Grands Causses	08851X0006/HY	PIERREFICHE	Résurgence de Glassac
		08851X0009/HY	VIMENET	Source de Mayrinhac
		08856X0007/HY	LAPANOUSE	Source de Tantayrou
		08856X0062/HY	BUZEINS	Source de Buzareingnes
362AC17	Unité aquifère captive des grès et calcaires de l'Hettangien et Sinémurien dans la région des Grands Causses	09357X0022/HY	SAINTE-EULALIE-DE-CERNON	Sources du Cernon
		09357X0023/HY	SAINTE-EULALIE-DE-CERNON	Trou de Rause
362AC20	Grès et calcaires de l'Hettangien et Sinémurien dans le Causse de Saint-Affrique - système des Grands Causses	09357X0018/HY	LAPANOUSE-DE-CERNON	La Mouline

Illustration 9 - Distribution des sources utilisées dans le projet ERESSAR par entités BD LISA.

Code BD-Lisa NV3	Appellation BD Lisa NV3	Code BSS source	Commune	Appellation
362AC21	Grès et calcaires de l'Hettangien et sinemurien dans le causse de Caussanus - Guilhaumard - Loubiere - système des Grands Causses	09355X0014/HY	SAINT-AFFRIQUE	la Dragonnière
364AC01	Marnes, argilites et grès du Trias dans le système des Grands Causses	09092X0002/HY	VERRIERES	Source Saint-Pierre
370AA06	Socle du bassin versant du Dourdou	09615X0033/HY	BRUSQUE	Céras
402AA03	Calcaire à faciès Urgonien du Crétacé inférieur du chaînon d'Aspet	10734X0011/HY	CAZAVET	Aliou
402AA05	Calcaires et dolomies du Jurassique moyen et supérieur du chaînon d'Aspet	10731X0014/HY	IZAUT-DE-L'HOTEL	Maourou
		10734X0010/HY	BALAGUERES	Baget
		10733X0027/HY	ARBAS	Bernatas
402AE04	Calcaires et dolomies du Jurassique moyen et supérieur du chaînon de Mont Caup	10722X0015/HY	GENEREST	Plan de Pouts
402AR01	Calcaires et marnes du Crétacé inférieur du Pays de Sault dans le bassin Adour-Garonne	10766X0089/HY	BELESTA	Fontestorbes

Illustration 9 - Distribution des sources utilisées dans le projet ERESSAR par entités BD LISA.

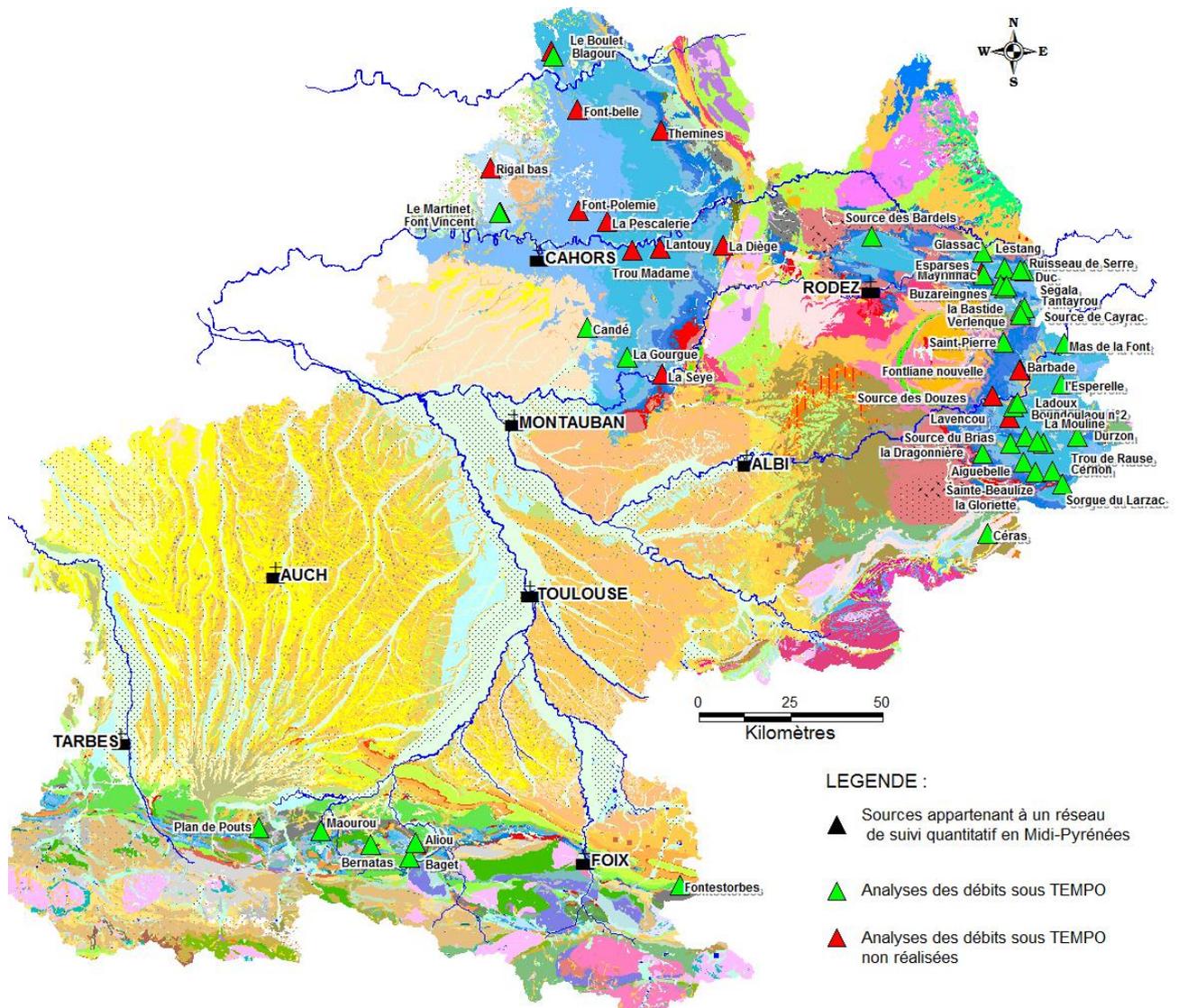


Illustration 10 - Localisation des 54 sources appartenant à un réseau de suivi quantitatif sur la région Midi-Pyrénées.

Par ailleurs, outre les chroniques de débits associées aux sources suivies dans le cadre d'un réseau de mesure, un export des données hydrométriques (hauteurs d'eau et débits) acquises au niveau des stations en rivière a également été effectué dans la Banque HYDRO. En effet, pour pallier la quasi-absence de données et d'informations hydrogéologiques en domaine de socle dans le secteur du Massif central, ces données ont été utilisées dans une approche expérimentale pour tenter de consolider ponctuellement les résultats obtenus dans le cadre du présent projet. L'ensemble des informations relatives à ces stations est indiqué dans chapitre 5 concernant les aquifères de socle.

3.4. ACQUISITION DES DONNÉES CLIMATIQUES (PRÉCIPITATIONS ET ETP)

L'évaluation de la recharge des entités hydrogéologiques est un élément prépondérant pour estimer la disponibilité en eau des aquifères étudiés, et *a fortiori* leur résistance à la sécheresse. Elle peut être approchée via le calcul de la pluie efficace et du coefficient d'infiltration.

La pluie efficace a été calculée en utilisant les précipitations (PP) et l'évapotranspiration (ETP) de plusieurs stations météorologiques réparties sur l'ensemble de la région Midi-Pyrénées et des régions voisines (Illustration 12).

Les données climatiques ont été acquises pour différents types de stations météorologiques (Illustration 11), de la station manuelle de type 4 (relevé manuel par des bénévoles) à la station de type 0 ou 1 (automatique avec observation humaine). Le choix de la station est fonction des données disponibles (précipitations et ETP) et du type de stations représenté sur le secteur considéré. Au total, les données ont été collectées sur 29 stations météorologiques différentes réparties aussi bien en Midi-Pyrénées que dans les régions voisines (Languedoc-Roussillon, Auvergne et Aquitaine).

CODE INSEE	DEPT	COMMUNE	APPELATION	DATE MISE EN SERVICE	XL2E	Y L2E	Z	TYPE STATION
9289001	09	LORP-SENTARAILLE (ST GIRONS)	ANTICHAN	01/01/1949	499 500	1 778 800	414	0
9199002	09	MONTAUT	LE MOULIN	01/05/2002	543 500	1 799 100	295	1
11028001	11	BELCAIRE	LA CROIX DE FER	01/07/1962	569 800	1 757 400	980	0
12063003	12	LA CAVALERIE	AERODROME	01/12/1998	667 800	1 887 600	795	2
12145001	12	MILLAU	SOULOBRES	01/04/1964	654 700	1 902 100	712	0
12254001	12	SALLES-LA-SOURCE	AEROPORT DE RODEZ	01/11/1970	611 600	1 934 400	578	0
12036001	12	BROMMAT	RUEYRES	01/06/1936	627 900	1 975 300	732	4
12258001	12	LA SALVETAT-PEYRALES	LA PLANE	01/05/1979	588 100	1 915 600	550	4
15014004	15	AURILLAC	AERODROME	01/01/1968	606 600	1 988 700	639	0
24037005	24	BERGERAC	ROUMANIERE	01/03/1988	456 500	1 981 900	49	0
30009001	30	ALZON	LE CUREL	01/01/1928	688 400	1 885 800	595	2
30297001	30	SAINT-SAUVEUR-CAMPRIEU	LE SOTCH DES BAYLES	01/06/1963	691 100	1 902 700	1107	2
31069001	31	TOULOUSE-BLAGNAC	AEROP. TOULOUSE-BLAGNAC	01/01/1947	522 500	1 847 000	151	0
32013005	32	AUCH	LAMOTHE	01/01/1985	459 900	1 855 700	122	0
34293001	34	LA SALVETAT-SUR-AGOUT	BARRI CAMPEMARE	01/01/1912	629 700	1 844 500	693	4
34064003	34	LE CAYLAR	ROQUE LONGUE	10/05/2007	677 950	1 874 414	729	2
40192001	40	MONT-DE-MARSAN	AERODROME	01/12/1944	371 900	1 882 800	59	0
46127001	46	GOURDON	GRIMARDET	01/02/1961	525 400	1 972 000	260	0
46071001	46	COMIAC	LA SALESSE	01/09/2004	573 438	1 996 279	562	4
46160001	46	LATRONQUIERE	LAS ROQUES	01/01/1924	578 700	1 977 700	651	4
48094001	48	LE MASSEGROS	GENDARMERIE	01/02/1870	667 200	1 923 400	873	2
48146002	48	SAINTE-ENIME	GENDARMERIE	01/09/1995	685 800	1 929 800	480	2
48176002	48	SAINT-PIERRE-DES-TRIEPIERS	LA VOLPILIERE	01/11/1987	677 200	1 916 600	929	1
65344001	65	OSSUN (TARBES-OSSUN)	OSSUN	01/08/1944	409 700	1 801 200	360	0
81284001	81	ALBI	AERODROME D'ALBI	01/11/1976	582 200	1 879 300	172	0
81014001	81	ANGLES	IMPASSE DES CHALETS	01/09/1956	618 400	1 840 400	750	4
81163001	81	MAZAMET	LES MONTAGNES	01/04/1944	600 800	1 828 800	683	4
81124001	81	LACAUNE	ANCIENNE GARE	01/01/1895	628 900	1 856 100	802	3
82121002	82	MONTAUBAN	AERODROME	01/06/1865	522 900	1 892 300	106	0

Illustration 11 - Liste des stations météorologiques sélectionnées.

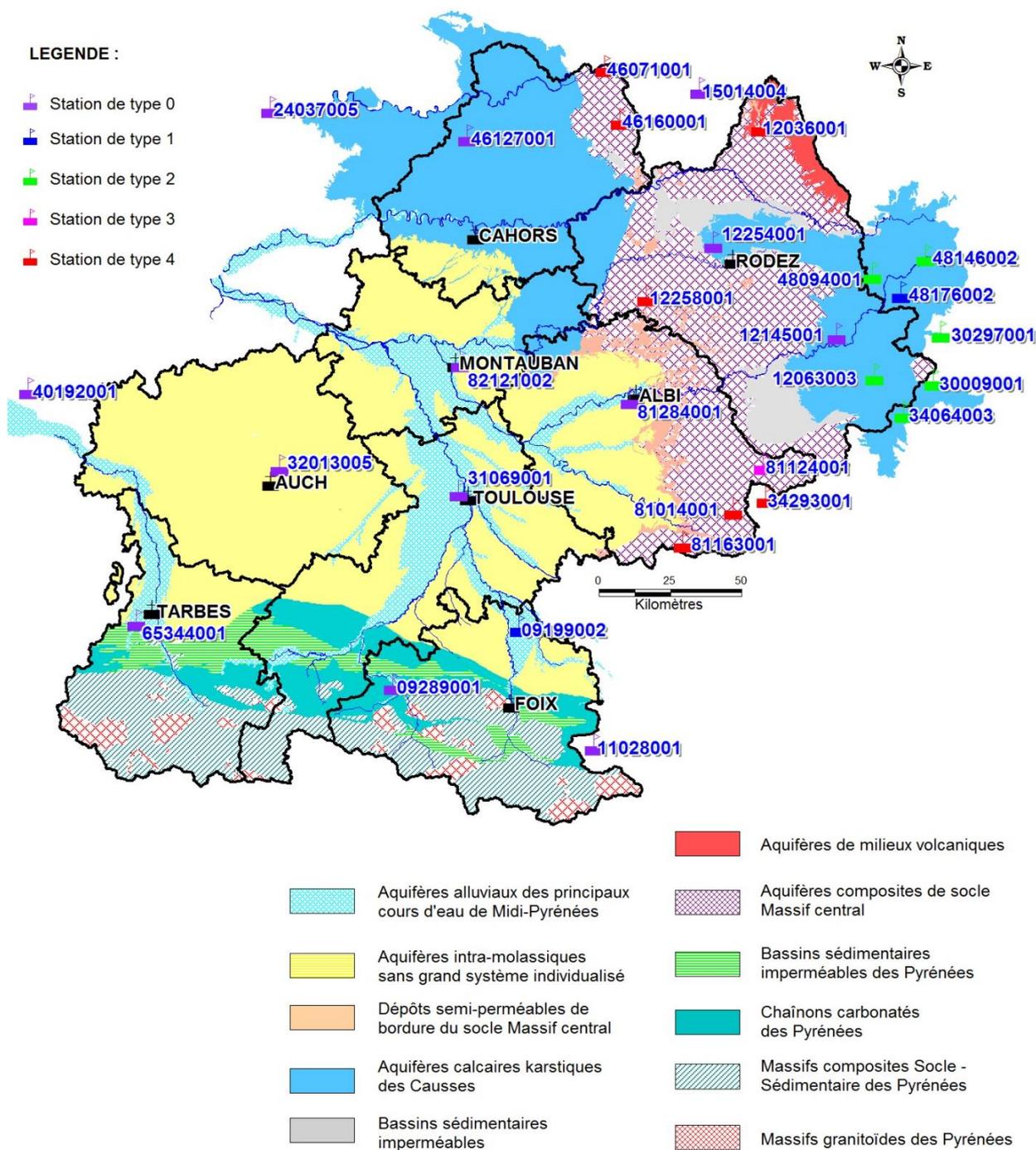


Illustration 12 - Localisation des stations météorologiques sélectionnées en fonction de leur situation au sein des grands ensembles hydrogéologiques de la région Midi-Pyrénées.

Il faut noter que les données climatiques n'ont pas été collectées de façon uniforme sur l'ensemble des stations, mais spécifiquement en fonction des périodes couvertes par les chroniques piézométriques ou hydrométriques analysées. Ainsi, les précipitations et l'ETP ont été acquises sur des périodes comprises entre 1961 et 2012 pour certaines stations et seulement sur la période 2013-2014 pour d'autres, en fonction des besoins spécifiques à l'étude (Illustration 13).

CODE INSEE	PLUIE JOUR	PLUIE DEC.	ETP JOUR	ETP DEC.
9289001	01/01/1968 - 31/12/2012			
9199002	01/01/2008 - 31/08/2013	01/01/1995 - 21/05/2013	01/01/2008 - 31/08/2013	01/01/1995 - 21/05/2013
11028001	01/01/1964 - 31/12/2012			
12063003	01/12/1998 - 31/12/2012			01/01/2004 - 01/10/2009
12145001	01/01/1988 - 31/12/2012		01/01/1998 - 31/07/2009	
12254001	01/01/1987 - 31/12/2012	01/09/2013 - 21/11/2014	01/09/2013 - 02/12/2014	01/09/2013 - 21/11/2014
12036001	01/09/2013 - 30/11/2014	01/09/2013 - 21/10/2014		
12258001	01/09/2013 - 30/11/2014	01/09/2013 - 21/10/2014		
15014004	01/01/1987 - 31/12/2012			
24037005	01/01/1997 - 31/12/2012	01/01/1972 - 21/12/2010		01/01/1972 - 21/12/2010
30009001	01/01/1993 - 31/12/2012			
30297001	01/01/1993 - 31/12/2012			
31069001	01/01/1987 - 31/12/2012	01/04/1982 - 21/12/2012	02/01/1996 - 28/01/2003	01/04/1982 - 21/12/2012
32013005		01/01/1985 - 21/12/2012		01/02/1985 - 21/12/2012
34293001	01/01/1987 - 31/12/2012			
34064003	01/01/1999 - 07/02/2013			
40192001		01/01/1972 - 21/12/2012		01/01/1972 - 21/12/2010
46127001	01/02/1961 - 31/12/2012	01/01/2001 - 21/11/2014	01/01/2004 - 27/09/2008	01/01/2001 - 21/11/2014
46071001	01/09/2013 - 02/12/2014	01/09/2013 - 21/11/2014	01/09/2013 - 02/12/2014	
46160001		01/09/2013 - 21/10/2014		
48094001	01/01/1993 - 31/12/2012			
48146002	01/09/1998 - 31/12/2012			
48176002	01/01/1993 - 31/12/2012			
65344001	01/01/1999 - 31/12/2012			01/05/2001 - 21/12/2012
81284001	01/01/1987 - 31/12/2012			01/09/2013 - 21/10/2014
81014001	01/09/2013 - 30/11/2014	01/09/2013 - 21/10/2014		
81163001		01/09/2013 - 21/10/2014		
81124001			01/09/2013 - 02/10/2014	
82121002	01/01/1987 - 31/12/2012	01/05/2004 - 21/04/2013		01/05/1990 - 21/04/2013

Illustration 13 - Données climatiques acquises auprès de Météo France pour les besoins du projet.

Pour chaque station, la pluie efficace journalière ou décadaire (en fonction des données disponibles) a été évaluée, puis la pluie efficace pendant la période de recharge a été calculée. Par expérience, la période de recharge a été définie sur la région comme couvrant la période début octobre - fin mai, avec une flexibilité d'une quinzaine de jours en fonction des années. La pluie efficace évaluée sur chaque station pendant cette période de recharge est disponible dans l'illustration 14.

Malgré des disparités existantes à l'échelle régionale, le tableau ci-dessus fait apparaître des années relativement humides à l'échelle régionale, comme les années 1993 ; 1994 ; 2001 ; 2004 ; 2009. À l'inverse, l'année la plus sèche est généralement associée à l'année 2012. Afin de s'affranchir des disparités régionales et temporelles, l'année sèche, humide et moyenne relatives à chaque chronique piézométrique et de débits a également été identifiée.

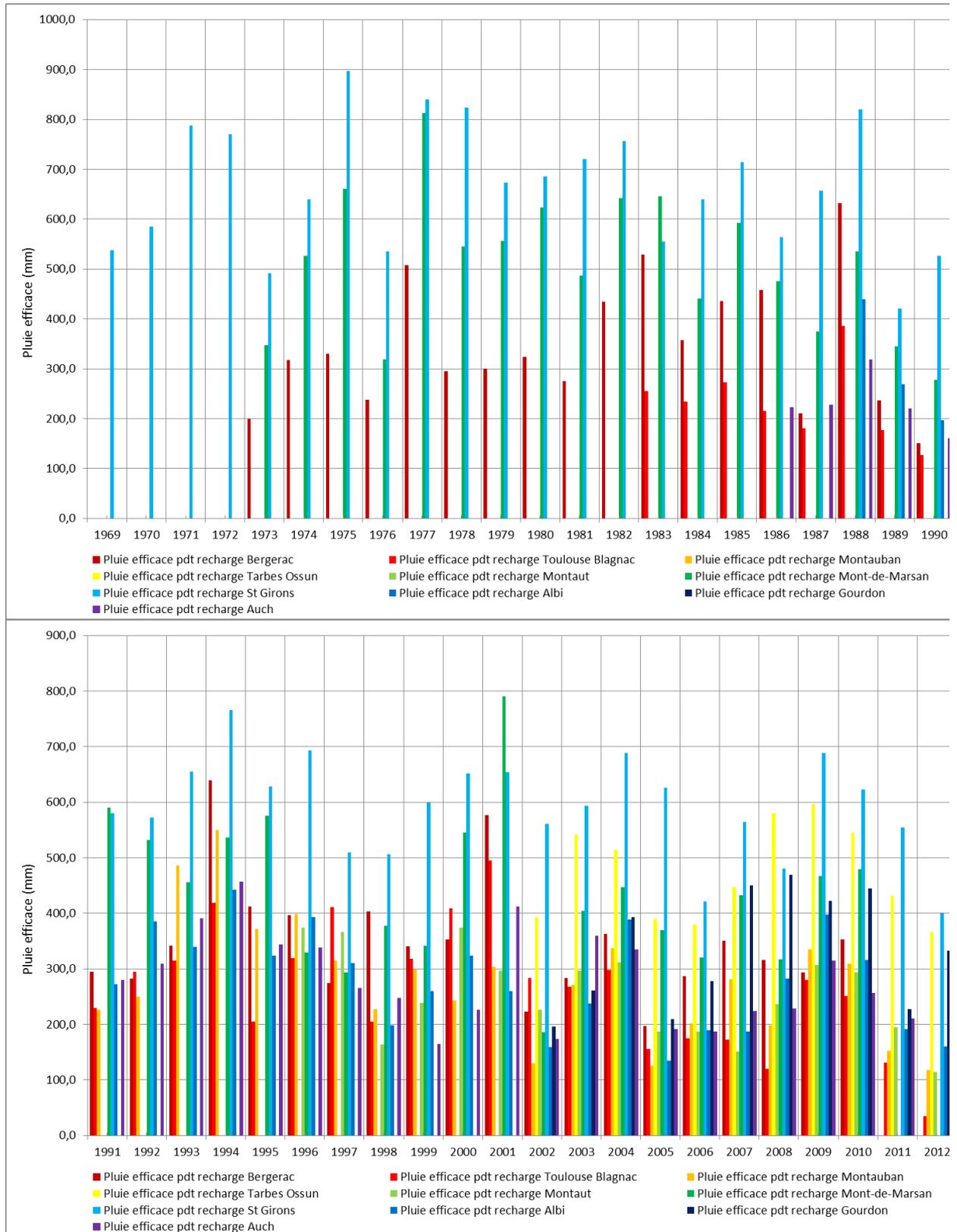


Illustration 14 - Pluie efficace calculée durant la période de recharge sur la période 1969 - 2012.

3.5. UNITÉS DE GESTION

Dans l'objectif de caractériser d'un point de vue intrinsèque les capacités à l'infiltration ou au ruissellement des différentes entités hydrogéologiques de la région Midi-Pyrénées, le travail effectué par la BRGM en 2001 sur la définition des unités de gestion de la qualité des eaux continentales a été repris et adapté à la présente étude.

L'objectif de ce projet était de définir un réseau optimisé de surveillance de l'impact sur la qualité des eaux continentales des produits potentiellement polluants à partir d'une méthodologie intégrant une cartographie multicritère des risques de pollution des eaux continentales (Rapport BRGM/RP-50337-FR, Schoen et Ricard, 2001, Rapport BRGM/RP-51456-FR, Schoen et Codvelle, 2001).

Cette étude a permis dans un premier temps, de définir des unités de gestion (UG) de la qualité des eaux continentales (eaux superficielles et souterraines) sur toute la région, puis dans un second temps, d'évaluer leur vulnérabilité intrinsèque.

Les contours des unités sont définis selon les caractéristiques du cheminement de l'eau de pluie après son arrivée sur le sol. Pour cela, la méthodologie proposée consiste à identifier localement le mécanisme prépondérant entre l'infiltration et le ruissellement et à approcher la réalité en se limitant à la description de ce seul mécanisme. Le contour d'une même unité de gestion peut donc comporter des limites de type ruissellement et des limites de type infiltration.

Ce travail a été suivi d'une phase d'évaluation de la vulnérabilité du milieu pour estimer le risque de pollution de l'eau. Le modèle retenu est une analyse multicritère spatialisée grâce à l'utilisation d'un SIG. La vulnérabilité des eaux souterraines a été évaluée en définissant les facteurs de l'écoulement de l'eau qui contribuent au transport des produits phytosanitaires. Ces facteurs sont évalués à l'aide de critères pondérés par une note en fonction de leur contribution à la vulnérabilité. La combinaison de ces notes aboutit au calcul de la vulnérabilité :

- facteurs liés au sol (perméabilité globale du sol, épaisseur, hydromorphie, teneur en matière organique) ;
- facteurs de la zone non saturée (ZNS) (épaisseur, perméabilité, écoulement préférentiel lié à l'existence de discontinuités) ;
- facteurs de la zone saturée (perméabilité de l'aquifère, présence de discontinuités, épaisseur de la lame d'eau).

Les facteurs utilisés pour évaluer une vulnérabilité spatialisée sont listés dans l'illustration 15. Ils sont décrits par un ou plusieurs critères, eux-mêmes listés dans cette même illustration. Ces facteurs et critères ont permis de définir une note de vulnérabilité pour chaque unité de gestion.

Les facteurs susceptibles d'intéresser le programme ERESSAR en tant que critères pour aider à la caractérisation des indicateurs de sécheresse sont essentiellement : la perméabilité de la zone non saturée et le caractère ruisselant, infiltrant, ou intermédiaire de l'unité de gestion. Ils traduisent tous deux la capacité de l'aquifère à plus ou moins bien se recharger. La perméabilité de la zone saturée peut être directement liée à l'inertie de la nappe. Cependant les contrastes de perméabilités indiqués sont essentiellement rattachés aux grands types d'aquifères qu'il s'agissait de différencier à l'échelle régionale (alluvions, karst, socle, etc.). Ils ne présentent ici que peu d'intérêt pour améliorer la caractérisation de ce paramètre au sein d'un seul type d'aquifère. Les deux premiers facteurs ont été testés dans le projet (cf. § 4.3).

À l'échelle de Midi-Pyrénées, 5 catégories d'unités ont été définies en fonction des 3 mécanismes d'écoulement identifiés et des 2 principaux types d'aquifères considérés. Ainsi, pour les **955 unités de gestion délimitées en Midi-Pyrénées** la répartition des catégories est la suivante (Illustration 16) :

- ruissellement prépondérant pour 616 UG ;
- infiltration prépondérante en aquifère poreux/fissuré pour 62 UG ;
- infiltration prépondérante en aquifère karstique pour 112 UG ;
- coexistence ruissellement et infiltration en aquifère poreux/fissuré pour 80 UG ;
- coexistence ruissellement et infiltration en aquifère karstique pour 85 UG.

Facteurs	Critères	Classes	Notes	Coeff. du critère	Coeff. du facteur
Sol		Sensibilité faible	1	10	10
		Sensibilité moyenne	2		
		Sensibilité forte	3		
		Sensibilité très forte	4		
Zone non-saturée (ZNS)	Epaisseur	> 500 m	0	4	10
		300 à 500 m	1		
		50 à 300 m	2		
		10 à 50 m	3		
		< 10 m	4		
	Perméabilité	Perméabilité négligeable	0	4	
		Perméabilité très faible	1		
		Perméabilité faible	2		
		Perméabilité forte	3		
Ecoulements préférentiels	EP très limités	1	2		
	EP peu importants	2			
	EP importants	3			
Zone Saturée (ZS)	Epaisseur de la lame d'eau	> 5 m	1	2	5
		2 à 5 m	2		
		1 à 2 m	3		
		< 1 m	4		
	Perméabilité	Perméabilité très faible	1	2	
		Perméabilité faible	2		
		Perméabilité forte	3		
		Perméabilité très forte	4		
	Ecoulements préférentiels	EP très limités	1	1	
EP peu importants		2			
EP importants		3			

Illustration 15 - Notes et coefficients attribués à chaque critère des facteurs opérationnels de la vulnérabilité des eaux souterraines en Midi-Pyrénées.

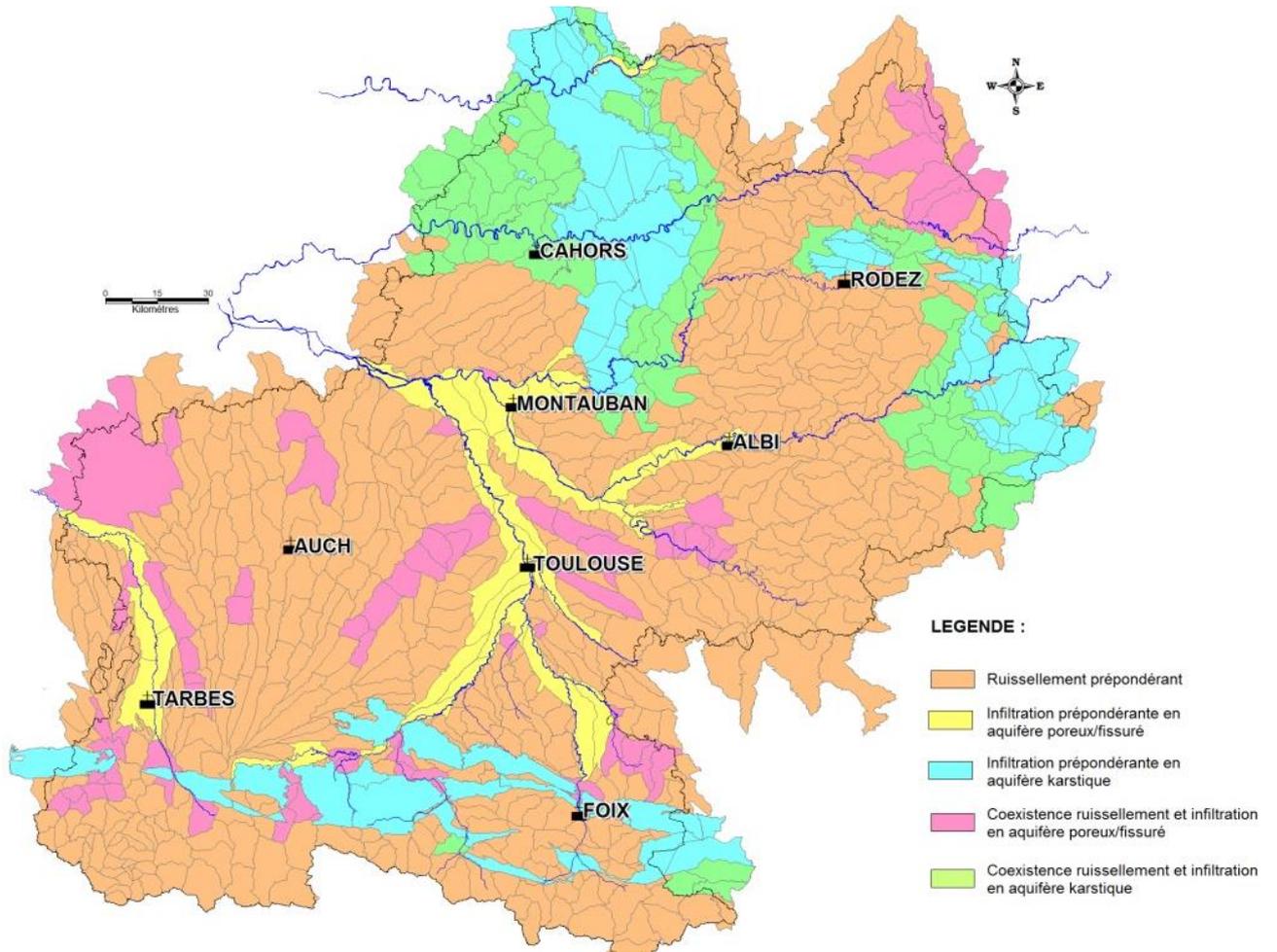


Illustration 16 - Unités de gestion délimitées en Midi-Pyrénées.

4. Évaluation de la sensibilité à la sécheresse des aquifères poreux

La dynamique d'un aquifère libre, en milieu poreux dépend de :

- la perméabilité K et le coefficient d'emmagasinement S de l'aquifère (paramètres hydrodynamiques variant spatialement) ;
- la géométrie de l'aquifère (taille, puissance) ;
- les conditions aux limites (notamment le compartimentage de l'aquifère et les conditions d'interdépendances entre les différents compartiments aquifères).

L'inertie de la nappe témoigne de sa capacité à résister à un déficit d'apport naturel d'eau (sécheresse) et peut être estimée à partir de plusieurs paramètres pouvant être évalués par l'étude des courbes de récession des chroniques piézométriques. Celui qui caractérise le mieux l'inertie de la nappe est le temps de demi-décroissance de l'aquifère. Cette notion peut toutefois être complétée par la prise en compte de la ressource en eau renouvelable et par la connaissance du niveau de base de l'aquifère.

La géométrie du réservoir et les conditions aux limites sont étroitement liées à la connaissance locale de l'aquifère. A l'échelle régionale, et pour un même type d'aquifère, la notion de taille peut être simplifiée par la prise en compte de la superficie. L'évaluation des autres paramètres (K , T , S) dépend de la densité de données disponibles sur l'aquifère considéré qui est généralement très faible. La notion la plus complexe à caractériser à cette échelle est le compartimentage de l'aquifère qui est étroitement lié aux hétérogénéités géologiques locales, et aux conditions de drainage de la nappe par les cours d'eau. Seule une approche globale et moyennée permet d'aborder cet aspect.

4.1. TEMPS DE DEMI-DÉCROISSANCE

4.1.1. Aspects théoriques

Par analogie avec la loi exponentielle de tarissement d'une source, la baisse des niveaux d'une nappe, en l'absence de toute réalimentation, peut être modélisée par une loi de décroissance exponentielle du type :

$$H(t) = H_b + H_0 e^{-\alpha(t-t_0)}$$

Avec :

$H(t)$: la charge hydraulique en un point donné à l'instant t (en m NGF),

H_b : la charge hydraulique correspondant au niveau de base,

H_0 : la charge hydraulique au-dessus du niveau de base à la date t_0 ,

t_0 : la date de début de la baisse des niveaux,

α : la constante dite de tarissement, inverse d'un temps.

La constante α peut être reliée au temps de demi-décroissance $t_{1/2}$. Ce temps est le temps nécessaire pour qu'il y ait diminution de moitié de la charge hydraulique au-dessus du niveau de base, soit :

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\alpha}$$

avec : $\alpha = \frac{\pi^2 T}{4 S L^2}$,

et :

T : transmissivité de l'aquifère,

S : coefficient d'emmagasinement,

L : paramètre rendant compte de la taille de l'aquifère

Le temps de demi-décroissance apparaît comme un critère susceptible de rendre globalement compte de la dynamique de tarissement d'une nappe. Elle intègre à la fois les deux paramètres hydrodynamiques (T et S) et un facteur rendant compte de la taille de l'aquifère (Thiery D., 1985).

Plus ce temps de demi-décroissance est grand, plus la dynamique de tarissement sera lente et plus l'aquifère sera capable de résister à des épisodes de déficit de recharge. Ce paramètre peut être relié aux constantes S, T et à la taille de l'aquifère via l'équation ci-dessus. Aussi, un temps élevé signifie :

- des réserves en eau importantes (aquifère de grande extension et/ou très capacitif) ;
- une transmissivité peu importante.

Pour évaluer ce temps de demi-décroissance, il conviendra d'exploiter les chroniques piézométriques disponibles, en ajustant une loi de décroissance exponentielle aux portions de chroniques présentant une baisse de la charge hydraulique.

4.1.2. Résultats obtenus à l'échelle du piézomètre

Par analogie avec les hydrogrammes des sources, les chroniques piézométriques permettent également de mettre en évidence une période de « crue » et une période de « récession » :

- la courbe de « crue » correspond à la recharge apparente des nappes, conséquence de l'alimentation par les précipitations ;
- la courbe de « récession » correspond à la période d'étiage. Cette période peut parfois être elle-même sub-divisée en deux parties :
 - une courbe de décrue qui correspond à une diminution de la charge hydraulique alors que la période d'alimentation se poursuit,
 - une courbe de tarissement qui correspond à la décharge de la nappe en l'absence d'alimentation.

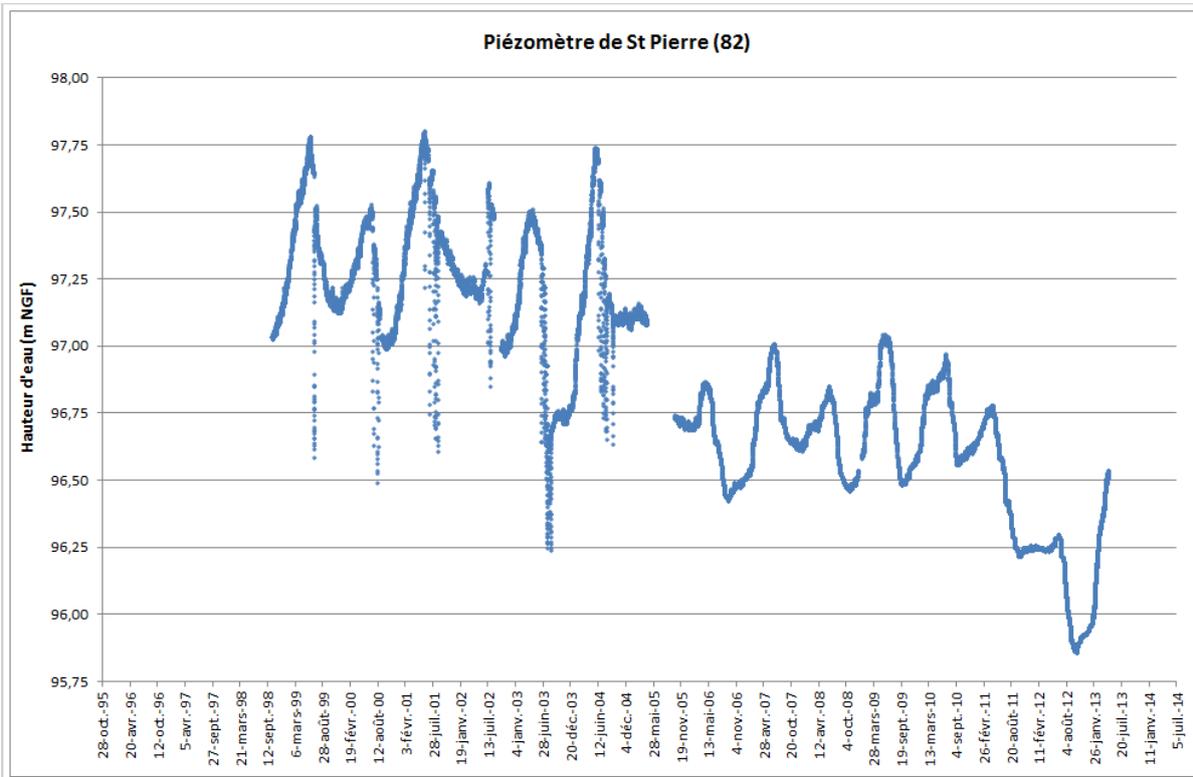
Chacun des 40 piézomètres de la région disposant d'une chronique exploitable (cf. § 3.3.1) a été étudié. Dans un premier temps, la chronique a été représentée, puis les périodes d'étiage ont été individualisées (date de début, date de fin).

Ces périodes d'étiage ont été superposées à une loi de décroissance exponentielle (cf. § 4.1.1.), et un ajustement des paramètres H_b , H_0 et $t_{1/2}$ a été réalisé sous Excel[®] de façon à obtenir le meilleur calage possible entre la chronique piézométrique et la loi de décroissance exponentielle. À titre d'exemple, le travail effectué sur le piézomètre de Saint-Pierre (09307X0146/F) est présenté dans l'illustration 17. Ce travail a été entrepris pour les 40 piézomètres intéressant un aquifère poreux à nappe libre de la région Midi-Pyrénées.

Certaines années, l'occurrence d'épisodes plus ou moins importants de recharge en cours d'étiage peut rendre difficile le calage de la chronique sur une loi de décroissance exponentielle. Dans ce cas, plusieurs calages correspondant aux différents épisodes de recharge ont été entrepris. Les paramètres associés au calage apparaissant comme le plus représentatif vis-à-vis des traitements réalisés sur les autres années ont été retenus.

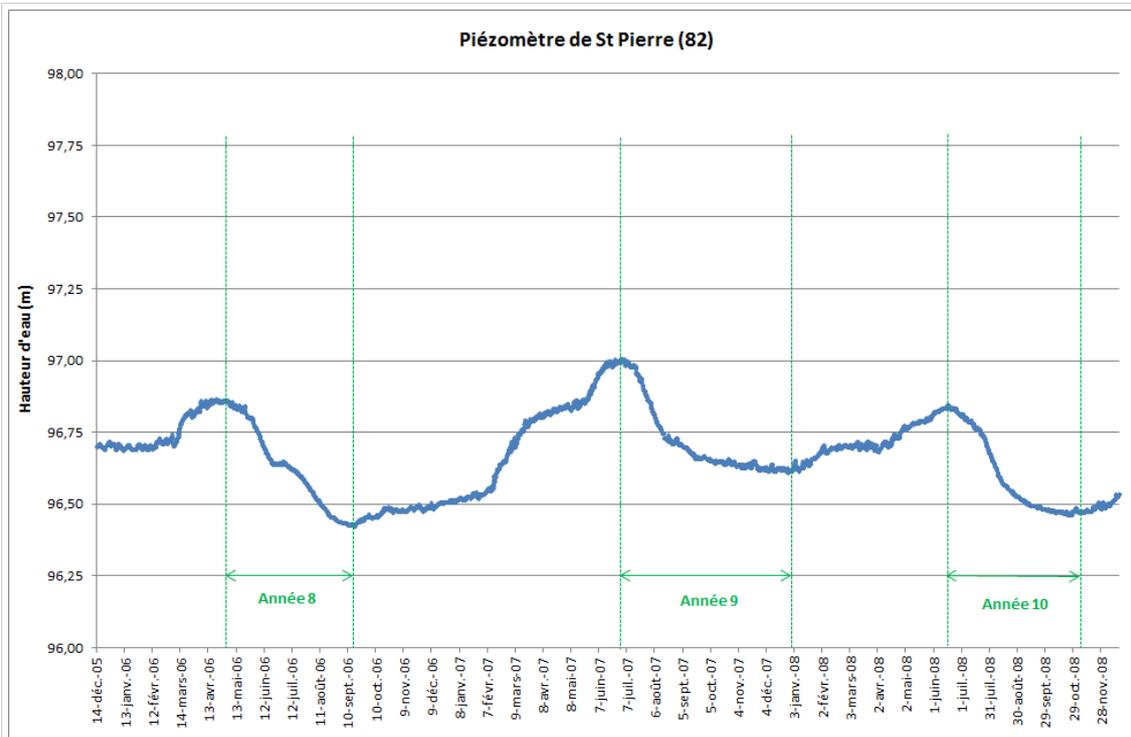
Certaines chroniques piézométriques, ne suivant pas une loi de décroissance exponentielle sur toute leur durée, présentent des difficultés de calage. D'autres ont une faible sensibilité aux paramètres de la loi de décroissance exponentielle. Dans ces cas, le calage jugé le plus « cohérent » a été retenu sur une base de dire d'expert, tout en gardant une traçabilité des difficultés rencontrées pour estimer si besoin, et par la suite, le niveau de confiance du résultat obtenu.

Étape 1 - Graphique de la chronique piézométrique - 09307X0146/F.



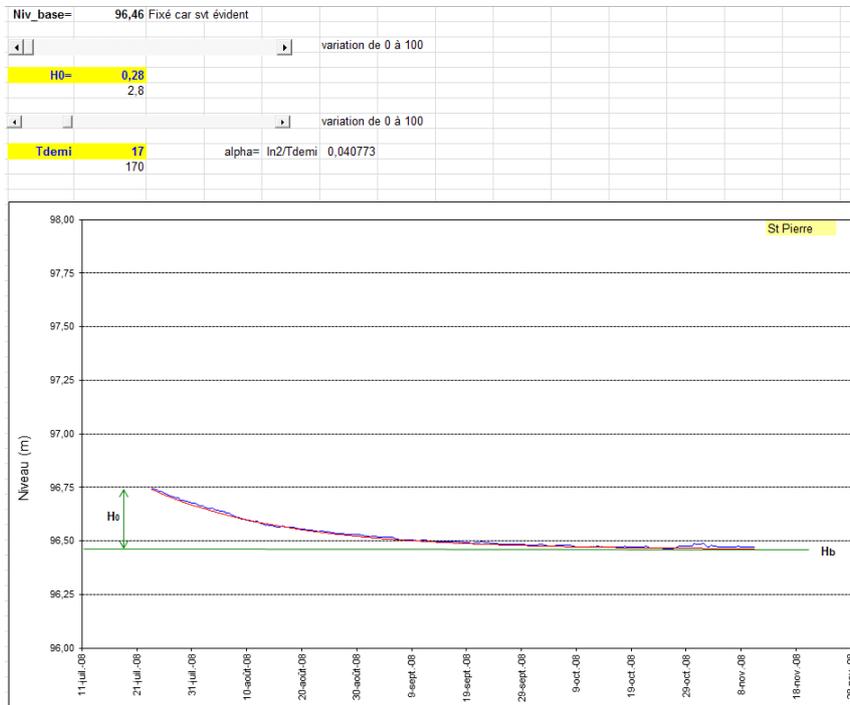
Étape 2 - Identification de la date de début et de fin d'étiage pour chaque année disponible.

Ici, à titre d'exemple, sont représentées les années 2006 à 2008, correspondant aux 8^{ème} à 10^{ème} années de suivi de ce piézomètre



Étape 3 - Calage des paramètres H_b , H_0 et $t_{1/2}$ de la loi de décroissance exponentielle sur chaque période d'étiage de la chronique piézométrique.

Ici, à titre d'exemple, est représentée l'année 2008.



Étape 4 - Synthèse des données de calage dans un tableau résumé.

Année	Date de début	Date de fin	Durée de l'étiage (jours)	H_b	H_0	H_b+H_0	$H_0/(H_b+H_0)$	Temps de demi-décroissance
1998								
1999								
2000								
2001								
2002								
2003								
2004								
2005								
2006								
2007								
2008								
2009								
2010								
2011								
2012								
Moyenne			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Ecart-type			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Minimum			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00
Maximum			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00
Année sèche								
Année moyenne								
Année humide								

Étape 5 - Identification des années sèche, humide et moyenne sur la durée de la chronique, en utilisant les données météorologiques de la station la plus représentative (cf. § 0).

Un code couleur est utilisé sur le tableau créé en Étape 4 afin d'identifier ces années.

Étape 6 - Graphique de l'évolution temporelle des paramètres de calage H_b , $H_b + H_0$, et t_0 en fonction des pluies efficaces pendant la période de recharge et de la durée de l'étiage.

Ces graphiques ont été réalisés afin de visualiser les évolutions temporelles des paramètres de calage.

Illustration 17 - Étapes relatives au calage d'une chronique sur une loi de décroissance exponentielle et à l'exploitation des résultats.

4.1.3. À l'échelle d'une entité BD-LISA de niveau 3

Après avoir calé les différents étiages de chaque chronique piézométrique sur une loi de décroissance exponentielle, les piézomètres ont été regroupés par leur appartenance à une entité BD-LISA de niveau 3. Bien qu'inadapté du point de vue de la compréhension des résultats (cf. § 3.1), la synthèse des données obtenues a été maintenue à l'échelle des entités alluviales complémentaires dans l'optique d'une traçabilité facilitée par l'utilisation d'un référentiel dans l'attente de son actualisation. Les résultats ont également été rattachés au référentiel propre au projet ERESSAR pour les besoins de l'étude.

Pour chaque entité, les chroniques piézométriques ont été répertoriées sur un même graphique afin d'identifier les similarités, ou, à contrario, les différences dans leur évolution. Les piézomètres présentant des dates de début et de fin d'étiage comparables ont été regroupés.

Ensuite, les piézomètres d'une même entité BD-LISA ont été cartographiés sur le fond de carte géologique harmonisée afin d'identifier de potentielles différences de contexte géologique. Une attention particulière a été portée sur l'appartenance des piézomètres d'une même entité à des terrasses alluviales différentes ou à des formations géologiques différentes (cf. mise en place d'un référentiel propre au programme ERESSAR, § 3.2).

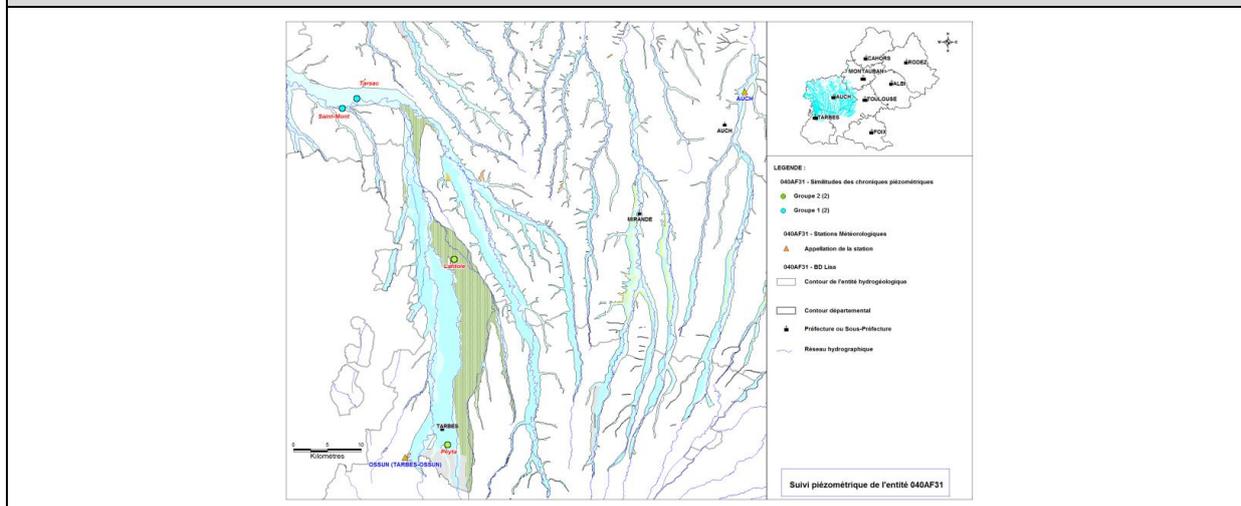
Un résumé du calage de chaque chronique sur la loi exponentielle décroissance a ensuite été réalisé pour comparer notamment les temps de demi-décroissance, leur intervalle de variation, leur valeur moyenne au sein d'un même piézomètre et au sein de l'entité.

À titre d'exemple, le travail effectué est représenté dans l'illustration 18 pour l'entité 040AF31. Ce travail a été réalisé sur les 14 entités BD-LISA de niveau 3 disposant d'au moins un point de suivi piézométrique en nappe libre et en milieu assimilable à un milieu poreux (Illustration 8). L'ensemble des fiches de synthèse réalisées sont disponibles en annexe 1.

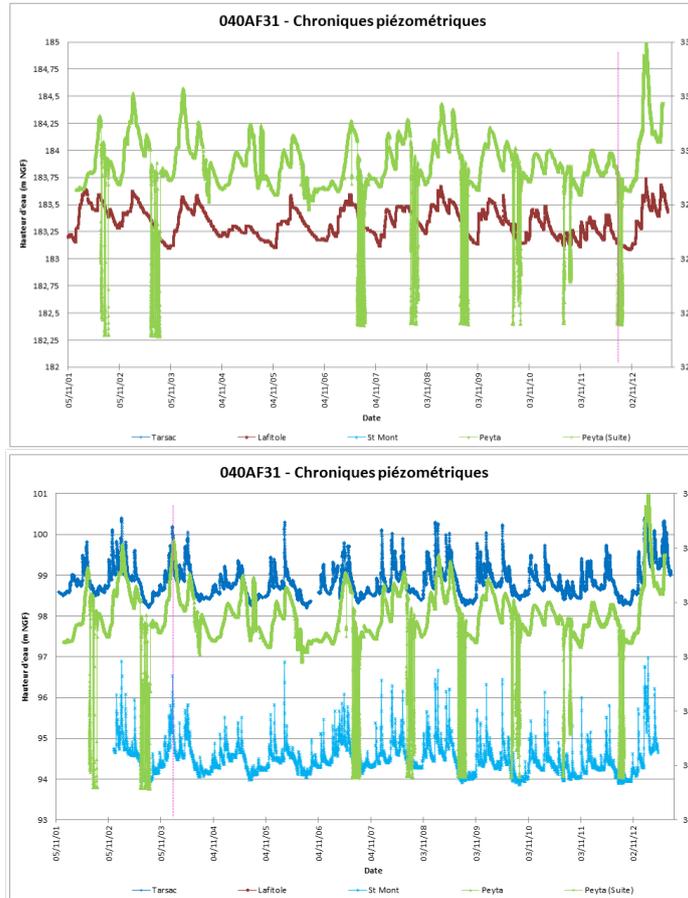
Étape 1 - Regroupement des piézomètres d'une même entité et résumé de leur localisation, suivi et paramètres de calage sur la loi de décroissance exponentielle.

Données piézométriques										Date		Hb (m)		H0 (m)		t1/2 (j)		Géologie	
Code BSS	Commune	Dénomination	X (Lambert IIe)	Y (Lambert IIe)	Z (masl)	Profondeur	Code MESO	Code BD-RHF v1	Réseau RCS	MO BRGM	Début	Fin	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne		Ecart-type
09793X0003/F	SAINT-MONT	Saint-Mont	400435	1653254	96	5	5028	129		Non	18-déc.-02	24-avr.-13	93,93	0,15	1,05	0,22	19,10	6,31	Alluvions récentes et actuel indifférenciées (F2) de l'Ad.
09793X0011/F	TARSAC	Tarsac	402570	1854683	101	6	5028	348	Oui	Oui	19-déc.-96	22-juil.-13	98,29	0,12	1,13	0,18	15,48	5,22	Alluvions récentes et actuel indifférenciées (F2) de l'Ad.
10065X0042/F	LAFFTOLE	Lafftole	416949	1830777	186	??	5028	129	Oui	Oui	9-oct.-73	22-juil.-13	183,16	0,21	0,60	0,21	38,05	25,51	Alluvions des vallées de l'Adour et de l'Echez (Fy1) Galets, graviers, sables
10315X0112/F	LALOUBÈRE	Peyla	416000	1803125	335	9,08	5028	129	Oui	Oui	1-janv.-02	10-juin-13	329,18	0,11	1,27	0,31	55,40	10,31	Alluvions de l'Adour (Fy1) de plaine de Tarbes : galets, graviers et sables.

Étape 2 - Localisation des piézomètres sur l'entité BD-LISA et sur la carte géologique harmonisée.



Étape 3 - Groupement des chroniques piézométriques et exploitation afin d'identifier d'éventuelles similitudes, ou, au contraire, des différences.



Étape 4 - Résumé des paramètres de calage sur une loi exponentielle décroissante.

Ici, le paramètre « temps de demi-décroissance » est présenté. Le même tableau est disponible pour les paramètres H_b et H_0 . À noter que le tableau a ici été volontairement tronqué (de l'année 1975 à 1997) pour une meilleure lisibilité. Le tableau excel présente une colonne pour chaque année de chronique piézométrique disponible.

040AF31 Formations alluviales complémentaires		(Adour)																										
Nombre total de points de suivi :				4																								
Nombre de points de suivi sous MIO BRGM :				3																								
Données piézométriques																												
Code BSS	Commune	Dénomination	X (Lambert IIe)	Y (Lambert IIe)	Z (mnl)	Géologie	t1/2	t1/2	Minimum	Maximum	Moyenne																	
09793X003F	SAINT-MONT	Saint-Mont	400435	1853254	96	Alluvions récentes et actuelles indifférenciées (Fz) de l'Adour	Fz																					
09793X0011F	TARSAC	Tarsac	402570	1854883	101	Alluvions récentes et actuelles indifférenciées (Fz) de l'Adour	Fz	10	8	10	11	16	22	20	20	19	17	25	21	14	10	8,00	25,00	15,45				
10065X0042F	LAFFOLE	Laffole	416849	1830777	188	Alluvions des vallées de l'Adour et de l'Echez (Fy1) : Galets, graviers, sables	Fy1	19	30	75	100	110	71	90	80	80	80	53	45	43	43	15	31	23	15,00	110,00	57,00	
10315X0112F	LALOUBERE	Peyta	416900	1803125	335	Alluvions de l'Adour (Fy1) de la plaine de Tarbes : galets, graviers et sables	Fy1							55	55	30	60	65	58	47	100	60	52	30,00	100,00	58,20		

Stations météo : Tarbes, Auch
 Année sèche
 Année moyenne
 Année humide

Étape 5 - Identification des années sèches, humides et moyennes à l'échelle de l'entité, sur la période couverte par les chroniques piézométriques.

Un code couleur est utilisé sur le tableau créé en Étape 4 afin d'identifier ces années.

Illustration 18 - Étapes relatives à l'agglomération des données de calage d'une chronique piézométrique à l'échelle d'une entité BD-LISA.

4.1.4. À l'échelle de la région Midi-Pyrénées

Résultats obtenus pour les entités alluviales

Comme mentionné précédemment, le principal problème rencontré dans la représentation des résultats obtenus pour les piézomètres intéressant les formations alluviales concerne le découpage des entités alluviales complémentaires dans la BD LISA V0. En effet, pour rappel (cf. § 3.1.2.) leur délimitation est établie à partir des polygones des formations alluvionnaires extraits des cartes géologiques à 1/50 000 découpés en fonction de l'extension de l'entité régionale (NV2) d'ordre relatif 1 sous-jacente. Cette représentation ne permet pas d'effectuer des comparaisons avec les différences identifiées dans les résultats de temps de demi-décroissance calculé pour chaque piézomètre. La logique observée est en effet révélatrice de contrastes existants entre les différentes terrasses alluviales.

Le découpage spécifique réalisé dans le projet ERESSAR pour représenter ces formations est donc plus adapté et sera utilisé pour la représentation cartographique finale et présentée au chapitre 4.6.3. Le tableau de l'illustration 19 indique la concordance entre les entités alluviales découpées dans le cadre du projet ERESSAR et les entités alluviales complémentaires de la BD LISA V0.

Code_Projet	Appellation	Form_Geol	Code_BDLisa_V0
GAM1	Garonne Amont	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	040AG67 / 040AG99
GAM2	Garonne Amont	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	040AG67 / 040AG99
GAM3	Garonne Amont	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	040AG67 / 040AG75
NE1	Neste	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	040AG67 / 040AG83
NE2	Neste	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	040AG67
NE3	Neste	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	040AG67 / 040AG83
GM1	Garonne Mediane	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	040AF35 / 040AG99
GM2	Garonne Mediane	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	040AF35 / 040AG99
GM3	Garonne Mediane	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	306AA01
AHV1	Ariege / Hers Vif	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	040AF35 / 040AF39
AHV2	Ariege / Hers Vif	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	040AF35
GHM1	Garonne / Hers Mort	Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses inférieures attribuées au Würm (Fy)	040AF35
TA1	Tarn	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	040AF35 / 040AF39 / 040AF45
TA2	Tarn	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	040AF35 / 040AF39 / 040AF45
TA3	Tarn	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	306AA01
AGD1	Agout / Dadou	Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses inférieures attribuées au Würm (Fy)	040AF35 / 040AF39 / 040AF43
CTG1	Complexe Tarn / Garonne	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	040AF35
CTG2	Complexe Tarn / Garonne	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	040AF35 / 040AF39
TAV1	Tarn / Aveyron	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	040AF35
TAV2	Tarn / Aveyron	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	040AF35
GAV1	Garonne Aval	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	040AF35 / 040AF39
GAV2	Garonne Aval	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	040AF35 / 040AF39
GAV3	Garonne Aval	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	306AA01
AD1	Adour	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	040AF31
AD2	Adour	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	040AF31
AD3	Adour	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	040AF31
AD4	Adour	Fw : Alluvions fluviales des hautes terrasses attribuées au Mindel	306AA01
ARR1	Arros	Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses inférieures attribuées au Würm (Fy) ET des terrasses moyennes attribuées au Riss	040AF31
LO1	Lot	Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses moyennes attribuées au Riss	040AG03
DO1	Dordogne	Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses inférieures attribuées au Würm (Fy) ET des terrasses moyennes attribuées au Riss	040AF93

Illustration 19 - Tableau de correspondance entre les entités alluviales découpées dans le cadre du projet ERESSAR et les entités alluviales complémentaires de la BD LISA V0.

Le temps de demi-décroissance évalué annuellement à l'échelle du piézomètre et synthétisé à l'échelle de l'entité BD-LISA (cf. § 4.1.2 et 4.1.3) est donc repris dans ce paragraphe pour être exploité à l'échelle de Midi-Pyrénées. L'objectif est ici d'identifier de potentielles différences de comportement intra ou inter-entités de façon à hiérarchiser les entités par rapport à l'intervalle de variation de leur temps de demi-décroissance.

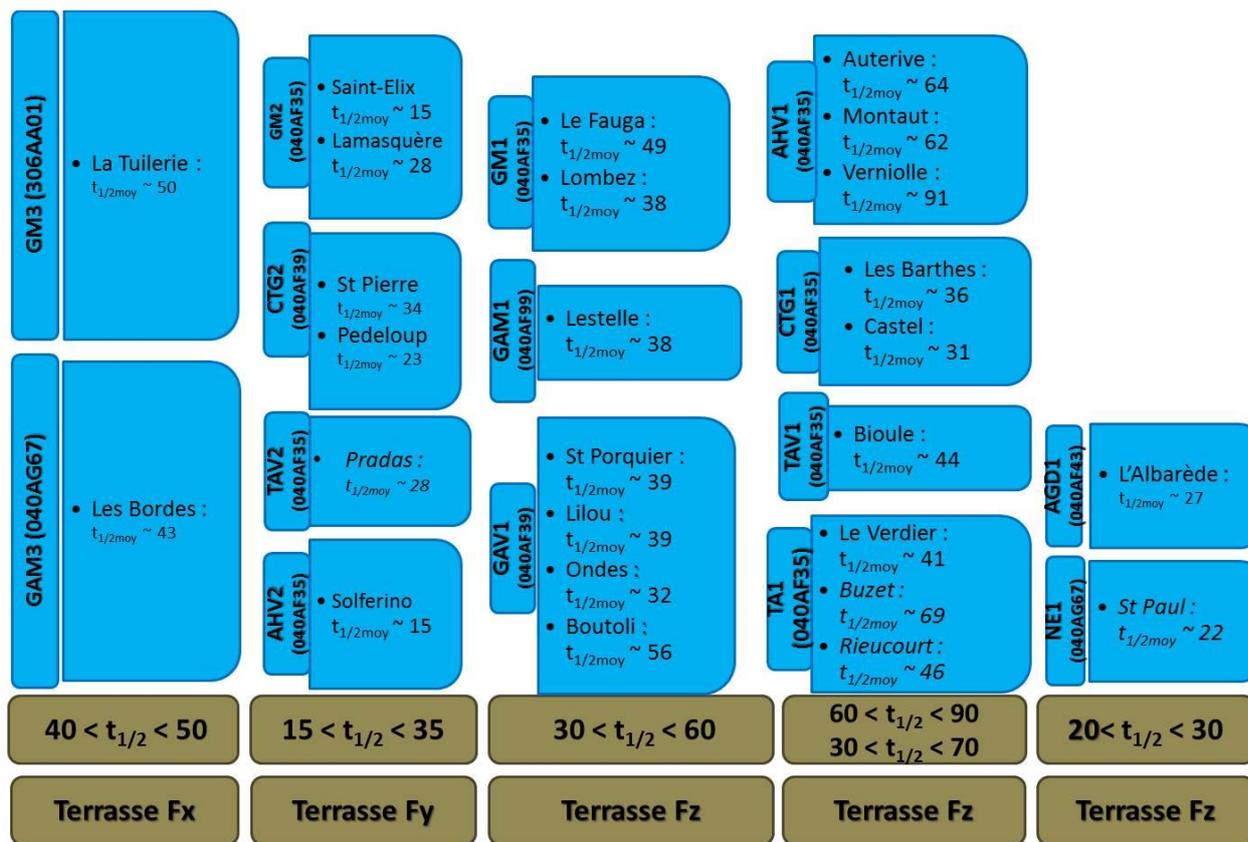
Le tableau de l'illustration 20 récapitule l'ensemble des temps de demi-décroissance moyens calculés pour chacun des piézomètres analysés en fonction des entités alluviales auxquelles ils appartiennent.

Code BSS	Denomination	T _{demi} Moy (jours)	Appellation	Code Projet	Notation	Nbre Pts Suivi	T _{demi} - Min (jours)	T _{demi} - Max (jours)	T _{demi} - Moy (jours)							
10553X0026/F	Lestelle	38	Garonne Amont	GAM1	Fz	1	38	38	38							
10548X0102/F	Les Bordes	64		GAM2	Fy	1	64	64	64							
10548X0101/F	Les Bordes	43		GAM3	Fx	1	43	43	43							
10097X0224/F	Le Fauga	49	Garonne Mediane	GM1	Fz	2	38	49	43.5							
09838D0727/F	Avenue de Lombez	38		GM2	Fy	2	15	28	21.5							
10345X0199/F	Saint-Elix	15			GM3	Fx	1	50	50	50						
10092X0166/F	Lamasquere	28				CTG1	Fz	2	31	36	33.5					
09833C0249/F	La Tuilerie	50					CTG2	Fy	2	23	34	28.5				
09301X0028/F	Les Barthes	36	Complexe Tarn / Garonne	GAV1	Fz	4		32	56	41.5						
09303X0185/F	Castel	31														
09302X0139/F	Pedeloup	23														
09307X0146/F	Saint-Pierre	34														
09567X0219/F	Ondes	32														
09562X0170/F	Lilou	39														
09306X0286/F	Boutoli	56														
09306X0091/F	Saint-Porquier	39														
09294X0256/F	Pomies	108														
Aucun point de suivi							Garonne Aval				GAV2	Fy	1	108	108	108
10546X0026/F	Saint-Paul	22	GAV3	Fx	0	/		/	/							
Aucun point de suivi			Neste	NE1	Fz	1		22	22	22						
Aucun point de suivi				NE2	Fy	0		/	/	/						
Aucun point de suivi				NE3	Fx	0	/	/	/							
10351X0024/F	Auterive	64	Ariege / Hers Vif	AHV1	Fz	3	62	91	72.33							
10357X0021/F	Montaut	62		AHV2	Fy	1	15	15	15							
10577X0159/F	Verniolle	91			Garonne / Hers Mort	GHM1	Fz / Fy	0	/	/	/					
10357X0213/F	Solferino	15				Agout / Dadou	AGD1	Fz / Fy	1	27	27	27				
09857X0102/F	L'Albarede	27	Tarn	TA1	Fz		3	41	69	52						
09577X0047/F	Buzet	69														
09574X0030/F	Le Verdier	41														
09328X0126/F	Rieucourt	46														
Aucun point de suivi						Tarn / Aveyron					TA2	Fy	0	/	/	/
Aucun point de suivi			TA3	Fx	0		/	/	/							
09312X0063/F	Bioule	44	TAV1	Fz	1		44	44	44							
09311X0093/F	Pradas	28		TAV2	Fy	1	28	28	28							
09793X0011/F	Tarsac	15	Adour	AD1	Fz	2	15	17	16							
09793X0003/F	Saint-Mont	17														
10315X0112/F	Peyta	58														
10065X0042/F	Lafitole	57														
Aucun point de suivi										Adour	AD2	Fy	2	57	58	57.5
Aucun point de suivi											AD3	Fx	0	/	/	/
Aucun point de suivi			Adour	AD4	Fw	0	/	/	/							
Aucun point de suivi				Arros	ARR1	Fz / Fy / Fx	0	/	/	/						
Aucun point de suivi			Lot	LO1	Fz / Fy / Fx	0	/	/	/							
Aucun point de suivi			Dordogne	DO1	Fz / Fy / Fx	0	/	/	/							

Illustration 20 - Tableau de synthèse des temps de demi-décroissance moyens calculés pour chacun des 32 piézomètres. Statistiques associées calculées en fonction des entités alluviales concernées.

• Cas du système Garonne et affluents principaux

En fonction des différentes terrasses alluviales présentes dans le système Garonne et ses principaux affluents, la réponse à l'étiage est sensiblement différente. Cette différence est représentée sur l'illustration 21 qui regroupe les piézomètres en fonction de leur terrasse d'appartenance et de l'entité alluviale dans laquelle ils se situent. Apparaissent également sur cette figure les temps de demi-décroissance moyens évalués à partir de l'ensemble des chroniques piézométriques disponibles.



Note : Pomiès (040AF35) n'a pas été placé sur ce schéma, son comportement n'étant pas représentatif de la terrasse sur laquelle il est situé

Illustration 21 - Temps de demi-décroissance évalués sur les terrasses alluviales du système Garonne.

Les temps de demi-décroissance moyens évalués sur les terrasses du système Garonne et de ses affluents varient entre 15 et 90 jours environ. Cependant, des différences relativement importantes apparaissent entre les terrasses et les vallées alluviales concernées.

Les différents niveaux d'alluvions des basses plaines à l'actuel (généralement notés Fz sur les cartes géologiques) de la vallée de la Garonne (de Lestelle à Saint-Nicolas-de-la-Grave) se caractérisent par des temps de demi-décroissance compris entre 38 et 56 jours avec globalement un temps estimé à 38 jours pour la partie amont du système (piézomètre de Lestelle), entre 40 et 50 jours environ pour la partie médiane et entre 40 et 60 jours en aval de l'entité (56 jours estimé au piézomètre Boutoli). Entre ces deux dernières zones, deux ouvrages implantés à proximité de la Garonne présentent des temps plus faibles, compris entre 30 et 40 jours, probablement en relation avec la nature plus grossière des alluvions à ce niveau, voire de l'effet de drainage de la nappe par la Garonne.

Les terrasses plus anciennes (Fy et Fx) se comportent différemment. Alors que les terrasses inférieures (notées Fy) présentent des temps de demi-décroissance relativement faibles (compris entre 15 et 35 jours), les terrasses moyennes, plus anciennes, (notées Fx) semblent plus résistante à la sécheresse. Cette dernière est souvent constituée de matériaux altérés, nettement argileux, limitant leur capacité conductrice, qui leur confèrent une inertie plus grande. À l'inverse, les terrasses Fy contribuent à l'alimentation des terrasses sous-jacentes plus récentes en particulier en période d'étiage et ne sont que faiblement alimentées par les terrasses Fx, peu conductrices. Elles auront donc tendance à se vidanger plus rapidement. Il est également envisageable que, du moins localement au niveau des piézomètres traités, l'aquifère soit plus compartimenté que dans les terrasses Fx.

Pour les autres vallées alluviales, le même type de constat en fonction des terrasses peut être établi sachant que des différences sont toutefois observées entre elles. Ainsi, les alluvions Fz de la plaine de l'Ariège présentent les plus fortes valeurs estimées, comprises entre 60 et 90 jours (supérieures à celles de la vallée de la Garonne). Inversement, des plaines de plus faibles extensions latérales (type Agout ou Neste) se caractérisent par des temps de demi-décroissance plus faibles pour ces mêmes alluvions récentes, compris entre 20 et 30 jours.

- **Cas du système Adour**

L'illustration 22 représente la répartition des temps de demi-décroissance moyens évalués à partir des chroniques acquises sur les piézomètres implantés au sein des terrasses alluviales de l'Adour (Code projet AD1, AD2 / Code BD LISA V0 : 040AF31).

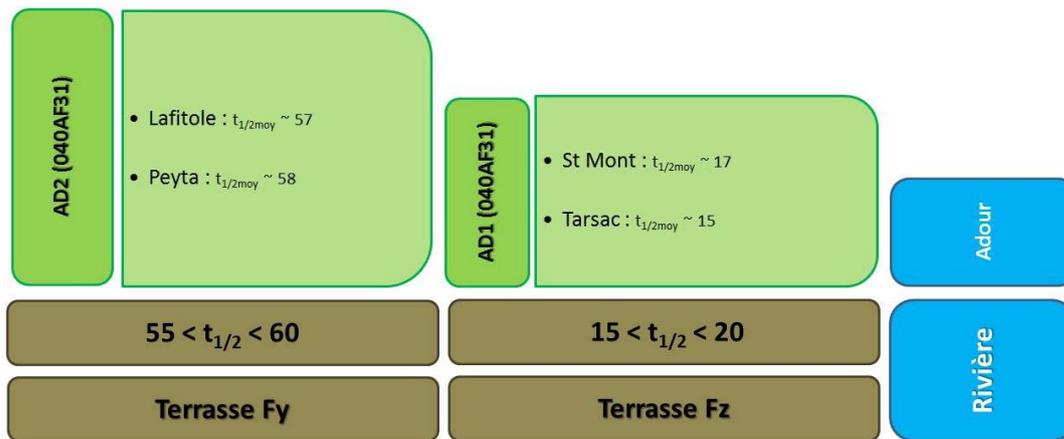


Illustration 22 - Temps de demi-décroissance moyens évalués sur les terrasses alluviales de l'Adour.

Les temps de demi-décroissance moyens varient de 15 à 58 jours, avec une différence marquée entre les valeurs obtenues pour les alluvions récents et actuels (Fz) et les alluvions des terrasses inférieures (Fy). Ces dernières présentent des temps de demi-décroissance relativement élevés par rapport à leur contexte alluvial (55 à 60 jours), alors que les alluvions les plus récentes répondent très rapidement à l'étiage. Le fonctionnement hydrodynamique de l'Adour est complexe et différent de celui de la Garonne. En particulier, l'emboîtement des terrasses et la présence de nombreux paléochenaux, plus ou moins bien connectés entre eux, et avec des perméabilités particulièrement élevées, sont des éléments susceptibles d'expliquer ces différences observées. Les fréquentes relations d'échanges observées localement entre la nappe et l'Adour peuvent également constituer une explication. Toutefois, en l'état actuel des connaissances de cet aquifère alluvial, il est difficile d'émettre des hypothèses préférentielles. L'actualisation du modèle hydrodynamique permettrait de mieux comprendre le rôle des terrasses et leurs interactions avec l'Adour et ses affluents.

Résultats obtenus pour les autres aquifères libres

Outre les aquifères alluviaux, 7 autres entités BD LISA (NV3) ayant un comportement de nappe libre sont actuellement surveillées par 8 points de suivi. Chacun d'entre eux a donc fait l'objet d'une modélisation à l'aide de la loi de Maillet afin d'estimer leur temps de demi-décroissance. Les résultats obtenus sont recensés dans le tableau de l'illustration 23.

Les temps de demi-décroissance moyens évalués sur ces 7 entités sont compris entre 10 et 66 jours, soit des ordres de grandeurs similaires à ceux évalués pour les formations alluviales. Ces évaluations sont cependant à prendre avec précaution, ces entités étant la plupart du temps surveillées par un seul point.

Outre la comparaison des ordres de grandeur avec les entités alluviales étudiées, il ressort de ces résultats que des variations importantes de temps de demi-décroissance existent en fonction des aquifères considérés.

Ainsi, les entités ayant les temps de demi-décroissance les plus faibles (entre 10 et 20 jours) correspondent aux calcaires du Kimméridgien du nord du Bassin aquitain (356AB01) et aux faluns, grès et sables du Langhien-Serravalien du Bassin aquitain (316AA01). Ainsi, ces aquifères se caractérisent par des réponses relativement rapides à l'étiage.

Inversement, les entités aux temps de demi-décroissance les plus élevés (entre 55 et 66 jours) sont au nombre de 3. Il s'agit des molasses Oligo-Miocènes, des argiles à graviers Oligo-Eocènes et des calcaires, grès et sables du Turonien du bassin aquitain correspondant probablement dans les 3 cas à des ouvrages captant une nappe semi-captive donc faiblement réactive à l'absence de recharge saisonnière.

Dans le cas des formations molassiques, il est intéressant de constater une différence relativement importante dans les 2 cas étudiés (66 jours contre 30 jours pour l'entité 326AA05) susceptible de retranscrire le compartimentage de ce type d'unité semi-perméable.

Entité	Dénomination	Nbre Pts Suivi	Code BSS	T _{1/2} Moy
316AA01	Faluns, grès et sables du Langhien-Serravalien du Bassin aquitain	1	09526X0212/F	~ 24
322AA03	Molasses Oligo-Miocènes du Bassin aquitain	1	09845C1426/F	~ 66
326AA05	Molasses Oligo-Éocène du Bassin aquitain	1	09307X0136/F	~ 30
332AA01	Brèches et conglomérats de la Grèsigne, argiles à graviers de l'Albigeois et du Carmausin, et graviers d'Issel (Oligo-Eocène)	1	09866X0074/F	~ 56
348AA03	Calcaires, grès et sables du Turonien du nord du Bassin aquitain	1	08323X0205/F	~ 55
356AB01	Calcaires du Kimméridgien du nord du Bassin aquitain	2	08565X0007/F 08811X0055/F	~ 10 ~ 23
362AA03	Calcaires, dolomies et anhydrite de l'Hettangien-Sinémurien du Bassin aquitain	1	08341X0031/F	~ 36

Illustration 23 - Temps de demi-décroissance moyens des entités libres (hors entités alluviales).

4.2. ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU RENOUVELABLE ET LEUR FLUCTUATION

En reprenant la loi de décroissance exponentielle définie dans le paragraphe 4.1.1. :

$$H(t) = H_b + H_0 e^{-\alpha(t-t_0)}$$

La présence d'un terme indépendant du temps (H_b) est constatée, il retranscrit une notion de réserve pérenne et il est associé à un terme dépendant du temps ($H_0 e^{-\alpha.t}$), représentant une notion de ressource en eau renouvelable. Cette ressource en eau dépend notamment de la recharge et des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère.

4.2.1. Évaluation des ressources en eau renouvelable

Ce travail a été réalisé en utilisant la loi de décroissance exponentielle. Le paramètre H_0 définit en effet l'épaisseur de la nappe qui fluctue saisonnièrement, en fonction des phénomènes de recharge et d'étiage. Ces fluctuations sont représentées sur l'illustration 24.

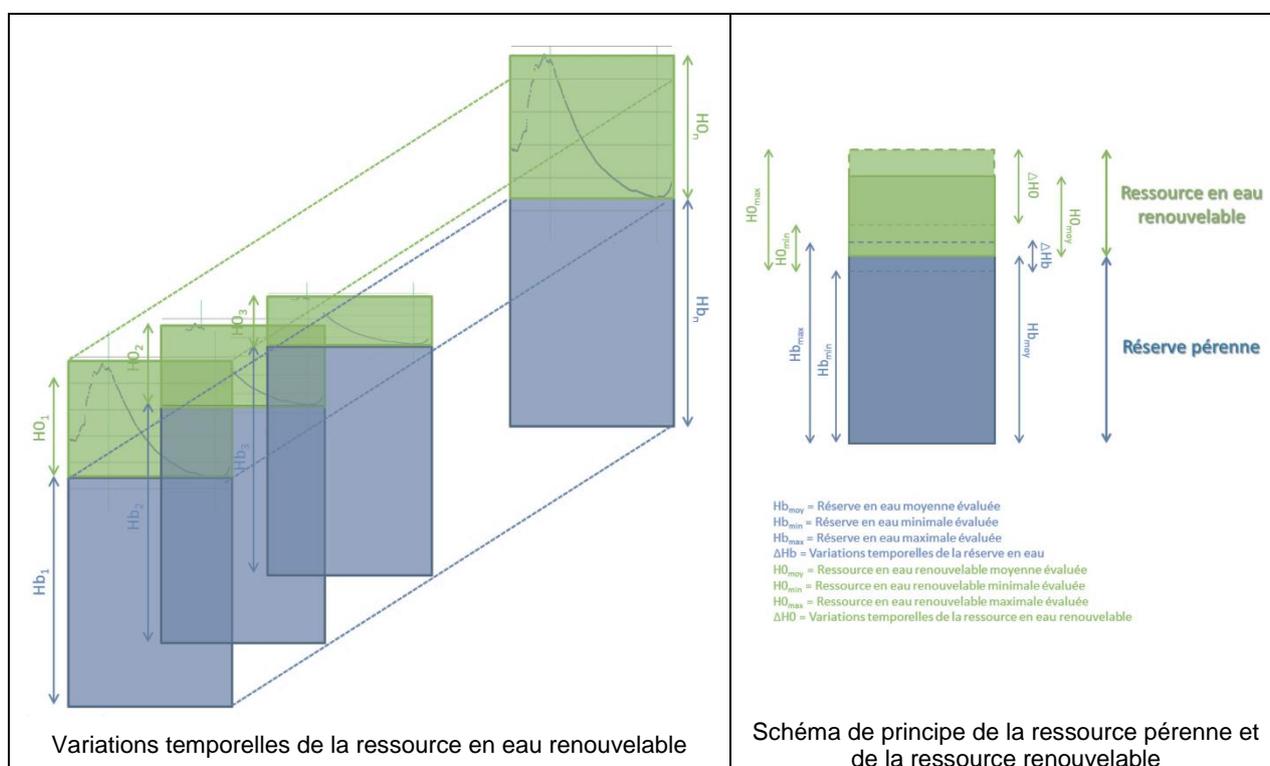


Illustration 24 - Ressource en eau renouvelable et réserve en eau pérenne.

Le volume associé à la ressource en eau renouvelable a été estimé annuellement au voisinage de chaque piézomètre disposant d'une chronique piézométrique exploitable à partir de :

- l'évaluation du paramètre H_0 pour l'ensemble des chroniques piézométriques, année par année ;
- la prise en compte de la porosité efficace moyenne de l'aquifère estimée à partir des résultats des différentes modélisations hydrodynamiques réalisées (alluvions de la Garonne, de l'Ariège, et de l'Adour). Pour les aquifères n'ayant pas fait l'objet d'une modélisation, ce paramètre a été collecté dans la bibliographie existante et disponible, ou, à défaut, a été évaluée en fonction du type de terrain rencontré au droit du piézomètre. Les plus fortes porosités efficaces sont rencontrées dans la basse plaine de l'Ariège (30 %), les plus faibles au niveau des terrasses moyennes de la Garonne (0,5 %).

La ressource en eau renouvelable d'un aquifère est un indicateur de la dynamique et de l'inertie de la nappe. En règle générale, plus elle sera importante plus l'aquifère aura la capacité à résister à des événements extrêmes.

4.2.2. Capacité régulatrice de l'aquifère

La ressource en eau renouvelable n'est cependant pas représentative de la capacité de la réserve de l'aquifère à résister à un déficit d'apport d'eau naturel. Ce second critère a donc été recherché.

La capacité régulatrice intrinsèque de l'aquifère constituerait un excellent critère vis-à-vis de la sensibilité à la sécheresse. Il est défini par la hauteur d'eau correspondant à la « réserve historique » (amplitude maximale des fluctuations de la nappe relevée sur une période donnée) rapporté à la hauteur d'eau correspondant à la réserve totale moyenne de l'aquifère. Il caractérise le pouvoir régulateur de l'aquifère. Autrement dit, plus la valeur de ce critère est faible (faible amplitude de fluctuation de la réserve historique et importante réserve totale) plus le pouvoir régulateur est important, et plus la résistance à la sécheresse de l'aquifère sera forte.

Cependant, pour le cas des aquifères alluviaux, les calages à partir de la loi de Maillet ont nécessité d'intégrer une variation de la réserve pérenne (ΔH_b , Illustration 24). En effet, dans ce type d'aquifère, le niveau de base (exutoire) est le plus souvent variable car dépendant des conditions de drainage par les cours d'eau, et donc de leur niveau d'eau. Par ailleurs, la base de l'aquifère permettant de quantifier localement la réserve pérenne n'est généralement pas connue. Dans ces conditions il est proposé de s'appuyer sur un paramètre caractérisant partiellement cette capacité régulatrice de l'aquifère en considérant les amplitudes de fluctuations par rapport au niveau de base minimum historique. En s'appuyant sur le graphe explicatif de l'illustration 24, ce terme est défini par la relation suivante :

Capacité Régulatrice de l'Aquifère (rapporté au niveau de base minimum) =
$$\frac{(H_b + H_0)_{\min} - H_{b\min}}{(H_b + H_0)_{\max} - H_{b\min}}$$
 dont tous les termes ont été définis précédemment.

Il est compris entre 0 et 1. Au plus le rapport se rapproche de 1, au plus l'aquifère tend à être peu sensible aux apports de la recharge. Il sera donc plus résistant à la sécheresse. À l'inverse, au plus ce rapport tend vers 0, au plus l'aquifère sera soumis à l'influence des apports par les précipitations.

4.3. SUPERFICIE DE L'ENTITÉ AQUIFÈRE

La taille d'une entité hydrogéologique contribue à déterminer sa plus ou moins grande inertie, c'est-à-dire sa réactivité globale aux propagations d'influence. Ainsi, plus l'entité est étendue, plus l'inertie de la nappe est élevée, car les flux souterrains provenant des zones lointaines, cumulés avec des flux d'origine proche, contribuent à la régulation des écoulements souterrains. (Collin J.J. *et al.*, 1994).

Le terme de superficie a été préférée à celui de taille, afin de distinguer superficie et profondeur (ou épaisseur), la taille se référant à ces deux notions.

Ainsi, il est admis que plus l'entité est étendue plus sa capacité à résister à un manque d'alimentation prolongé sera élevée.

La superficie des 30 entités alluviales individualisées dans le projet a été calculée par traitement SIG. Une cartographie par classe de taille est présentée en Illustration 25. Les valeurs sont reportées dans le tableau de l'illustration 26. Ce critère sera pris en compte dans le calcul des indicateurs de résistance à la sécheresse abordé dans le chapitre 6 en considérant que la résistance est d'autant plus grande que l'aquifère est étendu.

Les plus petites entités sont représentées par les terrasses inférieures et moyennes de la Neste (environ 3 km² et 8,5 km²) tandis que les trois plus importantes correspondent aux terrasses inférieures et moyennes de l'entité Garonne Médiane (348 et 307 km² de superficie) et aux alluvions récentes de l'entité Ariège / Hers Vif (306,5 km²).

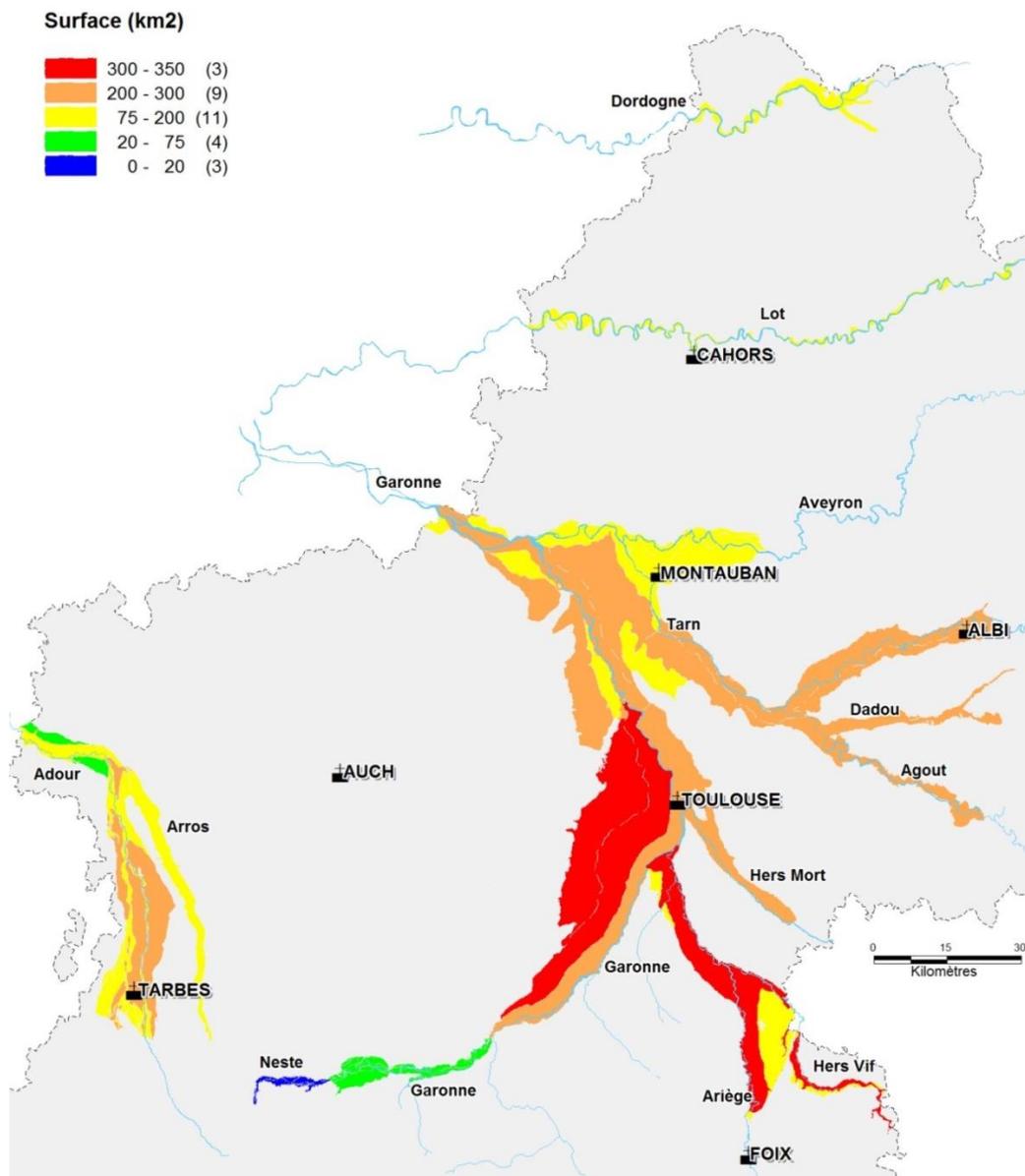


Illustration 25 - Superficie des entités alluviales (en km²) étudiées dans ERESSAR.

Appellation	Superficie Totale (km ²)	Code Projet	Formations Géologiques - Carte Géologique Régionale 1 / 250 000	Notation	Superficie (km ²)
Garonne Amont	100.33	GAM1	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	Fz	28.81
		GAM2	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	Fy	38.42
		GAM3	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	Fx	33.11
Garonne Médiane	863.47	GM1	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	Fz	208.69
		GM2	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	Fy	348.06
		GM3	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	Fx	306.72
Complexe Tarn / Garonne	342.52	CTG1	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	Fz	105.78
		CTG2	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	Fy	236.74
Garonne Aval	529.93	GAV1	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	Fz	200.61
		GAV2	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	Fy	100.63
		GAV3	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	Fx	228.70
Neste	24.46	NE1	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	Fz	13.01
		NE2	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	Fy	2.98
		NE3	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	Fx	8.47
Ariège / Hers Vif	438.27	AHV1	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	Fz	306.56
		AHV2	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	Fy	131.71
Garonne / Hers Mort	218.99	GHM1	Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses inférieures attribuées au Würm (Fy)	Fz / Fy	218.99
Agout / Dadou	203.80	AGD1	Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses inférieures attribuées au Würm (Fy)	Fz / Fy	203.80
Tarn	289.60	TA1	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	Fz	228.15
		TA2	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	Fy	212.32
		TA3	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	Fx	77.28
Tarn / Aveyron	76.18	TAV1	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	Fz	76.18
		TAV2	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	Fy	133.41
Adour	520.82	AD1	Fz : Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel	Fz	131.02
		AD2	Fy : Alluvions fluviales des terrasses inférieures attribuées au Würm	Fy	267.62
		AD3	Fx : Alluvions fluviales des terrasses moyennes attribuées au Riss	Fx	86.72
		AD4	Fw : Alluvions fluviales des hautes terrasses attribuées au Mindel	Fw	35.46
Arros	111.71	ARR1	Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses inférieures attribuées au Würm (Fy) ET des terrasses moyennes attribuées au Riss	Fz / Fy / Fx	111.71
Lot	105.11	LO1	Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses moyennes attribuées au Riss	Fz / Fy / Fx	105.11
Dordogne	90.08	DO1	Alluvions fluviales des basses terrasses à actuel (Fz) ET des terrasses inférieures attribuées au Würm (Fy) ET des terrasses moyennes attribuées au Riss	Fz / Fy / Fx	90.08

Illustration 26 - Superficie des entités alluviales traitées dans ERESSAR.

4.4. UNITÉ DE GESTION ET DENSITÉ DE DRAINAGE

Les apports d'eau naturels reçus par un territoire correspondent aux précipitations dites efficaces qui engendrent le potentiel d'écoulement, comprenant à la fois les apports d'eau de ruissellement et les apports d'eau par infiltration qui alimentent les nappes souterraines (Collin J.J. *et al.*, 1994). Le coefficient de répartition entre ces deux éléments est généralement mal connu à l'échelle des aquifères étudiés.

Dans l'étude nationale de 2006, les apports d'eau par infiltration ont été estimés au travers de l'Indice de Développement et de Persistance de Réseaux (IDPR). En effet, cet indice a remplacé la densité de drainage (initialement considéré comme critère dans l'étude de Collin J.J. *et al.*, 1994) dans son rôle dans la classification de l'aquifère pour sa résistance à la sécheresse.

L'IDPR permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface en comparant un réseau hydrographique théorique (calculé à partir du MNT et basé sur l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène) au réseau naturel mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (Seguin J.J., 2006).

Toutefois lors des travaux de 2006, l'utilisation de l'IDPR a été comparée aux résultats apportés par le calcul de la densité de drainage. Il en ressort que les 2 paramètres sont corrélés et, dans la majorité des cas, les aquifères conservent la même classe. Un tiers environ change d'une classe et une petite minorité (3,8 %) diffèrent de 2 classes. L'IDPR a été choisi pour son aspect global, intégrant à la fois le réseau hydrographique réel et la géomorphologie.

Dans la présente étude, les résultats apportés par cet indice n'ayant pas été validés en Midi-Pyrénées, il est proposé de s'appuyer sur plusieurs critères.

Le premier critère reprend une partie des résultats obtenus pour la définition des unités de gestion (Schoen et Ricard (2001), Schoen et Codvelle (2001)) détaillée dans le chapitre 3.5. En effet, le découpage de ces unités étant basé sur les caractéristiques de cheminement de l'eau de pluie après son arrivée au sol, il intègre différents facteurs régissant l'écoulement de l'eau du sol vers la nappe. Ainsi, 5 catégories définissant les unités de gestion ont été individualisées et renseignent sur le mécanisme d'écoulement prépondérant intervenant en fonction du type d'aquifère caractérisé.

La carte de l'illustration 27 présente une superposition des entités sédimentaires de milieux poreux sur ces catégories d'unité de gestion alors que la carte de l'illustration 28 informe sur les classes de perméabilité de la zone non-saturée (ZNS) considérées (cf. présentation au chapitre 3.5. des différents facteurs intégrés dans la délimitation des unités de gestion). Il ressort sans surprise que la majorité des entités alluviales se superposent aux unités de gestion où l'infiltration est estimée prépondérante et où la perméabilité de la ZNS est évaluée comme très forte. Des nuances apparaissent toutefois pour certaines des entités comme par exemple celle de l'Arros ou de l'Agout, où une coexistence de ruissellement et d'infiltration est mise en évidence et se caractérise par une perméabilité de la ZNS très faible voire négligeable. Assez classiquement également, les terrasses moyennes de la Garonne (Médiane et Aval) et du Tarn se superposent aux unités de gestion caractérisées par un ruissellement prépondérant.

Afin de le comparer aux résultats des unités de gestion, le calcul de la densité de drainage des entités alluviales délimitées dans le projet ERESSAR a été effectué par traitement SIG en utilisant comme couche de référence pour les cours d'eau, le référentiel Carthage de l'IGN. Ces derniers, figurant sous la forme de polygones, ont été découpés par les polygones représentant les entités alluviales. Les tronçons de cours d'eau ainsi créés ont été recensés par entité alluviale et leurs longueurs sommées. Les surfaces utilisées pour le calcul de la densité de drainage sont celles calculées lors de la détermination de la superficie des entités (§ 4.3.).

LEGENDE :

-  Ruissellement prépondérant
-  Infiltration prépondérante en aquifère poreux/fissuré
-  Infiltration prépondérante en aquifère karstique
-  Coexistence ruissellement et infiltration en aquifère poreux/fissuré
-  Coexistence ruissellement et infiltration en aquifère karstique

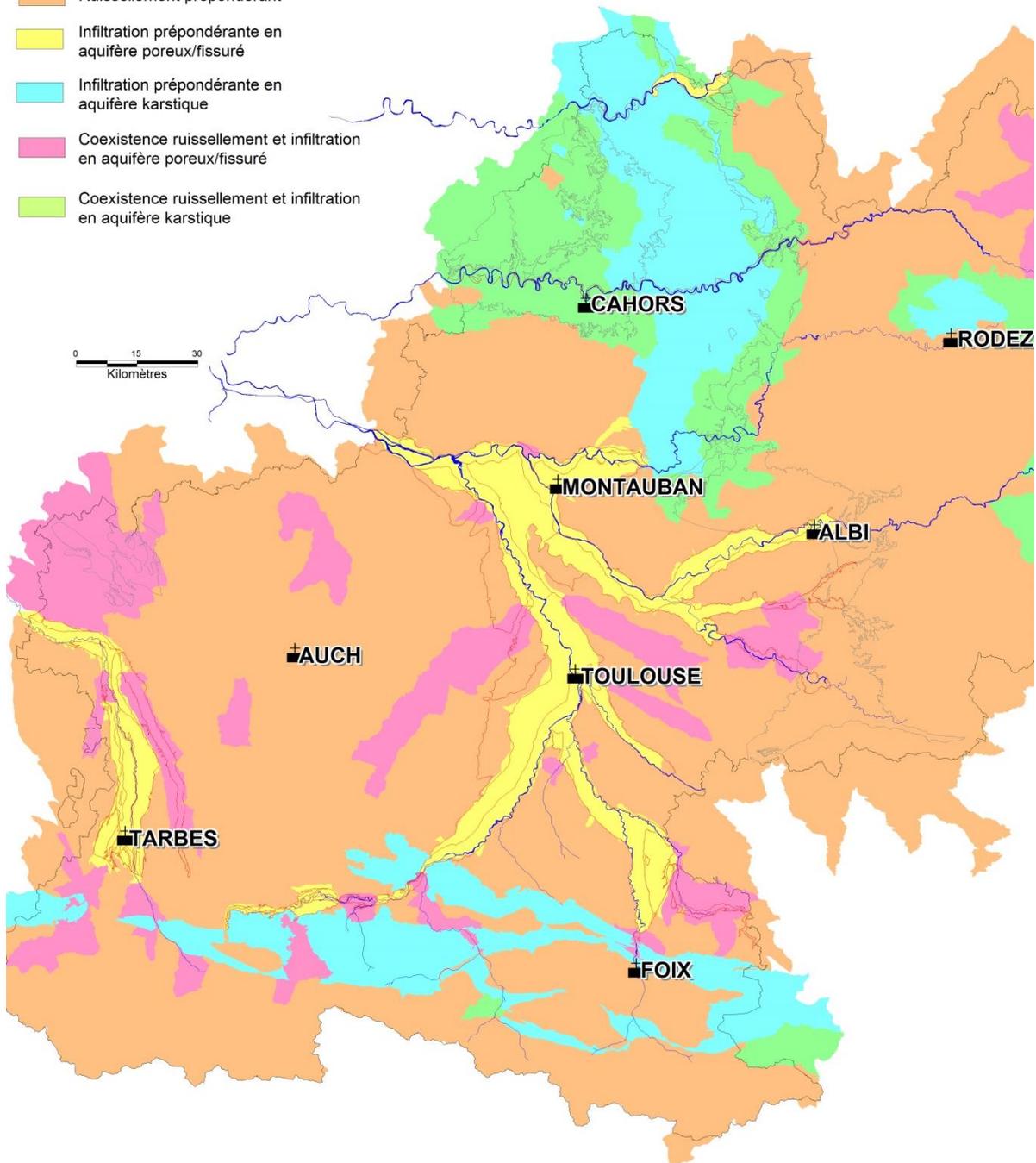


Illustration 27 - Superposition des entités sédimentaires de milieux poreux considérées dans le cadre du projet ERESSAR et des catégories d'unité de gestion établies en Midi-Pyrénées.

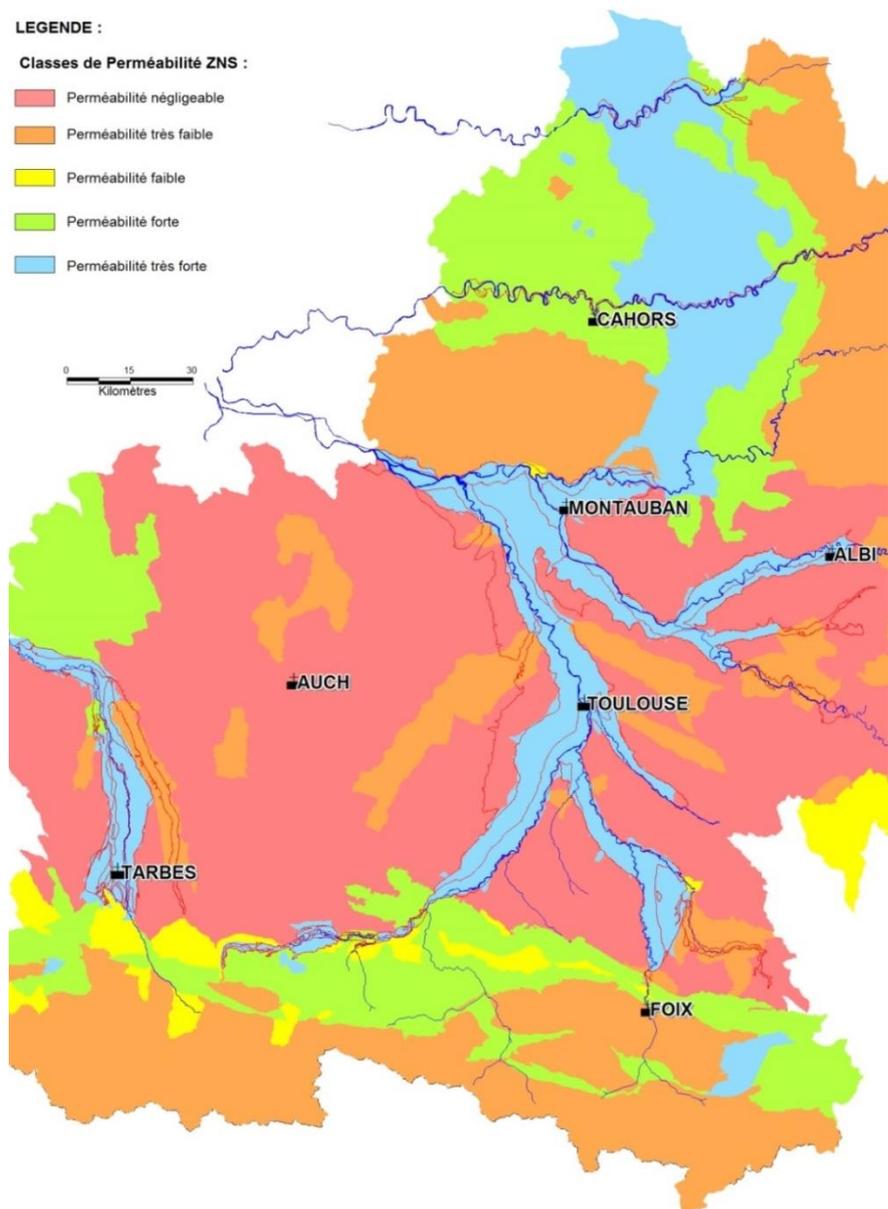


Illustration 28 - Superposition des entités alluviales sur les classes de perméabilité de la ZNS prises en compte pour la définition des unités de gestion.

Les valeurs de densité de drainage trouvées ont été subdivisées en 5 classes exprimées en kilomètres de cours d'eau par rapport à une surface unitaire d'un kilomètre carré. La carte de l'illustration 29 représente la répartition de ces 5 classes en fonction des entités alluviales étudiées. Les valeurs de densité de drainage sont comprises entre 0,04 km de cours d'eau par km² pour l'entité des terrasses moyennes de la Garonne Amont, à 2,6 km de cours d'eau par km² pour l'entité des alluvions récentes de la Garonne Amont.

Les résultats obtenus ne semblent pas être adaptés aux contextes des aquifères alluviaux, avec des valeurs incohérentes vis-à-vis de la connaissance locale. À titre d'exemple, les alluvions des moyennes terrasses de la Garonne présentent à travers ces résultats un caractère sensiblement plus infiltrant que les alluvions de la basse plaine. Ce qui est en désaccord avec les observations de terrain. En raison de ces résultats inadaptés, le critère de densité de drainage ne sera pas retenu dans la caractérisation des indicateurs de sécheresse en contexte alluvionnaire.

Les paramètres issus du travail sur les unités de gestion ne sont pas contrastés au sein d'un même grand type d'aquifère, en l'occurrence dans le cas présent les entités alluviales. Ce programme avait en effet comme objectif d'établir une carte à l'échelle régionale en s'attachant plutôt à différencier les grands types d'aquifères régionaux que constituent les karst, le socle, les alluvions, etc. Néanmoins, les données existantes sur le caractère ruisselant ou infiltrant des aquifères alluviaux satisfont fidèlement les caractéristiques de la zone non saturée rencontrées dans la région, en différenciant les alluvions de rivières secondaires (caractère plus ruisselant) et les aquifères des grands cours d'eau (caractère infiltrant). D'ailleurs les perméabilités de la ZNS sont également cohérentes pour ces différents niveaux d'aquifères alluviaux. Les résultats issus des unités de gestion seront donc préférés par la suite. Ils permettront de mieux appréhender la capacité des différents types d'unités alluviales à favoriser l'infiltration de la pluie efficace (recharge). Néanmoins, au regard de l'échelle à laquelle ils ont été établis, il s'agira de pondérer faiblement ce critère.

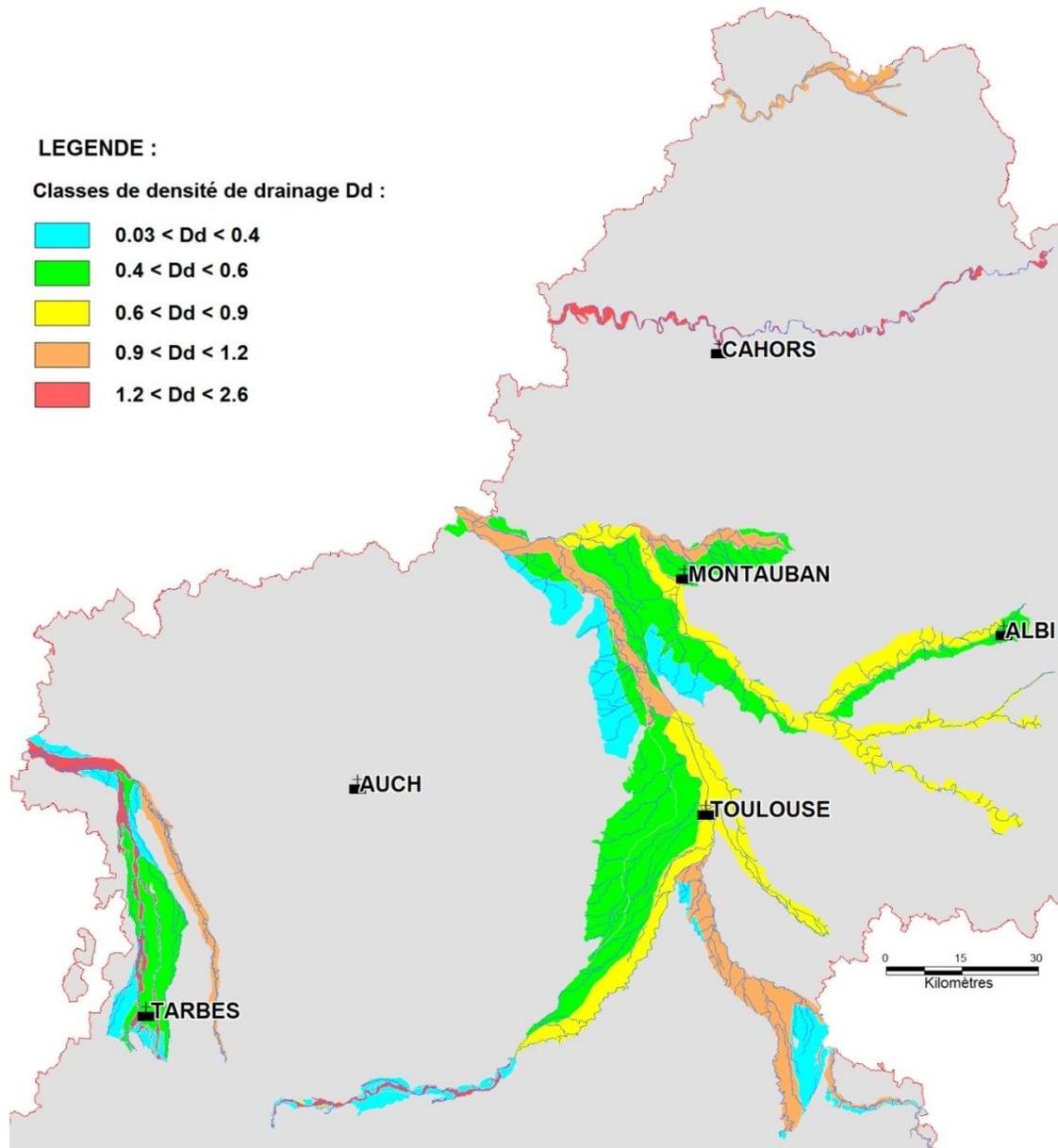


Illustration 29 - Densité de drainage des entités alluviales étudiées.

4.5. SYNTHÈSE DE RÉSULTATS

Le suivi quantitatif des aquifères alluviaux est hétérogène en termes de densité de points d'observation. Sur les 30 secteurs définis, 20 sont représentés par 1 à 4 piézomètres et 10 ne font l'objet d'aucun suivi. Ces derniers n'ont donc pas pu faire l'objet de l'analyse de l'inertie de la nappe et n'ont donc pas été traités dans le cadre d'ERESSAR. Les aquifères poreux sont au nombre de 7. La densité de points d'observation est très faible au regard des vastes superficies qu'ils concernent (1 à 2 points par entités). De plus au regard de l'hétérogénéité de ces aquifères, et de leur méconnaissance globale, les piézomètres installés ne peuvent être considérés comme représentatifs que très localement. À titre d'exemple, les aquifères des molasses en Midi-Pyrénées, d'une superficie avoisinant 20 000 km², ne sont représentés que par deux piézomètres, soit 1 point d'observation pour 10 000 km². Pour ces raisons, et notamment l'impossibilité de déterminer certains critères comme la porosité moyenne de l'aquifère, deux traitements indépendants ont été effectués à partir de deux séries de critères vis-à-vis de la résistance à la sécheresse :

Pour les aquifères alluviaux :

- superficie de l'aquifère ;
- caractère ruisselant ou infiltrant à partir des unités de gestion ;
- le temps de demi-décroissance moyen lorsque présence d'une chronique piézométrique exploitable ;
- la ressource en eau renouvelable moyenne ;
- la capacité régulatrice de l'aquifère par rapport au niveau de base (hypothèse fluctuation des niveaux maximale).

Pour les aquifères poreux (hors alluvions) (ressource renouvelable non calculable, superficie inadaptée) :

- caractère ruisselant ou infiltrant à partir des unités de gestion ;
- le temps de demi-décroissance moyen lorsque présence d'une chronique piézométrique exploitable ;
- la capacité régulatrice de l'aquifère par rapport au niveau de base (hypothèse fluctuation des niveaux maximale).

Pour ce dernier critère l'analyse croisée des deux hypothèses (fluctuations maximale ou moyenne sur la période de mesure) a été réalisée (Illustrations 30,31, 32, 33).

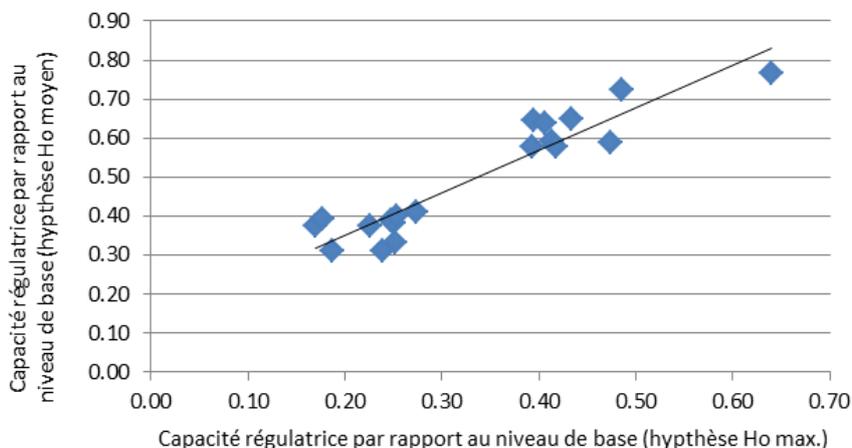


Illustration 30 - Capacité régulatrice des aquifères alluviaux selon les deux hypothèses Ho moyen et Ho maximal.

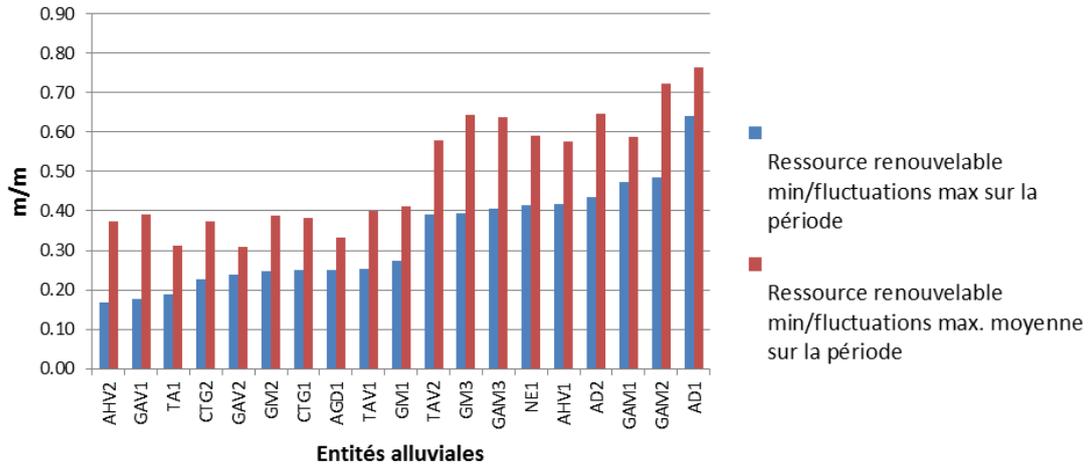


Illustration 31 - Comparaison des résultats pour le critère capacité régulatrice des aquifères alluviaux selon les deux hypothèses (Ho maximal ou Ho moyen).

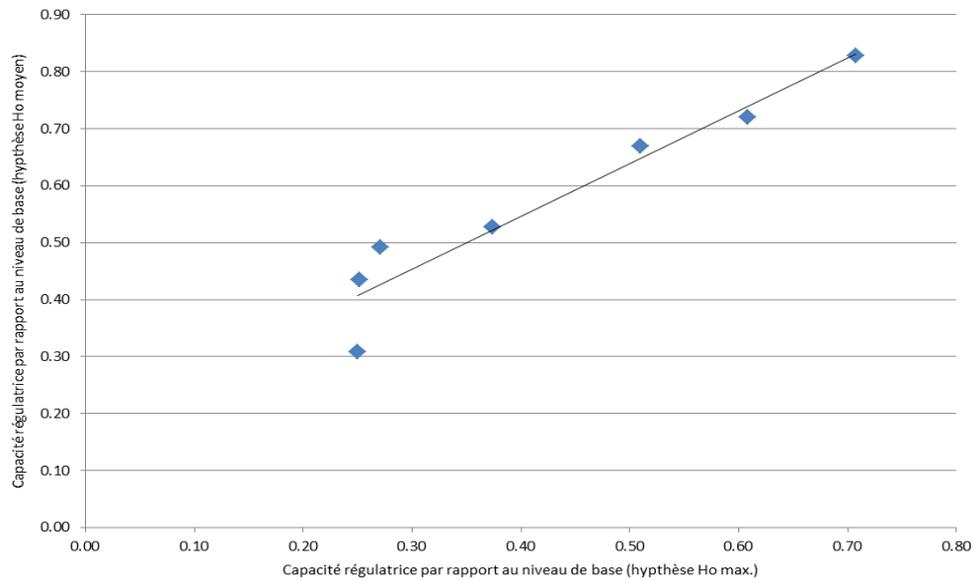


Illustration 32 - Critère de la capacité régulatrice des aquifères poreux (hors alluvions) selon les deux hypothèses Ho moyen et Ho maximal.

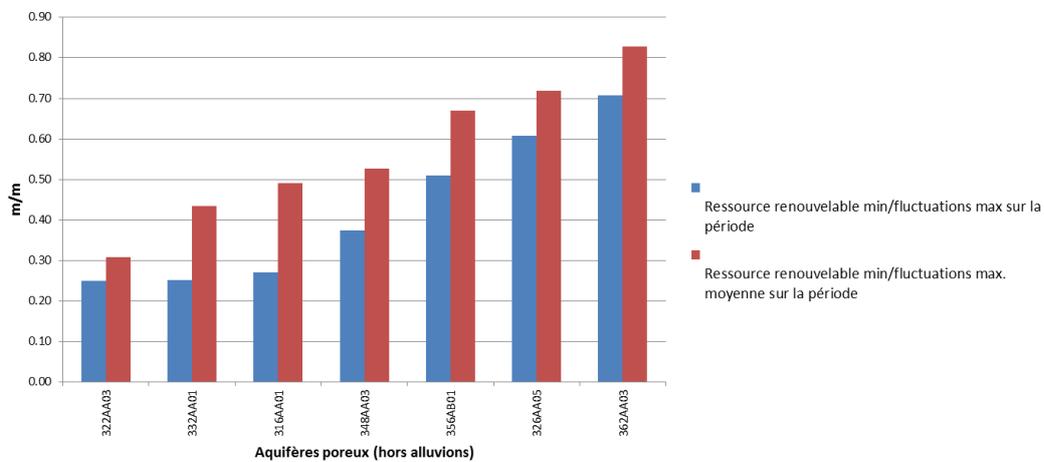


Illustration 33 - Comparaison des résultats pour le critère capacité régulatrice des aquifères poreux selon les deux hypothèses (Ho maximal ou Ho moyen).

Cette analyse montre que les deux hypothèses sont sensiblement équivalentes en relatif mais que celle considérant une fluctuation maximale tient mieux compte des diversités observées sur la zone d'étude. De plus, elle caractérise la puissance historiquement maximale susceptible d'être atteinte pour un aquifère donné. Cette dernière hypothèse sera donc préférée.

Les différents critères pris en compte ont été établis par piézomètre et moyennés à l'échelle de l'entité lorsque plusieurs piézomètres la caractérisent. L'ensemble des résultats concernant les critères retenus est indiqué dans les tableaux des Illustrations 34 et 35 (aquifères alluviaux par piézomètres et par entités) et les Illustrations 36 et 37 (aquifères poreux hors alluvions par piézomètres et par entités).

Code BSS	Denomination	Code Projet entités	Notation géologique	T _{demi- décroissance} moyen (jours)	H ₀ moyen (m)	Porosité efficace moyenne	Ressource Renouvelable (m)	Capacité régulatrice par rapport au niveau de base [H ₀ max](s.d.)	Capacité régulatrice par rapport au niveau de base [H ₀ moy](s.d.)
09793X0003/F	Saint-Mont	AD1	Fz	17	1.08	0.05	0.05	0.62	0.76
09793X0011/F	Tarsac	AD1	Fz	15	1.17	0.03	0.04	0.66	0.77
10065X0042/F	Lafitole	AD2	Fy	57	0.60	0.15	0.09	0.45	0.66
10315X0112/F	Peyta	AD2	Fy	58	1.27	0.08	0.10	0.42	0.64
09857X0102/F	L'Albarede	AGD1	Fz / Fy	27	1.21	0.05	0.06	0.25	0.33
10351X0024/F	Auterive	AHV1	Fz	64	0.76	0.30	0.23	0.40	0.53
10357X0021/F	Montaut	AHV1	Fz	62	0.46	0.20	0.09	0.32	0.54
10577X0159/F	Verniolle	AHV1	Fz	91	1.91	0.15	0.29	0.54	0.66
10357X0213/F	Solferino	AHV2	Fy	15	1.31	0.005	0.007	0.17	0.37
09301X0028/F	Les Barthes	CTG1	Fz	36	0.62	0.15	0.09	0.14	0.28
09303X0185/F	Castel	CTG1	Fz	31	0.60	0.15	0.09	0.36	0.49
09302X0139/F	Pedeloup	CTG2	Fy	23	0.65	0.20	0.13	0.25	0.45
09307X0146/F	Saint-Pierre	CTG2	Fy	34	0.53	0.20	0.11	0.20	0.30
10553X0026/F	Lestelle	GAM1	Fz	38	1.09	0.08	0.09	0.47	0.59
10548X0102/F	Les Bordes	GAM2	Fy	64	0.67	0.07	0.05	0.48	0.72
10548X0101/F	Les Bordes	GAM3	Fx	43	0.97	0.07	0.07	0.41	0.64
09306X0091/F	Saint-Porquier	GAV1	Fz	39	0.88	0.15	0.13	0.08	0.16
09306X0286/F	Boutoli	GAV1	Fz	56	1.01	0.15	0.15	0.14	0.31
09562X0170/F	Lilou	GAV1	Fz	39	1.19	0.04	0.05	0.26	0.58
09567X0219/F	Ondes	GAV1	Fz	32	0.88	0.15	0.13	0.23	0.52
09294X0256/F	Pomies	GAV2	Fy	108	0.20	0.15	0.03	0.24	0.31
09838D0727/F	Avenue de Lombez	GM1	Fz	38	0.24	0.16	0.04	0.36	0.49
10097X0224/F	Le Fauga	GM1	Fz	49	0.79	0.03	0.02	0.19	0.33
10092X0166/F	Lamasquere	GM2	Fy	28	1.31	0.02	0.02	0.27	0.41
10345X0199/F	Saint-Elix	GM2	Fy	15	1.63	0.03	0.04	0.23	0.37
09833C0249/F	La Tuilerie	GM3	Fx	50	0.54	0.01	0.01	0.39	0.65
10546X0026/F	Saint-Paul	NE1	Fz	22	0.82	0.05	0.04	0.41	0.59
09328X0126/F	Rieucourt	TA1	Fz	46	1.03	0.09	0.09	0.19	0.31
09574X0030/F	Le Verdier	TA1	Fz	41	0.91	0.09	0.08	0.10	0.18
09577X0047/F	Buzet	TA1	Fz	69	0.48	0.09	0.04	0.27	0.45
09312X0063/F	Bioule	TAV1	Fz	44	1.19	0.15	0.18	0.25	0.40
09311X0093/F	Pradas	TAV2	Fy	28	1.65	0.02	0.03	0.39	0.58

Illustration 34 - Tableaux des résultats par piézomètre en fonction des critères pour les aquifères alluviaux.

Code Projet entités	Superficie (km ²)	Unite Gestion	Nbre de points de suivi	T _{demi-décroissance moyen} (jours)	H ₀ moyen (m)	Porosité efficace moyenne	Ressource Renouvelable (m)	Capacité régulatrice par rapport au niveau de base [H ₀ max](s.d.)	Capacité régulatrice par rapport au niveau de base [H ₀ moy](s.d.)		
AD1	131	infiltration prépondérante	2	16.00	1.12	0.04	0.04	0.64	0.76		
AD2	268	infiltration prépondérante	2	57.00	0.94	0.12	0.11	0.43	0.65		
AD3	87	infiltration prépondérante	0	Non traité (absence de suivi)							
AD4	35	infiltration prépondérante	0	Non traité (absence de suivi)							
AGD1	204	coexistence ruissellement et infiltration	1	27.00	1.21	0.05	0.06	0.25	0.33		
AHV1	307	infiltration prépondérante	3	72.33	1.04	0.22	0.23	0.42	0.58		
AHV2	132	infiltration prépondérante	1	15.00	1.31	0.005	0.01	0.17	0.37		
ARR1	112	coexistence ruissellement et infiltration	0	Non traité (absence de suivi)							
CTG1	106	infiltration prépondérante	2	33.50	0.61	0.15	0.09	0.25	0.38		
CTG2	237	infiltration prépondérante	2	28.50	0.59	0.20	0.12	0.23	0.37		
DO1	90	infiltration prépondérante	0	Non traité (absence de suivi)							
GAM1	29	coexistence ruissellement et infiltration	1	38.00	1.09	0.08	0.09	0.47	0.59		
GAM2	8	coexistence ruissellement et infiltration	1	64.00	0.67	0.07	0.05	0.48	0.72		
GAM3	6	coexistence ruissellement et infiltration	1	43.00	0.97	0.07	0.07	0.41	0.64		
GAV1	201	infiltration prépondérante	4	41.50	0.99	0.12	0.12	0.18	0.39		
GAV2	101	infiltration prépondérante	1	108.00	0.20	0.15	0.03	0.24	0.31		
GAV3	229	ruissellement prépondérant	0	Non traité (absence de suivi)							
GHM1	219	infiltration prépondérante	0	Non traité (absence de suivi)							
GM1	209	infiltration prépondérante	2	43.50	0.52	0.10	0.05	0.27	0.41		
GM2	348	infiltration prépondérante	2	21.50	1.47	0.02	0.03	0.25	0.39		
GM3	135	ruissellement prépondérant	1	50.00	0.54	0.01	0.01	0.39	0.65		
LO1	105	infiltration prépondérante	0	Non traité (absence de suivi)							
NE1	13	infiltration prépondérante	1	22.00	0.82	0.05	0.04	0.41	0.59		
NE2	3	infiltration prépondérante	0	Non traité (absence de suivi)							
NE3	8	infiltration prépondérante	0	Non traité (absence de suivi)							
TA1	228	infiltration prépondérante	3	52.00	0.81	0.09	0.07	0.19	0.31		
TA2	212	infiltration prépondérante	0	Non traité (absence de suivi)							
TA3	77	ruissellement prépondérant	0	Non traité (absence de suivi)							
TAV1	76	infiltration prépondérante	1	44.00	1.19	0.15	0.18	0.25	0.40		
TAV2	133	infiltration prépondérante	1	28.00	1.65	0.02	0.03	0.39	0.58		

Illustration 35 - Tableaux des résultats par critère pour les aquifères alluviaux par entité.

Code BSS	Denomination	Code Projet entités (BD Lisa)	Unite Gestion	Nbre de points de suivi	T _{demi-décroissance moyen} (jours)	H ₀ moyen (m)	Capacité régulatrice par rapport au niveau de base [H ₀ max](s.d.)	Capacité régulatrice par rapport au niveau de base [H ₀ moy](s.d.)
09526X0212/F	Forage de Latrille	316AA01	coexistence ruissellement et infiltration	1	24	0.41	0.27	0.53
09845C1426/F	UPS	322AA03	ruissellement prépondérant	1	66	0.53	0.25	0.43
09307X0136/F	Bressols	326AA05	ruissellement prépondérant	1	30	0.67	0.61	0.72
09866X0074/F	Valdurenque	332AA01	ruissellement prépondérant	1	56	0.57	0.25	0.31
08323X0205/F	Piezomètre Crétacé PZ4 N°	348AA03	coexistence ruissellement et infiltration	1	55	0.39	0.37	0.49
08565X0007/F	Forage du Bru	356AB01	coexistence ruissellement et infiltration	2	16.5	3.06	0.51	0.67
08341X0031/F	Terrou	362AA03	infiltration prépondérante	1	36	7.00	0.71	0.83

Illustration 36 - Tableaux des résultats par critère pour les aquifères poreux (hors alluvions) par piézomètre.

Code Projet entités (BD Lisa)	Unite Gestion	Nbre de points de suivi	T _{demi-décroissance moyen} (jours)	H ₀ moyen (m)	Capacité régulatrice par rapport au niveau de base [H ₀ max](s.d.)	Capacité régulatrice par rapport au niveau de base [H ₀ moy](s.d.)
316AA01	coexistence ruissellement et infiltration	1	24	0.41	0.27	0.53
322AA03	ruissellement prépondérant	1	66	0.53	0.25	0.43
326AA05	ruissellement prépondérant	1	30	0.67	0.61	0.72
332AA01	ruissellement prépondérant	1	56	0.57	0.25	0.31
348AA03	coexistence ruissellement et infiltration	1	55	0.39	0.37	0.49
356AB01	coexistence ruissellement et infiltration	2	16.5	3.06	0.51	0.67
362AA03	infiltration prépondérante	1	36	7.00	0.71	0.83

Illustration 37 - Tableaux des résultats par critère pour les aquifères poreux (hors alluvions) par entité.

4.6. CARTOGRAPHIE DE RÉSISTANCE À LA SÉCHERESSE DES AQUIFÈRES POREUX

4.6.1. Quantification des critères

Les critères retenus dans le cadre de la présente étude pour caractériser la résistance à la sécheresse des aquifères poreux sont au nombre de 5 pour les aquifères alluviaux et de 3 pour les aquifères poreux (hors alluvions). Ils ont été décrits et évalués par entité dans le § 4.5.

Les valeurs obtenues pour chacun des 5 critères ont été classées et une note a été attribuée à chaque classe. La note a été choisie de façon à donner une valeur élevée lorsque la résistance à la sécheresse est forte. Pour chaque critère, les tableaux des classes et des notes, ainsi que les graphiques ayant permis l'élaboration des différentes classes sont fournis dans les Illustrations 38 à 47 en ce qui concerne les aquifères alluviaux, et les Illustrations 48 à 53 en ce pour les aquifères poreux (hors alluvions).

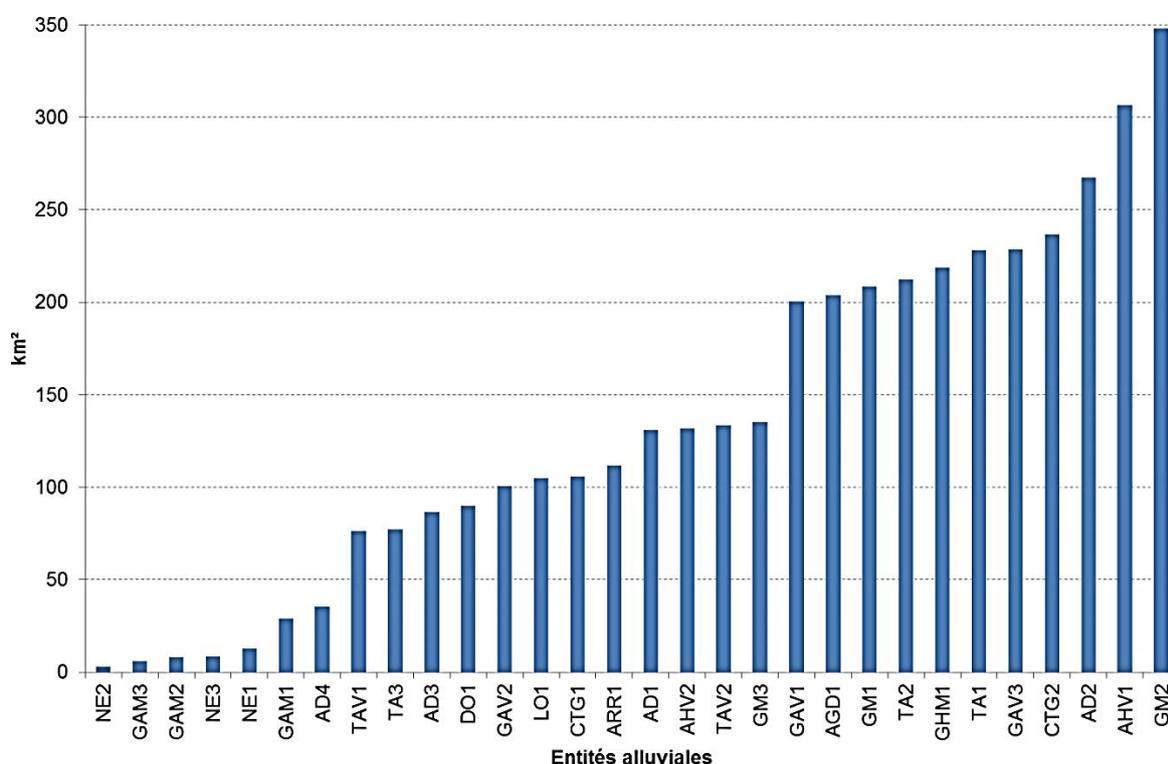


Illustration 38 - Classement des aquifères alluviaux vis-à-vis du critère de superficie de l'aquifère.

Taille (km ²)	Classe	Note
> 240	1	4
140 - 240	2	3
70 - 140	3	2
< 70	4	1

Illustration 39 - Aquifères alluviaux - Tableau des classes et des notes pour le critère de superficie de l'aquifère.

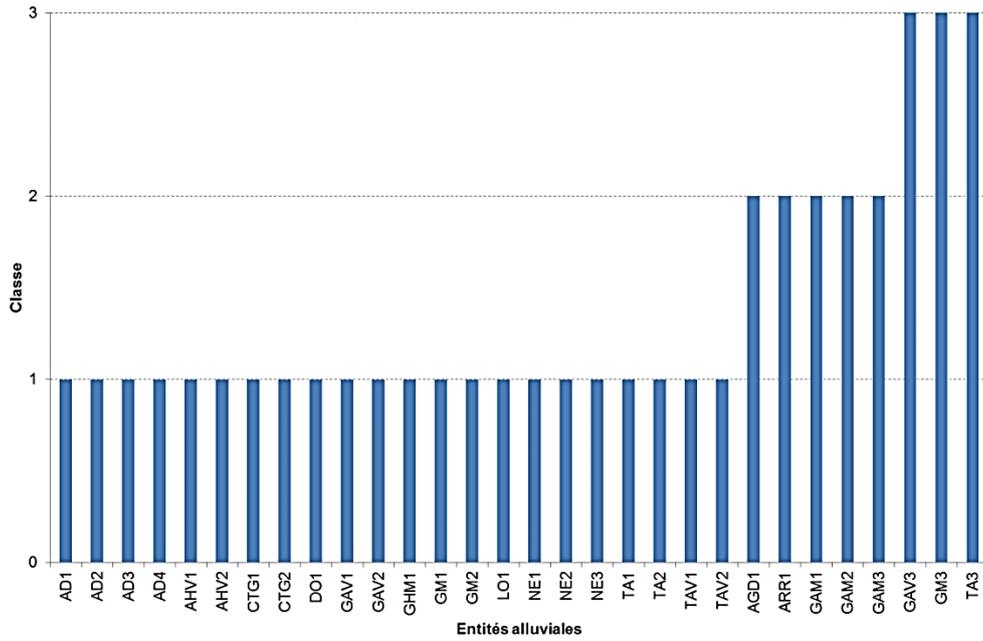


Illustration 40 - Classement des aquifères alluviaux vis-à-vis du critère de capacité à l'infiltration.

Capacité à l'infiltration (selon Unité Gestion)	Classe	Note
infiltration prépondérante	1	3
coexistence ruissellement et infiltration	2	2
ruissellement prépondérant	3	1

Illustration 41 - Aquifères alluviaux - Tableau des classes et des notes pour le critère de capacité à l'infiltration.

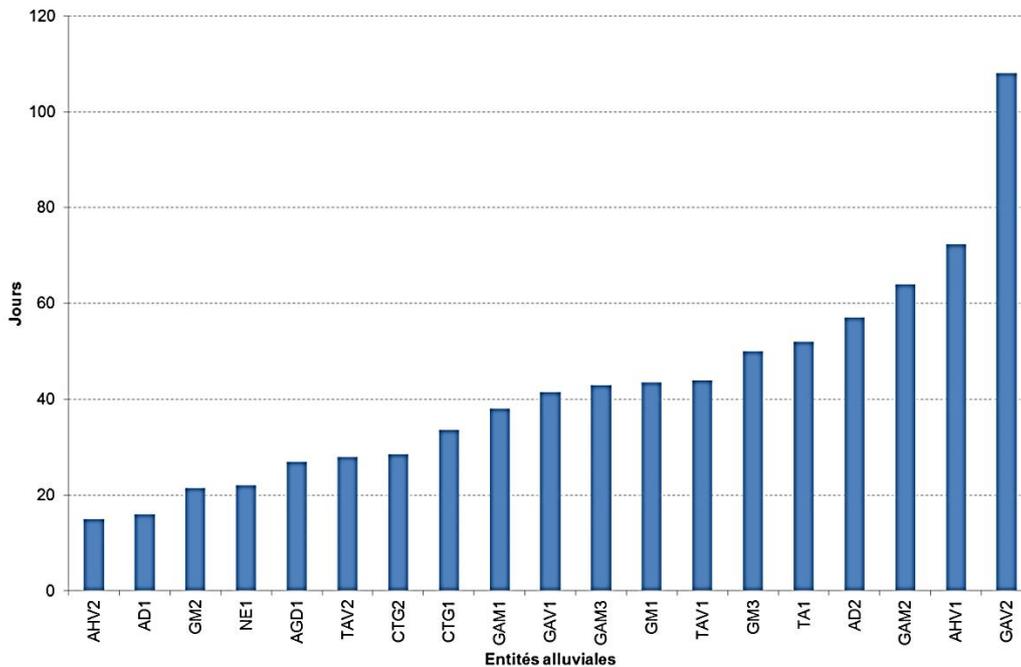


Illustration 42 - Classement des aquifères alluviaux vis-à-vis du critère de temps de demi-décroissance.

Temps de demi-décroissance moyen (jours)	Classe	Note
> 60	1	5
45 - 60	2	4
30 - 45	3	3
15 - 30	4	2
< 15	5	1

Illustration 43 - Aquifères alluviaux - Tableau des classes et des notes pour le critère de temps de demi-décroissance.

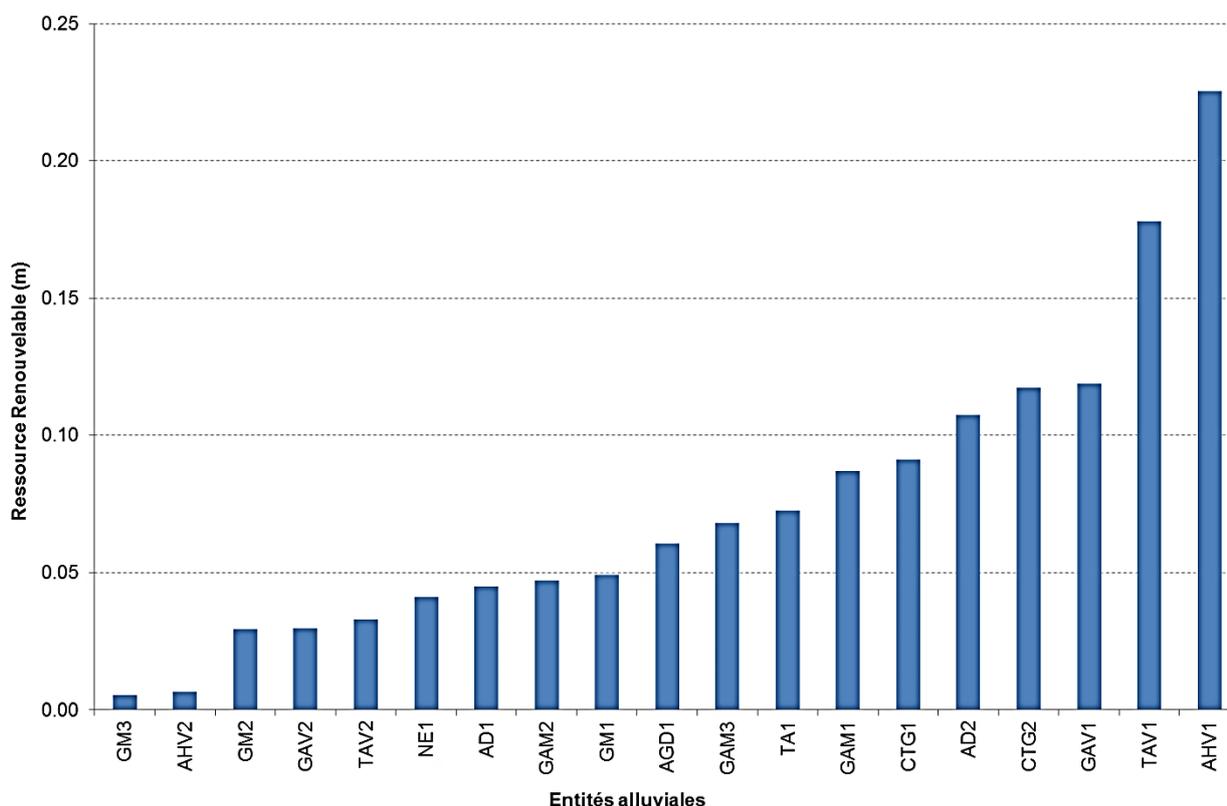


Illustration 44 - Classement des aquifères alluviaux vis-à-vis du critère de ressources en eau renouvelable.

Ressource en eau renouvelable (m)	Classe	Note
> 0.15	1	5
0.15 - 0.10	2	4
0.05 - 0.10	3	3
0.02 - 0.05	4	2
< 0.02	5	1

Illustration 45 - Aquifères alluviaux - Tableau des classes et des notes pour le critère de ressources en eau renouvelable.

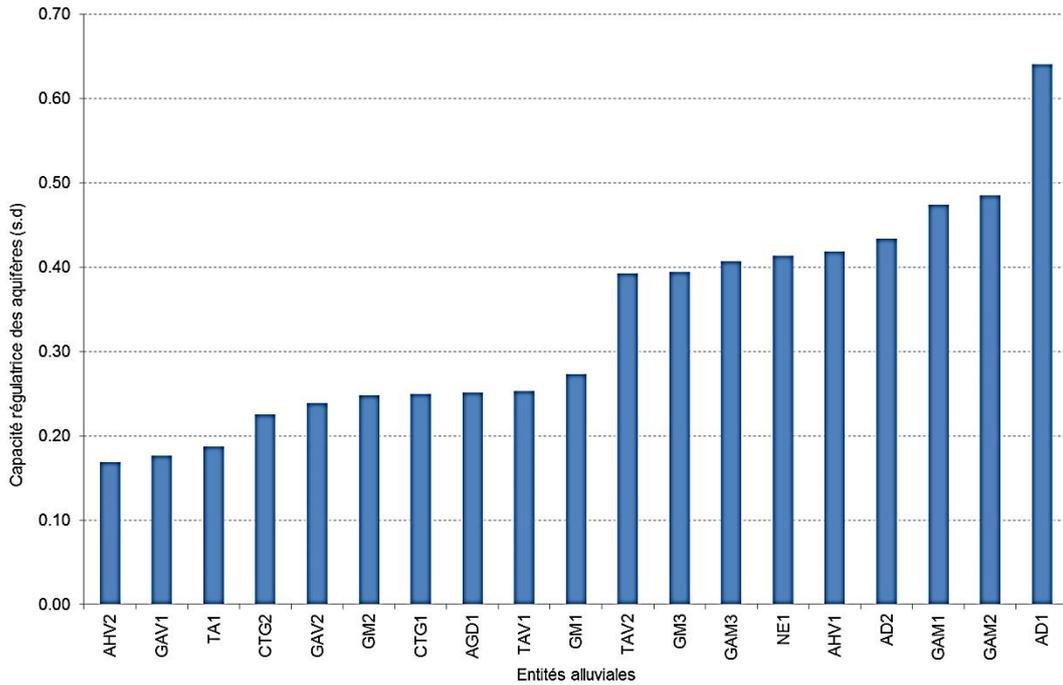


Illustration 46 - Classement des aquifères alluviaux vis-à-vis du critère de capacité régulatrice des aquifères.

Capacité régulatrice par rapport au niveau de base (s.d.)	Classe	Note
> 0.60	1	5
0.45 - 0.60	2	4
0.30 - 0.45	3	3
0.20 - 0.30	4	2
< 0.20	5	1

Illustration 47 - Aquifères alluviaux - Tableau des classes et des notes pour le critère de capacité régulatrice des aquifères.

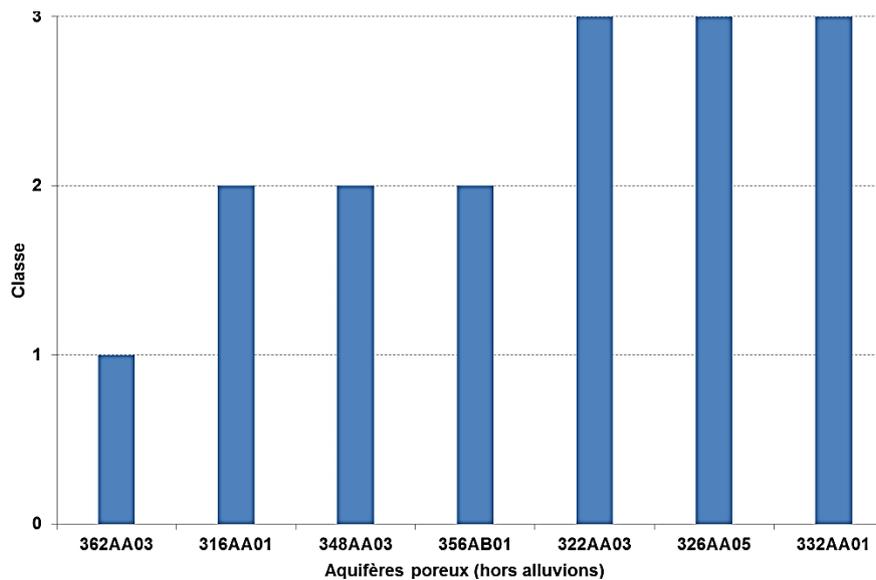


Illustration 48 - Classement des aquifères poreux (hors alluvions) vis-à-vis du critère de capacité à l'infiltration.

Capacité à l'infiltration (selon Unité Gestion)	Classe	Note
infiltration prépondérante	1	3
coexistence ruissellement et infiltration	2	2
ruissellement prépondérant	3	1

Illustration 49 - Aquifères poreux (hors alluvions) - Tableau des classes et des notes pour le critère de capacité à l'infiltration.

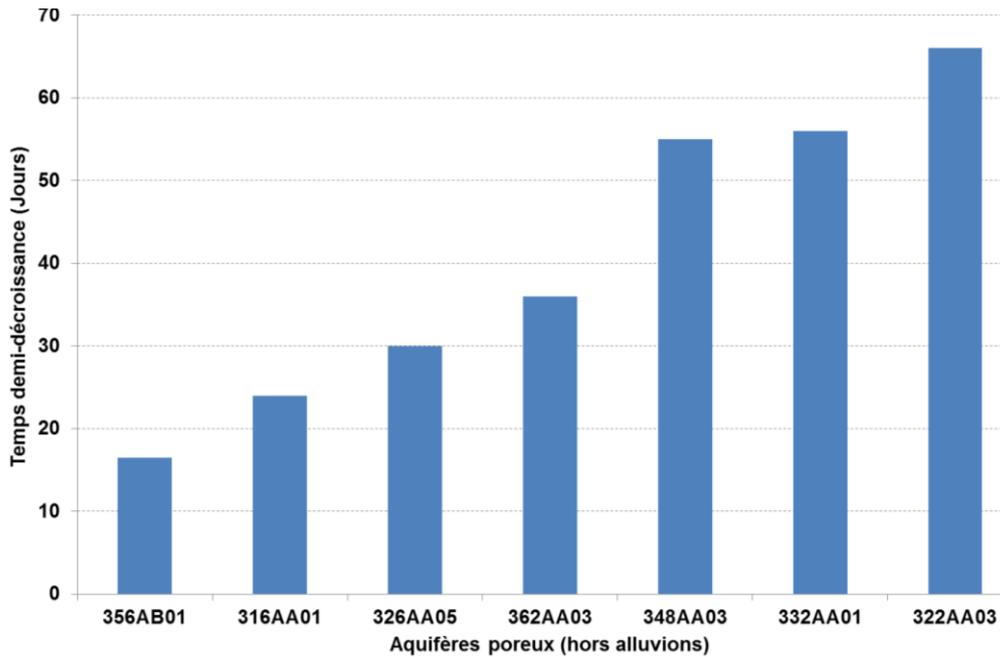


Illustration 50 - Classement des aquifères poreux (hors alluvions) vis-à-vis du critère de temps de demi-décroissance.

Temps de demi-décroissance moyen (jours)	Classe	Note
> 60	1	4
40 - 60	2	3
20 - 40	3	2
< 20	4	1

Illustration 51 - Aquifères poreux (hors alluvions) - Tableau des classes et des notes pour le critère de temps de demi-décroissance.

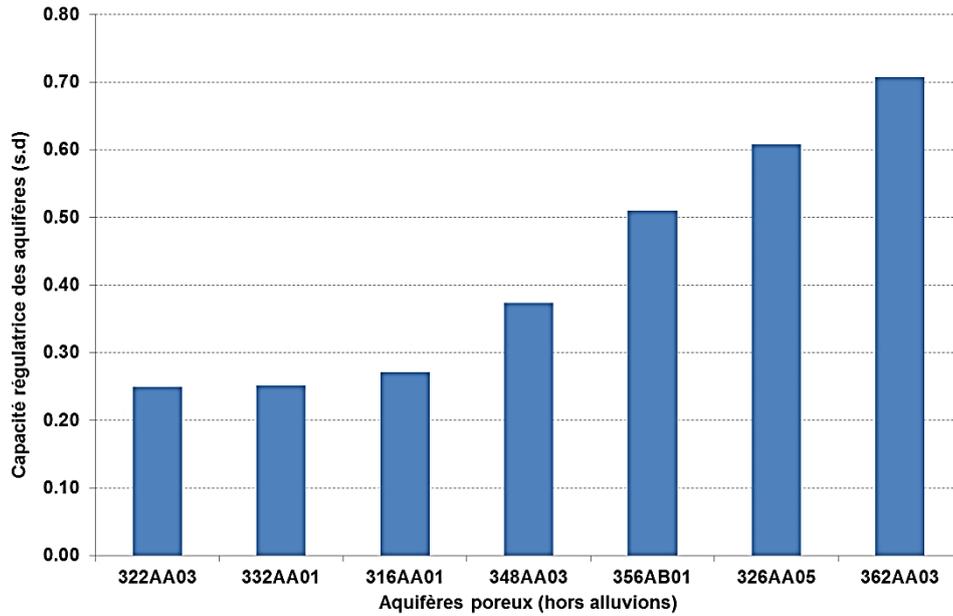


Illustration 52 - Classement des aquifères poreux (hors alluvions) vis-à-vis du critère de capacité régulatrice des aquifères.

Capacité régulatrice par rapport au niveau de base (s.d.)	Classe	Note
> 0.60	1	5
0.45 - 0.60	2	3
0.30 - 0.45	3	2
< 0.30	4	1

Illustration 53 - Aquifères poreux (hors alluvions) - Tableau des classes et des notes pour le critère de capacité régulatrice des aquifères.

4.6.2. Pondérations des critères

L'indicateur de résistance à la sécheresse (IRS) a été calculé en pondérant et en sommant les notes attribuées à chaque classe. La pondération a été choisie de façon à refléter l'importance du critère dans son rôle régulateur face à l'occurrence d'une sécheresse.

$$IRS_j = \sum_{i=1}^n p_i N_{j,i},$$

Avec :

IRS_j : l'indice de résistance à la sécheresse de l'aquifère j,

p_i : le poids du critère i,

N_{j,i} : la note attribuée au critère i pour l'aquifère j.

Une pondération différente par entité a été définie suivant les deux traitements réalisés :

- **Aquifères alluviaux représentés par au moins un piézomètre :**

$$IRS = [IRS_{\text{Taille}}] \times 1 + [IRS_{\text{Cap-infiltration}}] \times 1 + [IRS_{\text{T1/2-décroissance}}] \times 5 + [IRS_{\text{Res-renouvelable}}] \times 3 + [IRS_{\text{Cap-régulation}}] \times 2$$

▪ **Aquifères poreux (hors alluvions) représentés par au moins un piézomètre**

$$IRS = [IRS_{\text{Cap-infiltration}}] \times 1 + [IRS_{\text{T1/2-décroissance}}] \times 5 + [IRS_{\text{Cap-régulation}}] \times 3$$

Une analyse de sensibilité a été réalisée sur plusieurs paramètres de pondération. Les résultats respectent globalement le classement pour les entités extrêmes. C'est l'analyse qui est apparue la plus fidèle à l'observation de terrain et à la connaissance des entités traitées qui a été retenue.

Les Illustrations 54 et 55 présente le classement des aquifères poreux selon leur sensibilité à la sécheresse. Les Illustrations 56 et 57 présentent les tableaux de notation finale par entités.

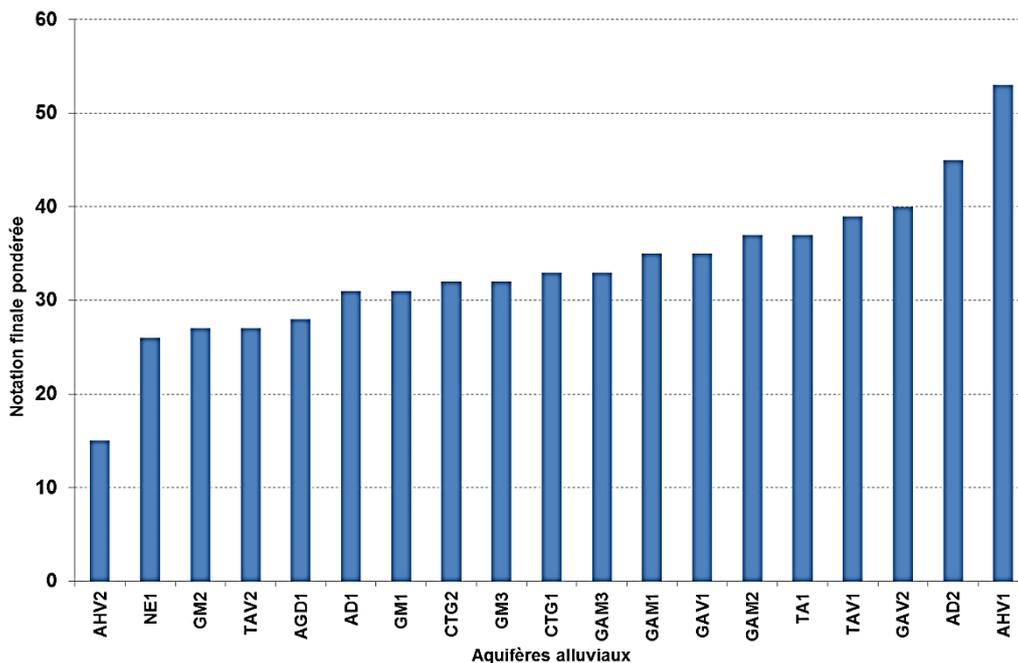


Illustration 54 - Classement des aquifères alluviaux selon leur sensibilité à la sécheresse.

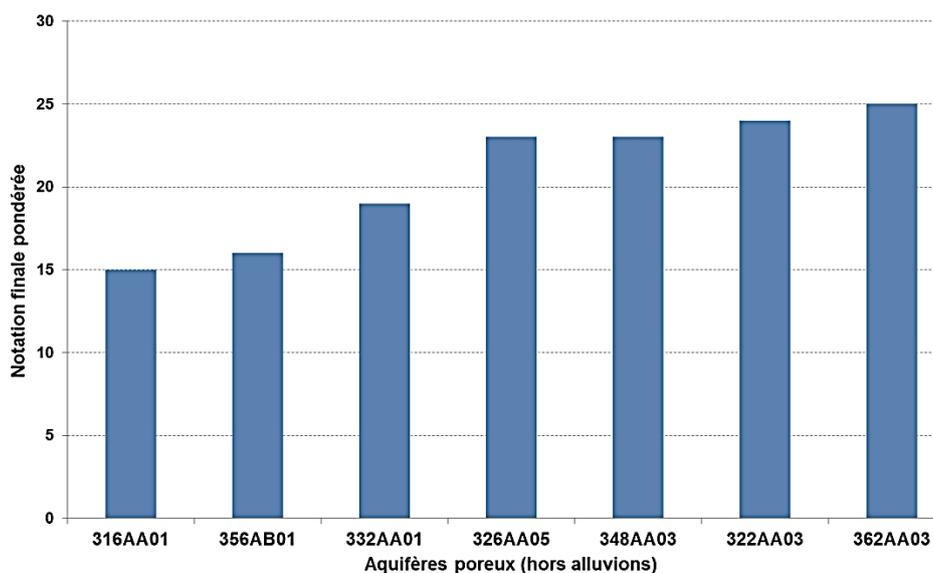


Illustration 55 - Classement des aquifères poreux (hors alluvions) selon leur sensibilité à la sécheresse.

Critères	Taille		Capacité à l'infiltration		Temps de demi-décroissance moyen		Ressource renouvelable		Capacité régulatrice		Note finale par entité
	1		1		5		3		2		
Pondération	1		1		5		3		2		Note finale par entité
Code Projet entité	Classe	Note	Classe	Note	Classe	Note	Classe	Note	Classe	Note	
AD1	3	2	1	3	4	2	4	2	1	5	31
AD2	1	4	1	3	2	4	2	4	3	3	45
AGD1	2	3	2	2	4	2	3	3	4	2	28
AHV1	1	4	1	3	1	5	1	5	3	3	53
AHV2	3	2	1	3	5	1	5	1	5	1	15
CTG1	3	2	1	3	3	3	3	3	4	2	33
CTG2	2	3	1	3	4	2	2	4	4	2	32
GAM1	4	1	2	2	3	3	3	3	2	4	35
GAM2	4	1	2	2	2	4	4	2	2	4	37
GAM3	4	1	2	2	3	3	3	3	3	3	33
GAV1	2	3	1	3	3	3	2	4	5	1	35
GAV2	3	2	1	3	1	5	4	2	4	2	40
GM1	2	3	1	3	3	3	4	2	4	2	31
GM2	1	4	1	3	4	2	4	2	4	2	27
GM3	3	2	3	1	2	4	5	1	3	3	32
NE1	4	1	1	3	4	2	4	2	3	3	26
TA1	2	3	1	3	2	4	3	3	5	1	37
TAV1	3	2	1	3	3	3	1	5	4	2	39
TAV2	3	2	1	3	4	2	4	2	3	3	27

Illustration 56 - Tableau de notation finale de la sensibilité à la sécheresse pour les aquifères alluviaux.

Critères	Capacité d'infiltration		Temps de demi-décroissance moyen		Capacité régulatrice		Note finale par aquifère poreux
	1		5		3		
Pondération	1		5		3		Note finale par aquifère poreux
Code Projet entité (BD lisa)	Classe	Note	Classe	Note	Classe	Note	
316AA01	2	2	3	2	4	1	15
322AA03	3	1	1	4	4	1	24
326AA05	3	1	3	2	1	4	23
332AA01	3	1	2	3	4	1	19
348AA03	2	2	2	3	3	2	23
356AB01	2	2	4	1	2	3	16
362AA03	1	3	3	2	1	4	25

Illustration 57 - Tableau de notation finale de la sensibilité à la sécheresse pour les aquifères poreux (hors alluvions).

4.6.3. Carte de la sensibilité à la sécheresse des aquifères poreux

Le calcul de l'IRS a permis de définir les classes de sensibilité à la sécheresse des aquifères poreux qui ont pu faire l'objet d'un traitement (présence au moins d'un piézomètre).

5 classes de sensibilité ont été définies variant entre des aquifères très peu sensibles à très sensibles à la sécheresse.

Les aquifères non traités concernent les terrasses anciennes de la Garonne, de l'Adour et du Tarn, ainsi que les alluvions de l'Hers Mort et de l'Arros respectivement affluent de la Garonne et de l'Adour. Toutes ces entités sont peu aquifères, relativement peu étendues et devraient être sensibles à très sensibles à la sécheresse.

D'autre part, l'ensemble des alluvions des petits cours d'eau secondaires, s'écoulant quasiment tous sur les formations molassiques, ne sont que peu ou pas aquifères. Ils sont tous considérés comme très sensibles à la sécheresse.

Les formations molassiques contiennent principalement des nappes captives ou semi captives, de dimensions limitées. Tous ces aquifères sont indépendants les uns des autres, sans aucune connexion hydraulique. Les deux piézomètres traités ne peuvent être représentatifs de l'ensemble de l'entité, mais n'ont qu'une représentativité locale. Les résultats obtenus pour ces 2 ouvrages devront être confrontés avec les nouvelles données acquises dans l'étude en cours sur l'amélioration de la connaissance des formations molassiques portée par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.

L'entité des brèches et conglomérats de la Grèsigne et des argiles à graviers de l'Albigeois se caractérise également par un fonctionnement hydrogéologique relativement complexe, dont la connaissance actuelle est restreinte. Le programme de recherche GAIA (Géologie et Aquifères du sud du bassin Aquitain) en cours de réalisation devrait apporter des éléments nouveaux dans la compréhension du fonctionnement hydrodynamique de ces formations. La note attribuée au point de suivi identifié dans cette entité (09866X0074/F - Valdurenque) la classe parmi les aquifères sensibles au déficit d'apport d'eau, sachant que cet ouvrage semble influencer par des pompages à certaines périodes de la chronique susceptibles d'altérer les résultats obtenus.

La carte finale de la sensibilité à la sécheresse des aquifères poreux est présentée en Illustration 58. Elle appelle aux remarques suivantes :

- 3 entités apparaissent comme très sensibles à la sécheresse. Il s'agit de la basse terrasse de l'Ariège du fait de sa faible épaisseur et sa relativement faible perméabilité des alluvions. L'aquifère poreux des sables et grès du Miocène supérieur est également très sensible. Il constitue la partie sub-affleurante d'un vaste aquifère captif qui s'étend vers l'ouest (principalement dans le département des Landes). Il est fortement entaillé par de nombreux cours d'eau qui le draine. Les calcaires fissurés du Kimméridgien constituent le troisième secteur définie comme très sensible, ils sont présent dans le département du Lot et correspondent à un aquifère de faible perméabilité ;
- 3 entités apparaissent comme très peu sensibles à la sécheresse. Il s'agit des puissantes nappes alluviales de l'Ariège et de l'Adour dont les réserves régulent les périodes de déficit d'apport d'eau. La partie affleurante des calcaires de l'Hettangien qui plongent rapidement vers l'ouest, comparativement aux aquifères alluviaux, n'est pas sensible à la sécheresse, mais au regard de sa faible inertie, il devrait être considéré plus sensible à la sécheresse s'il était à rapprocher des types d'aquifères apparentés (calcaires plus ou moins karstifiés par exemple).

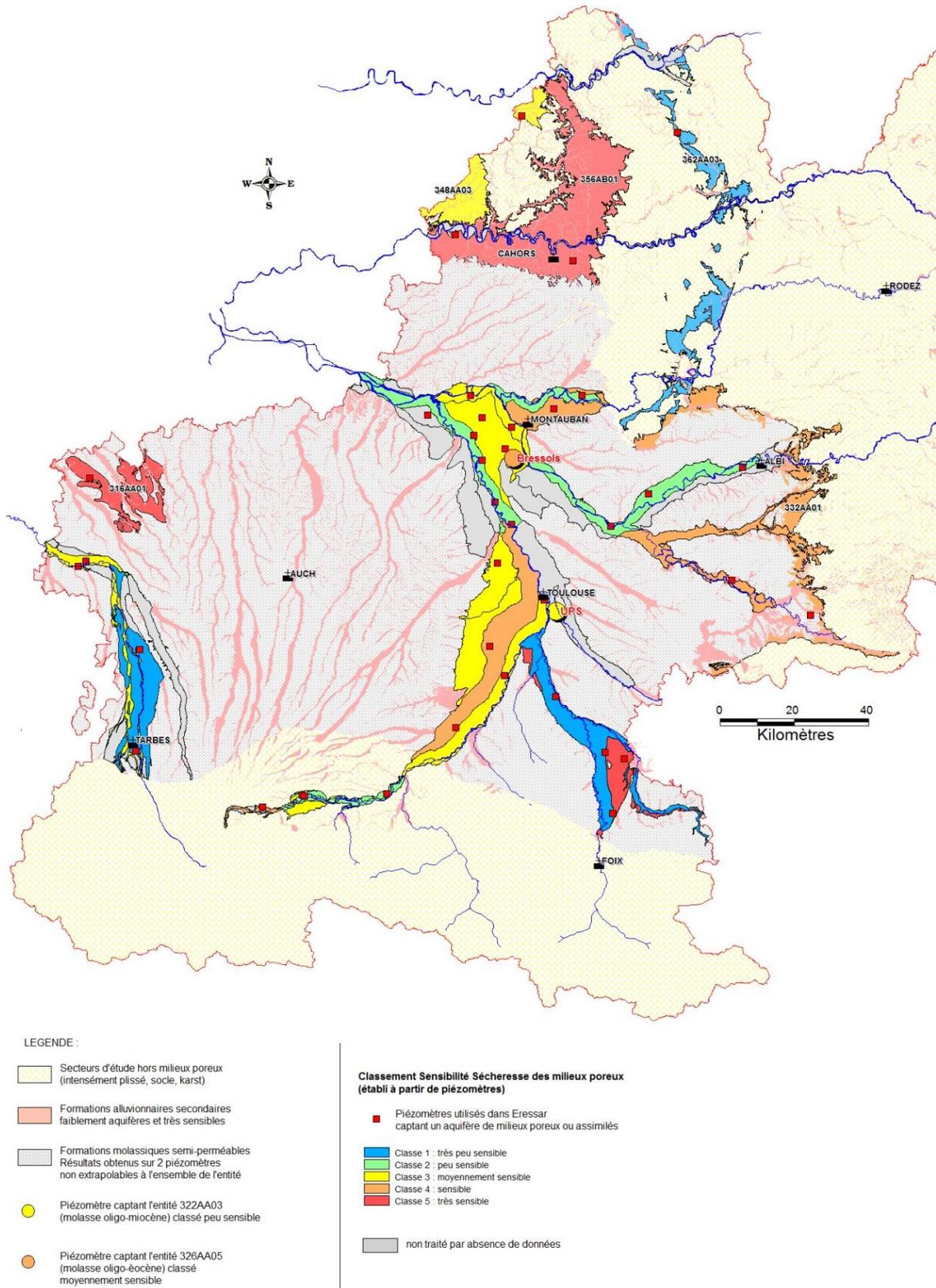


Illustration 58 - Carte de la sensibilité à la sécheresse des aquifères poreux.

4.7. UTILISATION DES RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DE LA LOI DE DÉCROISSANCE EXPONENTIELLE

Outre la prise en compte des résultats de la modélisation de la loi de décroissance exponentielle comme critères d'évaluation de la résistance à la sécheresse des aquifères, une tentative d'utilisation des données de calages obtenus a été initié à des fins de prédictions en termes d'étiage et de sa sévérité.

4.7.1. Impact de la recharge hivernale et printanière sur le temps de demi-décroissance

Le modèle de loi de décroissance exponentielle utilisé ici suppose une indépendance du phénomène de recharge par rapport aux paramètres calés, i.e. H_b , H_0 et $t_{1/2}$. Cette indépendance peut être vérifiée en traçant les graphiques de variations annuelles des paramètres H_b , H_0 , H_b+H_0 et $t_{1/2}$ en fonction de la pluie efficace enregistrée à la station météorologique la plus proche, calculée sur la période de recharge hivernale et printanière. Ce travail est illustré sur l'illustration 59 pour le piézomètre du Verdier.

Sur l'illustration 59, parties a, b et c, les liens entre H_b , H_0 , H_b+H_0 et $t_{1/2}$ avec la pluie efficace ne sont pas systématiques. En revanche, en prenant en considération les variations de $t_{1/2}$ avec la recharge hivernale, printanière et globale ou cumulée (= recharge hivernale et printanière cumulée en valeur absolue) évaluée directement à l'aide de la chronique piézométrique, une corrélation plus directe apparaît entre $t_{1/2}$ évalué au cours de l'étiage et la recharge hivernale et printanière précédente (Illustration 59, partie d).

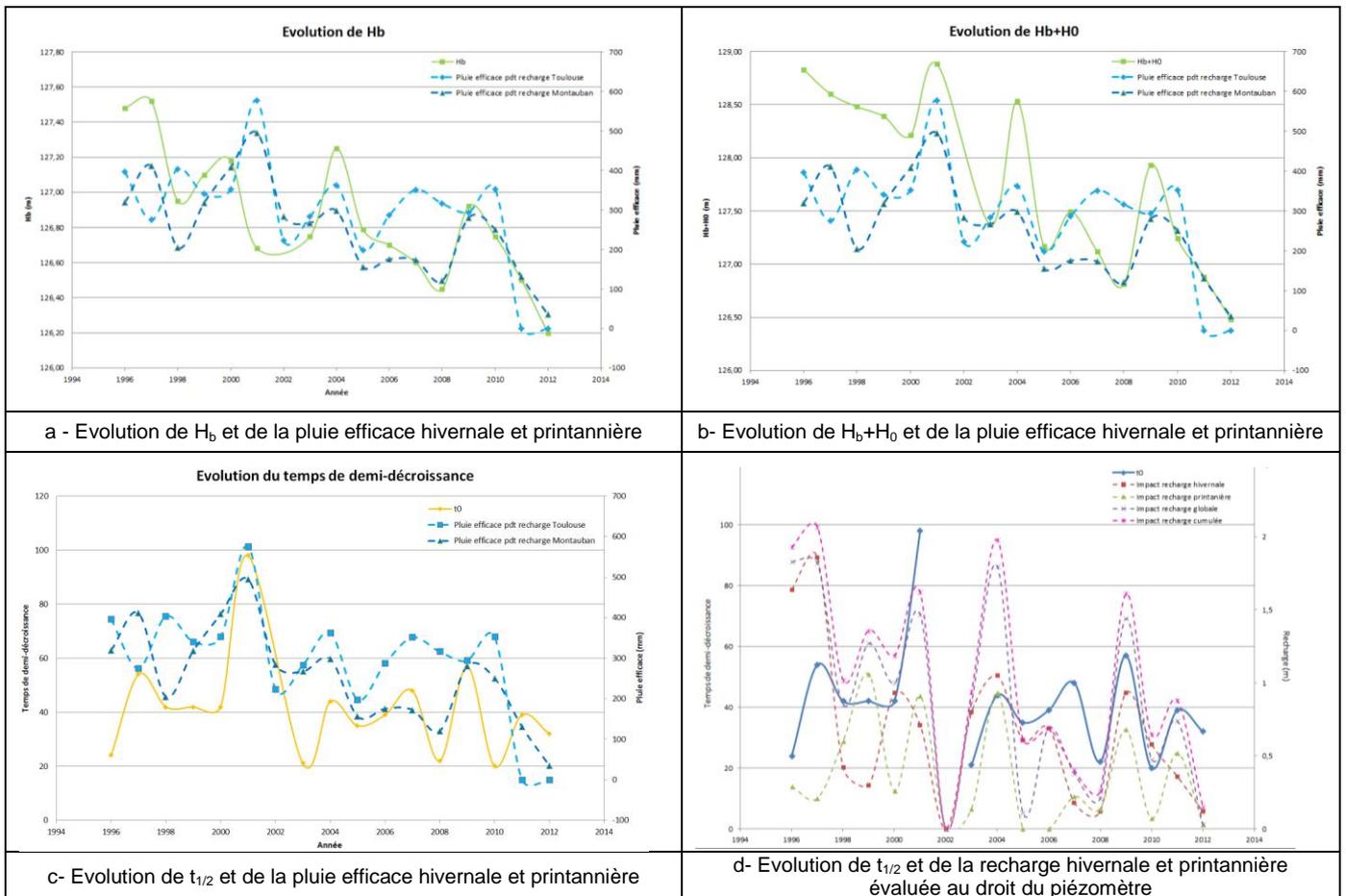


Illustration 59 - Influence de la pluie et de la recharge sur les paramètres de calage de la loi de décroissance exponentielle - Exemple du piézomètre du Verdier.

En effet, de faibles à très faibles recharges hivernale et printanière sont observées entraînant un temps de demi-décroissance faible à très faible et vice-versa. Lorsque la recharge hivernale est faible à très faible et que la recharge printanière est importante à très importante, c'est la recharge cumulée qui donne l'intervalle d'appartenance du temps de demi-décroissance.

4.7.2. Utilisation du calage de la loi de décroissance exponentielle à des fins prédictives

En attribuant des signes -- / - / + / ++ en fonction de l'appartenance des paramètres au 1^{er}, 2nd, 3^{ème} ou dernier quartile (quartile calculés sur la longueur de la chronique disponible), l'observation ci-dessus conduit à l'arbre décisionnel repris sur l'illustration 60. Cet arbre permet d'évaluer la sévérité, ou, à contrario, la clémence de l'étiage à venir en fonction de la recharge hivernale et printanière sur le piézomètre du Verdier.

Recharge hivernale	Recharge printanière	Recharge globale	t0	Variation de t0	Variation de h_étiage
+ / ++	+ / ++	indifférent	+ / ++	++	
- / --	- / --	indifférent	- / --	- / --	- / --
+ / ++	- / --	- / --	- / --	tendance à - / --	tendance à - / --
+ / ++	- / --	+ / ++	+ / ++	tendance + / ++	tendance + / ++
- / --	+ / ++	- / --	- / --	tendance à - / --	tendance à - / --
- / --	+ / ++	+ / ++	+ / ++	tendance + / ++	tendance + / ++

Illustration 60 - Arbre décisionnel de la sévérité de l'étiage de l'année n en fonction de la recharge hivernale et printanière de l'année n pour le piézomètre du Verdier.

L'illustration 60 montre que de faibles à très faibles recharges hivernale et printanière entraînent un temps de demi-décroissance faible à très faible et une diminution de la hauteur piézométrique en fin d'étiage par rapport à l'année précédente. Ceci peut se traduire par un étiage important à très important. Lorsque la recharge hivernale est faible à très faible et que la recharge printanière est importante à très importante, c'est la recharge cumulée qui donne l'importance de l'étiage. **Cet arbre décisionnel ouvre la voie vers des prédictions en terme d'étiage et de sa sévérité.**

Cependant, ce constat a été dressé ici pour le piézomètre du Verdier et **n'est valable que pour cet ouvrage**. Des tests ont été réalisés sur d'autres ouvrages. Il s'avère que **les arbres décisionnels sont différents d'un ouvrage à l'autre** et peuvent, dans certains cas, être **beaucoup plus compliqués** et nécessiter notamment la prise en compte de l'inertie du système.

Ce travail a été mené à titre exploratoire et demande à être élargi et complété avec d'autres techniques d'analyses du signal permettant d'évaluer notamment l'inertie du système.

4.8. AUTRES TECHNIQUES D'ANALYSE DU SIGNAL COMPLÉMENTAIRES À LA LOI DE DÉCROISSANCE EXPONENTIELLE

Ce paragraphe est introduit ici à titre illustratif et n'a pas vocation à faire un état de l'art des techniques d'analyse du signal.

Moyennant le développement de quelques algorithmes et l'existence d'une chronique piézométrique suffisamment longue à pas de temps régulier, de nombreuses informations peuvent être obtenues et utilisées, couplées aux informations rendues disponibles dans le cadre de cette étude, pour mieux comprendre le fonctionnement du système et évaluer les potentialités en termes de prédiction de la sévérité / clémence des étiages.

4.8.1. Informations concernant les hauteurs piézométriques moyennes, minimales et maximales et leurs évolutions

L'observation de la piézométrie minimale, maximale et moyenne permet d'obtenir une information rapide et synthétique concernant l'allure générale de la chronique piézométrique en un lieu donné. Les Illustrations 61, 62 et 63 montrent que les années 2000, 2004 et 2009 observent une piézométrie relativement haute, avec des maxima, moyennes et minima plus importants que les autres années sur le piézomètre de Ondes. *A contrario*, les années 1998, 2005-2006-2007-2008 et 2011-2012 sont des années relativement sèches sur ce même piézomètre. Ces observations se corrélient bien aux informations obtenues grâce à la moyenne mobile équipondérée exposées dans le paragraphe suivant et sont confirmées par les pluies efficaces calculées sur les stations météorologiques les plus proches, à savoir Toulouse et Montauban.

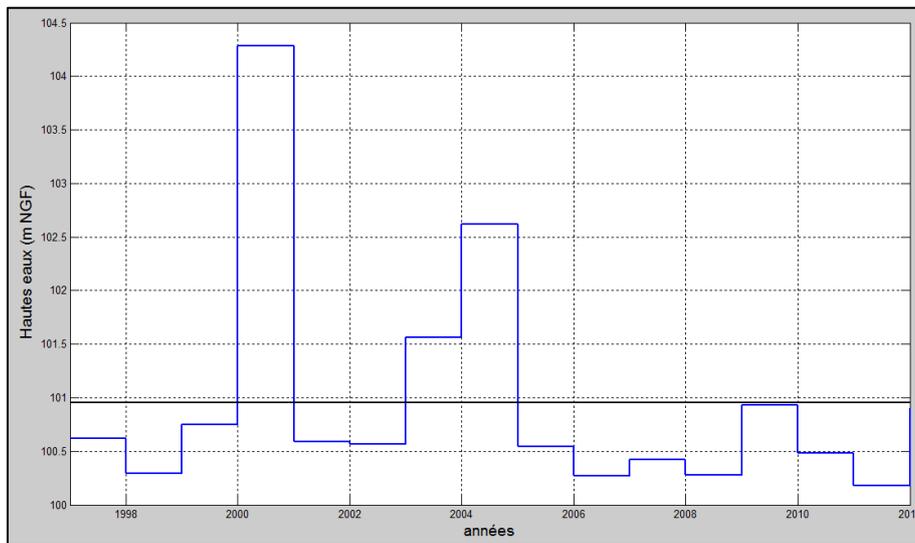


Illustration 61 - Hautes eaux sur le piézomètre de Ondes.

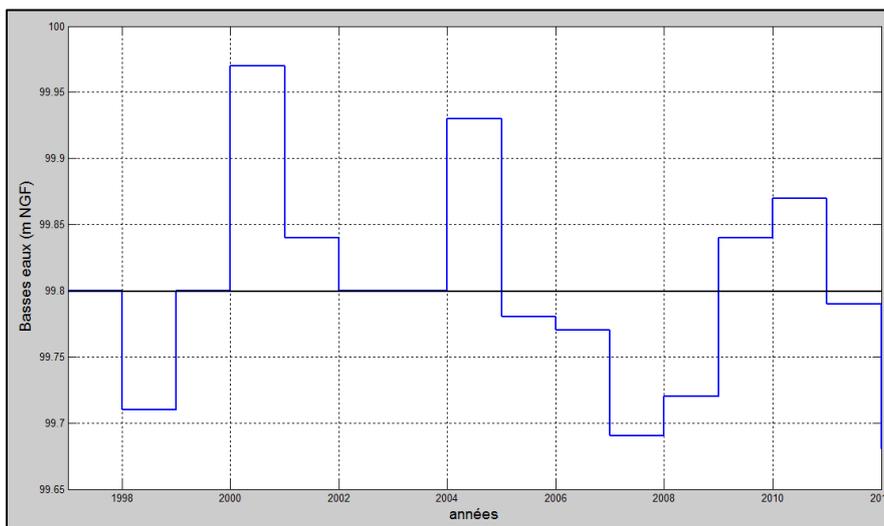


Illustration 62 - Basses eaux sur le piézomètre de Ondes.

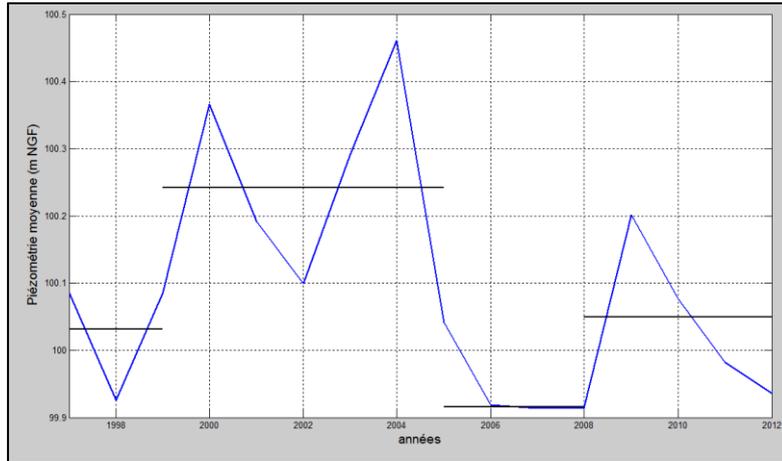


Illustration 63 - Piézométrie moyenne sur le piézomètre de Ondes.

Ces informations peuvent être rapportées sur un même graphique pour une meilleure appréhension des ordres de grandeur (Illustration 64).

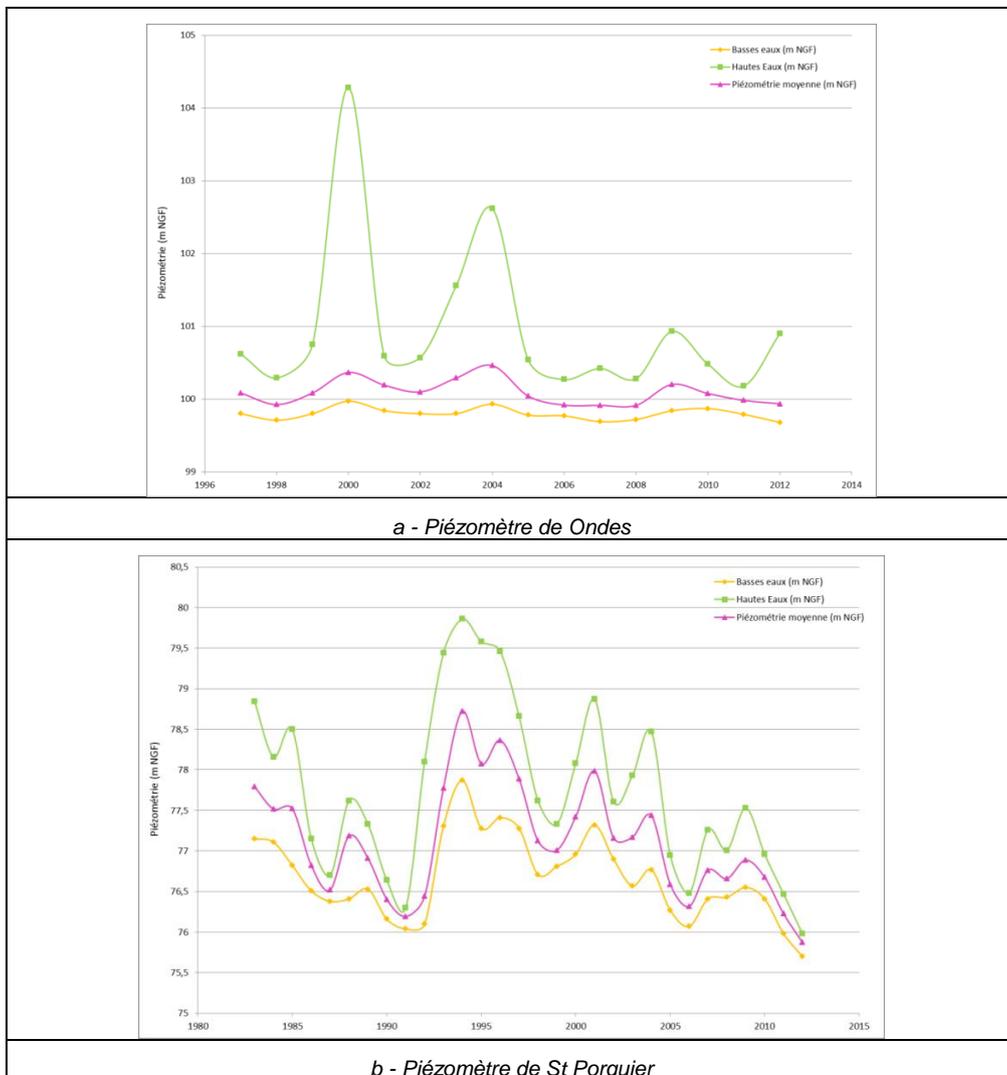


Illustration 64 - Piézométrie minimale, maximale et moyenne sur les piézomètres de Ondes et de Saint-Porquier.

4.8.2. Informations concernant l'évolution globale de la piézométrie

Dans le cadre de cette étude, la moyenne mobile équipondérée permet d'évaluer les hauteurs piézométriques en s'affranchissant de la variante saisonnière, permettant ainsi de souligner la **variation sur le long terme de la hauteur piézométrique**.

Sur le piézomètre de Ondes, par exemple, la moyenne mobile équipondérée et sa tendance à long terme ont été calculées et sont disponibles sur l'illustration 65. À titre de comparaison, la chronique piézométrique de Ondes est visible sur l'illustration 66.

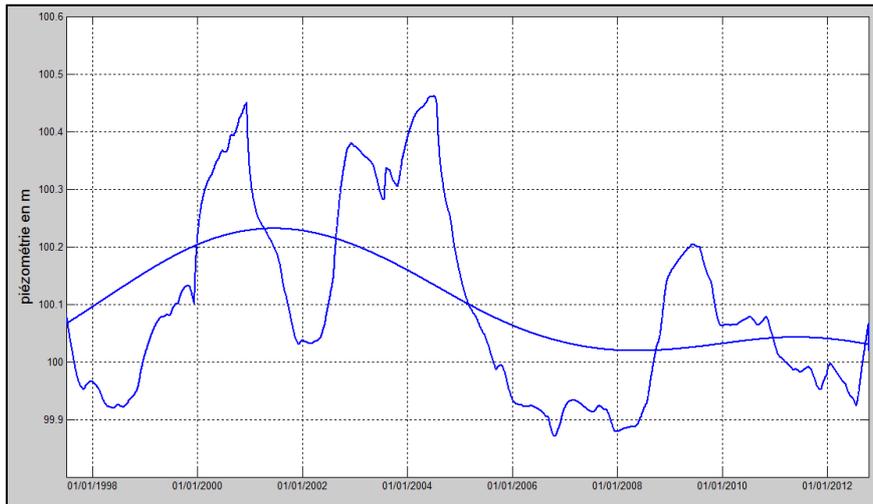


Illustration 65 - Moyenne mobile équipondérée et tendance (Piézomètre de Ondes).

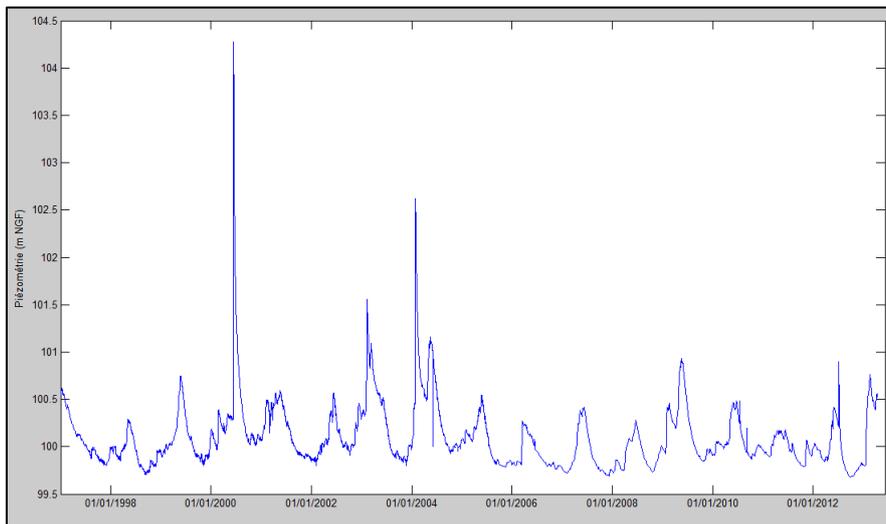


Illustration 66 - Chronique piézométrique (Piézomètre de Ondes).

En comparant les 2 graphiques ci-dessus, il apparaît que les grandes tendances de la chronique sont clairement observées sur le premier graphique alors qu'elles sont moins visibles sur le second. Les années 2000-2001, 2003-2004 et 2009-2010 observent des niveaux d'eau relativement importants comparés aux années 1998, 2006-2007 et 2011-2012.

4.8.3. Informations concernant les dates d'occurrence des hautes eaux et basses eaux

Les périodes de fin de recharge (hautes eaux) et fin d'étiage (basses eaux) peuvent être rapidement identifiées pour chaque année de chronique disponible. À titre d'exemple, les périodes de basses eaux et hautes eaux sont illustrées pour le piézomètre de Ondes sur les Illustrations 67 et 68 respectivement. En général, les basses eaux sont enregistrées au mois d'octobre ou novembre, alors que les hautes eaux sont enregistrées au mois de mai ou juin.

Certaines années dérogent à cette observation, d'après les graphiques. Cependant, en réalité, les anomalies observées dans les périodes de basses eaux en 2000, 2002 et 2008 sont associées à une faible recharge hivernale et une recharge printanière importante, entraînant un niveau piézométrique en période de recharge hivernale plus faible qu'en fin d'étiage, d'où les dates sur le graphique. De même, les anomalies relatives aux périodes de hautes eaux en 2003, 2004 et 2006, reflètent une faible recharge printanière, recharge masquée par une recharge hivernale plus importante dans l'analyse du signal.

Ces graphiques sont donc à interpréter avec précaution, en gardant à l'esprit les chroniques piézométriques. Une correction manuelle s'avère nécessaire dans les cas observés ci-dessus. Moyennant ces modifications, ces graphiques peuvent être utilisés pour mettre en évidence des différences de comportement à l'échelle des entités hydrogéologiques, d'un département voire d'une région.

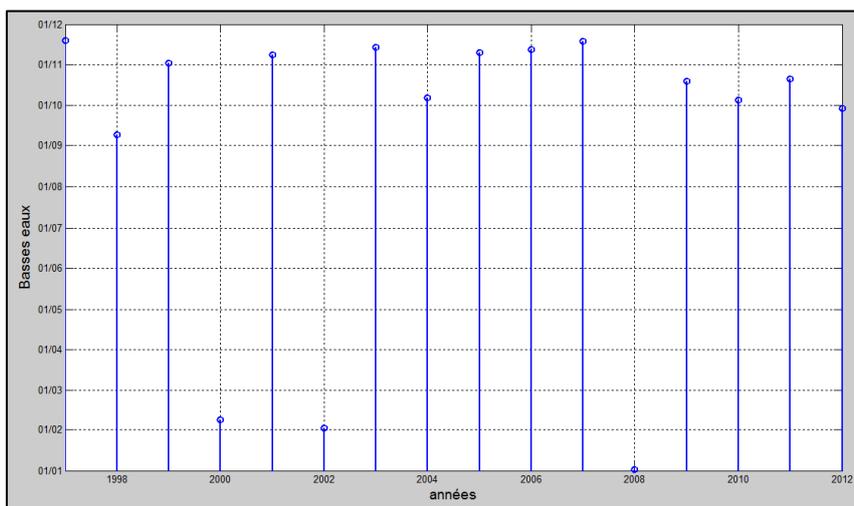


Illustration 67 - Date d'occurrence de fin d'étiage (Piézomètre de Ondes).

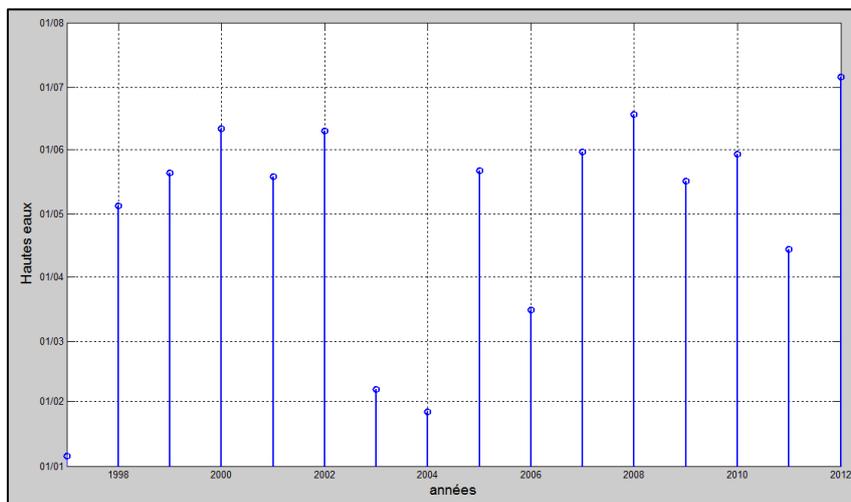


Illustration 68 - Date d'occurrence des hautes eaux (Piézomètre de Ondes).

5. Évaluation de la sensibilité à la sécheresse des aquifères en domaine de socle

5.1. STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES AQUIFÈRES DE SOCLE : RAPPELS

5.1.1. Concepts d'aquifères de socle

Jusque vers la fin des années 1990, l'eau souterraine des régions de socle, métamorphique ou plutonique était considérée comme localisée dans des aquifères discontinus, isolés les uns des autres (absence de nappe généralisée), et associés à des couloirs de fracturation plus ou moins verticaux hérités de l'histoire tectonique de la région (Illustration 69). Il était considéré que ces aquifères étaient alimentés depuis la surface à travers une mince couche d'altération (de 2 à 3 m d'épaisseur).

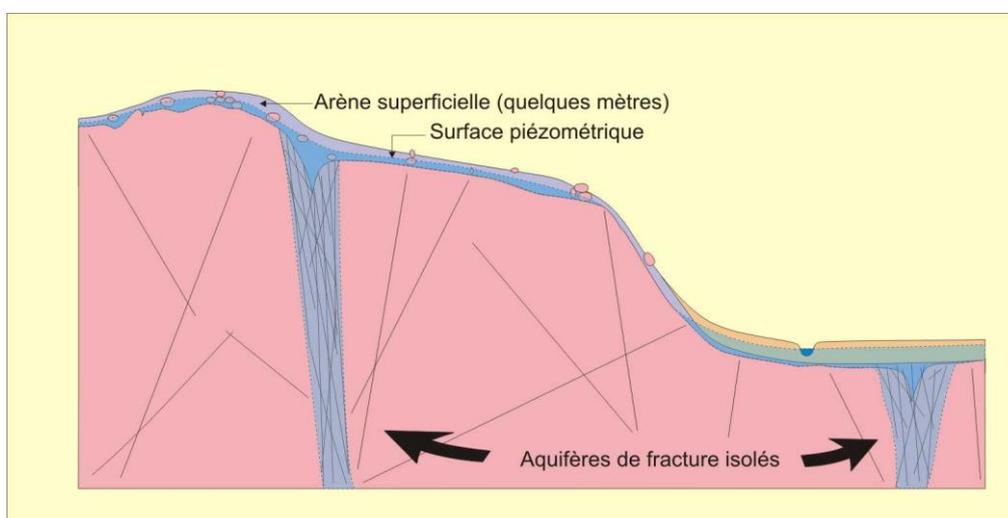


Illustration 69 - Modèle ancien d'aquifère de socle.

Par la suite, les travaux de recherche développés au BRGM sur les propriétés physiques des profils d'altération ont abouti à la révision du concept d'aquifère de socle. Le premier résultat a été de mettre en évidence, sous la partie meuble des profils d'altération, une zone de roche dure intensément fissurée (appelée « horizon fissuré »), d'une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres et surmontée de formations meubles (appelées « altérites »). Les observations ont montré que l'épaisseur de l'horizon fissuré est environ le double de celle de la partie meuble des profils d'altération lorsque ceux-ci sont complets. L'origine des fissures constituant l'horizon fissuré réside dans le processus même de l'altération de certains minéraux, notamment la biotite, les pyroxènes, l'olivine, très instables en présence d'eau et s'altèrent en augmentant de volume.

Le modèle actuel d'aquifère de socle (Illustration 70) consiste ainsi en un aquifère multicouches (altérites meubles et horizon fissuré), stratiforme, avec présence d'une nappe continue comme dans les bassins sédimentaires.

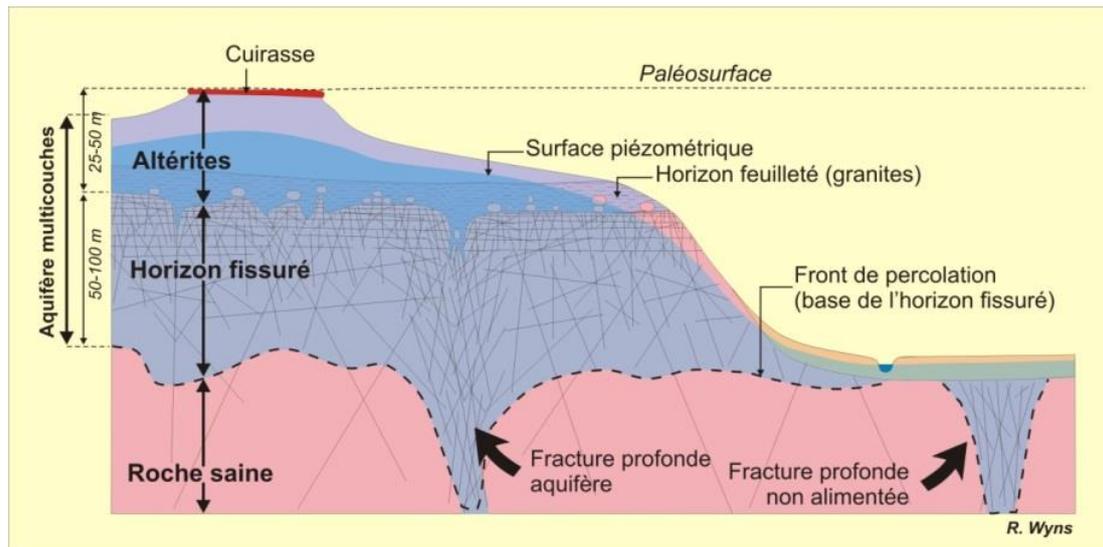


Illustration 70 - Actuel modèle conceptuel d'aquifère de socle.

Les roches de socle granitique ne sont généralement aquifères qu'au sein de leur frange superficielle qui a été soumise à des processus d'altération. Le profil d'altération type comprend, de haut en bas :

- une cuirasse ferrugineuse ou bauxitique peu épaisse dure et souvent absente ;
- des altérites meubles qui résultent d'une altération très poussée de la roche originelle, avec une perméabilité relativement faible et des capacités de stockage significatives ;
- un horizon fissuré est constitué de roche dure affectée, sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, par la présence de fissures de fréquence décroissante avec la profondeur, qui résultent, elles aussi, du processus d'altération. Cet horizon assure la fonction transmissive de l'aquifère et est capté par la plupart des forages réalisés en région de socle ;
- le substratum sain qui n'est perméable que très localement, là où il est affecté par des fractures d'origine tectonique, le plus souvent sub-verticales.

Les spécificités des propriétés hydrodynamiques de ces trois horizons permettent de distinguer grossièrement deux types de contextes aquifères différents, suivant que l'effet de l'altération, de l'érosion et de la tectonique auront affecté les formations de socle. Sont différenciés :

- des aquifères de type « fissuré avec couverture d'altérites », correspondant à des environnements où le profil d'altération aura été préservé de l'érosion ;
- des aquifères de type « fissuré sans couverture d'altérites », où l'érosion aura fait disparaître la majeure partie des altérites et une partie de l'horizon fissuré ou bien lorsque la fissuration est principalement liée à de la fracturation d'origine tectonique. Les observations sur forages a montré que ces types d'aquifères sont généralement moins transmissifs.

La fracturation tectonique peut intervenir dans les deux types de contexte.

Les nombreuses études réalisées ont montré que 85 à 90 % de la réserve en eau est contenue dans l'horizon fissuré, principalement dans sa partie supérieure.

5.1.2. Notions sur la résistance à la sécheresse des aquifères de socle

Les aquifères de socle sont des aquifères composites et discontinus. Ils se caractérisent principalement par une perméabilité de fissures et de fractures. En raison de l'importante variabilité spatiale de leurs propriétés hydrodynamiques, de leurs faibles perméabilités et porosités, et de leurs conditions d'alimentation principalement par les précipitations, ils sont généralement très peu résistants à la sécheresse, comparativement aux grands ensembles aquifères de type alluviaux, sédimentaires, et karstiques. Ils le seront d'autant plus du fait du caractère compartimenté de ces aquifères (longueur des fissures d'altération de l'ordre de 5 à 40 m en moyenne, « fermeture » des fractures tectoniques du fait de l'augmentation de la pression des terrains avec la profondeur, etc.), le plus souvent largement érodés et entaillés profondément par les cours d'eau dans lesquels ils se vidangent.

Le caractère composite de ces aquifères est généralement défini par :

- un premier horizon d'altérites de nature et d'épaisseur très variable en fonction de la nature géologique de la roche mère, des processus d'altération mis en jeu, de l'intensité et de l'âge de la fracturation d'origine tectonique, mais aussi des conditions de préservation de ce profil d'altération (géomorphologie, érosion, etc.). Il influe très largement sur les conditions de recharge et de dynamique de la nappe. Ces altérites peuvent être totalement décapées engendrant des conditions de recharge de la nappe sensiblement différentes ;
- un second compartiment (horizon fissuré et compartiment aquifère principal) pourvu de propriétés hydrodynamiques qui ont fait l'objet d'une caractérisation de détail (Maréchal *et al.*, 2005). Au sein des granites, seules quelques fractures subhorizontales présentent une perméabilité suffisante pour permettre des « venues d'eau » significatives. D'une perméabilité voisine de 10^{-4} m/s, leur extension latérale est comprise entre 5 et 40 m environ. Des joints subverticaux, d'une perméabilité 10 fois moindre en moyenne, contribuent à la connexion du réseau. L'ensemble des autres fractures de moindre perméabilité est à l'origine d'une « perméabilité de blocs », voisine de $5 \cdot 10^{-8}$ m/s, significativement plus forte que la perméabilité de matrice (10^{-14} à 10^{-9} m/s). Ces « blocs » assurent 90 % de l'emmagasinement total de l'horizon fissuré de l'aquifère (de l'ordre de 0,5 à 1 %), les fractures perméables ne contribuant quant à elles que pour 10 % à cet emmagasinement (0,05 à 0,1 %). Ces propriétés hydrauliques très contrastées influent sensiblement sur l'inertie de la nappe, et la position de cet horizon par rapport au niveau de base que constituent les rivières joue un rôle prépondérant sur les conditions de vidange de la nappe ;
- le substratum rocheux sain sous-jacent, quant à lui ne présente des perméabilités significatives que très localement, et n'offre qu'une très faible capacité de stockage d'eau souterraine à l'échelle du massif (porosité efficace $\ll 10^{-4}$).

La sensibilité de ces aquifères à la sécheresse est étroitement liée à :

- la capacité des formations mère à développer un aquifère d'altération aquifère ;
- la préservation de ce profil d'altération au cours du temps, notamment la présence ou non de l'horizon altéritique ;
- la nature plus ou moins argileuse de cet horizon superficiel qui lui confère un caractère plus ou moins ruisselant vis-à-vis des pluies efficaces ;
- la taille de l'aquifère et la densité de drainage qui l'affecte et qui joue un rôle prépondérant dans la vidange de l'aquifère selon sa position par rapport au niveau de base ;

- l'inertie de la nappe par sa faculté de réagir plus ou moins rapidement aux précipitations conjuguée au tarissement naturel de la nappe en période d'étiage, ce dernier étant étroitement lié aux différentes porosités de fissures de la roche (cf. ci-avant).

Longtemps considérés comme peu à pas aquifères exceptés très localement (fracture tectonique), l'exploitation des aquifères de socle s'est focalisée sur des sources très superficielles à faible débit (rattachées à un petit bassin versant) issues des formations altéritiques à la faveur d'une rupture de pente dans la topographie. Ces sources sont exclusivement dépendantes des précipitations et sont donc extrêmement sensibles à la sécheresse. Peu d'ouvrages souterrains existent et ceux-ci sont peu profonds captant la plupart du temps les formations altéritiques meubles.

Ces constatations entraînent directement que ces aquifères ont été longtemps délaissés en ce qui concerne une optique de gestion globale, et aucun suivi quantitatif de la nappe, notamment de la nappe contenue dans l'horizon fissuré, n'a été mis en place dans les années passées.

Dans le cadre du présent programme, du fait d'un manque de données susceptibles de renseigner les paramètres essentiels pour caractériser la sensibilité à la sécheresse des aquifères de socle, il est cependant proposé une première classification de la résistance à la sécheresse de ces aquifères en fonction des données à disposition. Cette approche permet de mieux définir les perspectives d'amélioration des connaissances nécessaires à une gestion globale et efficace des aquifères de socle qui constituent le plus souvent la seule ressource locale en eau pour l'alimentation en eau potable.

Il est bien évident que cette nuance apportée dans la classification des aquifères de socle ne peut être liée aux autres classifications effectuées dans le cadre du présent programme pour les autres types d'aquifères (alluviaux, karsts), les aquifères de socle restant toujours bien moins résistants à la sécheresse que ces derniers.

5.2. LES FORMATIONS DE SOCLE EN MIDI-PYRÉNÉES

Les formations de socle sont constituées de roches cristallines plutoniques (granites) et métamorphiques (gneiss, schistes, micaschistes, etc.) du Précambrien et du Paléozoïque (anté-Permien). En région Midi-Pyrénées, elles couvrent environ 11 000 km² (Illustration 71) et se répartissent principalement :

- au sud du Massif central (Montagne Noire, Monts Lacaune, Rouergue, etc) dans les départements de l'Aveyron, du Tarn, et dans une moindre mesure la partie nord-est du Lot : superficie de 8 200 km² ;
- dans la zone axiale pyrénéenne, majoritairement dans le département de l'Ariège, et dans une moindre mesure le sud de la Haute-Garonne et les Hautes-Pyrénées : superficie de 2 800 km² .

Un diagnostic sur les potentialités aquifères de ces formations a été engagé en Midi-Pyrénées à travers deux programmes d'amélioration des connaissances :

- **POTAMAC** (2008-2010) (*POTentialités Aquifères des formations de socle : secteur MAssif Central*). Ce programme est achevé et c'est principalement sur la base des données et résultats qui y ont été obtenus que s'appuie la présente étude pour estimer la résistance à la sécheresse des aquifères de socle ;
- **POTAPYR** (2013-2015) (*POTentialités Aquifères des formations de la chaîne PYRénéenne*). Programme en cours qui s'achèvera fin 2015.

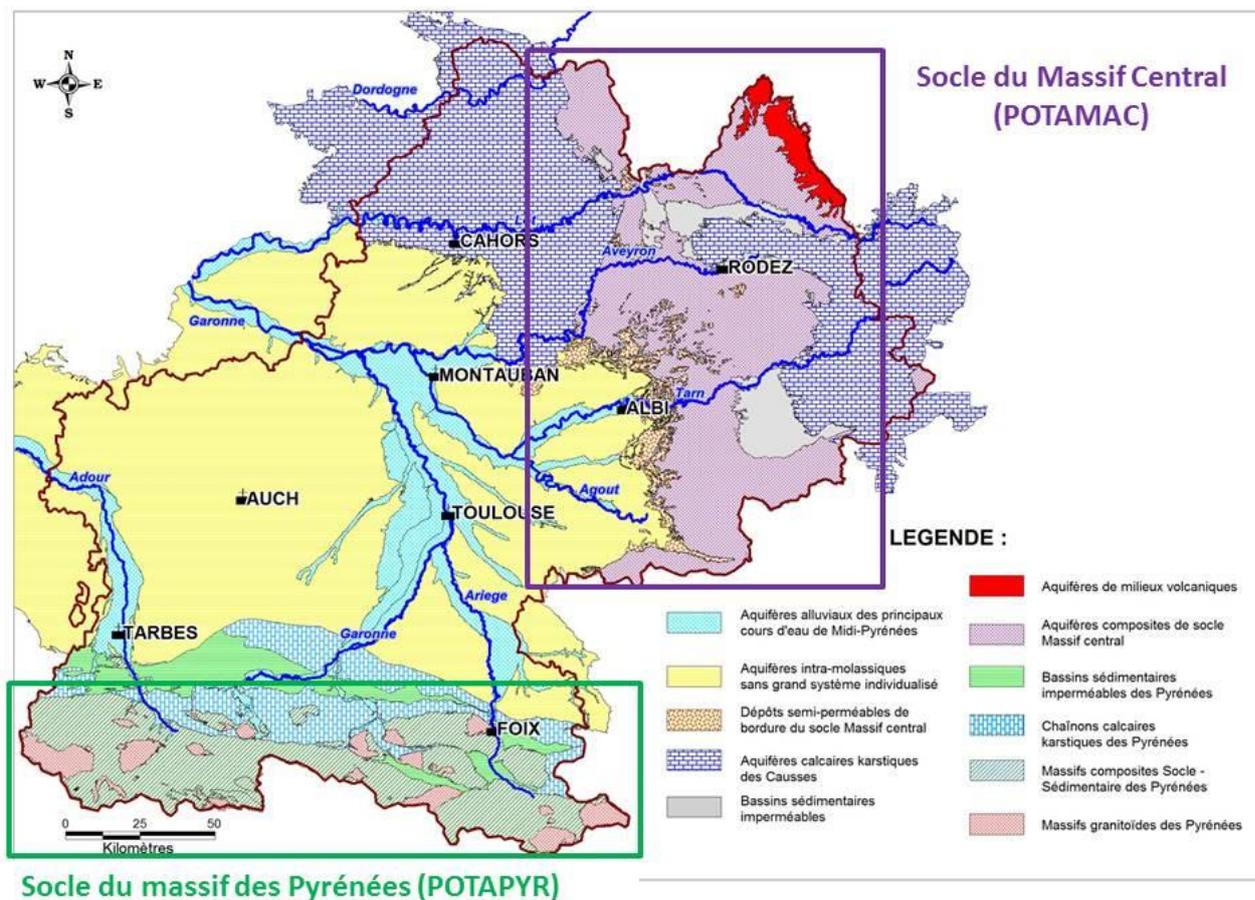


Illustration 71 - Localisation des formations de socle en région Midi-Pyrénées.

Ces programmes ont pour principal objectif d'établir une typologie des formations de socle en termes de potentialités aquifères, et de hiérarchiser ces formations en fonction de leur intérêt hydrogéologique sur l'ensemble de la région Midi-Pyrénées. Ils ont pour objectifs d'améliorer la connaissance des potentialités aquifères des formations de socle pour permettre aux décideurs de mieux guider leurs actions locales dans le cadre de programmes complémentaires sur des formations de socle identifiées comme intéressantes en fonction des besoins et contraintes identifiées.

En raison du déphasage entre le programme ERESSAR et le programme POTAPYR (actuellement en cours d'acquisition de données), seul le secteur concerné par le programme POTAMAC est étudié dans le cadre de la présente étude.

Les résultats du programme POTAPYR en 2016 devraient compléter les travaux effectués dans le cadre du programme ERESSAR. Dans cette attente, les reconnaissances géologiques de l'ensemble des formations de socle dans le massif des Pyrénées ont déjà permis de dresser une première carte de capacité des formations à développer un profil d'altération (Illustration 72). La complexité géologique des Pyrénées nécessitera de réaliser des approches hydrogéologiques à l'échelle de massifs intégrant l'ensemble des formations (socle mais aussi karstique, fluvio-glaciaire, ...). Ces travaux s'appuient sur des reconnaissances de terrain systématiques. Les résultats obtenus seront restitués, à l'échelle régionale (1/250 000), sous la forme d'un atlas hydrogéologique par massif.

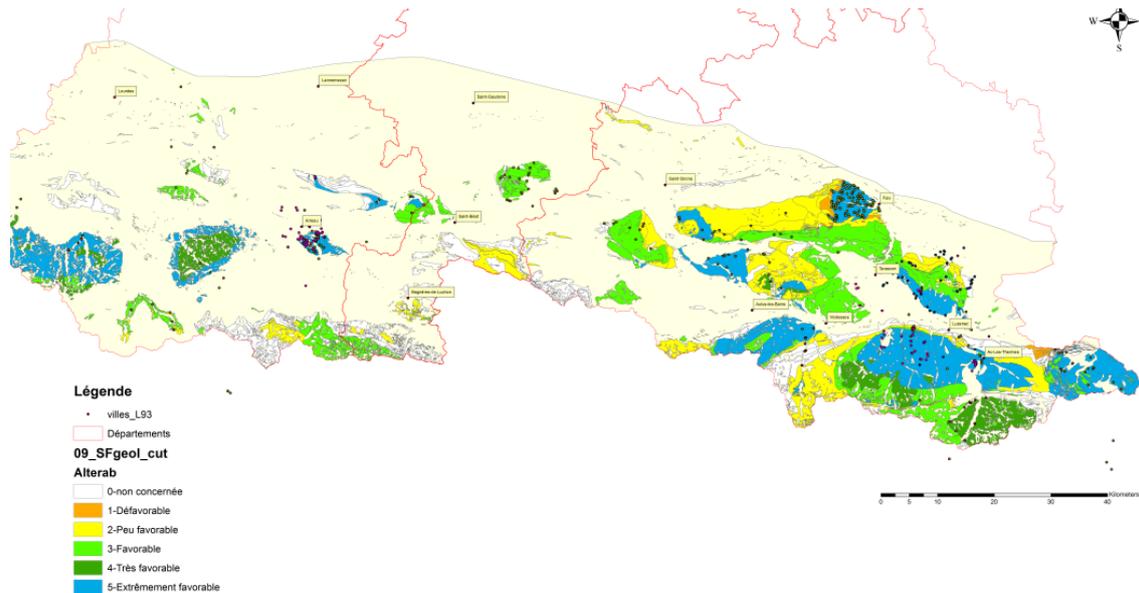


Illustration 72 - Altérabilité des formations de socle dans le massif des Pyrénées (programme POTAPYR).

À la différence du projet POTAMAC, les formations pyrénéennes de socle, hormis certains massifs granitiques, ne semblent pas offrir de réelles potentialités aquifères au sens de l'exploitabilité (vidange rapide des aquifères, profil d'altération fortement tronqué). À ce titre, la quasi-totalité des aquifères de socle dans les Pyrénées peuvent être classés comme extrêmement peu résistants à la sécheresse. Seules deux unités (granites du Quérigut, granites de Foix) voient leur profil d'altération bien préservé et devraient être dotées d'une résistance à la sécheresse sensiblement plus grande.

En revanche, les aquifères de socle pyrénéen jouent un rôle prépondérant, dans le soutien d'étiage des rivières (rôle de retardateur) mais aussi dans les interactions avec les autres formations plus perméables (glaciaires par exemple) qui constituent alors un réceptacle des eaux issues du massif, et forment un aquifère à fort potentiel et sensiblement plus résistant à la sécheresse. Ces observations seront à relativiser par le contexte de hautes montagnes pour lesquelles les conditions de recharge sont bien plus favorables que dans le secteur du Massif central (fonte progressive de la neige alimentant sur la durée les aquifères de montagne).

5.3. INDICATEURS DE SENSIBILITÉ À LA SÉCHERESSE DES AQUIFÈRES DE SOCLE : DIAGNOSTIC DES DONNÉES DISPONIBLES

L'évaluation de la résistance à la sécheresse des aquifères de socle se base principalement sur 3 critères :

- **la taille et la puissance de l'aquifère.** Ce critère détermine la plus ou moins grande inertie de l'aquifère. Pour les aquifères de socle, il s'agit tout d'abord d'identifier, selon les nouveaux concepts (cf. § 5.1.1), la présence de formations ayant développé un profil d'altération susceptible d'être aquifère (fracturation ouverte et préservée). Ce critère pourra être établi à partir des cartes d'altérabilité et de potentiel aquifère. Ce dernier traduit assez fidèlement l'épaisseur de l'aquifère (épaisseur du profil d'altération), et son caractère capacitif (présence d'un horizon fissuré plus ou moins bien développé). Une faible résistance à la sécheresse est en effet liée à de faibles réserves (aquifère peu épais et peu capacitif). Cependant l'altérabilité et le potentiel aquifère ne permet pas ici de préciser, la taille de l'aquifère et notamment le compartimentage des aquifères de socle et les conditions de vidange dans les cours d'eau ;

- **la densité de drainage.** Ce critère permet d'estimer le caractère « infiltrant » ou « ruisselant » d'une zone vis-à-vis des apports d'eau naturels (pluies efficaces). Les secteurs à faible densité de drainage seront ainsi dotés d'une résistance à la sécheresse plus forte, le caractère infiltrant prévalant. En ce qui concerne plus spécifiquement les aquifères de socle, ceux-ci ne sont généralement pas « soutenus » à leurs limites par les cours d'eau, mais ont un rôle quasi exclusif de soutien à l'étiage des cours d'eau. Une forte densité de drainage est censée représentée assez fidèlement le compartimentage des aquifères, leur plus petite taille donc, et les conditions de vidange des horizons altéritiques et fissurés qui se placeraient au-dessus du niveau de base. Le rapport de la somme des longueurs des cours d'eau à la superficie au bassin versant auquel ils appartiennent quantifie ce critère. La décomposition des hydrogrammes des rivières (écoulements lents et rapides) permet un contrôle de la cohérence des résultats. La difficulté réside essentiellement dans la localisation des stations de jaugeage des rivières dont le bassin versant n'est pas homogène d'un point de vue géologique et hydrogéologique. D'autre part la présence et la nature des altérites jouent un rôle prépondérant dans leur capacité à favoriser les précipitations efficaces, donc la recharge de l'aquifère composite. Malheureusement, nous verrons que cette donnée n'est pas disponible à une échelle de travail adaptée pour la présente étude ;
- **le temps de demi-décroissance de la nappe.** Lorsqu'un aquifère n'est plus alimenté pendant une période de temps assez longue, le niveau de la nappe, en l'absence de prélèvements, va baisser jusqu'à stabilisation à une cote minimale correspondant à l'exutoire de cette nappe (le niveau de base). Ce critère exprime la loi de vidange de la nappe et le paramètre « temps de demi-décroissance de la nappe » est directement lié à la capacité de l'aquifère à résister à la sécheresse. Plus ce temps est long plus l'aquifère sera résistant. Il nécessite la disponibilité de chroniques piézométriques ou de débits de sources suffisamment longues pour être représentatives de la dynamique de l'aquifère. Comme mentionné au chapitre 5.2, les aquifères de socle n'ont jamais fait l'objet de suivi quantitatif, et aucune chronique n'était disponible sur le secteur d'étude. Les seules données disponibles dans le cadre du présent programme sont celles qui y ont été acquises par la mise en place d'un suivi des niveaux d'eau sur plusieurs points d'observation. De fait, la durée des mesures (un cycle hydrologique) est jugée largement insuffisante pour permettre une représentativité correcte de ce paramètre, notamment vis-à-vis des conditions météorologiques particulièrement atypiques en 2014 durant la période d'étiage (fortes précipitations). Le contrôle de la cohérence des résultats par l'analyse des hydrogrammes des cours d'eau a cependant été réalisé ponctuellement. Tout comme pour le critère de densité de drainage, cette approche est confrontée à l'hétérogénéité géologique et hydrogéologique des bassins versants concernés par les cours d'eau. En effet il est impossible, dans l'état des données actuelles, d'attribuer la contribution en eau souterraine de tel ou tel aquifère à un débit d'une rivière en période d'étiage.

5.3.1. Altérabilité des formations de socle

Les potentialités aquifères théoriques d'une formation géologique sont liées à l'abondance des minéraux gonflants susceptibles de générer un horizon fissuré lors de l'altération. La carte d'altérabilité a été établie dans le cadre du programme POTAMAC en codant chaque formation géologique en fonction de sa composition minéralogique. Seules les formations du socle antépermien ont été prises en compte, en excluant les formations sédimentaires et volcaniques carbonifères. La carte d'altérabilité des formations de socle du secteur Massif Central est rappelée dans l'illustration 75.

L'échelle de favorabilité retenue est présentée sur l'illustration 73 ; elle caractérise la capacité plus ou moins grande des formations de socle à développer un aquifère d'altération à partir de leur composition minéralogique. Elle ne reflète cependant pas sensu stricto le potentiel aquifère des formations, mais en constitue une étape préliminaire indispensable.

Ces résultats ne seront pas directement utilisés pour l'attribution d'un indicateur à la résistance à la sécheresse. Ils permettront cependant d'apporter la réflexion nécessaire sur les secteurs considérés comme « potentiel aquifère défavorable ou peu favorable » à l'échelle de réalisation du programme POTAMAC (1/250 000), où pourtant les informations à une échelle locale fine révèlent la présence de sources ou d'ouvrages dont les débits ne sont pas négligeables.

Cette réflexion permettra de mieux cibler les perspectives d'amélioration des connaissances aussi bien sur le potentiel aquifère des formations de socle que leur sensibilité à la sécheresse.

Altérabilité	Légende
0	Formation non concernée par la classification (formations sédimentaires, formations superficielles, coulées volcaniques)
1	Défavorable (roches hypovolcaniques acides, microgranites, quartzites, roches sans micas, leptynites)
2	Peu favorable (amphibolites, leucogranites à muscovite seule, granites à grain fin)
3	Favorable (granites à 2 micas, schistes, gneiss leucocrates)
4	Très favorable (granites à biotite, micaschistes et gneiss à biotite)
5	Extrêmement favorable (diorites, granodiorites)
6	Formation carbonatée paléozoïque

Illustration 73 - Codage de l'altérabilité des formations géologiques.

5.3.2. Présence et extension des aquifères

La carte finale du potentiel aquifère des formations de socle du Massif central a été réalisée dans le cadre du programme POTAMAC en croisant la carte d'altérabilité et la carte de l'âge de l'altération (Illustration 76). En effet les paléosurfaces antérieures au Lias ont toutes subi une importante diagenèse d'enfouissement ayant abouti au colmatage de la porosité de l'horizon fissuré (potentiel aquifère défavorable), alors que les paléosurfaces infracrétacées et éocènes ont conservé une porosité ouverte jusqu'à l'actuel. L'illustration 113 présente le codage du potentiel aquifère des formations de socle (programme POTAMAC).

Potentiel aquifère	Légende
0	Formation non concernée par la classification (formations sédimentaires, formations superficielles, coulées volcaniques)
1	Défavorable (roches hypovolcaniques acides, microgranites, quartzites, roches sans micas, leptynites)
2	Peu favorable (amphibolites, leucogranites à muscovite seule, granites à grain fin)
3	Favorable (granites à 2 micas, schistes, gneiss leucocrates)
4	Très favorable (granites à biotite, micaschistes et gneiss à biotite)
5	Extrêmement favorable (diorites, granodiorites)
6	Formation carbonatée paléozoïque (non concernée par la classification)

Illustration 74 - Codage du potentiel aquifère des formations de socle du secteur Massif central (POTAMAC).

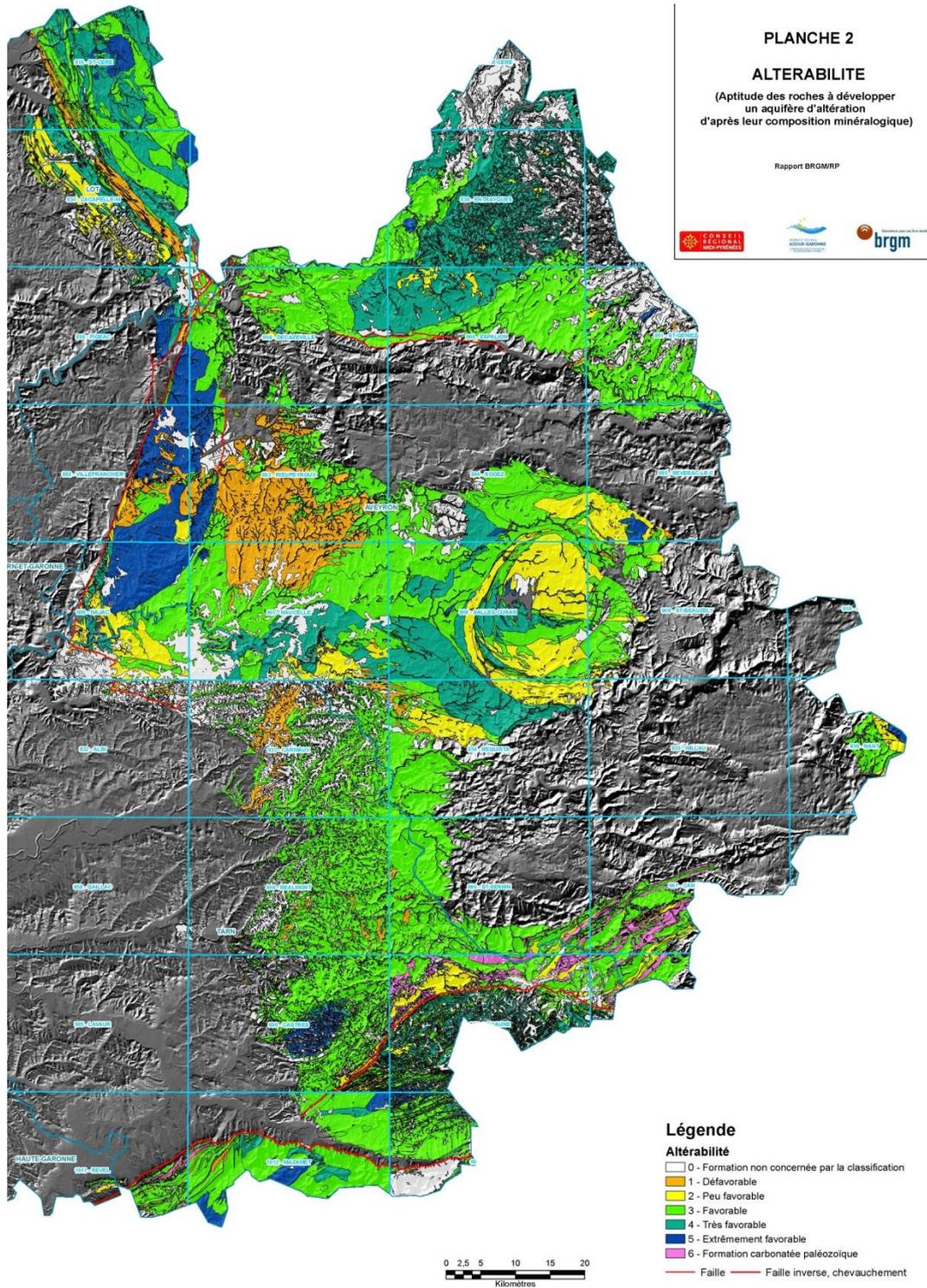


Illustration 75 - Carte d'altérabilité des formations de socle du secteur Massif central (POTAMAC).

Cinq classes (notées de 1 à 5) sont identifiées avec un potentiel aquifère croissant. Dans le domaine de socle, ces classes sont étroitement liées à la puissance de l'aquifère et sa porosité globale, donc à sa capacité à constituer une réserve importante. Elles caractérisent l'inertie de l'aquifère, par conséquent sa résistance à la sécheresse. Les aquifères de classe 1 sont les plus sensibles à la sécheresse tandis que ceux de classes 5 sont en théorie le moins.

Ce critère est à pondérer en fonction des remarques stipulées dans le § 5.3 vis-à-vis du fort compartimentage des aquifères de socle notamment par les cours d'eau qui les entaillent. Il est également rappelé que les hétérogénéités géologiques au sein de ces aquifères (filons de quartz drainant ou de dolérites jouant un rôle de limite étanche par exemple), et notamment la variabilité des perméabilités et de l'emmagasinement dans ce type d'aquifère composite, influent tout particulièrement sur la taille de ces aquifères. Seule une approche globale est envisageable dans le cadre de la présente étude.

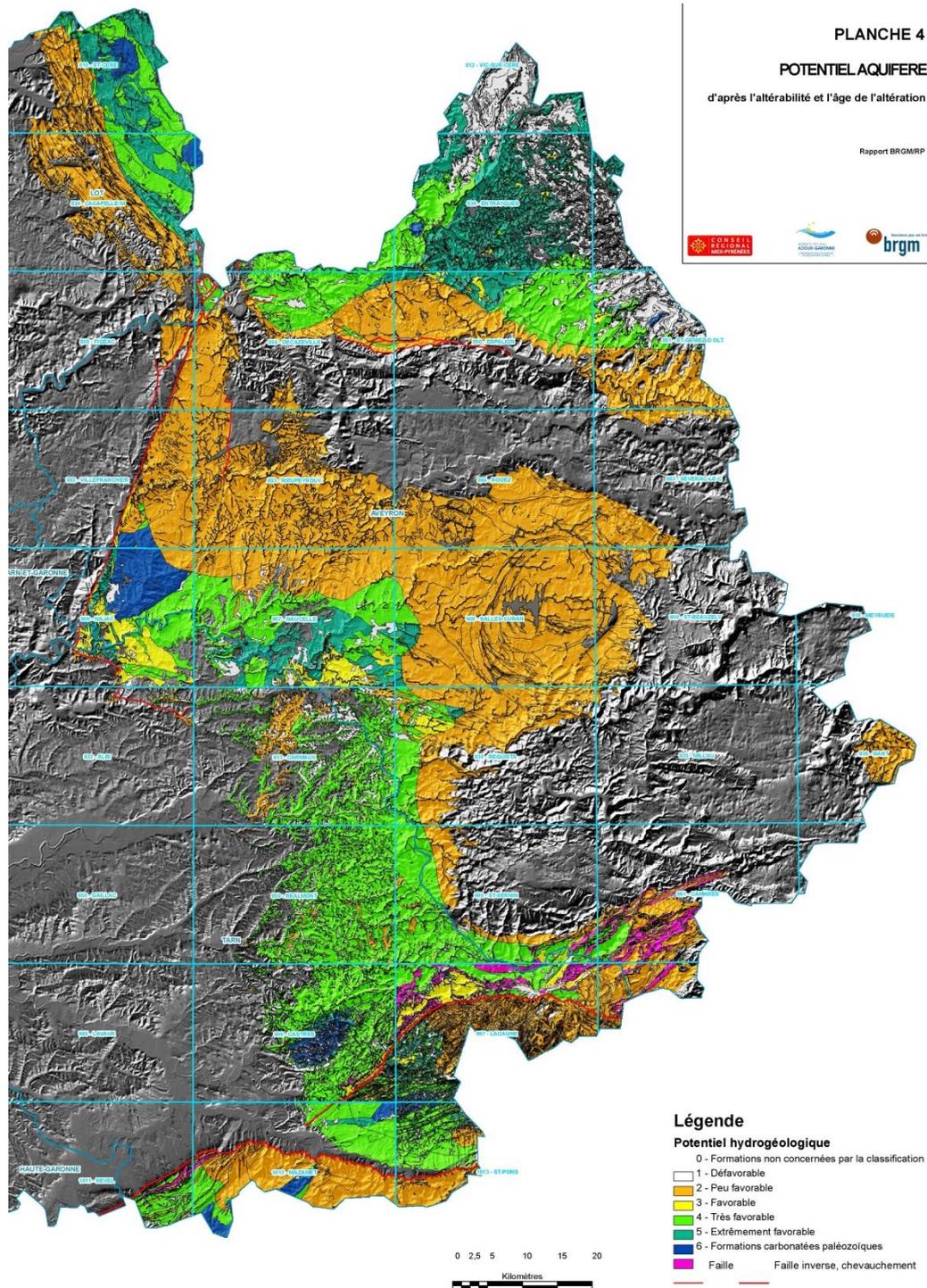


Illustration 76 - Potentiel aquifère des formations de socle sur le secteur Massif central (POTAMAC).

Afin de s'affranchir des nombreuses hétérogénéités géologiques qui n'apportent aucun intérêt vis-à-vis de l'objet de l'étude, une carte simplifiée du potentiel aquifère a été élaborée à partir de la carte de l'illustration 76. Elle est présentée en Illustration 77.

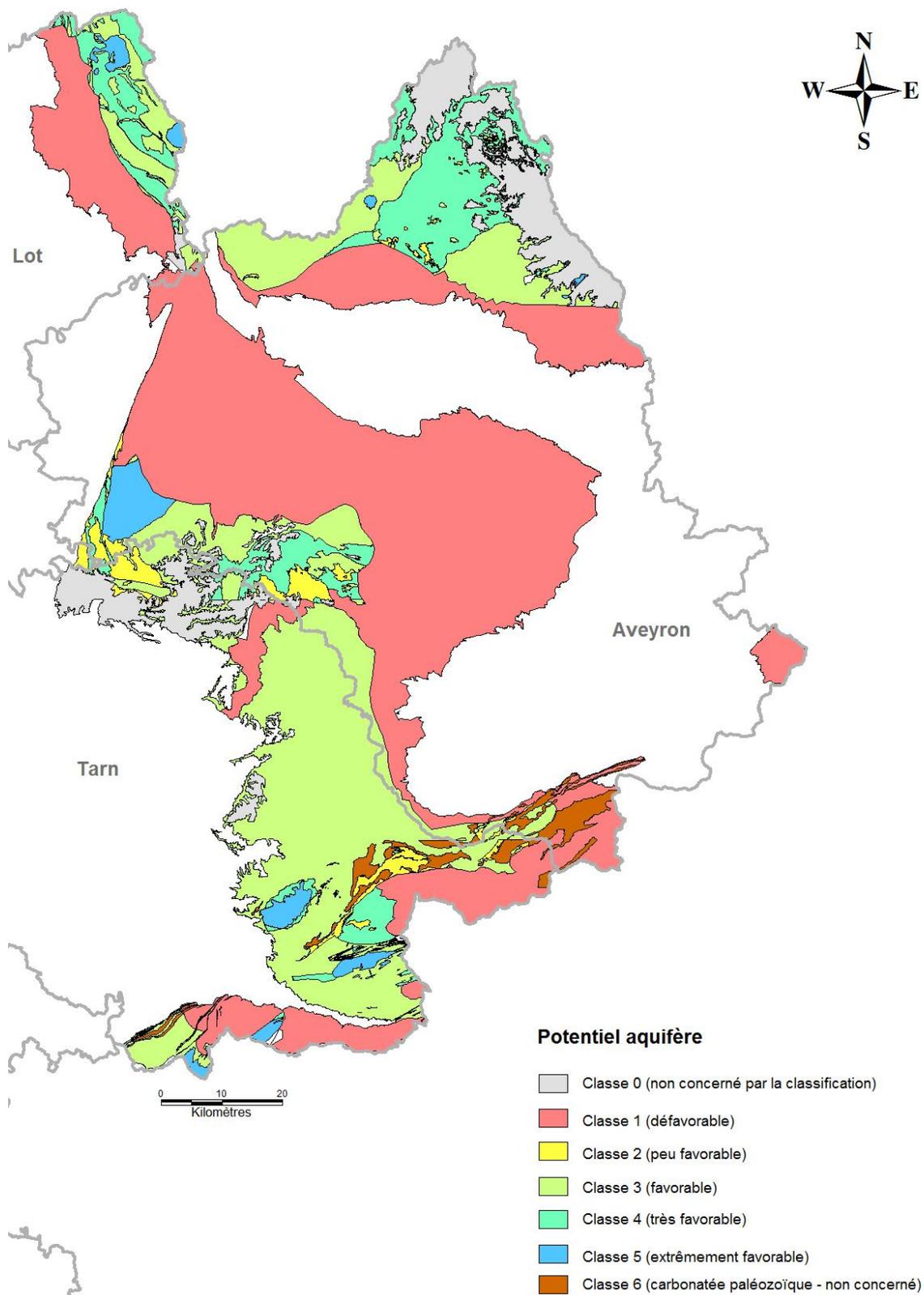


Illustration 77 - Carte simplifiée du potentiel aquifère du secteur Massif central.

5.3.3. Localisation des horizons altéritiques

Globalement, le socle du Massif central a relativement bien préservé son profil d'altération avec la présence d'un horizon superficiel altéritique sur la majorité des classes de potentiel aquifère. La présence et la nature de cet horizon joue un rôle prépondérant dans la recharge de l'aquifère par sa capacité à permettre l'infiltration des apports d'eau. Aucune carte de localisation d'altérites de socle n'existe actuellement. Seules des informations géologiques ponctuelles et mal réparties sur le secteur d'étude permettent de préciser la présence ou non de ces formations, la plupart du temps sans apporter d'éléments quant à leur nature argileuse ou pas.

L'illustration 78 présente les informations disponibles issues de la BSS avec la localisation des ouvrages connus recoupant la limite arène / horizon fissuré sur la zone d'étude. Il est dénombré 132 ouvrages, soit environ 15 % des ouvrages répertoriés dans la BSS, qui recoupent l'interface « altérée » et « fissurée ». Ce nombre relativement faible est lié au manque d'informations lithologiques dans les coupes géologiques établies par les foreurs.

Au vu de la répartition hétérogène de ces ouvrages et principalement leur très faible densité (environ 1 ouvrage renseigné pour 50 km²), il n'est pas envisageable d'extrapoler la présence d'altérites, *a fortiori* leur épaisseur et leur nature, sur les classes de potentiel aquifère.

D'autre part, les campagnes de terrain réalisées dans le cadre du programme POTAMAC en 2009 et 2010 ont montré la complexité au sein de chaque classe de potentiel aquifère pour dresser une cartographie détaillée des altérites de socle. Ceci est étroitement lié à l'histoire géologique du Massif Central, notamment vis-à-vis des différents âges des surfaces d'érosion. Il est fourni en annexe 2 quelques extraits de « carnet de terrain » avec la position des points d'arrêt avec observations géologiques, montrant localement la distribution hétérogène de la préservation de l'horizon altéritique. Ce critère sur la présence d'une couverture altéritique ne peut être pris en considération dans le cadre du présent programme pour préciser la résistance à la sécheresse des formations de socle. Dans une perspective d'amélioration des connaissances vis-à-vis de la sensibilité à la sécheresse des formations de socle, il s'avère nécessaire de dresser préalablement une carte de l'horizon altéritique à une échelle adaptée (1/50 000), notamment à partir de la valorisation des informations issues des campagnes de terrain 2009-2010.

5.3.4. Débit des sources à l'étiage

Aucune chronique de débit de sources suffisamment longue n'est réellement disponible sur le secteur d'étude pour pouvoir appréhender la dynamique et l'inertie de la nappe. L'ensemble des sources recensé en BSS, particulièrement celles dotées d'une mesure de débit à l'étiage a cependant été inventorié. Les sources ne sont généralement pas rattachées à un contexte aquifère particulier spécifiant les conditions d'émergence (altérites, horizon fissuré, voire même colluvions de pentes). Elles sont en grande majorité issues des formations altéritiques du socle qui émergent à la faveur d'une rupture de pente, et drainant de petits bassins versants soumis à la seule alimentation des précipitations. À ce titre, elles sont toutes très sensibles à la sécheresse.

Sur environ 580 sources répertoriées avec des données de débits, seules 175 sources présentent des données de débit en période d'étiage (Illustration 79). La majorité d'entre elles présentent un débit d'étiage très faible (< 1l/s). Les sources à plus gros débit se situent essentiellement au niveau du granite de la Margeride (nord-est de la zone d'étude), des Monts de Lacaune (sud-est de la zone d'étude, cependant probablement en connexion avec les formations carbonatées paléozoïque), et du secteur du Vibal-Lévézou (est de la zone d'étude).

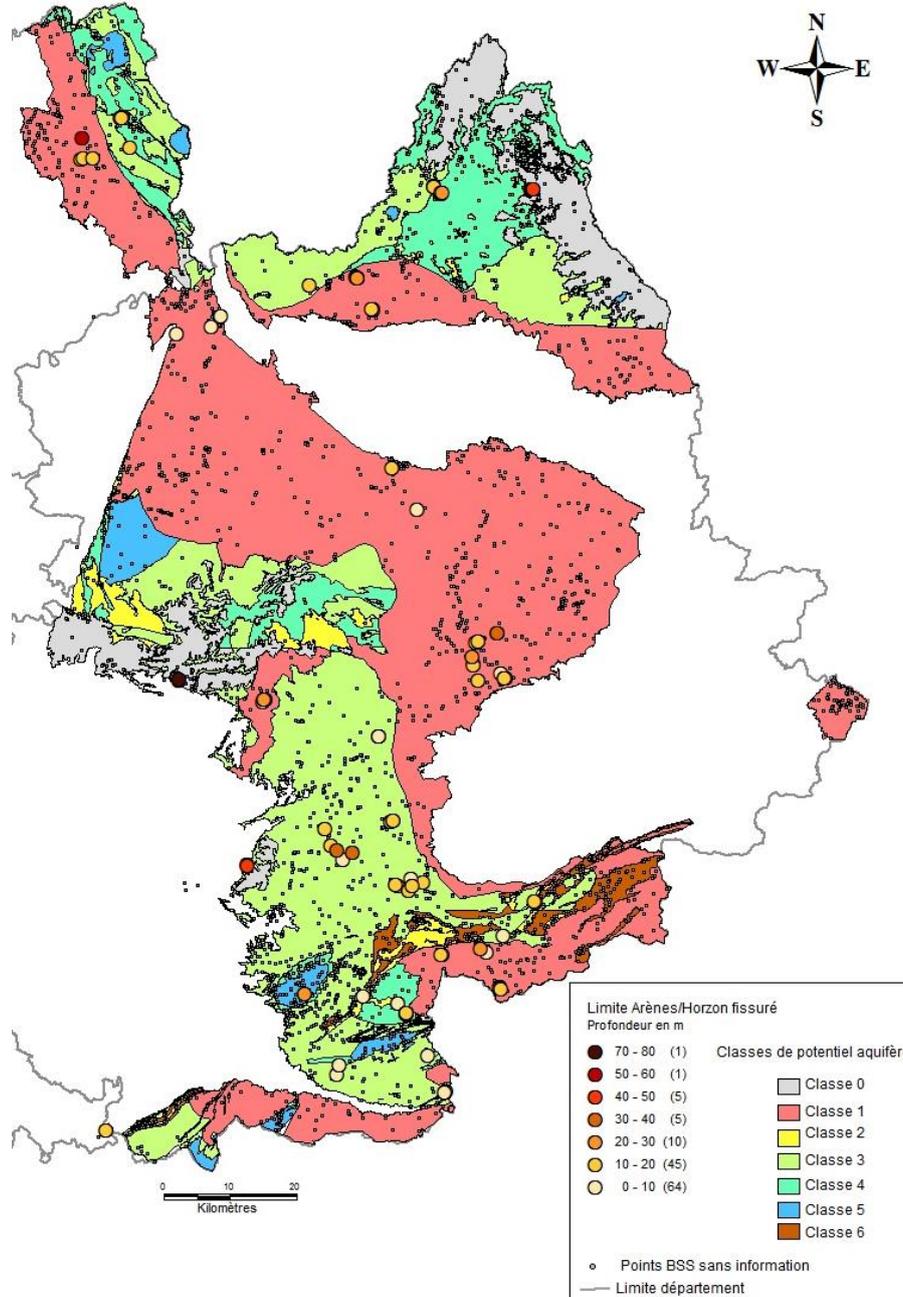


Illustration 78 - Informations géologiques sur la présence d'altérites (source : BSS).

Pour ce dernier secteur, il est difficilement explicable la présence d'autant de sources dans une classe de potentiel aquifère « défavorable » (classe 1). La méthodologie employée régionalement stipulant que l'horizon fissuré, à ce niveau, est susceptible de voir ses fractures colmatées du fait de la présence d'une paléosurface anté-liasique, ne semble pas fonctionner localement. Il est probable que ces sources soient exclusivement issues des formations altéritiques pourvues de grands bassins versants, ne participant pas à l'alimentation de l'horizon fissuré en profondeur (puisque potentiellement colmaté). Cette hypothèse confirmerait le caractère sensible à la sécheresse de cette zone. Il apparaît cependant important, dans une perspective d'amélioration des connaissances de vérifier à plus fine échelle le potentiel aquifère de cette classe « défavorable », notamment si l'aquifère est composite avec la présence d'un horizon fissuré non colmaté, et d'implanter, le cas échéant un réseau de suivi quantitatif non influencé pour permettre de mieux comprendre la dynamique de la nappe.

Pour les autres zones, une faible densité de sources répertoriées est observée, excepté dans la partie est du département du Tarn (classe 3). Cela pourrait indiquer que la capacité d'infiltration est confirmée dans les classes très favorables (classe 4 et 5), où les quelques sources identifiées ont d'ailleurs des débits non négligeables, mais a contrario, pourrait être le signe d'un compartimentage important des formations, qui se vidangent alors dans les vallées encaissées. Il est bien évident qu'il n'est pas possible dans l'état actuel des connaissances d'abonder dans un sens ou dans l'autre. Une caractérisation précise des sources sur le terrain permettraient de mieux appréhender la problématique liée aux périodes de sécheresse dans la gestion locale des eaux.

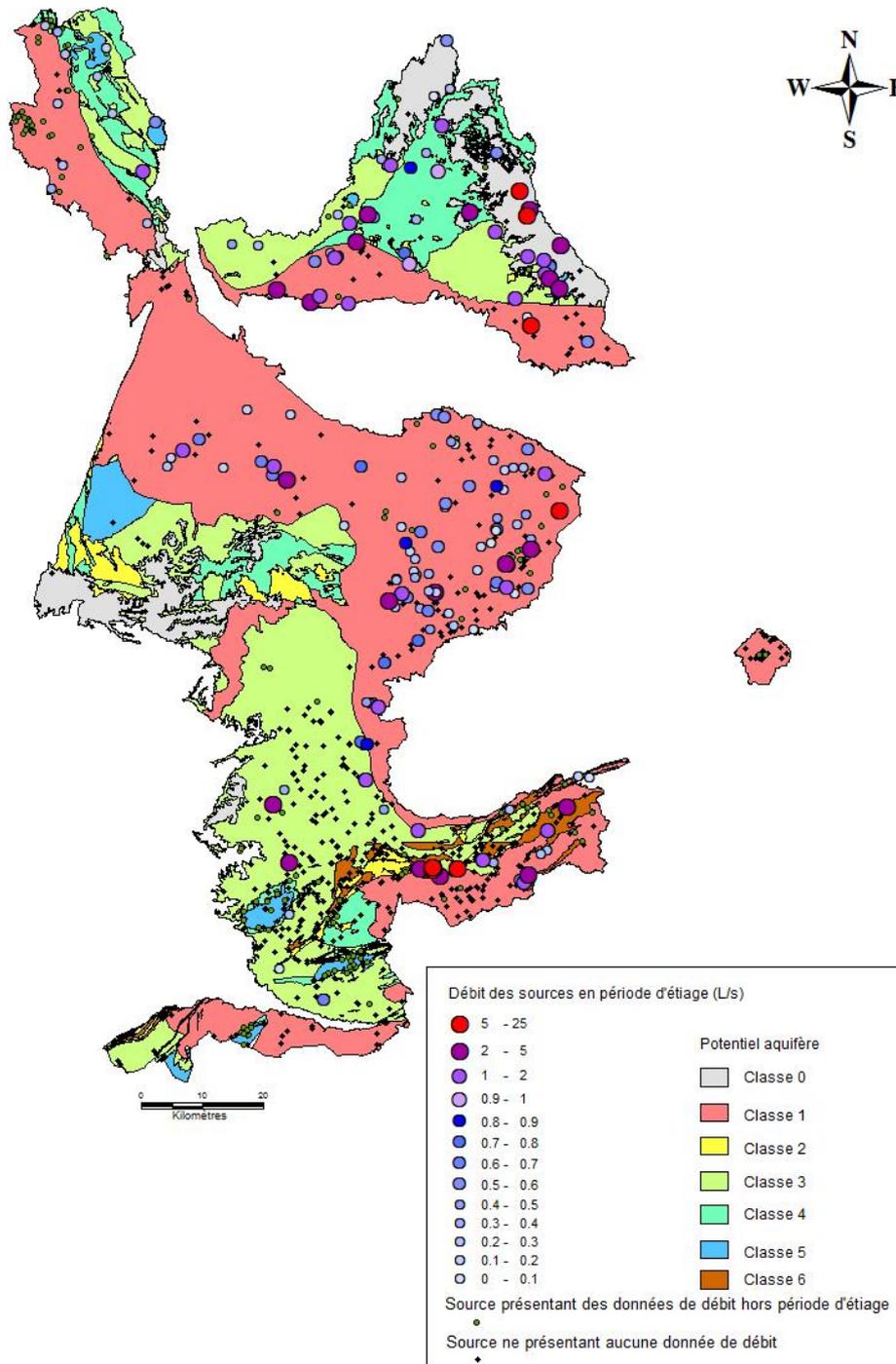


Illustration 79 - Localisation des sources présentant un débit d'été sur le secteur Massif central.

5.3.5. Chronique piézométrique

La considération de chroniques piézométriques suffisamment longues est essentielle pour caractériser la dynamique et l'inertie de la nappe, critère jouant un rôle prépondérant pour déterminer sa sensibilité à la sécheresse. Sur l'ensemble des ouvrages répertoriés dans la BSS sur la zone d'étude, 370 présentent au moins un niveau d'eau. Ils s'établissent en grande majorité entre 0 et 10 m (85 %). Seuls 53 ouvrages présentent un niveau d'eau au-delà de 10 m de profondeur, généralement indicateur de la présence de formations sensiblement plus perméables et potentiellement en relation avec l'horizon fissuré.

Aucune chronique piézométrique n'est donc répertoriée sur la zone d'étude. Il était donc nécessaire de programmer la mise en place d'un réseau spécifique de suivi quantitatif avec installation d'enregistreurs automatiques des niveaux d'eau dans chacun des ouvrages.

a) Mise en place d'un réseau de suivi quantitatif

Contrairement aux approches présentées en milieux poreux et karstiques où l'analyse des critères à prendre en compte pour l'évaluation de la sensibilité à la sécheresse est basée sur les données existantes (acquises à la faveur des réseaux de mesures en place), les aquifères en domaine de socle en Midi-Pyrénées se caractérisent par une quasi absence d'informations.

Ainsi, pour pallier ces lacunes de connaissance, les investigations de terrain ont été ciblées sur les formations géologiques de socle dans le secteur du Massif central. Les formations de socle présentes dans le massif des Pyrénées sont actuellement étudiées dans le cadre du programme POTAPYR. Au terme de ce travail (finalisation prévue en 2016), des propositions de points de suivi représentatifs des aquifères de socle des Pyrénées seront soumises afin de compléter le réseau initié dans le Massif central sur cette thématique.

b) Critères de sélection des ouvrages recensés

Engagée en 2012, une recherche de points d'eau adaptés à l'installation d'enregistreurs de niveaux d'eau a été réalisée sur les 3 départements concernés par les formations de socle du Massif central (Lot, Aveyron et Tarn). Ainsi, 121 points d'eau implantés dans 18 des 40 entités de socle et volcaniques présentes dans la région ont fait l'objet d'un diagnostic de faisabilité.

Pour guider les recherches les critères de sélection théoriques étaient les suivants :

- forte classe de potentiel aquifère (3 à 5) ;
- présence d'altérites ;
- aquifère ne se vidangeant pas rapidement (sur plateau) et niveau d'eau profond ;
- forte profondeur de l'ouvrage ;
- ouvrage non exploité.

Afin de sélectionner les ouvrages à équiper pour un suivi des niveaux d'eau, la démarche opérationnelle a été la suivante :

- présélection de points d'observation par unité aquifère à caractériser, en fonction des informations à disposition dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS). Au vu de la faible densité de points d'eau inventoriés en BSS, de nouveaux ouvrages ont été recherchés auprès des principaux foreurs intervenant sur le secteur. Cette intervention a permis de notablement améliorer la connaissance des ouvrages présents sur cette zone puisque plusieurs dizaines de nouveaux dossiers ont été créés en BSS ;

- visite de terrain et diagnostic détaillé de l'ouvrage (localisation, caractéristiques techniques [profondeur, diamètre, hauteur de l'en-tête, etc.], état d'exploitation, présence d'équipement de pompage, etc.). La possibilité de mise en place d'un enregistreur numérique des niveaux d'eau a été appréciée à cette occasion ;
- investigations de terrain complémentaires menées sur les zones où aucun point d'eau est recensé (BSS ou base de données des foreurs), ou pourvues d'ouvrages inadaptés au besoin du projet, afin d'inventorier de nouveaux captages présentant une bonne faisabilité pour un équipement d'enregistreurs ;
- création de fiches signalétiques pour les 20 points de suivi sélectionnés, comprenant des descriptions textuelles, graphiques et photographiques des caractéristiques de l'ouvrage retenu et de son environnement (annexe 4) ;
- mise en place de conventionnements avec les propriétaires des ouvrages concernés par les équipements (majoritairement privés) afin d'assurer, par un cadre juridique, une certaine longévité dans le suivi engagé ;
- acquisition et mise en place des enregistreurs automatiques afin de disposer de données détaillées et complètes sur plusieurs années.

Les critères de sélection concernant les conditions de vidange de l'aquifère et de non exploitation ont été respectés que partiellement (manque de points d'accès à la nappe).

c) Présentation du réseau de mesures

À ce jour, 20 enregistreurs automatiques des niveaux d'eau ont été mis en place dans l'optique d'acquérir des informations sur le fonctionnement hydrogéologique des entités de socle identifiées comme présentant les potentialités aquifères les plus intéressantes, à savoir sur les classes 3 à 5 (« favorable » à « extrêmement favorable »). Le point n° 18 n'a pas pu être équipé d'un enregistreur. Il a cependant fait l'objet de mesures manuelles.

La carte de l'illustration 80 représente leur répartition en fonction des 38 unités de socle de la BD LISA auxquelles se superposent l'information sur les potentialités aquifères définies dans le programme POTAMAC. Le tableau de l'annexe 3 récapitule les données utiles pour chacun des 20 points d'eau équipés et du point suivi manuellement. 19 points sur 21 sont concernés par les classes 3 à 5. Les points n° 79 et n° 125 se placent volontairement dans la classe n°1 de potentiel aquifère (défavorable) de façon à contrôler si la forte altérabilité des formations en présence (granites à biotites), conformément aux résultats de l'étude POTAMAC, correspond à un profil d'altération colmaté. 5 points sont situés dans le Lot (et un en limite dans le Cantal). 8 ouvrages sont localisés dans l'Aveyron dont 3 points (n° 68, 70, 128) implantés pour mieux caractériser les potentielles relations hydrauliques entre les formations volcaniques de l'Aubrac et les formations de socle (granites de Margeride). 7 points sont situés dans le Tarn. Les points 116 et 24, proches l'un de l'autre, présentent l'intérêt de caractériser les mêmes formations (granites à biotites) mais l'un (n° 24) capte uniquement l'horizon des altérites, l'autre (n° 116) intéresse l'intégralité de l'aquifère composite (altérites et horizon fissuré). Les fiches signalétiques des 20 points équipés d'un enregistreur sont présentées en annexe 4 (localisation, contexte géologique et hydrogéologique, caractéristiques de l'ouvrage, situation administrative, chronique piézométrique, photographies).

S'agissant des toutes premières données acquises dans le domaine de socle en Midi-Pyrénées, il a été nécessaire de mener préalablement une analyse critique de chacune des chroniques afin d'évaluer leur représentativité et de sélectionner celles qui permettront à terme d'effectuer une analyse du signal dans une optique d'appréciation de la sensibilité à la sécheresse.

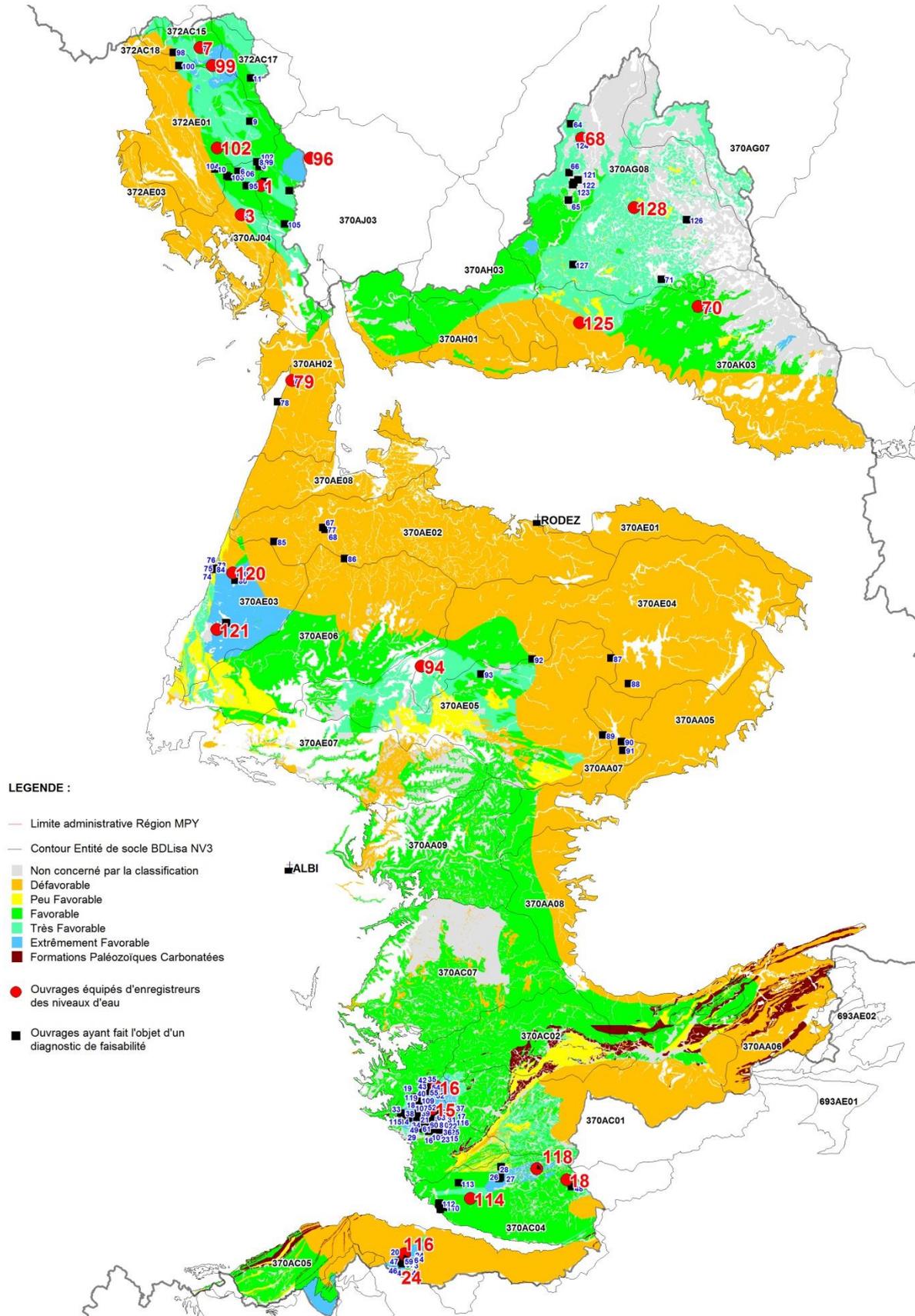


Illustration 80 - Localisation des piézomètres retenus pour un suivi quantitatif de la nappe.

5.3.6. Données hydrologiques

La faible quantité de données hydrogéologiques, et notamment la disponibilité de chroniques piézométriques sur un cycle hydrologique seulement ne permettent pas de caractériser convenablement le fonctionnement et la dynamique de la nappe. La résistance à la sécheresse sera d'autant plus importante que l'aquifère aura pu bénéficier d'une recharge importante (toutes choses étant égales par ailleurs, en particulier pour une même pluie efficace). La partition de la pluie efficace entre recharge et ruissellement est sous la dépendance de facteurs pédologiques et géomorphologiques, et peut être évaluée dans l'analyse des hydrogrammes des rivières. Il est par contre nécessaire que les bassins versants des stations étudiées soient homogènes sur le plan géologique et hydrogéologique, ce qui n'est pas le cas dans les territoires de socle. Dans le cadre du présent probable, il serait trop optimiste de penser retenir un indicateur de résistance à la sécheresse à partir de l'analyse statistique des hydrogrammes dans le domaine de socle du Massif Central, au regard du manque de données adaptées. Par contre cette approche peut permettre, sur des stations jugées les plus représentatives, de contrôler la cohérence des résultats obtenus dans l'analyse des piézomètres.

a) Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique sur les formations de socle du Massif central est dense et très développé. Cinq principaux cours traversent d'est en ouest la zone d'étude :

- le Lot prend sa source sur le versant sud de la montagne du Goulet en Lozère (48) à une altitude d'environ 1 300 m, et se jette dans la Garonne dans le département du Lot-et-Garonne (47). Il traverse le nord du département de l'Aveyron. Le débit moyen interannuel de la rivière à Villeneuve-sur-Lot est de 151 m³/s par seconde. Le plus faible débit mensuel est de 32,5 m³/s ;
- le Tarn prend sa source sur le mont Lozère, dans la Lozère, et se jette dans la Garonne près de Castelsarrasin, dans le Tarn-et-Garonne (82). Son débit moyen est de 233 m³/s, et le plus faible débit mensuel moyen est de 54,9 m³/s ;
- l'Aveyron prend sa source près de Sévérac-le-Château, dans l'Aveyron, et se jette dans le Tarn au nord-ouest de Montauban (département du Tarn-et-Garonne). Il traverse la quasi-totalité du département de l'Aveyron ;
- l'Agout prend sa source à 1 100 m d'altitude dans le Parc naturel régional du Haut-Languedoc dans les monts d'Espinouse en Haut-Languedoc (département de l'Hérault), et se jette dans le Tarn à Saint-Sulpice (département du Tarn) ;
- le Dadou prend sa source dans les monts de Lacaune sur la commune de Saint-Salvi-de-Carcavès dans le Tarn, et se jette dans l'Agout en rive droite, près d'Ambres, après avoir traversé d'est en ouest la totalité du département du Tarn.

b) Stations hydrométriques

Au total 86 stations hydrométriques intéressant pour partie ou en totalité les formations de socle du Massif central ont été inventoriées dont 9 situées dans le Lot, 43 dans l'Aveyron, et 34 dans le Tarn. 32 d'entre elles sont actuellement en service. Ces stations ont fait l'objet d'un diagnostic préalable vis-à-vis de la cohérence des périodes et durées de mesures, ainsi que de l'appartenance de leur bassin versant majoritairement au domaine de socle. 69 stations hydrométriques ont ainsi été considérées en première sélection.

L'annexe 5 présente la localisation des stations hydrométriques par département. Le tableau de synthèse présentant les stations hydrométriques est fourni en annexe 6.

c) Bassins versants des stations hydrométriques

Les bassins versants de chacune des 69 stations hydrométriques retenues ont été tracés sous SIG afin d'estimer la part du bassin appartenant au domaine de socle et estimer l'hétérogénéité géologique et hydrogéologique. L' Illustration 81 présente ces bassins versants.

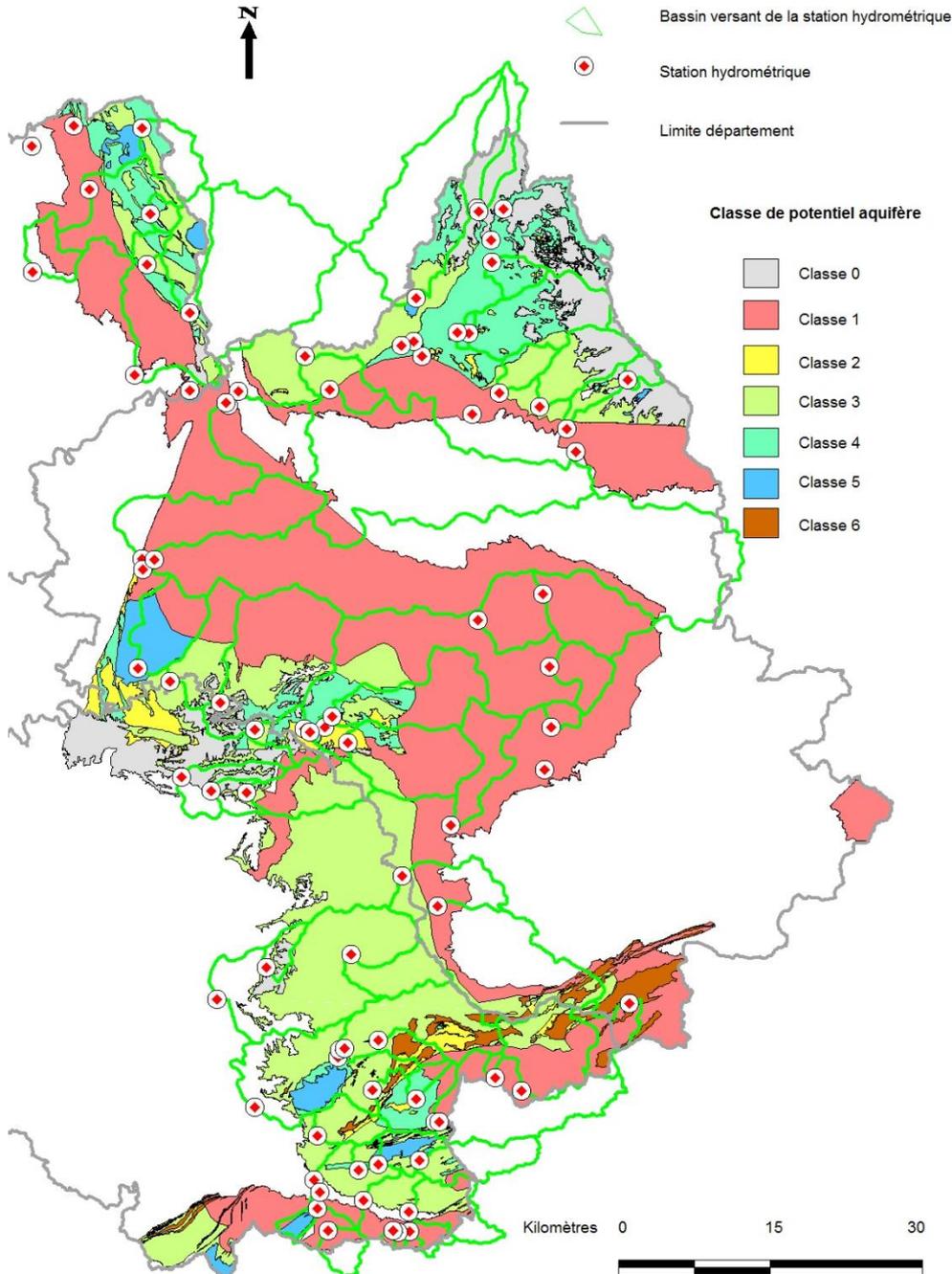


Illustration 81 - Délimitation des bassins versants des stations hydrométriques.

Le graphe de l'illustration 82 montre qu'une trentaine de stations hydrométriques concerne exclusivement le domaine de socle, les autres concernent un territoire (et donc potentiellement des aquifères) en dehors de la zone de socle. C'est à partir de ces données que des stations représentatives ont été sélectionnées et ont fait l'objet de travaux de contrôle ciblés des résultats.

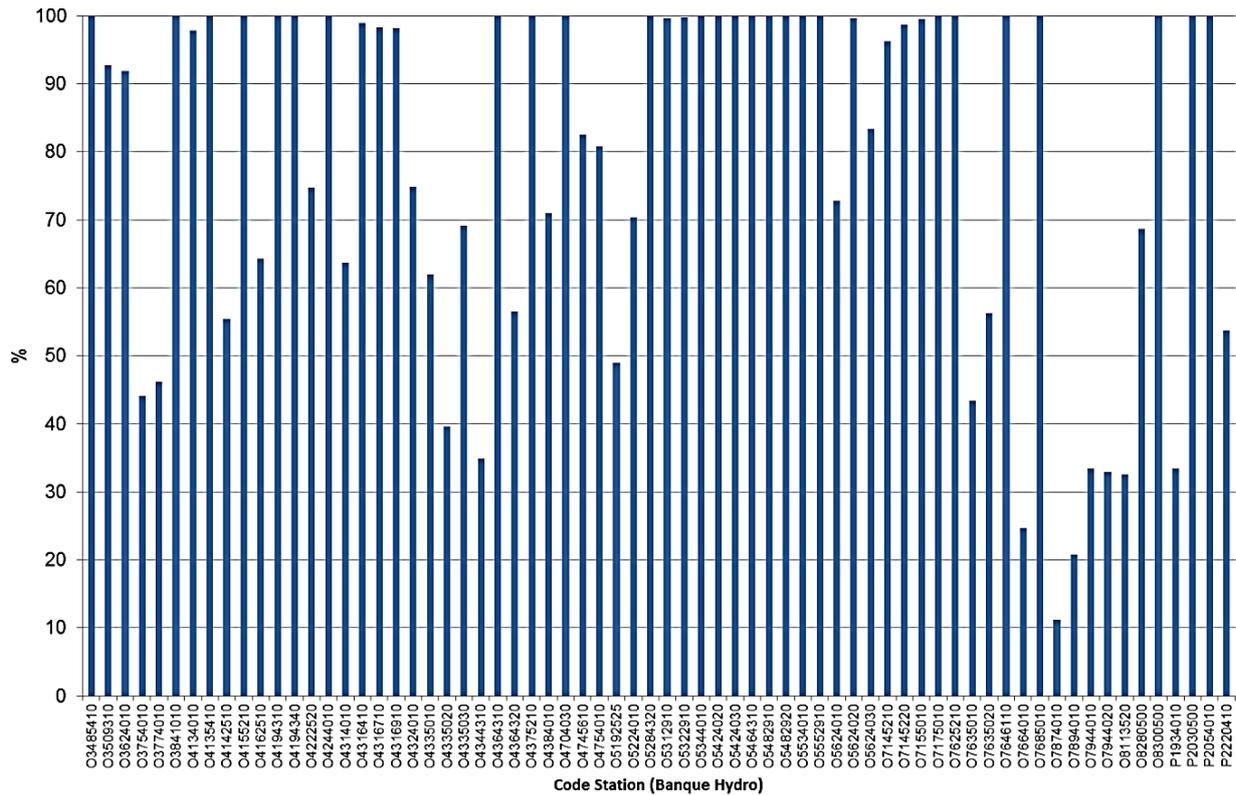


Illustration 82 - Superficie des bassins versants occupant le domaine de socle (%).

d) Hétérogénéités géologiques des bassins versants des stations hydrométriques

Dans le cadre du programme POTAMAC, une série de bassins versants de stations hydrométriques relativement homogènes avaient fait l'objet d'une analyse croisée entre le débit spécifique d'étiage des rivières et le potentiel aquifère des formations en présence sur le bassin.

Le débit spécifique d'étiage ($m^3/s/km^2$) avait été calculé pour chaque station hydrométrique sélectionnée à partir des données extraites de la Banque HYDRO. Les différents types de formations géologiques présents sur les bassins versants d'ordre 3 (BD Carthage) avaient également été différenciés en pourcentage d'occupation du bassin. Les principaux résultats sont présentés en annexe 7. Il a été conclu qu'il était difficile de comparer les débits spécifiques des rivières avec le potentiel aquifère de formations en raison de la très forte hétérogénéité des formations géologiques et des dynamiques de nappe concernés par le bassin versant. Cette approche nécessiterait de suivre le débit des rivières sur de très petits bassins versants homogènes d'un point de vue géologique, afin d'établir un véritable bilan hydrique à chaque grand type d'aquifère.

e) Stations météorologiques

19 stations météorologiques de type 0 et type 1 (stations professionnelles gérées par METEO France) sont présentes dans les départements du Lot, de l'Aveyron, et du Tarn. Les contrastes pluviométriques sont fortement marqués avec une pluviométrie plus importante au nord de la zone d'étude (bassin amont du Lot) avec 1 418 mm, et au sud (Bassin de l'Agout) avec 1 057 mm, et une pluviométrie modérée au centre (Bassin de l'Aveyron) avec 875 mm.

5.4. ANALYSE DES CRITÈRES PRIS EN COMPTE DANS LE CADRE DE LA PRÉSENTE ÉTUDE

Le diagnostic des données disponibles sur le secteur d'étude permet de retenir 3 indicateurs pour caractériser la résistance à la sécheresse des aquifères :

- **la capacité des formations de socle à présenter un profil d'altération aquifère.** Cet indicateur est obtenu à partir des classes de potentiels aquifères établies dans le cadre du programme POTAMAC. Il est censé représenter l'emmagasinement total de l'aquifère. Au plus le potentiel aquifère sera important au moins celui-ci sera sensible à la sécheresse. Les altérites et l'horizon fissuré sont indissociables dans l'état des connaissances actuelles. Il est certain que cet indicateur ne peut refléter précisément la résistance à la sécheresse qui aurait nécessité d'intégrer la présence ou non d'altérites, leur nature et leur épaisseur ;
- **la densité de drainage par bassin versant.** Cet indicateur est obtenu à partir de la densité du réseau hydrographique sur chaque bassin versant d'ordre 3. Il est censé représenter le compartimentage des aquifères de socle et donc leur extension, ainsi que les conditions de vidange des aquifères. Au plus cette densité sera faible au plus le caractère infiltrant du bassin versant considéré sera fort, au plus sa résistance à la sécheresse sera forte ;
- **l'inertie de la nappe.** Cet indicateur est obtenu à partir de l'analyse des chroniques piézométriques. Trois méthodes sont abordées : l'analyse des auto-corrélogrammes (effet mémoire de la nappe), des corrélogrammes croisés pluie-niveau piézométriques, et le temps de demi-décroissance de la nappe par la loi de Maillet (pouvoir régulateur de l'aquifère). Au plus l'inertie de la nappe est forte au plus la résistance à la sécheresse de l'aquifère sera forte. Cet indicateur de première importance est à prendre avec précaution dans le cadre du présent programme du fait des difficultés liées à la représentativité surfacique des piézomètres dans des aquifères très compartimentés, et la faible durée des périodes d'observation (un cycle hydrologique seulement).

5.4.1. Capacité des formations de socle à présenter un profil d'altération aquifère

Les résultats sont ceux obtenus dans le cadre du programme POTAMAC avec 5 classes de potentiel notées de 1 (défavorable) à 5 (extrêmement favorable). Les unités de plus petites tailles n'ont pas été considérées à l'échelle de travail du domaine de socle du Massif central. Certaines unités complexes ont été regroupées dans une seule classe (classe de potentiel prépondérante), comme la zone axiale de la Montagne Noire. La classe 1, bien que défavorable a également été abordée dans le projet ERESSAR en raison des incertitudes la concernant, notamment dans le secteur est de la zone d'étude.

5.4.2. Densité de drainage par bassin versant

Le réseau hydrographique et les bassins d'ordre 3 selon la BD Carthage sur la zone d'étude sont indiqués en Illustration 83.

La densité de drainage par bassin versant d'ordre 3 a été calculée en rapportant la longueur cumulée des cours d'eau s'écoulant sur le bassin à la superficie de ce dernier. Elle est exprimée en km^{-1} . 212 bassins versants d'ordre 3 concernent en totalité ou en partie la zone de socle. Les valeurs varient entre $0,38 \text{ km}^{-1}$ (bassins versants à caractère infiltrant) et $1,95 \text{ km}^{-1}$ (bassins versants à caractère ruisselant). La moyenne est de $1,16 \text{ km}^{-1}$. La distribution des densités de drainage par bassin versant est indiquée en Illustration 84.

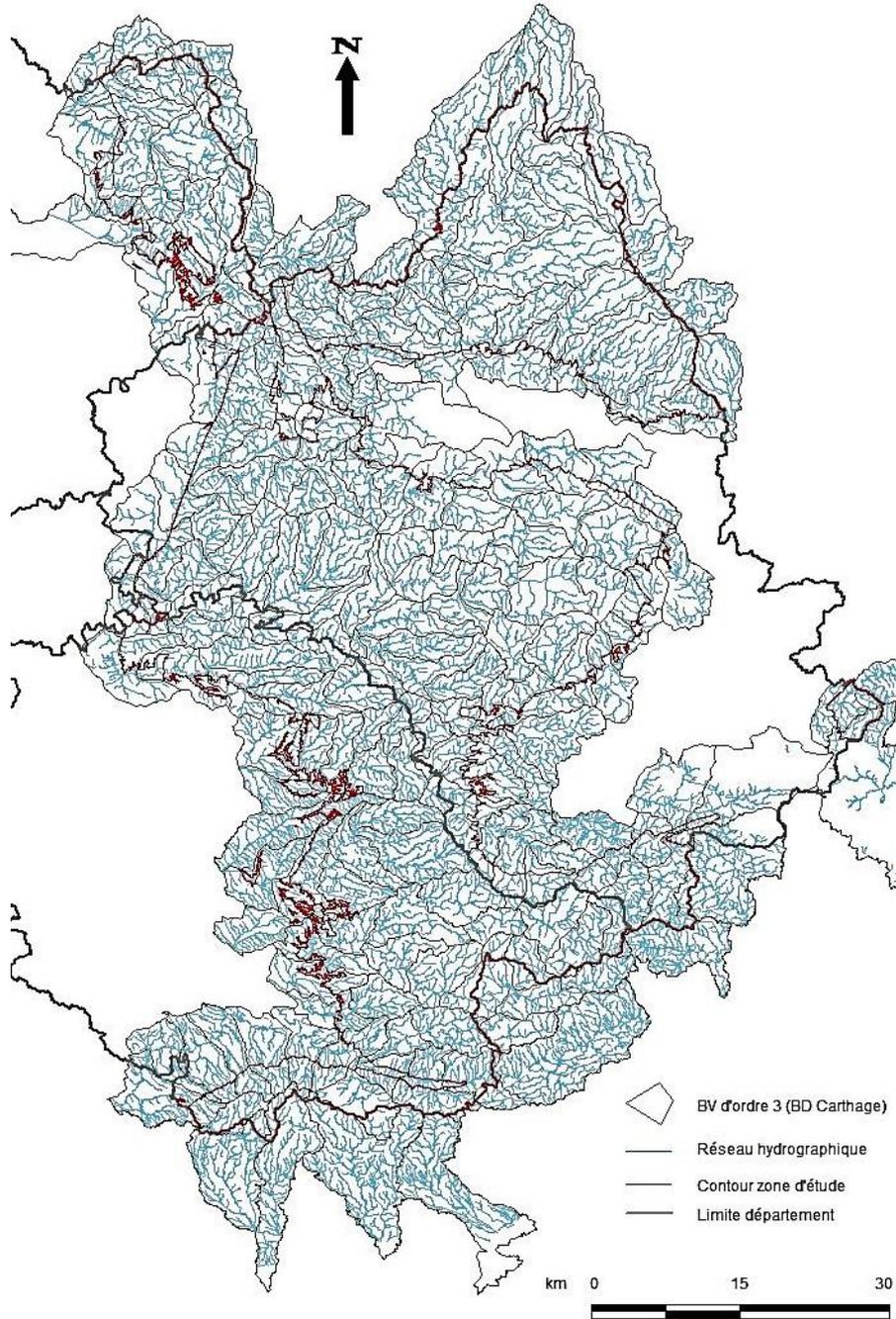


Illustration 83 - Réseau hydrographique et bassin versant d'ordre 3 selon la BD Carthage.

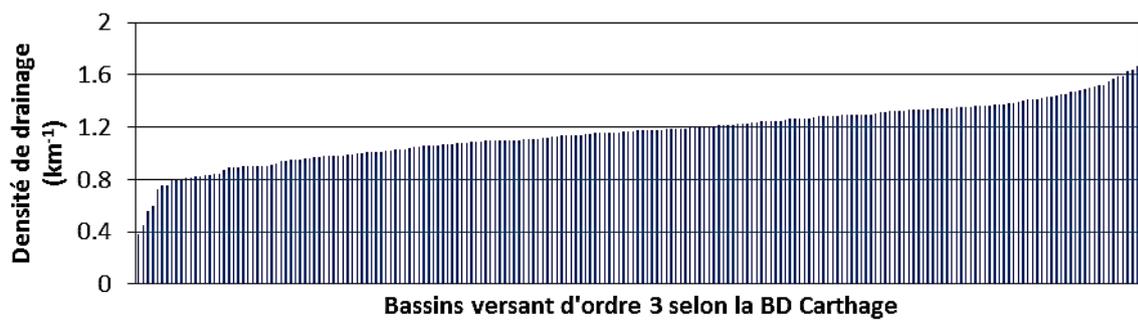


Illustration 84 - Distribution des densités de drainage par bassin versant.

Quatre classes de densité de drainage ont été établies :

- **Classe 1 (supérieur à 1,37 km⁻¹)** : bassin versant à caractère très ruisselant, aquifères en présence fortement compartimentés ;
- **Classe 2 (1,16 – 1,37 km⁻¹)** : bassin versant plutôt ruisselant, aquifères en présence compartimentés ;
- **Classe 3 (0,86 – 1,16 km⁻¹)** : bassin versant plutôt infiltrant, aquifères en présence moyennement compartimentés ;
- **Classe 4 (inférieur à 0,86 km⁻¹)** : bassin versant à caractère infiltrant, aquifères en présence relativement faiblement compartimentés

L'illustration 85 présente la carte de densité de drainage. Elle montre de plus faible densité de drainage dans la partie lotoise, dans les granites de la Margeride, mais également dans les secteurs à l'est du département de l'Aveyron pourtant classés avec un potentiel aquifère « défavorable ». Les formations de schistes ou micaschistes montrent le plus souvent une densité de drainage plus forte. La zone axiale de la Montagne Noire présente globalement des densités de drainage plus faibles lorsque le potentiel aquifère des formations est élevé.

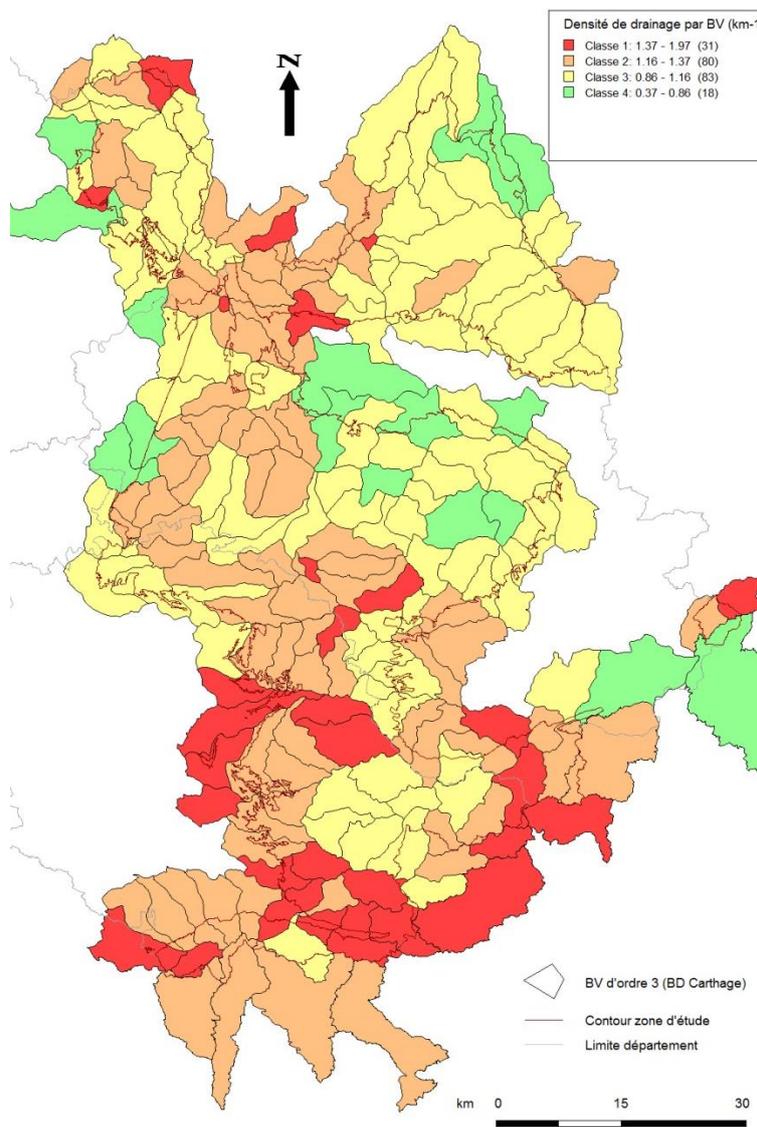


Illustration 85 - Carte de la densité de drainage par bassin versant d'ordre 3.

5.4.3. Estimation de l'inertie des nappes

a) Auto-corrélogrammes

Des analyses corrélatoires ont été mises en œuvre sur l'ensemble des chroniques piézométriques pour caractériser « l'effet mémoire » de l'aquifère (inertie de la nappe). Il est important de noter que les résultats sont à prendre avec la plus grande prudence au vu de la durée de ces chroniques, limitée à un seul cycle hydrologique. L'auto-corrélogramme caractérise le degré de corrélation qui existe entre deux points de la chronique piézométrique d'un même point d'observation selon un décalage temporel de plus en plus grand. Ainsi, l'autocorrélation n'est autre que la mesure d'une corrélation d'une chronique par rapport à elle-même. Elle caractérise et met en évidence l'interdépendance des événements affectant une chronique pour des intervalles de temps de plus en plus longs. Le processus aléatoire marquant une tendance à long terme produira un corrélogramme dont la décroissance est lente. Dans le cas contraire, le corrélogramme tend plus ou moins rapidement vers une valeur nulle. La nappe aura une inertie d'autant plus grande que son effet mémoire sera grand, et donc d'autant plus résistante à une sécheresse.

L'autocorrélation n'est plus considérée comme significative pour des valeurs inférieures à 0,3. Les graphes des auto-corrélogrammes et les commentaires associés par piézomètre sont présentés en annexe 8 et les courbes piézométriques en relation avec la pluie en annexe 9. Plusieurs types de comportement sont observés :

- piézomètres présentant une inertie élevée (61 à 95 jours) qui traduit à la fois la durée de la recharge de l'aquifère par les précipitations mais aussi son tarissement naturel. La décroissance quasi linéaire de la corrélation indique que les effets de la recharge et du tarissement décroissent lentement mais ne sont pas dissociables (n° 1, 3, 7, 15, 16, 24, 114, 116, 118) ;
- piézomètres présentant une inertie élevée (63 à 76 jours) qui traduit à la fois la durée de la recharge de l'aquifère par les précipitations mais aussi son tarissement naturel. La forme aiguë du pic d'autocorrélation suggère que l'effet de la recharge s'estompe au bout de 15 à 43 jours (n° 79, 96, 120). Deux de ces piézomètres voient leurs mesures quelques peu perturbées par des pompages ponctuels ;
- piézomètres présentant une inertie plus faible (12 à 41 jours) qui traduit un effet « mémoire » peu important, et suggérant que l'effet de la recharge s'estompe très rapidement. Ils sont tous perturbés par des pompages ponctuels rendant les interprétations délicates (n° 68, 70, 99, 125, 128).

4 chroniques piézométriques sont inexploitable en raison d'une forte perturbation des mesures (n° 18, 94, 102, 121). La synthèse des résultats est présentée sur l'illustration 86. L'effet mémoire sur les chroniques exploitables varie entre 12 et 95 jours, avec une moyenne de l'ordre de 58 jours. Les plus fortes valeurs concernent *a priori* les aquifères dotés de la plus grande inertie de nappe, et donc les plus résistants à la sécheresse dans la mesure où les données sont représentatives et non influencées. Celui présentant la plus forte valeur est le piézomètre 24 (95 jours). 11 piézomètres se classent ensuite dans une gamme allant de 60 à 80 jours. Les plus faibles valeurs correspondent à des aquifères peu résistants à la sécheresse (piézomètres 99, 70, 125, 128).

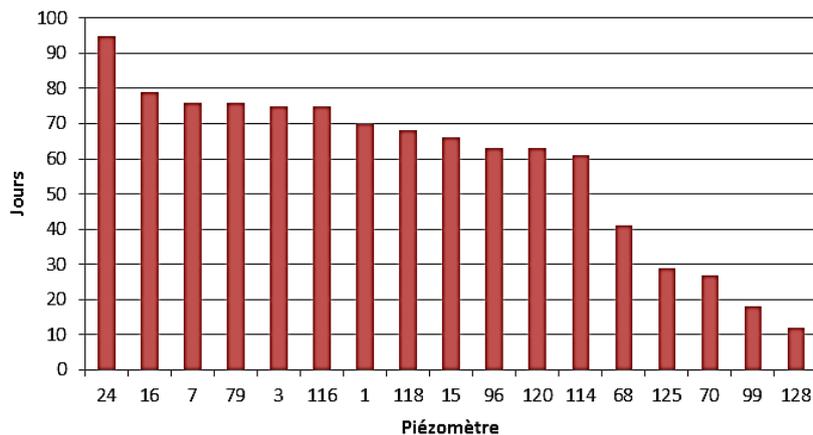


Illustration 86 : Effet « mémoire » de l'aquifère en jours (auto-corrélogramme).

b) Temps de demi-décroissance par la loi de Maillet

La formule de Maillet exprime la loi de vidange de l'aquifère : décroissance du débit selon une fonction exponentielle de type : $Q_t = Q_0 \exp(-\alpha \cdot t)$. La résistance à la sécheresse de l'aquifère est directement lié au temps de demi-décroissance qui est lui-même fonction du coefficient de tarissement. Plus le temps de demi-décroissance est grand, moins l'aquifère sera sensible à la sécheresse. Son évaluation a été effectuée sur les chroniques piézométriques disponibles et dont la courbe de tarissement est exploitable. 13 piézomètres ont été évalués, les chroniques de données des huit autres piézomètres n'étant pas exploitables (niveaux influencés par des pompages). Cette tâche a été rendue difficile en raison de la perturbation du régime hydrologique par des apports pluviométriques pendant la période d'été en 2014, mais aussi par l'absence de recul sur la dynamique de la nappe (un seul cycle hydrologique disponible). Les temps de demi-tarissement auront donc tendance à être surévalués et devront être comparés plutôt en relatif qu'en absolu.

La synthèse des résultats est présentée sur l'illustration 87. Cette analyse a également permis d'estimer le niveau de base de l'aquifère (en m NGF) et la charge hydraulique au-dessus du niveau de base à la date de début de la baisse des niveaux d'eau. Les graphes d'interprétation sont fournis en annexe 10.

Les temps de demi-décroissance sur les chroniques exploitables varient entre 23 et 130 jours, avec une moyenne de l'ordre de 68 jours. Les plus fortes valeurs concernent *a priori* les aquifères les plus résistants à la sécheresse dans la mesure où les données sont représentatives et non influencées. Il s'agit des piézomètres n° 01 et n° 120. Les plus faibles valeurs correspondent à des aquifères peu résistants à la sécheresse (piézomètres 3, 7, 128).

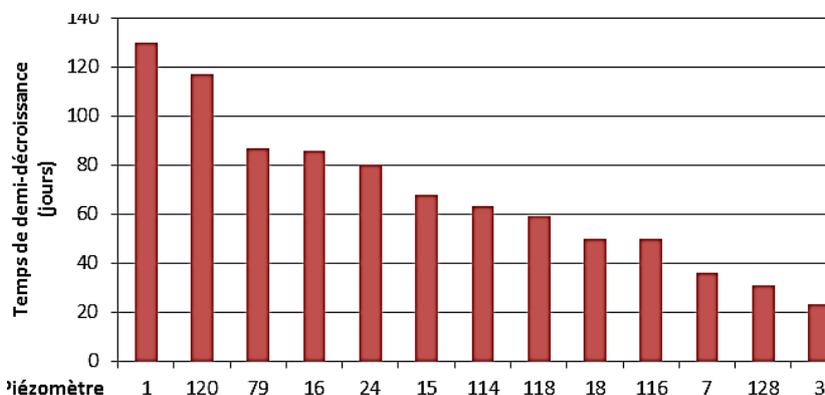


Illustration 87 : Temps de demi-décroissance des aquifères calculés à partir de la loi de Maillet sur les chroniques piézométriques.

c) Corrélogramme croisé pluie efficace-niveau piézométrique

Des analyses corrélatoires croisées ont été mises en œuvre sur les chroniques de données piézométriques pour caractériser les dépendances dans le temps de la piézométrie aux événements qui l'affectent (pluie efficace), et de mettre en évidence des phénomènes périodiques. Il est important de noter que les résultats sont à prendre avec la plus grande prudence au vu de la durée de ces chroniques, limitée à un seul cycle hydrologique. D'autre part la position des stations météorologiques (de type 4) n'est pas optimale vis-à-vis de la localisation des piézomètres au regard des contrastes pluviométriques sur le secteur d'étude. Les stations ont été sélectionnées par rapport à leur proximité et leur altitude.

Le corrélogramme croisé permet d'analyser des relations de causalité entre séries. Dans ce cas précis, le corrélogramme croisé est une approximation de la réponse impulsionnelle du niveau piézométrique à la pluie efficace. Lorsque la valeur du corrélogramme croisé reste faible sur tout son domaine de définition, la relation entrée-sortie n'est pas mise en évidence.

Deux paramètres sont considérés pour caractériser la sensibilité à la sécheresse :

- **le pic de réaction de l'aquifère aux précipitations** : selon que le pic interviendra plus ou moins tôt suite aux précipitations (en jours) la capacité de l'aquifère à se recharger sera plus ou moins forte. Une valeur faible de la corrélation de ce pic traduira un impact modéré de l'amplitude de variation du niveau piézométrique. Un pic tardif accompagnée d'une valeur de corrélogramme faible devrait traduire une faible résistance à la sécheresse en raison de la faible capacité de l'aquifère à se recharger (bassin à caractère ruisselant, couverture altéritique très argileuse, etc.) ;
- **la durée du maintien de l'effet des pluies sur l'aquifère** (en jours) traduit la capacité de l'aquifère à résister à une sécheresse. Plus cette durée sera longue, plus l'aquifère sera résistant à la sécheresse.

L'ensemble de ces traitements a été réalisé à l'aide de l'outil TEMPO développé au BRGM. Les graphes des corrélogrammes croisés et les commentaires associés par piézomètre sont présentés en annexe 11, et les courbes piézométriques en relation avec la pluie en annexe 9. Les résultats par piézomètres sont les suivants :

Le corrélogramme croisé entre les précipitations et la piézométrie moyenne journalière n'est pas calculé sur 7 piézomètres (n° 18, 68, 70, 94, 96, 102, 121) car l'effet des pompages est prépondérant pendant toute la période de suivi. Il est en effet difficile de faire la part en cet effet et celui lié aux pluies efficaces sur les niveaux d'eau. 4 piézomètres (n° 99, 120, 125, 128) ont fait l'objet de pompages sporadiques qui rendent difficiles l'interprétation des corrélogrammes. Les résultats doivent être pris avec prudence.

Les Illustrations 88 et 89 présentent les résultats synthétiques de l'analyse corrélatoire par les corrélogrammes croisés. Le décalage du pic (représentant les variations de niveau d'eau suite à un épisode de précipitation) sur les chroniques exploitables varie entre 3 et 56 jours, avec une moyenne de l'ordre de 15 jours. Les plus fortes valeurs concernent a priori la capacité de l'aquifères à bien se recharger mais avec une grande inertie. Elles peuvent témoigner de la présence d'un horizon altéritique retardant l'effet des pluies mais permettant cependant la recharge (ni trop argileux, ni trop perméable). Il est difficile de relier directement ce paramètre à la sensibilité à la sécheresse. Cependant, il est admis qu'un effet retardateur des pluies, dans la mesure où la recharge est effective, va dans le sens d'une plus grande inertie du système. Ce paramètre ne peut pas être considéré seul mais couplé à un ou plusieurs autres paramètres pour avoir une vision cohérente. Les plus faibles valeurs indiquent une réponse rapide du système aux pluies. Elles peuvent témoigner d'une plus grande sensibilité aux apports d'eau naturels. Le décalage du pic est le plus fort sur les piézomètres 1, 120, et 7 (plus de 25 jours). Il est le plus faible sur les piézomètres 99, 125, 79 (moins de 5 jours).

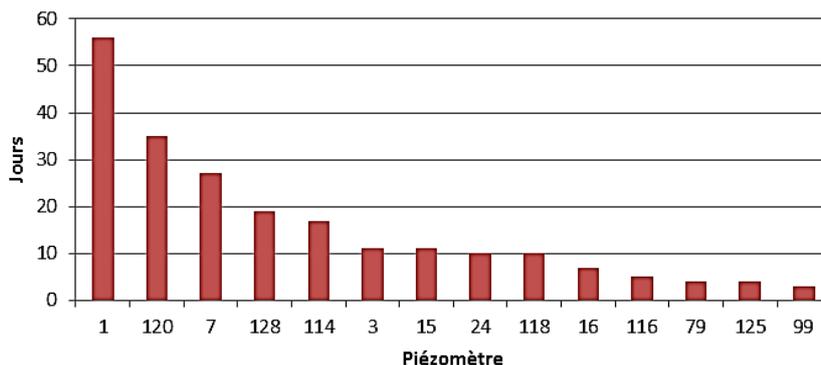


Illustration 88 - Réaction de la nappe aux pluies efficaces : décalage du pic de réaction en jours.

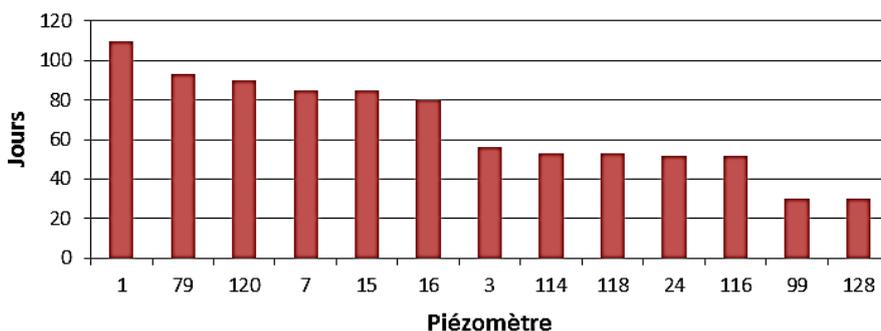


Illustration 89 - Maintien sur la nappe de l'effet de la pluie après son occurrence (jours).

Le maintien de l'effet d'une pluie sur les niveaux d'eau après son occurrence est quelque peu redondant avec le temps de demi-décroissance et caractérise l'inertie de la nappe. Au plus les valeurs sont élevées au plus l'aquifère sera résistant à la sécheresse. Les valeurs varient entre 18 et 110 jours avec une moyenne de l'ordre de 63 jours. 6 piézomètres se classent dans de fortes valeurs (supérieures à 80 jours). Il s'agit des piézomètres 1, 79, 120, 7, 15, 16. Les valeurs les plus faibles concernent les piézomètres 9 et 128 (30 jours).

d) Synthèse des résultats

L'illustration 90 présente le tableau synthétique des résultats sur l'estimation de l'inertie des nappes. Ces résultats permettent d'apprécier un critère hydrodynamique appelé *capacité régulatrice spécifique*. Il est défini comme le rapport entre une réserve dite « historique » (volume d'eau contenu dans la zone de fluctuation de la nappe) et la réserve totale moyenne de l'aquifère. Soit, en hauteur d'eau (volume d'eau par unité de surface, en supposant un coefficient d'emmagasinement identique sur toute l'épaisseur aquifère) :

$$CR_{sp} = \frac{\Delta H}{H_{rm}}$$

ΔH = hauteur d'eau correspondant à la "réserve historique" : amplitude maximale des fluctuations de la nappe relevée sur une période donnée.

H_{rm} = hauteur d'eau correspondant à la réserve totale moyenne de l'aquifère.

Cette *capacité régulatrice spécifique* est supposée caractériser le pouvoir régulateur de l'aquifère, partant du constat que « la réserve joue dans les conditions naturelles le rôle de volant amortisseur qui régularise les débits sortants par rapport aux flux d'apport discontinus et irréguliers, ce que traduisent les fluctuations des niveaux des nappes » .

N°	DEP	COMMUNE	NATURE	Prof/sof (m)	ETAT OUVRAGE	Amplitude des maximaux d'eau sur la période (m)	Effet mémoire aquifère (en jours)	Temps de demi-décroissance (jours)	Niveau de base (m NGF)	Charge hydraulique H ₀ selon loi de Maillet (m)	Pic de réaction aux pluies (jour)	Valeur corrélatrice du pic de réaction	Maintien de l'effet de la pluie sur les niveaux (jours)
1	46	LAURESSES	PUITS	10.15	NON-EXPLOITE	3.75	70	130	622.50	5.10	56	0.19	110
3	46	SABADEL-LATRONQUIERE	PUITS	12	NON-EXPLOITE	2.75	75	23	568.70	1.50	11	0.19	56
7	46	COMIAC	PUITS	9.35	NON-EXPLOITE	1.72	76	36	465.55	1.70	27	0.18	85
15	81	BURLATS	PUITS	10.78	NON-EXPLOITE	5.00	66	68	641.70	4.95	11	0.30	85
16	81	LA CROUZETTE	PUITS	10.1	NON-EXPLOITE	5.98	79	86	657.00	5.70	7	0.27	80
18	81	ANGLES	PUITS	9.5	NON-EXPLOITE	3.46	non exploitable	50	771.10	3.37	non exploitable	non exploitable	non exploitable
24	81	MAZAMET	PUITS	8.9	EXPLOITE	4.46	95	80	703.70	3.74	10	0.26	52
68	12	TAUSSAC	FORAGE	41	EXPLOITE-TEMP	non exploitable	41	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable
70	12	MONTPEYROUX	FORAGE	82	EXPLOITE	6.14	27	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable
79	12	ASPRIERES	FORAGE	128	NON-EXPLOITE	2.66	76	87	436.50	1.60	4	0.10	93
94	12	CAMJAC	FORAGE	100	EXPLOITE	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable
96	15	PARLAN	FORAGE	35	EXPLOITE	4.82	63	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable
99	46	SOUSCEYRAC	FORAGE	25.5	EXPLOITE	0.77	18	non exploitable	non exploitable	non exploitable	3	0.18	30
102	46	GORSES	FORAGE	31	EXPLOITE	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable
114	81	PONT DE L'ARN	FORAGE	N.M.	NON-EXPLOITE	5.19	61	63	567.75	4.32	17	0.19	53
116	81	MAZAMET	FORAGE	31.00	NON-EXPLOITE	3.00	75	50	683.30	2.67	5	0.18	52
118	81	ANGLES	PUITS	7.80	NON-EXPLOITE	3.53	68	59	780.30	2.60	10	0.20	53
120	12	SANVENS	FORAGE	45	EXPLOITE-TEMP	1.73	63	117	469.40	2.89	35	0.17	90
121	12	LA FOUILLADE	FORAGE	50	EXPLOITE-TEMP	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable
125	12	NAYRAC	FORAGE	42	EXPLOITE	1.80	29	non exploitable	non exploitable	non exploitable	4	0.18	18
128	12	SAINT-SYMPHORIEN-DE-THENIERE	FORAGE	22	ABANDONNE	non exploitable	12	31	834.95	1.40	19	0.22	30

Illustration 90 - Tableau synthétique des résultats sur l'estimation de l'inertie des nappes.

Autrement dit, plus la valeur de ce critère est faible (faible amplitude de fluctuation de la réserve historique et importante réserve totale) plus le pouvoir régulateur est important, et plus la résistance à la sécheresse de l'aquifère sera forte. A noter pour ce critère :

- il présente une certaine redondance avec le temps de demi-décroissance qui traduit déjà la dynamique de la nappe, sa plus ou moins grande inertie et donc aussi sa capacité régulatrice ;
- il suppose une homogénéité de l'aquifère sur toute son épaisseur, ce qui n'est pas une règle générale dans les aquifères de socle.

Le calcul a été effectué sur un seul cycle hydrologique, attribué à une année humide, à partir des chroniques piézométriques exploitables et du niveau de base issu du calcul par la loi de Maillet. Les Illustrations 91 et 92 présentent le tableau des résultats du pouvoir régulateur de l'aquifère et la distribution des résultats par piézomètre

Elles montrent que 3 piézomètres captent un aquifère doté d'un fort pouvoir régulateur (n° 120 et 01, et dans une moindre mesure le n° 16), et 2 piézomètres d'un faible pouvoir régulateur (n° 18, et dans une moindre mesure le n° 07). Les autres piézomètres se hiérarchisent dans une gamme de valeur relativement homogène. Seuls 12 piézomètres ont permis de réaliser ce calcul, les 9 restants ne disposant pas d'une chronique exploitable.

N°	DEP	COMMUNE	Amplitude maximale des niveaux d'eau sur la période (m)	Niveau de base (m NGF)	Charge hydraulique H ₀ selon loi de Maillet (m)	Amplitude max./H ₀	NP maximal sur la période de mesure (m NGF)	Réserve totale (m)	Pouvoir régulateur
1	46	LAURESSES	3.75	622.50	5.10	0.74	627.61	5.11	0.73
3	46	SABADEL-LATRONQUIERE	2.75	568.70	1.50	1.83	571.67	2.97	0.93
7	46	COMIAC	1.72	465.55	1.70	1.01	467.35	1.80	0.96
15	81	BURLATS	5.00	641.70	4.95	1.01	647.14	5.44	0.92
16	81	LACROUZETTE	5.98	657.00	5.70	1.05	664.16	7.16	0.84
18	81	ANGLES	3.46	771.10	3.37	1.03	774.48	3.38	1.02
24	81	MAZAMET	4.46	703.70	3.74	1.19	708.72	5.02	0.89
68	12	TAUSSAC	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	717.22	non exploitable	non exploitable
70	12	MONTPEYROUX	6.14	non exploitable	non exploitable	non exploitable	890.07	non exploitable	non exploitable
79	12	ASPRIERES	2.66	436.50	1.60	1.66	439.43	2.93	0.91
94	12	CAMJAC	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	483.42	non exploitable	non exploitable
96	15	PARLAN	4.82	non exploitable	non exploitable	non exploitable	554.65	non exploitable	non exploitable
99	46	SOUSCEYRAC	0.77	non exploitable	non exploitable	non exploitable	573.39	non exploitable	non exploitable
102	46	GORSSES	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	585.41	non exploitable	non exploitable
114	81	PONT DE L'ARN	5.19	567.75	4.32	1.20	573.49	5.74	0.90
116	81	MAZAMET	3.00	683.30	2.67	1.12	686.58	3.28	0.91
118	81	ANGLES	3.53	780.30	2.60	1.36	784.08	3.78	0.93
120	12	SANVENSAS	1.73	469.40	2.89	0.60	471.81	2.41	0.72
121	12	LA FOUILLADE	non exploitable	non exploitable	non exploitable	non exploitable	396.08	non exploitable	non exploitable
125	12	NAYRAC	1.80	non exploitable	non exploitable	non exploitable	654.95	non exploitable	non exploitable
128	12	SAINT-SYMPHORIEN-DE-THENIERE	non exploitable	834.95	1.40	non exploitable	838.15	3.20	non exploitable

Illustration 91 - Tableau de calcul du pouvoir régulateur de l'aquifère.

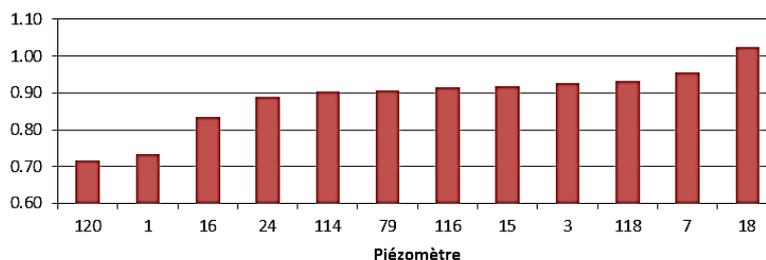


Illustration 92 - Distribution du pouvoir régulateur de l'aquifère par piézomètre.

5.5. ANALYSES DES HYDROGRAMMES

Comme indiqué dans le § 5.3.6, il serait trop optimiste de penser retenir un indicateur de résistance à la sécheresse à partir de l'analyse statistique des hydrogrammes dans le domaine de socle du Massif central, au regard du manque de données adaptées. Par contre une approche expérimentale sur les stations jugées les plus représentatives a été effectuée pour tenter de contrôler la cohérence des résultats obtenus dans l'analyse des piézomètres au regard de l'acquisition récente des données piézométriques, et mieux appréhender le fonctionnement de la nappe pour les secteurs dépourvus de suivi piézométrique. Cette approche est destinée à apporter des éléments complémentaires à la compréhension du fonctionnement hydrodynamique de ce type d'aquifère.

Pour cela, une première étape a consisté à recenser les stations hydrométriques existantes (en service ou non) en conservant uniquement celles implantées sur des cours d'eau représentatifs du domaine de socle. Les proportions relatives des différentes formations géologiques présentes au sein des bassins versants ont été estimées en termes de surface dans le but de sélectionner les stations ayant la meilleure homogénéité dans la nature lithologique des formations constituant le bassin versant.

Un export des chroniques de débits de ces stations a ensuite été effectué dans la banque HYDRO. Parallèlement, les stations météorologiques ont été sélectionnées en privilégiant celles présentant des périodes communes d'acquisition de données (débits, PP et ETP).

Deux approches d'analyses des hydrogrammes ont été effectuées :

- analyse statistique des hydrogrammes par le logiciel TEMPO du BRGM ;
- décomposition des hydrogrammes par le programme PART de l'US Geological Survey.

5.5.1. Analyses statistique -Tempo

TEMPO utilise les techniques de traitement du signal et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie. Son fonctionnement est présenté dans le chapitre 6. La localisation des stations hydrométriques ayant fait l'objet d'un traitement par Tempo, est indiquée en Illustration 93. L'analyse comparative des données des stations hydrométriques et météorologiques est fournie en annexe 12. Elle montre que l'absence de période de mesures commune suffisamment longue ne permet pas de traiter les stations du département du Lot.

Les graphiques de résultats du traitement Tempo (modèle, décomposition écoulement rapide et lent, analyses composante lente et rapide) sont indiqués par station hydrométrique en annexe 13. Les résultats sont les suivants :

✓ **Station O7635010**

Cette station est représentative du volcanisme du massif de l'Aubrac et son traitement devait permettre une étude comparative avec les bassins avals drainant les granites de Margeride. Les données hydrométriques et météorologiques n'ont aucune période commune, et n'ont pas permis la réalisation d'un traitement TEMPO.

✓ **Station O5284310**

Ce bassin de 82 km² est constitué très majoritairement par les granites de Villefranche, classé extrêmement favorable en potentialité aquifère, et faisant l'objet d'un suivi piézométrique (n° 120 et 121). Sa partie amont est à caractère ruisselant.

Le modèle a été réalisé sur la période 1998-2009, avec une pluie optimisée et pondérée « 38 % Albi + 15 % Gourdon + 20 % Montauban + 27 % Rodez ».

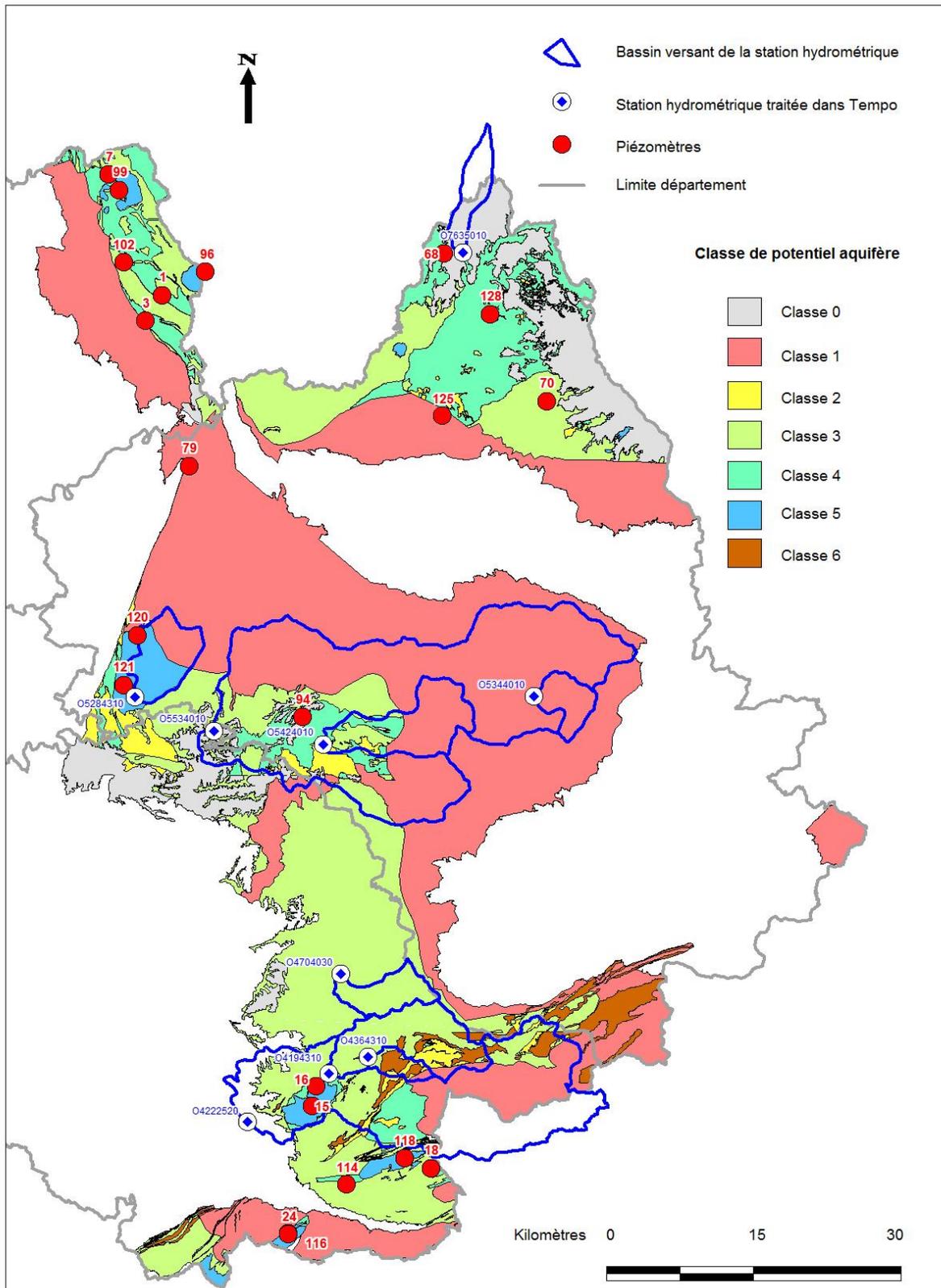


Illustration 93 - Localisation des stations hydrométriques sélectionnées pour un traitement Tempo.

La contribution des eaux souterraines est forte et du même ordre de grandeur quelque-soit le contexte climatique (année sèche [79 %], ou humide [71 %]). La capacité de stockage de l'aquifère est donc importante et confirme le fort potentiel aquifère.

Contribution moyenne 1988-2012		Contribution année sèche 2011		Contribution année humide 1992	
Rapide	Lente	Rapide	Lente	Rapide	Lente
28%	72%	21%	79%	29%	71%
~ 9 M de m ³	~ 23 M de m ³	~ 4 M de m ³	~ 16.5 M de m ³	~ 11 M de m ³	~ 28 M de m ³

La réponse impulsionnelle rapide (ruissellement) (RIR) est maximale à 2 jours et n'est plus ressentie au bout de 6 jours. La réponse impulsionnelle lente (contribution eau souterraine) (RIL) est synchrone avec la RIR (2 j), sans effet de retard. Elle est significative pendant 86 j et ressentie durant 150 j. Elle dénote d'un temps de transfert très rapide des eaux souterraines dans l'aquifère doté d'une grande réserve. Elle suggère que cet aquifère est peu sensible à la sécheresse comme le montre les résultats sur le piézomètre 120 (Illustration 93).

✓ **Station O5534010**

Cette station de 1 346 km² est représentative d'un bassin plus ou moins homogène constitué majoritairement de micascistes classés favorables en potentiel aquifère. La partie amont du bassin, estimée à caractère ruisselant, occupe la plus grande superficie. Seul un piézomètre est présent (n° 94) mais les données ne sont pas exploitables.

Le modèle a été réalisé sur la période 1988-2004, avec une pluie optimisée et pondérée « 31 % Albi + 26 % Montauban + 43 % Rodez »

La contribution des eaux souterraines est contrastée : année sèche [45 %], et humide [54 %]. Le volume de la composante rapide est quant à lui identique en année sèche et humide. Ceci dénote que la capacité de stockage de l'aquifère est importante et confirme un fort potentiel aquifère sur le bassin (présence de formations de classe 4). Les vitesses de transfert dans l'aquifère sont vraisemblablement contrastées, une partie étant restituée rapidement au cours d'eau, une partie différée de façon relativement continue dans le temps. La RIR atteint son maximum en 1 jour, et la RIL en 13 jours en décroissant très progressivement sur une centaine de jours. Cela suggère que la sensibilité à la sécheresse des formations de classe 4 est relativement faible.

Contribution moyenne 1989-2003		Contribution année sèche 1989		Contribution année humide 2000	
Rapide	Lente	Rapide	Lente	Rapide	Lente
57%	43%	55%	45%	46%	54%
~ 47 M de m ³	~ 35 M de m ³	~ 40 M de m ³	~ 33 M de m ³	~ 38 M de m ³	~ 45 M de m ³

✓ **Station O5424010**

Cette station est un sous-bassin de la station O5534010. Le bassin, de 164 km² et constitué de formations de classes 1 à 4, est hétérogène avec un bassin amont à caractère ruisselant.

Le modèle a été réalisé sur la période 1989-2012, avec une pluie optimisée et pondérée « 26 % Albi + 11 % Gourdon + 11 % Millau + 18 % Montauban + 34 % Rodez ».

La contribution des eaux souterraines est classiquement plus importante en année sèche [74 %] qu'en année humide [67 %]. Ceci dénote que la capacité de stockage de l'aquifère n'est pas négligeable et confirme le potentiel aquifère composite sur le bassin. La RIR atteint son maximum en 1 jour et n'est plus ressentie au bout de 15 jours. La RIL atteint son maximum en 12 jours, est restée significative pendant 150 jours, et n'est plus ressentie au

bout de 250 jours. Cela suggère que la sensibilité à la sécheresse des formations composant le bassin est relativement faible.

Contribution moyenne 1989-2012		Contribution année sèche 2011		Contribution année humide 1992	
Rapide	Lente	Rapide	Lente	Rapide	Lente
37%	63%	26%	74%	33%	67%
~ 20 M de m ³	~ 35 M de m ³	~ 9 M de m ³	~ 27 M de m ³	~ 21 M de m ³	~ 42 M de m ³

✓ **Station O5344010**

Cette station a été sélectionnée pour tenter une comparaison avec la station O5424010. En effet, ce petit bassin de 56 km² est exclusivement constitué par des formations considérées comme défavorables en potentiel aquifère car colmatées.

Le modèle a été réalisé sur la période 1989-2012, avec une pluie optimisée et pondérée « $0.16 * P_{Albi} + 0.43 * P_{Millau} + 0.20 * P_{Montauban} + 0.22 * P_{Rodez}$ »

Quel que soit le contexte climatique, la part de la composante lente est plus importante que la part de la composante rapide. Les volumes en année humide sont peu différents de la moyenne interannuelle.

En année sèche, la part de la contribution en eau souterraine augmente, même si globalement le débit du cours d'eau diminue. Le soutien des eaux souterraines en année sèche permet de maintenir le débit de la rivière. Si cette station est sensible aux variations climatiques, témoignant le caractère ruisselant de son bassin versant, les apports des eaux souterraines, notamment en année sèche jouent un rôle important.

Contribution moyenne 1988-2011		Contribution année sèche 2011		Contribution année humide 1992	
Rapide	Lente	Rapide	Lente	Rapide	Lente
32%	68%	23%	77%	31%	69%
~ 10 M de m ³	~ 20.5 M de m ³	~ 4.5 M de m ³	~ 15 M de m ³	~ 11 M de m ³	~ 24 M de m ³

Les réponses impulsionnelles (RIR et RIL) sont à leur maximum dès l'occurrence d'une pluie, la composante lente (RIL) est plus large et n'est plus ressentie au bout d'une centaine de jours.

Comparaison des deux stations O5424010 et O5344010

Dans les deux cas les RIR sont quasiment à leur maximum dès l'impulsion et ne sont plus ressenties en une vingtaine de jours témoignant d'un ruissellement important sur les bassins. Les RIL présentent par contre des profils différents : dans le cas de la station O5424010, il est observé une mise en charge différée alors que pour la station O5344010 elle est immédiate. Ceci suggère l'existence d'un vrai compartiment aquifère qui permet un relargage secondaire d'eau en ce qui concerne le bassin de la station O5424010, ce qui n'est pas le cas dans le bassin de de la station O5344010. Cette comparaison révèle également que certains secteurs considérés comme défavorables en potentiel aquifère, peuvent cependant bénéficier de la présence d'aquifère jouant un rôle important de soutien d'étiage des débits des rivières.

✓ **Station O4222520**

Cette station représente un bassin de grande taille (900 km²) incluant l'ensemble des granites du Sidobre (classe 5 en potentiel aquifère). Cependant le pourcentage surfacique de ces formations est faible, l'amont du bassin étant quant à lui composé de formations hétérogènes majoritairement ruisselantes. Ces granites sont suivis par les piézomètres n° 15 et 16.

Le modèle a été réalisé sur la période 1989-2012, avec une pluie optimisée et pondérée « 17 % Albi + 18 % La Salvetat + 11 % Millau + 35 % Montauban + 19 % Toulouse Blagnac ».

La variation des débits est importante suivant le contexte climatique. La composante rapide (ruissellement) devient prépondérante en année humide, le contexte géologique du bassin favorisant le ruissellement au dépend de l'infiltration. En année sèche la part de la composante lente [76 %] devient largement majoritaire, témoignant la présence d'aquifères à forte réserve et forte inertie comme l'indique la RIL.

Contribution moyenne 1989-2012		Contribution année sèche 2005		Contribution année humide 1996	
Rapide	Lente	Rapide	Lente	Rapide	Lente
31%	69%	24%	76%	55%	45%
~ 148 M de m ³	~ 327 M de m ³	~ 83 M de m ³	~ 268.5 M de m ³	~ 488 M de m ³	~ 402 M de m ³

En effet la RIR est immédiatement à son maximum après l'occurrence d'une pluie et disparaît en une dizaine de jours. La RIL est, quant à elle, quasiment nulle à l'origine, trouvant son maximum au bout de 67 jours, étant encore significative au bout de 200 jours (mise en charge, transfert puis relargage). Ceci suggère que les aquifères en présence (très probablement les granites du Sidobre) contiennent une nappe à forte inertie, et sont donc très peu sensibles à la sécheresse.

✓ **Station O4194310**

Cette station représente un sous-bassin de 206 km² de la station O4222520. Elle est occupée par des formations à caractère ruisselante, excepté la présence de formations gréso-schisteuses du Cambrien, de faibles étendues et potentiellement aquifères (lorsque karstifiées).

Le modèle a été réalisé sur la période 1988-2012, avec une pluie optimisée et pondérée « 14 % La Salvetat + 31 % Montauban + 16 % Rodez + 39 % Toulouse Blagnac ».

La part de la contribution lente dans le débit est toujours prépondérante (3/4) quel que soit le contexte climatique. Elle est très marquée en année sèche [84 %]. Le système doit donc pouvoir emmagasiner des réserves, mais de façon limitée, et assurer un certain débit à l'étiage et en contexte sec.

Contribution moyenne 1988-2010		Contribution année sèche 2005		Contribution année humide 1996	
Rapide	Lente	Rapide	Lente	Rapide	Lente
23%	77%	16%	84%	29%	71%
~ 31 M de m ³	~ 104 M de m ³	~ 15 M de m ³	~ 79 M de m ³	~ 64 M de m ³	~ 155 M de m ³

Les réponses impulsionnelles (RIR, RIL) sont à leur maximum quasiment après l'occurrence d'une pluie. L'allongement de la RIL à 225 j a permis un meilleur calage des débits d'étiages suggérant qu'un transfert plus lent dans l'aquifère, doté d'un emmagasinement non négligeable, est présent. Il est envisageable que la présence de formations potentiellement aquifères puisse avoir un rôle majeur sur ce bassin. Elle ne permet pas de conclure vis-à-vis de la sensibilité des formations de socle de classe 3 présentes également sur ce bassin.

✓ **Station O4364310**

Cette station représente un petit sous-bassin de 31 km² de la station précédente (O4194310) Elle est majoritairement occupée par les formations gréso-schisteuses du Cambrien.

Le modèle a été réalisé sur la période 1987-1997, avec une pluie optimisée et pondérée « 38 % La Salvetat + 45 % Rodez + 17 % Toulouse Blagnac ».

La chronique de débit présente de brusques variations journalières qui sont difficilement modélisables, mais à rapprocher d'un comportement de type karstique. La rapidité des réponses impulsionnelles et notamment la composante lente qui n'est plus ressentie à partir d'une soixantaine de jours peuvent en témoigner. Un second calage avec une seule composante fournit d'ailleurs un même calage.

✓ **Station O4704030**

Cette station est représentative d'un petit bassin de 71 km², relativement homogène et essentiellement constitué de micaschistes de classe 3 en potentiel aquifère. Aucun piézomètre n'est présent.

Le modèle a été réalisé sur la période 2001-2011, avec une pluie optimisée et pondérée « 40 % Albi + 11 % La Salvetat + 29 % Toulouse Blagnac + 21 % Millau ».

La part de la contribution lente est prépondérante dans le débit du cours d'eau quelque-soit l'année (sèche [70 %], humide [74 %]). Entre une année sèche et une année humide, le volume de la contribution rapide est similaire, le bassin versant montrant un même comportement vis-à-vis de la pluie quel que soit le volume de pluie. De plus la contribution lente varie peu en fonction du contexte climatique.

Contribution moyenne 2000 - 2011		Contribution année sèche 2011		Contribution année humide 2002	
Rapide	Lente	Rapide	Lente	Rapide	Lente
33%	67%	30%	70%	26%	74%
~ 12 M de m ³	~ 25 M de m ³	~ 9 M de m ³	~ 22 M de m ³	~ 8 M de m ³	~ 24 M de m ³

Les réponses lente et rapide sont à leur maximum en même temps au bout de 2 jours, et la RIL n'est plus significative au bout de 100 jours. Un test a également été effectué avec une seule composante (sans RIL) en offrant un calage équivalent, indiquant que la réalité de la composante lente n'est pas établie. Ceci suggère que les formations en présence sont probablement aquifère mais avec une relativement faible capacité de stockage. Elles sont donc plus sensibles que les formations traitées précédemment de classe 4 ou 5 (très et extrêmement favorables en potentiel aquifère).

5.5.2. Décomposition des hydrogrammes

Une approche expérimentale a été effectuée sur 10 stations hydrométriques présentant des périodes de mesures adaptées et des bassins relativement homogènes vis-à-vis de l'objectif recherché. Elle a consisté en la décomposition des hydrogrammes des cours d'eau (Programme PART en libre accès, US Geological Survey) afin d'estimer la contribution moyenne des eaux souterraines aux débits des cours d'eau en année sèche. Le principal objectif est de consolider les résultats des travaux réalisés précédemment.

La localisation des stations hydrométriques ayant fait l'objet d'un traitement est indiquée en Illustration 94.

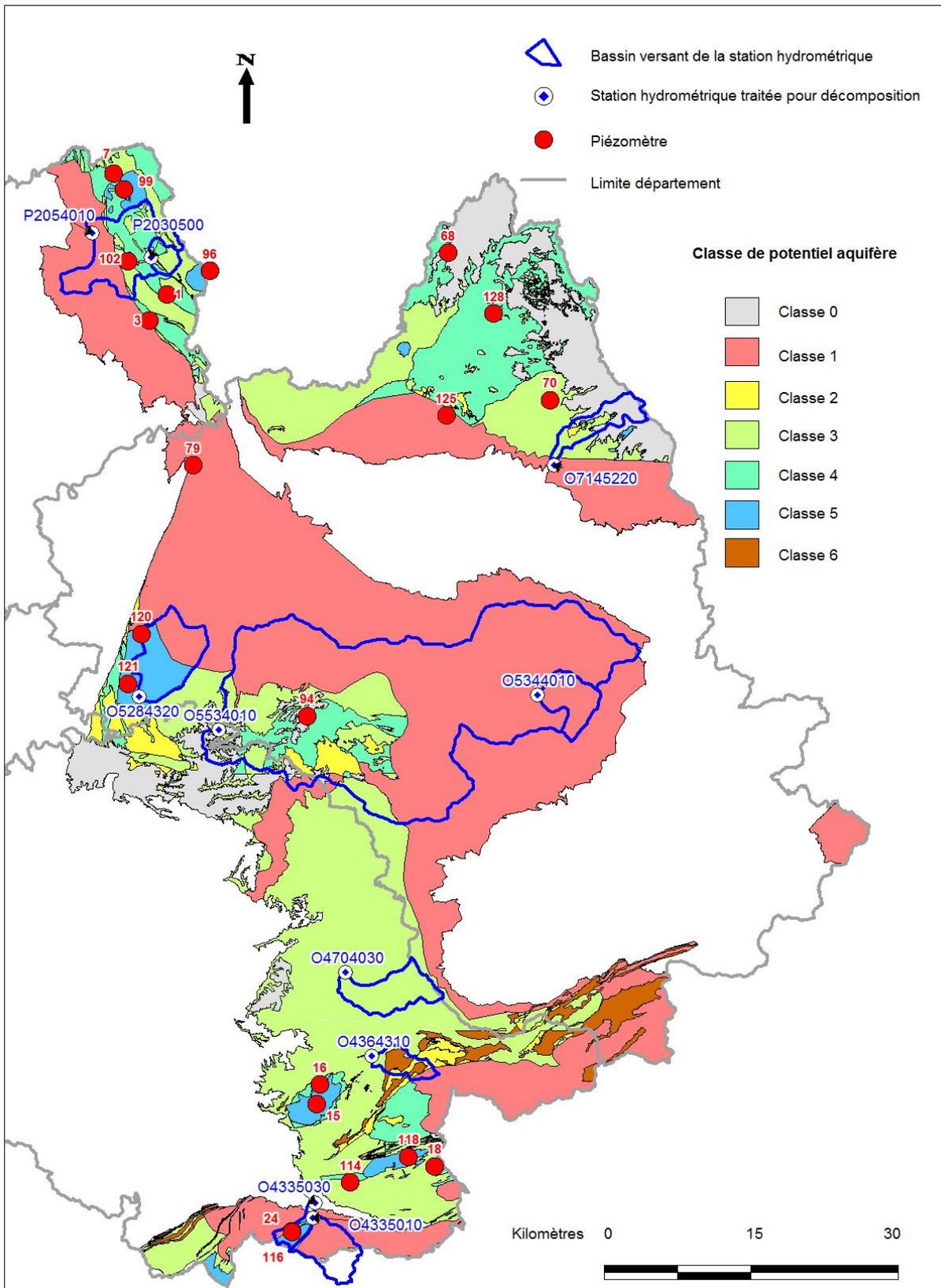


Illustration 94 - Localisation des stations hydrométriques pour décomposition de l'hydrogramme.

L'annexe 14 illustre un exemple de décomposition (station O5534010). Elle présente la décomposition de l'hydrogramme selon 3 récessions : écoulement rapide rattaché au ruissellement, écoulement retardé attribué à l'écoulement hypodermique rapide des terrains aquifères, et l'écoulement souterrain. La distribution de l'écoulement total entre le ruissellement et les écoulements souterrains (sans distinction) a été établie pour chaque année, et pour les années sèches. Le tableau de l'illustration 95 synthétise cette distribution par station.

Il confirme l'inertie de la nappe sur le bassin représenté par les piézomètres n° 24 et 116 et d'une manière globale la forte contribution des eaux souterraines au débit des cours d'eau. La correspondance entre les bassins communs ayant fait l'objet d'un traitement TEMPO semble indiquer que les contributions des eaux souterraines sont surestimées car elles intègrent l'écoulement hypodermique à transfert rapide. Celui-ci pourrait être évalué de l'ordre de 12 % en moyenne sur les zones traitées.

D'autre part la station O4704030 confirme la part non négligeable de la contribution des eaux souterraines de la classe 3 en potentiel aquifère avec un écoulement lent traduisant une relative résistance à la sécheresse de ce type d'aquifère. Il est de même pour la station O5284310 -20 mais avec une part plus accentuée des écoulements lents (classe 5 en potentiel aquifère). La station O5534010 confirme le caractère plutôt ruisselant du bassin largement influencée par son bassin amont. Dans le Lot, le contraste est marqué par les deux stations imbriquées (P2030500, P2054010), cette dernière étant plus contributive au débit des rivières du fait de la présence d'aquifères de classe 4 mieux représentés en terme surfacique.

Station ayant fait l'objet d'une décomposition	Période de mesures	Ruissellement débit moyen annuel (m3/s)	Écoulement souterrain débit moyen annuel (m3/s)	Ruissellement moyen (mm/an)	Écoulement souterrain moyen (mm/an)	Contribution moyenne des eaux souterraines à l'écoulement total (%)	Station ayant fait l'objet d'un traitement TEMPO (O/N)	Contribution moyenne des eaux souterraines à l'écoulement total (traitement TEMPO) (%)	Estimation écoulement "hypodermique" par rapport à l'écoulement total (%)	Piézomètre présent sur le bassin versant
O4335010	1970-1998	1.67	1.49	880	782	88.9	N	-	-	n° 24, 16
O4335030	2008-2011	1.61	1.39	644	557	86.5	N	-	-	-
O4364310	1950-1995	non exploitable	-	-	-	-	O	pas de valeur	-	-
O4704030	2001-2012	1.06	0.81	469	361	76.9	O	67	9.9	-
O5284310	1970-2012	1.17	0.87	358	265	74.1	O	72	2.1	-
O5344010	1961-2008	1.06	0.88	589	489	83	O	68	15	-
O5534010	1970-2002	2.90	1.87	68	44	64.5	O	43	21.5	n° 94
O7145220	1961-2003	1.61	1.30	960	776	80.9	N	-	-	-
P2030500	2012-2012	0.32	0.22	530	364	68.8	N	-	-	-
P2054010	2011-2012	1.95	1.49	336	257	76.5	N	-	-	n° 102

Illustration 95 - Tableau de synthèse de la décomposition des hydrogrammes.

5.5.3. Conclusions sur l'apport de l'analyse des hydrogrammes

L'analyse des hydrogrammes permet d'appréhender le fonctionnement et l'inertie des systèmes aquifères qui sont présents sur le bassin versant, notamment en l'absence de données piézométriques. Cependant, l'information recueillie est très globale, et la localisation des stations de mesures est le plus souvent inadaptée vis-à-vis de la position de ces aquifères. Les bassins ne sont pas homogènes d'un point de vue géologique et notamment du nouveau découpage effectué sur la base de l'altérabilité des formations de socle. Dans une perspective d'amélioration des connaissances, aussi bien vis-à-vis du potentiel aquifère des formations de socle, mais aussi de leur sensibilité à la sécheresse, il serait judicieux de cibler des sites expérimentaux de petites, voire très petites tailles, équipés pour le suivi quantitatif des eaux souterraines en concordance avec des mesures sur des stations hydrométriques représentant des bassins homogènes sur le plan géologique et hydrogéologique.

Dans le cadre de la présente étude, il n'est pas envisageable de retenir un indicateur global à la sécheresse qui serait représentatif à l'échelle de la zone de socle. Au regard de la quasi absence de données sur les eaux souterraines, les analyses d'hydrogrammes permettent de consolider les résultats obtenus par ailleurs.

5.6. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS : ÉLABORATION DE LA CARTE DES INDICATEURS À LA SÉCHERESSE EN DOMAINE DE SOCLE

5.6.1. Choix et quantification des critères

Les critères retenus dans le cadre de la présente étude pour caractériser la résistance à la sécheresse des aquifères de socle sont les suivants :

- **potentiel aquifère**, qui représente la capacité de l'aquifère à avoir une réserve en eau importante ;
- **densité de drainage de l'aquifère**, qui est censé représenter le compartimentage de l'aquifère et donc sa taille ;
- **l'inertie de la nappe**, qui caractérise sensu stricto sa résistance à la sécheresse.

La quasi absence de données, le fort compartimentage des aquifères de socle, et la faible quantité de piézomètres jugés représentatifs d'un aquifère ne permettent pas d'élaborer une méthodologie de quantification uniforme sur l'ensemble du domaine de socle. Deux traitements ont été nécessaires :

- pour les aquifères représentés par un piézomètre disposant d'une chronique de données exploitable ;
- les aquifères dépourvus de piézomètre (chronique absente ou non exploitable).

Les aquifères représentés par un piézomètre ont été traités à partir des 3 critères. Les autres ont été caractérisés à partir des deux premiers critères en l'absence de données hydrogéologiques suffisamment fiables permettant de caractériser l'inertie de la nappe.

Les valeurs obtenues pour chacun des 3 critères ont été classées et une note a été attribuée à chaque classe. La note a été choisie de façon à donner une valeur élevée lorsque la résistance à la sécheresse est forte (Illustration 96, 97 et 98).

a) Potentiel aquifère

Les notes de classes de potentiel aquifère affectées dans le cadre du programme POTAMAC ont été reprises avec quelques adaptations concernant les secteurs qui avaient été à l'époque estimées peu aquifères en raison du colmatage du profil d'altération qui était pourtant favorable. Les classes de valeurs constituées et les notes affectées sont les suivantes, du plus au moins résistant à la sécheresse :

Potentiel aquifère	Classe	Note
Extrêmement favorable	5	5
Très favorable	4	4
Favorable	3	3
Peu favorable	2	2
Défavorable	1	1

Illustration 96 - Critère « potentiel aquifère » - Tableau des notes.

La prise en compte de ce critère a nécessité le traitement préalable par SIG de la carte du potentiel aquifère pour les besoins des calculs. 16 polygones ont été créés et rattachés à son piézomètre représentatif. 4 zones ont été créées pour les piézomètres 18, 114, 79, et 125. Ils ont tous été affectés d'une classe 3. Les n° 18, 114 étaient déjà classés en classe 3, par contre il a été affecté une classe 3 pour les piézomètres n° 79 et 125 qui étaient classées en potentiel aquifère « défavorable » (classe 1). Leurs limites ont été établies sur celles des classes d'altérabilité 4 (« très favorable ») pour les points 79 et 125. Elles ont été définies sur

les limites des classes de potentiel des entités voisines et des limites de bassins versants d'ordre 3 en ce qui concerne les points 18 et 114. Certaines zones contiennent deux piézomètres. Dans chaque cas le point le plus représentatif a été retenu (piézomètre n° 7 par rapport au n° 99, n° 16 par rapport au n° 15, et n° 24 par rapport au n° 116).

b) Densité de drainage

Les notes de ce critère ont été affectées à chaque secteur représenté par un piézomètre, et dans leur intégralité, à partir des densités de drainage établies sur les bassins versants d'ordre 3 en fonction de leur représentativité surfacique. 4 classes ont été établies. La densité de drainage étant censé représenter le compartimentage de l'aquifère, la note définie sera retranchée avec un coefficient de pondération à celle du potentiel aquifère. Les notes les plus fortes sont donc les moins favorables vis-à-vis de la résistance à la sécheresse des aquifères. Les classes de valeurs constituées et les notes affectées sont les suivantes, du plus au moins sensible à la sécheresse:

Densité de drainage (km ⁻¹)	Compartimentage aquifère	Classe	Note
>1,37	Ruisselant, très compartimenté	1	4
1,16 – 1,37	Plutôt ruisselant, compartimenté	2	3
0,86 – 1.16	Plutôt infiltrant, moyennement compartimenté	3	2
< 0,86	Infiltrant, faiblement compartimenté	4	1

Illustration 97 - Critère « densité de drainage » - Tableau des notes.

c) Inertie de la nappe

Le critère « inertie de la nappe » a été seulement évalué sur les secteurs représentés par un piézomètre à partir des résultats du § 5.4.3 et de l'illustration 98. Il concerne 5 paramètres caractérisant de près ou de loin l'inertie de la nappe. Un classement de chaque aquifère représenté, pour chaque paramètre, a été établi. Afin de privilégier les paramètres les uns par rapport aux autres vis-à-vis de leur impact sur la sensibilité à la sécheresse des aquifères, une pondération a été apportée. Le temps de demi-décroissance a été privilégié (x3), puis le pouvoir régulateur de l'aquifère avec le maintien de l'effet de la pluie sur les niveaux de nappe (x2), les autres paramètres n'ont pas été pondérés (x1). Ce travail a permis de dresser un classement final à partir de la note obtenue et sur les aquifères ayant fait l'objet d'un traitement pour tous les paramètres (Illustrations 99 et 100).

Les classes et les notes du critère ont été définies à partir de la note finale pondérée. 3 classes complémentaires ont été rajoutées afin de prendre en compte les 7 piézomètres traités par seulement une partie des paramètres.

N°	DEP	COMMUNE	Effet mémoire aquifère (classement)			Temps de demi-décroissance (classement)	Pic de réaction aux pluies (classement)	Maintien de l'effet de la pluie sur les niveaux (classement)		Pouvoir régulateur (classement)	Total sans pondération	Classement vis-à-vis de la résistance à la sécheresse (sans pondération)	Total avec pondération	Classement vis-à-vis de la résistance à la sécheresse (avec pondération)
			1	2	3			1	2					
		Pondération												
1	46	LAURESSES	5	11	11	11	11	11	10	48	1	91	1	
3	46	SABADEL-LATRONQUIERE	7	1	5	7	5	7	3	23	9	35	9	
7	46	COMIAC	9	2	8	9	8	9	1	29	6	43	8	
15	81	BURLATS	3	6	7	6	7	6	4	26	7	48	7	
16	81	LACROUZETTE	10	8	6	3	6	3	9	36	3	64	3	
18	81	ANGLES												
24	81	MAZAMET	11	7	2	5	2	5	8	33	5	60	4	
68	12	TAUSSAC												
70	12	MONTPEYROUX												
79	12	ASPRIERES	8	9	10	1	10	1	6	34	4	59	5	
94	12	CAMUJAC												
96	15	PARLAN												
99	46	SOUSCEYRAC												
102	46	GORSES												
114	81	PONT DE L'ARN	1	5	4	8	4	8	7	25	8	50	6	
116	81	MAZAMET	6	3	1	2	1	2	5	17	10	30	11	
118	81	ANGLES	4	4	3	4	3	4	2	17	10	31	10	
120	12	SANVENSE	2	10	9	10	9	10	11	42	2	83	2	
121	12	LA FOUILLADE												
125	12	NAYRAC												
128	12	SAINTE-SYMPHOREN-DE-THENIERE												

Illustration 98 - Tableau de synthèse du critère « inertie de la nappe ».

Inertie de la nappe (calcul avec pondération)	Classe	Note
>70 points	1	7
55 – 70 points	2	6
40 – 55 points	3	5
25 – 40 points	4	4
< 25 points (note relative forte)	5	3
< 25 points (note relative moyenne)	6	2
< 25 point (note relative faible)	7	1

Illustration 99 - Critère « inertie de la nappe » - Tableau des notes.

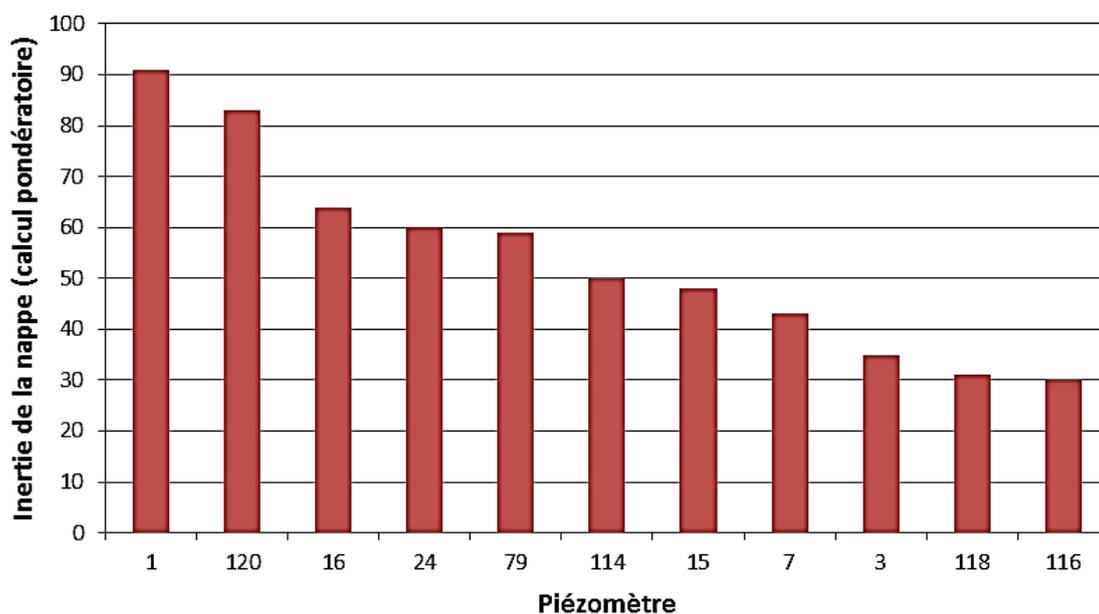


Illustration 100 - Classement des aquifères représentés par les piézomètres vis-à-vis du critère « inertie de la nappe ».

5.6.2. Pondération des critères

L'indicateur de résistance à la sécheresse (IRS) a été calculé en pondérant et en sommant les notes attribuées à chaque classe. La pondération a été choisie de façon à refléter l'importance du critère dans son rôle régulateur face à l'occurrence d'une sécheresse.

$$IRS_j = \sum_{i=1}^n p_i N_{j,i}$$

Avec :

IRS_j : l'indice de résistance à la sécheresse de l'aquifère j,

p_i : le poids du critère i,

$N_{j,i}$: la note attribuée au critère i pour l'aquifère j.

Une pondération différente a été définie suivant les deux traitements réalisés :

- **Aquifère représenté par un piézomètre et intégrant le critère « inertie de la nappe » :**

$$IRS = [IRS_{\text{potentiel aquifère}}] \times 3 - [IRS_{\text{densité de drainage}}] \times 1 + [IRS_{\text{inertie de la nappe}}] \times 3$$

La représentation des IRS est celle des unités relatives au potentiel aquifère dans leur intégralité.

- **Aquifère dépourvu de chroniques et n'intégrant pas le critère « inertie de la nappe »**

$$IRS = [IRS_{\text{potentiel aquifère}}] \times 3 - [IRS_{\text{densité de drainage}}] \times 2$$

Ce dernier critère a été établi par rapport aux découpages en bassins versants d'ordre 3 des polygones du potentiel aquifère. La représentation des classes IRS est donc celle des bassins versants découpés au sein d'une unité relative au potentiel aquifère.

5.6.3. Carte de la sensibilité des aquifères de socle à la sécheresse

Le calcul de l'IRS a permis de définir les classes de sensibilité à la sécheresse des aquifères de socle. Elles sont les suivantes :

- **Aquifère représenté par un piézomètre et intégrant le critère « inertie de la nappe »**

Six classes ont été définies variant entre des aquifères très peu sensibles à très fortement sensibles à la sécheresse.

- **Aquifère dépourvu de chroniques et n'intégrant pas le critère « inertie de la nappe »**

Cinq classes ont été définies variant entre : formations aquifères et peu sensibles à la sécheresse et formations peu ou non aquifères et très sensibles à la sécheresse.

La correspondance des classes de sensibilité entre ces deux approches ne peut être établie. Cependant, les différentes analyses effectuées (notamment approche par l'étude des hydrogrammes) permettent d'avancer que globalement les formations caractérisées par l'approche avec 3 critères (approche 1) sont nettement moins sensibles que celles de l'approche menée avec 2 critères (approche 2).

La carte finale de la sensibilité à la sécheresse des aquifères de socle est présentée en Illustration 101. Trois entités seulement sont caractérisées par une très faible sensibilité à la sécheresse sur le domaine de socle. Il s'agit des aquifères suivis par les piézomètres n° 01, 120 et 24 (ou 116).

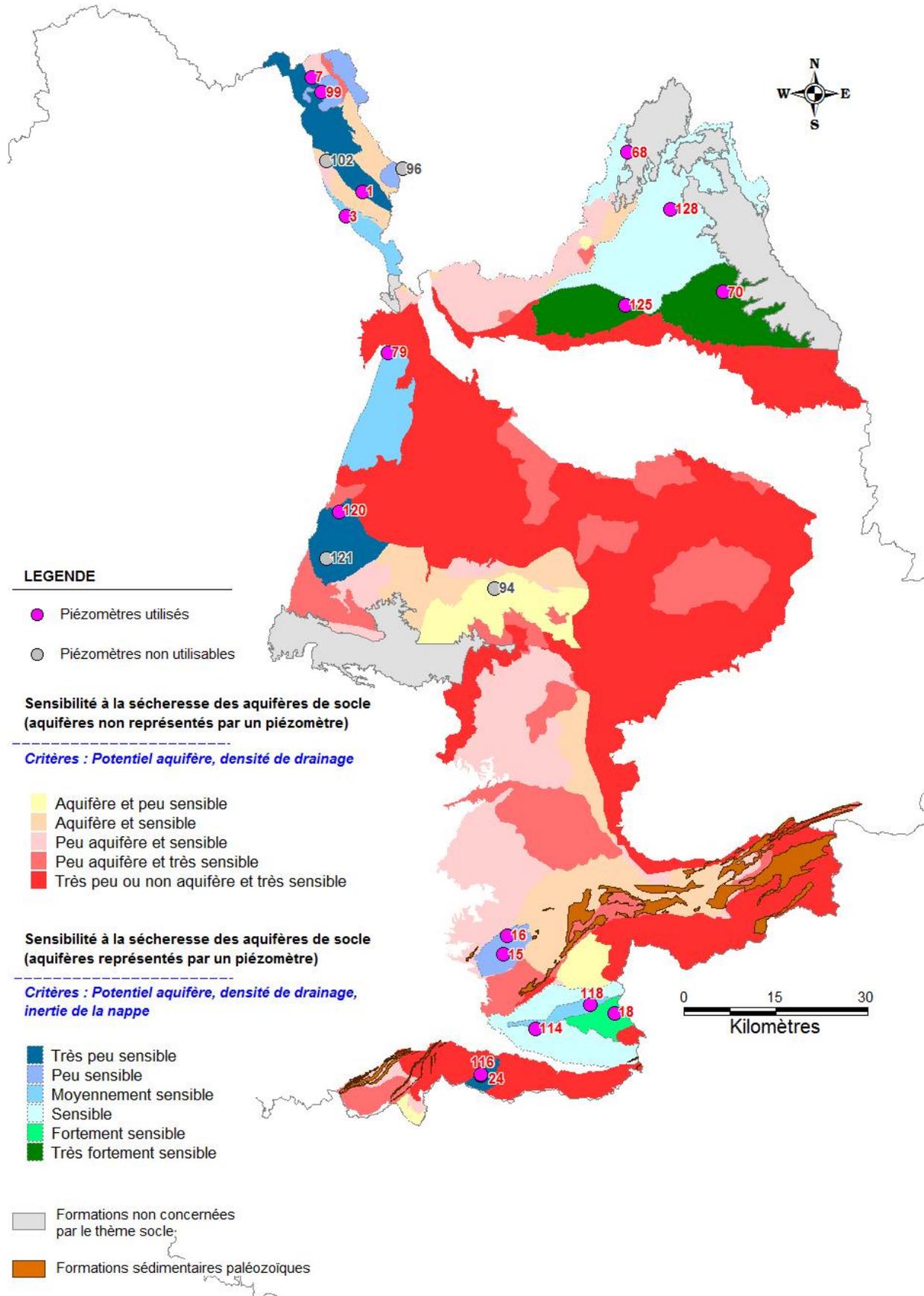


Illustration 101 - Carte de la sensibilité à la sécheresse des aquifères de socle.

5.6.4. Conclusions et perspectives

L'étude de la sensibilité à la sécheresse des aquifères nécessite une bonne connaissance de plusieurs paramètres caractérisant notamment le potentiel aquifère et l'inertie de la nappe. Ces paramètres nécessitent généralement de disposer de chroniques suffisamment longues (plusieurs cycles hydrologiques) pour permettre d'estimer avec un niveau de confiance acceptable les Indicateurs de Résistance à la Sécheresse dans le cadre d'une gestion anticipative des eaux souterraines pendant les périodes de crise.

Le domaine de socle a longtemps été dépourvu de données exploitables pour permettre une gestion des eaux efficace, notamment lors des périodes de déficits en apport d'eau (sécheresse). La structure même de ces aquifères leur confère généralement de relativement faibles emmagasineurs mais les réserves en eau souterraine peuvent être importantes. Ils jouent un rôle primordial dans le soutien qu'ils apportent au débit des cours d'eau en période d'étiage, notamment lors d'évènement extrême. Il est ainsi important d'améliorer leur connaissance. Dans le Massif central plusieurs perspectives d'amélioration peuvent être retenues :

- préciser le potentiel aquifère des secteurs les moins connus et actuellement classés comme « défavorable » à une échelle régionale ;
- réactualiser le référentiel BD LISA dans les formations de socle pour avoir une base de gestion commune avec les autres types d'aquifères en présence sur le bassin Adour-Garonne ;
- mettre en place un réseau représentatif suffisamment dense, et spécifique aux formations de socle (aspect qualitatif et quantitatif) ;
- améliorer la connaissance dans le fonctionnement des aquifères composites que sont les formations de socle, en axant la compréhension des processus de recharge entre les horizons altéritiques et fissurés, à partir de petits bassins expérimentaux représentatifs des différents types d'altérabilité en présence, et faisant l'objet d'un équipement complet (eaux souterraines, eau de surface, etc.).

6. Évaluation de la sensibilité à la sécheresse des aquifères karstiques

6.1. SPÉCIFICITÉ DES AQUIFÈRES KARSTIQUES

6.1.1. Structure des aquifères karstiques

Classiquement, trois grandes parties sont distinguées dans la structure d'un aquifère karstique (Illustration 102) :

- une **zone épikarstique** représentant la partie la plus proche de la surface, épaisse de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Les phénomènes d'altération y sont très importants, en particulier la dissolution ;

Cette zone correspond à la zone d'alimentation où l'eau s'infiltré dans une nappe perchée locale et discontinue, drainée vers le bas soit par les vides les plus larges en un ruissellement souterrain rapide, soit par les vides de petites dimensions en une infiltration lente. Elle est donc le siège d'un stockage temporaire des écoulements et constitue un aquifère perché épikarstique où les écoulements horizontaux sont prépondérants.

Les reliefs ruiniformes, les champs de lapiaz, les dolines se trouvent dans cette zone, ces différentes figures présentent dans le paysage favorisant l'infiltration des précipitations ou de l'eau de ruissellement qui seront stockée temporairement ou qui rejoindront directement la zone noyée via des conduits verticaux (sans transiter par l'aquifère épikarstique).

- une **zone d'infiltration** des eaux constituée par la partie non saturée de l'aquifère au sein de laquelle des écoulements lents s'opèrent au sein des fines fissures et des écoulements rapides s'effectuent au niveau des conduits verticaux plus ou moins connectés au réseau de conduits karstiques de la zone noyée ;
- une **zone noyée** qui correspond à la zone de stockage des eaux dans laquelle sont distingués les drains assurant la fonction transmissive de l'aquifère et les systèmes annexes au drainage, situés principalement à l'aval du massif. Ces derniers sont constitués de vides de grande taille organisés en ensembles individualisés et ils sont en connexion hydraulique avec les conduits du réseau de drainage souterrain.

6.1.2. Différentes configurations de systèmes karstiques

En fonction de la nature de l'impluvium et de la genèse de l'aquifère (ou de son état), différentes configurations de systèmes karstiques vont être différenciées (Illustration 103).

La nature de l'impluvium permet de distinguer :

- les karsts unaires où l'ensemble de l'impluvium est constitué de terrains karstifiables ;
- les karsts binaires alimentée d'une manière non négligeable par des écoulements de surface provenant de la zone non karstique et imperméable du bassin versant et qui s'infiltreront par l'intermédiaire de pertes.

Le rôle d'un impluvium non karstique est fondamental car il concentre l'énergie disponible en un seul point, ce qui accélère et augmente le développement d'une structure de drainage (Marsaud B., 1997).

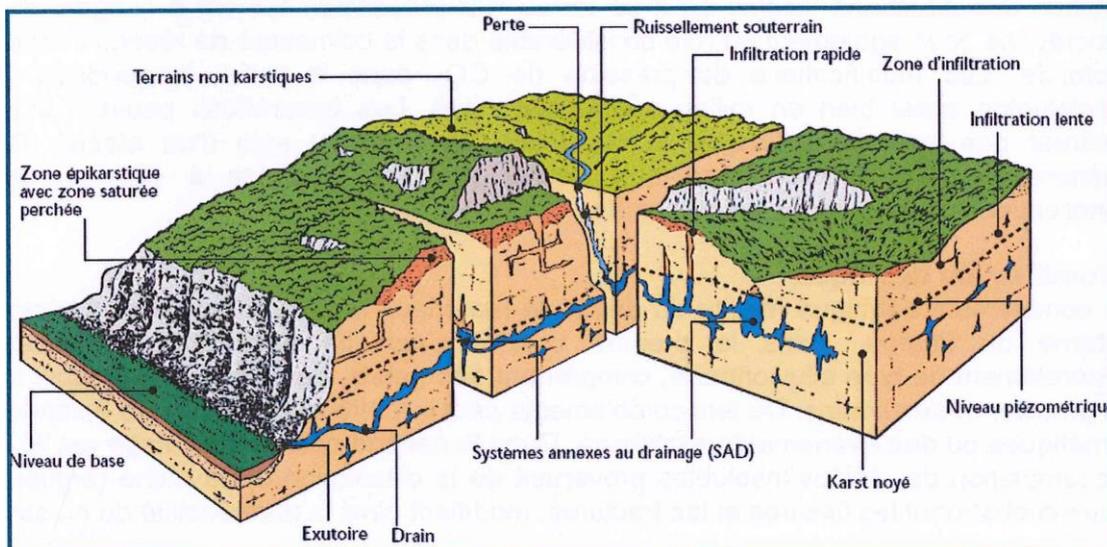
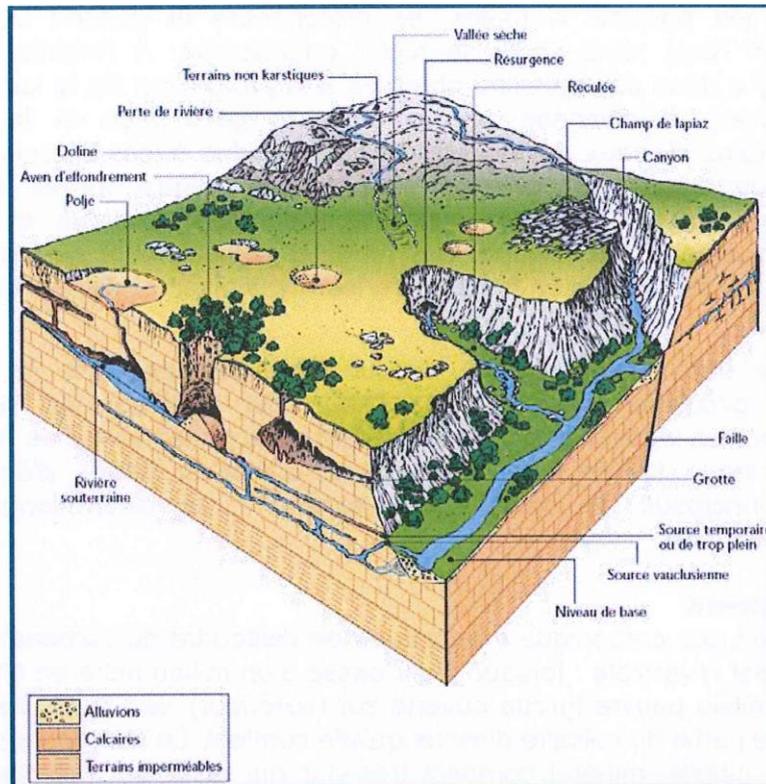


Illustration 102 - Représentation schématique d'un aquifère karstique (AERMC, 1999 et AERMC 1999 d'après Mangin A., 1975).

En fonction de l'état de genèse de l'aquifère, les drains peuvent s'organiser à proximité même de la surface piézométrique ou, au contraire à grande profondeur, ce qui revient à distinguer :

- les karsts jurassiens où le réseau de drainage s'organise à proximité du niveau de l'exutoire ;
- les karsts vauclusiens où la karstification se développe en profondeur sous le niveau de base.

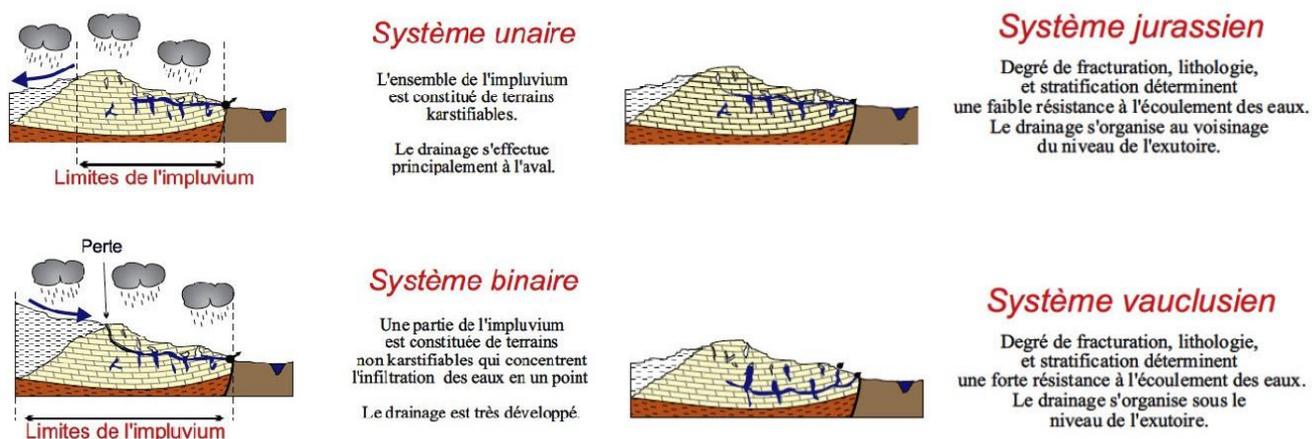


Illustration 103 - Configurations des systèmes karstiques (Marsaud B., 1997).

6.1.3. Propriétés fondamentales des aquifères karstiques : notions d'évolution et de fonctionnalité

Une structure karstique est à la fois une structure hydrologique (organisation des écoulements) et une structure morphologique (organisation des vides karstiques), engendrée par l'érosion karstique. Cette érosion est liée à l'évolution morphologique des paysages en fonction des modifications climatiques et des mouvements tectoniques. Deux propriétés fondamentales des aquifères karstiques résultants du processus de karstification sont généralement considérées :

- le **degré d'évolution** de l'aquifère intégrant le fait que la karstification correspond à une évolution au cours de laquelle certains vides du milieu fissuré originel s'élargissent alors que d'autres se colmatent pouvant aboutir à terme à la création d'une structure de drainage organisée et isolée du milieu fissuré originel ;
- la **fonctionnalité de l'aquifère** définie l'existence d'un comportement karstique des écoulements à la résultante de la conjonction d'une structure organisée (présence de conduits ou drains) et d'un fort potentiel hydraulique aux limites du système. Si l'un de ces éléments manque, comme cela peut être le cas lors d'une remontée du niveau de base, il n'y a plus de comportement karstique d'un point de vue hydraulique et le système n'est alors plus fonctionnel.

6.2. ENTITÉS KARSTIQUES DE MIDI-PYRÉNÉES

Le domaine karstique représente une superficie supérieure à 15 000 km², soit plus du tiers de la surface et plus de la moitié des ressources en eaux souterraines de Midi-Pyrénées (Illustration 104). Les principales entités karstiques sont situées dans les régions naturelles suivantes :

- les Causses du Quercy (8 000 km²) ;
- les Grands Causses de l'Aveyron (3 500 km²) ;
- les calcaires des Monts de Lacaune et de la Montagne Noire (< 1 000 km²) ;
- les chaînons calcaires secondaires et massifs primaires nord-pyrénéens (3 500 km²).

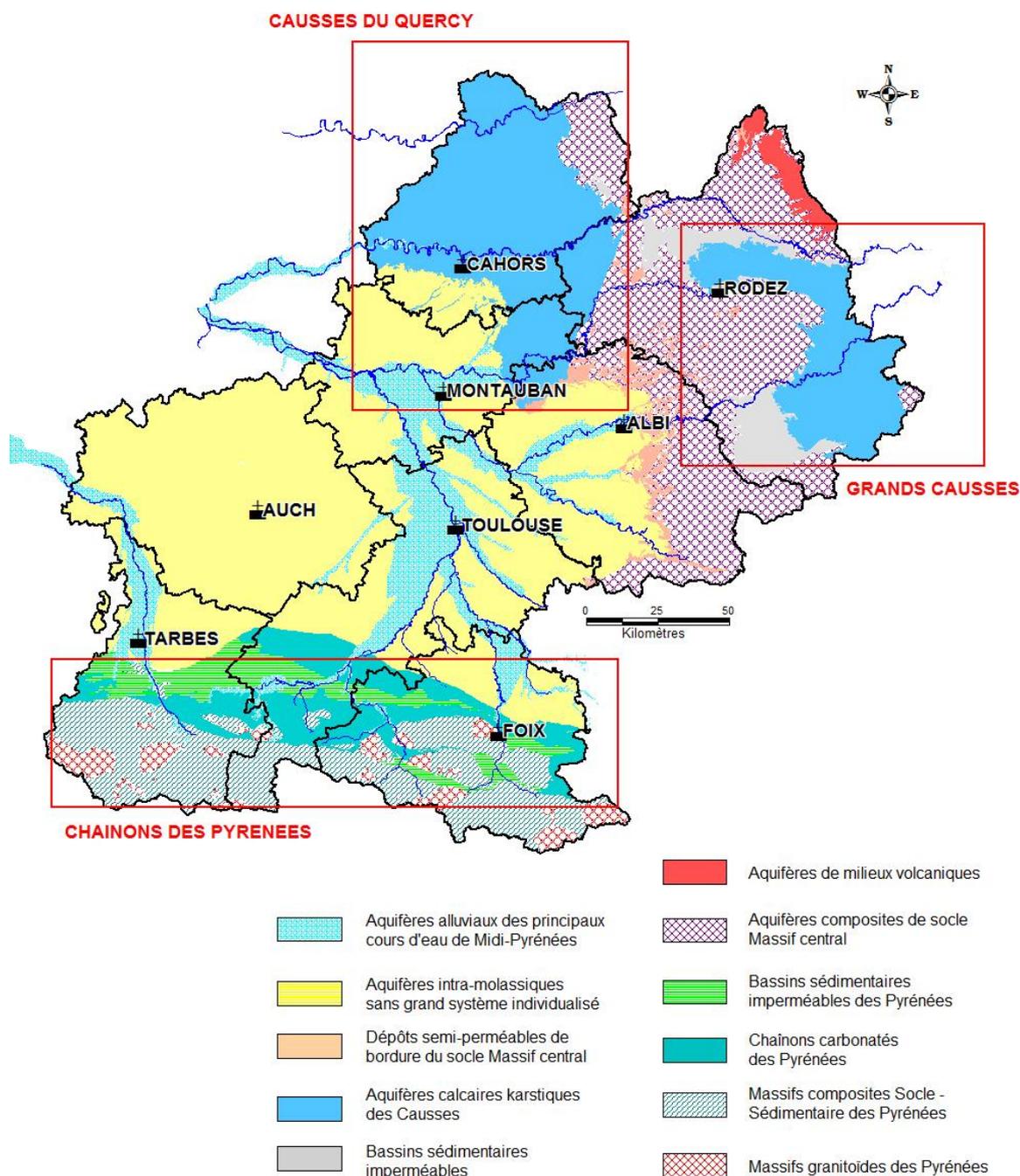


Illustration 104 - Principales entités karstiques de la région Midi-Pyrénées.

Les calcaires lacustres tertiaires (constituant un des faciès de l'empilement des formations molassiques du Bassin aquitain) de la Romieu ou de l'Agenais (département du Gers), du Quercy blanc ou de Castres sont morcelés par le réseau hydrographique et souvent perchés. Ils renferment des systèmes karstiques de dimensions restreintes.

Les séries carbonatées du domaine karstique en Midi-Pyrénées sont présentes sur l'ensemble de l'échelle stratigraphique comme le montre le tableau de l'illustration 105.

L'organisation structurale et l'histoire géologique sont à l'origine des variations latérales de faciès modifiant l'épaisseur et la porosité des ensembles carbonatés de la région. L'annexe 15 rappelle les coupes lithostratigraphiques des aquifères karstiques établies entre le Quercy et les Grands Causse et pour les Pyrénées centrales à l'occasion de l'état des lieux et de la définition du programme d'actions engagé pour les karsts de Midi-Pyrénées en 1997.

TERTIAIRE	MIOCENE OLIGOCENE PALEOCENE	La Romieu, l'Agenais (32) Quercy Blanc (46, 82), Cordes (81) Plantaurel (09), Petites Pyrénées (31)
SECONDAIRE	CRETACE MALM – DOGGER LIAS	Bouriane (46), Chaînons calcaires Nord-Pyrénéens (09, 31, 65) Causses du Quercy : Martel, Gramat, Limogne (46) Causse Comtal (12) Grands Causses : Masegros, Noir, Larzac (12) Causse Rouge (12)
PRIMAIRE	DEVONIEN CAMBRIEN	Massifs primaires Nord-Pyrénéens (09, 31, 65) Montagne Noire (81), Monts de Lacaune (81)

Illustration 105 - Séries carbonatées du domaine karstique en Midi-Pyrénées.

6.2.1. Les karsts de la bordure nord orientale du Bassin aquitain

Les karsts de la bordure nord orientale du Bassin aquitain forment trois principaux ensembles bien individualisés, regroupant des unités géomorphologiques généralement définies par les vallées et/ou les limites géologiques.

- Les **Causses du Quercy** à ossature jurassique (Dogger-Malm) regroupant des unités géomorphologiques bien distinctes, soit du nord au sud, le Causse de **Martel**, le Causse de **Gramat** et le Causse de **Limogne** ;
- Les **Grands Causses** se subdivisent en plusieurs unités géographiques dont les principales à ossature jurassique (Dogger-Malm) toujours du nord au sud, le Causse **Comtal**, le Causse de **Séverac**, le Causse de **Masegros**, le Causse de **Sauveterre**, le Causse **Noir**, le Causse de **Méjean** et le Causse du **Larzac** et à ossature liasique (Hettangien à Lotharingien), le Causse **Rouge**, le Causse de **Saint-Affrique** et le Causse de **Caussanus** ;
- Les **calcaires des Monts de Lacaune et de la Montagne Noire** correspondant aux bandes de terrains carbonatés primaires (Cambrien) disposés dans des structures plissées de direction SW-NE.

Les systèmes karstiques des Causses du Quercy

Les Causses du Quercy représentent près de la moitié de la superficie du domaine karstique de la région Midi-Pyrénées. Situés dans le département du Lot, ils sont formés du nord au sud par le Causse de Martel, le Causse de Gramat et le Causse de Limogne dont la partie sud se prolonge dans le Tarn-et-Garonne.

Les entités karstiques des Causses du Quercy délimitées dans la BD LISA V0 (NV3) concernent principalement 8 unités aquifères des formations du Coniacien-Santonien à celles de l'Hettangien-Sinemurien. Le tableau de l'illustration 106 récapitule l'ensemble des entités hydrogéologiques concernées associé aux sources karstiques suivies dans le cadre des réseaux de mesure. L'illustration 107 indique leur localisation sur les Causses du Quercy. Actuellement, 3 unités aquifères sont dépourvues de points de surveillance par des sources (entités 348AA01, 348AA03 et 362AA01), sachant que l'entité 348AA03 fait l'objet d'un suivi par un forage (08323X0205/F) traité dans le chapitre 4 (Illustration 23).

Code Entité BD LISA	Dénomination	Sources suivies
348AA01	Calcaires, grès et marnes du Coniacien-Santonien du nord du Bassin aquitain	Aucun point de suivi
348AA03	Calcaires, grès et sables du Turonien du nord du Bassin aquitain	Aucun point de suivi
352AA01	Calcaires et dolomies du Tithonien du Bassin aquitain	Font Vincent (08567X0028/HY) Le Martinet (08567X0027/HY) Rigal bas (08327X0007/HY)
356AB01	Calcaires du Kimméridgien du nord du Bassin aquitain	Font-Polemie (08576X0022/HY)
358AE03	Calcaires micritiques et bioclastiques du Bathonien moyen à Oxfordien du nord du Bassin aquitain	Blagour (08091X0006/HY) Le Boulet (08091X0001/HY) Font-Belle (08332X0011/HY) La Pescalerie (08577X0029/HY) Trou Madame (08814X0011/HY) Lantouy (08821X0014/HY) Candé (09052X0002/HY) La Gourgue (09058X0022/HY)
358AE07	Calcaires et dolomies du Bajocien du nord du Bassin aquitain	La Diège (08587X0008/HY)
362AA01	Calcaires et grès du Domérien supérieur du Bassin aquitain	Aucun point de suivi
362AA03	Calcaires, dolomies et anhydrite de l'Hettangien-Sinémurien du Bassin aquitain	La Seye (09065X0019/L) Themines (08341X0011/HY)

Illustration 106 - Tableau récapitulatif des unités aquifères représentées sur les Causses du Quercy et des sources karstiques suivies dans le cadre d'un réseau de mesure.

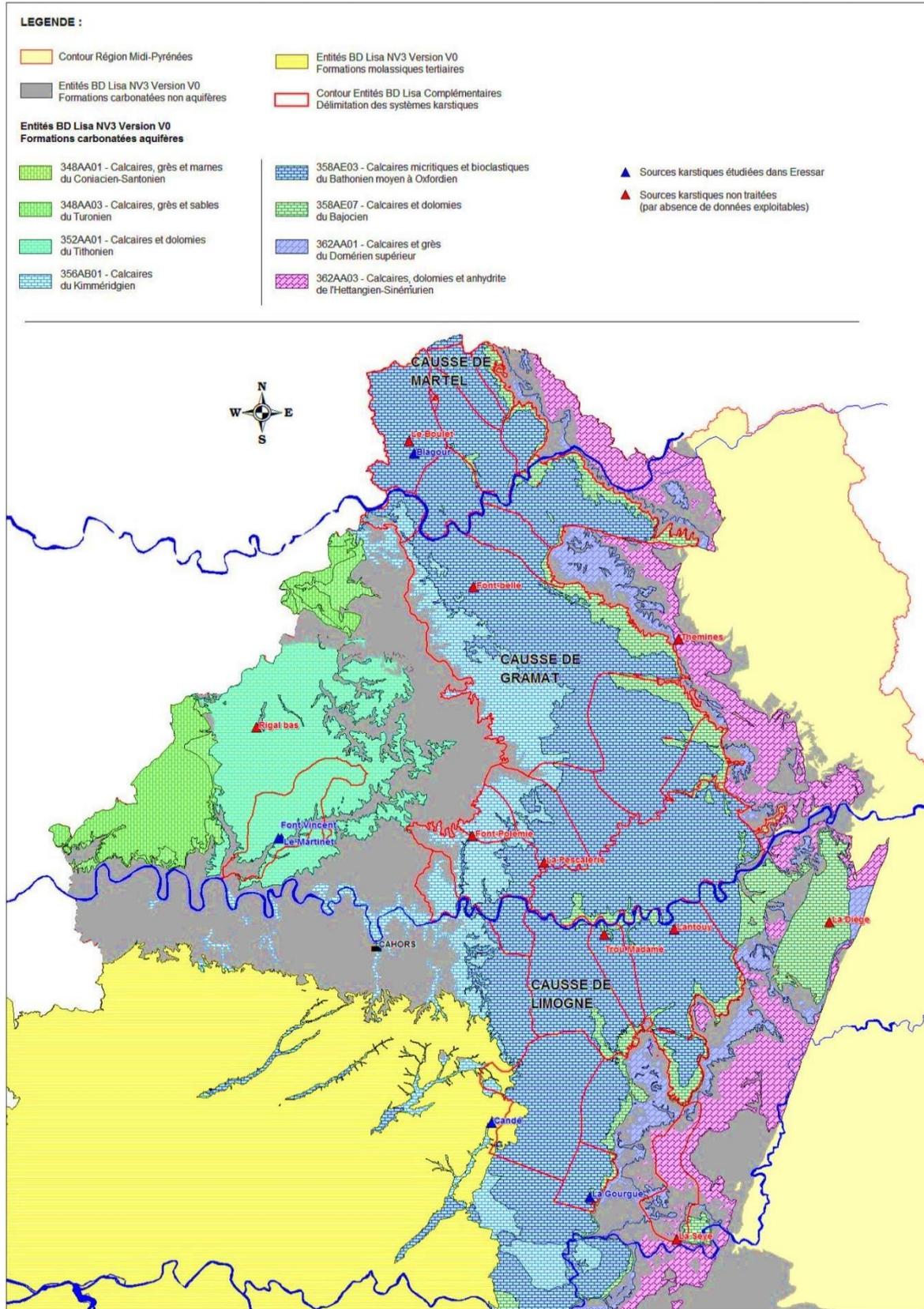


Illustration 107 - Unités aquifères (BD LISA V0) des Causse du Quercy et sources karstiques suivies dans le cadre d'un réseau de mesure.

Les systèmes karstiques des Grands Causses

L'ensemble karstique des Grands Causses forme une vaste unité géographique se développant dans la partie méridionale du Massif central à cheval sur les régions Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon. Cette zone est caractérisée par de grandes étendues tabulaires entaillées par d'étroites vallées accidentées et creusées par les rivières Tarn, Jonte et Dourbie, Vis etc...qui subdivisent du nord au sud 4 unités principales :

- le Causse de Sauveterre ;
- le Causse de Méjean ;
- le Causse Noir ;
- le Causse du Larzac.

Séparées par des failles, deux unités annexes un peu moins élevées forment :

- le Causse Comtal ;
- le Causse Rouge.

La coupe hydrogéologique synthétique des Grands Causses est représentée par une série aquifère supérieure séparée d'une autre série aquifère inférieure par un important niveau de marnes du Lias (Illustration 108).

L'aquifère supérieur est représenté par les formations calcaires et dolomitiques de l'Aalénien au Tithonien formant une vaste aire d'alimentation dans laquelle se développe de nombreux avens et réseaux souterrains.

La série aquifère inférieure correspond aux formations calcaires et dolomitiques du Lias (Hettangien-Sinemurien). Le mur est soit constitué par le Trias supérieur marneux ou conglomératique ou lorsqu'il est absent directement par le socle cristallin et métamorphique ou sur les formations argilitiques et gréseuses du Permien.

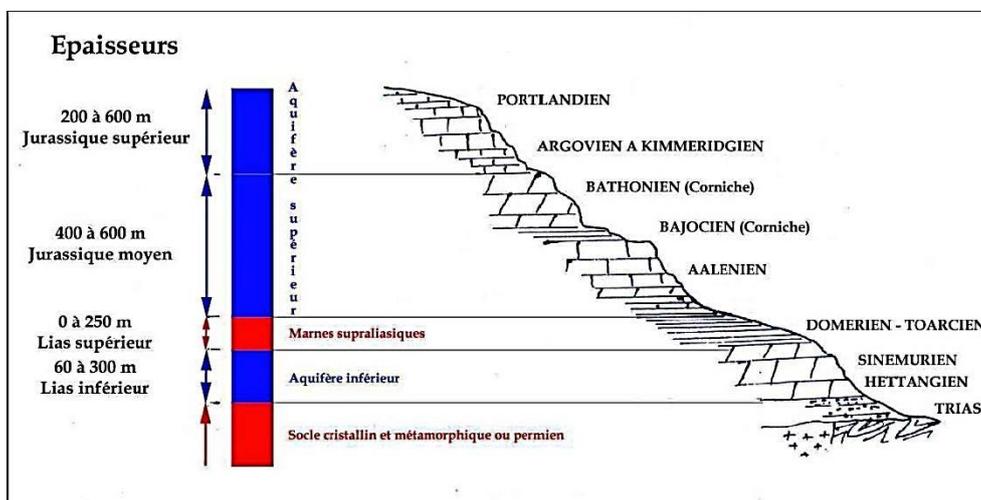


Illustration 108 - Coupe hydrogéologique synthétique des Grands Causses.

Les entités karstiques des Grands Causses délimitées dans la BD LISA V0 (NV3) concernent 5 unités aquifères appartenant à la série supérieure réparties en fonction des différents causses et 7 autres unités aquifères correspondant à la série inférieure. Le tableau de l'illustration 109 récapitule l'ensemble des entités hydrogéologiques concernées associé aux sources karstiques suivies dans le cadre des réseaux de mesure. L'illustration 110 indique leur localisation sur les Grands Causses. Actuellement, 5 unités aquifères sont dépourvues de points de surveillance par des sources (entités 358A101, 362AC02, 362AC18, 362AC22 et 362AC23).

Code Entité BD LISA	Dénomination	Sources suivies
358AI01	Calcaires et dolomies de l'Aalénien au Tithonien dans le Causse Noir du système des Grands Causses	Aucun point de suivi
358AI02	Calcaires et dolomies de l'Aalénien au Tithonien dans le Causse de Massegros- Séverac - système des Grands Causses	Esparses (08851X0008/HY) Lestang (08852X0006/HY) Ruisseau de Serre (08853X0007/HY) Duc (08853X0024/HY) Segala (08856X0072/HY) La Bastide (08857X0010/HY) Cayrac (08857X0013/HY) La Verlenque (08857X0030/HY) Mas de la Font (09094X0017/HY)
358AI10	Calcaires et dolomies de l'Aalénien au Tithonien dans le Causse du Larzac du système des Grands Causses	Esperelle (09098X0081/HY) Lavencou (09352X0005/HY) Boundoulaou (09352X0048/HY) Ladoux (09353X0002/HY) Brias (09356X0025/HY) Aiguebelle (09357X0011/HY) Durzon (09365X0019/HY) Sainte-Beaulize (09613X0010/HY) La Gloriette (09614X0003/HY) Sorgue du Larzac (09614X0036/GL)
358AI11	Calcaires et dolomies de l'Aalénien au Tithonien dans le Causse du Comtal du système des Grands Causses	Muret-le-Château (08605X0007/HY)
362AC01	Dolomies et calcaires de l'Hettangien au Carixien dans les causses de Séverac et de Massegros	Glassac (08851X0006/HY) Mayrinhac (08851X0009/HY) Tantayrou (08856X0007/HY) Buzareingnes (08856X0062/HY) Barbade (09097X0037/HY) Fontliane nouvelle (09097X0080/HY) Les Douzes (09352X0026/HY)
362AC02	Dolomies et calcaires de l'Hettangien au Carixien dans le Causse noir	Aucun point de suivi
362AC17	Unité aquifère captive des grès et calcaires de l'Hettangien et Sinémurien dans la région des Grands Causses	Cernon (09357X0022/HY) Trou de Rause (09357X0023/HY)
362AC18	Grès et calcaires de l'Hettangien et Sinémurien dans le Causse Begon	Aucun point de suivi
362AC20	Grès et calcaires de l'Hettangien et Sinémurien dans le Causse de Saint-Affrique	La Mouline (09357X0018/HY)
362AC21	Grès et calcaires de l'Hettangien et Sinémurien dans le Causse de Caussanus - Guilhaumard - Loubiere	La Dragonnière (09355X0014/HY)
362AC22	Grès et calcaires de l'Hettangien et Sinémurien dans le Causse du Comtal	Aucun point de suivi
362AC23	Grès et calcaires de l'Hettangien et Sinémurien dans le Causse de Rignac	Aucun point de suivi
364AC01	Marnes, argilites et grès du Trias des Grands Causses	Saint-Pierre (09092X0002/HY)

Illustration 109 - Tableau récapitulatif des unités aquifères représentées sur les Grands Causses et des sources karstiques suivies dans le cadre d'un réseau de mesure.

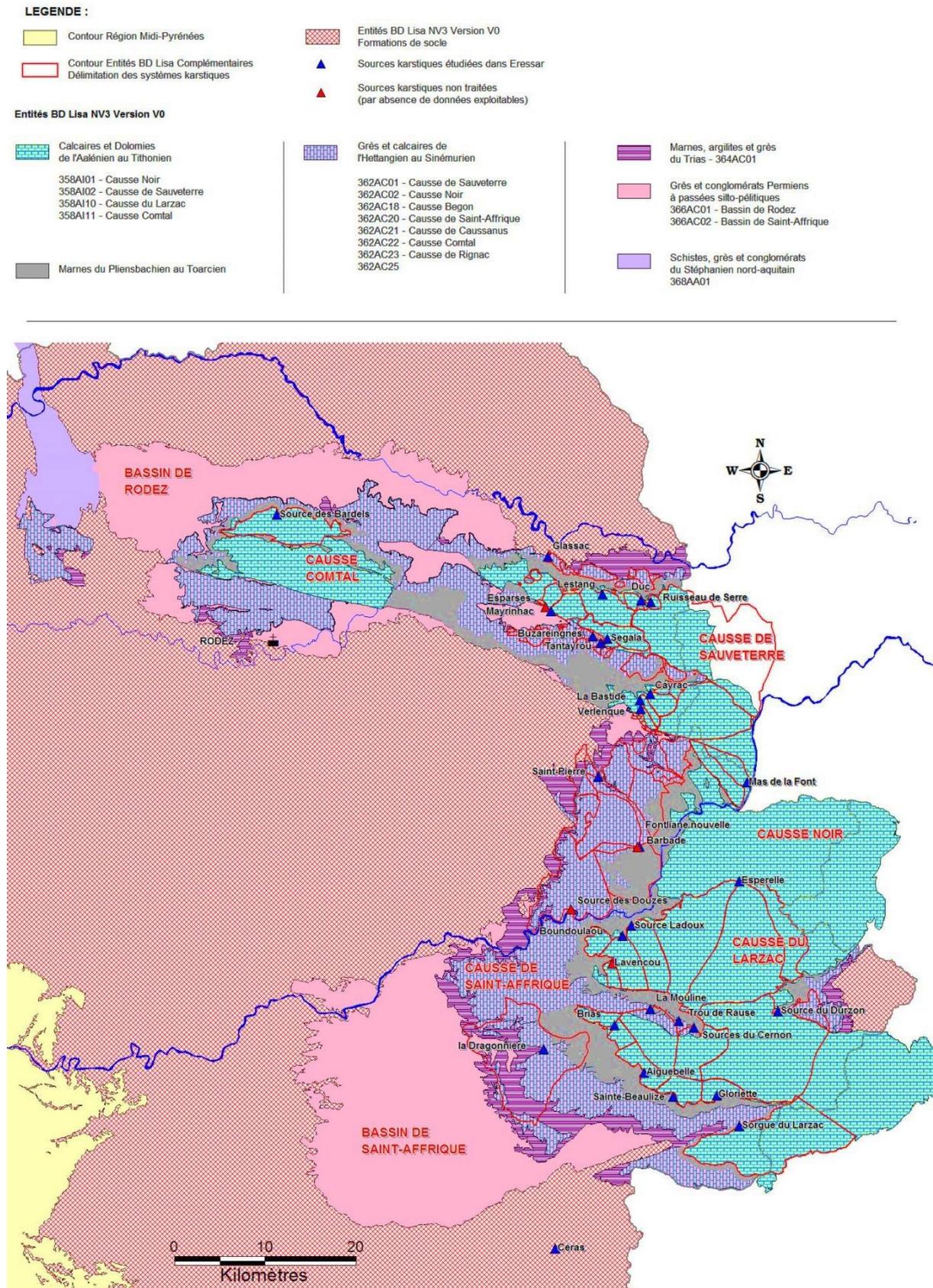


Illustration 110 - Unités aquifères (BD LISA V0) des Grands Causses et sources karstiques suivies dans le cadre d'un réseau de mesure.

Les systèmes karstiques des Monts de Lacaune et de la Montagne Noire

Les calcaires du Cambrien constituent l'essentiel des ressources dans les Monts de Lacaune. Ils sont disposés en bandes dans des structures plissées de direction sud-ouest/nord-est. La plus importante source issue de ces calcaires semble être la source de Céras (09615X0033/HY) actuellement suivie dans le cadre du réseau de connaissance du Parc Régional des Grands Causses. Elle émerge dans la vallée du Dourdou au contact des formations carbonatées du Cambrien et l'ensemble gréso-schisteux sous-jacent (Illustration 110).

6.2.2. Les karsts pyrénéens

Le contexte géologique et structural détermine le schéma hydrogéologique du massif pyrénéen. En effet, en fonction de la lithologie, des déformations subies par les roches, de la profondeur et de l'activité des accidents tectoniques, les ressources en eaux souterraines sont diverses et très irrégulièrement réparties. En ce qui concerne les formations karstiques, ces dernières ne sont pas continues et constituent des ensembles relativement isolés, désignés par le terme de massif karstique. Au sein de ces massifs, lorsque la karstification intervient, l'aquifère se structure en différentes unités de drainage, appelées systèmes karstiques.

De l'Ordovicien à l'Eocène les formations carbonatées se répartissent sur la totalité des Pyrénées centrales. Ces aquifères karstiques, notamment les calcaires du Jurassique et du Crétacé inférieur et ceux du Dévonien, constituent les réservoirs les plus importants du massif pyrénéen. Ils sont d'autant mieux réalimentés qu'ils sont situés en altitude. Schématiquement en fonction de la nature des formations carbonatées, leur structure et leur position au sein des unités structurales de la chaîne, les séries carbonatées peuvent être divisées en quatre grands ensembles :

✓ Les séries paléozoïques

Les formations carbonatées paléozoïques ont au total une puissance de 250 à 300 m et sont réparties tout au long de la série stratigraphique, toutefois les deux ensembles karstiques les plus notables sont les suivants :

- 50 à 100 m de calcaires plus ou moins dolomités de l'Ordovicien (Caradoc) localisés dans la zone axiale. Il s'agit notamment du massif du Haut Lez - Haut Salat où se développe le karst du réseau Martel - La Cigalère ;
- les calcaires du Dévonien moyen à supérieur, dans lesquels des phénomènes de karstification se sont développés, notamment dans la zone axiale et sur la couverture des massifs nord-pyrénéen. Il s'agit des karsts de la haute vallée de l'Esera et du Goueil de Joeu dans le Val d'Aran, du système de Bordes de Crue dans le Couserans, des sources de Font Bergens dans la Pays d'Olmes

✓ les séries mésozoïques

Situés pour l'essentiel dans la zone axiale et sous pyrénéenne, les terrains du Mésozoïque sont majoritairement carbonatés notamment au Lias inférieur, au Jurassique moyen et supérieur et au Crétacé inférieur et moyen (faciès Urgonien). Ces trois séries carbonatées sont d'une part, séparées les unes des autres par des formations imperméables et d'autre part, compartimentées compte tenu de la tectonique. Toutefois, selon les ensembles considérés, il peut exister des interconnexions entre les trois séries identifiées comme aquifère :

- les calcaires, dolomies et conglomérats du Permo-Trias constituent une unité aquifère de nature diverse, généralement peu épaisse et compartimentée mais dont les niveaux carbonatés apparaissent souvent très karstifiés ;

- les calcaires et dolomies du Jurassique inférieur (Sinémurien – Hettangien) dont la puissance peut atteindre 200 m donnent naissance à des aquifères assez continus ;
- les calcaires et dolomies du Jurassique moyen à supérieur et ceux du Crétacé inférieur (Néocomien – Barrémien) constituent une unité aquifère d'importance aussi bien dans son extension et sa puissance (pouvant dépasser 400 m) que dans ses capacités de réservoir avec des phénomènes de karstification bien développés ;
- les calcaires au faciès Urgonien (récifaux) du Crétacé inférieur (Aptien), généralement épais (300 m) et très largement karstifiés constituent les aquifères les mieux développés du massif pyrénéen. Il s'agit notamment des karsts du Pays de Sault (Fontestorbes), du massif de Lestelas Balaguères (Baget, Aliou), du massif d'Arbas, massif du Gar-Cagire.

✓ Les séries mésozoïques métamorphiques

Pour ces séries, l'âge est indifférencié entre le Lias et le Crétacé en raison de l'homogénéité due à l'action du métamorphisme (calcaires recristallisés), de leur puissance d'un seul tenant (200 à 400 m) et de leur situation à proximité de la faille nord-pyrénéenne. Il s'agit notamment des karsts de l'Étang de l'Hers, du système du Baget et d'une partie du karst du Pays de Sault.

✓ Les séries du Crétacé supérieur à l'Éocène

- les formations du Crétacé supérieur présentant des variations latérales de faciès, constituées de calcaires (Calcaires Nankin), de grès (Grès de Labarre) et de marnes voire d'argiles dans des proportions différentes suivant les entités considérées ;
- les terrains du Paléocène sont également marqués par des natures lithologiques différentes selon les entités. Ainsi à l'est du massif, l'unité du Plantaurel et du Pech de Foix est considérée comme imperméable, principalement marneuse et argileuse. Dans les Petites Pyrénées, le Paléocène devient plus aquifère, représenté par des calcaires et dolomies ;
- les formations aquifères de l'Eocène inférieur basal se caractérisent principalement par des sables, grès et calcaires gréseux. Ces formations abritent les karsts de la région sous-pyrénéenne : Labouiche, le Mas-d'Azil, Fabas, Tourtouse...

En termes de suivi existant, seulement 6 sources sont actuellement intégrées dans un réseau de surveillance quantitative des aquifères karstiques de la chaîne pyrénéenne et concernent 4 entités hydrogéologiques BD LISA NV3. Le tableau de l'illustration 111 indique l'unité aquifère de la BD LISA représentée par chacune d'entre-elles. L'illustration 112 représente leur répartition au sein du massif pyrénéen.

Code Entité BD LISA	Dénomination	Sources suivies
402AA03	Calcaires à faciès urgonien du Crétacé inférieur du chaînon d'Aspet	Aliou (10734X0011/HY)
402AA05	Calcaires et dolomies du Jurassique moyen et supérieur du chaînon d'Aspet	Maourou (10731X0014/HY) Baget (10734X0010/HY) Bernatas (10733X0027/HY)
402AE04	Calcaires et dolomies du Jurassique moyen et supérieur du chaînon de Mont Caup	Plan de Pouts (10722X0015/HY)
402AR01	Calcaires et marnes du Crétacé inférieur du Pays de Sault dans le bassin Adour-Garonne	Fontestorbes (10766X0089/HY)

Illustration 111 - Tableau récapitulatif des sources karstiques suivies dans le cadre d'un réseau de mesure dans le massif des Pyrénées.

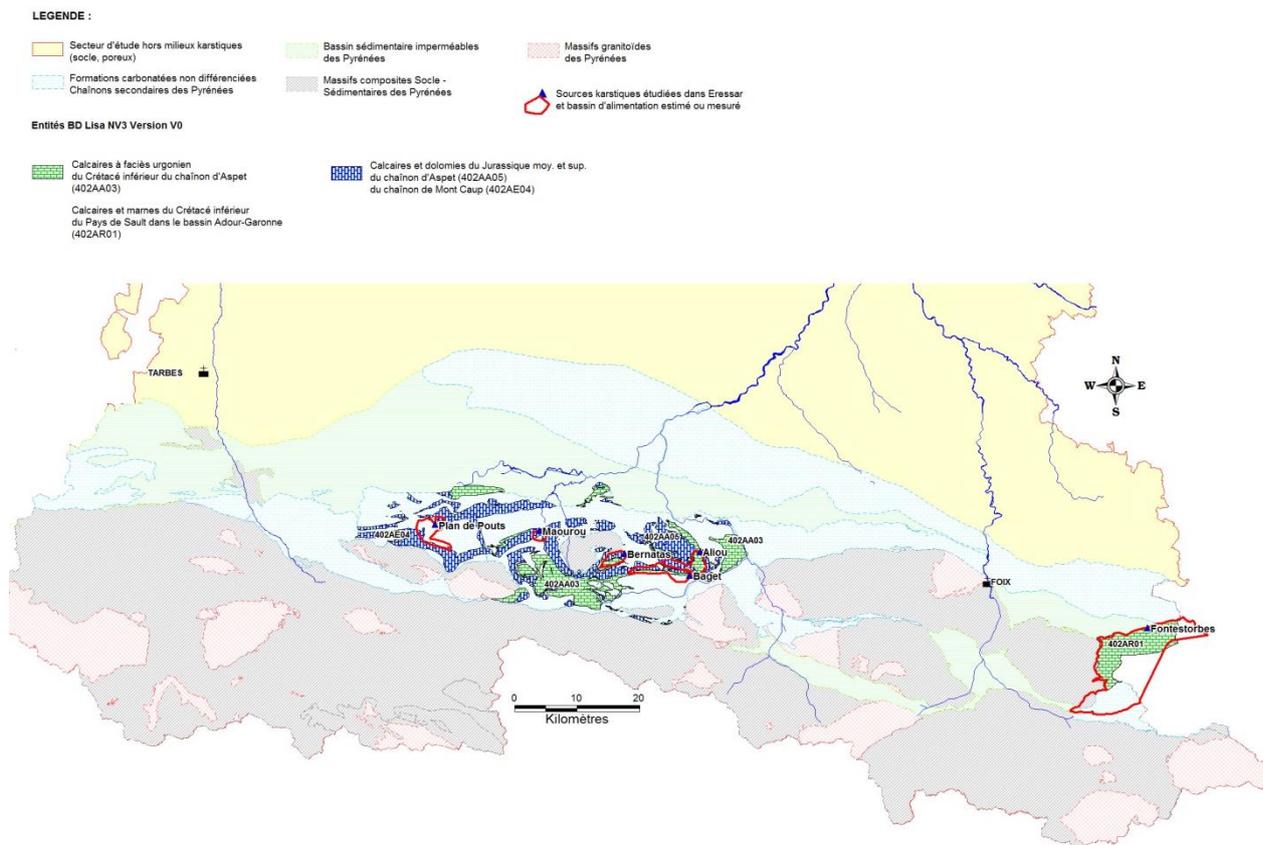


Illustration 112 - Unités aquifères (BD LISA V0) des Pyrénées et sources karstiques suivies dans le cadre d'un réseau de mesure.

6.3. MÉTHODES EMPLOYÉES

Les systèmes karstiques sont considérés comme un opérateur, qui transforme une fonction d'entrée, la pluie, en une fonction de sortie, les débits. L'analyse des hydrogrammes des principales sources permet ainsi de caractériser le fonctionnement des aquifères karstiques.

6.3.1. Élaboration de fiches descriptives

Pour chaque source étudiée, une fiche descriptive a été élaborée à partir d'une synthèse bibliographique des études et travaux menés afin de synthétiser les connaissances existantes. Deux exemples de fiche sont donnés en annexe 16. Ces fiches détaillent les éléments suivants :

- le contexte hydrogéologique général de l'aquifère ;
- la description de la source et de son bassin d'alimentation accompagnée d'une carte de situation de la source et de la station hydrométrique sur fond de carte géologique ;
- un tableau synthétique sur la source et la station hydrométrique ;
- une carte du bassin d'alimentation s'il a été défini (ou périmètre de protection éloigné) sur fond de carte géologique, avec la représentation des cavités (BSS et BD Cavités) ;
- les résultats de l'analyse TEMPO (débit modélisé, graphe des réponses impulsionnelles, graphe décomposant le débit en contributions lentes et rapides) ;
- une conclusion succincte sur le fonctionnement du système ;
- des éléments bibliographiques.

6.3.2. Analyse des hydrogrammes

Sur certaines sources, afin de compléter les informations issues de la bibliographie et pour mieux comprendre le système, une analyse des débits mesurés a été réalisée. Elle consiste à étudier les débits classés ainsi que les courbes de récession lorsqu'elles sont exploitables.

✓ *Analyse des débits classés*

La méthode d'analyse des débits classés a pour objectif de caractériser les différents régimes d'écoulement observables au niveau d'un exutoire. Il s'agit d'identifier des événements particuliers de type mise en fonctionnement d'un trop plein, fuites vers un autre système, à partir d'une analyse des modifications qu'ils induisent sur les hydrogrammes (Marsaud, 1996).

Généralement, ces événements sont répétitifs, se produisent pour des valeurs de débit particulières et induisent une modification durable de l'écoulement à l'exutoire. Aussi, la méthode proposée par Mangin (1971) consiste à classer les débits par groupes afin de mettre en évidence les valeurs de débits anormalement élevées ou faibles. Une loi statistique est ajustée liant les classes de débit à leurs fréquences d'apparition. Le choix de la loi est arbitraire, celle-ci pouvant être déterministe, empirique ou statistique. Dans le cas présent, la loi choisie est statistique et dérive de la loi de Laplace.

L'interprétation des graphes de débits classés repose sur l'identification d'anomalies affectant la droite représentative, anomalies représentées par des variations de la pente de la droite (Illustration 113 et Illustration 114). L'information obtenue sur le fonctionnement du système est différente en fonction de la position des ruptures dans la partie du graphique relative aux forts ou aux faibles pourcentages.

Cette méthode permet de :

- mettre en évidence la présence d'un impluvium fluctuant au travers des fuites ou d'apports éventuels pouvant se produire entre les différents systèmes karstiques ;
- déterminer les conditions de mises en fonctionnement de trop-pleins ;
- vérifier la qualité de la station de jaugeage de l'exutoire.

Cas	Pentes des droites	Position de la rupture	Interprétation
A	$\alpha_2 > \alpha_1$	Forts pourcentages	- Mise en fonctionnement de trop-plein - Fuites vers un autre système - Stockage momentané - Fuites ou débordement de la station de jaugeage lors des hautes eaux
B	$\alpha_2 < \alpha_1$		- Apports en provenance d'un autre système - La station de jaugeage prend en compte lors des crues des écoulements n'appartenant pas au système
C	$\alpha_2 < \alpha_1$	Faibles pourcentages	- Apports d'une réserve issue d'un cycle antérieur
D	$\alpha_2 > \alpha_1$		- Constitution d'une réserve
E	$\alpha_2 > \alpha_1$ $\alpha_3 < \alpha_2$	Double rupture	- Piégeage d'une réserve lors de la décrue et restitution au cours du tarissement

Illustration 113 - Interprétation des ruptures de pente de la droite représentative des débits classés.

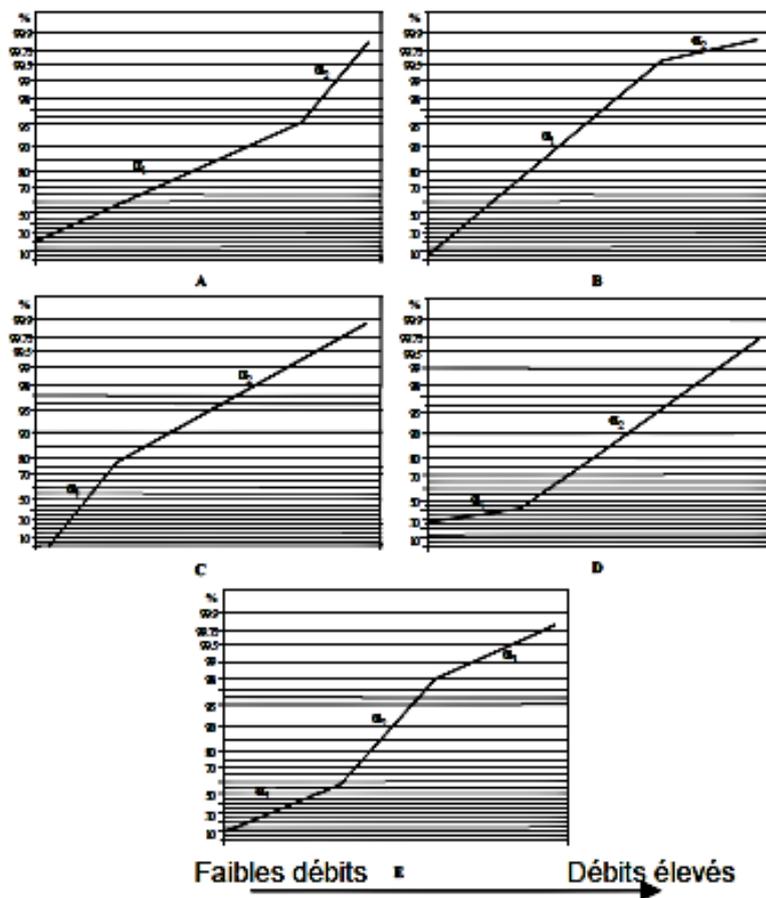


Illustration 114 - Différents cas de rupture de pente de la droite représentative des débits classés (en ordonnée pourcentage d'apparition des débits et en abscisse représentation des débits selon une échelle logarithmique).

Par la mise en évidence de trop-pleins ou d'apports supplémentaires au cours de cycle, l'analyse des débits classés représente une méthode intéressante pour mieux comprendre un système karstique. Avant de conclure sur l'unité ou non d'un système, elle doit cependant **toujours être croisée avec des observations de terrain ou d'autres méthodes.**

✓ **Analyse des courbes de récession**

L'évaluation de l'importance des réserves d'un système karstique constitue un préliminaire indispensable à toute exploitation d'un aquifère. La principale méthode utilisée est l'analyse des courbes de récession. Cette méthode consiste à étudier la partie décroissante de l'hydrogramme d'une source, appelée récession, à partir d'un modèle de type global assimilant le système karstique à des réservoirs se vidangeant les uns dans les autres.

La méthode de l'analyse des courbes de récession des hydrogrammes des sources karstiques a été développée en 1975 par A. Mangin. Elle repose sur la décomposition de l'hydrogramme (Illustration 115) résultant de la vidange d'un système conceptualisé par un modèle. Ce dernier est constitué, d'après A. Mangin, de deux réservoirs indépendants, un pour la zone d'infiltration qui se vidange avec un débit q , et un autre qui correspond à la zone noyée se vidangeant avec un débit Q .

Deux parties peuvent être distinguées sur les courbes de récession :

- la décrue, durant laquelle l'infiltration par les pluies efficaces influence la vidange du réservoir de la zone noyée ;
- le tarissement non influencé, qui débute à l'instant où les débits d'infiltration deviennent nuls, et qui correspond à la vidange du réservoir de la zone noyée.

La description analytique du modèle se fait à l'aide de la formule suivante :

$$Q(t) = \varphi(t) + \psi(t)$$

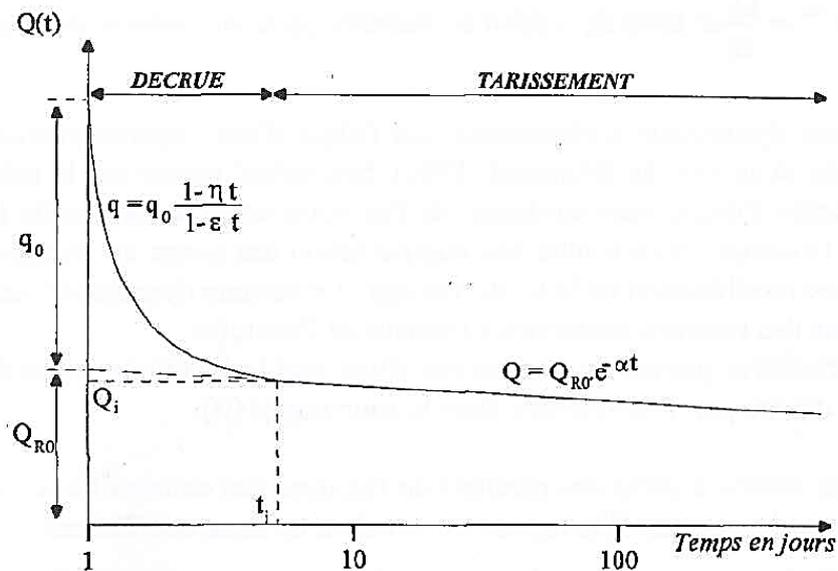


Illustration 115 - Décomposition de la récession selon la méthode Mangin (1975).

Le modèle pour décrire la vidange de la zone noyée, représentée par $\varphi(t)$ est le modèle de Maillet, décrit à l'aide de la formule suivante :

$$\varphi(t) = Q_{RO} \times e^{-\alpha t}$$

Avec α = coefficient de tarissement

Le débit Q_{RO} qui ne possède aucune réalité physique, correspond à l'extrapolation de la courbe de tarissement à l'instant de la pointe de crue.

Le modèle utilisé pour décrire le fonctionnement de la zone d'infiltration correspond à la fonction homographique suivante :

$$\psi(t) = q_0 \times \frac{1 - \eta t}{1 - \epsilon t}$$

Avec q_0 : débit d'infiltration à l'instant t_0 marquant la pointe de crue

$\eta = \frac{1}{t_i}$: coefficient de vitesse d'infiltration. Il peut donc être assimilé à la vitesse moyenne d'infiltration. Il varie entre 0 et 1, cette borne supérieure traduisant une infiltration rapide

t_i = moment où l'infiltration cesse

ϵ = coefficient d'hétérogénéité d'écoulement : décrit la concavité de la courbe. Des valeurs faibles (0,001 à 0,01) caractérisent une infiltration lente alors que des valeurs élevées (1 à 10) traduisent une décrue très rapide, se ralentissant ensuite considérablement.

L'ajustement des paramètres de la loi décrivant la récession conduit à :

- la caractérisation du fonctionnement de la zone d'infiltration à partir notamment du coefficient de tarissement du système, α ;
- l'estimation du volume d'eau contenu dans le réservoir, responsable de la décroissance observée des débits. Ce volume, désigné par A. Mangin, volume dynamique V_d , correspond au volume d'eau du karst noyé dont l'écoulement détermine les variations du débit Q à l'exutoire. Le Q_{R0} pris au moment de la pointe de crue est fictif, d'après les considérations du karst noyé, le point de départ choisi, pour le calcul du volume dynamique, sera donc le moment où le tarissement devient une certitude (Q_i).

$$V_d = \frac{Q_i}{\alpha} C$$

Avec $C = 86\,400$ si Q_i est exprimé en m^3/s et V_d en m^3 .

Une classification a été établie par A. Mangin (1975) à partir des résultats de l'analyse des courbes de récession afin de comparer les systèmes karstiques. Elle repose sur le calcul de deux coefficients :

- k : ce paramètre est égal au rapport entre le volume dynamique maximum obtenu sur une grande période et le volume de transit inter-annuel sur la même période. Il traduit l'aptitude de la zone noyée à stocker les précipitations et à les restituer progressivement dans le temps, c'est-à-dire, son **pouvoir régulateur**. Dans le cas des aquifères karstiques, k est en général inférieur à 0,5, 0 étant synonyme d'un pouvoir régulateur peu important ;
- i : ce coefficient, compris entre 0 et 1, caractérise les **retards à l'infiltration**. Il est égal à la valeur de la fonction homographique deux jours après la pointe de crue. Une forte valeur traduit une infiltration lente ou complexe contribuant à une meilleure régulation de l'écoulement, alors qu'à l'inverse une faible valeur est le signe d'un transit rapide des eaux vers la zone noyée.

Le report des valeurs de k et de i sur un diagramme permet d'établir une comparaison avec des systèmes karstiques de références en France (Illustration 116). Les données obtenues sur différents systèmes ont conduit A. Mangin à définir 4 domaines :

- le domaine des systèmes complexes, généralement des systèmes de grande taille et dont la structure est constituée de nombreux sous-systèmes ;
- le domaine des systèmes plus karstifiés à l'amont qu'à l'aval, et avec des retards dans l'alimentation dus soit à la présence de terrains non karstiques, soit à une couverture neigeuse importante ;
- le domaine des systèmes possédant un réseau de drainage très développé, avec une zone noyée peu importante ;
- le domaine des systèmes possédant un réseau spéléologique bien développé et débouchant à l'aval sur un important karst noyé.

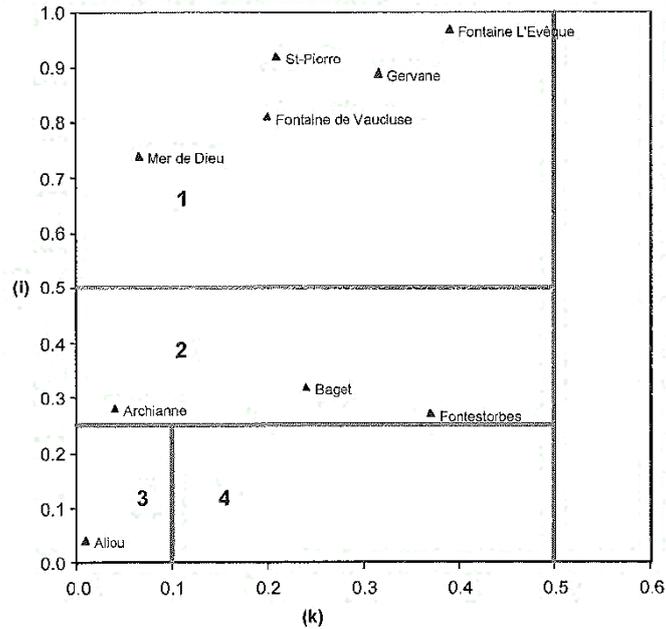


Illustration 116 - Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975) – (i) paramètre d'infiltration et (k) pouvoir régulateur.

6.3.3. Approche de modélisation globale à l'aide du logiciel TEMPO

L'étude des mécanismes régissant le fonctionnement d'un hydrosystème peut être appréhendée à partir d'une modélisation inverse des phénomènes. Il s'agit alors d'effectuer une description de l'hydrosystème à partir de réponses impulsionnelles, appelées également fonctions de transfert (ruissellement, écoulement souterrain) estimées à partir de séries chronologiques (pluie, débit, niveau piézométrique). Ce type d'approche ne nécessite pas la connaissance des caractéristiques physiques de l'aquifère (comme les perméabilités ou les coefficients d'emmagasinement) et de leur variabilité spatiale (à la différence des modèles maillés).

✓ **Présentation de l'outil**

Pour réaliser cette approche de modélisation inverse, le logiciel TEMPO, développé par le BRGM (Pinault, 2007) a été utilisé. Il permet de modéliser un hydrosystème de façon globale sous une forme de « boîte noire ». Le terme de « boîte noire » signifie que les écoulements sont considérés de manière globale, assimilant une structure hydrogéologique à un système physique mettant en relation des données d'entrée (en général un historique de précipitations) avec des données de sortie (généralement des chroniques de débit ou de niveau d'eau) par l'intermédiaire d'une fonction de transfert.

La technique d'inversion consiste à calculer la ou les réponses impulsionnelles (assimilées aux fonctions de transfert) de façon à ce que les valeurs calculées de la variable de sortie (débit ou niveau) s'ajustent au mieux aux mesures observées. Dans l'approche de modélisation, le choix du type de réponse impulsionnelle est fixé par l'utilisateur, celle-ci peut être de type paramétrique (fonction mathématique connue, fonction exponentielle par exemple) ou non paramétrique. Dans ce cas, c'est le logiciel qui détermine la fonction mathématique appropriée permettant de décrire au mieux la variable de sortie à modéliser.

L'illustration 117 présente le schéma de principe de la modélisation inverse des écoulements sachant que outre les réponses impulsionnelles du système, une fonction seuil « Oméga » (Ω) est également estimée par inversion à partir des données de pluie et d'une variable climatique (ETP) afin que seule la hauteur d'eau située au-dessus de ce seuil génère un débit à l'exutoire. La fonction seuil Ω correspond au déficit de la réserve en eau du sol, de sorte que :

$$P_{\text{eff}} = \text{Pluie} - \Omega(t) \quad \text{si } \text{Pluie} > \Omega(t)$$

$$P_{\text{eff}} = 0 \quad \text{si } \text{Pluie} \leq \Omega(t)$$

$\Omega(t)$ est relié à la pluie et à l'ETP via 2 fonctions de transfert :

$$\Omega(t) = \Gamma_P \times \text{Pluie} + \Gamma_{ETP} \times \text{ETP} + \text{Cste}$$

Sachant que :

- l'ETP augmente le seuil Ω : contribution positive puisque perte d'eau du sol ;
- la pluie fait diminuer le seuil Ω : contribution négative puisque recharge en eau des sols.

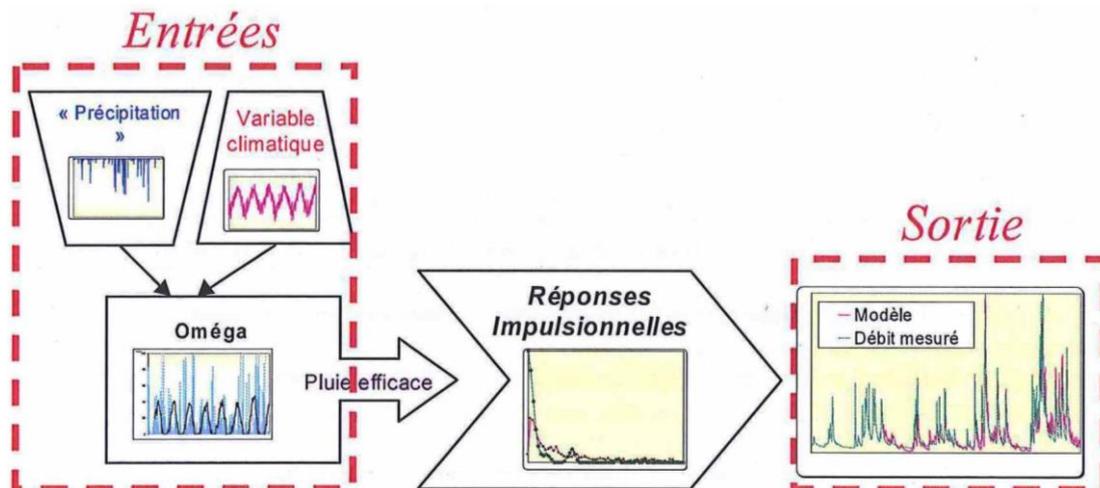


Illustration 117 - Schéma de principe du modèle de transfert.

Au terme du calage, le modèle fournit une décomposition de l'écoulement global (pluie efficace) en « écoulement rapide », le ruissellement en général, et en « écoulement lent », qui transite dans les nappes souterraines. Il est donc possible d'estimer la recharge de la nappe sous-jacente **mais il faut être prudent dans l'interprétation de cette décomposition, dont il n'est pas possible de toujours garantir qu'elle soit unique.**

Au terme du calage, le logiciel TEMPO permet donc d'obtenir :

- les différentes composantes contribuant au débit du cours d'eau à l'exutoire du bassin (ou à une source) ;
- les temps caractéristiques de ces écoulements, appelés « temps de réponse ».

✓ **Étapes de mises en œuvre**

Sélection des données climatiques nécessaires à la modélisation

Les données climatologiques nécessaires à la mise en œuvre des modélisations globales sous TEMPO concernent les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP) (correspondant sous TEMPO à la variable climatique). Le pas de temps de calcul des modélisations étant journalier, les données d'entrée de précipitations et d'ETP ont donc été acquises à ce même pas de temps.

Le climat en Midi-Pyrénées est soumis à deux influences, les flux humides et tempérés venant de l'ouest et ceux plus secs de la Méditerranée. En effet, la région, encadrée au sud et au nord-est par les reliefs des Pyrénées et du Massif central, est largement ouverte vers l'Atlantique. Ce caractère océanique est beaucoup moins marqué, en direction du nord-est par l'air continental descendant du Massif central et en direction du sud-est par l'air méditerranéen apportant le vent d'autan jusqu'aux plaines de la région toulousaine.

Cette disparité géographique se traduit par une répartition des précipitations variables en fonction du régime climatique dominant. Autre caractéristique, le climat de la région est irrégulier d'une année sur l'autre. Pour ces raisons, il s'est avéré nécessaire d'acquérir des données climatologiques sur plusieurs stations météorologiques (en Midi-Pyrénées et hors Midi-Pyrénées) afin de représenter au mieux les contextes climatiques représentatifs des systèmes karstiques étudiés. Les cumuls de précipitations journaliers ont été acquis auprès de Météo France dont la liste des stations météorologiques est indiquée dans l'illustration 118.

Département	Numéro	Nom	Producteurs	X en L2 E	Y en L2 E
09	09289001	SAINT-GIRONS	Météo France	499500	1778800
11	11028001	BELCAIRE	Météo France	569800	1757400
12	12063003	LA CAVALERIE	Météo France	667800	1887600
12	12145001	MILLAU	Météo France	657100	1900100
12	12254001	RODEZ (SALLES-LA-SOURCE)	Météo France	611600	1934400
15	15014004	AURILLAC	Météo France	606600	1988700
24	24037005	BERGERAC	Météo France	456500	1981900
30	30009001	ALZON	Météo France	688400	1885800
30	30297001	SAINT-SAUVEUR-CAMPRIEU	Météo France	691100	1902700
31	31069001	TOULOUSE BLAGNAC	Météo France	522500	1847000
34	34293001	LA SALVETAT-SUR-AGOUT	Météo France	629700	1844500
48	48094001	LE MASSEGROS	Météo France	667200	1923400
48	48146002	SAINTE-ENIMIE	Météo France	685800	1929800
48	48176002	SAINT-PIERRE-DES-TRIEPIERS	Météo France	677200	1916600
81	81284001	ALBI	Météo France	582200	1879300
82	82121002	MONTAUBAN	Météo France	522900	1892300

Illustration 118 - Liste des stations météorologiques utilisées pour les modélisations TEMPO.

En raison du très grand nombre de données à acquérir (chroniques de débit parfois longues de plus de 45 années), le choix s'est porté sur l'obtention des valeurs d'ETP au pas de temps journalier à partir de formules calibrées au profit d'une acquisition directe auprès de Météo France dans les stations automatisées. En effet, il existe de nombreuses formules pour calculer l'évapotranspiration : les plus connues et utilisées sont celles de Thornthwaite (1948), Penman (1948) ou de Turc (1961). Une autre méthode d'évaluation de ce paramètre est donnée par la formule déterminée par Tritz (2010) résultant de la similitude de l'évolution de l'évapotranspiration potentielle avec une courbe sinusoïdale. Cette méthode permet à partir de données d'ETP connues sur une période mensuelle ou décadaire d'obtenir une chronique d'ETP au pas de temps journalier. Cette formule a notamment été utilisée par Charlier *et al.* (2012) lors d'un travail d'étude des crues en milieu karstique sur le bassin du Tarn à Millau (BRGM/RP-61816-FR).

Les paramètres de calage à déterminer pour l'obtention d'une chronique d'ETP au pas de temps journalier à partir de la formule de Tritz sont :

- l'ETP moyenne journalière ;
- la date à laquelle l'ETP est à son minimum dans l'année ;
- un paramètre d'ajustement adimensionnel noté *a*.

À partir d'une chronique d'ETP connue, le paramètre d'ajustement *a* est ajusté au mieux afin de reconstituer la chronique d'ETP recherchée au pas de temps journalier. Les coefficients de corrélations obtenus entre les valeurs d'ETP mesurés et celles calculés sont supérieurs à 0,9 (à l'exception de la station de Millau égal à 0,87 pour un pas de temps initial mensuel) (Illustration 119).

Une fois déterminé sur les chroniques connues, les paramètres de calage obtenus ont été utilisés pour calculer l'ETP journalière pour l'ensemble des stations modélisées.

Station	Chronique de calage			Paramètres de calage			Coeff. Corr.
	Pas de temps	Début mesure	Fin mesure	<i>a</i>	ETP moy.	Date ETP min	
Bergerac	décadaire	janv-72	déc-10	0.90	2.51	01-janv	0.90
Gourdon	décadaire	janv-01	nov-10	0.87	2.59	20-déc	0.90
Gourdon	mensuel	janv-71	déc-00	0.87	2.55	20-déc	0.93
Montauban	décadaire	mai-90	avr-13	0.90	2.84	21-déc	0.92
Millau	mensuel	janv-98	août-09	0.85	2.93	01-janv	0.87
Montaut	décadaire	janv-00	mai-13	0.80	2.69	01-janv	0.91
Toulouse Blagnac	décadaire	janv-03	févr-07	0.95	3.13	01-janv	0.93
St-Girons	mensuel	janv-71	déc-71	0.87	2.11	20-déc	0.97

Illustration 119 - Chroniques utilisées pour le calcul de l'ETP (période, paramètres, coeff. corrélation).

Corrélogramme croisé Pluie-Débit

Au préalable à l'étude du fonctionnement hydrogéologique des différents systèmes karstiques de Midi-Pyrénées, il a été nécessaire de déterminer les chroniques de pluie « représentatives » du fonctionnement des karsts étudiés. En effet, les pluies enregistrées à la station météorologique la plus proche de la station hydrométrique étudiée ne permettent pas nécessairement de retranscrire la composition du signal de débit. La raison principale provient de la possible hétérogénéité des influences climatiques affectant le bassin d'alimentation de la source modélisée.

Ainsi, lorsque plusieurs chroniques pluviométriques entrent dans la composition du signal de débit il a été nécessaire de déterminer une combinaison linéaire des pluies relevées à différentes stations météorologiques pour obtenir une « pluie optimisée ». Pour cela, le logiciel TEMPO dispose d'un outil « pondération des chroniques de pluie » qui équivaut à établir un corrélogramme croisé entre les pluies efficaces et les débits.

Ainsi, dans le cadre du projet ERESSAR, sur les 41 sources étudiées, 9 modélisations ont nécessité de générer des pluies optimisées à partir de combinaisons linéaires de données pluviométriques acquises sur plusieurs stations météorologiques.

Résultats de la modélisation

Une fois le signal d'entrée défini au mieux, la modélisation est lancée (calcul de la fonction de transfert) de façon à ce que les valeurs calculées de la variable de sortie, ici le débit, s'ajustent le mieux possible aux mesures.

Le critère de Nash est utilisé comme critère de calage, il permet de mesurer la qualité de l'ajustement d'une série observée $S(t)$ à l'aide d'un modèle $M(t)$. C'est un paramètre sans dimension : $Nash = 1 - Z$, où Z est égal au rapport de la somme des carrés du résidu sur la variance de la série observée (moment centré d'ordre 2) :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{n=1,N} [S(n) - M(n)]^2}{\sum_{n=1,N} [S(n) - \bar{S}]^2}$$

Où \bar{S} représente la moyenne de la série observée $S(n)$, N est le nombre de valeurs commune aux deux séries S et M .

Le critère de Nash caractérise la « distance » entre la série observée et le modèle, notion qui inclue à la fois les erreurs systématiques (biais) et aléatoires (bruit). Il est très utilisé sur les séries temporelles hydrologiques et hydrogéologiques.

Plus le critère est proche de 1, meilleur est le calage. Le critère de Nash est un critère de qualité global, s'appliquant sur toute la période sélectionnée pour le calage, incluant les épisodes de crue et les étiages. Ainsi, dans le cas présent, les efforts de calage ont principalement porté sur les périodes de tarissement au détriment des épisodes de crues, induisant l'obtention de critères de Nash souvent faibles, avec moins de 10 % des modélisations calées avec un critère de Nash supérieur à 0,7.

Calcul des hydrogrammes unitaires

Au terme du calage, le logiciel TEMPO permet de discriminer les différentes composantes contribuant au débit à l'exutoire du bassin (Illustration 120), sachant que chaque composante est à mettre en relation avec une fonction de transfert (ou réponse impulsionnelle) :

- la composante rapide correspond à la contribution au débit du cours d'eau ou de la source par les écoulements de surface (ruissellement par exemple) ou dans une nappe aux écoulements préférentiels via un système de macropores, de fissures interconnectées, de conduits karstiques ;
- la composante lente, expliquant les retards plus ou moins importants entre les précipitations et le débit observé en sortie, correspond à des écoulements souterrains issus d'une matrice poreuse ou au travers d'une formation fissurée.

La composante lente peut-être parfois délicate à interpréter car elle peut correspondre à l'intégration de plusieurs écoulements différents :

- écoulements purement souterrains de type contribution de nappe ;
- écoulements plus lent que les écoulements de surface de type ruissellement intégrant des écoulements souterrains de type nappe et des écoulements issus de la macroporosité suivant la densité de fractures/fissures à l'échelle du bassin versant.

Pour les besoins du projet, les contributions relatives de chacune des composantes ont été calculées sur toute la période de calage (sous la forme d'une moyenne inter-annuelle) et exprimées en pourcentage, en les rapportant au débit total du cours d'eau. Elles ont également été établies en fonction du contexte climatique (en fonction des années humides ou années sèches de référence déterminées aux stations météorologiques sélectionnées).

Les fonctions de transferts utilisées dans la modélisation permettent aussi de calculer des temps caractérisant la réponse de l'hydrosystème (variation du débit à l'exutoire) à la suite d'une averse de brève durée (on parle de réponse impulsionnelle du système). À chaque fonction de transfert (écoulement lent, écoulement rapide) correspond un temps de réponse¹.

Ces temps de réponse sont calculés comme des moyennes des temps (sur la durée de réaction du système) pondérée par des valeurs de la réponse impulsionnelle (Illustration 121). Le temps de réponse moyen pour la composante rapide correspond au temps moyen, caractérisant l'écoulement de surface, calculé sur l'intervalle de temps compris entre l'épisode pluvieux et la fin de la réaction du cours d'eau/source enregistrée à la station hydrométrique, il dépend de la taille du bassin, des pentes, de la « rugosité ».

- le temps de réponse moyen pour la composante lente représente le temps moyen calculé sur l'intervalle de temps compris entre l'impulsion reçue par la nappe à la suite d'un bref épisode pluvieux et la fin de la réaction du cours d'eau/source. Il dépend alors de la structure du milieu souterrain et des paramètres hydrodynamiques.

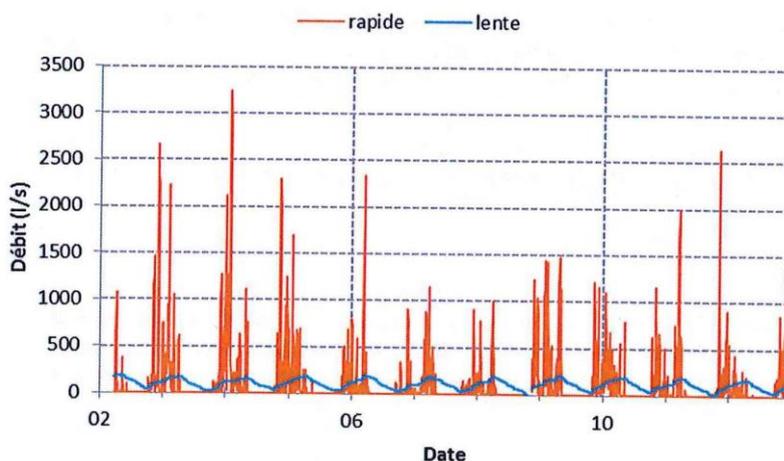


Illustration 120 - Représentation dans le temps de la contribution au débit de la composante rapide et lente.

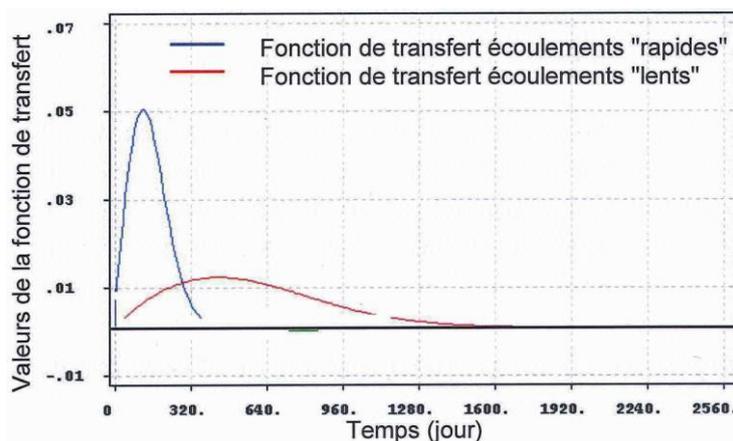


Illustration 121 - Décomposition dans le temps des réponses impulsionnelles lentes et rapides.

¹ Remarque : la notion de temps de réponse est plus générale que celle de temps de transit, dans le sens où « transit » correspond à la circulation effective de l'eau dans le milieu : transfert de masse et non juste transfert de pression.

La forme des réponses impulsionnelles rapides et lentes permettent de caractériser le type de réponse du système à une pluie efficace et d'estimer l'effet mémoire du système étudié. Ainsi, la prépondérance d'une réponse dite rapide est susceptible de retranscrire la présence d'un système transmissif, présentant des conduits karstiques bien développés. Inversement, une réponse dite lente majoritaire est représentative d'un système plus capacitif où les écoulements souterrains sont issus d'une matrice poreuse ou au travers d'une formation fissurée.

6.4. ANALYSE DES CRITÈRES DE SÉLECTION POUR LES AQUIFÈRES KARSTIQUES

Le suivi quantitatif des aquifères karstiques est hétérogène en termes de densité de points d'observation en raisonnant à l'échelle des entités de la BD LISA. Ainsi, les 38 sources disposant d'une chronique de débits exploitable concernent seulement 17 entités de niveau 3. Entre 1 et 9 sources peuvent représenter une entité, ce qui rend impossible de mener une approche cohérente à l'échelle des entités BD LISA de niveau 3 au regard des caractéristiques contrastées de chacune des sources et de la diversité de leur bassin hydrologique. D'autre part, la densité surfacique des bassins des sources faisant l'objet d'un suivi est, dans la majorité des cas, sensiblement inférieure à 20 %. Dans ces conditions, il a été retenu une approche à l'échelle des bassins hydrologiques des sources traitées sans extrapolation à l'échelle de l'entité BD LISA dans laquelle elles s'inscrivent.

L'analyse fine des chroniques de débits des sources établie sous la forme de fiches descriptives permet de caractériser un grand nombre de paramètres susceptibles de mieux appréhender le fonctionnement complexe de la nappe mais aussi d'estimer la sensibilité à la sécheresse de l'aquifère. Une vingtaine de paramètres différents a été évaluée mais n'ont pas pu l'être pour toutes les sources (Illustration 122). Afin de permettre une étude comparative pour la totalité des 38 sources, les paramètres jugés d'intérêt vis-à-vis de la résistance des aquifères à la sécheresse et renseignés pour la totalité des sources ont été sélectionnés.

Les 6 critères retenus pour la caractérisation de la résistance à la sécheresse des aquifères karstiques de Midi-Pyrénées sont les suivants :

- la superficie du bassin d'alimentation des sources étudiées ;
- l'index de résistance à la sécheresse des aquifères karstiques (IRSAK) ;
- le maintien de l'effet des pluies efficaces sur le débit des sources ;
- la durée de l'influence de la composante lente sur le débit total ;
- la contribution en pourcentage de la composante lente au débit total pour une année sèche ;
- le rapport des volumes de la composante lente au débit total entre une année sèche et une année humide.

Les valeurs obtenues pour chacun des 6 critères ont été classées et une note a été attribuée à chaque classe. La note a été choisie de façon à donner une note élevée lorsque la résistance à la sécheresse est forte.

6.4.1. Superficie du bassin d'alimentation

À l'instar de l'approche menée pour les milieux poreux, la superficie du bassin d'alimentation des sources étudiées détermine la plus ou moins grande inertie du système karstique.

La donnée sur les superficies des bassins d'alimentation des sources étudiées provient quasi-exclusivement des informations recueillies dans les documents bibliographiques consultés. Il s'agit alors de valeurs calculées soit par l'intermédiaire d'essai de traçages, soit d'estimation par la réalisation de bilan hydrologique.

Code BSS	Appellation	Code BD- Lisa NV3	Superficie Bassin Hydrologique (km ²)	Estimation Volume Dynamique (Mm3)	Q Min (m ³ /s)	Moyenne Q Min (m ³ /s)	IRSAK	Q Max (m ³ /s)	Q Moy. (m ³ /s)	Qmax / Qmin	K (Pouvoir régulateur)	i (Retard à l'infiltration)	Corrélogramme Pic de réaction à la pluie (jours)	Maintien de l'effet des pluies efficaces sur le débit (corrélogramme croisé) (jours)	Durée d'influence de la composante lente du débit (jours)	Contribution moyenne Composante lente au débit (%)	Contribution Composante lente au Q (année sèche) (%)	Volume Contribution Composante lente au Q (année sèche) (Mm3)	Volume Contribution Composante lente au Q (année humide) (Mm3)	Composante lente Vol. année sèche / Vol. année humide
08091X0006	Blagour	358AE03	88	526	0.145	0.209	0.69	11.7	0.668	81	2.49	0.57	1	34	75	85	88	16.06	14.14	0.88
08567X0028	Font Vincent	352A01	18	0.4	0.001	0.006	0.18	1.56	0.121	1560	ND	ND	2	35	100	54	55	2.17	1.22	0.56
08605X0007	Bardels, Murelle-Château	358A11	35	ND	0.021	0.043	0.49	7.55	0.503	360	ND	ND	2	37	80	44	42	0.88	0.66	0.75
08851X0006	Glascac	362AC01	2	0.4	0.005	0.013	0.39	0.228	0.057	46	ND	ND	1	25	170	95	89	2.13	0.68	0.32
08851X0009	Mayrhac	362AC01	8	1	0.021	0.030	0.69	1.04	0.117	50	0.34	0.42	1	32	300	83	74	3.94	2.75	0.70
08852X0006	Leslang	358A02	17	0.8	0.017	0.034	0.51	3.4	0.195	200	0.11	0.38	1	26	150	35	51	2.54	2.23	0.88
08853X0007	Ruisseau de Serre	358A02	2	0.1	0.001	0.003	0.33	0.524	0.022	524	0.1	0.43	1	27	150	23	40	0.15	0.2	1.33
08853X0024	Duc	358A02	3	0.09	0.001	0.004	0.25	0.461	0.037	461	0.056	0.544	1	27	150	23	39	0.24	0.33	1.38
08856X0007	Tantayrou	362AC01	1	N.D.	0.022	0.031	0.70	0.404	0.044	18	ND	ND	2	35	365	90	93	1.35	0.97	0.72
08856X0062	Buzareinghes	362AC01	1	0.2	0.005	0.006	0.81	0.174	0.019	35	0.37	0.72	2	34	200	92	95	0.64	0.39	0.61
08856X0065	Segala	358A02	14	0.7	0.015	0.022	0.67	2.58	0.159	172	0.14	0.39	1	26	150	72	82	4.96	2.47	0.50
08857X0010	La Bastide	358A02	3	0.9	0.011	0.014	0.78	0.351	0.026	32	0.81	0.262	1	25	365	69	70	0.57	0.48	0.84
08857X0013	Cayrac (Massegros)	358A02	6	2	0.035	0.043	0.81	0.213	0.061	6	1.33	0.48	1	25	365	88	88	2.07	1.28	0.62
08857X0030	La Vertrieque	358A02	2	0.6	0.008	0.009	0.88	1.03	0.016	129	ND	ND	1	26	50	64	62	0.46	0.27	0.59
09052X0002	Candé	358AE03	70	ND	0.017	0.067	0.26	2.34	0.494	138	ND	ND	1	78	200	86	90	12.58	10.18	0.81
09056X0022	La Gourgue	358AE07	53	N.D.	0	0.014	0.00	0.92	0.268	-	ND	ND	1	31	60	96	96	9.09	7.25	0.80
09092X0002	Saint-Pierre	364AC01	18	ND	0.001	0.002	0.46	2.24	0.148	2240	ND	ND	2	26	150	39	59	1.27	1.23	0.87
09094X0017	Mis de la Font	358A02	5	ND	0.033	0.036	0.92	0.27	0.041	8	ND	ND	4	27	350	97	98	1.336	1.302	0.97
09097X0037	Barbade ou Fontliane	362AC01	30	0.61	0.013	0.021	0.63	2.93	0.082	225	0.24	0.33	1	14	39	76	80	2.39	1.18	0.49
09099X0081	Esperelle	358A10	99	4.58	0.123	0.178	0.69	17.5	1.019	142	ND	ND	1	14	82	64	75	24.64	16.8	0.68
09352X0048	Boudouaiou n°2	358A10	17	1.81	0.043	0.060	0.72	3.4	0.208	79	ND	ND	1	13	150	85	81	8.35	3.36	0.40
09353X0002	Ladoux, Homède	358A10	21	2.06	0.042	0.067	0.63	5.29	0.29	126	ND	ND	1	20	150	56	65	4.01	4.05	1.01
09355X0014	La Dragonnière	362AC21	25	1	0.003	0.006	0.50	1.47	0.077	480	ND	ND	1	32	125	68	77	1.66	1.17	0.70
09356X0025	Brias, Balastière	358A10	6	0.1	0.002	0.004	0.48	1.96	0.066	980	ND	ND	1	23	75	68	77	1.6	1.17	0.73
09357X0018	Aigüebelle	358A10	8	1	0.017	0.032	0.54	2.41	0.122	142	0.25	0.41	2	13	300	88	96	4.41	1.58	0.36
09357X0018	La Meuline	362AC20	29	18.7	0.192	0.259	0.74	3.65	0.492	19	ND	ND	1	25	250	87	83	13.06	8.22	0.63
09357X0022	Cernon	362AC17	17	7.9	0.044	0.073	0.60	3.46	0.192	79	ND	ND	1	33	250	90	93	7.43	2.88	0.39
09366X0019	Durzon	358A10	108	24.6	0.594	0.880	0.68	16.3	1.518	31	ND	ND	2	23	250	90	93	61	25	0.41
09613X0010	Sainte-Beaulize, Fouseille	358A10	11	1.2	0.02	0.041	0.48	1.53	0.135	77	ND	ND	1	23	250	84	81	3.51	2.28	0.65
09614X0003	Gliriette, L'ébretoix de Cornus	358A10	9	1.13	0.023	0.034	0.67	3.02	0.095	131	0.38	0.38	1	16	300	46	41	1.35	1.02	0.76
09614X0036	Sorgue du Larzac	358A10	65	ND	0.425	0.539	0.79	20.6	1.031	48	ND	ND	1	41	300	84	83	29.04	16.35	0.56
09615X0033	Céras	370A06	10	ND	0.009	0.018	0.51	0.275	0.089	31	ND	ND	4	77	300	98	99	3.84	1.5	0.39
10722X0015	Plan de Pouis	402AE04	18	1	0.057	0.084	0.68	8.62	0.423	151	ND	ND	1	12	75	51	58	7.5	6.3	0.84
10731X0014	Macourou	402A03	3	ND	0	0.000	0.00	0.67	0.09	ND	ND	ND	1	14	100	21	28	0.43	0.59	1.37
10733X0027	Bernats	402A07	6	ND	0.018	0.079	0.23	3.87	0.218	215	ND	ND	1	13	200	49	58	3.25	3.71	1.02
10734X0010	Baget	402A03	13	2	0.018	0.063	0.28	10.1	0.477	561	ND	ND	1	13	200	69	82	13.82	7.77	0.56
10734X0011	Allou	402A05	12	0.075	0.003	0.024	0.13	28.9	0.439	9633	ND	ND	1	13	35	84	89	18.9	7.5	0.40
10766X0089	Fonestorbes	402AR01	85	23	0.391	0.761	0.51	13.6	2.036	35	ND	ND	1	86	300	82	92	67	39	0.58

Illustration 122 - Tableau des résultats des paramètres et critères retenus par source pour les aquifères karstiques.

Les valeurs varient entre moins d'un kilomètre carré (0,91 km² pour la source de Tantayrou (08856X0007/HY) située dans le Causse de Sauveterre) et plus de 100 kilomètre carré (108,15 km² pour la source du Durzon (09365X0019/HY) située dans le Causse du Larzac). La distribution des superficies de bassin d'alimentation en fonction des sources est indiquée dans l'illustration 123.

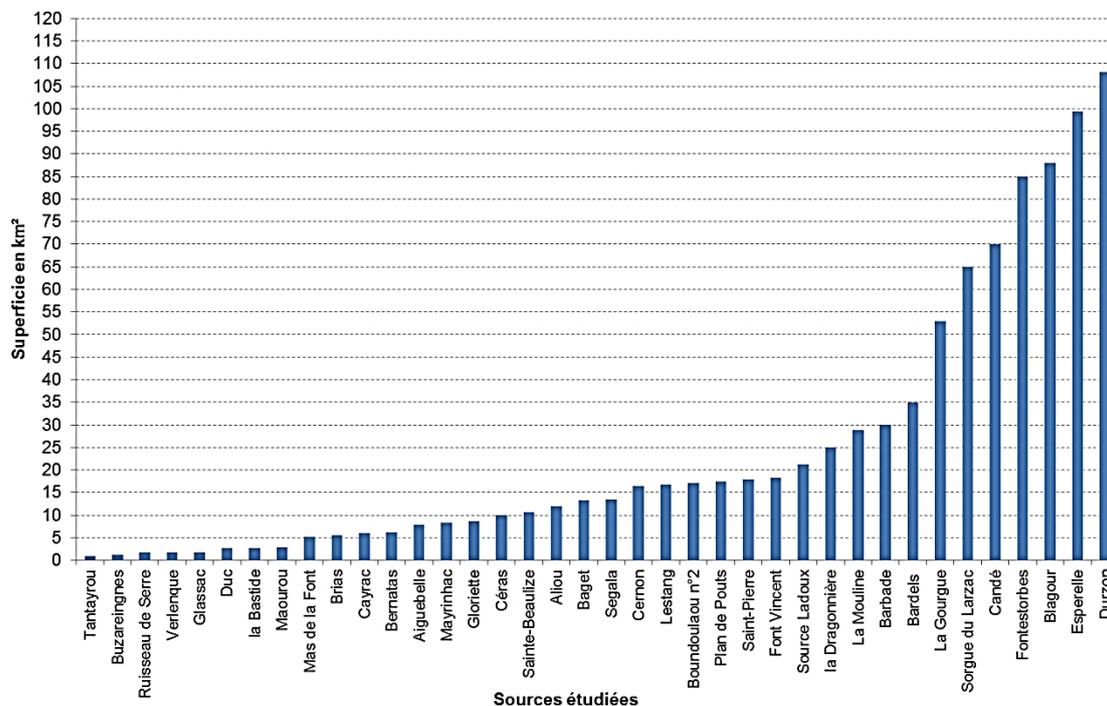


Illustration 123 - Distribution de superficies des bassins d'alimentation des sources karstiques étudiées.

À partir de cette distribution, 5 classes de superficie de bassins d'alimentation ont été établies associées aux notes attribuées (Illustration 124).

Taille (km ²)	Classe	Note
> 70	1	5
40 - 70	2	4
20 - 40	3	3
10 - 20	4	2
< 10	5	1

Illustration 124 - Aquifères karstiques - Tableau des classes et des notes pour le critère de taille du bassin hydrologique de la source.

6.4.2. Index de résistance à la sécheresse des aquifères karstiques

L'approche menée en 1994 par Collin *et al.*, avait souligné l'insuffisance à l'époque des chroniques de débits à disposition et la nécessité d'en acquérir pour mener à bien ce type de travail sur la résistance à la sécheresse des aquifères karstiques. Pour pallier à ces lacunes de données pertinentes, un index de résistance à la sécheresse des aquifères karstiques (désigné IRSAK) avait été identifiée. Cet index considère qu'en faisant la moyenne des débits les plus bas d'un historique connu et en analysant l'écart entre celle-ci et la valeur la plus basse enregistrée, il était possible de mettre en évidence que plus cette différence est grande, moindre est le pouvoir du système karstique à régulariser les débits sortants par rapport aux flux d'apport déficitaire.

$$IRSAK = \frac{Q_{min}}{\langle Q \rangle_{min}}$$

Un système karstique caractérisé par des valeurs de l'IRSAK se rapprochant de 1 offre une meilleure résistance à la sécheresse. Cet index est donc fonction directe de la résistance d'une nappe au phénomène de la sécheresse.

L'analyse des chroniques de débits des 38 sources étudiées donne des valeurs variant de zéro (pour les 2 sources présentant des assècs, à savoir celle de la Gourgue (09058X0022/HY) et celle de Maourou (10731X0014/HY) situées respectivement dans le Tarn-et-Garonne et dans les chaînons des Pyrénées) à 0,92 pour l'exurgence du Mas de la Font (09094X0017/HY) située dans le Causse de Sauveterre. La distribution de ces valeurs d'IRSAK est donnée dans l'illustration 125.

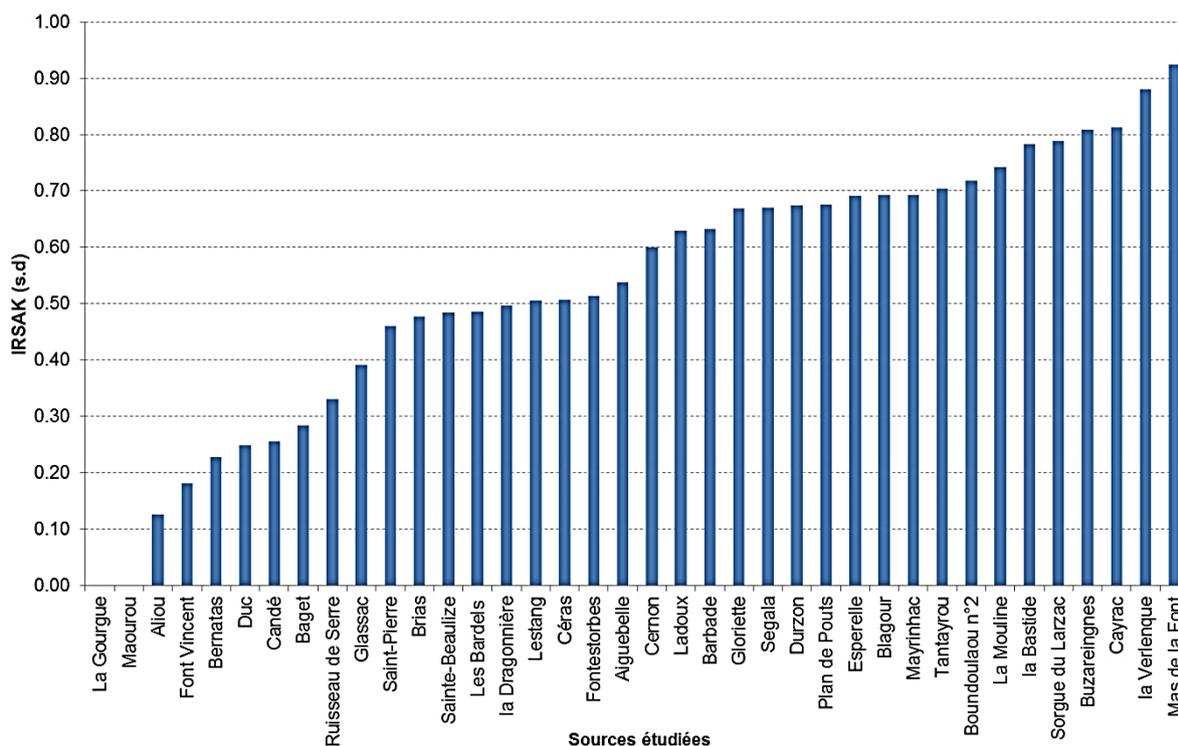


Illustration 125 - Distribution des valeurs d'IRSAK calculées pour les sources karstiques étudiées.

À partir de cette distribution, 5 classes d'index ont été établies associées aux notes attribuées (Illustration 125).

IRSAK	Classe	Note
> 0.85	1	5
0.70 - 0.85	2	4
0.55 - 0.70	3	3
0.35 - 0.55	4	2
< 0.35	5	1

Illustration 126 - Aquifères karstiques - Tableau des classes et des notes pour le critère IRSAK.

6.4.3. Maintien de l'effet des pluies efficaces sur les débits des sources

Des analyses corrélatoires croisées ont été mises en œuvre sur chacune des 38 chroniques de débits afin d'analyser les relations de causalité entre les séries. Dans le cas présent, l'information apportée sur la durée du maintien de l'effet des pluies (en jours) traduit la capacité de l'aquifère à résister à une sécheresse. Ainsi plus cette durée sera longue, plus l'aquifère sera résistant à une période déficitaire en apport d'eau.

L'illustration 127 présente la dispersion des résultats obtenus à travers l'analyse des corrélogrammes croisés réalisés. Les valeurs obtenues varient entre 12 jours pour la source de Plan de Pouts (10722X0015/HY) caractérisant les chaînons secondaires de Mont Caup dans les Pyrénées et 86 jours pour la source de Fontestorbes (10766X0089/HY) également située dans les Pyrénées mais plus à l'est du massif dans le plateau de Sault. À noter que les 4 autres sources caractérisant des chaînons calcaires des Pyrénées (Aliou, Baget, Arbas et Maourou) présentent également un faible maintien de l'effet des pluies efficaces (de 13 et 14 jours).

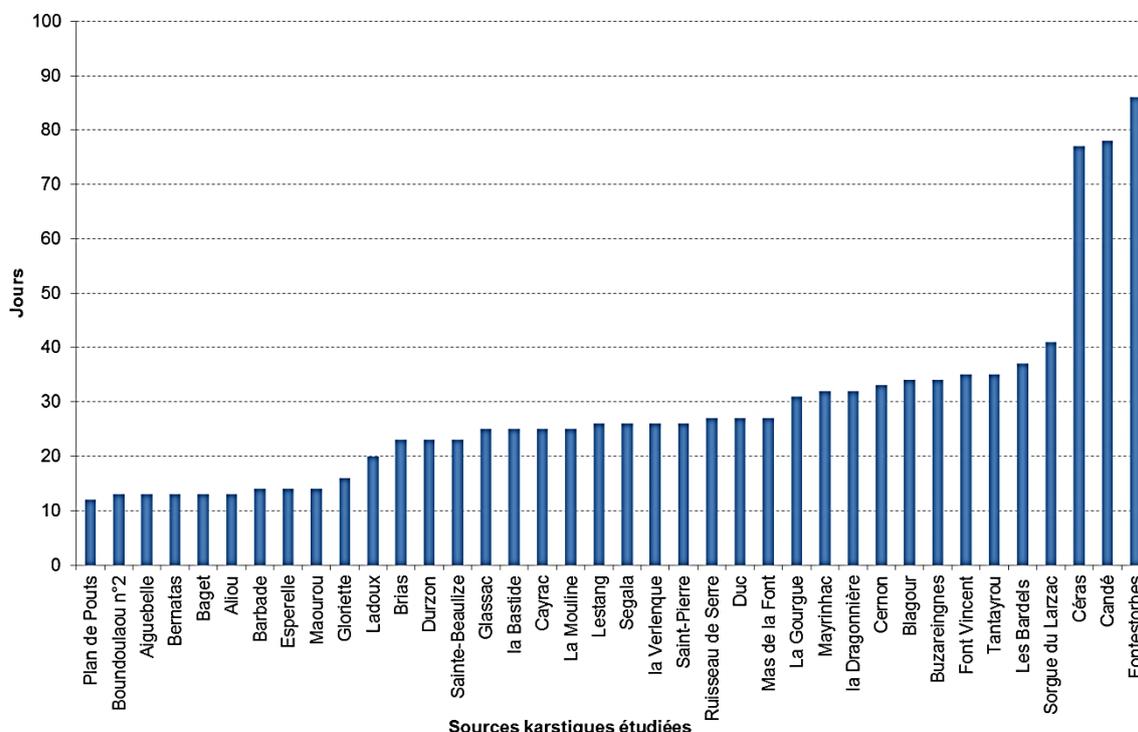


Illustration 127 - Maintien de l'effet de la pluie sur les débits (jours).

À partir de cette distribution, 5 classes de maintien de l'effet des pluies ont été établies associées aux notes correspondantes (Illustration 128).

Maintien de l'effet des pluies efficaces sur le débit (jours)	Classe	Note
> 60	1	5
45 - 60	2	4
30 - 45	3	3
15 - 30	4	2
< 15	5	1

Illustration 128 - Aquifères karstiques - Tableau des classes et des notes pour le critère « Durée du maintien de l'effet de des pluies sur le débit ».

6.4.4. Durée d'influence de la composante lente dans le débit mesuré

Comme indiqué au chapitre 6.3.3, la modélisation réalisée à partir du logiciel TEMPO permet de discriminer les différentes composantes contribuant au débit à l'exutoire du système. Ainsi, la composante lente, explique les retards plus ou moins importants entre les précipitations et le débit observé en sortie. Elle correspond à des écoulements souterrains issus d'une matrice poreuse ou au travers d'une formation fissurée qui intrinsèquement favorisent la résistance à des périodes prolongées en déficit d'apport d'eau dans le système.

Les temps de réponse sont calculés comme des moyennes des temps (sur la durée de réaction du système) pondérée par des valeurs de la réponse impulsionnelle. Le temps de réponse moyen calculé pour la composante lente permet de déterminer le temps moyen de réaction calculé sur l'intervalle de temps compris entre l'impulsion reçue par la nappe à la suite d'un bref épisode pluvieux et la fin de la réaction mesurée à la source. Il dépend alors de la structure du milieu souterrain et des paramètres hydrodynamiques.

Les résultats obtenus à partir du corrélogramme croisée donnent une information globale de la réponse du système sans discriminer les parts des composantes lente et rapide.

Les valeurs obtenues pour les 38 sources étudiées varient entre 35 jours mesurés à la source d'Aliou (10734X0011/HY) (massif d'Estelas-Balaguère dans les Pyrénées) et plus d'une année (supérieur à 365 jours) enregistrées sur 3 sources (08856X0007/HY - Tantayrou / 08857X0010/HY - Bastide / 08857X0013/HY - Cayrac), toutes situées dans le Causse de Sauveterre (en Aveyron). À noter également, que la majorité des sources étudiées présentent des temps moyens de réponse de composante lente supérieur à 100 jours (pour 29 des 38 sources). La dispersion des résultats obtenus est donnée dans l'illustration 129.

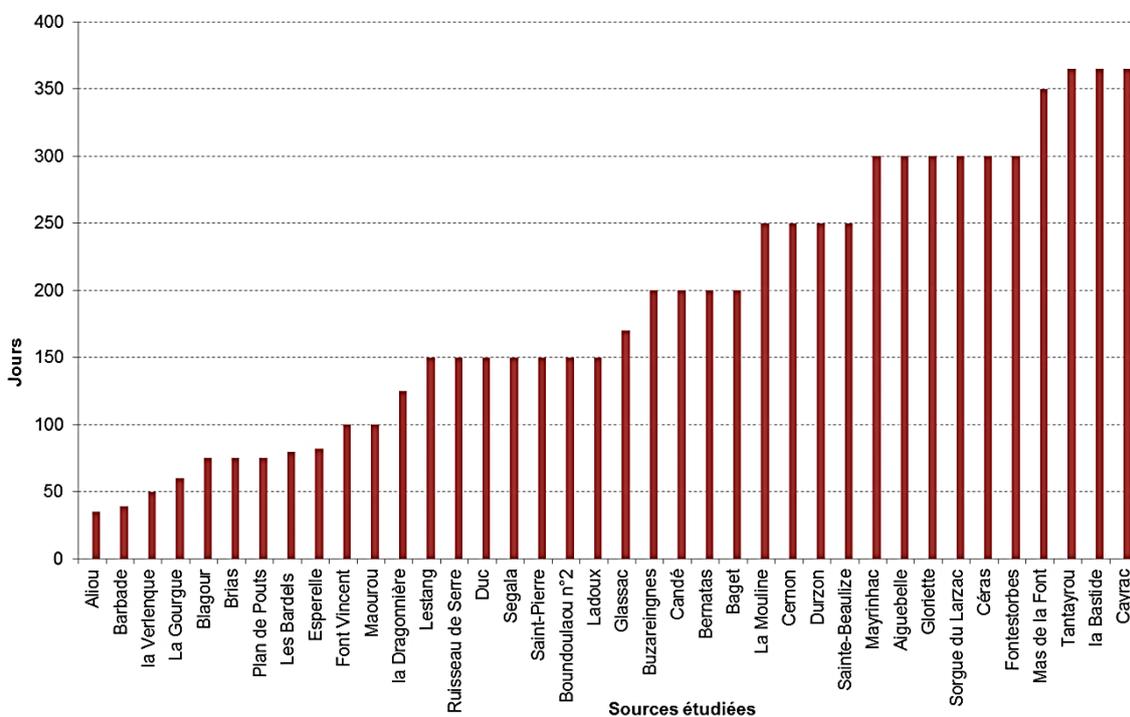


Illustration 129 - Durée d'influence de la composante lente sur le débit mesuré à la source.

À partir de cette distribution, 5 classes de durée d'influence de la composante lente sur le débit de la source ont été établies associées aux notes correspondantes (Illustration 130).

Durée d'influence composante lente du débit (jours)	Classe	Note
> 320	1	5
250 - 320	2	4
180 - 250	3	3
100 - 180	4	2
< 100	5	1

Illustration 130 - Aquifères karstiques - Tableau des classes et des notes pour le critère « Durée de l'influence de la composante lente du débit total de la source ».

6.4.5. Contribution relative de la composante lente au débit mesuré à l'exutoire en année sèche de référence

Outre la durée d'influence, les contributions relatives de chacune des composantes ont été calculées sur toute la période de calage (sous la forme d'une moyenne inter-annuelle) et exprimées en pourcentage, en les rapportant au débit total mesuré à l'exutoire. Elles ont également été établies en fonction du contexte climatique (en fonction des années humides ou années sèches de référence déterminées aux stations météorologiques sélectionnées).

Considérée pour une année sèche de référence, cette information renseigne donc directement sur l'importance des volumes transitant par la composante lente et donc sur la résistance du système à maintenir un débit en sortie sans apport d'eau en entrée. Il s'agit alors d'une forme indirecte d'évaluation de la fonction capacitive du système.

L'ensemble de ces données sont retranscrites à travers l'illustration 131 représentant la distribution des résultats obtenus.

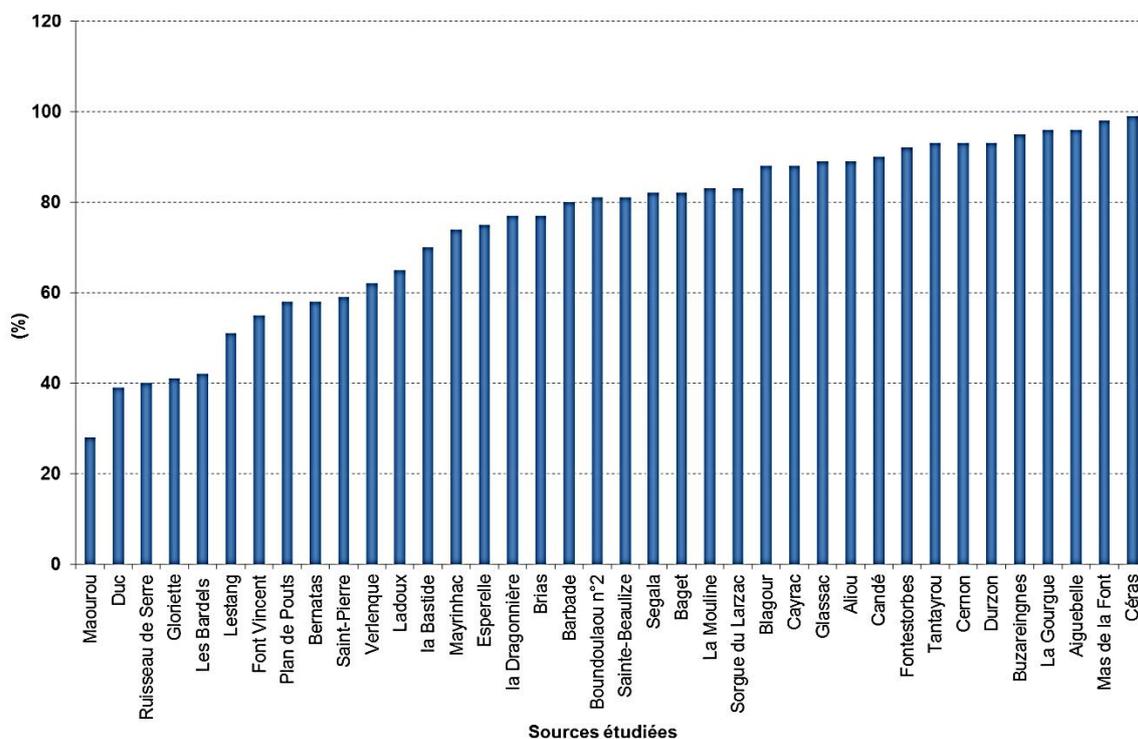


Illustration 131 – Pourcentage de contribution de la composante lente au débit des sources en année sèche.

Les sources ayant les plus les plus forts pourcentages (supérieur à 90 %) sont au nombre de 10 sachant que pour deux d'entre-elles, les volumes quantifiés pour la composante lente représente en année sèche la quasi-totalité du débit à l'exutoire. Il s'agit de la résurgence du Mas de la Font (09094X0017/HY) située dans le Causse de Sauveterre et de la source de Cérans constituant un des exutoires des calcaires cambriens de la Montagne Noire (Tarn).

Inversement, 5 sources présentent de plus faibles pourcentages compris entre 30 et 40 indiquant ainsi l'existence de drains développés dans la structure des systèmes favorisant les écoulements rapides. C'est le cas par exemple pour la source de Maourou (10731X0014/HY) située dans les Pyrénées.

À partir de cette distribution, 5 classes de pourcentage de contribution de la composante lente au débit des sources en année sèche ont été établies associées aux notes correspondantes (Illustration 132).

Contribution Composante lente au Q (année sèche) (%)	Classe	Note
> 95	1	5
85 - 95	2	4
65 - 85	3	3
45 - 65	4	2
< 45	5	1

Illustration 132 : Aquifères karstiques - Tableau des classes et des notes pour le critère « Contribution de la composante lente au débit totale de la source pour une année sèche ».

6.4.6. Rapport des volumes transitant par la réponse impulsionnelle lente en année sèche et en année humide

Le calcul du rapport des volumes de la composante lente contribuant au débit en année sèche sur les volumes calculés en année humide renseigne sur l'influence des apports d'eau dans la réponse du système. En effet, un rapport proche de 1 signifie que le même volume d'eau issue de la composante lente s'écoule à l'exutoire en année sèche et en année humide, c'est-à-dire que les précipitations n'ont pas d'influence sur la réponse du système, soit un indicateur d'une bonne résistance à des périodes prolongées de déficit en eau.

Pour 8 des sources étudiées, les valeurs calculées sont inférieures à 0,5 indiquant l'écoulement pour ces systèmes de plus grands volumes d'eau issus de la composante lente en année humide par rapport à une année sèche. Il s'agit par exemple de la résurgence de Glassac (08851X0006/HY) dans le Causse de Sauveterre qui présente une forte variabilité de volumes écoulés en fonction du contexte climatique (rapport de 0,32).

Inversement, les sources présentant le moins de variabilité en fonction des années sèches ou humides sont au nombre de 6 dont la résurgence de Ladoux (09353X0002/HY) ayant un rapport très proche de 1 (Illustration 133).

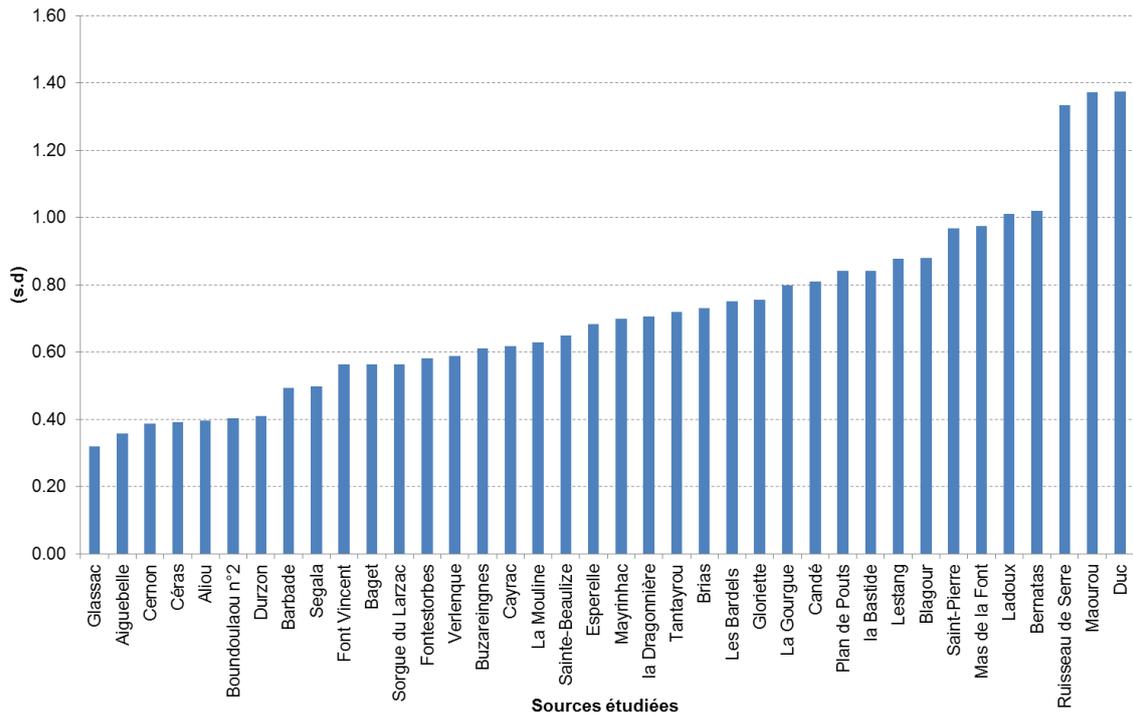


Illustration 133 - Rapport des volumes de la composante lente contribuant au débit calculés en année sèche sur ceux calculés en année humide.

À partir de cette distribution, 5 classes de rapport de volumes de la composante lente contribuant au débit calculés en année sèche sur ceux calculés en année humide ont été établies associées aux notes correspondantes (Illustration 134).

Vol RI année sèche / Vol. RI année humide	Classe	Note
> 1.05	1	5
0.85 - 1.05	2	4
0.65 - 0.85	3	3
0.45 - 0.65	4	2
< 0.45	5	1

Illustration 134 - Aquifères karstiques - Tableau des classes et des notes pour le critère « Rapport des volumes de la composante lente du débit-année sèche/humide ».

6.5. PONDÉRATIONS DES CRITÈRES

L'indicateur de résistance à la sécheresse (IRS) a été calculé en pondérant et en sommant les notes attribuées à chaque classe. La pondération a été choisie de façon à refléter l'importance du critère dans son rôle régulateur face à l'occurrence d'une sécheresse.

$$IRS_j = \sum_{i=1}^n p_i N_{j,i}$$

Avec :

IRS_j : l'indice de résistance à la sécheresse de l'aquifère j,

p_i : le poids du critère i,

N_{j,i} : la note attribuée au critère i pour l'aquifère j.

La pondération des critères est la suivante :

$$IRS = [IRS_T] \times 1 + [IRS_{IRSAK}] \times 2 + [IRS_{DMEP}] \times 1 + [IRS_{DICL}] \times 2 + [IRS_{RVCL}] \times 3 + [IRS_{CCLS}] \times 4$$

avec :

IRS_T : la superficie du bassin hydrologique de la source

IRS_{IRSAK} : le paramètre IRSAK

IRS_{DMEP} : la durée du maintien de l'effet des pluies efficaces sur le débit à partir de leur occurrence

IRS_{DICL} : la durée de l'influence de la composante lente du débit total

IRS_{RVCL} : le rapport des volumes de la composante lente du débit total entre une année sèche et une année humide

IRS_{CCLS} : la contribution en pourcentage de la composante lente au débit totale de la source pour une année sèche

Une analyse de sensibilité a été réalisée sur plusieurs paramètres de pondération. Les résultats respectent globalement le classement pour les entités extrêmes. C'est l'analyse qui est apparue la plus fidèle au regard de l'observation de terrain et la connaissance des sources traitées qui a été retenue.

Les Illustrations 118 et 119 présentent le classement par source des aquifères karstiques auxquelles elles sont rattachées, selon leur sensibilité à la sécheresse.

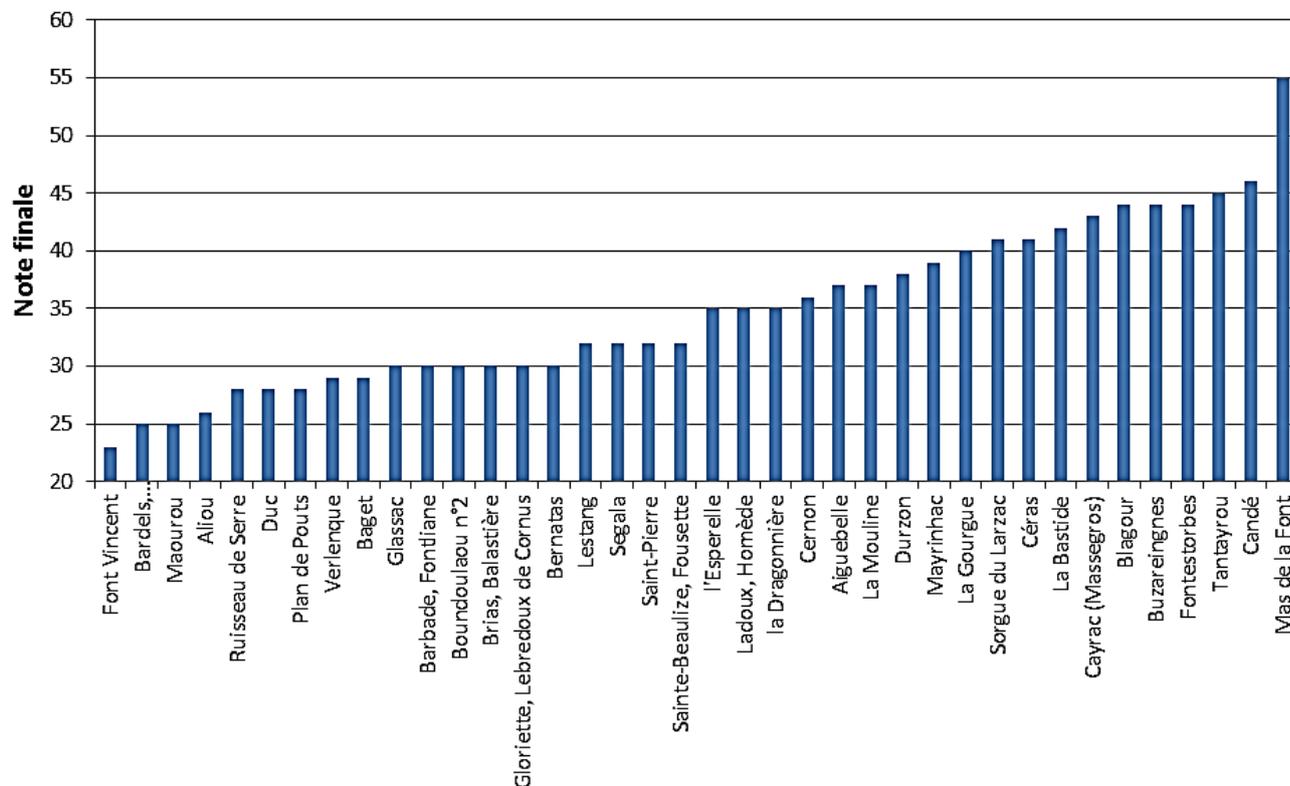


Illustration 135 - Classement des aquifères karstiques selon leur sensibilité à la sécheresse.

Critère	Taille		IRSAK		Maintien de l'effet des pluies efficaces sur le débit		Durée d'influence de la composante lente du débit		Vol année sèche / Vol année humide		Contribution Composante lente au Q (année sèche)		Note finale / source
	1		2		1		2		3		4		
	Code BSS	Classe	Note	Classe	Note	Classe	Note	Classe	Note	Classe	Note	Classe	
08091X0006	1	5	3	3	3	3	5	1	2	4	2	4	44
08567X0028	4	2	5	1	3	3	5	1	4	2	4	2	23
08605X0007	3	3	4	2	3	3	5	1	3	3	5	1	25
08851X0006	5	1	4	2	4	2	4	2	5	1	2	4	30
08851X0009	5	1	3	3	3	3	2	4	3	3	3	3	39
08852X0006	4	2	4	2	4	2	4	2	2	4	4	2	32
08853X0007	5	1	5	1	4	2	4	2	1	5	5	1	28
08853X0024	5	1	5	1	4	2	4	2	1	5	5	1	28
08856X0007	5	1	3	3	3	3	1	5	3	3	2	4	45
08856X0062	5	1	2	4	3	3	3	3	4	2	1	5	44
08856X0065	4	2	3	3	4	2	4	2	4	2	3	3	32
08857X0010	5	1	2	4	4	2	1	5	3	3	3	3	42
08857X0013	5	1	2	4	4	2	1	5	4	2	2	4	43
08857X0030	5	1	1	5	4	2	5	1	4	2	4	2	29
09052X0002	2	4	5	1	1	5	3	3	3	3	2	5	46
09058X0022	2	4	5	1	3	3	5	1	3	3	1	5	40
09092X0002	4	2	4	2	4	2	4	2	2	4	4	2	32
09094X0017	5	1	1	5	4	2	1	5	2	4	1	5	55
09097X0037	3	3	3	3	5	1	5	1	4	2	3	3	30
09098X0081	1	5	3	3	5	1	5	1	3	3	3	3	35
09352X0048	4	2	2	4	5	1	4	2	5	1	3	3	30
09353X0002	3	3	3	3	4	2	4	2	2	4	4	2	35
09355X0014	3	3	4	2	3	3	4	2	3	3	3	3	35
09356X0025	5	1	4	2	4	2	5	1	3	3	3	3	30
09357X0011	5	1	4	2	5	1	2	4	5	1	1	5	37
09357X0018	3	3	2	4	4	2	3	3	4	2	3	3	37
09357X0022	4	2	3	3	3	3	3	3	5	1	2	4	36
09365X0019	1	5	3	3	4	2	3	3	5	1	2	4	38
09613X0010	4	2	4	2	4	2	3	3	4	2	3	3	32
09614X0003	5	1	3	3	4	2	2	4	3	3	5	1	30
09614X0036	2	4	2	4	3	3	2	4	4	2	3	3	41
09615X0033	5	1	4	2	1	5	2	4	5	1	1	5	41
10722X0015	4	2	3	3	5	1	5	1	3	3	4	2	28
10731X0014	5	1	5	1	5	1	5	1	1	5	5	1	25
10733X0027	5	1	5	1	5	1	3	3	2	4	4	2	30
10734X0010	4	2	5	1	5	1	3	3	4	2	3	3	29
10734X0011	4	2	5	1	5	1	5	1	5	1	2	4	26
10766X0089	1	5	4	2	1	5	2	4	4	2	2	4	44

Illustration 136 - Tableau de notation finale par source de la sensibilité à la sécheresse pour les aquifères karstiques.

Une discussion sur les critères de sélection utilisés est engagée pour permettre la validation de la pondération dans le modèle de calcul et mieux guider leur poids respectif dans l'optique d'affiner la sensibilité à la sécheresse en domaine karstique.

6.5.1. Analyse du critère superficie du bassin d'alimentation de la source

La comparaison entre la note finale issue de la pondération de l'ensemble des critères de sensibilité et les valeurs du critère sur la superficie du bassin d'alimentation est présentée dans les Illustrations 137 et 138.

Aucune tendance ne se dégage globalement. Les illustrations 137 et 138 montrent néanmoins assez logiquement que les sources ayant de grands bassins hydrologiques sont toutes assez résistantes à la sécheresse (en rouge). Par contre toutes les sources qui sont résistantes à la sécheresse n'ont pas forcément de grands bassins hydrologiques (exemple marqué du système de Mas de Font, en orange).

Dans le cas particulier du système du Mas de la Font (situé dans le Causse de Sauveterre en Aveyron), il semble que son importante résistance à la sécheresse est gouvernée par la présence particulière de dépôts sablonneux provenant de la corrosion des dolomies (localement dénommés grésou) sur la quasi-totalité de l'impluvium. Cette configuration induit un comportement de l'aquifère assimilable à celui d'un milieu poreux avec prédominance d'une composante lente dans le débit de la source.

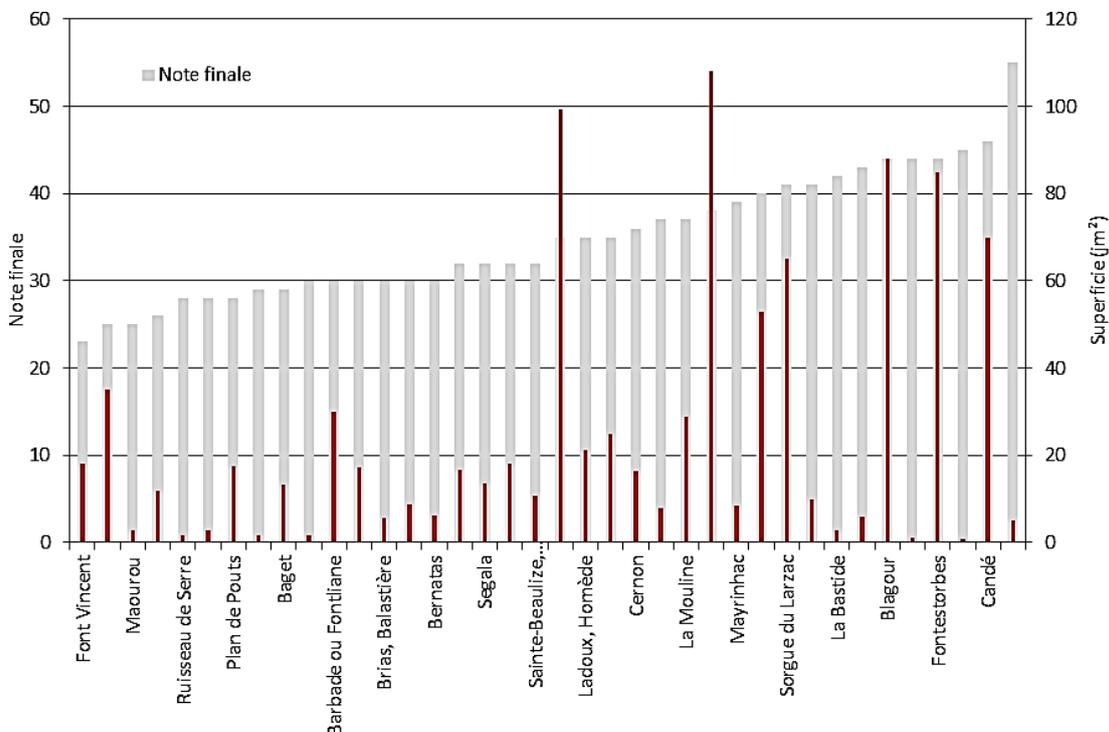


Illustration 137 - Comparaison du niveau de sensibilité des sources avec la superficie du bassin hydrologique des sources.

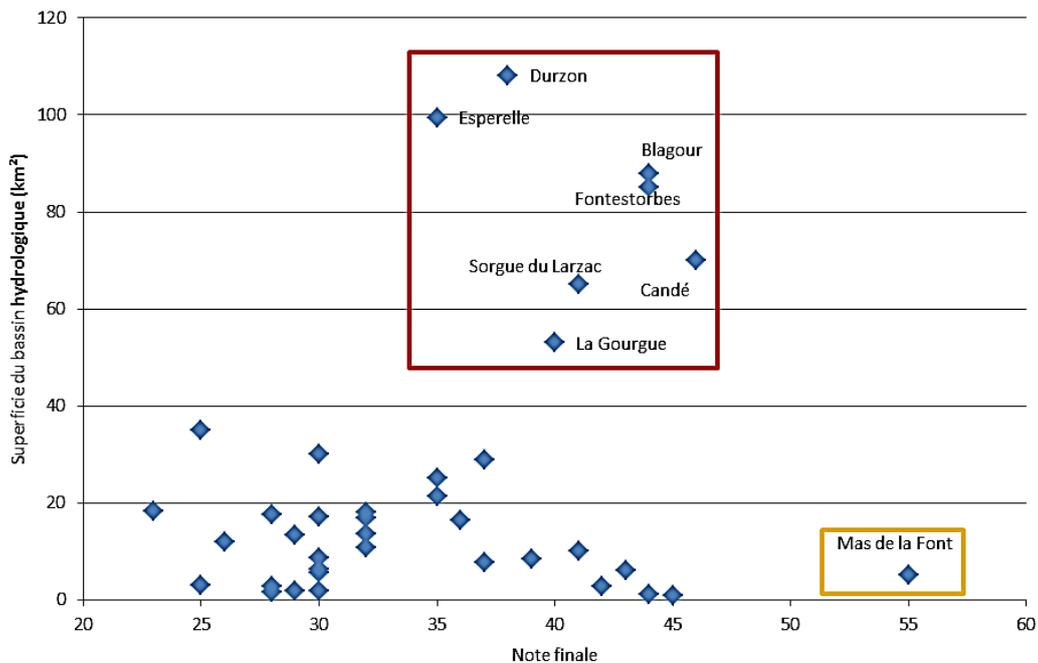


Illustration 138 - Corrélation entre la sensibilité à la sécheresse et la superficie des bassins hydrologiques.

6.5.2. Analyse du critère IRSAK

La comparaison entre la note finale issue de la pondération de l'ensemble des critères de sensibilité et les valeurs du critère IRSAK est présentée dans les Illustrations 139 et 140.

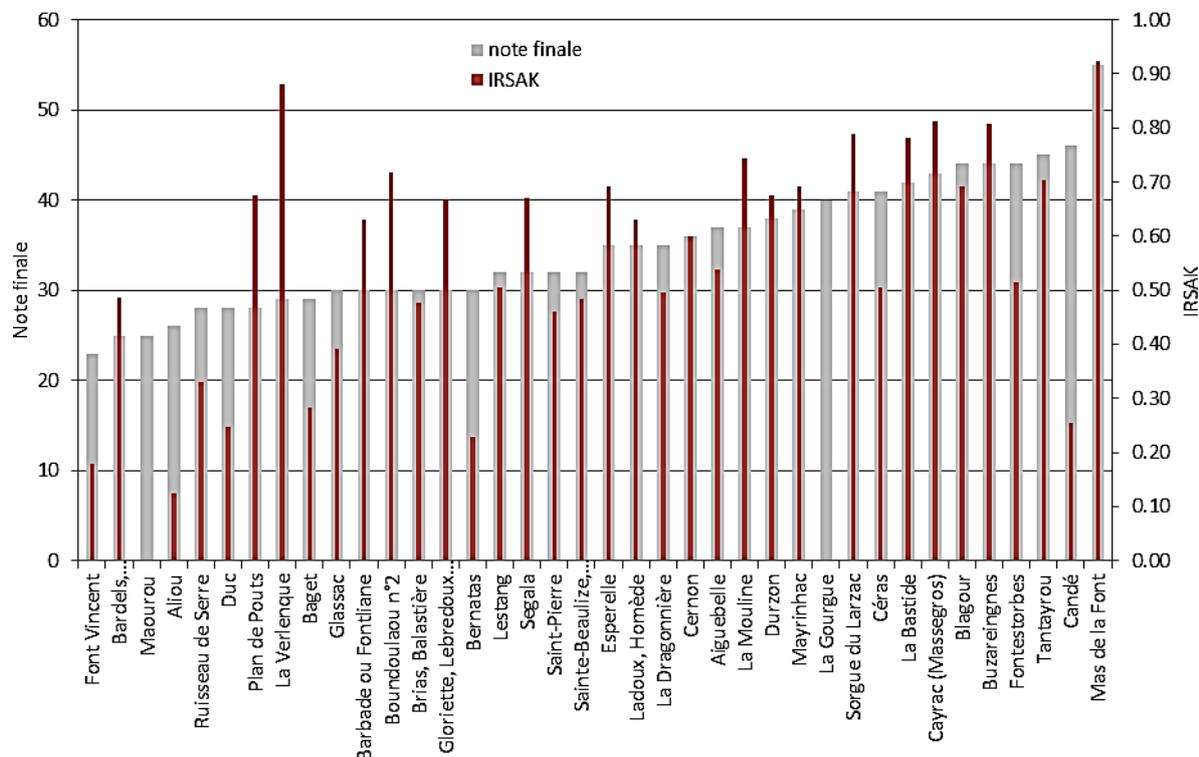


Illustration 139 - Comparaison du niveau de sensibilité des sources avec le critère IRSAK.

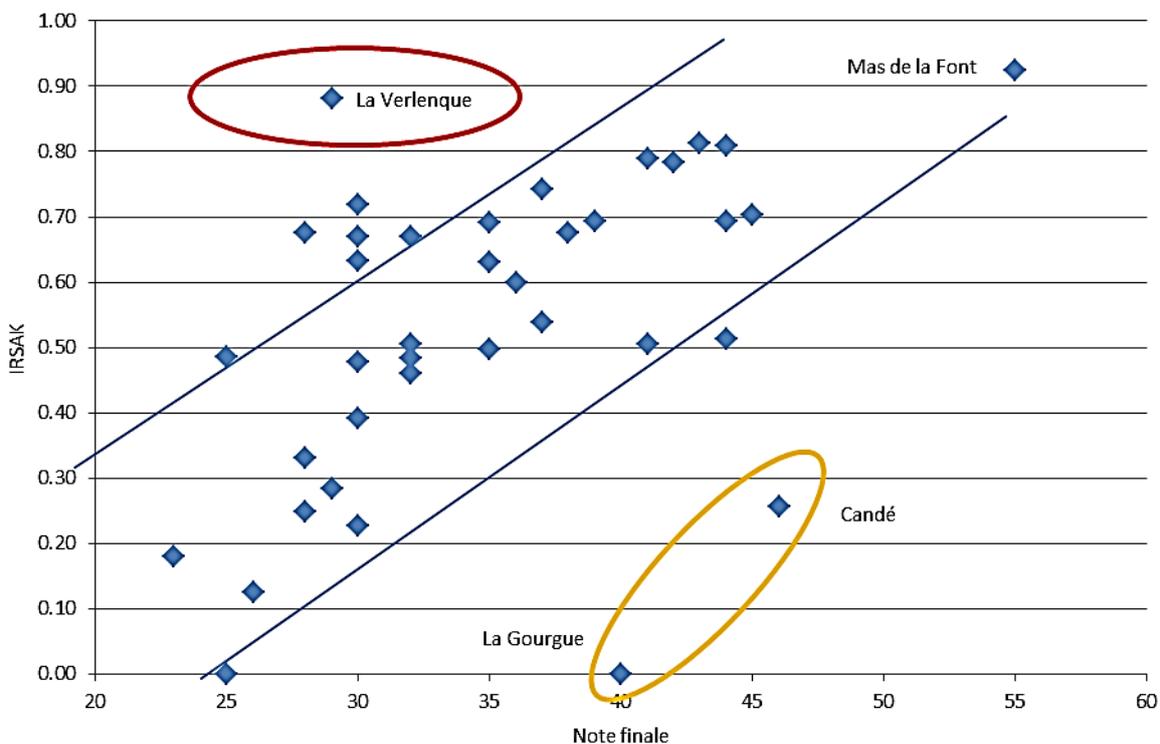


Illustration 140 - Corrélation entre la sensibilité à la sécheresse et le critère IRSAK.

Une tendance générale linéaire peut être dégagée avec néanmoins une forte dispersion des points. Particulièrement les sources de Candé et de La Gourgue, relativement peu sensibles à la sécheresse s'écarte de cette tendance avec un critère IRSAK particulièrement faible (en orange). Le système de la source de Verlenque considéré comme sensible à la sécheresse s'écarte également avec une valeur forte du critère IRSAK. Il semble que la dispersion est plus prononcée pour les aquifères sensibles à la sécheresse, ce qui pourrait indiquer que le critère IRSAK trouve son efficacité plutôt pour les aquifères les moins sensibles. Il est donc logique de ne pas mettre un poids maximum sur ce critère dans la pondération vis-à-vis de la sensibilité à la sécheresse.

6.5.3. Analyse du critère « maintien de l'effet des pluies efficaces sur le débit »

La comparaison entre la note finale issue de la pondération de l'ensemble des critères de sensibilité et les valeurs du critère de maintien de l'effet des pluies efficaces sur le débit est présentée dans les Illustrations 141 et 142.

Une tendance générale linéaire se dégage, sans surprise, avec une augmentation de ce critère avec la résistance à la sécheresse des aquifères. Les 3 sources parmi les plus résistantes à la sécheresse (en rouge) sont dotées de valeurs particulièrement fortes s'écartant de la tendance (système de Fontestorbes, de Candé et de Céras). Trois sources se distinguent de la tendance, indiquant que ce critère n'est pas prépondérant dans leur sensibilité à la sécheresse. Il s'agit du système de Mas de la Font (encadré en orange) qui possède la plus forte note et dont le comportement est assimilable à celui d'un aquifère poreux (cf. § 6.5.1). Et il s'agit des systèmes de Muret-le-Château (Causse Comtal) et de Font Vincent (Causse de Montgesty dans le Lot), tous deux parmi les moins résistantes à la sécheresse (encadré en vert) mais pour des raisons différentes. En effet, le système de Muret-le-Château est peu capacitif en relation avec un important développement de conduits karstiques induisant de très rapides circulations d'eaux alors que le système de Font Vincent se caractérise par un réservoir dont les ressources sont limitées (aquifère constitué de calcaires noduleux du Tithonien).

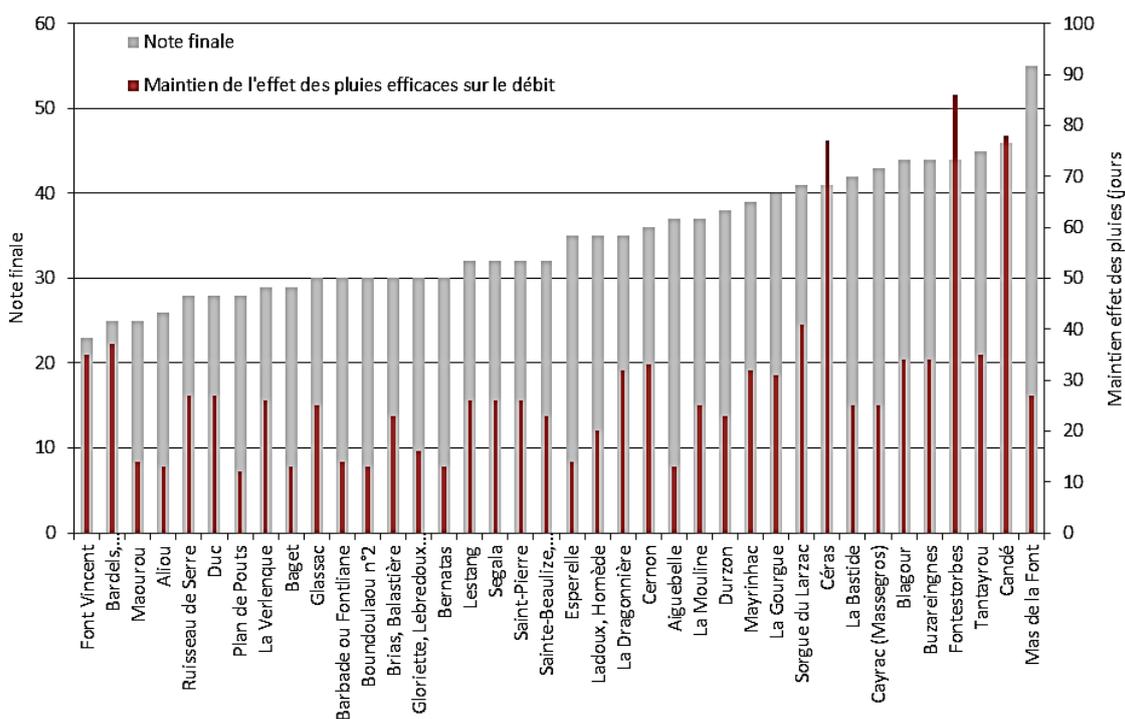


Illustration 141 - Comparaison du niveau de sensibilité des sources avec le critère « maintien de l'effet des pluies sur le débit des sources ».

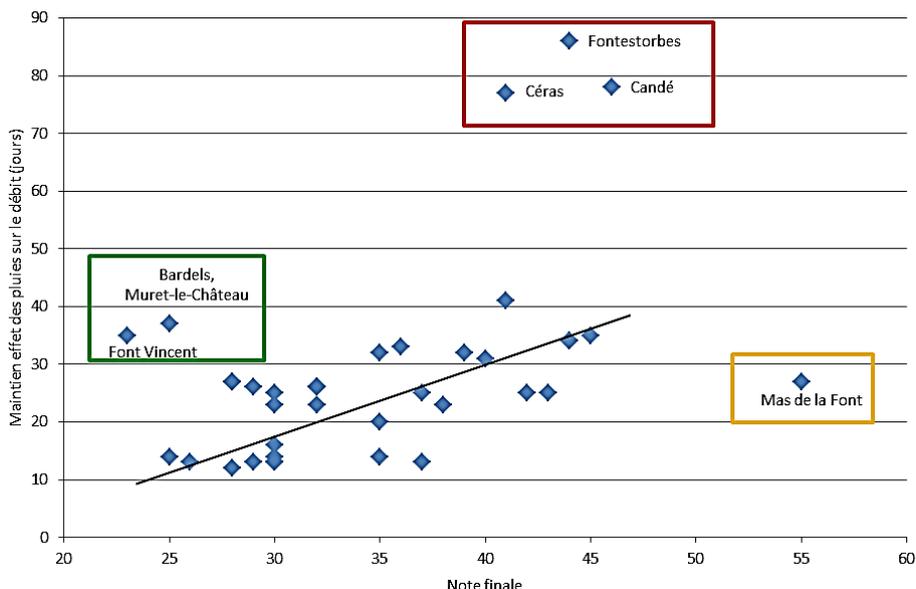


Illustration 142 - Corrélation entre la sensibilité à la sécheresse et le critère « maintien de l'effet des pluies sur le débit des sources ».

Ce critère établi à partir des corrélogrammes croisés Pluie/débit est vraisemblablement pertinent. Toutefois, s'agissant d'une approche purement statistique, et au vu d'une certaine dispersion des points, il s'agit de rester prudent vis-à-vis de son utilisation pour caractériser la sensibilité à la sécheresse d'un aquifère karstique (système complexe). Sa pondération dans ce type d'aquifère doit rester relativement faible.

6.5.4. Analyse du critère de durée d'influence de la composante lente dans le débit

La comparaison entre la note finale issue de la pondération de l'ensemble des critères de sensibilité et les valeurs du critère de durée d'influence des pluies sur la composante lente du débit est présentée dans les Illustrations 143 et 144.

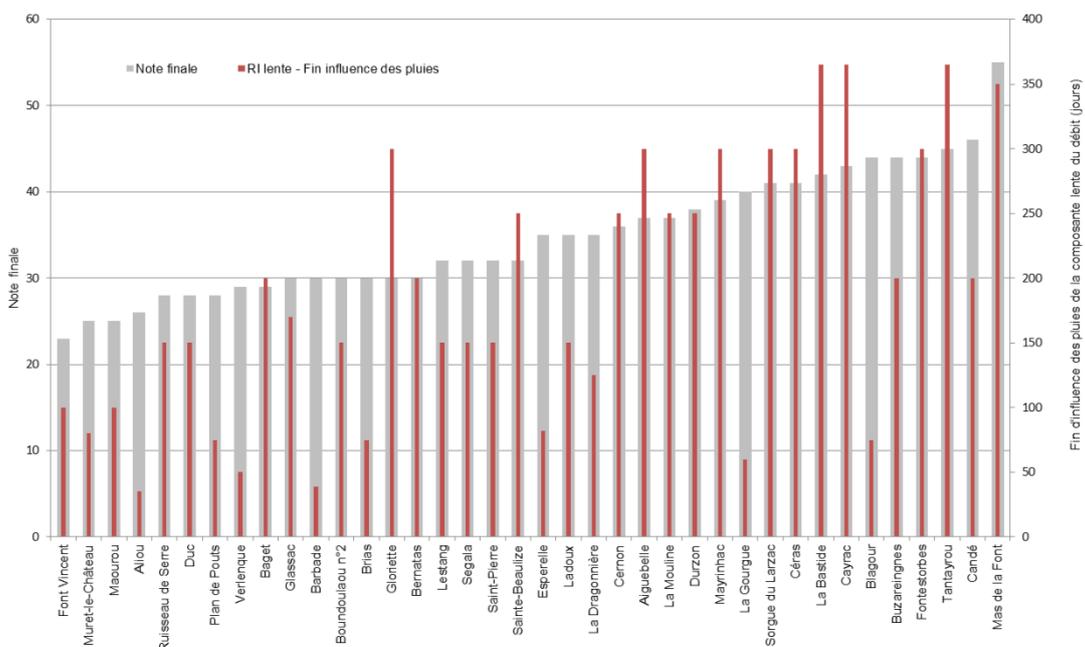


Illustration 143 - Comparaison du niveau de sensibilité des sources avec le critère « fin d'influence des pluies sur la composante lente du débit ».

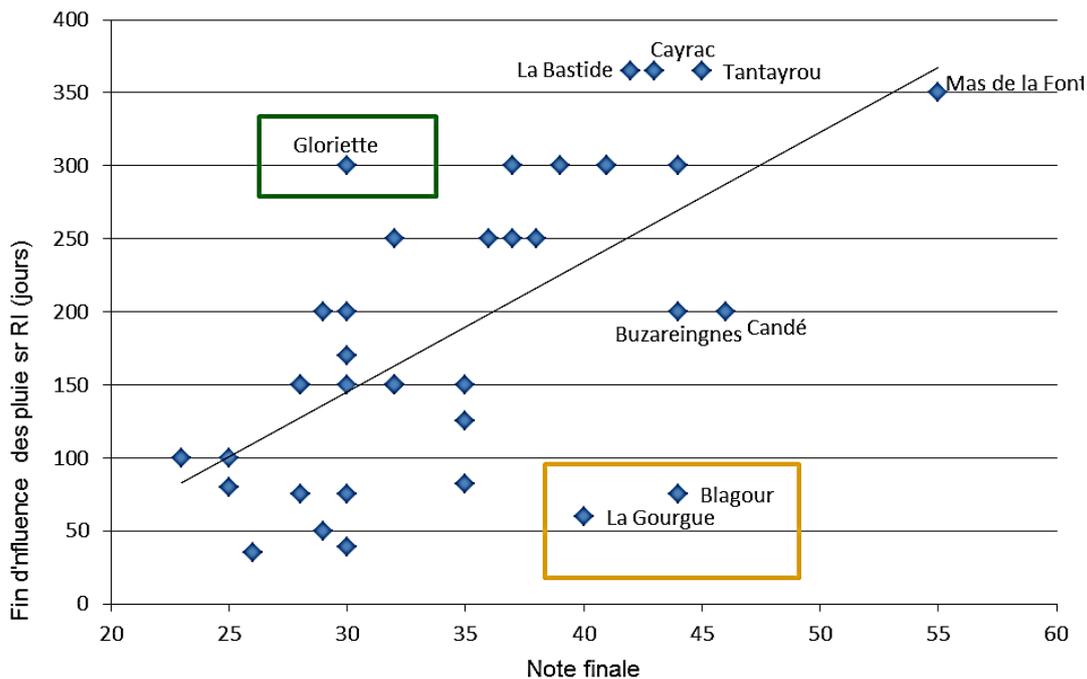


Illustration 144 - Corrélation entre la sensibilité à la sécheresse et le critère « fin d'influence des pluies sur la composante lente du débit ».

Une tendance linéaire semble se dégager avec néanmoins une forte dispersion des points. Deux sources, celle du Blagour et de La Gourgue, se distinguent de façon similaire avec une assez forte résistance à la sécheresse et un rôle de la composante lente moins prononcé (en orange). La source de Gloriette (en vert) se distingue également de façon surprenante. Résultant d'une analyse statistique dont le calage dépend étroitement des données de débit à l'étiage, ce critère est intéressant mais ne doit pas faire l'objet d'une pondération trop élevée. De plus, il est quelque peu redondant avec le critère précédent établi à partir des corrélogrammes croisés, même si la corrélation effectuée entre ces deux derniers critères n'est pas réellement satisfaisante.

6.5.5. Analyse du critère « Rapport des volumes de contribution de la composante lente au débit en année sèche et en année humide »

La comparaison entre la note finale issue de la pondération de l'ensemble des critères de sensibilité et les valeurs du critère de rapport des volumes transitant par la réponse impulsionnelle lente en année sèche et humide est présentée dans les Illustrations 145 et 146.

Aucune tendance ne se dégage. Seuls quelques points se distinguent du nuage de point. Il s'agit du système de Mas de la Font (en orange) et surtout de 3 sources (en vert) qui présentent de fortes valeurs pour ce critère tout en étant classés très sensible à la sécheresse. En l'occurrence, il s'agit de deux systèmes voisins, celui de Duc et du Ruisseau de Serre (Causse de Sauveterre en Aveyron) et d'un système des chaînons pyrénéens, celui de Maourou.

Il est difficile d'émettre un avis sur ce critère issu de la modélisation effectuée sous TEMPO. Il s'agira de pondérer ce paramètre avec modération.

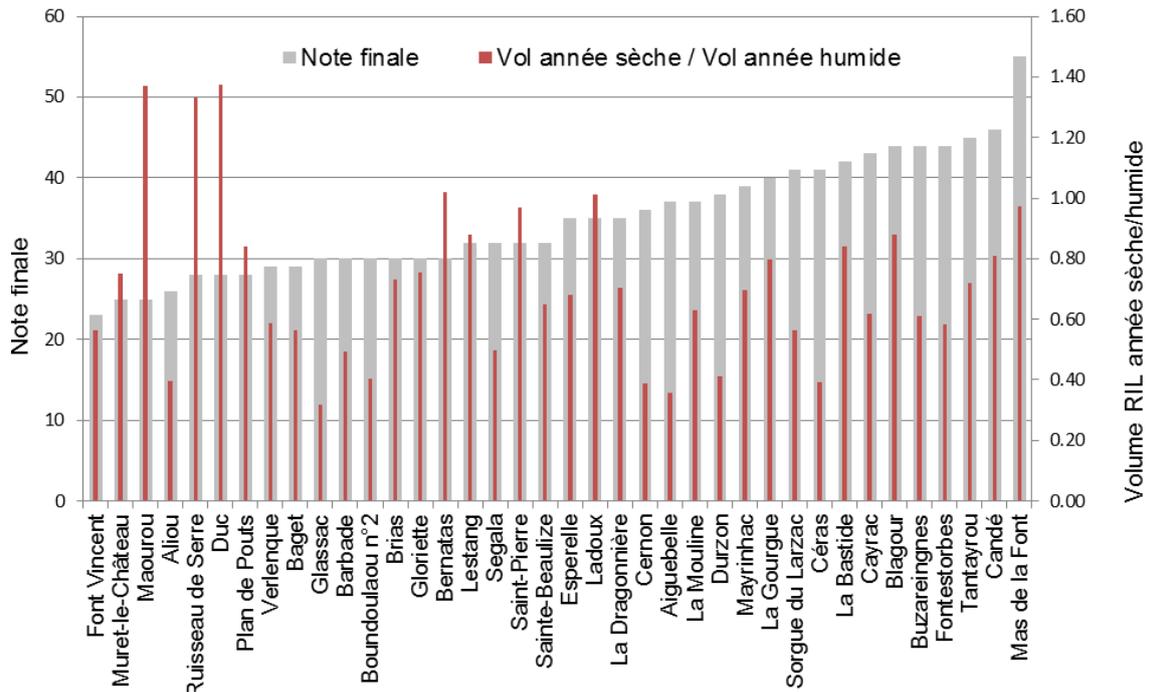


Illustration 145 - Comparaison du niveau de sensibilité des sources avec le critère « rapport des volumes de la composante lente du débit (sec/humide) ».

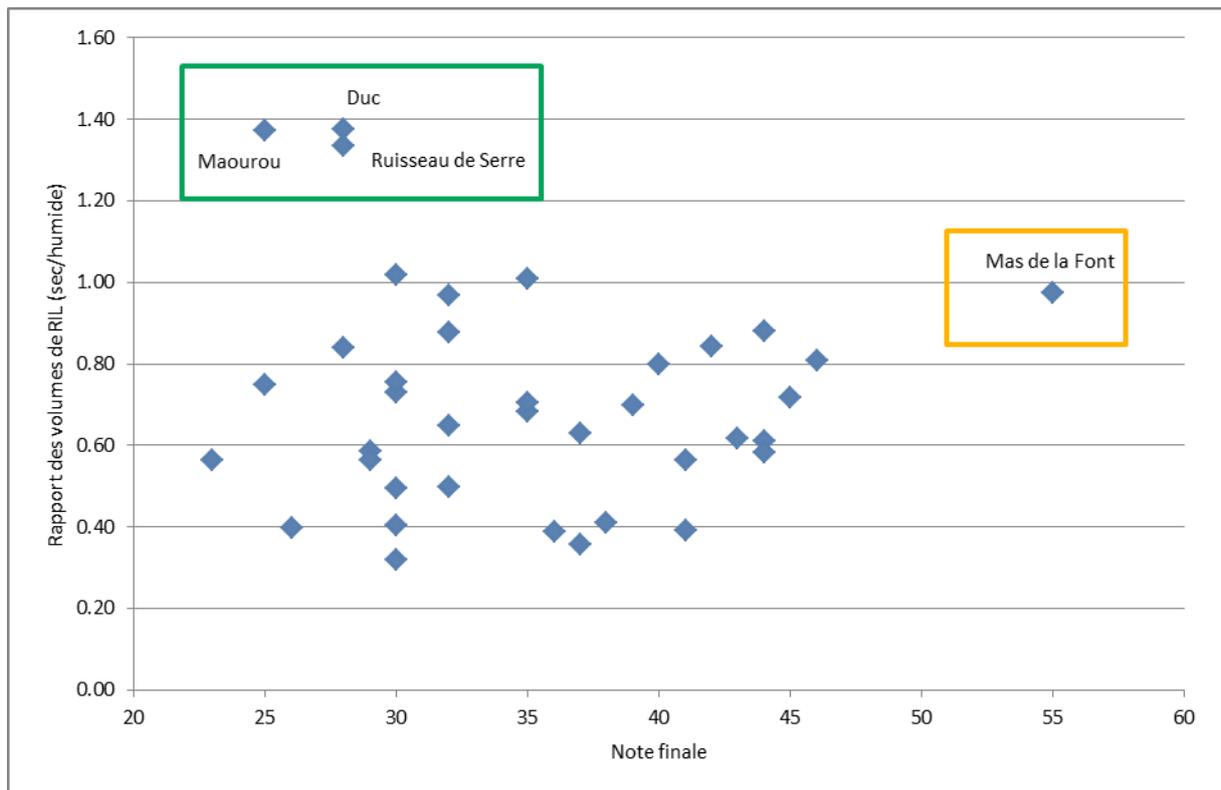


Illustration 146 - Corrélation entre la sensibilité à la sécheresse et le critère « rapport des volumes de la composante lente du débit (sec/humide) ».

6.5.6. Analyse du critère « contribution de la composante RIL au débit en année sèche »

La comparaison entre la note finale issue de la pondération de l'ensemble des critères de sensibilité et les valeurs du critère de contribution relative de la composante lente au débit en année sèche de référence est présentée dans les Illustrations 147 et 148.

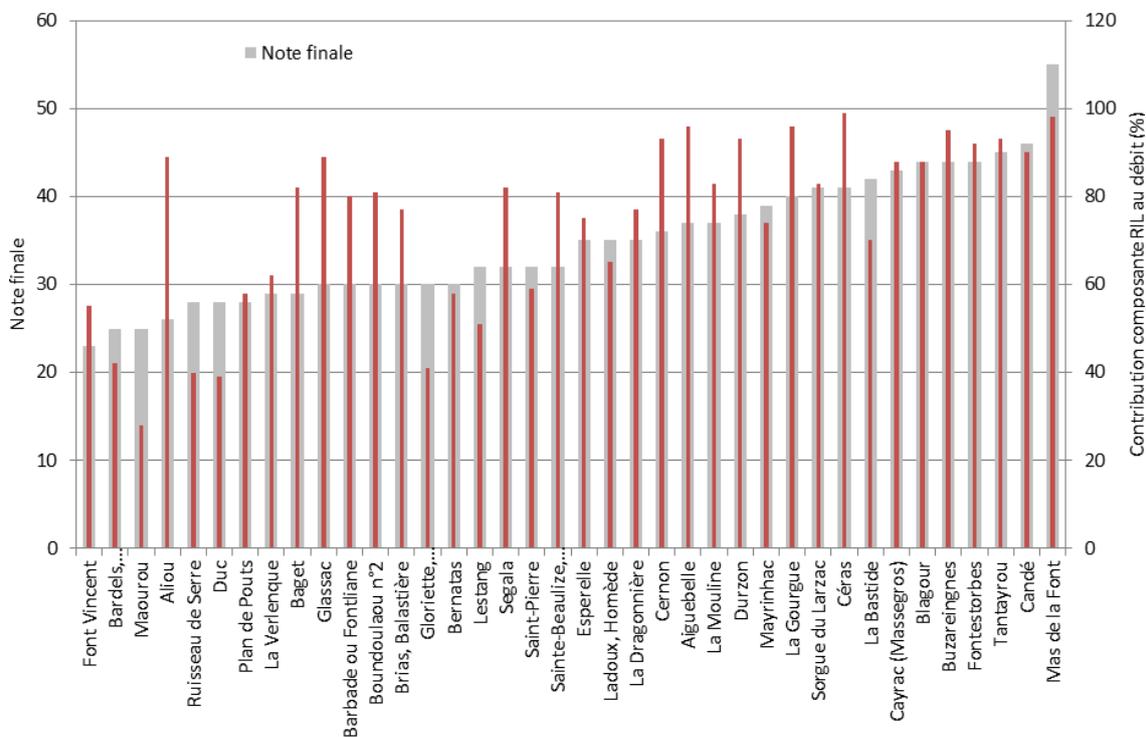


Illustration 147 - Comparaison du niveau de sensibilité des sources avec le critère « contribution de la composante RIL au débit en année sèche ».

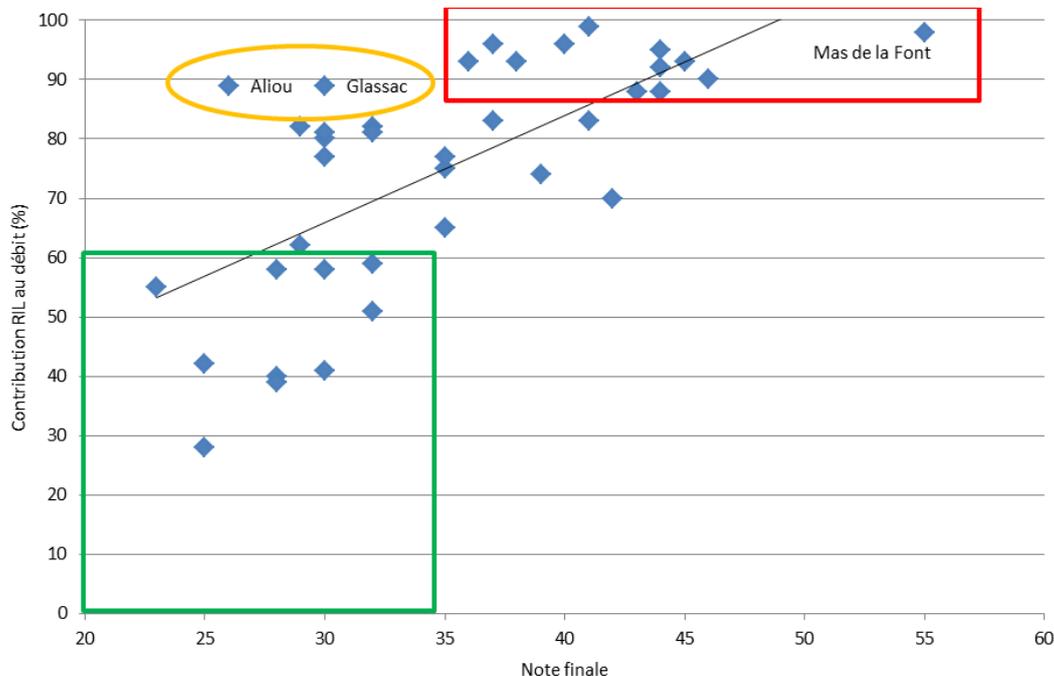


Illustration 148 - Corrélation entre la sensibilité à la sécheresse et le critère « contribution de la composante RIL au débit en année sèche ».

Les graphiques montrent qu'une tendance linéaire se dégage, avec cependant une dispersion des points. À noter que toutes les valeurs faibles de contribution en volume de la composante lente au débit en année sèche (< 60 %) concernent des aquifères sensibles ou très sensibles à la sécheresse (encadré en vert). Toutes les valeurs fortes (> 85 %) sont des aquifères assez, voire très résistants à la sécheresse (encadré en rouge). Seules 2 sources sortent de ce schéma, Aliou et Glassac, qui ont une valeur forte mais sont classées comme sensible à la sécheresse (encadré en orange). Ce critère paraît intéressant pour caractériser la sensibilité à la sécheresse et devra faire l'objet d'étude plus poussée. Une pondération élevée de ce critère est cohérente.

6.6. CARTOGRAPHIE DE RÉSISTANCE À LA SÉCHERESSE DES AQUIFÈRES KARSTIQUES

Six classes de sensibilité à la sécheresse des aquifères karstiques ont été définies à partir des valeurs obtenues dans le calcul de l'indicateur de résistance à la sécheresse des 38 sources étudiées. Ces classes définies varient entre des aquifères très peu sensibles (classe 1) et des aquifères extrêmement sensibles (classe 6).

Les bassins d'alimentation non traités concernent des sources actuellement dépourvues de longues chroniques de débits et/ou celles dont les courbes de tarage n'ont pas encore été construites (seules les hauteurs d'eau sont présentes dans la Banque Hydro). Ces cas de figure concernent majoritairement les sources situées dans le Causse du Quercy.

Les cartes finales de la sensibilité à la sécheresse des aquifères karstiques sont présentées en Illustration 149 (karsts des Grands Causses, Causse du Quercy et Monts de Lacaune) et en Illustration 150 (karsts des Pyrénées).

Dans la partie nord de la région (Causse du Quercy, Grands Causses et Mont de Lacaune), 17 systèmes apparaissent comme très sensibles à la sécheresse sur les 38 étudiés, voire extrêmement sensible pour deux d'entre eux. Il s'agit des systèmes karstiques de la source des Bardels (Muret-le-Château, 12) et à celui de la source de Font-Vincent dans le Causse de Montgesty (46).

Inversement 8 systèmes apparaissent comme peu sensibles à la sécheresse dont un très peu sensible, celui de la résurgence du Mas-de-Font située dans le Causse de Sauveterre.

Sur les 6 sources étudiées dans le massif des Pyrénées, seul le système de la source de Fontestorbes (10766X0089/HY) est évaluée comme peu sensible à la sécheresse probablement en relation avec un important volume dynamique estimé 23 millions de m³. Les 5 autres systèmes sont définis comme très sensibles à extrêmement sensibles pour deux d'entre eux.

LEGENDE :

- Secteur d'étude hors milieux karstiques (intensément plissé, socle, poreux)
- Formations carbonatées non différenciées Secteurs Causse du Quercy / Grands Causses

Classement Sensibilité Sécheresse des aquifères karstiques
(établi à partir des chroniques de débits de sources appartenant à des réseaux de surveillance)

- | | | |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Classe 1 : très peu sensible Classe 2 : peu sensible Classe 3 : moyennement sensible Classe 4 : sensible | <ul style="list-style-type: none"> Classe 5 : très sensible Classe 6 : extrêmement sensible non traité par absence de données exploitables | <ul style="list-style-type: none"> Sources karstiques étudiées dans Eressar Sources karstiques non traitées (par absence de données exploitables) |
|---|---|---|

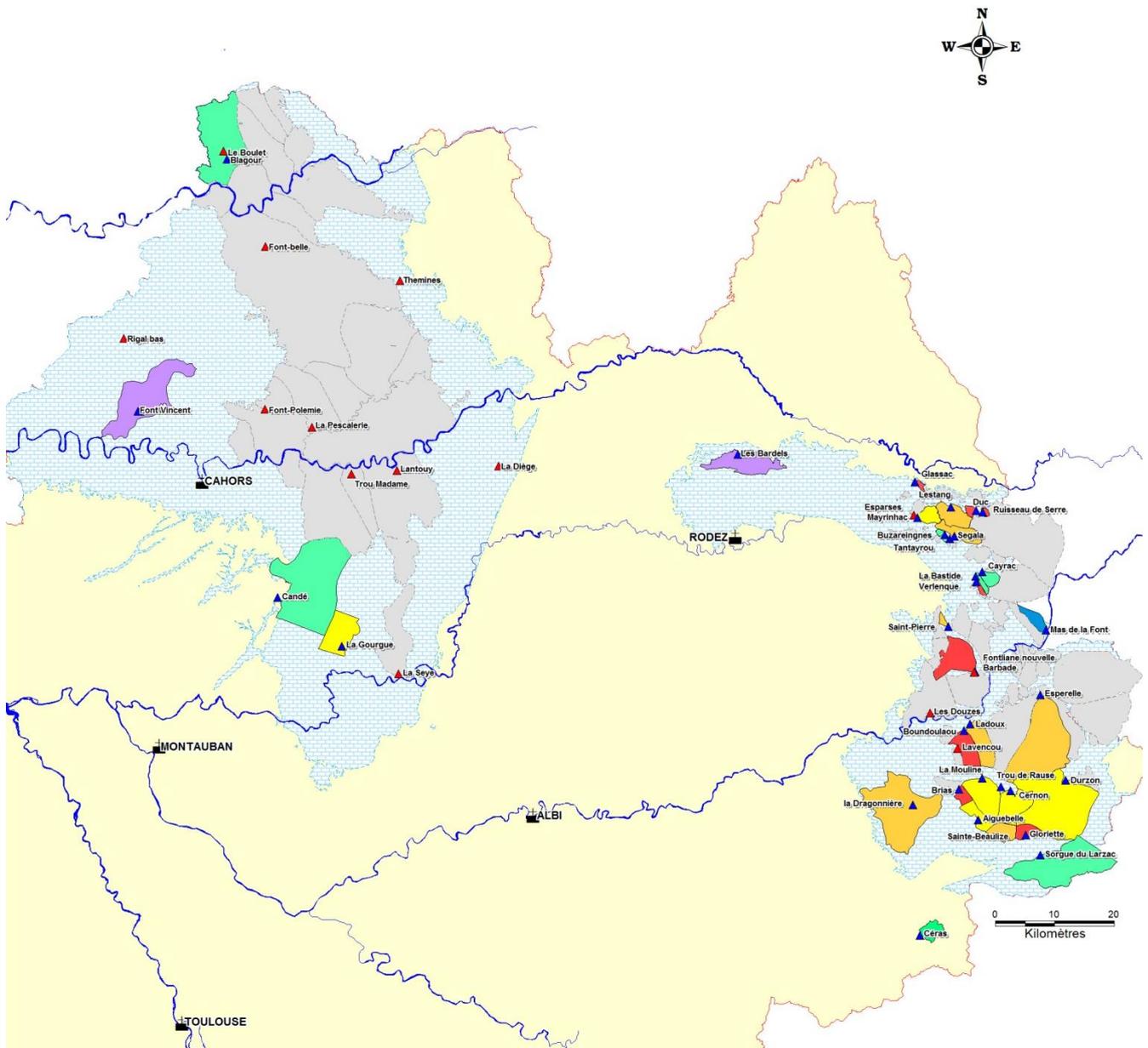


Illustration 149 - Carte de la sensibilité à la sécheresse des aquifères karstiques (Grands Causses, Causse du Quercy, Monts de Lacaune).

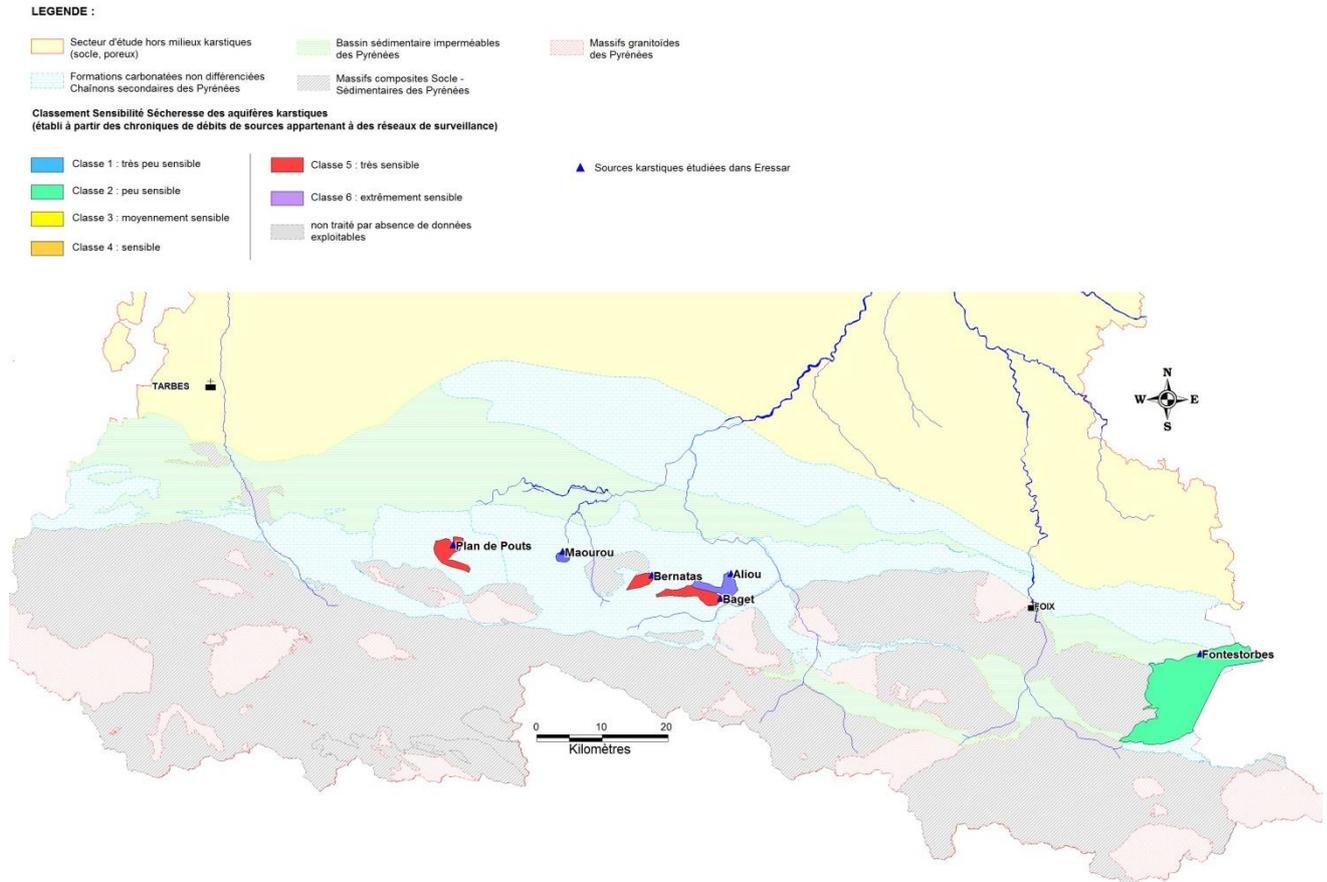


Illustration 150 - Carte de la sensibilité à la sécheresse des aquifères karstiques (Pyrénées).

6.7. CONSOLIDATION DES RÉSULTATS SUR LES CRITÈRES DE SENSIBILITÉ À LA SÉCHERESSE

Comme stipulé dans le chapitre 6.4., les critères pris en compte pour établir la carte de la sensibilité à la sécheresse ont été sélectionnés en s'assurant d'être en mesure de pouvoir effectuer une comparaison pour l'ensemble des sources étudiées (soit a minima un paramètre renseigné pour toutes les sources étudiées). Afin de consolider les résultats du classement des sources en fonction de leur sensibilité à la sécheresse, d'autres paramètres jugés d'intérêt vis-à-vis de cette problématique ont été examinés. Ces éléments n'ont pas été utilisés en première analyse car seulement disponibles sur certaines des sources étudiées.

6.7.1. Volumes dynamiques

Ce paramètre est disponible pour 28 des 38 sources étudiées (tableau des résultats de l'illustration 122). Comme indiqué dans le chapitre 6.3.2., à partir de l'analyse des courbes de récession d'une source, il est possible d'estimer le volume d'eau contenu dans le karst noyé, responsable de la décroissance des débits observés à l'exutoire, introduite par A. Mangin sous le terme de volume dynamique. Cette donnée permet d'évaluer l'importance des réserves contenues dans le système karstique. Ainsi, en termes de sensibilité à la sécheresse, au plus il sera important au plus en toute théorie la résistance à la sécheresse de l'entité sera élevée.

La comparaison entre la note finale issue de la pondération des critères de sensibilité et le volume dynamique déterminé pour 28 des 38 sources étudiées est indiquée dans les illustrations 151 et 152.

De façon surprenante aucune tendance générale ne peut se dégager à la lecture de ces graphiques. Si les trois sources à fort volume dynamique (encadré en rouge) se classe sans surprise comme résistante à la sécheresse, 4 sources (encadré en jaune) sont caractérisées également comme peu sensible à la sécheresse mais avec de faibles volumes dynamiques. Toutefois, pour au moins 2 d'entre-elles (Buzareingues et Mayrinhac), des apports profonds extérieurs au système ont été mis en évidence lors de l'étude hydrogéologique de 2006 effectuée sur le Causse de Sauveterre. Les 2 autres sources (Cayrac et La Bastide) présentent des singularités avec notamment de forts pouvoirs régulateurs caractéristiques de systèmes au comportement de milieu poreux.

Blagour est une source atypique par son fonctionnement particulier et montre que le volume dynamique joue un rôle relativement limité dans sa résistance à la sécheresse. En effet, ce système se caractérise d'une part, par un comportement de type aquifère fissuré en raison de l'encombrement en matériaux détritiques des galeries à proximité de l'exutoire et d'autre part, par une zone noyée renfermant des réserves importantes (volume dynamique estimé à plus de 5 millions de m³ par l'analyse des hydrogrammes de 2010).

Hormis ces sources, une légère tendance se dégage pour les classes de sensibilité moyenne avec une augmentation relative de la résistance à la sécheresse en relation avec le volume dynamique.

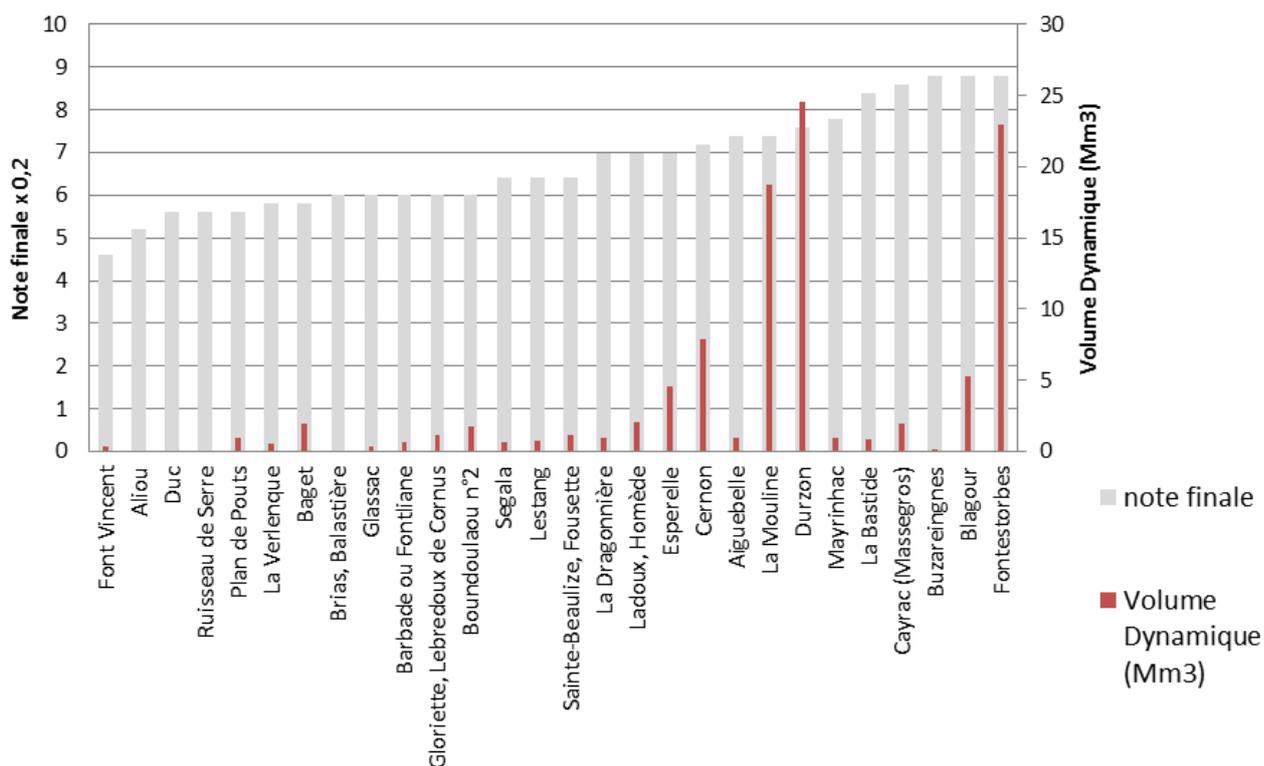


Illustration 151 - Comparaison du niveau de sensibilité à la sécheresse avec le volume dynamique estimé pour 28 sources.

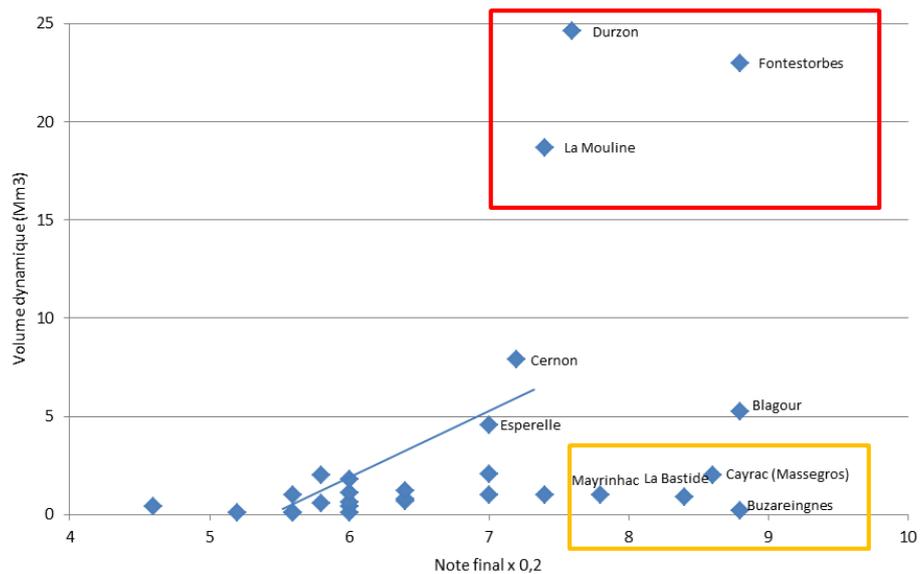


Illustration 152 - Graphe de corrélation entre la sensibilité des sources et leur volume dynamique.

6.7.2. Pouvoir régulateur de l'aquifère

Ce paramètre k constitue également un critère susceptible d'apporter des éléments d'explication dans la caractérisation de la sensibilité à la sécheresse des aquifères karstiques. Il a été décrit dans le chapitre 6.3.2. et provient de l'analyse des courbes de récession. Il traduit l'aptitude de la zone noyée à stocker les précipitations et à les restituer progressivement dans le temps. En toute théorie, ce paramètre intervient donc directement sur la résistance à la sécheresse du système.

S'agissant d'un paramètre égal au rapport entre le volume dynamique maximum obtenu sur une grande période et le volume de transit inter-annuel sur la même période, seulement 18 des 38 sources étudiées disposent d'une estimation de k. La comparaison entre la note finale issue de la pondération des critères de sensibilité et les valeurs de pouvoir régulateur des 18 sources étudiées est indiquée dans les Illustrations 153 et 154.

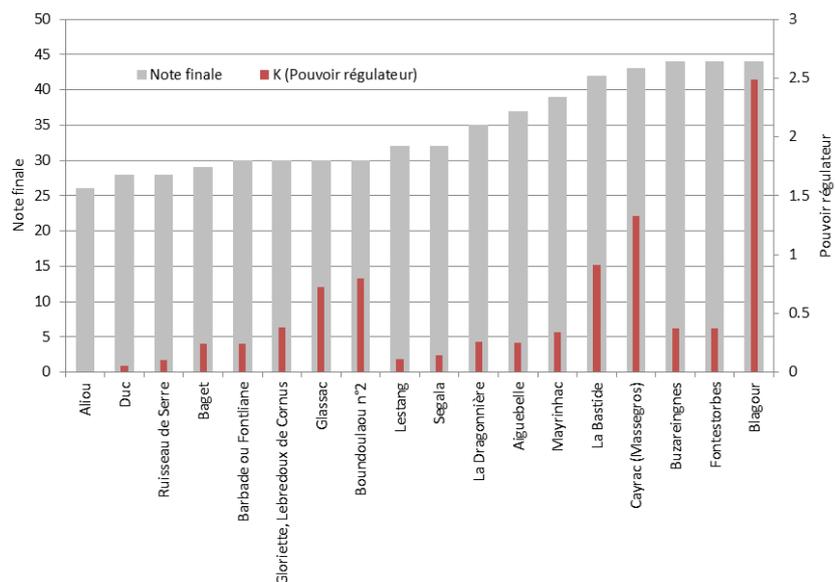


Illustration 153 - Comparaison du niveau de sensibilité à la sécheresse de 18 des sources étudiées avec le pouvoir régulateur de l'aquifère.

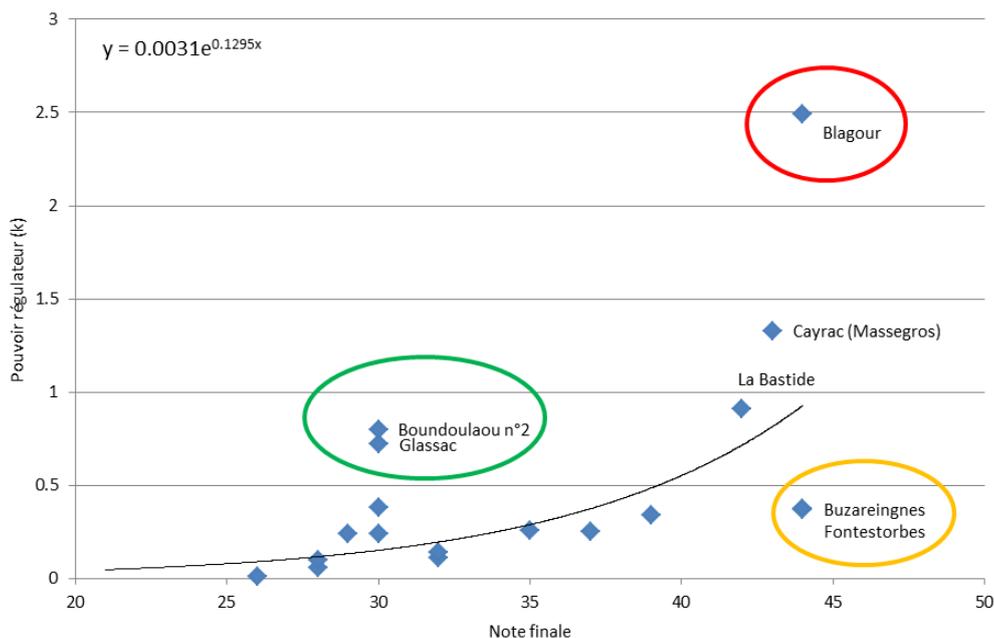


Illustration 154 - Corrélation de la sensibilité à la sécheresse de 18 des sources étudiées avec le pouvoir régulateur de l'aquifère.

Plus le pouvoir régulateur est élevé, plus le coefficient k tend vers une valeur proche de 1. C'est notamment le cas pour les aquifères poreux où le volume dynamique est quasiment égal au volume de transit. Dans le cas des aquifères karstiques, k est en général inférieur à 0,5 sachant qu'une valeur proche de zéro traduit un pouvoir régulateur peu important.

Une courbe de tendance de type exponentielle semble se dégager, indiquant que les aquifères les plus résistants à la sécheresse nécessitent un fort pouvoir régulateur. La source du Blagour (08091X0006/HY) avec un coefficient k particulièrement élevé illustre bien cette hypothèse.

À note de sensibilité à la sécheresse quasi équivalente avec la source du Blagour, la source de Buzareingnes (08856X0062/HY) se distingue de la tendance. Elle est dotée d'un relativement fort pouvoir régulateur (proche de 0,5) et d'une forte résistance à la sécheresse mais sans volume dynamique important (en moyenne estimé à 0,2 Mm³). En effet, l'étude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre et de ses avants Causses réalisée en 2006 avait mis en évidence l'existence d'apports profonds (estimés à 40 %) non pris en compte dans son bassin d'alimentation (cette particularité avait également été identifiée pour la source voisine de Tantayrou (08856X0007/HY), avec des apports estimés à 75 %).

D'une manière plus générale, il faut noter que les sources les moins sensibles associées à un faible volume dynamique (Illustrations 151 et 152 précédentes) sont par contre pourvues d'un pouvoir régulateur relativement important. Ce dernier paramètre semble jouer un rôle plus important pour ce type de source que leur volume dynamique dans la caractérisation de leur sensibilité à la sécheresse.

6.7.3. Retard à l'infiltration

Au même titre que le paramètre k , le coefficient i caractérisant les retards à l'infiltration constitue un critère susceptible d'apporter des éléments d'explication dans la caractérisation de la sensibilité à la sécheresse des aquifères karstiques. Il a été décrit dans le chapitre 6.3.2. et provient de l'analyse des courbes de récession. Une forte valeur traduit une infiltration lente ou l'influence d'un aquifère épikarstique contribuant à une meilleure

régulation de l'écoulement alors qu'une faible valeur est le signe d'un transit rapide des eaux vers la zone noyée.

Ce coefficient i a été évalué sur les mêmes 18 sources mentionnées précédemment pour le pouvoir régulateur. La comparaison entre la note finale issue de la pondération des critères de sensibilité et les valeurs de retard à l'infiltration des 18 sources étudiées est indiquée dans les Illustrations 155 et 156. Une tendance linéaire est observée sur l'illustration 156 dans le sens logique qu'au plus le retard à l'infiltration est important au plus la sensibilité à la sécheresse est faiblement exprimée. Toutefois, 3 sources se dégagent de cette tendance.

Pour les mêmes raisons que celles énoncées précédemment dans le chapitre 6.7.2. sur le pouvoir régulateur, à savoir l'existence d'apports profonds, la source de Buzareingnes se caractérise par un très fort retard à l'infiltration.

La source Duc (08853X0024/HY) située sur la Causse de Sauveterre en Aveyron se caractérise par une sensibilité à la sécheresse assez marquée (parmi les plus faibles pour ces 18 sources étudiées avec celle du ruisseau de Serre située dans le même contexte) associé à un fort retard à l'infiltration (en moyenne estimé à plus de 0,5). Cette source présente par ailleurs un très faible pouvoir régulateur (en moyenne de 0,05) et un faible volume dynamique (en moyenne de 0,07 Mm³).

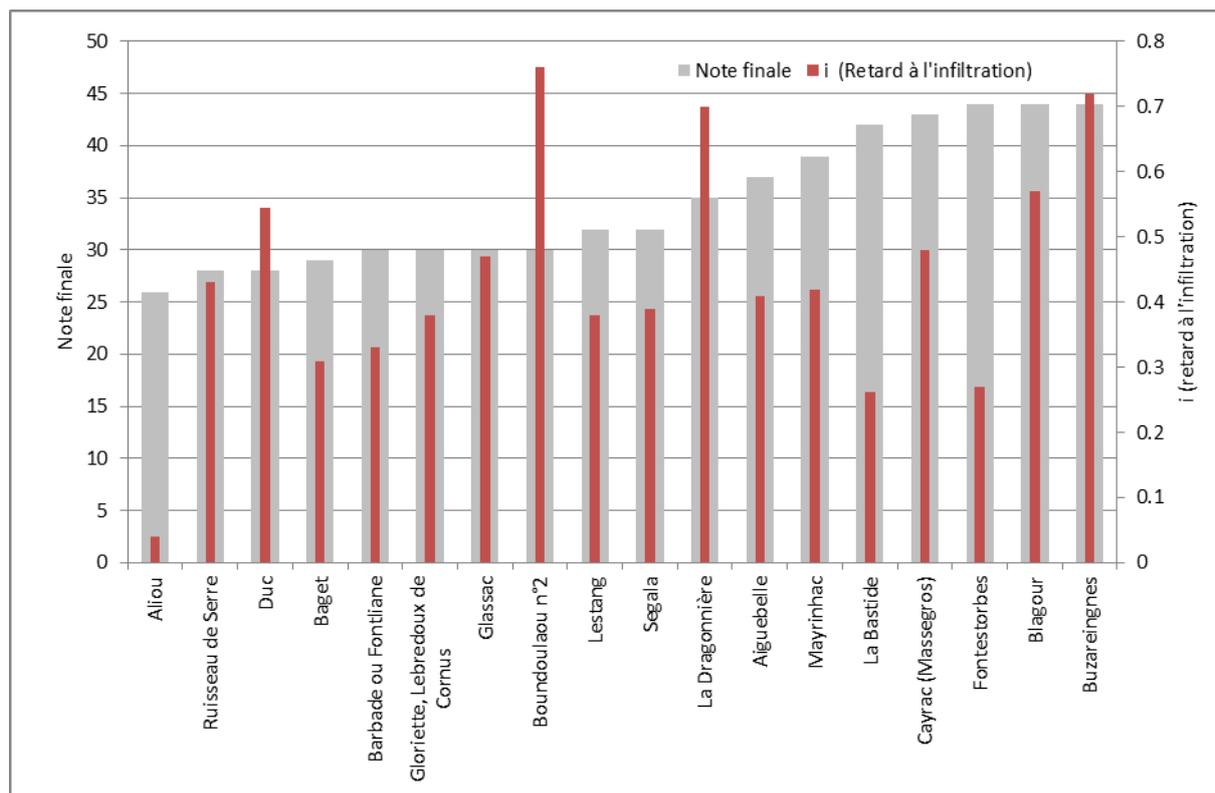


Illustration 155 - Comparaison du niveau de sensibilité à la sécheresse de 18 des sources étudiées avec les valeurs du retard à l'infiltration.

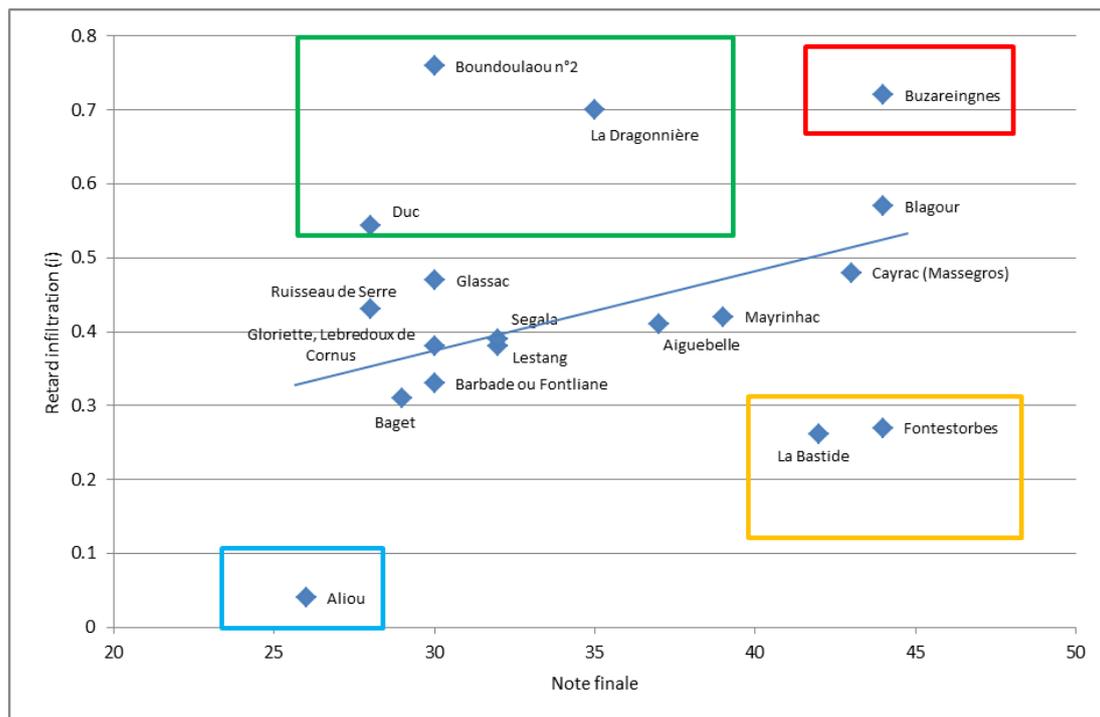


Illustration 156 - Corrélation de la sensibilité à la sécheresse de 18 des sources étudiées avec le retard à l'infiltration.

Autre source particulière, l'exurgence de La Bastide caractérisée par une bonne résistance à la sécheresse associée à un faible retard à l'infiltration, synonyme d'un transit rapide des eaux vers la zone noyée et donc d'une karstification bien développée. Ce système présente également un fort pouvoir régulateur, proche de 1, indiquant un comportement assimilable à celui d'un aquifère poreux. Ce cas de figure est difficilement explicable. Cette particularité avait également été observée lors de l'étude de 2006 sur le Causse de Sauveterre. Toutefois, l'analyse des débits classés semble indiquer l'existence d'apports extérieurs au système susceptible d'expliquer son comportement particulier.

6.7.4. Classification des systèmes karstiques

Dans le but de comparer les systèmes karstiques en fonction des caractéristiques de leur zone d'infiltration et de leur zone noyée, une classification a été établie par A. Mangin (1975) à partir des résultats des analyses des courbes de récession. Le report des valeurs de pouvoir régulateur (k) et de retard à l'infiltration (i) sur un diagramme a ainsi permis d'établir une comparaison avec des systèmes karstiques de référence en France (Illustration 116).

Les données de ces deux coefficients obtenues pour les 18 sources étudiées sont reportées sur le diagramme de l'illustration 157 afin d'identifier le domaine qui les caractérise.

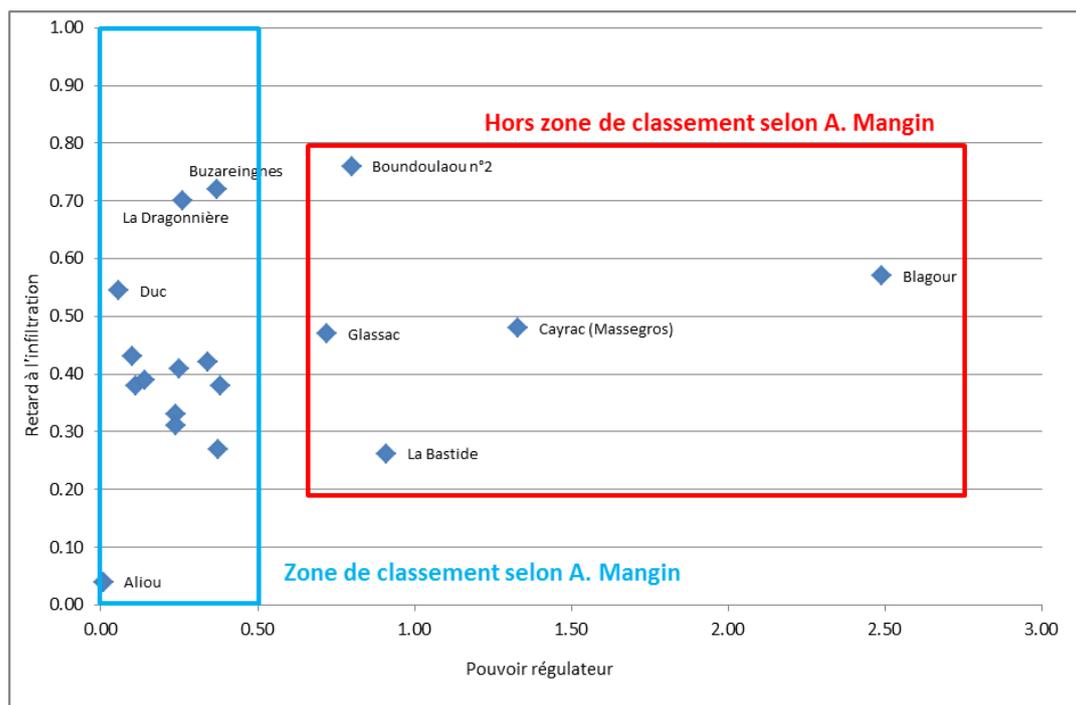


Illustration 157 - Classification des systèmes karstiques des 12 sources étudiées à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975).

Cinq des 18 sources étudiées sortent de la classification des systèmes karstiques établie par A. Mangin en raison d'un pouvoir régulateur particulièrement élevé. Il s'agit des systèmes du Blagour, de Cayrac, de La Bastide, de Glassac et de Boundoulaou détaillés dans les paragraphes ci-dessus qui présentent des comportements de milieu poreux.

L'illustration 158 présente le même diagramme centré sur les sources appartenant aux 4 domaines de classification.

Trois sources appartiennent au **domaine n° 1** correspondant aux systèmes complexes, généralement de grande taille et dont la structure est constituée de nombreux sous-systèmes. Il s'agit des sources de Buzareingnes, de Duc, de la Dragonnière.

Dans le **domaine n° 2**, 9 sources sont représentées et se caractérisent par des systèmes plus karstifiés à l'amont qu'à l'aval et avec des retards dans l'alimentation dus soit à la présence de terrains non karstiques (système binaire) soit à une couverture neigeuse importante. C'est notamment le cas des systèmes de référence de Fontestorbes et du Baget.

Seul le système d'Aliou (système de référence dans la classification) appartient au **domaine n° 3** caractérisant des systèmes possédant un réseau de drainage très développé, avec une zone noyée peu importante.

Aucune des sources étudiées est classée dans le **domaine n° 4**, soit des systèmes possédant un réseau spéléologique bien développé et débouchant à l'aval sur un important karst noyé.

En termes de résistance à la sécheresse, aucune relation n'est retranscrite au travers de la répartition des sources dans les différents domaines. En effet à l'intérieur de chacun des domaines, des sources classées aussi bien comme peu sensibles que très sensibles y sont représentées. Seul le domaine n°3 uniquement concerné par la source d'Aliou semble correspondre à des systèmes susceptibles peu résistants à la sécheresse.

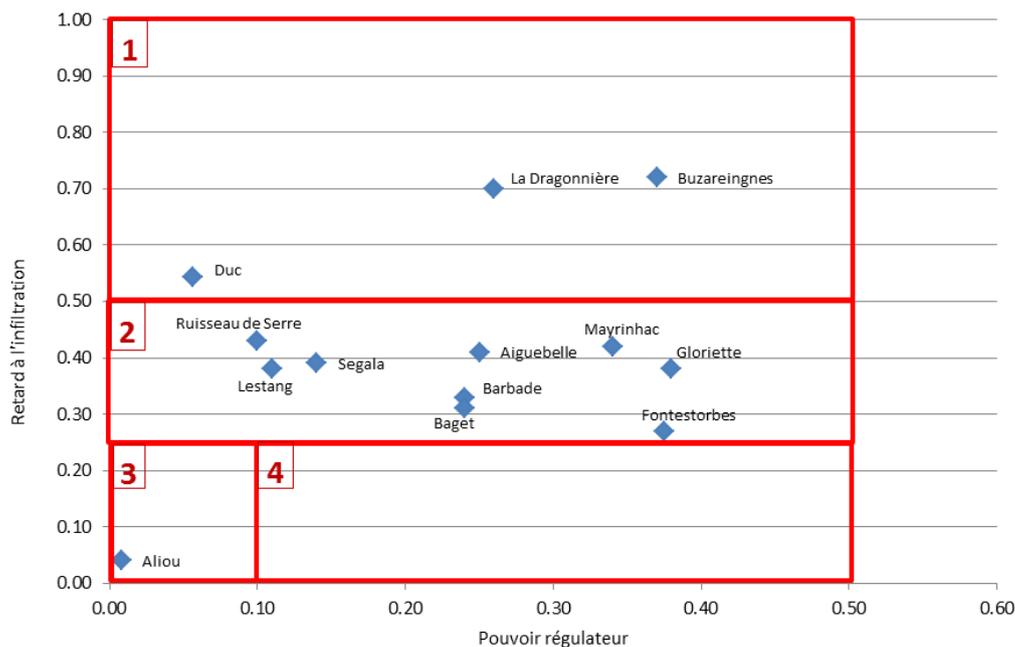


Illustration 158 - Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975) hors sources particulières (3).

6.7.5. Développement du réseau de karstification des bassins hydrologiques des sources

Le développement du réseau de karstification des systèmes karstiques des sources étudiées peut être approché par le rapport Q_{jmax}/Q_{jmin} rapporté à la superficie du bassin hydrologique, ce rapport étant également un indicateur d'une certaine régulation.

Ce paramètre lorsqu'il est élevé devrait indiquer un écoulement associé à une forte composante rapide, et dont la sensibilité à la sécheresse en toute théorie devrait être plus prononcée. Les résultats comparatifs sont indiqués sur l'illustration 159.

Les valeurs les plus fortes concernent essentiellement les sources les plus sensibles à la sécheresse, c'est le cas notamment du système d'Aliou (chaînon pyrénéen) ou de la source du ruisseau de Serre (Causse de Sauveterre), les aquifères les plus résistants à la sécheresse ayant un développement du réseau de karstification bien plus faible en comparaison avec la surface de leur bassin hydrologique.

Ce paramètre semble donc être un bon indicateur de la sensibilité à la sécheresse. Afin de consolider ce résultat il est proposé de corréler ce degré de karstification de l'aquifère karstique à la contribution de la composante rapide à l'écoulement total. Au plus cette contribution est importante au moins l'aquifère sera résistant à la sécheresse.

La corrélation a été réalisée pour une composante rapide en année sèche (Illustration 160). Toutefois, aucune tendance générale ne peut être mise en exergue. Par contre il semble se dégager 3 groupes.

- celui avec un fort développement du réseau de karstification sur les sources les plus sensibles à la sécheresse (en rouge) ;
- celui des fortes (> 25 %) contributions de la composante rapide à l'écoulement (en orange), sans aucune logique particulière ;
- celui des faibles (< 25 %) contributions de la composante rapide à l'écoulement (en vert), qui semble dégager, lorsque le réseau est faiblement développé, une tendance linéaire.

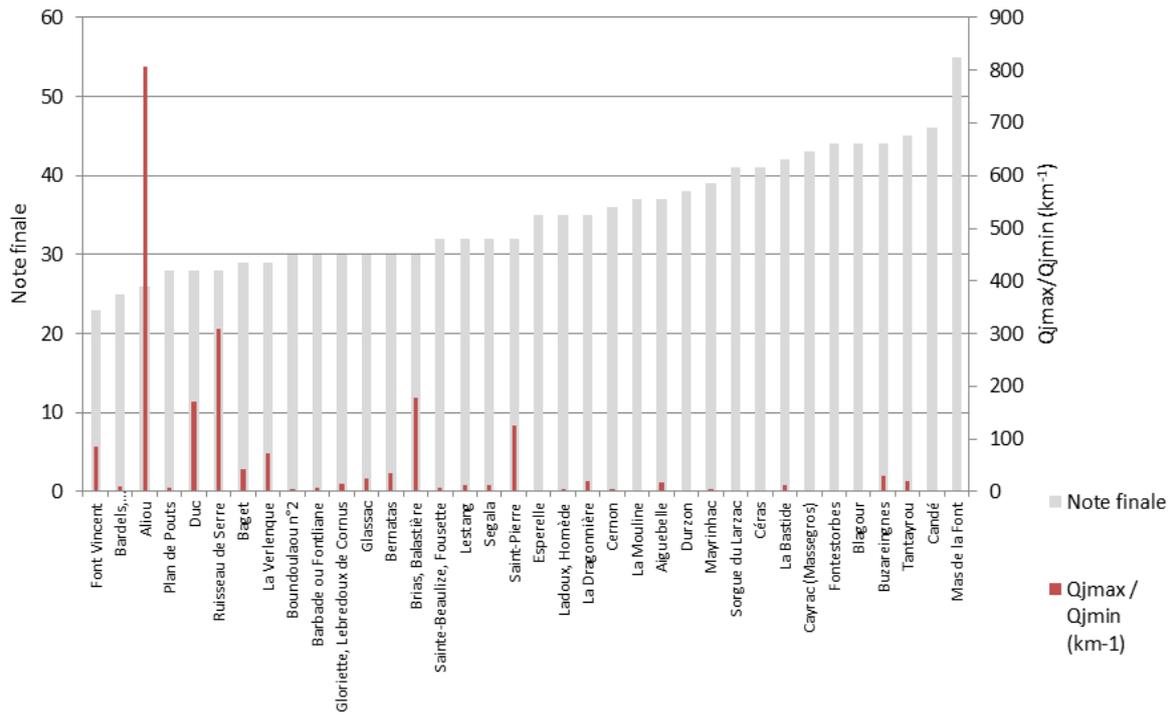


Illustration 159 - Développement du réseau de karstification des bassins hydrologiques des sources.

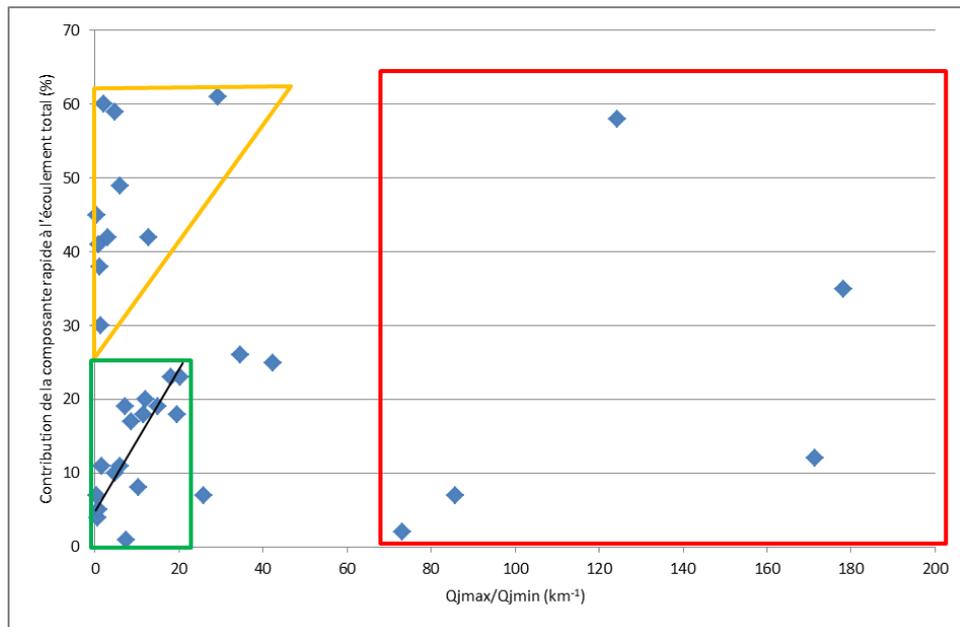


Illustration 160 - Corrélation de l'intensité du développement du réseau karstique avec la composante rapide de l'écoulement total (en année sèche).

7. Mise en place d'un réseau régional de suivi quantitatif spécifique à la problématique sécheresse

Les cartes de résistance à sécheresse établies doivent être interprétées non pas en tant que reflet d'une vulnérabilité ou d'une résistance absolue à la sécheresse mais en tant que construction d'une hiérarchie des aquifères vis-à-vis de leur sensibilité permettant de cibler les zones prioritaires en matière de gestion de la ressource.

La vue statique des nappes qu'elle propose ne doit pas être dissociée d'une interprétation de la dynamique des nappes sous-jacentes. L'indicateur de résistance à la sécheresse traduit en effet la plus ou moins grande inertie des nappes, correspondant à des comportements différents suite à une baisse des niveaux. Ainsi, lors d'une période de baisse des niveaux suivie d'une recharge significative, une nappe dotée d'une faible inertie réagira relativement rapidement alors qu'une nappe à forte inertie ne l'enregistrera que beaucoup plus tard.

Ces éléments donnent lieu d'envisager, selon les nappes, différentes modalités de gestion de crise en tenant compte de l'état de remplissage du réservoir aquifère au moment de l'amorce de la baisse des niveaux. En adjoignant à une vue statique des nappes (leur résistance intrinsèque à la sécheresse) une vue dynamique de la piézométrie des nappes à une date donnée, il ressort une information modulée sur l'état des ressources en eau sur la période considérée.

La mise en place d'un réseau régional spécifique à la problématique sécheresse est donc utilement associée à la cartographie de résistance à la sécheresse des différents aquifères considérés. Les données acquises permettent ainsi aux décideurs régionaux de disposer d'éléments pour une gestion équilibrée et durable des ressources en eau du territoire.

7.1. SURVEILLANCE DES AQUIFÈRES DÉVELOPPÉS EN MILIEUX POREUX

Les différents réseaux de suivi quantitatif des eaux souterraines en région Midi-Pyrénées, tels qu'ils sont actuellement définis sont globalement adaptés pour surveiller les principaux aquifères de milieux poreux (en particulier de systèmes alluviaux) vis-à-vis de la sensibilité à la sécheresse. Ils présentent pour la plupart une longueur de chronique intéressante pour appréhender les événements extrêmes, notamment ceux liés à un déficit d'apport d'eau.

Sur la base de l'analyse des 40 chroniques piézométriques ayant permis d'établir la cartographie de résistance à la sécheresse des 26 entités hydrogéologiques de milieux poreux, 7 d'entre-elles sont considérées de très sensibles à sensibles (hors entités des molasses et des argiles à graviers). Elles concernent pour 5 entités, les alluvions fluviales de basses terrasses mais aussi l'aquifère des calcaires du Jurassique supérieur dans le Lot et celui des sables et grès du Miocène supérieur dans le Gers.

Les 7 ouvrages assurant le suivi quantitatif de ces entités seront préférentiellement intégrés dans le réseau spécifique à la problématique de la sécheresse. Il s'agit des points de surveillance listés dans le tableau de l'illustration 162 et dont la localisation est représentée sur l'illustration 161.

7.2. SURVEILLANCE DES AQUIFÈRES DE DOMAINE DE SOCLE

En début de projet aucune chronique piézométrique était disponible sur les aquifères de socle. 20 points d'eau ont été équipés d'un enregistreur des niveaux d'eau dans le cadre d'ERESSAR pour appréhender le fonctionnement des nappes et leur sensibilité à la sécheresse en se focalisant sur les secteurs dotés d'un potentiel aquifère favorables.

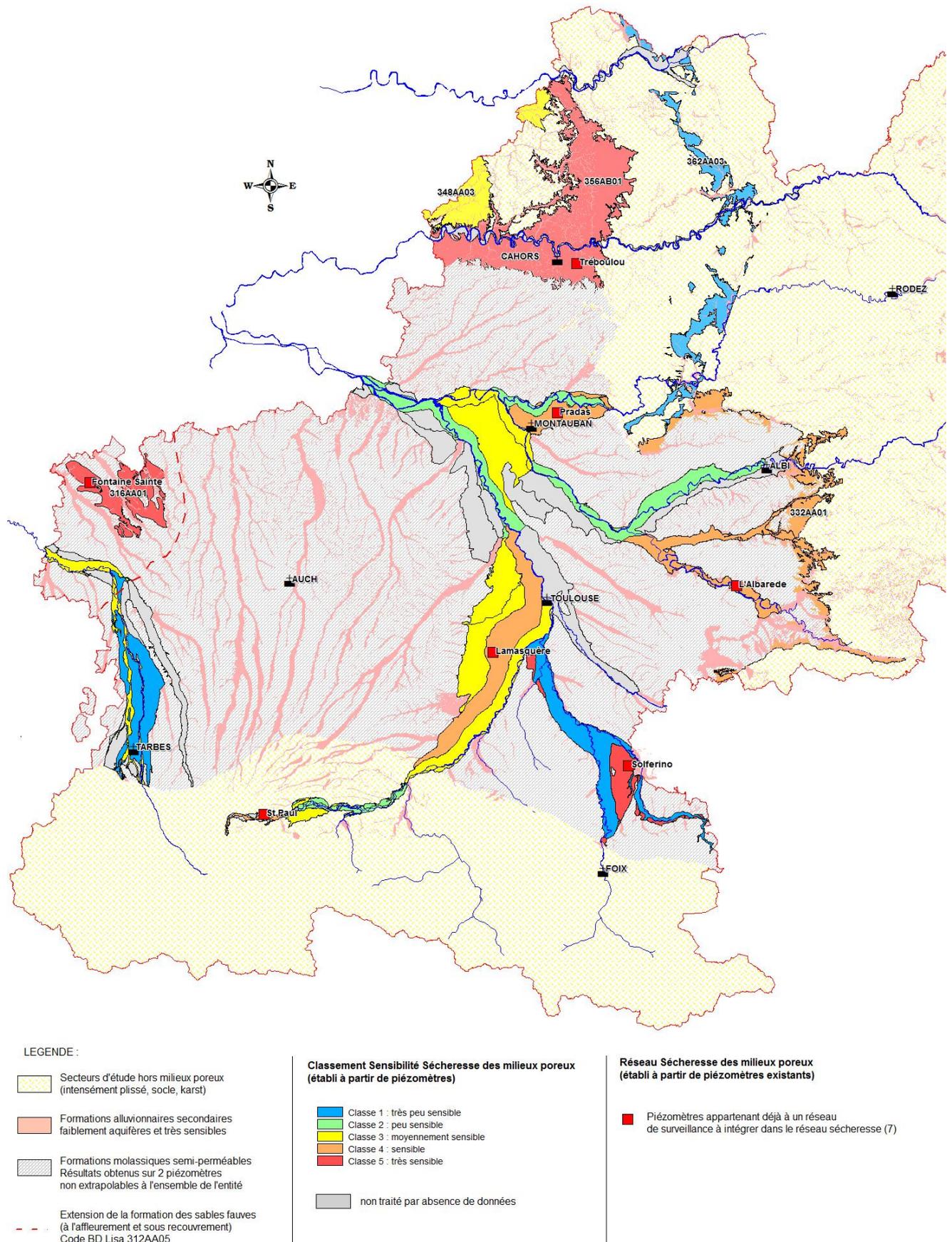


Illustration 161 - Répartition des points du réseau « sécheresse » pour les aquifères poreux.

Indice National	Dénomination	Commune	Date Début Chronique	Code BD LISA NV3	Code Projet ERESSAR (Alluvial)
09311X0093/F	Pradas	SAINT-ETIENNE-DE-TULMONT	23/06/1999	040AF35	TAV2
10092X0166/F	Lamasquere	LAMASQUERE	21/06/1996	040AF35	GM2
10357X0213/F	Solferino	MAZERES	22/12/2003	040AF35	AHV2
09857X0102/F	L'Albarede	L'ALBAREDE	16/05/1995	040AF43	AGD1
10546X0026/F	Saint-Paul	SAINT-PAUL	09/02/2005	040AG67	NE1
09523X0032/F	Fontaine Sainte	ESTANG	12/01/2003	316AA01	Non concerné
08811X0055/F	Treboulou	FLAUJAC-POUJOLS	02/10/2009	356AB01	Non concerné

Illustration 162 - Liste des points d'eau sélectionnés pour le suivi quantitatif des aquifères poreux définis comme sensibles à la sécheresse.

L'équipement de ces points pourra être redirigé selon 2 types de réseau :

- un réseau spécifique à la problématique de la sécheresse des aquifères de socle ;
- un réseau destiné à l'amélioration de la connaissance du fonctionnement des aquifères de socle.

Le suivi sur plusieurs cycles hydrologiques de ces deux réseaux permettra de se doter de chroniques piézométriques représentatives temporellement et spatialement des différents aquifères en présence. En effet, la mise en place d'un réseau spécifique pour les aquifères de domaine de socle est différente des autres types d'entités présentes en Midi-Pyrénées dans le sens où ce réseau de suivi aura une double finalité. Outre son rôle de surveillance des aquifères sensibles aux périodes prolongées de déficit en eau dans une optique de gestion maîtrisée des ressources en eau, il doit également permettre d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydrodynamique de ces aquifères complexes. La longueur des chroniques piézométriques (un cycle hydrologique complet) sur laquelle s'est appuyé le programme ERESSAR est de toute évidence insuffisante pour appréhender le comportement de ces nappes face à des événements extrêmes.

Il est donc proposé de poursuivre l'acquisition de données sur les points disposant d'une chronique piézométriques exploitables et adaptées pour optimiser la caractérisation de la sensibilité à la sécheresse. Il s'agit de **10 piézomètres** parmi les 20 sélectionnés dans le cadre du programme ERESSAR. Ils sont déjà équipés d'un enregistreur et disposent d'une chronique de mesures depuis l'automne 2013 pour la plupart. Leur localisation est indiquée en Illustration 163. À noter l'intérêt de conserver deux piézomètres (n° 24 et 116), situés sur un même secteur (granitoïdes de Mazamet) mais représentatif de l'aquifère composite, le premier concernant les seules altérites, le second recoupant l'intégralité de l'aquifère (altérites et horizon fissuré).

D'autre part et parallèlement, il est fortement recommandé de mettre en place un réseau de surveillance quantitatif dans la seule optique d'améliorer la connaissance de ces aquifères composites, afin de se doter d'une représentativité surfacique acceptable sur le domaine de socle. Il s'agit de :

- 4 piézomètres déjà équipés d'un enregistreur dans le cadre de ERESSAR, mais qui ont des chroniques légèrement perturbées par une exploitation ponctuelle. Ils pourront être mis sous observation sur un cycle hydrologique supplémentaire. Ils disposent également d'une chronique de mesures depuis l'automne 2013 pour la plupart. Une tentative de négociation avec les propriétaires de ces ouvrages pourra être engagée afin d'assurer la pérennité du suivi de ces ouvrages.

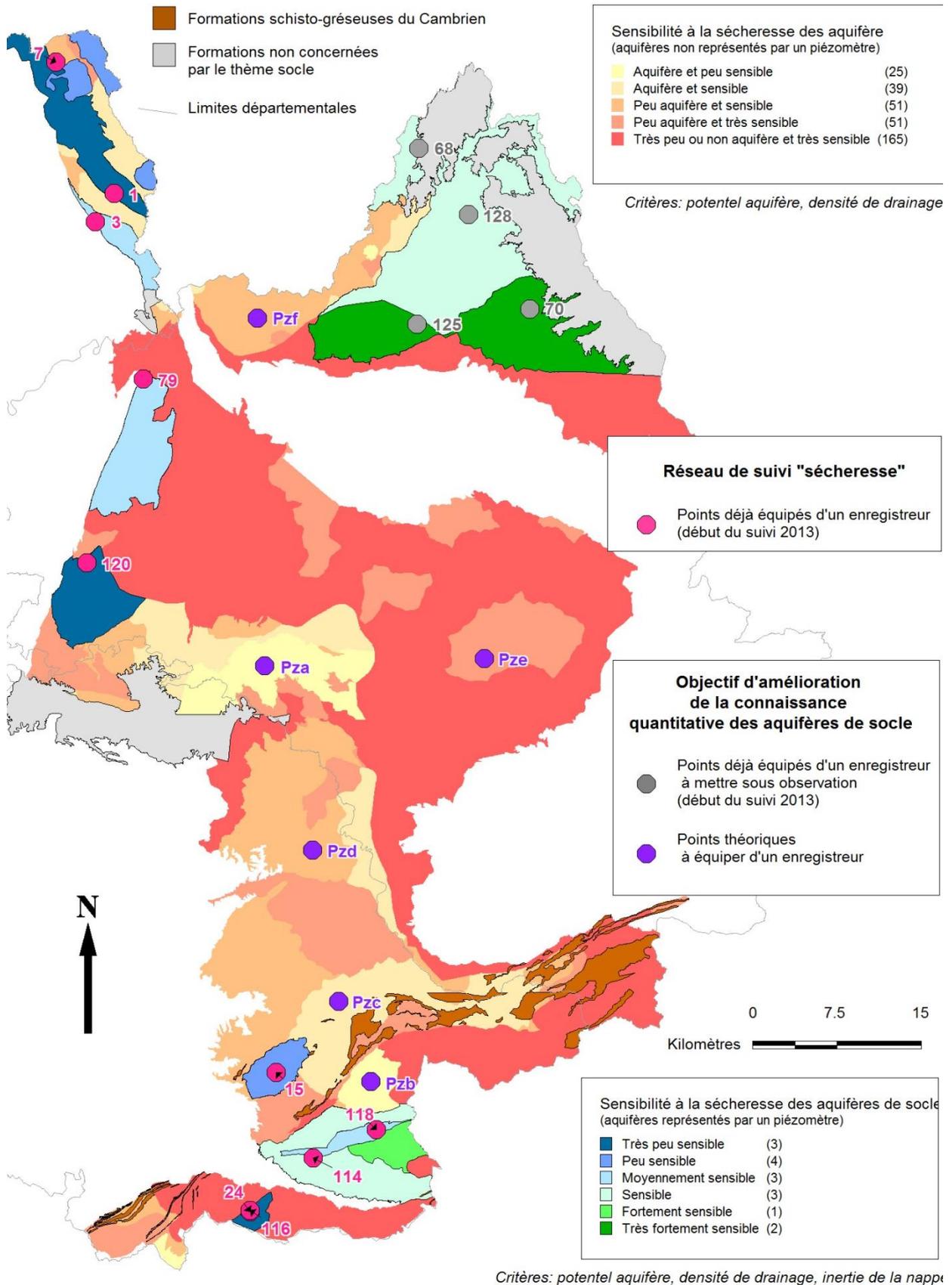


Illustration 163 - Répartition des points du réseau « sécheresse » pour les aquifères de socle.

- 6 nouveaux piézomètres afin de compléter le réseau de surveillance sur les secteurs en étant totalement dépourvu, ou dont le potentiel aquifère est considéré comme moins favorable. Ils sont notés de Pza à Pzf. Les 6 derniers enregistreurs installés dans le cadre du programme ERESSAR pourront ainsi être redirigés vers ces points. Le choix de leur localisation (position théorique au sein d'un secteur) est guidé de la façon suivante :
 - Pza se situe dans la partie ouest de l'Aveyron dans un secteur aquifère actuellement dépourvu de toute donnée de suivi, et doté d'un potentiel aquifère très favorable,
 - Pzb et Pzc se situent dans le Tarn à proximité ou dans la zone de la Montagne noire, avec des potentiels aquifères pouvant répondre à des enjeux locaux,
 - Pzd se situe à l'est du Tarn dans la grande unité des schistes et micaschistes considérée comme moins aquifère. Cette vaste zone de près de 1 000 km² ne fait l'objet d'aucun suivi et est relativement mal connue,
 - Pze est situé au centre de l'Aveyron dans un secteur considéré avec un potentiel aquifère « défavorable ». Il est pourtant le siège de nombreuses sources exploitées incitant à revoir plus précisément le classement de ce secteur. Le positionnement de ce piézomètre permettra de mieux appréhender le potentiel aquifère de ce secteur mais aussi, à terme, sa sensibilité à la sécheresse,
 - Pzf est situé dans des schistes et micaschistes qui font l'objet d'aucun suivi et dans un secteur fortement méconnu.

7.3. SURVEILLANCE DES AQUIFÈRES KARSTIQUES

Les principales entités karstiques de Midi-Pyrénées font l'objet d'un suivi quantitatif relativement dense mais principalement localisé dans la partie nord de la région (Causse du Quercy, Grands Causses) avec en particulier les 32 sources surveillées dans le cadre du réseau du Parc Régional des Grands Causses sur les 54 appartenant à un réseau de suivi en Midi-Pyrénées. La plupart de ces sources présentent des longueurs de chroniques intéressantes pour appréhender les événements extrêmes, notamment ceux liés à un déficit d'apport d'eau.

Sur la base de l'analyse des 34 chroniques de débits ayant permis d'établir la cartographie de résistance à la sécheresse du secteur nord de la région (Causse du Quercy et Grands Causses), 17 systèmes karstiques sont considérées de très sensibles à sensibles, voire extrêmement sensible pour deux d'entre eux.

Les bassins d'alimentation non traités concernent des sources actuellement dépourvues de longues chroniques de débits et/ou celles dont les courbes de tarage n'ont pas encore été construites (seules les hauteurs d'eau sont présentes dans la Banque Hydro). Ces cas de figure concernent majoritairement les sources situées dans le Causse du Quercy.

Le choix des points à intégrer dans le réseau spécifique à la problématique de la sécheresse concerne les 17 systèmes considérés comme peu résistants à des déficits prononcés d'apports d'eau. Ainsi, les deux systèmes désignés comme extrêmement sensibles d'après les critères considérés seront préférentiellement intégrés. Il s'agit des systèmes de la source des Bardels (Muret-le-Château, 12) et de celui de la source de Font Vincent dans le Causse de Montgesty (46).

Pour les autres systèmes, les sources présentant les plus grandes superficies de bassin d'alimentation et celles pour lesquelles les études menées ont permis de bien caractériser le fonctionnement de l'aquifère karstique ont été privilégiées, sachant qu'une représentativité d'entités hydrogéologiques BD LISA NV3 a également été recherchée.

Sur les 6 sources étudiées dans le massif des Pyrénées, seul le système de la source de Fontestorbes (10766X0089/HY) est évaluée comme peu sensible à la sécheresse. Les 5 autres systèmes sont définis comme très sensibles à extrêmement sensibles pour deux d'entre eux. Les systèmes de Maourou et de Bernatas ne seront pas intégrés au réseau sécheresse en raison de la petite taille de leur bassin d'alimentation.

La liste des 11 points de surveillance (8 sources pour la partie nord de la région et 3 pour le secteur pyrénéen) ainsi déterminés est inscrite dans le tableau de l'illustration 164 et leur localisation est représentée sur les Illustrations 165 et 166.

Indice National	Dénomination	Commune	Date Début Chronique	Code BD LISA NV3
08567X0028/HY	Font Vincent	SAINT-MEDARD	03/07/2004	352AA01
08605X0007/HY	Les Bardels	MURET-LE-CHATEAU	02/05/1998	358AI11
08852X0006/HY	Lestang	SAINT-SATURNIN-DE-LENNE	07/10/1998	358AI02
09098X0081/HY	L'Esperelle	ROQUE-SAINTE-MARGUERITE(LA)	07/11/1998	358AI10
09352X0048/HY	Boundoulaou	CREISSELS	23/12/1998	358AI10
09097X0037/HY	Barbade	AGUESSAC	22/12/1999	362AC01
09355X0014/HY	La Dragonnière	SAINT-AFFRIQUE	25/02/2002	362AC21
09092X0002/HY	Saint-Pierre	VERRIERES	08/06/2001	364AC01
10734X0011/HY	Aliou	CAZAVET	10/04/1969	402AA03
10734X0010/HY	Baget	BALAGUERES	25/04/1968	402AA05
10722X0015/HY	Plan de Pouts	GENEREST	02/09/1999	402AE04

Illustration 164 - Liste des points d'eau sélectionnés pour le suivi quantitatif des aquifères karstiques définis comme sensibles à la sécheresse.

LEGENDE :

- Secteur d'étude hors milieux karstiques (intensément plissé, socle, poreux)
- Formations carbonatées non différenciées
Secteurs Causse du Quercy / Grands Causses

Classement Sensibilité Sécheresse des aquifères karstiques
(établi à partir des chroniques de débits de sources appartenant à des réseaux de surveillance)

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Classe 1 : très peu sensible Classe 2 : peu sensible Classe 3 : moyennement sensible Classe 4 : sensible | <ul style="list-style-type: none"> Classe 5 : très sensible Classe 6 : extrêmement sensible non traité par absence de données exploitables |
|---|---|

Réseau Sécheresse des systèmes karstiques
(établi à partir des sources existantes)

- Sources karstiques appartenant déjà à un réseau de surveillance à intégrer dans le réseau sécheresse (8)

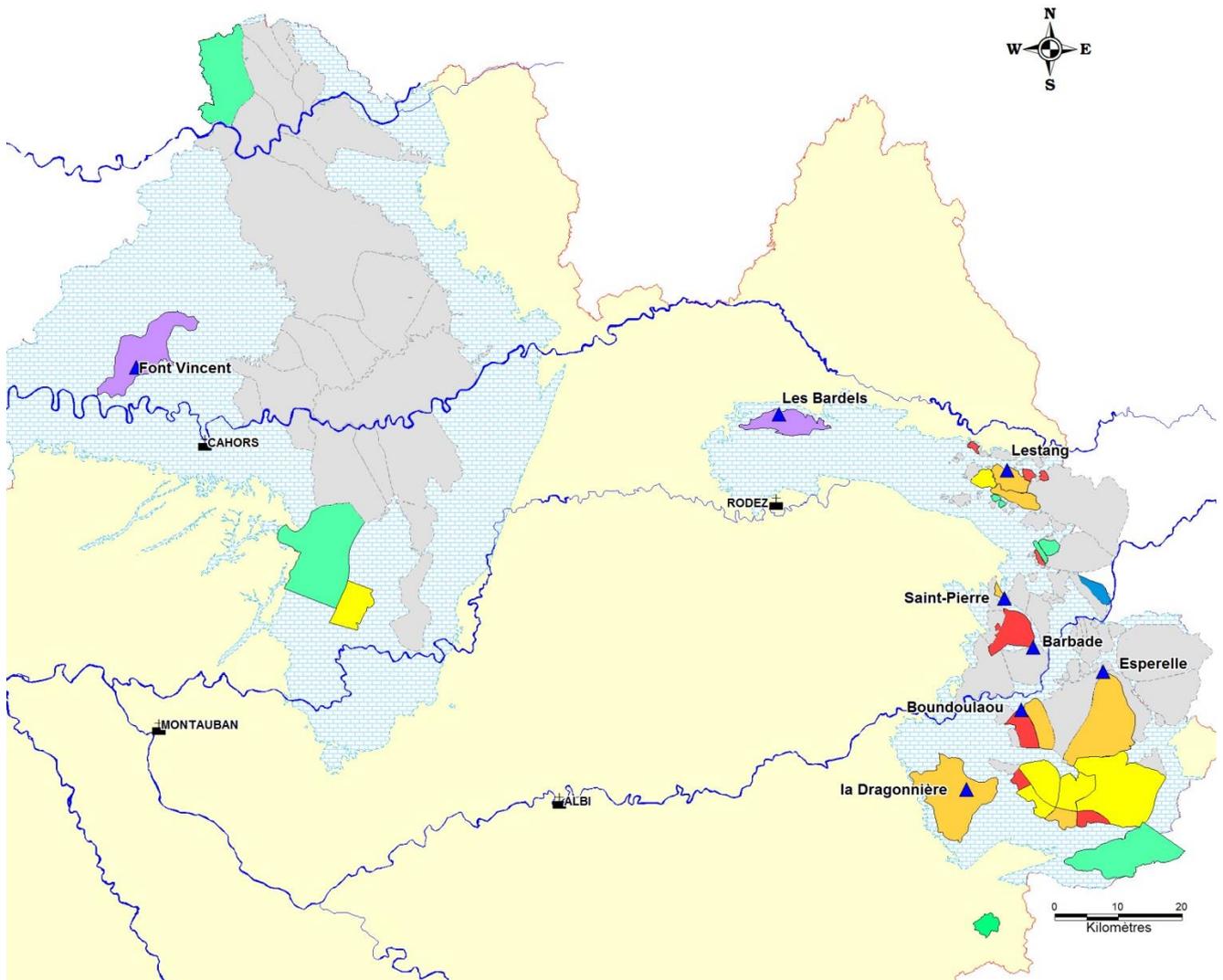


Illustration 165 - Répartition des points du réseau « sécheresse » pour les aquifères karstiques dans la partie nord de la région Midi-Pyrénées.

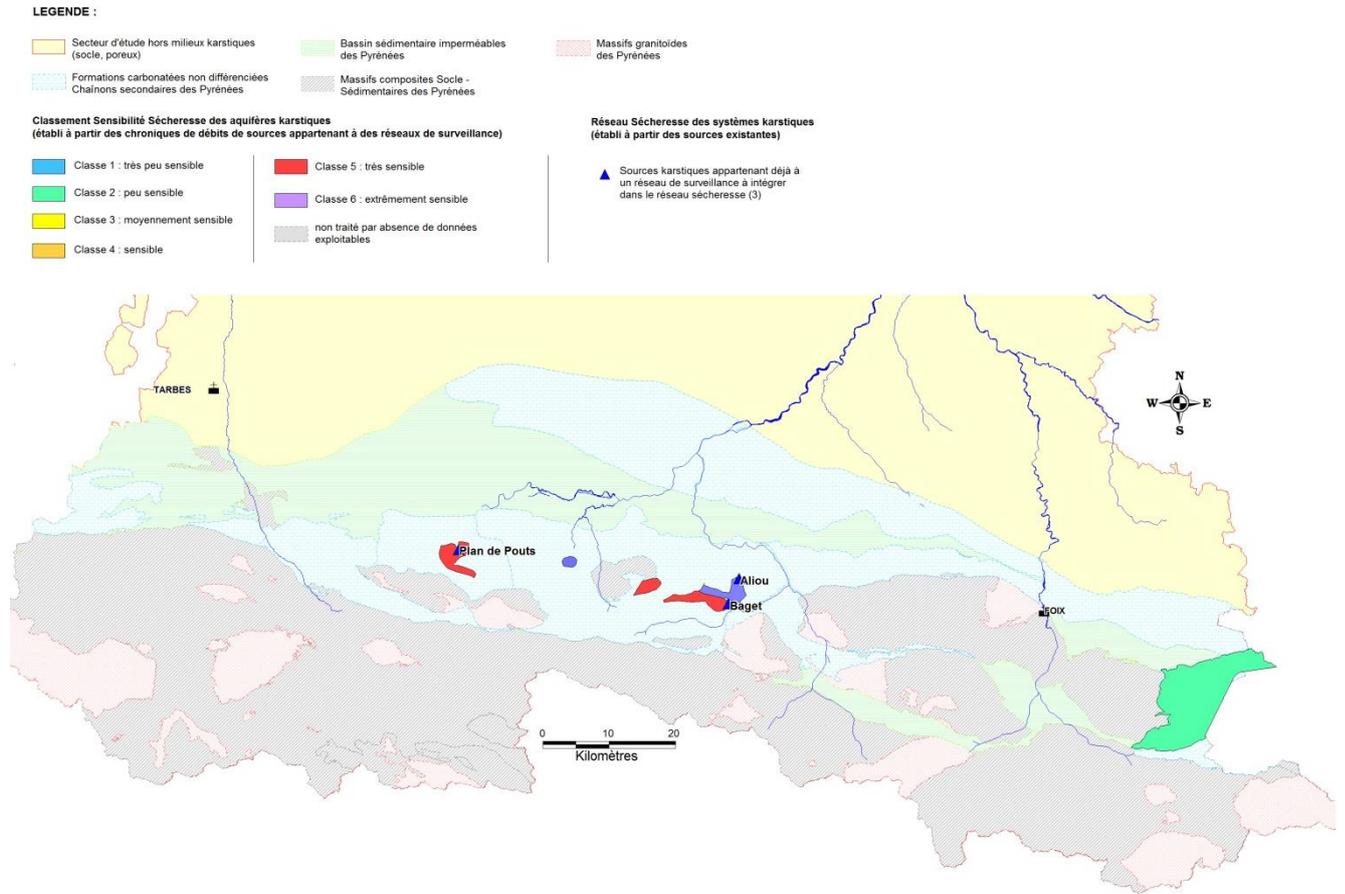


Illustration 166 - Répartition des points du réseau « sécheresse » pour les aquifères karstiques dans le secteur du massif des Pyrénées.

8. Conclusions

L'étude de la sensibilité à la sécheresse des principaux aquifères de la région Midi-Pyrénées a été mise en œuvre pour doter les décideurs d'un premier outil d'aide à la décision indispensable pour une gestion globale et durable des ressources en eau. Elle a été motivée par la prise de conscience de l'impact des périodes de sécheresse prononcées sur le territoire national et régional, aussi bien sur le plan économique que social.

Si généralement le terme de sécheresse est souvent traduit comme sécheresse atmosphérique (déficit pluviométrique), pédologique (stress hydrique des cultures ressenti par le monde agricole), ou hydrologique (car visuel vis-à-vis des écosystèmes et indicateur privilégié pour la mise en place de contraintes réglementaires), ce terme est moins souvent ressenti comme tel vis-à-vis des eaux souterraines, et notamment pour la capacité des aquifères à résister à ce type d'évènement extrême. Pourtant le rôle des eaux souterraines est primordial vis-à-vis du soutien des débits des cours d'eau et des écosystèmes qui y sont associés, mais aussi pour des aspects économiques dans le domaine de l'agriculture et bien évidemment pour l'alimentation en eau potable des populations.

Le programme ERESSAR s'attache exclusivement à caractériser le terme de sécheresse hydrogéologique, c'est-à-dire celui qui est susceptible d'affecter la dynamique des nappes. L'évaluation de la sensibilité à la sécheresse des principaux aquifères à nappe libre de la région est abordée par la mise en place d'approches spécifiques en fonction du type de réservoir concerné (aquifères développés en milieu poreux, fissurés ou karstifiés et en domaine de socle). Ces approches ont été réalisées à partir des chroniques piézométriques et/ou de débits des points d'eau appartenant aux différents réseaux de suivi quantitatif existants en Midi-Pyrénées. Toutefois, dans le cadre des aquifères développés en domaine de socle, les importantes lacunes de données mises en évidence ont nécessité l'installation d'enregistreurs de niveaux d'eau sur 20 nouveaux points de suivi (forages et puits) répartis dans les 3 départements concernés par les formations de socle du Massif central (Lot, Aveyron et Tarn).

Dans le cas des **aquifères développés en milieu poreux**, l'évaluation de la résistance à la sécheresse a été faite à partir de 5 critères :

- le temps de demi-décroissance des niveaux d'eau ;
- la ressource en eau souterraine renouvelable moyenne ;
- la capacité régulatrice de l'aquifère par rapport au niveau de base ;
- la superficie du système aquifère ;
- la caractéristique intrinsèque d'un sol à l'infiltration ou au ruissellement.

Ce travail a été mené à partir des chroniques d'évolution des niveaux d'eau enregistrées sur les 40 piézomètres appartenant aux différents réseaux de suivi quantitatif de Midi-Pyrénées. Ces données concernent 7 entités hydrogéologiques BD LISA de niveau 3 (version V0) et 7 autres entités complémentaires alluviales.

S'agissant de la version V0 de la BD LISA, les contours des entités alluviales complémentaires se sont révélés inadaptés à la représentation des résultats obtenus pour les différents piézomètres implantés dans les systèmes alluviaux. De fait, un nouveau découpage des formations alluviales a été élaboré en fonction des différents niveaux de terrasses identifiés dans les 14 principales plaines alluviales de la région. Ainsi, 30 entités alluvionnaires d'intérêt hydrogéologique ont été distinguées.

Le suivi quantitatif des aquifères alluviaux est particulièrement fourni en Midi-Pyrénées mais reste cependant hétérogène en termes de densité de points d'observation en fonction des différentes terrasses alluviales. Ainsi, sur les 30 secteurs définis, 19 sont représentés par 1 à 4 piézomètres et 11 ne font l'objet d'aucun suivi. Ces derniers n'ont donc pas pu faire l'objet d'une analyse de l'inertie de la nappe et n'ont donc pas été traités dans le cadre d'ERESSAR.

Les aquifères poreux (hors d'alluvions) faisant l'objet d'un suivi quantitatif sont au nombre de 7. La densité de points d'observation est très faible au regard des vastes superficies qu'ils concernent (1 à 2 points par entité). De plus au regard de l'hétérogénéité de ces aquifères, et de leur méconnaissance globale, les piézomètres installés ne peuvent être considérés comme représentatifs que très localement.

Sur la base d'une analyse multicritère classique, un indicateur de résistance à la sécheresse a été calculé et cartographié d'une part, pour les 19 entités alluviales et d'autre part, pour les 7 autres entités sédimentaires disposant de points de surveillance. Dans le système de notation établi, divisé en 5 classes (de très peu sensible à très sensible), 8 entités sont considérées de très sensibles à sensibles. Elles concernent pour 5 d'entre-elles les alluvions fluviales de basses terrasses (en particulier celle du système Ariège-Hers Vif) mais aussi l'aquifère calcaires du Jurassique supérieur dans le Lot, celui des sables et grès du Miocène supérieur dans le Gers et celui des argiles à graviers principalement développé dans le Tarn.

Dans le cas des **aquifères de socle**, la quasi absence de données, le fort compartimentage de ce type d'aquifères, et la faible quantité de points de suivi n'ont pas permis d'élaborer une méthodologie de quantification uniforme sur l'ensemble du domaine de socle. Deux traitements ont été nécessaires :

- pour les aquifères représentés par un piézomètre disposant d'une chronique de données exploitable ;
- pour les aquifères dépourvus de chroniques piézométriques (chronique absente ou non exploitable).

Les critères retenus pour caractériser la résistance à la sécheresse des aquifères de socle sont les suivants :

- les classes de potentiel aquifère reprises du programme POTAMAC, considéré ici comme la capacité de l'aquifère à avoir une réserve importante ;
- la densité de drainage de l'entité caractérisant ici le compartimentage de l'aquifère ;
- l'inertie de la nappe, qui caractérise sensu stricto sa résistance à la sécheresse.

Ce dernier critère, seulement évalué sur les secteurs représentés par un piézomètre, concerne au total 5 paramètres, à savoir le temps de demi-décroissance (calculé par la loi de Maillet), le maintien de l'effet de la pluie sur les niveaux et le pic de réaction aux pluies (issus de l'analyse des corrélogrammes croisés pluie efficace-niveau piézométrique), l'effet mémoire de l'aquifère (caractérisé à partir des auto-corrélogrammes), et le pouvoir régulateur (calculé à partir des éléments de la loi de Maillet).

Toujours sur la base d'une analyse multicritère, un indicateur de résistance à la sécheresse des aquifères de socle a été calculé et cartographié d'une part, pour les aquifères représentés par un piézomètre et d'autre part, pour ceux dépourvus de chroniques piézométriques.

Dans le système de notation établi pour les systèmes pourvus de points de surveillance, divisé en 6 classes (de très peu sensible à très fortement sensible), seulement 7 entités sont considérées comme très peu ou peu sensibles à la sécheresse. Ils concernent exclusivement des granitoïdes (granites, granodiorite), à savoir ceux du Sidobre et de

Mazamet (dans le Tarn), ceux de Latronquière, de Calviac et de Glénat (dans le Lot) et ceux de Villefranche-de-Rouergue (dans l'Aveyron).

La résistance à la sécheresse des **aquifères karstiques** est plus délicate à évaluer que celle des aquifères de milieux poreux en raison de leurs caractéristiques structurales propres conditionnant la dynamique des écoulements, en particulier le degré de karstification. L'approche entreprise pour ce type d'aquifère implique d'effectuer des traitements du signal correspondant aux chroniques de débits de 38 sources suivies, permettant ainsi de calculer la fonction de transfert du système aquifère et d'analyser sa dynamique.

Afin de guider et d'améliorer ces modélisations, réalisées à partir du logiciel TEMPO, un important travail de synthèse des connaissances existantes a été mis en œuvre, permettant d'élaborer des fiches descriptives (contexte géologique et hydrogéologique) pour chaque source étudiée. Ainsi, 38 fiches ont été rédigées pour les besoins du projet.

Le suivi quantitatif des aquifères karstiques est hétérogène en termes de densité de points d'observation en raisonnant à l'échelle des entités de la BD LISA. Ainsi, les 38 sources disposant d'une chronique de débits exploitable concernent seulement 17 entités de niveau 3. Entre 1 et 9 sources peuvent représenter une entité, ce qui rend impossible de mener une approche cohérente à l'échelle des entités BD LISA de niveau 3 au regard des caractéristiques contrastées de chacune des sources et de la diversité de leur bassin hydrologique. D'autre part, la densité surfacique des bassins des sources faisant l'objet d'un suivi est, dans la majorité des cas, sensiblement inférieure à 20 %. Dans ces conditions, il a été retenu une approche à l'échelle des bassins hydrologiques des sources traitées sans extrapolation à l'échelle de l'entité BD LISA dans laquelle elles s'inscrivent.

L'analyse fine des chroniques de débits des sources établie sous la forme de fiches descriptives permet de caractériser un grand nombre de paramètres susceptibles de mieux appréhender le fonctionnement complexe de la nappe mais aussi d'estimer la sensibilité à la sécheresse de l'aquifère. Une vingtaine de paramètres différents a été évaluée mais n'ont pas pu l'être pour toutes les sources. Afin de permettre une étude comparative pour la totalité des 38 sources, les paramètres jugés d'intérêt vis-à-vis de la résistance des aquifères à la sécheresse et renseignés pour la totalité des sources ont été sélectionnés.

Les critères retenus pour caractériser la résistance à la sécheresse des aquifères karstiques sont les suivants :

- la superficie du bassin d'alimentation des sources étudiées ;
- l'index de résistance à la sécheresse des aquifères karstiques (IRSAK) ;
- le maintien de l'effet des pluies efficaces sur le débit des sources ;
- la durée de l'influence de la composante lente sur le débit total ;
- la contribution en pourcentage de la composante lente au débit total pour une année sèche ;
- le rapport des volumes de la composante lente au débit total entre une année sèche et une année humide.

Sur la base d'une analyse multicritère, un indicateur de résistance à la sécheresse a été calculé et cartographié pour les 38 systèmes karstiques disposant de sources suivies sur une période suffisamment longue pour faire l'objet d'une analyse du signal. Six classes de sensibilité à la sécheresse des aquifères karstiques ont ainsi été définies, variant entre des aquifères très peu sensibles à des aquifères extrêmement sensibles.

Dans la partie nord de la région (Causse du Quercy, Grands Causses et Mont de Lacaune), 17 systèmes apparaissent comme très sensibles à la sécheresse sur les 38 étudiés, voire extrêmement sensible pour deux d'entre eux. Il s'agit des systèmes karstiques de la source des Bardels (Muret-le-Château, 12) et à celui de la source de Font Vincent dans le Causse de Montgesty (46). Inversement 8 systèmes apparaissent comme peu sensibles à la sécheresse dont un très peu sensible, celui de la résurgence du Mas-de-Font située dans le Causse de Sauveterre.

Sur les 6 sources étudiées dans le massif des Pyrénées, seul le système de la source de Fontestorbes (10766X0089/HY) est évaluée comme peu sensible à la sécheresse. Les 5 autres systèmes sont définis comme très sensibles à extrêmement sensibles pour deux d'entre eux.

Ces différents indicateurs ont dû être adaptés, en termes de représentativité et de pondération notamment, aux caractéristiques propres de chaque type d'aquifère, mais aussi à leur niveau de connaissance et à la disponibilité des données les concernant. Ainsi, si les cartes de sensibilité à la sécheresse pour les différents types d'aquifères ont pu être établies indépendamment (alluvial, poreux hors alluvions, karstique, ou de socle), leur comparaison entre elle n'est sans doute pas réaliste à l'échelle de la région.

Les cartographies ainsi élaborées doivent être interprétées non pas en tant que reflet d'une vulnérabilité ou d'une résistance absolue à la sécheresse mais en tant que construction d'une hiérarchie des aquifères vis-à-vis de leur sensibilité permettant de cibler les zones prioritaires en matière de gestion de la ressource. La vue statique des nappes qu'elle propose ne doit pas être dissociée d'une interprétation de la dynamique des nappes sous-jacentes. L'indicateur de résistance à la sécheresse traduit en effet la plus ou moins grande inertie des nappes, correspondant à des comportements différents suite à une baisse des niveaux.

Ces éléments donnent lieu d'envisager, selon les nappes, différentes modalités de gestion de crise en tenant compte de l'état de remplissage du réservoir aquifère au moment de l'amorce de la baisse des niveaux. En adjoignant à une vue statique des nappes (leur résistance intrinsèque à la sécheresse) une vue dynamique de la piézométrie des nappes à une date donnée, il ressort une information modulée sur l'état des ressources en eau sur la période considérée.

La mise en place d'un réseau régional spécifique à la problématique sécheresse est donc utilement associée à la cartographie de résistance à la sécheresse des différents aquifères considérés. Ainsi, 7 ouvrages représentatifs des aquifères développés en milieux poreux et 11 sources caractérisant des systèmes karstiques définis comme sensible à des périodes prolongées de déficit en eau ont été sélectionnés pour être intégrés au réseau sécheresse.

Concernant les aquifères de socle, l'approche proposée est différente des deux autres catégories d'aquifères étudiés dans le sens où il a été nécessaire d'acquérir des nouvelles données dans le cadre du projet. Ainsi, un suivi ayant deux objectifs distincts est proposé pour caractériser les aquifères de socle. Il s'agit de poursuivre l'acquisition de données sur 10 ouvrages disposant d'une chronique piézométriques exploitables avec pour objectif d'optimiser la caractérisation de la sensibilité à la sécheresse. En complément, il est fortement recommandé d'améliorer la connaissance du fonctionnement de ces aquifères composites par le suivi de 6 nouveaux ouvrages dans des secteurs actuellement dépourvus de toutes données.

En effet, la caractérisation de la sensibilité à la sécheresse nécessite, non seulement une bonne connaissance du fonctionnement hydrogéologique des aquifères et notamment une quantification de leur réserve à une échelle locale, mais aussi la disponibilité de chroniques de données suffisamment longues (piézométrie, débit des sources) à un pas de temps fin (jour). Certains secteurs, comme le domaine de socle, ou certains bassins hydrologiques de sources karstiques en sont actuellement dépourvus, ne permettant pas d'aborder cette thématique.

La mise en place d'un réseau spécifique à la sécheresse sur la région Midi-Pyrénées, liée à des actions d'amélioration des connaissances ciblées sur les zones le nécessitant devrait permettre à terme de mieux guider les décideurs sur une gestion anticipative vis-à-vis des événements extrêmes : occurrence d'une sécheresse, mais aussi à plus long terme sur les effets du changement climatique.

9. Bibliographie

Astruc J.G., Bakalowicz M., Biscaldi R., Mangin A. (1988) - Étude des possibilités de surexploitation des aquifères karstiques de Midi-Pyrénées. Rapport BRGM / 88 SGN 781 MPY.

Astruc J.G., Mangin A., Soule J.C. (1991) - Étude des possibilités d'amélioration de l'exploitation des aquifères karstiques – Phase 1 : Diagnostics.

Bardeau M., Belgodere C. (2009) - Actualisation de la synthèse hydrogéologique du département du Lot - Rapport BRGM RP-57678-FR.

Berard P. (1987) - Protection des captages AEP situés en terrains calcaires. Causes majeurs de la Lozère. 87 SNG 163 LRO.

BRGM Département EAU. (1998) - Séminaire national (novembre 1996). Pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique. Rapport BRGM R40126.

Collin J.J., Genna A., Margat J., Landreau A. (1994) - Cartographie de la résistance à la sécheresse des principaux systèmes aquifères régionaux à nappe libre. Rapport BRGM R37734.

Danneville L., Ricard J. (1997) - État des lieux et programme d'actions sur les karsts de Midi-Pyrénées. Rapport BRGM/R39413.

Dodge E.D. (1983) - Hydrogéologie des aquifères karstiques du Causse Comtal - Publication de synthèse, Thèse.

Dörfli N. (2010) - Guide méthodologique. Les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource. Rapport BRGM/RP-58237-FR.

Fabre J.P. (1983) - Étude hydrogéologique de la partie sud-ouest du Causse de Martel, Thèse.

Grunberger O. (1985) - Étude du système karstique du Goueil di Her à l'aide des chroniques de pluies et des débits. Emploi des méthodes corrélatoires et spectrales.

Horoi V. (2001) - Étude comparative entre le Massif d'Obarsia Closani - Piatra Mare (Roumanie) et le Massif d'Arbas (France), Thèse.

Mangin A. (1969) - Étude hydraulique du mécanisme d'intermittence de Fontestorbes, Annales de spéléologie, Tome24-Fascicule 2, 1969.

Mangin A. (1975) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, Thèse.

Mangin A., Ricard J. - Test de pompage en aquifère karstique pour le soutien du débit d'étiage des cours d'eau - Choix des techniques et évaluation des coûts sur deux sites - Gouffres de la Peyrère (09) et de Poudac (65).

Mangin A., Roche J. (1986) - Évaluation des potentiels en eau des karsts situés entre les vallées de la Garonne et de l'Aude. (Rapport établi à partir du mémoire de thèse présenté par C. Salic en novembre 1985). 86 SGN 096 MPY.

- Margat J.** (1994) - Gestion des eaux souterraines. Note technique BRGM/EAU 009/94.
- Marsaud B.** (1997) - Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux, Thèse, Doc BRGM 268, Editions BRGM.
- Monod B.** (2014) - Carte géologique numérique à 1/250 000 de la région Midi-Pyrénées. Notice technique. Rapport BRGM/RP-63650-FR.
- Muet Ph.** (1985) - Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes aquifères karstiques du nord du Causse de Martel (Corrèze), Thèse.
- Muet Ph., Gastereguy S.** (1996) - Autoroute A20 Brive-Montauban - Section Cahors Nord-Souillac « Études hydrogéologiques » - Impact de l'A20 sur la qualité des eaux souterraines. Par naturel régional des Grands Causses, CNRS Moulis, Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Orléans, MS Ingénierie, Université Paul Sabatier Toulouse. (2006). Étude hydrogéologique de la partie ouest du Causse de Sauveterre et de ses avants Causses.
- Puyoô S.** (1976) - Étude hydrogéologique du Massif karstique d'Arbas (Haute-Garonne), Thèse.
- Ricard J., Bakalowicz M.** (1996) - Connaissance, aménagement et protection des ressources en eau du Larzac Septentrional, Aveyron (France), Rap. BRGM R38953.
- Ricard J., Capdeville J.P., Giraud F., Schoen R., Tilloloy F.** (1998) - Développement du réseau de mesures piézométriques et du système d'information pour la gestion des eaux souterraines (SIGES) en Midi-Pyrénées. Rapport BRGM/RR-40062-FR.
- Rouquet L.** (1976) - Contribution à l'étude hydrogéologique de la région médiane des Grands Causses - Gorges du Tarn et de la Jonte - Causse Méjean - Causse de Massegros, Thèse.
- Salic C.** (1985) - Évaluation du potentiel en eau du karst pyrénéen entre les vallées de la Neste et de l'Aude.
- Salvayre H.** (1969) - Contribution à l'étude hydrogéologique de la région méridionale des Grands Causses, Thèse.
- Schoen R., Ricard J.** (2001) - Unités de gestion de la qualité des eaux continentales en région Midi-Pyrénées. Avec la collaboration de Codvelle A. Rapport BRGM/RP-50337-FR.
- Schoen R., Codvelle A.** (2001) - Cartographie de l'aléa pollution des eaux superficielles et souterraines par les substances phytosanitaires en région Midi-Pyrénées. Vulnérabilité des eaux souterraines. Rapport BRGM/RP-51456-FR.
- Seguin J.J., Wuilleumier A.** (2006) - Exploitabilité des ressources en eau souterraine en France. Résistance à la sécheresse des principaux aquifères à nappe libre. Rapport BRGM/RP-55188-FR.
- Thiery D.** (1985) - Pourquoi un modèle réservoir permet-il de simuler correctement le tarissement d'une nappe ou d'une source ? Note technique BRGM n° 85/23.



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

BRGM Midi-Pyrénées

3, rue Marie Curie
Bât. ARUBA / BP 49

31520 – Ramonville-Saint-Agne – France

Tél. : 05 62 24 14 50