



MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE



MINISTÈRE DE
L'ENVIRONNEMENT



AGENCE DE L'EAU
ADOUR-GARONNE

LOT-ET-GARONNE
CONSEIL GÉNÉRAL



Document public

Etude des possibilités de recharge artificielle des nappes alluviales Application à la nappe alluviale de la Garonne en Lot-et-Garonne

Juillet 1996

Rapport BRGM R39030



ASSOCIATION
CLIMATOLOGIQUE
DE LA MOYENNE-GARONNE
et du Sud-Ouest

ACMG



Etude réalisée dans le cadre des
actions de recherche du BRGM
P35 - MEDALUS II - 3 - CEE

BRGM

Direction du Service Géologique National
Service Géologique Régional Aquitaine
Avenue du Dr Albert Schweitzer
33600 - PESSAC - FRANCE
Tél : (33) 57-35-03-50
Direction de la Recherche
Département Hydrologie, Géochimie et Transferts
BP 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX 2 - FRANCE
Tél : (33) 38-64-34-34

Mots clé : recharge artificielle, réalimentation, MEDALUS, modélisation, nappe alluviale, eau souterraine, Lot-et-Garonne

En bibliographie ce rapport sera cité de la façon suivante :

A. DAVID, E. LAPEYRE, F. CHATELLARD, J.F. BERTHOUMIEU, B. SOURISSEAU, J.J. COLLIN (1996) - Etude des possibilités de recharge artificielle des nappes alluviales - Application à la nappe alluviale de la Garonne en Lot-et-Garonne. 34 pages, 18 figures, 12 annexes. BRGM, 1996.

avec la participation de F. BICHOT, J.C. FOUCHER, G. LONGIN et M. L. NOYER.

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

SOMMAIRE

	Pages
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES ANNEXES	
RÉSUMÉ	
INTRODUCTION	1
1. PROGRAMME TECHNIQUE - OBJECTIF	4
2. SÉLECTION D'UN SITE APPROPRIÉ.....	5
2.1. Inventaire des points d'eau et choix du site	5
2.2. Description du site expérimental	8
3. DÉROULEMENT DU PROJET - MÉTHODES ET TECHNIQUES.....	8
3.1. Inventaire des points d'eau.....	10
3.2. Identification géologique (méthode VLF).....	10
3.3. Mise en place de piézomètres et d'enregistreurs de niveaux.....	13
3.4. Essais de pompage - Interprétation.....	16
3.5. Modélisation préliminaire du processus de recharge artificielle.....	18
3.6. Mise en place du dispositif d'alimentation	20
3.7. Suivi piézométrique.....	22
3.8. Analyses d'eau	22
4. MODÉLISATION	23
4.1. Modèle conceptuel.....	26
4.2. Résultats du calage	26
4.3. Simulation - Extrapolation à une recharge intensive.....	33
CONCLUSION	34

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Localisation géographique de la zone d'étude (département du Lot-et-Garonne)
- Figure 2 : Localisation précise de la zone d'étude
- Figure 3 : Localisation du site expérimental
- Figure 4 : Répartition des points d'eau inventoriés
- Figure 5 : Carte de localisation des profils VLF et de la répartition des résistivités
- Figure 6 : Carte de localisation des puits et piézomètres observés sur le site expérimental
- Figure 7 : Epaisseur mesurée des limons
- Figure 8 : Carte de répartition des transmissivités.
- Figure 9 : Coupe schématique de l'installation de pompage
- Figure 10 : Evolution cumulée de la quantité d'eau injectée entre le début et la fin de la réalimentation (48 jours d'infiltration).
- Figure 11 : Evolution du pH de la nappe et du canal.
- Figure 12 : Variation des taux de nitrates de la nappe (puits situé à proximité du fossé d'alimentation) et du canal.
- Figure 13 : Evolution de la bactériologie dans la nappe (puits situé à proximité du fossé d'alimentation) et le canal.
- Figure 14 : Maillage utilisé pour la modélisation du processus de recharge artificielle.
- Figure 15 : Carte piézométrique calculée sur la zone d'étude (au pas de temps zéro).
- Figure 16 : Carte piézométrique calculée sur la zone d'étude réduite au secteur d'observation (au pas de temps zéro).
- Figure 17 : Variations observées de niveaux aux temps $t = 26$ j, 68 j et 104 j.
- Figure 18 : Variations de niveaux entre le début et la fin de la recharge, observés et calculés.

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Exemples d'études basées sur l'alimentation artificielle
- Annexe 2 : Géologie et hydrogéologie de la vallée de la Garonne
- Annexe 3 : Documents cartographiques synthétisant l'information recueillie le long de la zone d'étude (vallée de la Garonne)
- Annexe 4 : Sites présentant des problèmes de ressource
- Annexe 5 : Fiche signalétique des puits et forages
- Annexe 6 : Caractéristiques principales des puits et piézomètres observés
- Annexe 7 : Résultats des pompages d'essai
- Annexe 8 : Résultats de la modélisation préliminaire du processus de recharge artificielle
- Annexe 9 : Résultats des analyses chimiques
- Annexe 10 : Résultats de la modélisation du processus de recharge artificielle - Évolution des niveaux observés et calculés.
- Annexe 11 : Résultats de la modélisation du processus de recharge artificielle - Évolution des niveaux calculés avec et sans injection.
- Annexe 12 : Simulation d'un processus de recharge artificielle - Évolution des niveaux calculés sur 200 jours (4800 m³/j pendant 100 j).

RÉSUMÉ

Dans le cadre du programme MEDALUS II de l'Union Européenne, une étude des possibilités de recharge artificielle de nappe alluviale a été réalisée dans la vallée de la Garonne. Ciblées sur le département de Lot-et-Garonne compte tenu de l'agrément et de la participation financière du Conseil Général de Lot-et-Garonne, des investigations ont été entreprises dans le secteur situé entre l'Ouest de Marmande et l'Est d'Agen. L'objectif se voulait de localiser un site convenant sur les plans socio-économique et technique à une expérimentation de recharge artificielle.

Le site sélectionné du Passage près d'Agen a fait l'objet d'une recherche expérimentale prometteuse entre le 4 octobre 1995 et le 15 janvier 1996. Une caractérisation de la géologie et de l'hydrogéologie du site a été réalisée. Pendant 48 jours un volume total de 132 000 m³ a été injecté à partir d'eau de surface (canal du Midi) via un fossé d'environ 4 m de profondeur -au maximum-, longeant le canal sur 750 m puis traversant le site sur 1 km avant de se jeter dans la Garonne.

La piézométrie a été suivie régulièrement. L'eau de la nappe, du canal et de la Garonne a été analysée à plusieurs reprises.

Les résultats permettent, selon les niveaux calculés par un modèle numérique monocouche développé aux différences finies, d'évaluer un volume disponible de l'ordre de 70 000 à 80 000 m³ un mois après l'arrêt de l'injection, et de 20 000 à 30 000 m³ à la fin du suivi, soit environ deux mois plus tard ; ceci réparti sur une superficie d'environ 1.5 km².

Le modèle calé en transitoire sur les données recueillies lors de l'expérimentation sur le site sélectionné, a permis de simuler une injection quatre fois plus importante : 480 000 m³ sur une durée de 100 jours.

Les résultats font état d'une augmentation importante des niveaux par rapport à l'expérimentation réalisée fin 1995, mais la zone bénéficiant du volume injecté n'est que faiblement élargie.

Le stockage de cet important volume d'eau apporterait des avantages évidents quant à l'utilisation différée de l'eau emmagasinée compte tenu qu'au bout de 200 jours l'équilibre de la piézométrie n'est toujours pas rétabli. L'exploitation du volume injecté est toujours possible 6 mois plus tard.

INTRODUCTION

L'importance vitale du problème de l'eau dans le monde a depuis toujours mobilisé les hommes.

Ainsi, dès l'antiquité, les romains furent parmi les premiers à avoir réalisé une forme d'alimentation artificielle en construisant des terrasses et chenaux pour faciliter l'infiltration de l'eau et réduire ainsi le ruissellement et l'érosion des terres arables.

L'idée d'alimentation est venue de la simple constatation suivante : les ressources en eau offertes par les nappes souterraines et celles que constituent les cours d'eau de surface sont sans aucune mesure, les débits d'écoulements des fleuves étant en moyenne 100 fois plus importants que ceux des nappes d'eau souterraine. En saison pluvieuse, d'énormes quantités d'eau sont véhiculées par les fleuves et déversées dans la mer sans aucun profit pour personne.

Or certaines formations perméables du sous-sol constituent un réservoir de capacité considérable, réservoir libre en permanence (présence de terrains perméables non-saturés) ou temporairement (étiage des nappes en saison sèche, nappes libres rabattues par une exploitation intensive). On s'est donc interrogé sur les possibilités d'emmagasiner dans le sous-sol une partie de l'eau excédentaire des fleuves ou rivières pour les réutiliser ultérieurement en période de sécheresse ou de pointe de consommation ; le sous-sol jouant un rôle de régulateur comparable à celui de l'accumulation par un barrage implanté sur un cours d'eau, toutes proportions gardées. C'est le principe de l'alimentation dite "artificielle".

Celle-ci peut cependant avoir de multiples objectifs :

- épuration chimique d'une eau usée par filtration naturelle lors de la traversée du terrain perméable,
- reconstitution d'une nappe déprimée afin de créer une véritable barrière hydraulique contre l'envahissement d'eau salée ou de toute autre pollution,
- remise en pression d'une nappe captive en vue de restaurer les niveaux piézométriques fortement déprimés par l'exploitation (nappe des "sables verts" du Bassin de Paris, de l'Eocène en Gironde par exemples), et rendre ainsi réalisable tout prélèvement à une distance déterminée du point d'injection (transfert ou transport d'eau d'une zone à l'autre de la structure aquifère),
- régulation thermique : l'eau du sous-sol a une température pratiquement constante, alors que celle des rivières varie parfois beaucoup avec les saisons.

Quelques exemples d'études et de bibliographie basées ces considérations sont présentés en *annexe 1*.

Aujourd'hui, la nécessité de gérer les ressources en eau est admise, à l'échelle de l'Europe, d'un pays ou au niveau local. Dans ce contexte, si l'on s'intéresse aux dernières années de sécheresse dans le sud de l'Europe, les aspects quantitatifs des eaux souterraines s'avèrent d'un grand intérêt, dans l'optique du projet fondamental intitulé "gestion active des eaux souterraines".

Le projet MEDALUS ("Mediterranean Desertification And Land USE") développé dans le cadre des actions de recherche de l'Union Européenne, a été initié dans ce contexte, visant à :

- prédire l'impact de l'effet de serre sur les régions sèches de la Méditerranée,
- évaluer cet impact sur le couvert végétal, les sols et la ressource en eau,
- estimer l'impact socio-économique des phénomènes étudiés.

De nombreuses observations liées au manque de pluie et impliquant une réduction des recharges en eau souterraine, ont par conséquent conduit à cette attention toute particulière car :

- la demande en eau des agriculteurs n'est pas satisfaite compte tenu de la baisse des niveaux piézométriques,
- la protection et la restauration de la qualité des eaux deviennent essentielles,
- un équilibre des flux se doit d'être maintenu dans les hydrosystèmes.

C'est donc dans le but d'améliorer une telle situation, que le programme de "recharge artificielle des nappes" du projet MEDALUS a été conçu ; l'objectif étant de tester le potentiel de cette technique et ses effets sur différents sites hydrogéologiques.

L'expérience réalisée en France concerne un aquifère alluvial caractérisé pour sa grande capacité d'emmagasinement. De nombreuses investigations ont été menées dans la plaine alluviale de la Garonne située dans le département de Lot-et-Garonne (*figure 1*). Cette région a été choisie en raison de la présence de gens motivés ayant déjà eu affaire à ce genre d'expérience face à de réels problèmes de ressource (irrigation des cultures, actions de lutte contre le gel pour la protection des vergers). Par ailleurs, l'intérêt porté à la vallée de la Garonne repose également sur ses conditions géologiques et hydrogéologiques (*annexe 2*).

Compte tenu de l'impact socio-économique d'une telle expérimentation de "recharge artificielle" dans une vallée alluviale en pleine expansion, plusieurs services et organismes locaux, soucieux de promouvoir de nouvelles méthodes favorisant le développement agricole de leur région, se sont investis dans ce projet. Sur la base des fonds de l'Union Européenne, le Ministère de l'Industrie, le Ministère de l'Environnement (Directions Régionales d'Aquitaine et de Midi Pyrénées), l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, le Conseil Général de Lot-et-Garonne et la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt de Lot-et-Garonne ont contribué ensemble au montage technique et financier de l'opération.

Les sollicitations des différents partenaires ont par conséquent été prises en compte. Leur implication a apporté un caractère très appliqué aux objectifs, maintenus, de recherche scientifique. Un comité de pilotage composé de toutes ces autorités et des maîtres d'oeuvre a supervisé le projet et garanti le bon déroulement des opérations.

Le BRGM, désigné comme opérateur mandataire, a réalisé cette étude sur les possibilités d'alimentation artificielle de la nappe alluviale de la Garonne en collaboration avec l'Association Climatologique de la Moyenne Garonne (ACMG), basée au Passage près d'Agen et dont le travail est inhérent aux questions agro-climatiques et aux problèmes d'eau dans ce secteur.

La maîtrise d'ouvrage a été assurée par le Conseil Général de Lot-et-Garonne.

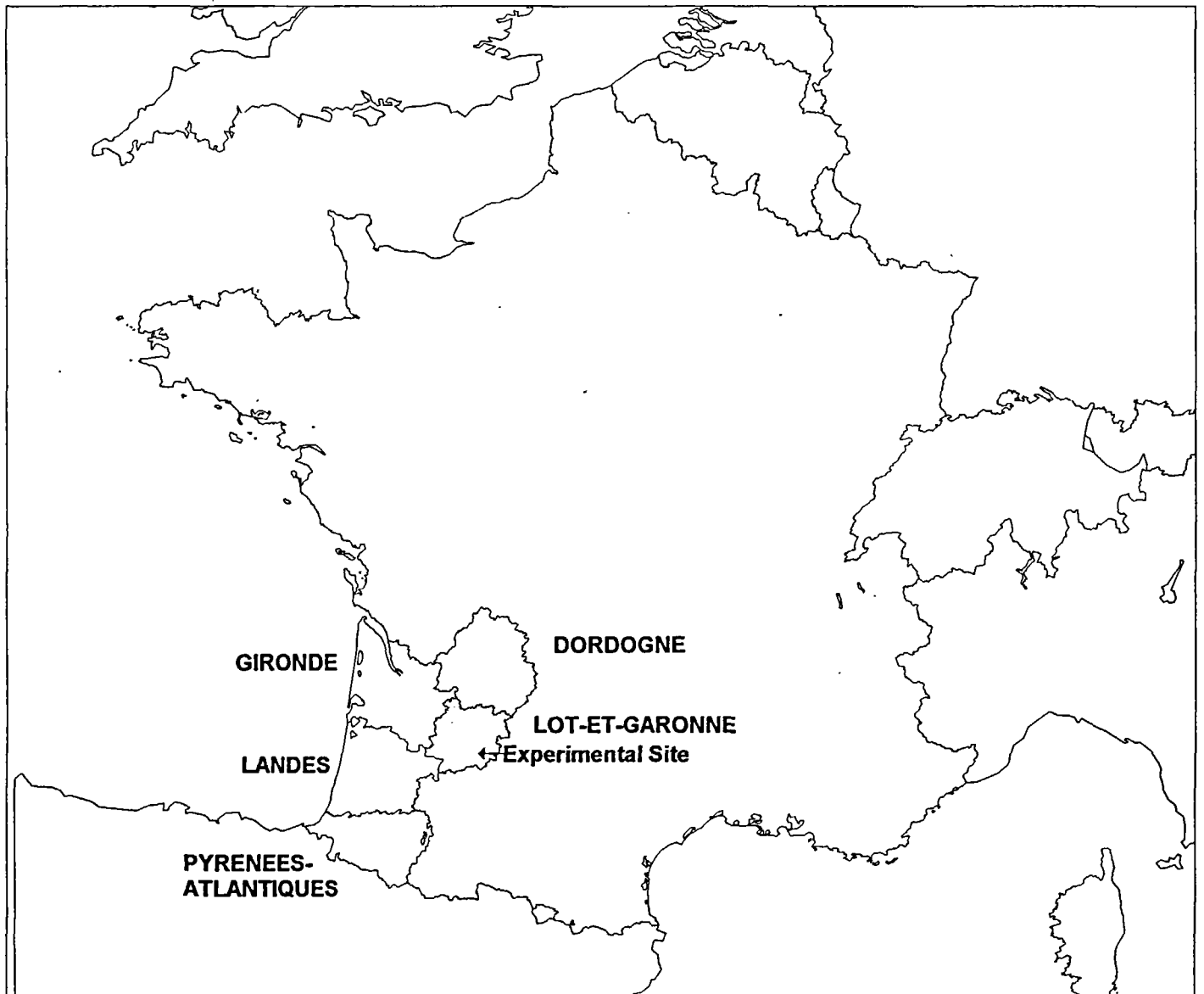


Figure 1 : Localisation géographique de la zone d'étude (département du Lot-et-Garonne)

1. PROGRAMME TECHNIQUE - OBJECTIF

L'opération concernant l'étude des possibilités de réalimentation artificielle de la nappe alluviale de la Garonne s'est déroulée sur plusieurs années. Initiée à l'été 1994, elle se termine en juin 1996. Des considérations locales telles que les définitions et signatures de conventions entre partenaires, ou l'attente d'autorisations d'accès aux parcelles d'étude et aux ouvrages de mesure (puits, piézomètres), ont différé le déroulement du programme qui s'achève six mois après l'échéance fixée par l'Union Européenne.

Le programme technique est distribué en **trois phases** :

- la **sélection d'un site approprié** basée sur plusieurs études réalisées le long de la plaine alluviale de la Garonne : des équipements propres à évaluer la capacité de stockage de la zone non-saturée sont installés sur différents sites ; l'information collectée sur ces sites et les enquêtes réalisées sont analysées et interprétées en terme d'accessibilité, de disponibilité spatiale et d'environnement géologique favorables à l'expérimentation.
- la **réalisation**, sur le site sélectionné, d'un test scientifique de **recharge artificielle** à partir d'eau de surface : l'évolution des niveaux de la nappe est suivie avant le début de l'opération, puis au cours de l'expérimentation d'alimentation artificielle, et enfin pendant la période de retour à l'équilibre. Cet essai est mené en vrai grandeur.
- l'**analyse et la validation des données**, et l'**extrapolation des résultats** par le biais d'un modèle numérique alimenté par les données observées. Le modèle est développé dans un souci de prévision des scénarii variés susceptibles d'être appliqués sur le site : mise en charge artificiellement de la nappe et utilisation retardée de la ressource nouvellement mobilisable.

L'**objectif** de cette étude était donc d'arriver à une meilleure compréhension des processus se produisant dans le sol, et de dégager les avantages et les inconvénients d'une telle méthode dans une perspective d'amélioration de l'environnement socio-économique de la région.

La nappe alluviale de la Garonne représente en effet une ressource en eau importante. Autrefois utilisée pour l'alimentation des réseaux d'adduction d'eau potable, elle est aujourd'hui abandonnée pour cet usage en raison de sa trop grande sensibilité aux pollutions d'origines diverses, au profit de la Garonne elle-même ou de forages profonds. En revanche, elle continue à être fortement sollicitée pour l'irrigation, cependant ralentie au cours de la sécheresse des étés 1989, 90 et 91 à cause d'une baisse importante du niveau de la nappe.

Ceci est dû à la conjonction de plusieurs causes :

- le surcreusement du lit de la Garonne par les extractions de granulats,
- les besoins en eau croissants de l'agriculture,
- les sécheresses répétitives de ces dernières années conjuguées à une baisse des crues ayant limité la recharge de la nappe.

Dans l'éventualité de nouvelles périodes de sécheresse -ordinaire ou exceptionnelle- cette méthode pourrait être intégrée aux procédures de gestion locale des ressources en eau.

2. SÉLECTION D'UN SITE APPROPRIÉ

Durant l'été 1994, des investigations hydrogéologiques se sont déroulées le long de la plaine de la Garonne, dans sa traversée du département du Lot et Garonne, depuis l'Ouest de la ville de Marmande jusqu'à l'Est de celle d'Agen, c'est-à-dire sur une superficie de 85 km de long et 4 à 6 km de large. Ce secteur couvre quelques 500 km² (*figure 2*).

2.1. Inventaire des points d'eau et choix du site

Un inventaire des puits domestiques et agricoles de ce secteur a ainsi été établi par une équipe du BRGM -Service Géologique d'Aquitaine.

L'ACMG a été chargée de la sensibilisation des propriétaires, agriculteurs pour la plupart. Ceux-ci ont été informés puis visités. Un courrier leur a été adressé par la Chambre d'Agriculture et l'ACMG. En dépit, ou peut-être à cause, du caractère officiel de ce courrier, l'attitude de certains agriculteurs s'est avérée pernicieuse face aux investigations prévues. Leur méfiance s'est révélée en fait être liée à la crainte d'être répertoriés, et de devoir, suite à cet inventaire des points d'eau, payer des taxes ou des redevances fiscales sur leurs prélèvements. Globalement, il ressort, d'après les estimations, que 30% des puits ont dû être dissimulés.

L'enquête a porté sur l'identification de chaque point d'eau, la profondeur, le niveau piézométrique, l'usage de l'eau, les débits prélevés, les événements climatiques, les périodes d'exploitation et les paramètres physico-chimiques non conservatifs (pH, Oxygène dissous, conductivité, température).

Une fiche de renseignement a été remplie pour chacun des points d'eau visités. Plus de 1200 ouvrages ont ainsi été recensés et renseignés. Les résultats chiffrés de ce travail évaluent :

- 1247 ouvrages recensés,
- 876 ouvrages renseignés avec dossier constitué,
- 763 mesures piézométriques,
- 689 prélèvements annuels,
- 793 profondeurs d'ouvrages mesurés,
- 41 ouvrages utilisés pour l'irrigation antigel,
- 743 ouvrages renseignés sur la problématique ressource,
- 784 mesures de pH et de l'Oxygène dissous,
- 797 mesures de conductivité et de température,

L'ensemble des informations a été saisi dans une base de données géoréférencées gérée avec le logiciel ACCESS, qui a permis la réalisation de tris et de sélections, et des traitements cartographiques réalisés et visualisés sous MapInfo. Les documents édités sous forme de cartes format A3 à 1/200000 sont les suivants (*annexe 3*) :

- répartition de la profondeur des puits,
- épaisseurs de la zone non-saturée et de la nappe,
- carte piézométrique,
- carte des prélèvements annuels,
- utilisation des ouvrages agricoles,
- répartition des ouvrages utilisés pour la lutte contre le gel,
- répartitions des conductivités, des pH, de l'oxygène dissous.

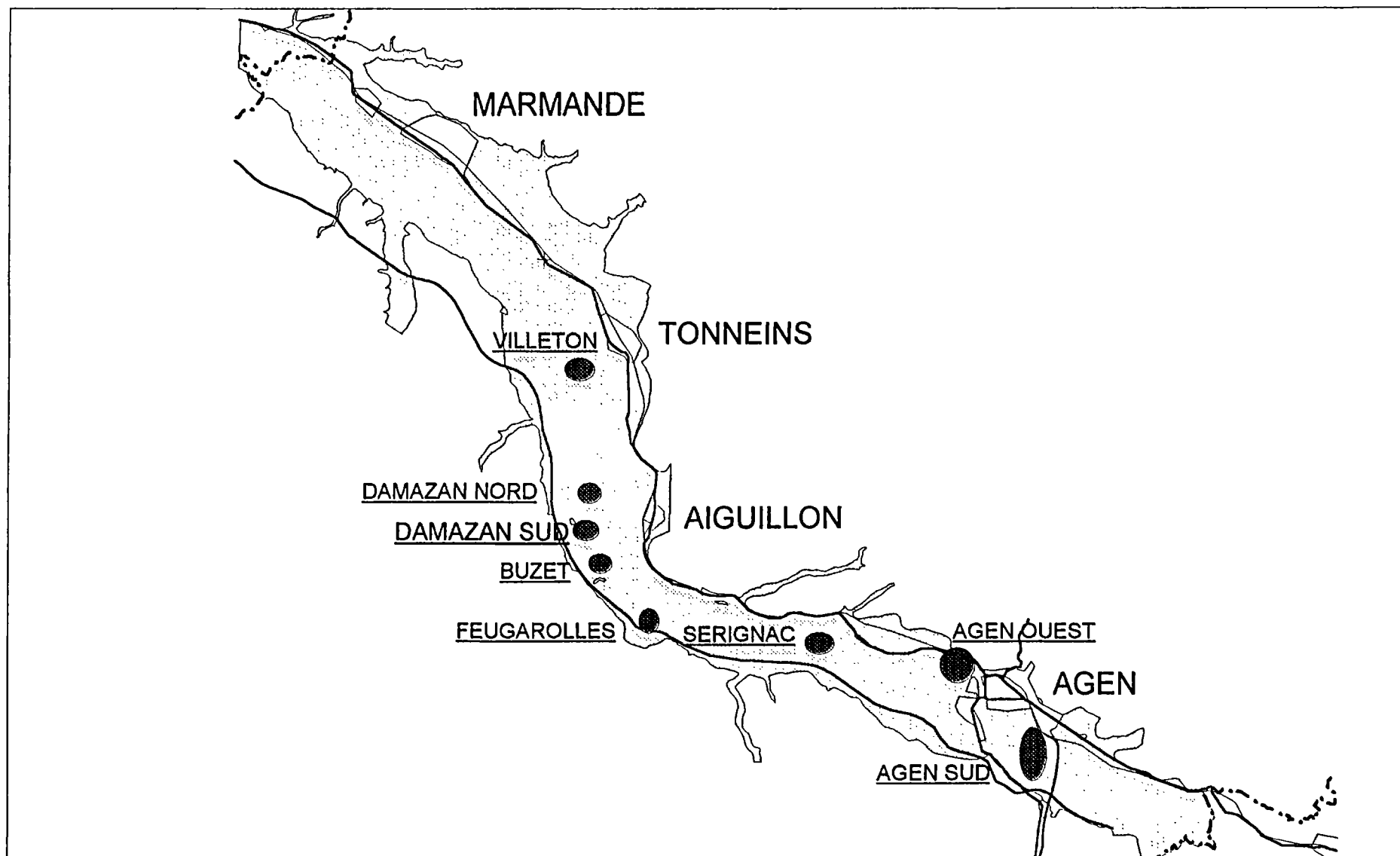


Figure 2 : Localisation précise de la zone d'étude

Pour ce qui concerne les ouvrages visités, l'ensemble des prélèvements effectués dans la nappe alluviale pendant la saison d'irrigation de l'année 1994 a été évalué à :

- volume 1994 : 3 275 000 m³,
- surfaces irriguées correspondantes : 3 275 hectares.

Notons que cette période s'est caractérisée par des besoins limités en raison d'un printemps pluvieux et d'orages d'été réguliers malgré des températures élevées.

Ces résultats bruts d'enquête n'ont pas été validés faute de renseignements sur les autres ressources en eau : prélèvements dans le fleuve, les rivières, les gravières en eau, le Canal du Midi, les réseaux d'irrigation collectives, etc.

Suite à cette analyse de l'inventaire des points d'eau, **une vingtaine de sites où des problèmes de ressources avaient été rencontrés ont été sélectionnés (annexe 4).**

Pour affiner la sélection, des critères spécifiques ont été définis :

- surface piézométrique à faible gradient hydraulique (forte perméabilité probable et risque de drainage souterrain rapide écarté),
- épaisseur de terrain non-saturé au moins égale à 3 voire 5 mètres,
- ressources actuelles et passées insuffisantes avec forte motivation des agriculteurs,
- disponibilité amont d'une ressource en eau facilement mobilisable,
- foncier disponible (accords des propriétaires pour acheminer l'eau d'alimentation et l'épandre).

Potentiellement, huit sites confirmaient plusieurs de ces critères. Ils ont alors fait l'objet d'une visite particulière afin d'affiner les potentialités physiques du terrain et connaître les motivations réelles des agriculteurs. Trois d'entre-eux ont été retenus. Une reconnaissance à la tarière a permis d'évaluer précisément l'épaisseur de la zone non saturée et le degré d'homogénéité du terrain.

Compte tenu de la menace de pollutions sur un des trois sites, et d'une épaisseur radicalement trop faible de non-saturé sur un autre, le **Comité de Pilotage a retenu le site d'Agen Le Passage** comme étant le plus favorable à l'expérimentation (le 8 mars 1995). En effet, en dépit de l'épaisseur parfois modique de la zone non-saturée (2 à 5 mètres), d'autres arguments pertinents encourageaient le choix de ce site :

- des besoins en eau importants,
- la présence d'un fossé (fossé du Pradet) favorable à l'infiltration (à surcreuser),
- la proximité du canal du Midi représentant une ressource en eau d'alimentation disponible, propre et en quantité suffisante pour l'injection,
- la présence de nombreux puits permettant des mesures de niveau d'eau,
- aucun risque de détérioration de la qualité de l'eau du captage d'alimentation en eau potable du Passage, la station de pompage du Barroy étant éloignée vers l'amont,
- la motivation des agriculteurs avec le soutien de la municipalité.

2.2. Description du site expérimental

Le site expérimental sélectionné (*figure 3*) est situé entre le canal du Midi et la Garonne sur la rive gauche du fleuve, au Nord-Ouest de la ville du Passage, en aval du pont-canal. Il couvre une superficie d'environ 700 hectares. C'est une zone agricole où les cultures maraîchères sont prédominantes.

Un large fossé (fossé du Pradet) d'environ 4 m de profondeur, au maximum, le sillonne longeant le canal du Midi sur 750 m puis traversant le site sur 1 km pour se jeter dans la Garonne au lieu dit "Pradet". Une vanne localisée à 200 m de la Garonne sous le pont du "Pradet", et installée pour obturer le fossé lors des crues de la Garonne, sert de barrage à l'eau d'alimentation, évitant son ruissellement direct vers le fleuve. En revanche, le système représente une garantie indispensable, au cas où une inondation liée à la recharge artificielle ou à un orage serait provoquée et nécessiterait une vidange rapide du fossé.

L'eau d'alimentation est prélevée en surface dans le canal du Midi au lieu-dit "Frésonis" et déversée dans ce fossé, qui a été curé et qui joue le rôle de distributeur : l'eau s'y répand avant de s'infiltrer dans le sol et recharger la nappe.

3. DÉROULEMENT DU PROJET - MÉTHODES ET TECHNIQUES

Avant de commencer l'expérimentation sur le site sélectionné du Passage, le travail préparatoire a consisté, d'une part à étudier les conditions géologiques et hydrogéologiques du secteur de manière approfondie pour mieux comprendre le fonctionnement du système, et d'autre part à aménager le site afin d'assurer le bon déroulement de l'expérimentation. Ainsi, les opérations suivantes ont été réalisées :

- définition précise du secteur observé ;
- complément d'inventaire des points d'eau jusqu'à l'exhaustivité - nivellement des points ;
- identification géologique avec réalisation de profils géophysiques par la méthode électromagnétique VLF ;
- identification hydrogéologique avec :
 - mise en place de piézomètres et d'enregistreurs de niveaux,
 - essais de pompage,
 - suivi de la qualité des eaux de la nappe, du canal et de la Garonne ;
 - suivi piézométrique,
- mise en place du dispositif d'alimentation :
 - curage du fossé et profil en long,
 - équipement de la prise d'eau dans le canal et du système de rejet dans le fossé
 - installation du matériel de pompage,
 - mise en place du protocole pour le fonctionnement de la vanne et la régulation des niveaux ;
- modélisation préliminaire simplifiée appliquée au site des processus de recharge artificielle, afin de déterminer un ordre de grandeur des volumes d'eau injectable dans le fossé.

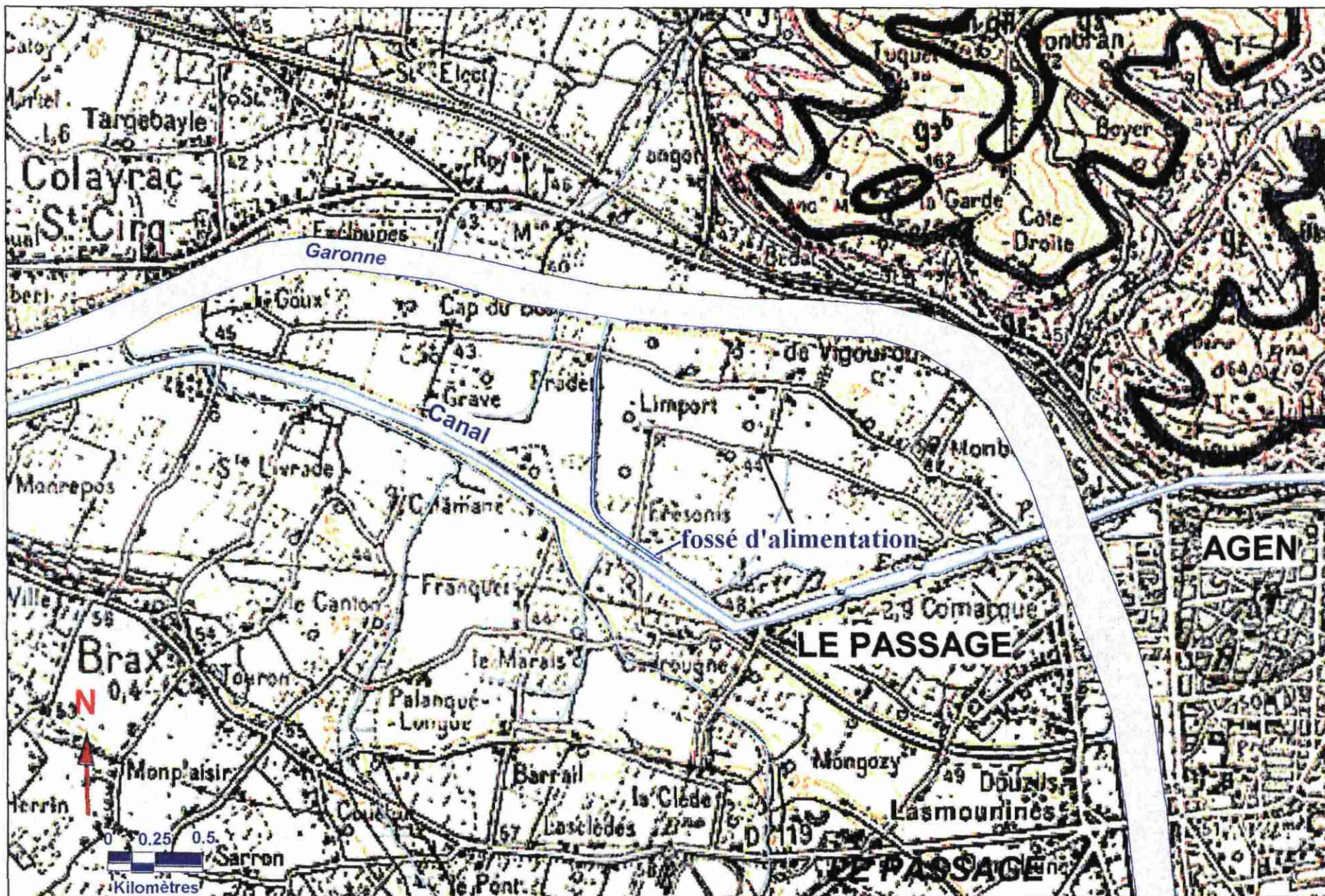


Figure 3 : Localisation du site expérimental.

3.1. Inventaire des points d'eau

L'inventaire des points d'eau a consisté en une enquête exhaustive auprès des propriétaires des terrains situés dans la zone d'étude. L'objectif était d'obtenir, le cas échéant, des renseignements sur leurs puits ou forages selon la fiche signalétique établie à cet effet (*annexe 5*).

Quarante puits ont ainsi pu être localisés et renseignés. La *figure 4* montre la répartition de l'ensemble des points d'eau répertoriés sur le site.

3.2. Identification géologique (méthode VLF)

Six profils VLF (appareil T.VLF d'Iris Instruments) ont été réalisés en mode résistivité. Leur localisation est présentée sur la *figure 5*. 223 mesures au total ont été effectuées :

- profil A1 : 20 mesures au pas de 20 m, soit 380 m,
- profil A2 : 20 mesures au pas de 20 m, soit 380 m.
- profil B1 : 65 mesures au pas de 10 m, soit 640 m,
- profil B2 : 34 mesures au pas de 20 m, soit 680 m,
- profil C1 : 60 mesures au pas de 20 m, soit 1180 m,
- profil C2 : 24 mesures au pas de 20 m, soit 460 m,

Compte tenu des émetteurs VLF utilisés et de leur fréquence -GBR / 15,975 HZ et GBZ / 19,575 HZ (ce dernier uniquement pour les profils A1 et A2)- la profondeur d'investigation serait de l'ordre de 50 m en terrain de résistivité moyenne 100 à 300 Ohm.m. Or, la faible résistivité apparente constatée sur les profils (10 à 15 Ohm.m en moyenne) amène à penser que la **profondeur d'investigation réelle est de l'ordre de 20 à 30 m.**

L'interprétation des profils de déphasage montre que la résistivité apparente décroît avec la profondeur ce qui est cohérent avec la présence d'un substratum molassique argileux ; sauf exception du profil B2 entre 350 et 600 m. Les contrastes de résistivité étant très faibles (compte tenu de l'épaisseur importante des molasses qui peut atteindre 300 m), il est difficile d'en tirer des conclusions vis à vis des variations lithologiques.

Les profils de résistivité apparente obtenus par VLF sont semblables à ceux obtenus par méthode de traîné en géophysique électrique classique :

- **zones plus résistives** : alluvions (ou formations) moins argileuses, donc *a priori* propres, constituées de sables et de graviers producteurs en eau, avec différents cas de figures tels que des alluvions très résistives peu épaisses ou moyennement résistives mais plus épaisses ;
- **zones moins résistives** : alluvions (ou formations) plus argileuses, donc moins productives en eau avec, soit une couche relativement résistive mais très mince, sur substratum argileux conducteur par exemple, soit une couche d'alluvions argileuses épaisses.

Certains points isolés présentent des valeurs fortement anormales dues à des perturbations locales vraisemblablement (lignes électriques, fortes variations topographiques, masses conductrices).

La mise en parallèle des profils VLF avec les coupes géologiques (*cf. § 3.3*) montre, pour le profil B1, une augmentation des résistivités qui correspond à une augmentation de l'épaisseur de grave, et à une baisse de la profondeur du substratum molassique. Une augmentation de la résistivité se manifesterait donc par une baisse du toit du substratum molassique.

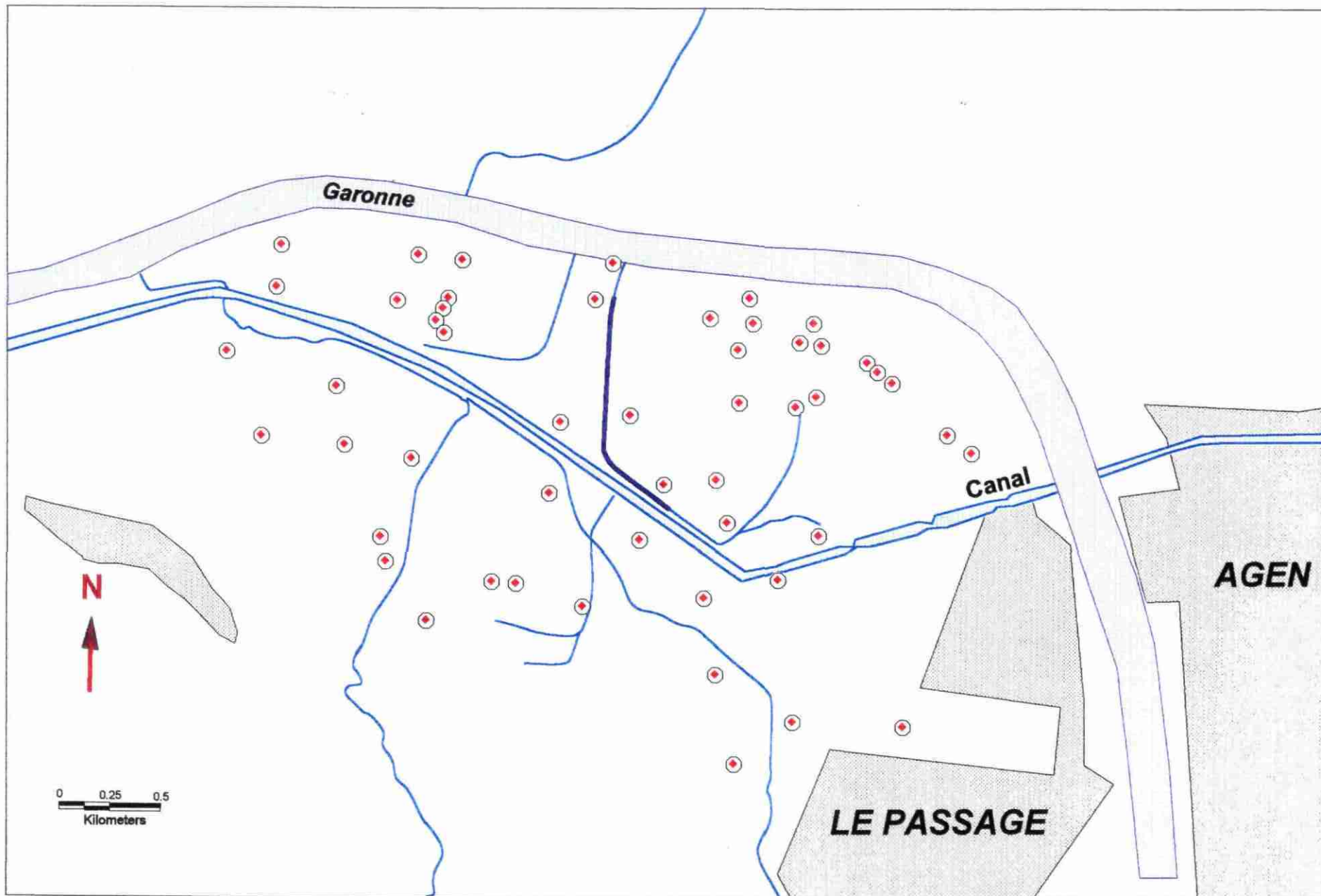


Figure 4 : Répartition des points d'eau inventoriés

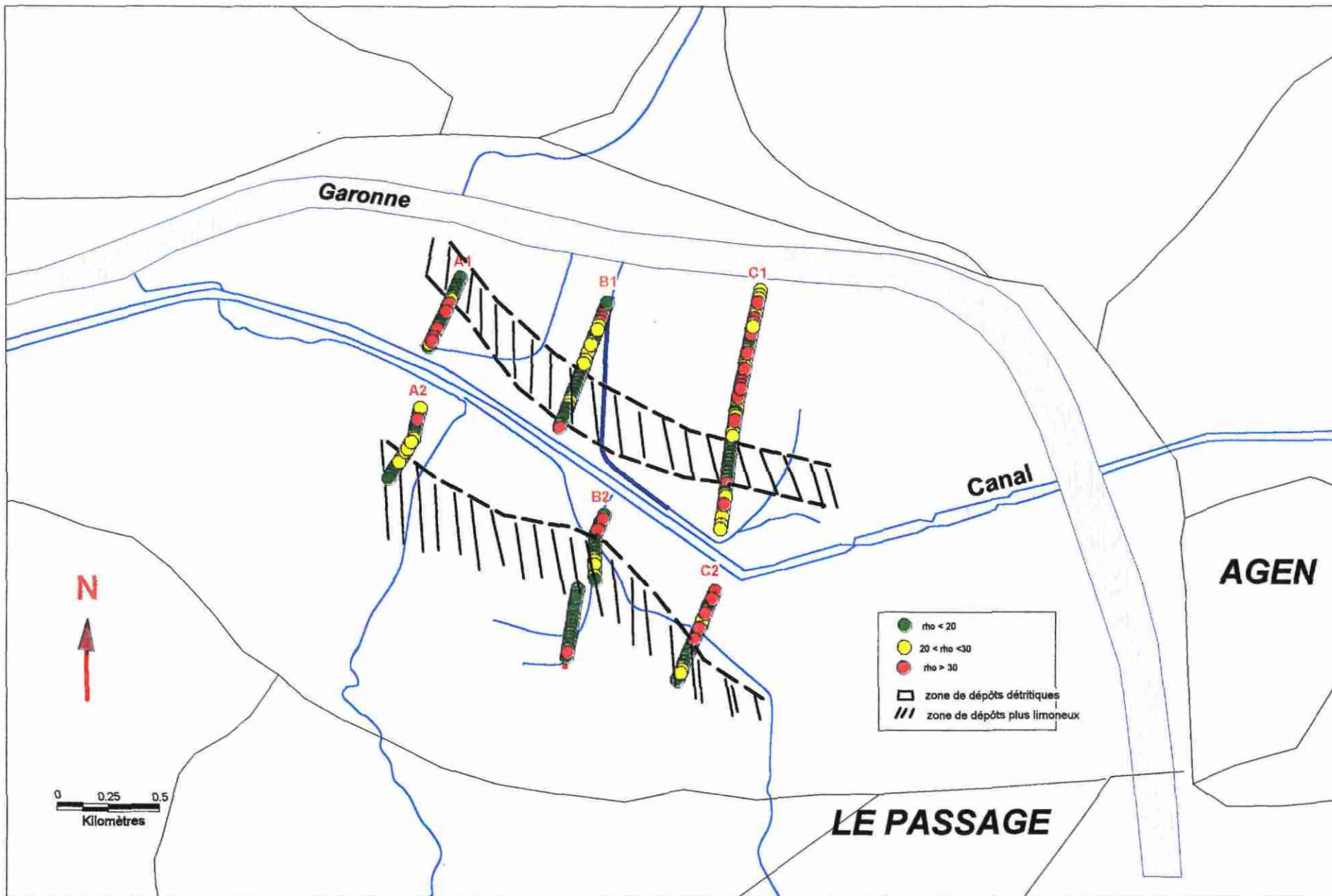


Figure 5 : Carte de localisation des profils VLF et de la répartition des résistivités

Cette hypothèse se vérifie au niveau du profil C1 et de la coupe 4 puisque le sable reposant sur la molasse est argileux, et donc conducteur.

Une carte de répartition des résistivités (*figure 5*) a été bâtie en séparant les résistivités en trois classes :

- $\rho < 20$ ohm.m
- $20 < \rho < 30$ ohm.m
- $\rho > 30$ ohm.m

Cette carte de répartition des résistivités met en évidence l'existence probable de chenaux correspondant à des phases de dépôts d'énergies différentes (sables limoneux par exemple pour des phases calmes, matériaux plus détritiques en période de plus grande énergie).

Ces chenaux sont de direction parallèle à la Garonne.

3.3. Mise en place de piézomètres et d'enregistreurs de niveaux

Parmi les ouvrages recensés sur la zone d'étude, huit d'entre eux ont été retenus pour y effectuer des essais de pompage. Des piézomètres de contrôle ont donc été installés à environ 15 m de distance des puits respectifs. Répartis de manière homogène autour du fossé, les puits se devaient de réunir deux critères principaux : avoir un débit d'exploitation élevé et être positionné à proximité d'un fossé d'évacuation.

Mis à part l'intérêt de cette contribution aux essais de pompage, ces forages ont permis d'acquérir une meilleure connaissance du milieu aquifère et de ses limites verticales. Il s'agissait avant tout d'atteindre le substratum molassique. Sa profondeur réelle est donc connue en huit points.

La carte de localisation des puits existants et des huit forages (réalisés dans le cadre du projet et équipés en piézomètres) observés sur le site expérimental, est présentée sur la *figure 6* ; leurs caractéristiques principales sont synthétisées en *annexe 6*. L'épaisseur des limons traversés à la tarière ou par forage (piézomètres) est indiquée sur la *figure 7*.

La méthode de foration utilisée est la méthode Rotary. La tête de forage s'enfonce dans le sol par rotation et pression exercées au sommet du train de tige. La remontée des cuttings est assurée par l'injection d'air comprimé (l'air comprimé traverse le train de tige et ressort au niveau des événements du trépan ; le diamètre du trépan étant supérieur à celui des tiges, il entraîne la remontée des cuttings vers la surface). Le sol étant pulvérulent, un tubage provisoire a été nécessaire pour maintenir le sol en place.

Les limons et sables ont été traversés à l'aide d'un trépan à rouleaux. Un changement d'outil a dû être effectué pour traverser la grave car celle-ci était d'une granulométrie trop élevée (> 1 cm) pour l'outil. Le toit de la molasse a été perforé à l'aide du même outil à lames.

Les ouvrages ont été équipés d'un tubage PVC de 125 mm de diamètre crépiné sur la hauteur aquifère et gravillonné dans l'espace annulaire. Une tête de puits de un mètre de hauteur équipée d'un couvercle protège le tube PVC.

Sur les huit sondages réalisés, un d'entre eux (emplacement du puits n°5) s'est avéré sec, d'où le nombre de sept essais de pompage effectués (cf. § 3.4).

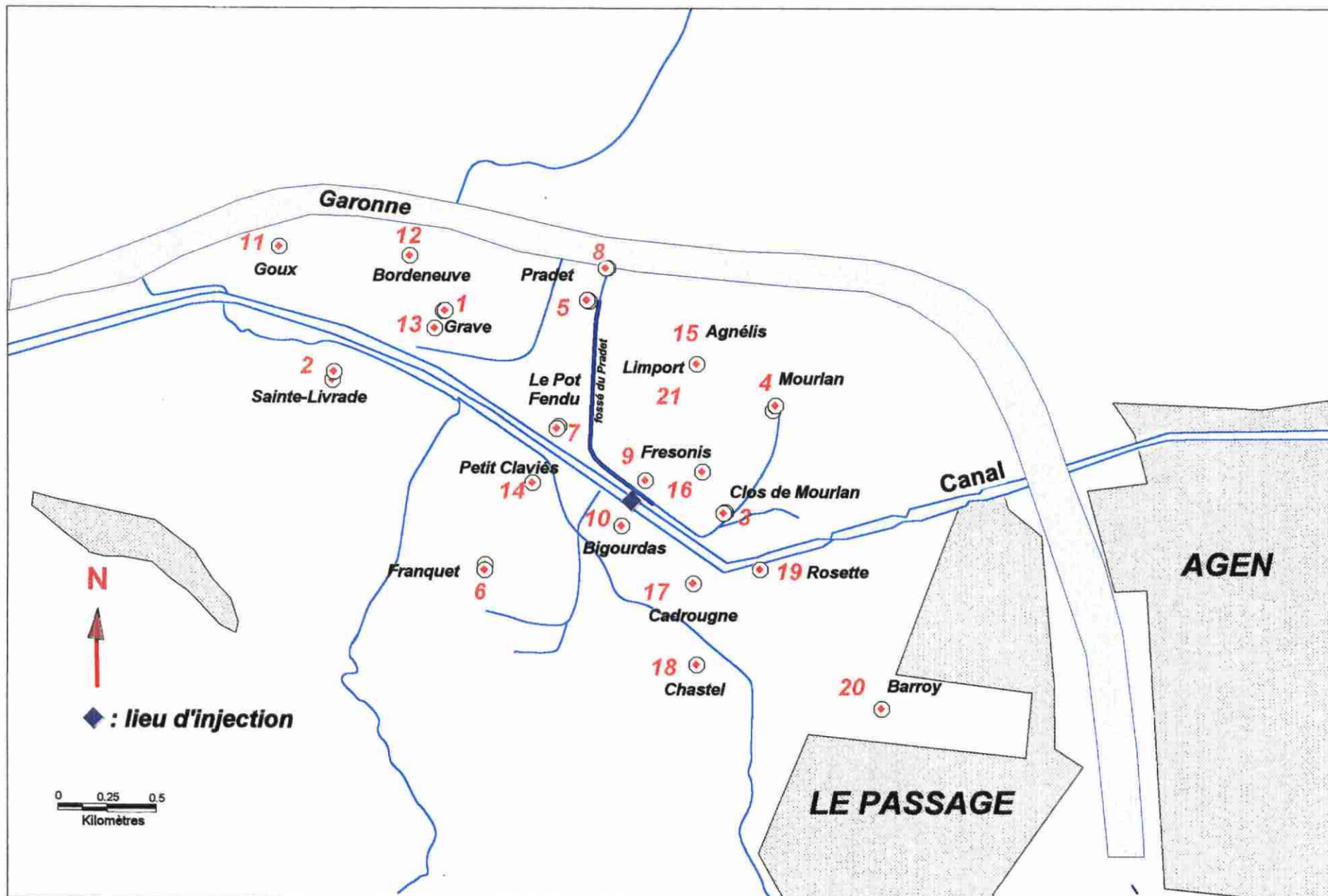


Figure 6 : Carte de localisation des puits et piézomètres observés sur le site expérimental.

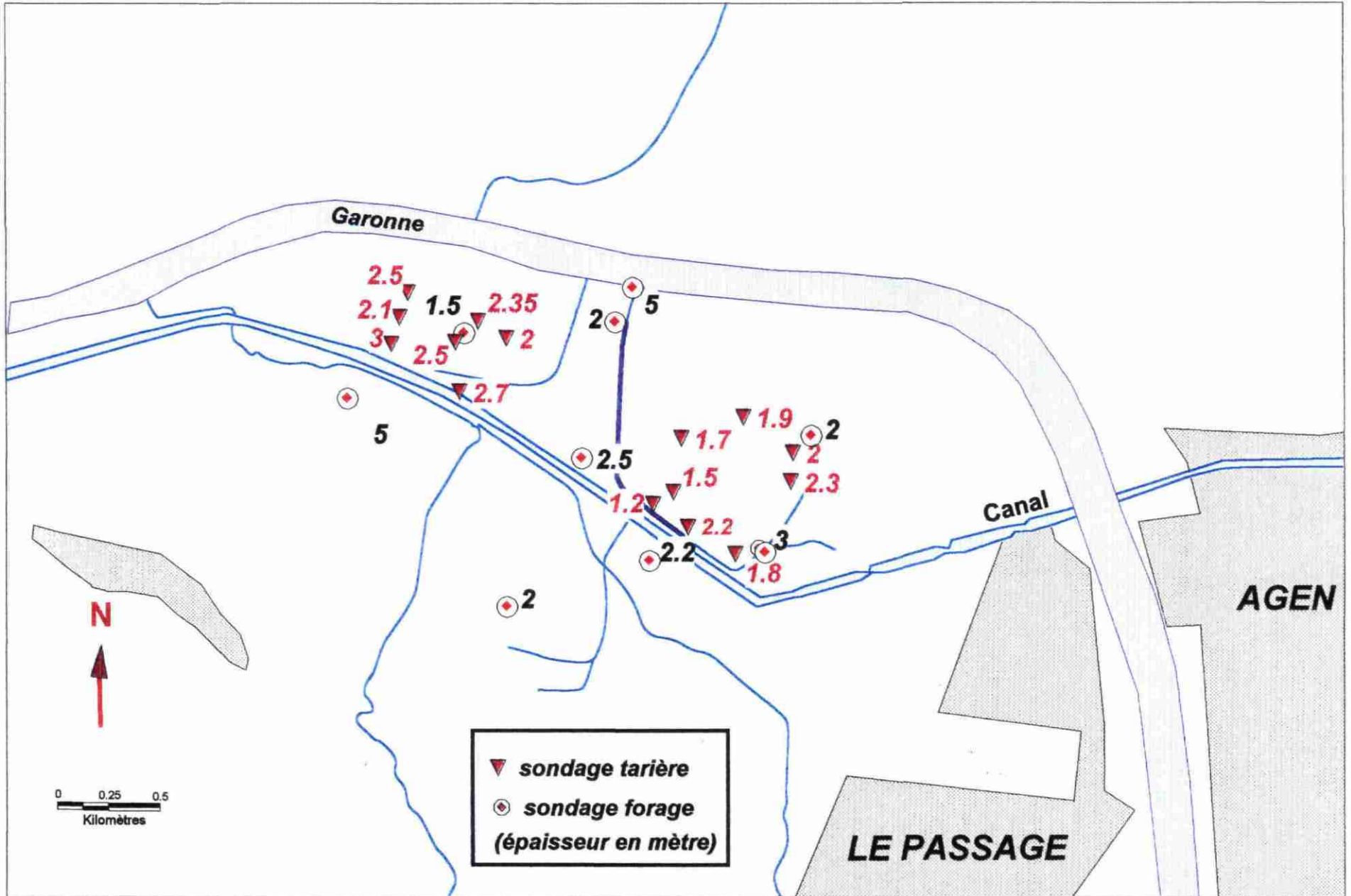


Figure 7 : Epaisseur mesurée des limons

Suite à l'équipement, les ouvrages ont été développés par des pompages d'une demi-heure à l'aide d'une moto-pompe.

Des enregistreurs continus de niveaux piézométriques ont été installés pour la durée de l'expérimentation sur les puits n°2, 3, 6, 7, 8, 9, 10 et 20. Les appareils de mesures utilisés sont :

- des limnigraphes à tambour vertical ou horizontal : les données recueillies ont été numérisées ;
- des centrales d'acquisition de mesures de type MADOSolo et MADOPlus (Module d'Acquisition de DONnées - matériel Iris Instruments) : elles enregistrent des signaux électriques fournis par un capteur de pression. De faible encombrement (boîtier cylindrique de 71 mm de diamètre et 44 cm de hauteur), ces capteurs ont été installés à l'intérieur des piézomètres.

3.4. Essais de pompage - Interprétation

Les essais de pompage ont été réalisés dans **sept puits** localisés sur le site dans le but d'évaluer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère et de recalculer les paramètres du modèle préliminaire (cf. § 3.5) de simulation de l'alimentation artificielle. Les puits associés à des piézomètres ont été choisis afin de bénéficier de deux points d'observation des fluctuations piézométriques. Les caractéristiques propres des ouvrages n'ont pas été recherchées.

Les durées de pompage, à débit constant, sont comprises entre 2h45 et 4h00, les remontées ayant été enregistrées pendant 2 à 3 heures après l'arrêt du pompage. Les rabattements ont été suivis à la fois sur le puits pompé et le piézomètre associé. Les eaux étaient déversées par canalisation loin des puits de pompage dans des exutoires naturels, drains rejoignant la Garonne.

La méthode employée pour l'interprétation prend en compte un puits réel en nappe captive et un milieu hétérogène aux limites. Les courbes de remontée et de descente sont interprétées en portant le logarithme du temps en abscisse et le niveau dynamique en ordonnée.

Les puits de pompage ayant un rayon non négligeable, l'effet de capacité du puits se manifeste sur l'ensemble des rabattements observés. En effet une partie du débit prélevé en début de pompage provient directement de la "réserve" du puits sans avoir transité dans la couche aquifère (l'effet inverse se produit lors de la remontée après arrêt du pompage). Les formules classiques donnent le rabattement au puits à 0.3% près, dès que le temps de pompage t (sec) est supérieur à :

$$t = (25.r^2) / T \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} r \text{ est le rayon du puits (m)} \\ T \text{ est la transmissivité (m}^2\text{/sec)} \end{array}$$

Les transmissivités sont calculées à partir des formules de Jacob d'après la pente de la droite :

$$T = 0,183.Q / i \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} Q \text{ est le débit de pompage} \\ i \text{ est la pente de la droite} \\ (i \text{ est égal à l'augmentation du rabattement par cycle Log du temps)} \end{array}$$

Les coefficients d'emmagasinement sont calculés d'après la formule :

$$S = 2.25T.t_0 / r^2 \quad \text{où } t_0 \text{ est l'abscisse à laquelle la droite coupe l'axe des temps pour un rabattement nul,}$$

r est la distance puits / piézomètre

Les remontées également étudiées ont été préférées aux descentes pour la détermination des transmissivités car ces premières ne subissent pas l'influence des perturbations liées aux variations de débit de pompage.

Les niveaux dynamiques portés sur les courbes d'interprétation sont donnés par rapport au repère propre à l'ouvrage étudié. L'*annexe 7* récapitule les résultats de ces pompages d'essai :

– "Grave" (1) :

On distingue 3 parties sur la courbe de descente. La première, de 0 à 1 minute correspond à l'effet de capacité du puits. La seconde, de 1 à 10 minutes, à l'atténuation de l'effet de capacité et au début de la sollicitation de la nappe. La troisième, où le niveau ne se stabilise pas, est due à la trop grande importance du débit. La chute observée en fin de pompage est due au dénoyage de la pompe. Les valeurs de transmissivité obtenues au niveau du puits et du piézomètre sont très proches :

$$T = 2.3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{et} \quad T = 2.1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$$

La remontée donne des valeurs légèrement supérieures.

La valeur moyenne considérée est de $2.7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$.

– "Sainte-Livrade" (2) :

Comme l'essai (1), la courbe de descente se divise en trois parties. Toutefois le niveau dynamique se stabilise quasiment après 4 heures de pompage ce qui montre une bonne alimentation du puits. Les transmissivités calculées lors de la remontée sont beaucoup plus faibles au niveau du puits.

La valeur moyenne considérée est de $1.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$.

– "Clos de Mourlan" (3) :

Les courbes sont ici perturbées par le changement de débit en cours de pompage (la courbe de descente ne se stabilisant pas le débit a dû être ralenti pour éviter le dénoyage de la pompe). Les valeurs de transmissivité sont plus faibles que celles obtenues lors de la remontée. La remontée n'a pas été perturbée par les effets de puits.

La valeur moyenne considérée est de $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$.

– "Mourlan" (4) :

Les courbes de descente, du moins pour le puits, ne présentent pas de palier aussi prononcé que les précédentes. L'effet de capacité du puits est donc moins important. Les valeurs obtenues pour la remontée sont plus fortes que pour la descente.

La valeur moyenne considérée est de $4.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$.

– "Franquet" (6) :

Les courbes sont similaires aux précédentes mais les pentes sont plus faibles. Les transmissivités observées lors de la remontée sont très proches de celles observées lors de la descente.

La valeur moyenne considérée est de $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$.

– "Le Pot Fendu" (7) :

Le pompage ayant lieu dans le piézomètre, à faible débit, l'influence de celui-ci au niveau du puits est très faible (courbe quasi horizontale). La courbe de descente présente une forme en S comme celles de "Grave" et de "Sainte-Livrade".

La valeur moyenne considérée est de $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$.

– "Pradet" (8) :

Les courbes ressemblent à celles observées aux points 4 et 6. Il n'y a pas de stabilisation au bout de 4 heures de pompage. Les transmissivités sont très proches entre descente et remontée.

La valeur moyenne considérée est de $1.2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$.

En conclusion, on distingue deux classes parmi les courbes de descente :

- la première comprend les courbes 1, 2 et 7 en forme de S laissant supposer qu'une alimentation retardée se manifeste : ceci peut s'expliquer par l'existence d'un chenal qui aurait lui aussi un certain effet capacitif : dans un premier temps la capacité du puits est sollicitée (chute rapide du niveau puisqu'il n'y a pas d'alimentation). Puis la "réserve" immédiate du chenal serait sollicitée à son tour ce qui provoquerait un amortissement de la descente (premier pallier). Enfin, une fois cette réserve épuisée les terrains moins productifs dont l'eau est plus difficilement mobilisable (éléments de plus faible granulométrie comme des sables par rapport à des graviers) seraient sollicités. L'alimentation au niveau du puits serait donc fortement ralentie ce qui expliquerait l'augmentation de la pente de la courbe ;
- la deuxième comprend les courbes 3, 5, 6 et 8 quasi linéaires laissant supposer qu'il n'y a pas d'alimentation retardée ou du moins, qu'elle se manifeste après plus de 4 heures de pompage.

La carte de répartition des transmissivités est représentée sur la *figure 8*.

La corrélation entre les coupes géologiques et la carte de répartition des transmissivités permet de constater que les zones où le toit de la molasse est le plus profond correspondent à des points où les transmissivités sont les plus élevées (points n°1, 3 et 4) et, où l'épaisseur des alluvions est la plus grande. Ces fortes transmissivités semblent s'aligner selon un axe quasi Est-Ouest.

L'absence de données lithologiques entre les points 5 et 7 ne permet toutefois pas de certifier la probable existence d'un chenal de direction N110 passant au niveau des points 1 et 3. La zone d'étude pourrait donc être divisée en trois domaines de transmissivités distinctes : un domaine sud passant sous une ligne "Frésonis"- "Sainte-Livrade", un domaine central correspondant au chenal et un domaine Nord passant au dessus d'une ligne "Cap du Bosc"- "Agnélis".

3.5. Modélisation préliminaire du processus de recharge artificielle

Un modèle préliminaire simplifié a été développé avant le lancement de l'opération de recharge artificielle. Son objectif était d'évaluer le débit maximal d'injection envisageable dans les conditions réelles de l'expérimentation.

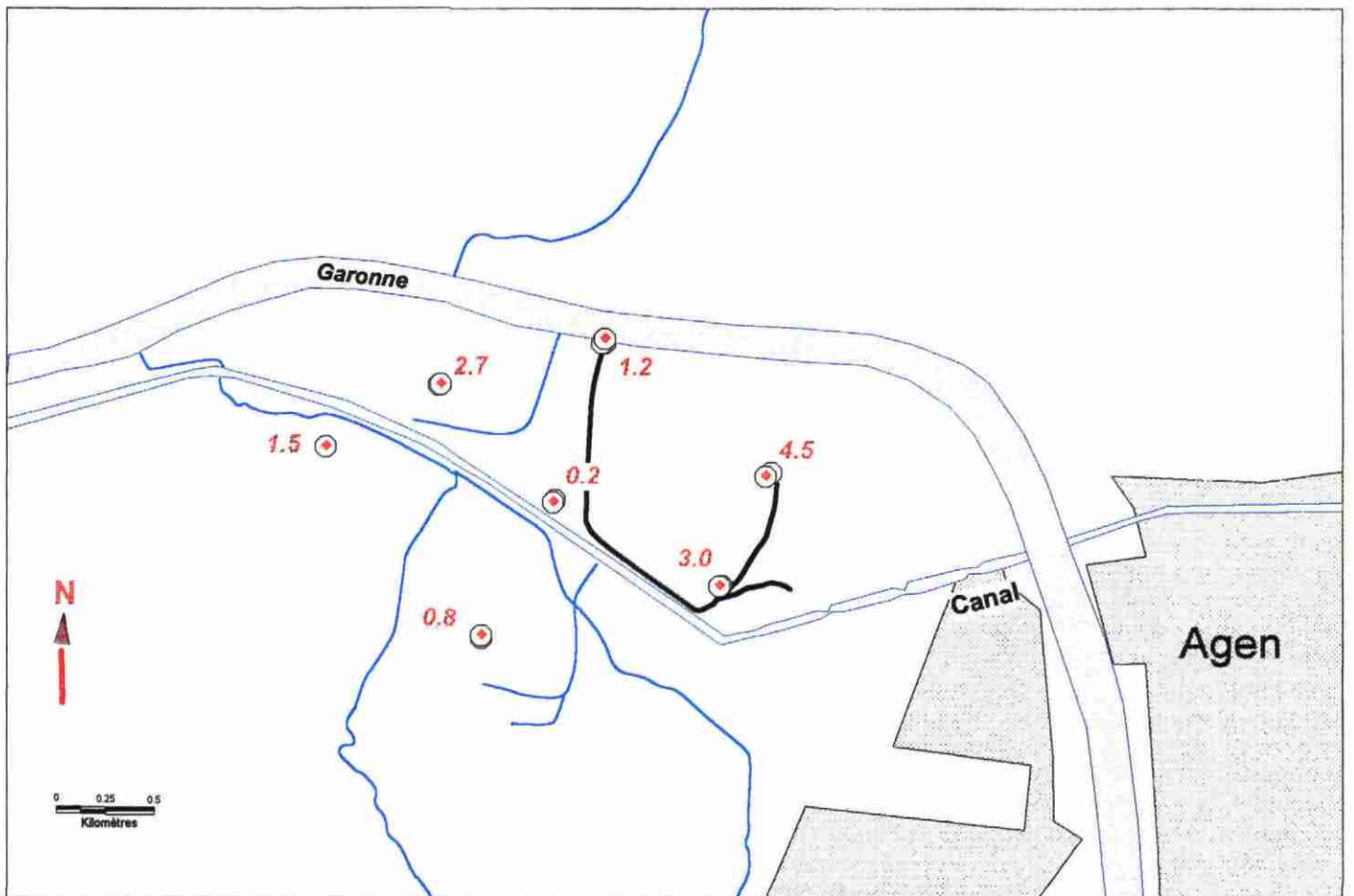


Figure 8 : Carte de répartition des transmissivités ($10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$).

Basé sur des hypothèses simples d'uniformité du milieu (perméabilité de 1.10^{-3} m/sec et coefficient d'emmagasinement de 7.5 %), le modèle préliminaire a permis de calculer qu'en maintenant le potentiel dans le fossé à un niveau voisin de la topographie, **un débit d'alimentation de 250 m³/h durant 3 mois permettrait de rehausser la nappe de 0.5 à 2.5 mètres sur toute la superficie du site.**

L'effet sur la piézométrie est représenté en *annexe 8*, en régime permanent puis en transitoire respectivement après 3 mois, 6 mois et 9 mois d'injection. Selon ce modèle, un volume plus important ferait déborder le fossé et inonderait le site.

En prenant une perméabilité de 2.10^{-3} m²/sec, un débit de 500 m³/h pourrait être injecté pour le même résultat, en admettant que le fossé puisse absorber un tel débit sans déborder.

C'est donc sur la base de ces résultats que les caractéristiques du dispositif d'alimentation ont été déterminées : puissance du matériel de pompage, et aménagement de la prise d'eau et du rejet au niveau du fossé notamment.

3.6. Mise en place du dispositif d'alimentation

Différents dossiers administratifs sont constitués dans le cadre de cette opération et en particulier les demandes d'autorisation temporaire :

- du domaine public fluvial auprès des Voies navigables de France (V.N.F.) pour les prélèvements effectués dans le canal du Midi, qui a aimablement fourni l'eau d'injection, et les travaux réalisés sur sa bordure,
- de prélèvement d'eau et de recharge artificielle au titre de la Loi sur l'eau du 3 janvier 1992.

La mise en place du dispositif d'alimentation comprend :

- le nettoyage du fossé du Pradet, qui consistait à l'origine en un curage de la couche de limons superficiels jusqu'aux graves sur toute la zone d'absorption du fossé. En réalité, le curage n'a été réalisé que partiellement pour diverses raisons dont des difficultés d'accès ou de stockage des déblais notamment. Ainsi, à plusieurs endroits, l'eau déversée dans le fossé s'est retrouvée être en contact directe avec les limons non évacués, dont les capacités d'absorption par infiltration et de restitution à la nappe par drainance sont largement limitées par rapport aux graves. Par ailleurs, des problèmes de colmatage ont été rencontrés ;
- le profil en long de ce fossé par un géomètre ;
- la réalisation d'une digue en amont du fossé ;
- l'achat et l'installation du matériel de pompage en bordure du canal ;
- l'installation d'un pluviographe enregistreur ;
- la caractérisation et une cartographie en pourcentage d'humidité de la couche superficielle du sol jusqu'à la nappe (2 à 4 m de profondeur).

La *figure 9* schématise la coupe de l'installation de pompage.

Un compteur installé à la sortie de la pompe permet le contrôle du volume d'eau injecté dans la nappe via le fossé en communication avec la zone de gravier de la nappe. Une ou deux fois par jour, le débit est contrôlé et ajusté en fonction de la hauteur d'eau dans le fossé et selon la pluviométrie. La vérification régulière (au moins une fois par semaine) de l'installation est nécessaire. Elle consiste à nettoyer les crépines et les grillages les protégeant ainsi qu'à ajuster la hauteur des crépines par rapport au fond du canal.

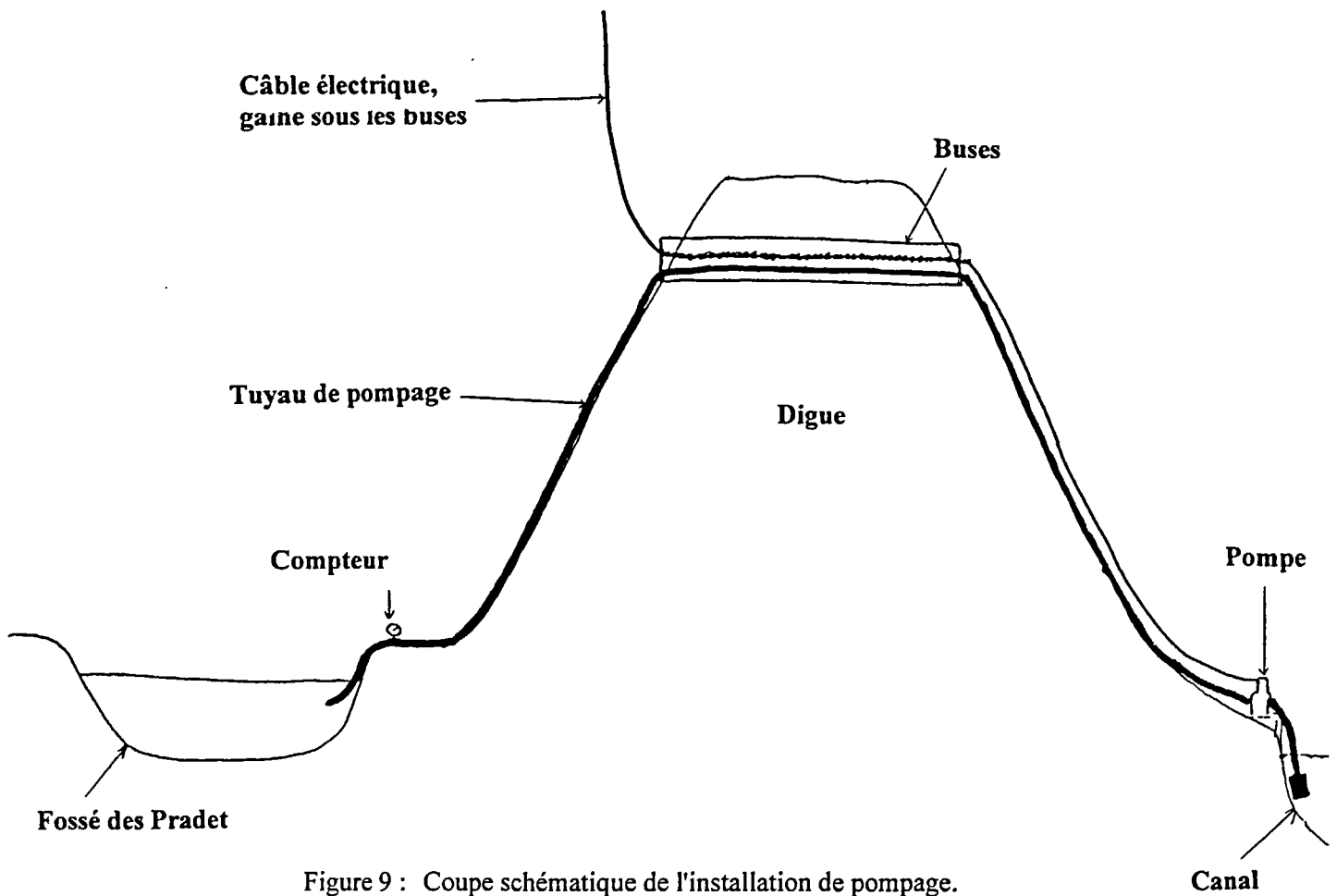


Figure 9 : Coupe schématique de l'installation de pompage.

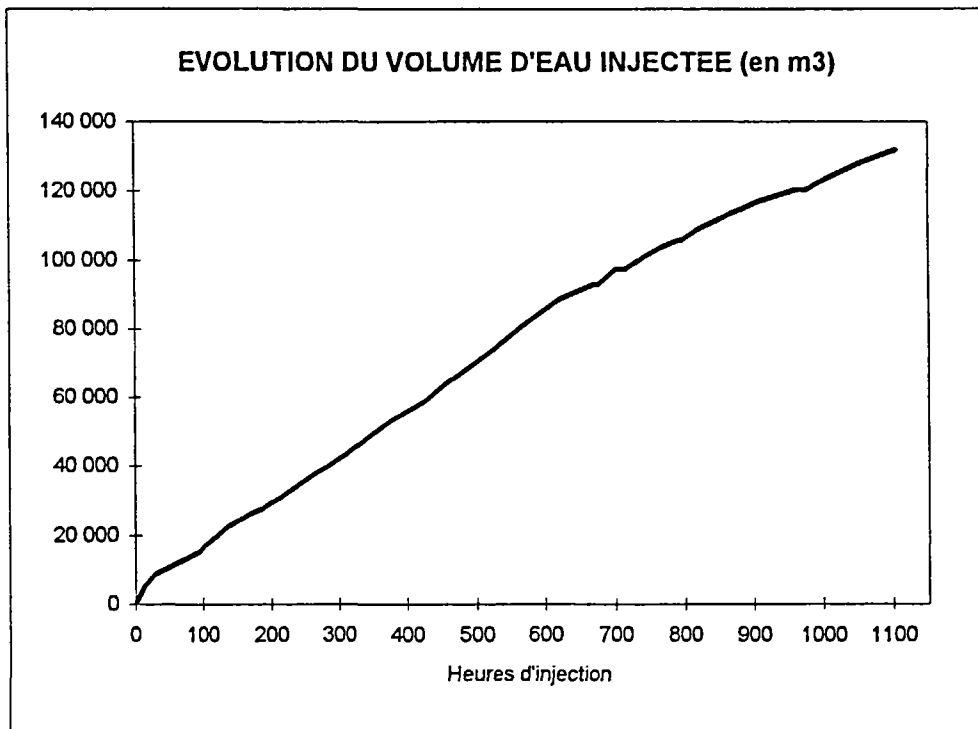


Figure 10 : Evolution cumulée de la quantité d'eau injectée entre le début et la fin de la réalimentation (48 jours d'infiltration).

Afin d'estimer les fuites au niveau de la vanne barrant le fossé à son extrémité aval, un petit barrage est réalisé à l'aide d'une planche percée d'un tuyau. Le débit de fuite est estimé à quelques litres par seconde.

L'injection d'eau se fait à environ 150 mètres à l'Est du pont de Frésonis grâce à deux pompes de surface de 130 m³/h chacune. Pour éviter une érosion trop importante des flancs du fossé un système de déversoir est mis en place. La *figure 10* montre l'évolution cumulée de la quantité d'eau injectée entre le début de la réalimentation au 4 octobre 1995 et la fin au 20 novembre 1995, soit après 48 jours d'infiltration.

Le débit de deux fois 130 m³/h n'a jamais été totalement appliqué lors de l'expérimentation compte tenu des facteurs de régulation au début, et de l'emmagasinement effectif du fossé. Une moyenne de 2750 m³/jour (115 m³/h) a été appliquée sur toute la période d'injection. En réalité, une croissance régulière du volume est observée jusqu'au 29^{ème} jour (700^{ème} heures sur la *figure 10*). A partir de cette date, les capacités d'absorption du fossé diminuent en raison du colmatage vraisemblablement. Par exemple, le volume injecté entre le 13 et le 30 octobre est de 56125 m³, soit 140 m³/h en moyenne, alors qu'il n'est que de 19410 m³ entre le 4 et le 12 novembre, soit 90 m³/h en moyenne.

Un volume total de 132000 m³ a été injecté jusqu'au 20 novembre, l'expérimentation ayant été interrompue au moment de la mise au chômage du canal du Midi.

3.7. Suivi piézométrique

Parallèlement à ce suivi du volume injecté, un contrôle hebdomadaire de la piézométrie de la nappe est effectué. Après l'arrêt de la recharge artificielle les relevés de mesure ont continué pendant 56 jours.

Le *chapitre 4* traitant de la modélisation du processus de réalimentation artificielle, reprend l'analyse des données recueillies. Très sommairement, notons toutefois quelques observations :

- la carte piézométrique montre un fort drainage de la nappe par la Garonne avec un gradient hydraulique plus important au nord de la zone d'étude.
- les mesures piézométriques indiquent une élévation régulière et soutenue de la nappe à proximité du fossé durant les trois premières semaines de recharge. Par la suite, l'élévation s'atténue nettement à proximité du fossé mais elle s'étend jusqu'à plusieurs centaines de mètres de celui-ci.
- la bulle d'eau formée dans le sous-sol ne se répartit pas symétriquement de part et d'autre du lieu d'injection.

3.8. Analyses d'eau

Pour connaître l'impact de l'injection sur les paramètres physico-chimiques et biologiques de la nappe alluviale, un suivi régulier de la qualité de l'eau est mené à bien.

Une fois par semaine, des prélèvements d'eau dans le canal et la nappe sont analysés à l'aide d'une sonde multiparamètres. Les mesures portent sur des paramètres physico-chimiques non conservatifs (pH, nitrates, nitrites, ammonium) et bactériologiques.

Par ailleurs, des analyses plus complètes sont réalisées avant, au cours et après l'expérimentation de recharge artificielle.

Les valeurs de pH se révèlent homogènes sur l'ensemble de la nappe alluviale et beaucoup plus basiques dans le canal et la Garonne. Comme on pouvait l'imaginer, le fait d'injecter de l'eau basique (pH = 8) dans un milieu neutre à acide provoque une élévation du pH de la nappe (*figure 11*). Les processus naturels d'acidification attendus au cours des semaines suivant la fin de l'injection n'ont pas été démontrés.

Les conductivités restent homogènes au niveau de la nappe (environ 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$), ce qui dénote une minéralisation assez élevée, contrairement au canal et à la Garonne où de faibles valeurs ont été mesurées. Les valeurs plus faibles observées dans la nappe au Nord du canal s'expliquent vraisemblablement par dilution éventuelle avec les pertes d'eau du canal.

La répartition des taux de nitrates (*figure 12*) tend à confirmer le fait précédent puisque l'on remarque que les concentrations sont beaucoup plus faibles sur les puits situés à proximité et au Nord du canal. L'eau prélevée dans un puits situé à proximité du fossé voit sa teneur en nitrates fortement chuter après le début de l'expérimentation et atteindre une valeur voisine de celle de l'eau injectée. Il semble donc qu'un phénomène de dilution de l'eau de la nappe par l'eau injectée se soit produit.

Cette observation est prometteuse et permet d'envisager de remettre en service des puits de captage pour l'alimentation en eau potable (abandonnés pour des raisons de surteneur en nitrates), et préserver les nappes profondes de la région.

Entre le 3 et le 17 octobre, une bonne qualité bactériologique de l'eau des puits observés a été constatée. Celle du canal du Midi s'est avérée médiocre. Mais à partir du 23 octobre, les résultats d'analyses deviennent très irréguliers et difficilement interprétables en ce qui concerne l'eau de la nappe (*figure 13*).

Les analyses plus complètes -hydrocarbures totaux, métaux lourds, azote Kjeldahl, oxydabilité au permanganate de potassium, éléments majeurs- effectuées sur des échantillons prélevés dans la Garonne, le canal et au niveau des puits 4 et 5, n'ont révélé aucune anomalie : les teneurs ont très peu varié entre le début et la fin de l'opération. Les résultats des prélèvements effectués respectivement, la dernière semaine d'août 1995 (résultats du 5 octobre 1995) et le 21 novembre 1995 (résultats du 3 janvier 1996), sont présentés en *annexe 9*.

4. MODÉLISATION

Un modèle numérique bidimensionnel a été développé aux différences finies sur la base des observations. L'objectif se voulait successivement :

- de caler le modèle sur les données mesurées caractéristiques du site, tout d'abord en régime permanent, puis en régime transitoire avec prise en compte de la réalimentation artificielle. Une fois calé, le modèle est sensé pouvoir reproduire numériquement le fonctionnement hydrodynamique naturel du site étudié ;
- de simuler différents scénarios hypothétiques de réalimentation artificielle plus soutenue, par exemple en durée et/ou en quantité -volume ou débit d'injection doublé, triplé ... ceci afin de pouvoir apprécier la réaction du système hydrodynamique face à de nouvelles applications.

Le modèle est construit sur la base des données recueillies et interprétées en terme de connaissance du contexte géologique et hydrogéologique du système.

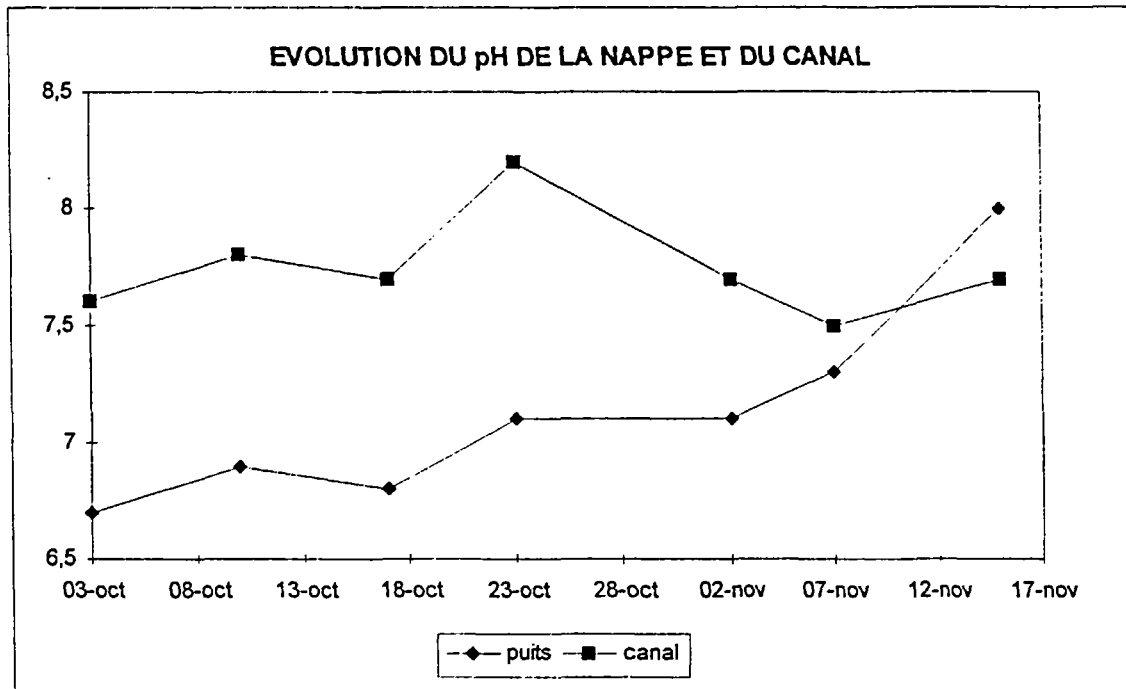


Figure 11 : Evolution du pH de la nappe et du canal.

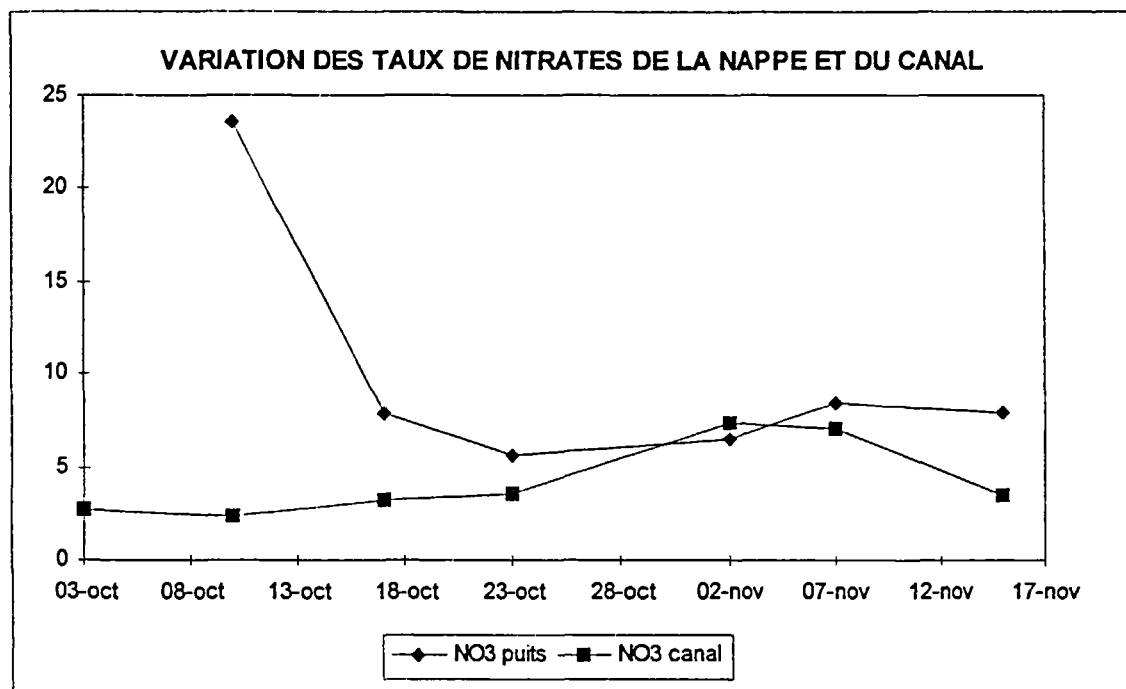


Figure 12 : Variation des taux de nitrates de la nappe (puits situé à proximité du fossé d'alimentation) et du canal.

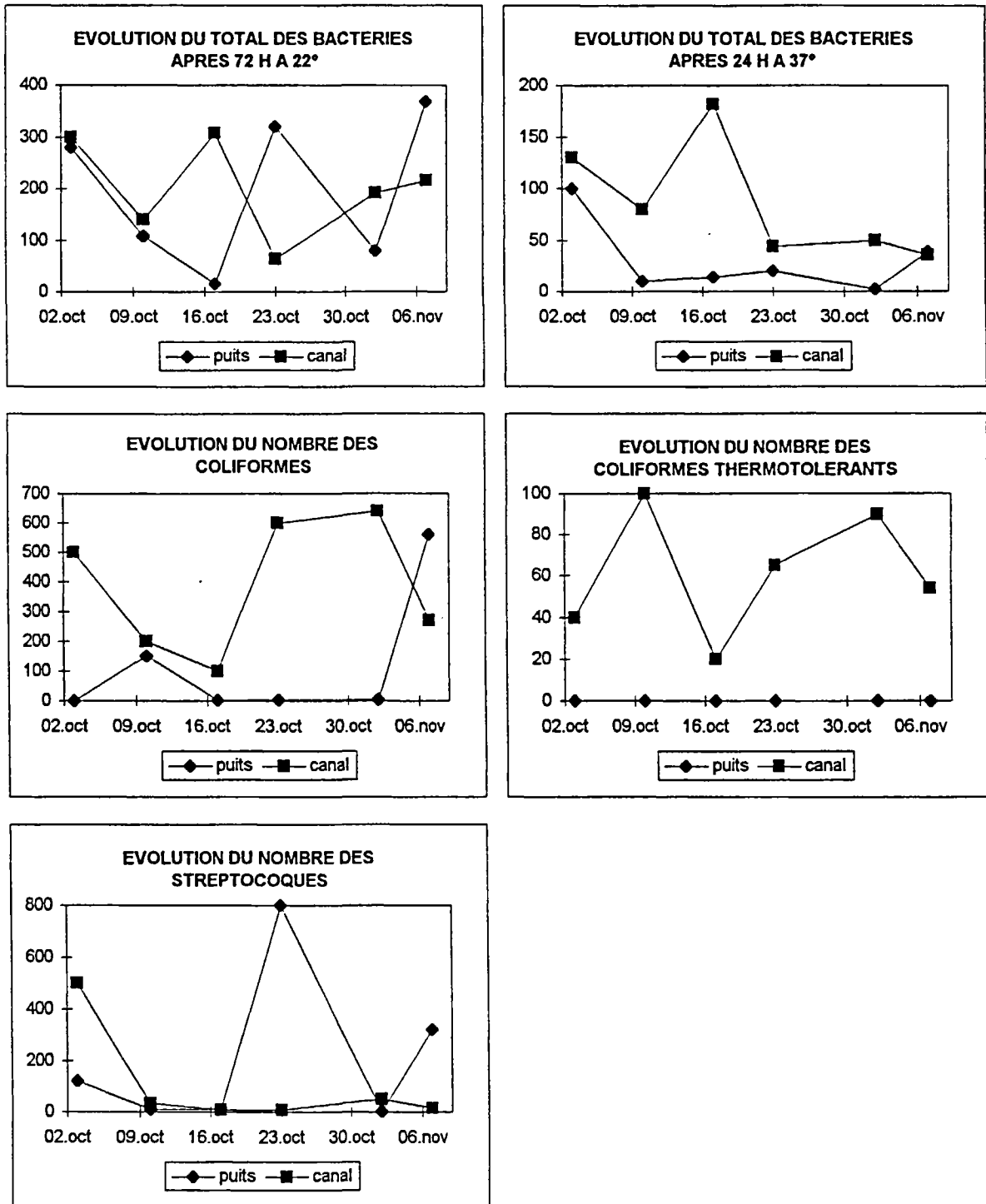


Figure 13 : Evolution de la bactériologie dans la nappe (puits situé à proximité du fossé d'alimentation) et le canal.

Il intègre par conséquent les informations sur :

- la profondeur du substratum molassique et du toit de la nappe (limons),
- l'épaisseur de l'aquifère,
- les paramètres hydrodynamiques calculés des pompages d'essai,
- les mesures de niveaux (piézométriques, Garonne),
- les débits injectés dans le fossé, etc.

4.1. Modèle conceptuel

Le modèle est construit de la façon suivante :

- type : monocouche ;
- mailles : carrées de 100 m de côté au nombre de 1579 (*figure 14*) dont 1440 mailles de calcul ;
- observations : 22 puits ou piézomètres de référence sur lesquels les niveaux ont été enregistrés ;
- couche : 1 seule, perméable, comprise entre deux surfaces étanches (substratum molassique et limons) sauf au droit du fossé d'injection ;
- limites : la nappe s'écoule des coteaux au sud vers la Garonne au nord et à l'est ; ces deux limites sont à potentiel imposé (potentiel variable de la Garonne) ;
- transitoire : 104 pas de temps de 1 jour chacun.

Le débit injecté dans le fossé (représenté par 11 mailles) est discrétisé sur tout le fossé de manière à simuler une infiltration homogène sur toute sa longueur. Ces débits sont arbitraires car en réalité l'infiltration varie selon les propres caractéristiques du milieu, et comme l'eau stagne avant de s'infiltrer, il aurait été préférable d'appliquer des potentiels mesurés dans le fossé.

Le calage se réalise tout d'abord par modèle inverse sur la carte des observations au temps $t=0$ et se fait sur une sous-zone du modèle en masquant les parties qui ne contiennent pas d'observation. Sur le premier champ de perméabilité obtenu, des classes sont définies pour réduire le nombre de paramètres à optimiser (égal au nombre de mailles dans la première étape). Chaque classe correspond à une zone dans laquelle la valeur médiane est imposée comme point de départ de l'optimisation.

Une seconde optimisation est ensuite réalisée en permanent cette fois sur les six zones de perméabilité définies.

Enfin, on passe à une optimisation en transitoire sur les perméabilités et les coefficients d'emmagasinement libre et captif (une zone pour chacun) ; huit paramètres sont à optimiser. Le calage se réalise en donnant un poids fort aux niveaux observés.

4.2. Résultats du calage

Les premiers calculs permettant de caler les paramètres hydrodynamiques du milieu aboutissent à la carte des charges optimisées au pas de temps zéro, c'est-à-dire avant le déversement. Les données calculées sont représentées sur les figures 15 et 16, respectivement sur toute la zone d'étude (*figure 15*), et sur la zone masquée réduite au secteur d'observation (*figure 16*).

L'évolution des niveaux calculés et observés en régime transitoire au cours des 104 jours d'expérimentation est représentée graphiquement en *annexe 10*.

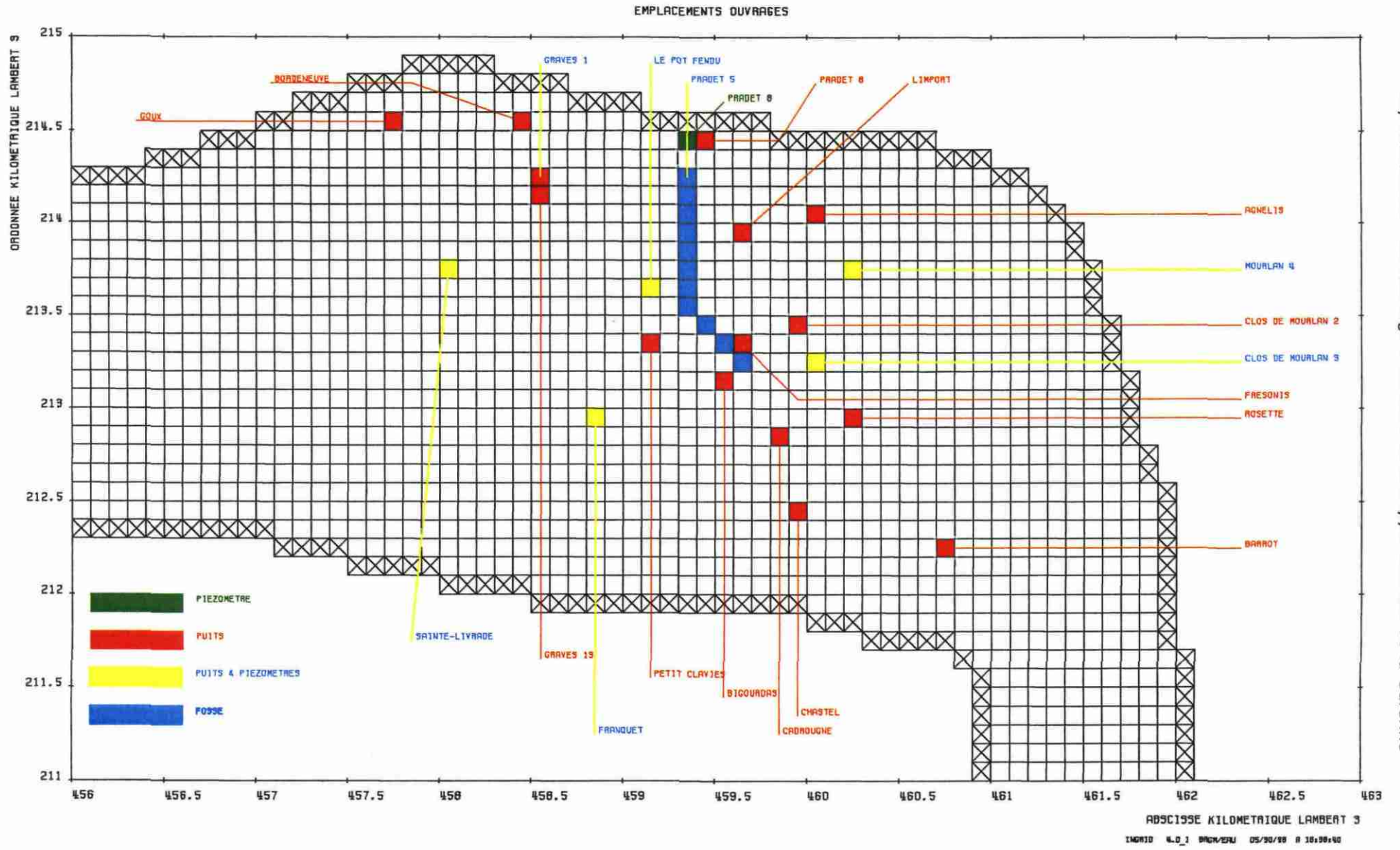
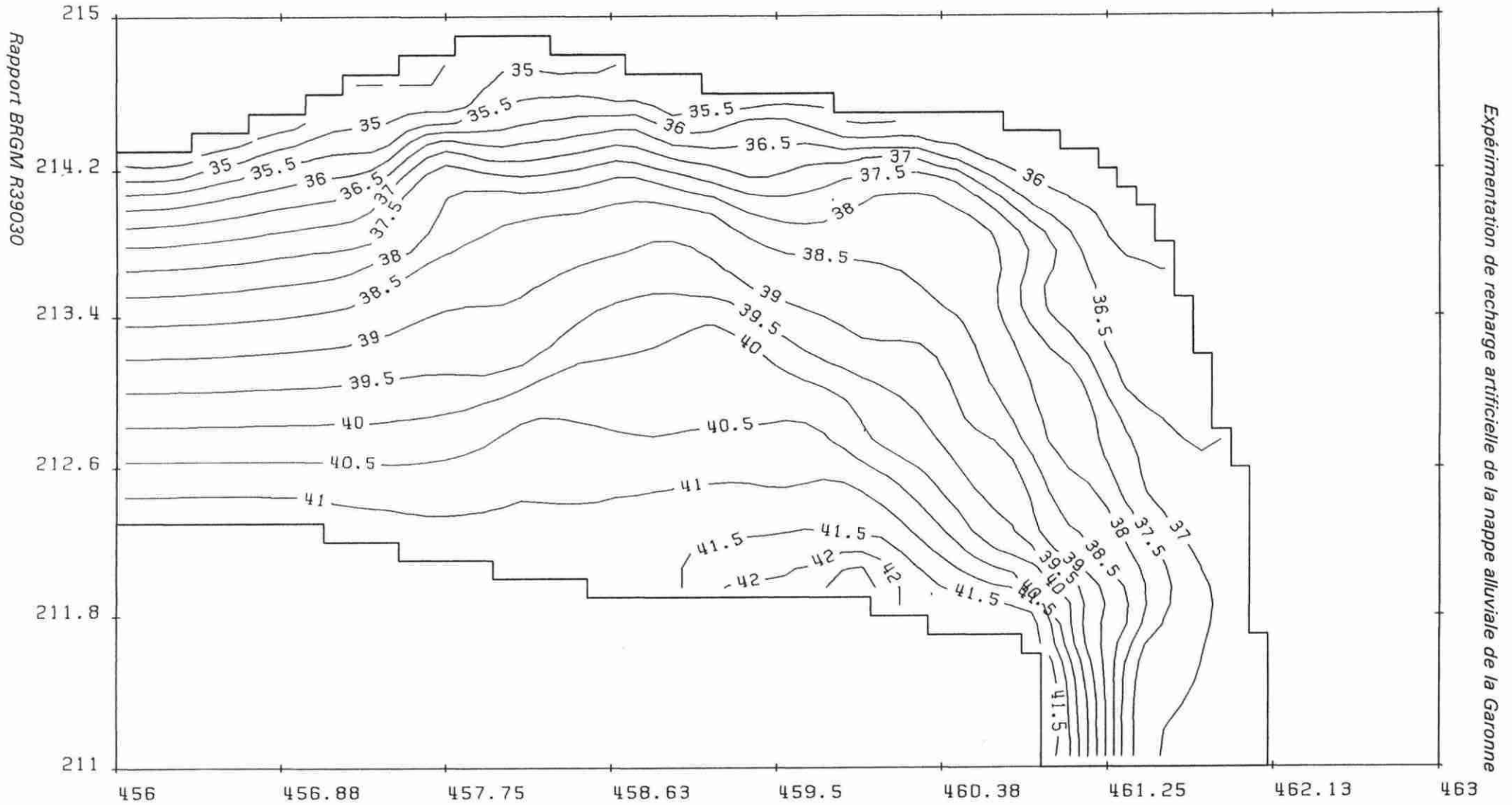


Figure 14 : Maillage utilisé pour la modélisation du processus de recharge artificielle.

CHARGES SIMULEES LE 04/10/95 (OPTIMISATION)

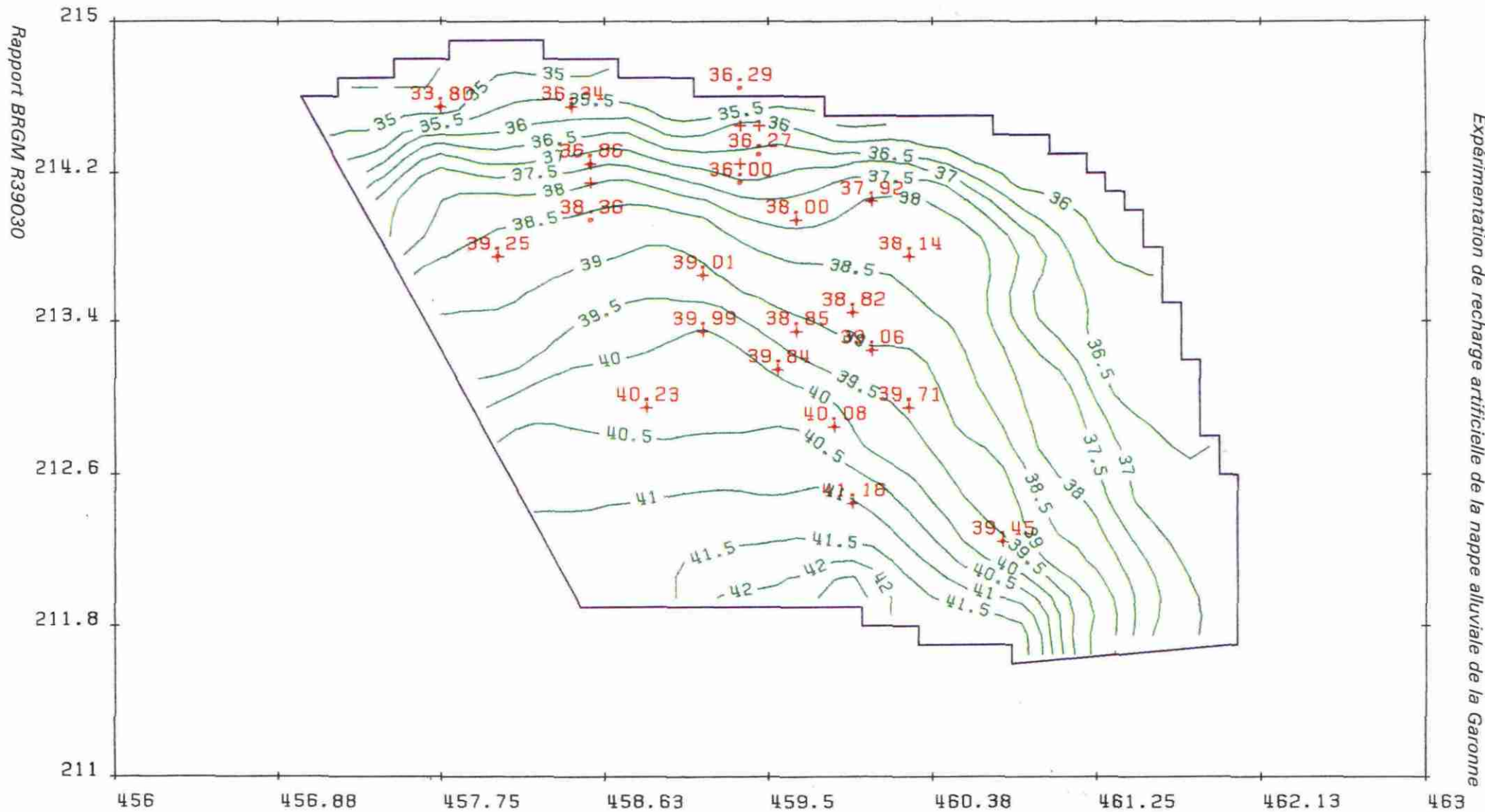


Rapport BRGM R39030

Experimentation de recharge artificielle de la nappe alluviale de la Garonne

Figure 15 : Carte piézométrique calculée sur la zone d'étude (au pas de temps zéro).

CHARGES SIMULEES LE 04/10/95 (OPTIMISATION)



Rapport BRGM R39030

Experimentation de recharge artificielle de la nappe alluviale de la Garonne

Figure 16 : Carte piézométrique calculée sur la zone d'étude réduite au secteur d'observation (au pas de temps zéro).

La recharge artificielle perturbe visiblement les niveaux de la nappe dans certains puits, mais les remontés puis les baisses observées des niveaux restent localisées autour du fossé. L'influence de la recharge s'observe sur une superficie d'environ 1.5 km². On note :

- aucune influence dans les ouvrages très éloignés de la zone de recharge : Barroy, Petit Clavies, Franquet et Chastel. Notons que la courbe calculée sur Petit Clavies montre une légère fluctuation des niveaux ;
- une fluctuation des niveaux très marquée due aux variations de niveaux de la Garonne sur Goux et Bordeneuve ;
- des variations de niveaux non négligeables observés et calculés à Mourlan 4 et Agnelis : éloignés du fossé leurs niveaux semblent pourtant influencés ;
- une très faible influence plus près du fossé : Bigourdas, Clos de Mourlan 3, Cardourgne et Rosette. Ces deux derniers, légèrement plus éloignés du fossé sont d'ailleurs moins influencés que Bigourdas et Clos de Mourlan 3 ;
- une influence bien marquée aux Pradet 5 et 8, Pot fendu et Frésonis, au voisinage du fossé d'infiltration.

Une exploitation cartographique de ces résultats permet d'apprécier :

- le déplacement du "cône de réalimentation" vers l'Est du fossé : les variations observées de niveaux aux temps $t = 26$ j (après le début de l'injection), 68 j (20 j après l'arrêt des pompes) et 104 j (56 j après l'arrêt des pompes soit à la fin du suivi), et les variations de niveaux entre le début et la fin de la recharge, observés et calculés, sont présentées respectivement sur les *figures 17 et 18* ;
- les limites du calage, qui, on s'en rend compte, n'est pas parfait.

Cette dernière observation est liée au manque de précision des informations apportées lors de l'examen du contexte hydrogéologique. En effet les paramètres hydrodynamiques connus par les sept pompages d'essai s'avèrent insuffisants pour bien comprendre le fonctionnement global du système. La localisation des chenaux graveleux et limoneux est mal connue, et le contraste entre les zones de forte et de plus faible perméabilité semble influencer fortement le fonctionnement du système. L'utilisation d'une méthode de calage consistant à définir des zones de perméabilité a été utilisée en raison de ce manque d'information.

D'autre part, la zone non-saturée n'a pas été prise en compte. En effet, des mesures de pourcentages d'humidité de la couche superficielle du sol jusqu'à la nappe (2 à 4 m de profondeur) ont été effectuées (prélèvements à la tarière), mais les résultats montrent que les eaux de pluie n'ont pas atteint la nappe. Toutefois, la recharge artificielle induit localement une mise en charge de la nappe, et la limite étanche considérée au sommet de la couche modélisée ne retranscrit pas la réalité car les limons, bien que peu perméables, peuvent emmagasiner l'eau de la recharge. Modéliser la zone non-saturée aurait peut-être apporté un meilleur calage ...

Enfin, les problèmes de calage observés en fin d'expérimentation sont liés à la remontée de la Garonne. Il est très difficile alors de quantifier l'influence de la Garonne sur les fluctuations piézométriques, car :

- d'une part, suite à l'arrêt du déversement, les niveaux de la nappe baissent en bordure du fossé mais continuent voire commencent à augmenter dans les zones éloignées du fossé ;
- d'autre part le niveau de la Garonne augmente en raison des précipitations. Les observations dans les ouvrages sous influence du fleuve sont alors difficilement interprétables, d'autant plus que la montée du niveau de la Garonne augmente son rayon d'influence sur la nappe.

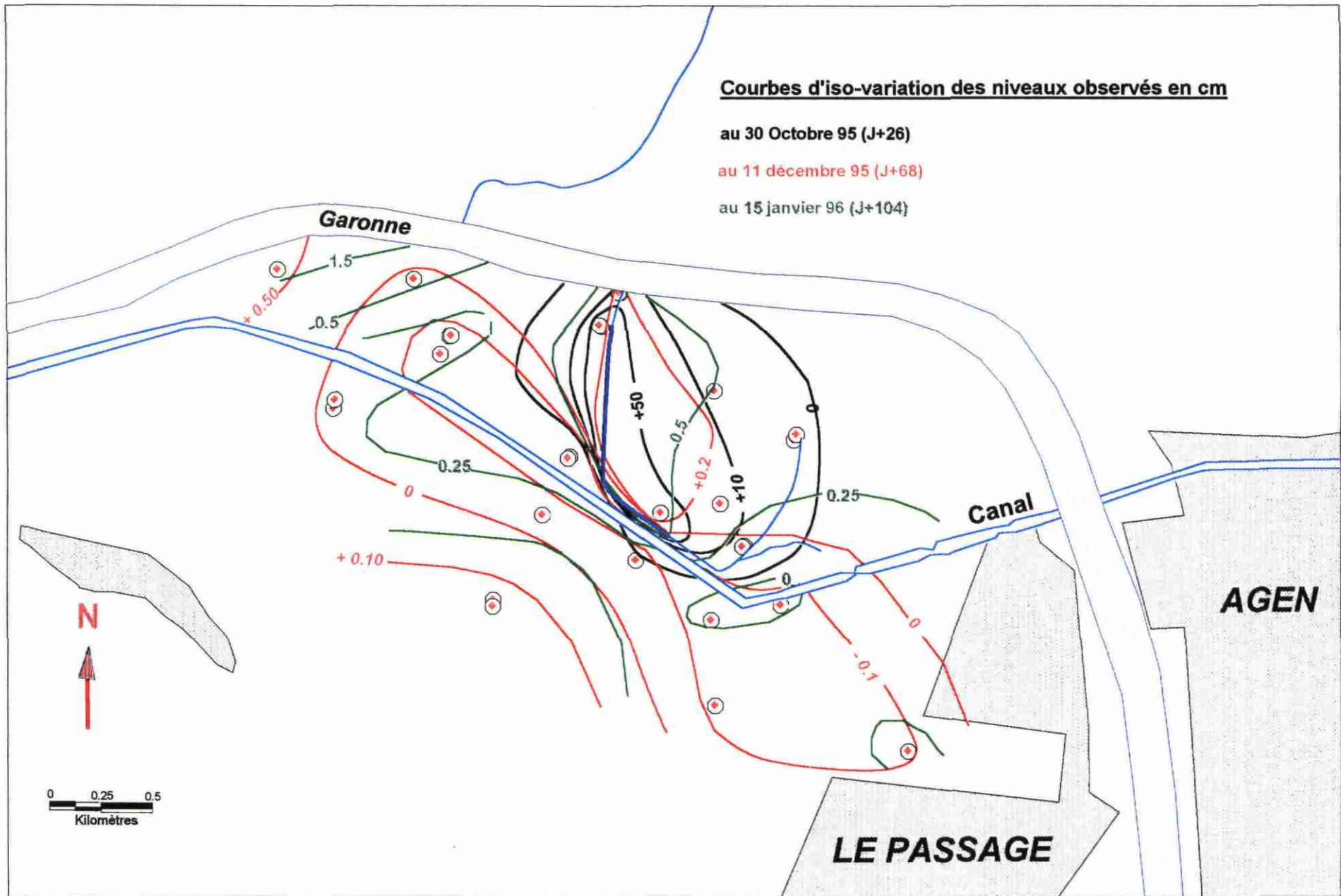


Figure 17 : Variations observées de niveaux aux temps t = 26 j, 68 j et 104 j.

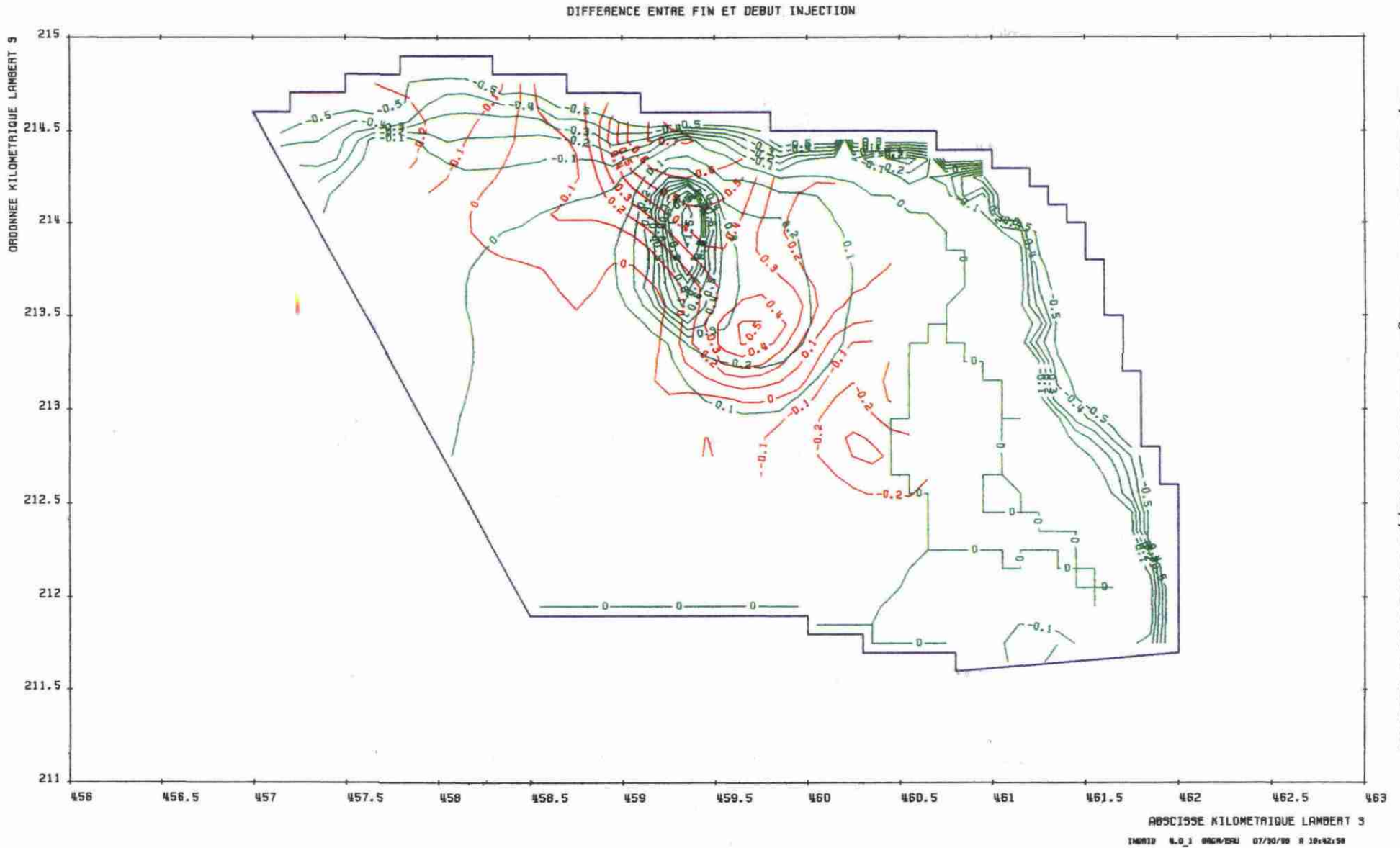


Figure 18 : Variations de niveaux entre le début et la fin de la recharge, observés (rouge) et calculés (vert).

Les charges calculées, avec et sans injection, ont été comparées afin de se rendre compte de l'influence de la recharge artificielle sur le milieu, et particulièrement de l'ampleur du phénomène de stockage dans l'espace et dans le temps. Les graphiques représentés en *annexe 11* montrent :

- une influence évidente de la recharge artificielle sur l'évolution des niveaux de la nappe : à Barroy, Goux et Bordeneuve, les deux courbes sont confondues car l'influence de la recharge n'atteint pas ces zones éloignées. Sur Franquet, Petit Clavies et Chastel, les niveaux ont légèrement été influencés. Sur Mourlan 4 et Agnelis, situés au nord-est du fossé, cette influence est plus flagrante. La recharge influence également Bigourdas et Mourlan 3. Le stockage le plus marqué s'observe aux alentours du fossé, au Pradet 5 et 8, au Pot Fendu et à Frésonis.
- le déplacement très clair, du fossé vers l'Est, de l'onde liée à l'injection ;
- un équilibre non rétabli 56 jours après l'arrêt du déversement. Le maximum des niveaux calculés se situe entre 25 et environ 60 jours selon l'éloignement du fossé. L'exploitation d'une partie du volume injecté pendant 48 jours est donc toujours possible deux mois plus tard.

Ces observations permettent, selon les niveaux calculés par le modèle, d'évaluer un volume disponible de l'ordre de 70000 à 80000 m³ un mois après l'arrêt de l'injection, et de 20000 à 30000 m³ à la fin du suivi, soit environ deux mois plus tard ; ceux-ci répartis sur une superficie d'environ 1.5 km².

4.3. Simulation - Extrapolation à une recharge intensive

Le modèle bien que partiellement adapté aux réelles conditions hydrogéologiques du site du Passage près d'Agen a été utilisé dans le cadre de simulations prévisionnelles. En d'autres termes, un débit supérieur au débit effectivement injecté a été appliqué dans le modèle et discrétisé tout au long du fossé de manière à avoir une infiltration homogène.

Ce débit est de 4800 m³/jour, soit 200 m³/h, injecté pendant 100 jours. La simulation est réalisée sur 200 jours au total, ce qui donne 100 jours d'observation après l'arrêt supposé de l'injection.

Un total de 480 000 m³ est ainsi emmagasiné par l'aquifère, soit un volume quatre fois supérieur à celui réellement injecté pendant l'expérimentation ; le temps d'injection de la simulation étant environ le double.

Les résultats (*annexe 12*) font état d'une augmentation importante des niveaux par rapport à l'expérimentation réalisée fin 1995, mais la zone bénéficiant du volume injecté n'est que faiblement élargie.

Le stockage de cet important volume d'eau apporterait des avantages évidents quant à l'utilisation différée de l'eau emmagasinée compte tenu des observations suivantes :

- trois mois plus tard le maximum des niveaux est atteint dans les puits proches du fossé ;
- quatre mois plus tard le maximum des niveaux s'observe dans les puits plus éloignés du fossé.
- au bout de 200 jours l'équilibre n'est toujours pas rétabli. L'exploitation du volume injecté est donc toujours possible 6 mois plus tard.

Il s'agit donc de se donner les moyens pour exploiter la capacité maximale de l'aquifère.

CONCLUSION

Il s'agit aujourd'hui d'apporter aux agriculteurs une réserve d'eau mobilisable en période critique, de juger de son utilisation effective au cours de l'été, et d'apprécier le véritable impact socio-économique de la méthode.

Compte tenu des données recueillies sur le terrain avant, pendant et après le processus de recharge expérimenté au Passage près d'Agen, le meilleur calage possible a été obtenu en transitoire sur les hypothèses choisies. Ce calage est imprécis, mais une amélioration est envisageable. Une application en vraie grandeur de ce processus de recharge artificielle est préconisée pour l'an prochain. Un débit de 4800 m³/jour, soit 200 m³/h, peut être injecté pendant 100 jours.

Il conviendrait alors, dans ce cadre, d'améliorer la connaissance du milieu afin de construire un modèle numérique mieux adapté aux réelles conditions hydrodynamiques du site, à savoir :

- caractériser plus précisément les zones limoneuses et graveleuses sur toute la zone (également dans le fossé) pour minimiser les estimations des paramètres hydrodynamiques (pompages d'essai) ;
- suivre la piézométrie en davantage de points notamment en bordure du site (présentant des lacunes) pour faciliter le calage en permanent et en transitoire ;
- curer proprement le fossé jusqu'aux graves pour favoriser l'infiltration et limiter les phénomènes de colmatage ;
- étudier le fonctionnement réel du fossé d'infiltration, en suivant l'évolution des potentiels sur toute sa longueur ; discrétiser des potentiels et non des débits tout au long du fossé dans le modèle induira une infiltration résultant des paramètres hydrodynamiques effectifs ;
- mesurer les débits des fuites à l'aval du fossé, au niveau de la vanne, et le débit des flux (sources) se jetant dans la Garonne.

Le devenir d'un outil tel que le modèle développé dans le cadre de la réalimentation artificielle réalisée au Passage près d'Agen, est prometteur. **Totalement adapté au fonctionnement réel du système hydrodynamique, ce modèle pourrait être intégré aux procédures de gestion locale des ressources en eau.** Des simulations de toutes les possibilités locales d'exploitation sont alors envisageables chaque année en fonction par exemple de la climatologie réelle de l'hiver et de scénarios climatiques pour les mois à venir.

L'impact socio-économique de cette étude, qui complétera le présent rapport, sera évalué dans le cadre du projet par l'ACMG dès la fin de la période des irrigations actuelles.

ANNEXE 1

EXEMPLES D'ÉTUDES BASÉES SUR L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE

EXEMPLES D'ÉTUDES BASÉES SUR L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE

LEYDE (Pays-Bas) :

La nappe des dunes de Leyde, est essentiellement alimentée par les pluies d'hiver. En été la demande d'eau croît au moment où la nappe a naturellement tendance à s'affaisser par écoulement au pied des dunes.

L'opération d'alimentation artificielle a pour but d'augmenter les ressources disponibles en saison sèche. Elle consiste à récupérer les eaux de drainage naturel dans les fossés aménagés spécialement à cet effet au pied des dunes, et à les réinjecter au sommet par l'intermédiaire de bassins ou de puits peu profonds.

La distance entre les ouvrages d'injection et les forages de reprise est déterminée de façon à laisser séjourner l'eau infiltrée environ 2 mois dans le terrain sans que les pertes vers les exutoires naturels soient considérables. Une partie de l'eau consommée en été a donc accompli presque deux cycles souterrains.

L'injection s'étend sur 4 mois, les volumes mis en jeu s'élevant à environ un million de mètres cubes.

MANHATTAN BEACH (U.S.A., Californie)

Une nappe côtière, épaisse de plusieurs dizaines de mètres, a pour gisement des graviers sableux recouverts par une couche d'argile qui la maintient captive.

Sous l'effet d'une exploitation intensive, le niveau de la nappe est rabattu au-dessous du niveau de la mer, avec en certains endroits un rabattement de plus de 15 m. Comme il était prévisible, l'eau de mer envahit la nappe et se substitue à l'eau douce sur 600 m à partir du rivage. Au delà, l'eau salée progresse de 450 m en formant un biseau.

En 1953 le *Los Angeles Flood Control District* prend des mesures afin de repousser l'invasion saline. A titre expérimental huit puits d'injection sont mis en place à 600 m de la côte. L'eau servant à l'injection est pompée dans la rivière Colorado et subit un traitement partiel.

Des essais préliminaires, sur un puits, paraissent alors démontrer qu'un espacement maximum de 150 m entre les puits permet de réaliser une barrière d'eau douce continue. En fait, on constate que les " bulbes " d'eau douce de chaque puits se rejoignent à leur sommet mais restent toujours séparés à la base de la couche aquifère, ménageant des " chenaux " salins par lesquels l'eau de mer continue à migrer vers l'intérieur des terres. L'implantation du phénomène est accrue du fait d'irrégularités, imprévues, du substratum.

Cette réalisation a fait l'objet d'une publication dans *Advance in Hydroscience* (65).

En conclusion, le procédé ne peut être parfaitement efficace qu'à la condition de connaître parfaitement le contexte hydrogéologique et de prendre de forts coefficients de sécurité.

ANNEXE 2

GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE DE LA VALLÉE DE LA GARONNE

GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE DE LA VALLÉE DE LA GARONNE

D'Est en Ouest, le fleuve Garonne traverse une plaine tertiaire remplie de sédiments d'âge Aquitanien et Burdigalien (Miocène) et d'âge Stampien (Oligocène). Les sédiments du Stampien sont des argilites et des marnes sableuses de faible perméabilité. Non aquifères et faisant jusqu'à 300 m d'épaisseur, ils représentent le substratum molassique tertiaire (les molasses de l'Agenais) du réservoir alluvial de la basse plaine. Compte tenu de la faible perméabilité des reliefs légèrement vallonnés entourant les terrasses alluviales, plusieurs petits cours d'eau courent à travers la plaine.

Le matériel alluvial -daté du Würm- de la basse plaine constitue un réservoir de bonne perméabilité qui est exploité pour l'irrigation des cultures. Il est composé de 6 à 10 m de limons, sables, graviers et galets (1 à plus de 10 cm de diamètre) ; les limons superficiels, déposés au Flandrien, sableux en bordure de Garonne, deviennent plus argileux quand on se rapproche de la première terrasse. En périphérie, on observe un enrichissement de 1 à 2.5 m d'épaisseur de colluvions issues des versants.

Le remplissage de la plaine correspond aux :

- alluvions actuels de la Garonne,
- alluvions de la basse plaine,
- alluvions de rivières,
- alluvions de la basse terrasse,
- laissées limoneuses d'inondation.

Sur les plateaux de la rive gauche subsistent des placages d'alluvions plus anciennes des moyennes et hautes terrasses qui n'intéressent pas la plaine alluviale.

La Garonne, troisième rivière en France par son débit naturel, a montré des niveaux très bas ces quelques dernières années, en raison du manque de pluie et de l'augmentation résultante des prélèvements. Par conséquent, le niveau dynamique de la nappe a chuté supportant les périodes d'irrigation estivale, et les actions de lutte contre le gel très répandues dans la région d'Agen en hiver et au printemps.

La carte piézométrique de ce secteur montre que, dans son ensemble, la nappe alluviale est drainée par la Garonne, les gradients hydrauliques étant les plus faibles dans la partie Ouest du département de Lot-et-Garonne.

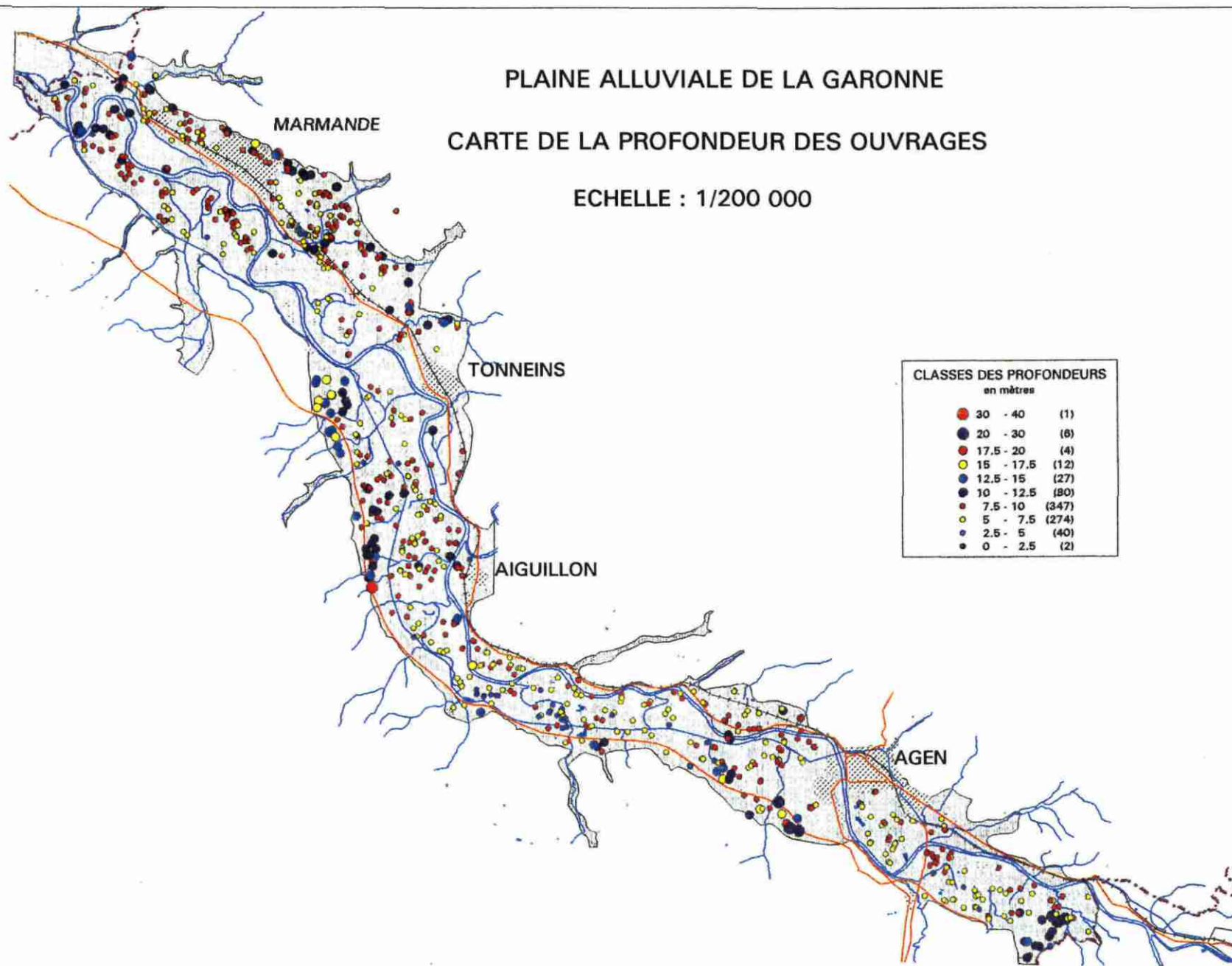
La nappe est comme perchée au dessus du niveau de la Garonne.

ANNEXE 3

**DOCUMENTS CARTOGRAPHIQUES SYNTHÉTISANT
L'INFORMATION RECUEILLIE LE LONG
DE LA ZONE D'ÉTUDE (VALLÉE DE LA GARONNE)**

PLAINE ALLUVIALE DE LA GARONNE
CARTE DE LA PROFONDEUR DES OUVRAGES

ECHELLE : 1/200 000



PLAINE ALLUVIALE DE LA GARONNE

EPAISSEUR DU NON-SATURE

ECHELLE : 1/200 000

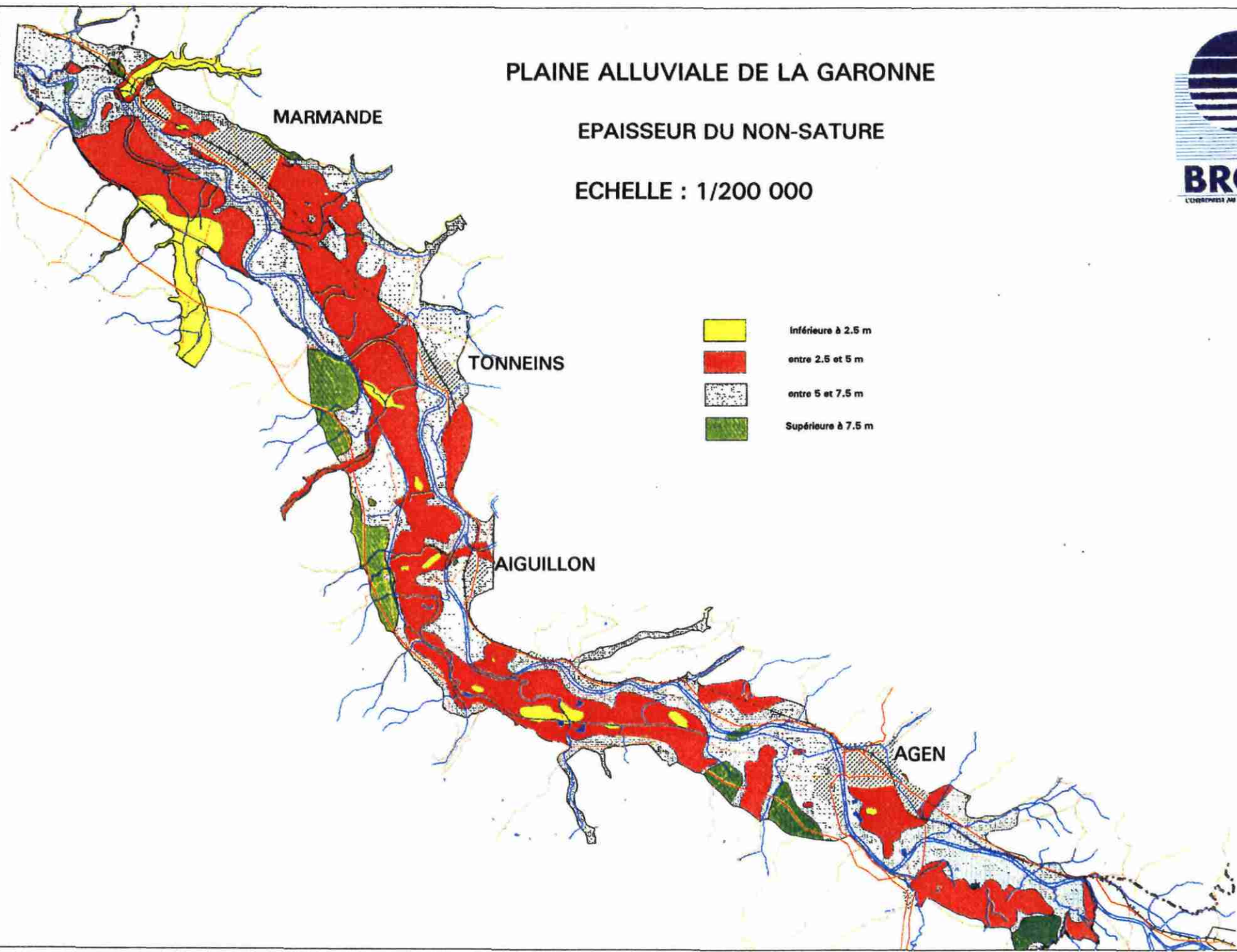
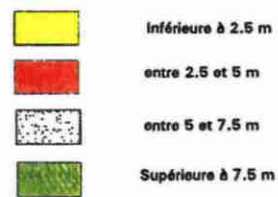


MARMADE

TONNEINS

AIGUILLON

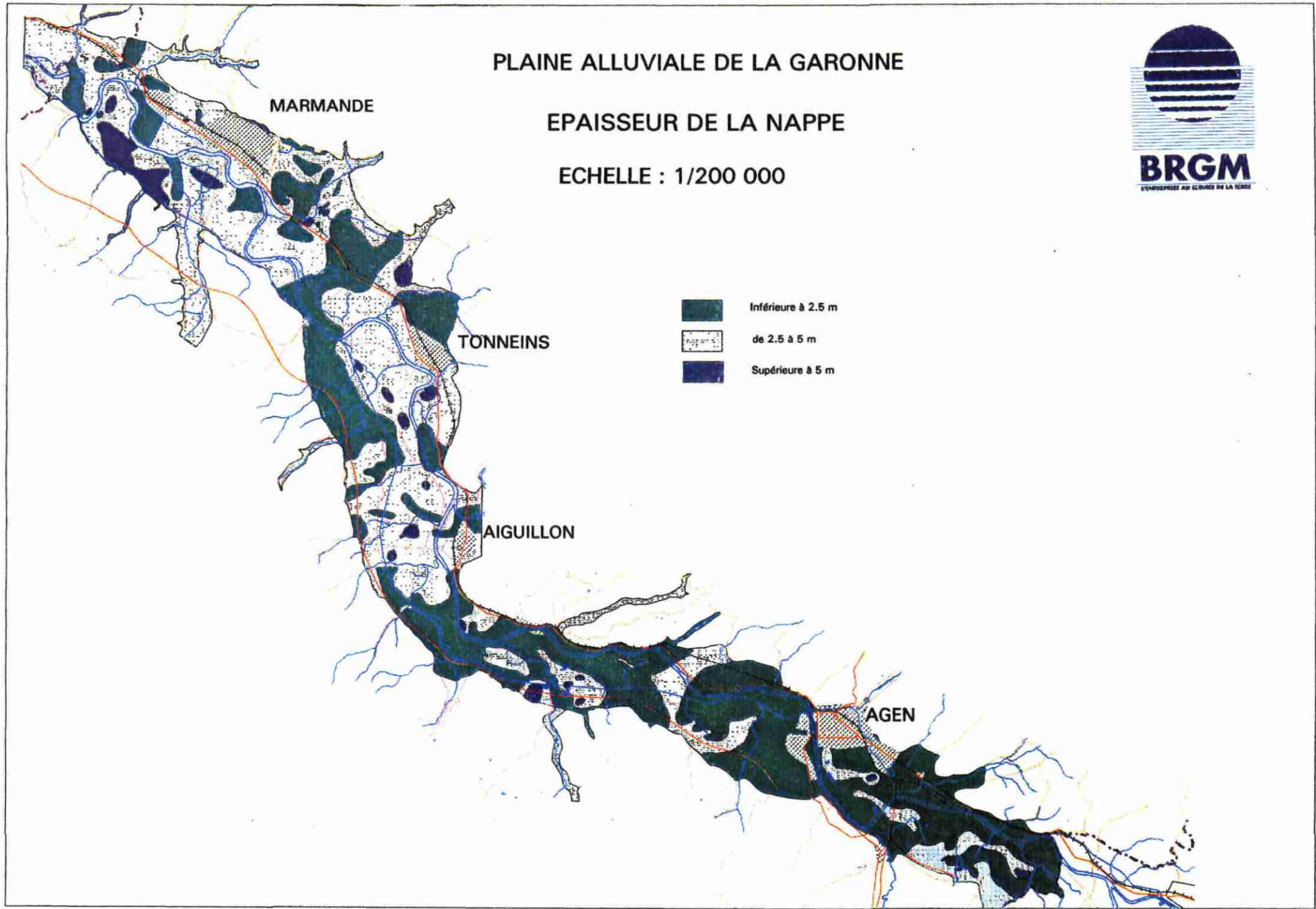
AGEN



PLAINE ALLUVIALE DE LA GARONNE

EPAISSEUR DE LA NAPPE

ECHELLE : 1/200 000



MARMANDE

TONNEINS

AIGUILLON

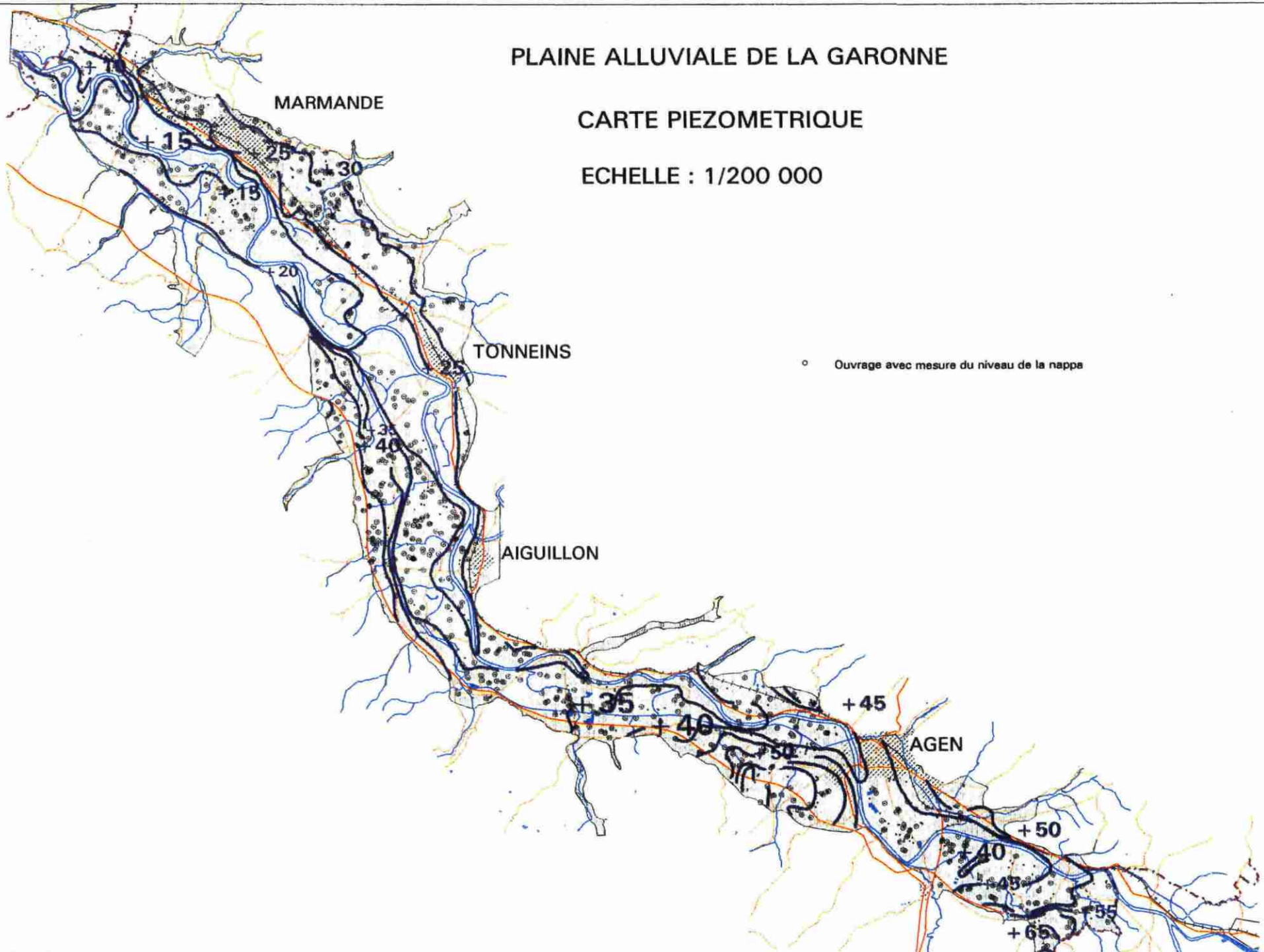
AGEN

- Inférieure à 2.5 m
- de 2.5 à 5 m
- Supérieure à 5 m

PLAINE ALLUVIALE DE LA GARONNE

CARTE PIEZOMETRIQUE

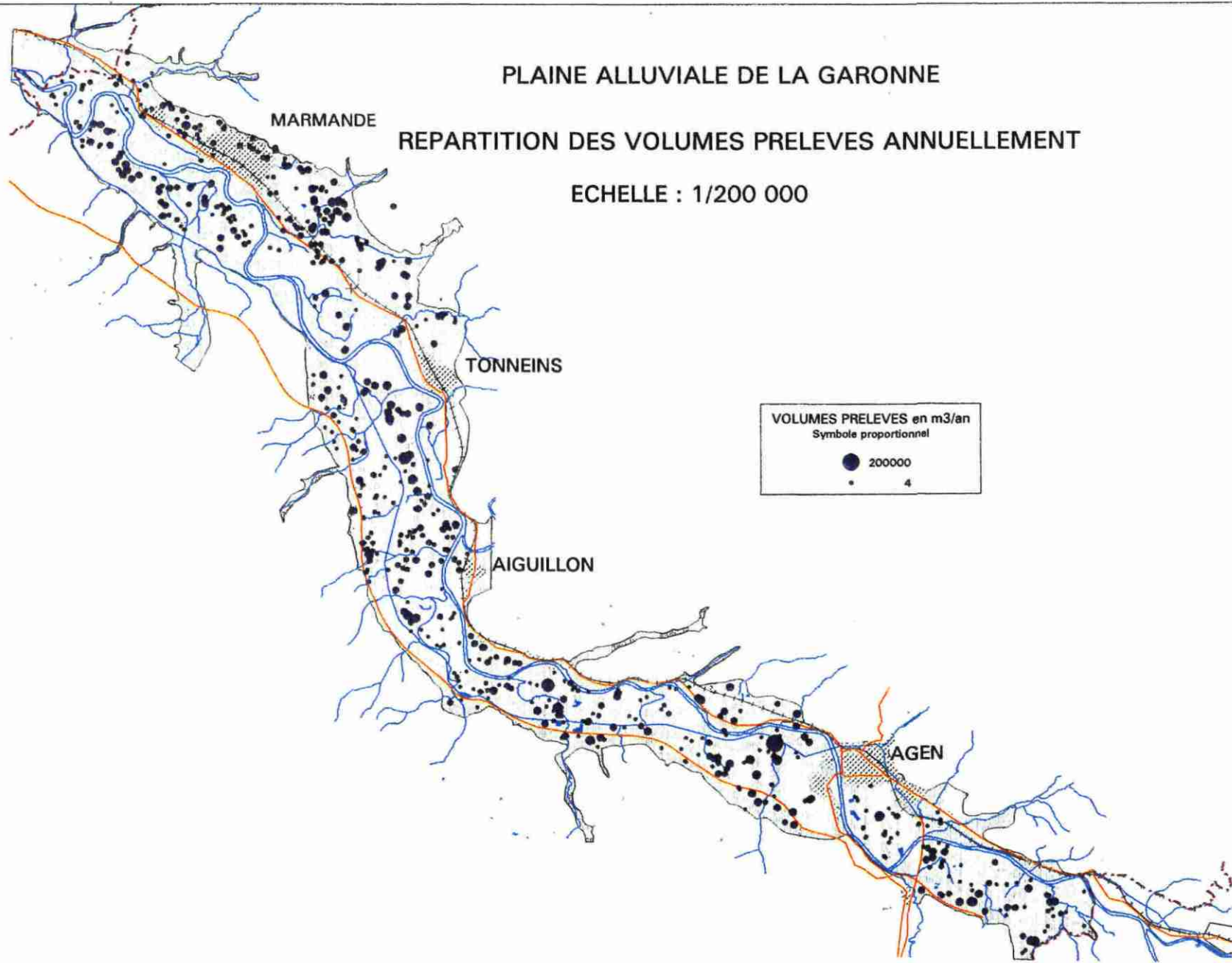
ECHELLE : 1/200 000



PLAINE ALLUVIALE DE LA GARONNE

REPARTITION DES VOLUMES PRELEVES ANNUELLEMENT

ECHELLE : 1/200 000



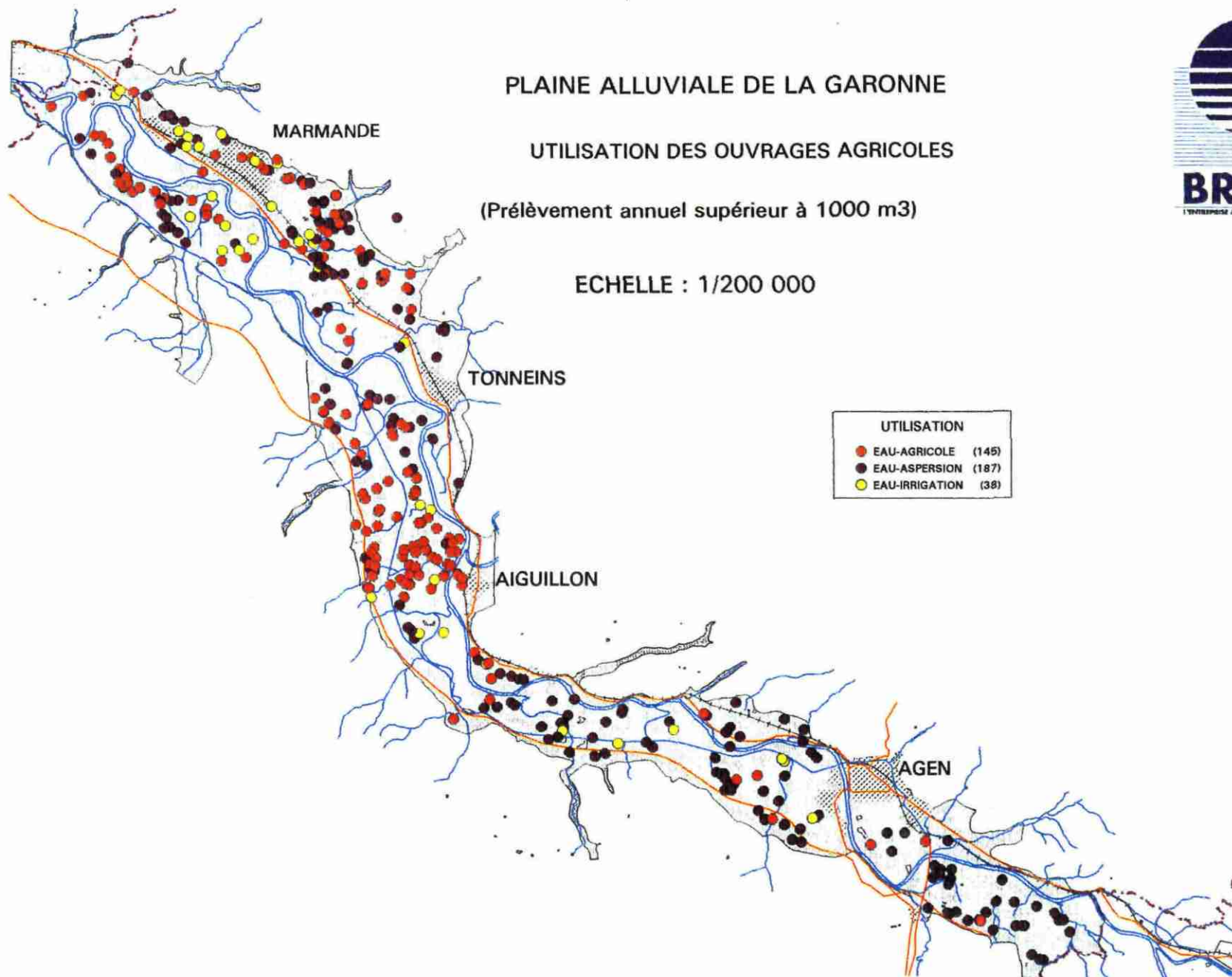


PLAINE ALLUVIALE DE LA GARONNE

UTILISATION DES OUVRAGES AGRICOLES

(Prélèvement annuel supérieur à 1000 m³)

ECHELLE : 1/200 000

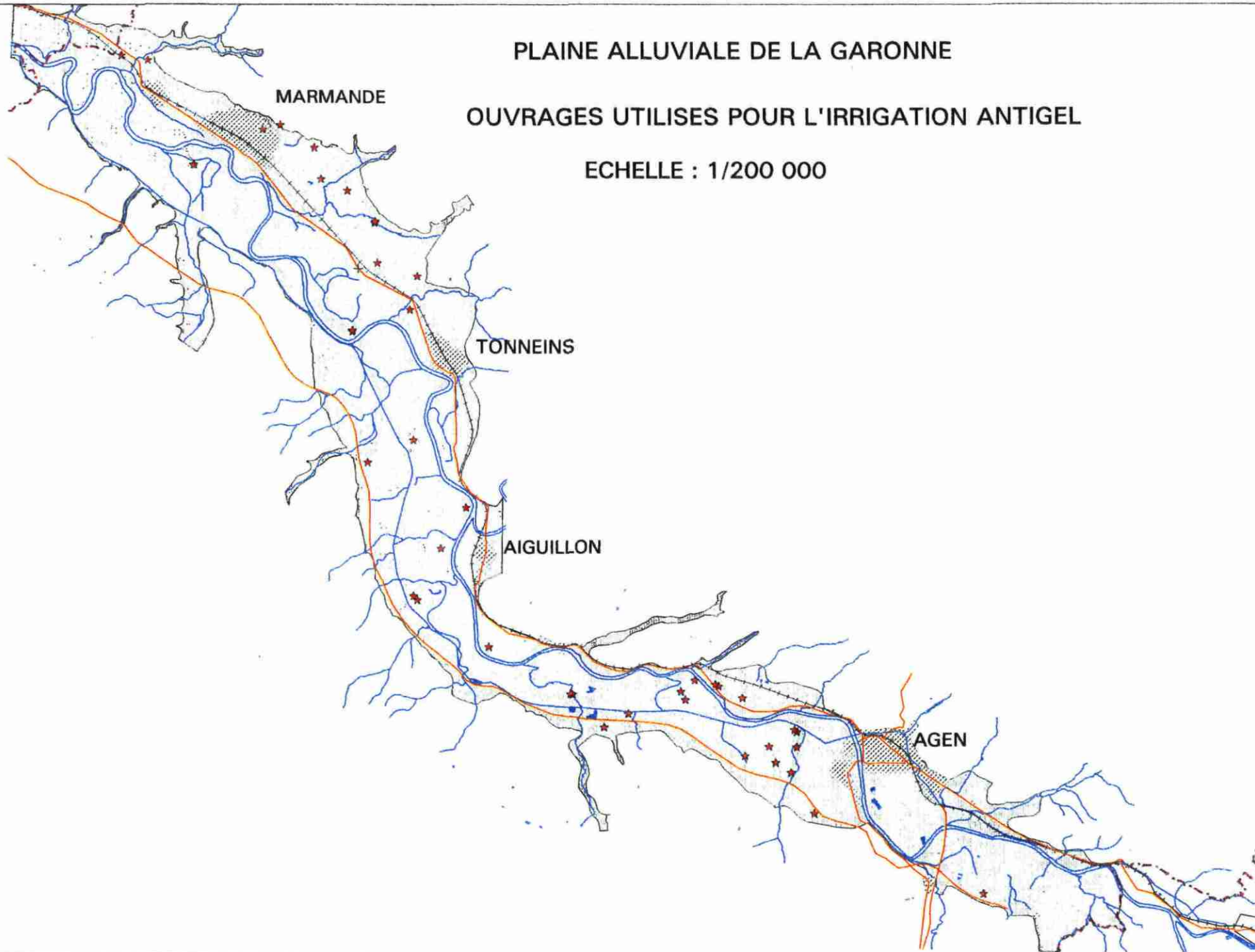


UTILISATION	
● EAU-AGRICOLE	(145)
● EAU-ASPERSION	(187)
● EAU-IRRIGATION	(38)

PLAINE ALLUVIALE DE LA GARONNE

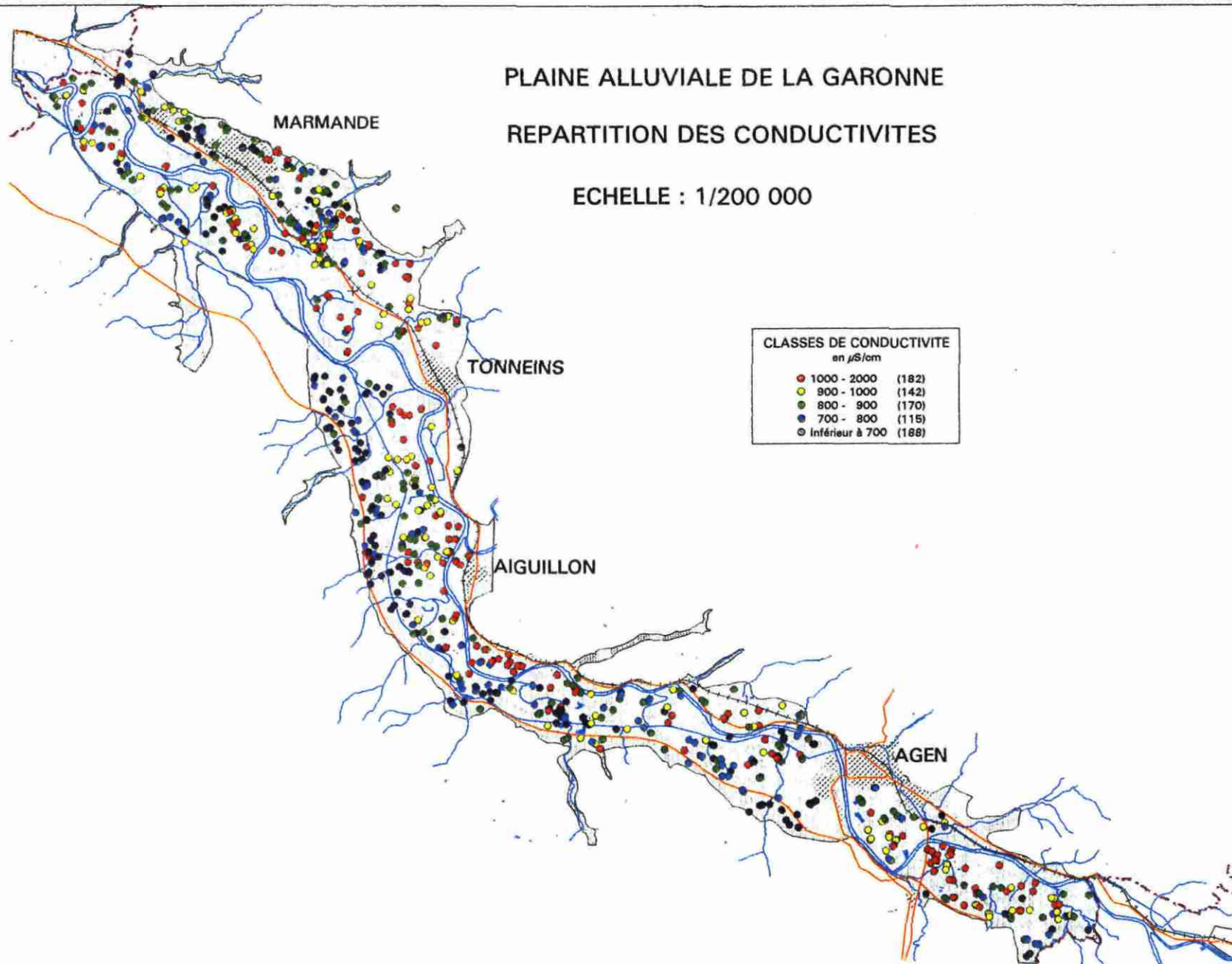
OUVRAGES UTILISES POUR L'IRRIGATION ANTIGEL

ECHELLE : 1/200 000



PLAINE ALLUVIALE DE LA GARONNE
REPARTITION DES CONDUCTIVITES

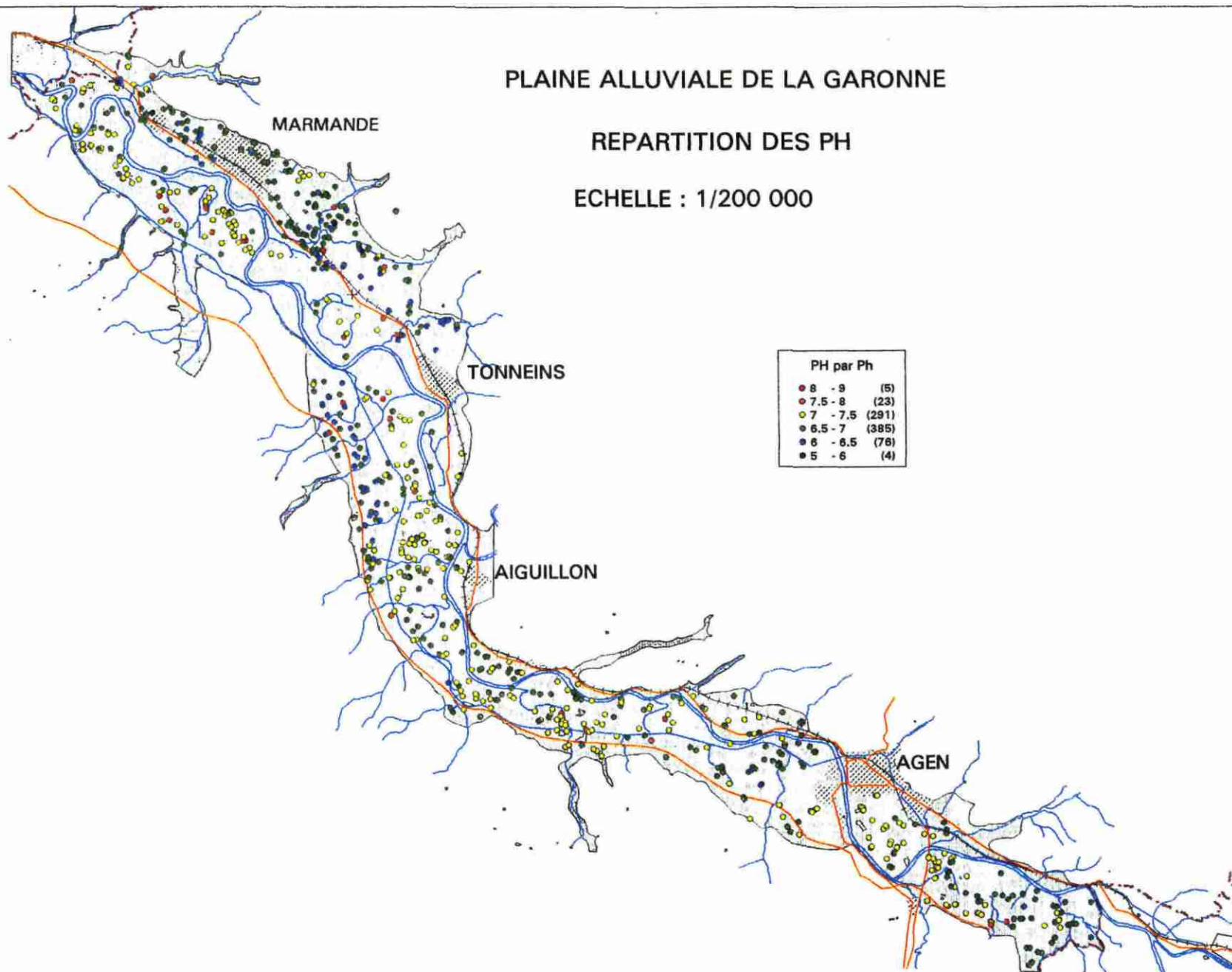
ECHELLE : 1/200 000



PLAINE ALLUVIALE DE LA GARONNE

REPARTITION DES PH

ECHELLE : 1/200 000



PLAINE ALLUVIALE DE LA GARONNE
REPARTITION DE L'OXYGENE DISSOUS

ECHELLE : 1/200 000

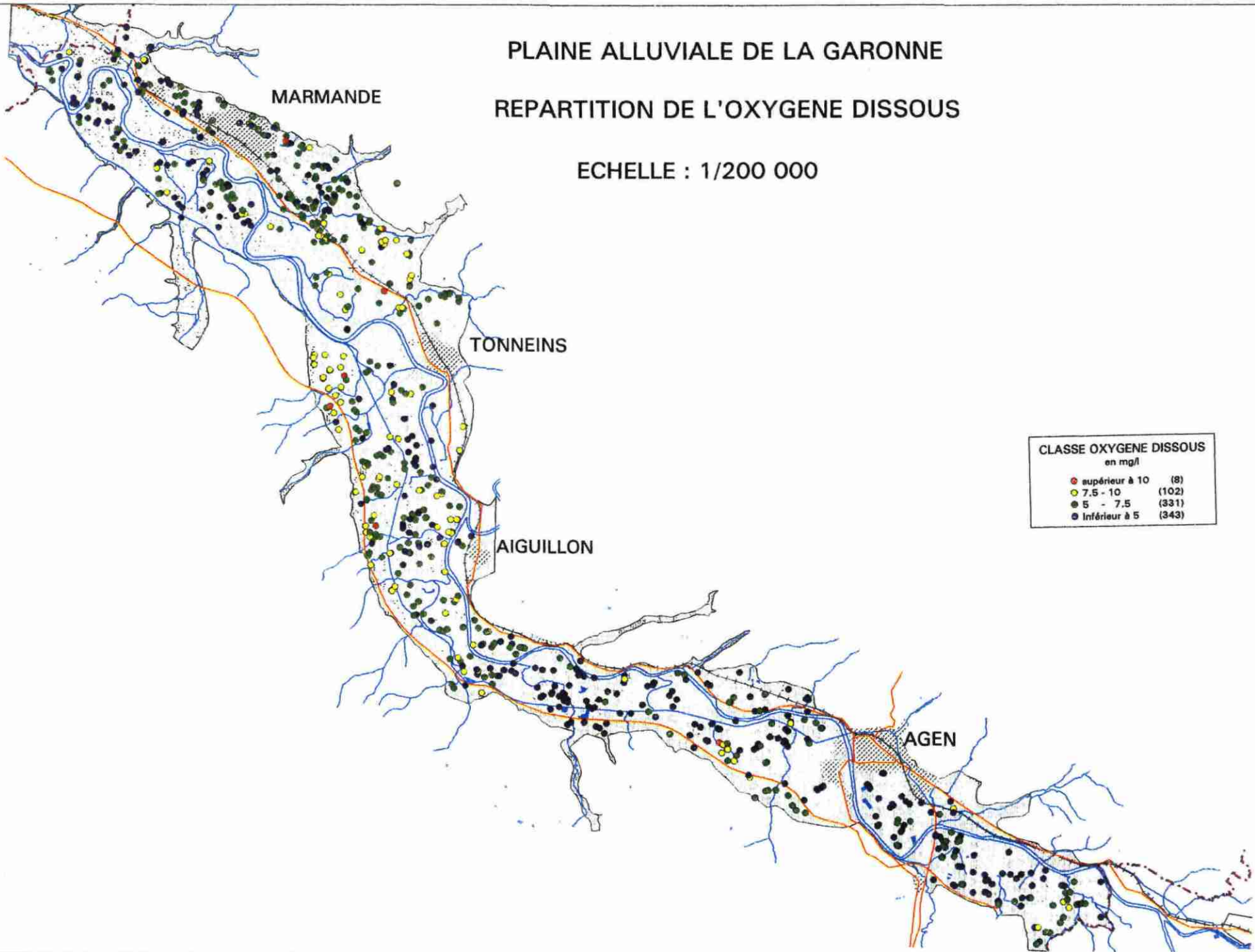
MARMAUDE

TONNEINS

AIGUILLON

AGEN

CLASSE OXYGENE DISSOUS en mg/l	
● supérieur à 10	(8)
● 7,5 - 10	(102)
● 5 - 7,5	(331)
● inférieur à 5	(343)



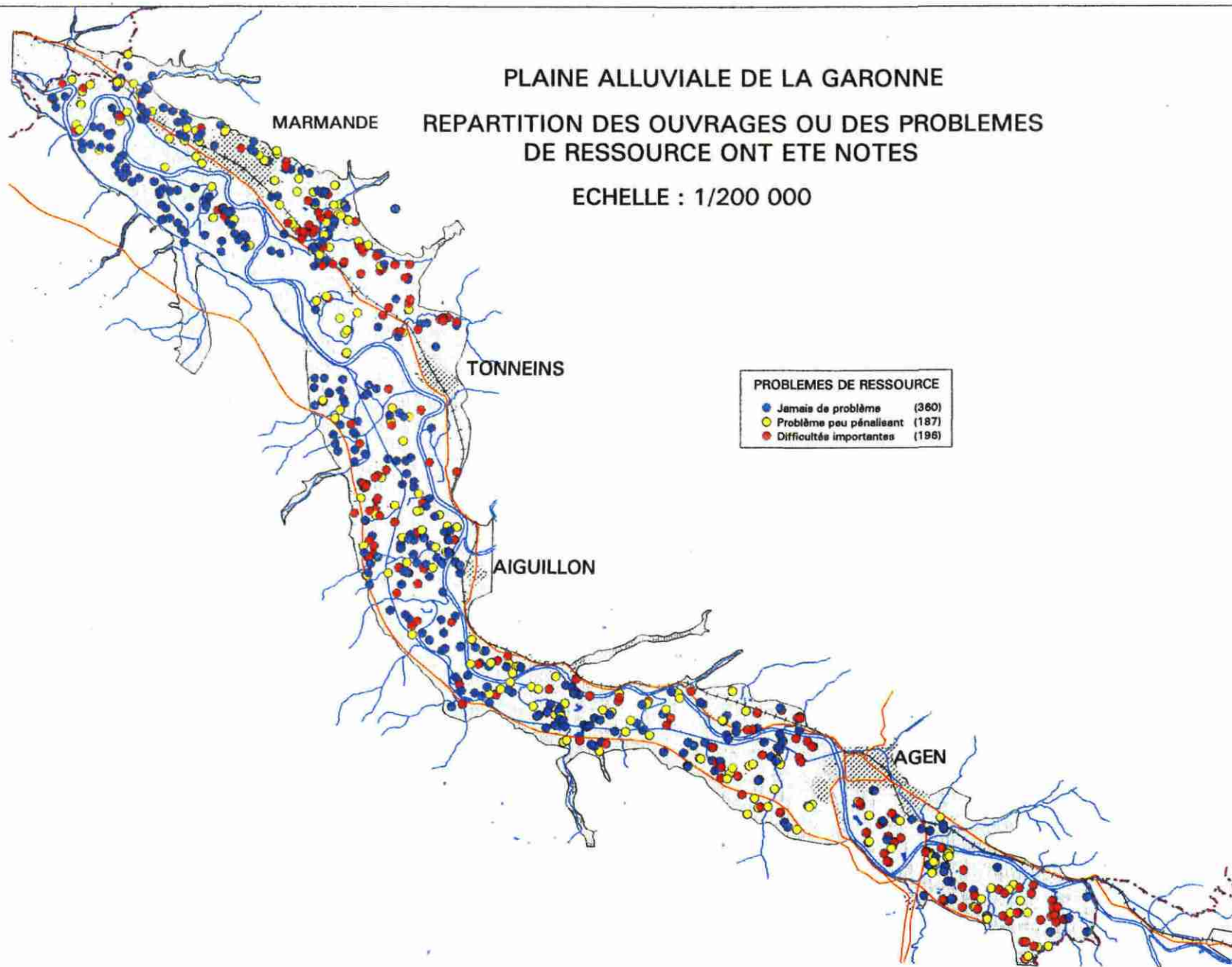
ANNEXE 4

SITES PRÉSENTANT DES PROBLÈMES DE RESSOURCE

PLAINE ALLUVIALE DE LA GARONNE

REPARTITION DES OUVRAGES OU DES PROBLEMES DE RESSOURCE ONT ETE NOTES

ECHELLE : 1/200 000



ANNEXE 5

FICHE SIGNALÉTIQUE DES PUIITS ET FORAGES.

Inventaire en Lot et Garonne

ENQUETEUR :

DATE: / /

FICHE OUVRAGE

NOCLAS :

DESIGNATION :

NATURE :

X :

Y :

COMMUNE :

Z :

LIEU DIT :

Z_REPERE :

PROPRIETAIRE :

REPERE :

EXPLOITANT :

UTILISATION :

DATE REALISATION :

DATE ABANDON :

PROFONDEUR :

DIAMETRE :

ACCESSIBILITE :

ETAT DE L'OUVRAGE :

HYDROGEOLOGIE

NAPPE :

NIVEAU BBS :

SYSTEME AQUIFERE :

CODE GRAND AQUIFERE :

ZONE GEOGRAPHIQUE :

CREPINE :

PROF. DEBUT :

HAUTEUR UTILE :

PROF. FIN :

MICROMOULINET (O/N) :

PROFOND. EAU :

DATE PIEZO :

RESEAU PIEZO :

HISTORIQUE PIEZO :

DEBIT SPECIFIQ.UE :

TRANSMISSIVITE :

POMPAGE D'ESSAI (O/N) :

TUBE DE MESURE (O/N) :

REFERENCES HYDROGEOLOGIQUES :

EXPLOITATION

DEBIT AUTORISE :

ANNEE AUTORISATION :

DEBIT EXPLOIT. :

PROFONDEUR POMPE :

FONCTIONNEMENT /ARRET :

SURFACE IRRIGUEE :

PROBLEMES ENTRE AOUT 89 ET MAI 92 :

REMARQUES (consommation électrique, puissance de la pompe ...) :

CHIMIE DES EAUX

HISTORIQUE CHIMIQUE (O/N) :
PROBLEMES DE POLLUTION :

ANALYSE C.E.E (O/N) :

ANALYSE IN SITU DU / /

TURBIDITE :

ODEUR :

pH :

EH :

TEMPERATURE :

OXYGENE DISSOUS :

CONDUCTIVITE :

HYDROCARBURES (O/N) :

CONDITIONS DES MESURES :

REMARQUES :

ANNEXE 6

CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES PUIITS ET PIÉZOMÈTRES OBSERVÉS

Désignation	N° ident.	Lieu-dit	Prof t /repère)	Diamètre	Repère	H. repère(m)	X	Y	Z	Z REPERE	T (m²/s)	S (%)
Puits	1	Graves	7.40	1.000	margelle	0.30	458.59	214.23	42.22	42.52	2.7E-02	16
Piezomètre	1		9.70	0.125	tube PVC	0.35	458.60	214.24	42.53	42.88		
Puits	2	Sainte-Livrade	7.40	1.000	margelle	0.50	458.08	213.74	44.10	44.60	1.5E-02	9
Piezomètre	2		8.40	0.125	tube PVC	0.20	458.08	213.75	43.82	44.02		
Puits	3	Clos de Mourlan	5.80	1.000	margelle	0.60	460.03	213.21	42.88	43.48	3.0E-02	24
Piezomètre	3		13.35	0.125	tube PVC	0.30	460.02	213.21	43.10	43.40		
Puits	4	Mourlan	8.00	1.000	margelle	0.50	460.27	213.79	43.70	44.20	4.5E-02	23
Piezomètre	4		8.90	0.125	tube PVC	0.55	460.27	213.78	43.72	44.27		
Puits	5	Pradet	8.95	1.200	margelle	0.60	459.34	214.29	44.19	44.79		
Piezomètre	5		11.05	0.125	tube PVC	0.40	459.33	214.29	44.18	44.58		
Puits	6	Franquet	5.90	1.000	margelle	0.60	458.80	212.95	43.18	43.78	8.0E-03	1
Piezomètre	6		8.95	0.125	tube PVC	0.00	458.80	212.96	43.61	43.61		
Puits	7	Le Pot Fendu	7.00	1.000	margelle	0.80	459.17	213.65	43.27	44.07	2.0E-03	4
Piezomètre	7		8.95	0.125	tube PVC	0.58	459.16	213.65	44.45	43.87		
Puits	8	Pradet	5.90	1.000	margelle	0.00	459.40	214.45	40.60	40.60	1.2E-02	8
Piezomètre	8		11.50	0.125	tube PVC	0.00	459.39	214.45	40.52	40.52		
Puits	9	Frésonis	7.50	1.000	margelle	0.80	459.60	213.36	43.84	44.64		
Puits	10	Bigourdas	5.40	1.000	margelle	0.00	459.53	213.13	42.54	42.54		
Puits	11	Goux	11.15	0.500	margelle	0.00	457.78	214.58	42.39	42.39		
Puits	12	Bordeneuve	7.95	1.000	margelle	0.00	458.45	214.50	42.88	42.88		
Puits	13	Grave	5.35	1.000	margelle	0.75	458.56	214.15	41.96	42.71		
Puits	14	Petits Claviès	6.90	1.000	margelle	0.75	459.10	213.36	43.83	44.58		
Puits	15	Agnélys	7.90	1.000	margelle	0.00	460.00	214.08	43.72	43.72		
Puits	16	Clos de Mourlan	5.75	1.000	margelle	0.40	459.95	213.43	42.79	43.19		
Puits	17	Cadrougne	5.5	1.000	margelle	0.00	459.85	212.88	44.62	44.62		
Puits	18	Chastel	6.45	1.000	margelle	0.00	459.91	212.49	45.47	45.47		
Puits	19	Rosette	7.00	1.000	margelle	0.00	460.22	212.95	45.67	45.67		
Puits	20	Barroy	13.47	1.000	plate-forme	3.80	460.79	212.23	45.00	48.80		
Puits	21	Limport	7.05	1.000	margelle	0.20	459.68	213.90	44.00	44.20		

Caractéristiques des ouvrages observés sur le site expérimental du Passage

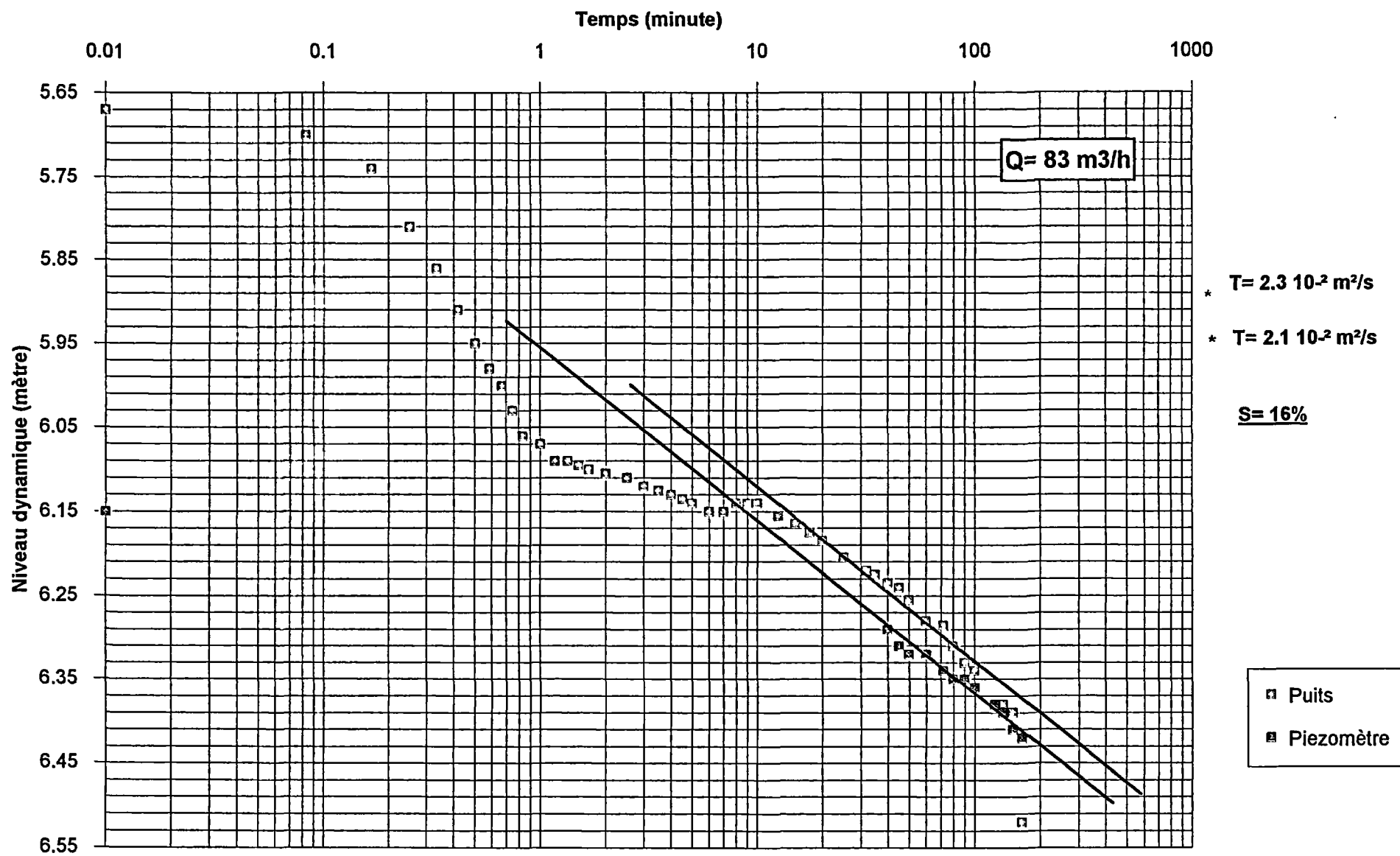
ANNEXE 7

RÉSULTATS DES POMPAGES D'ESSAI

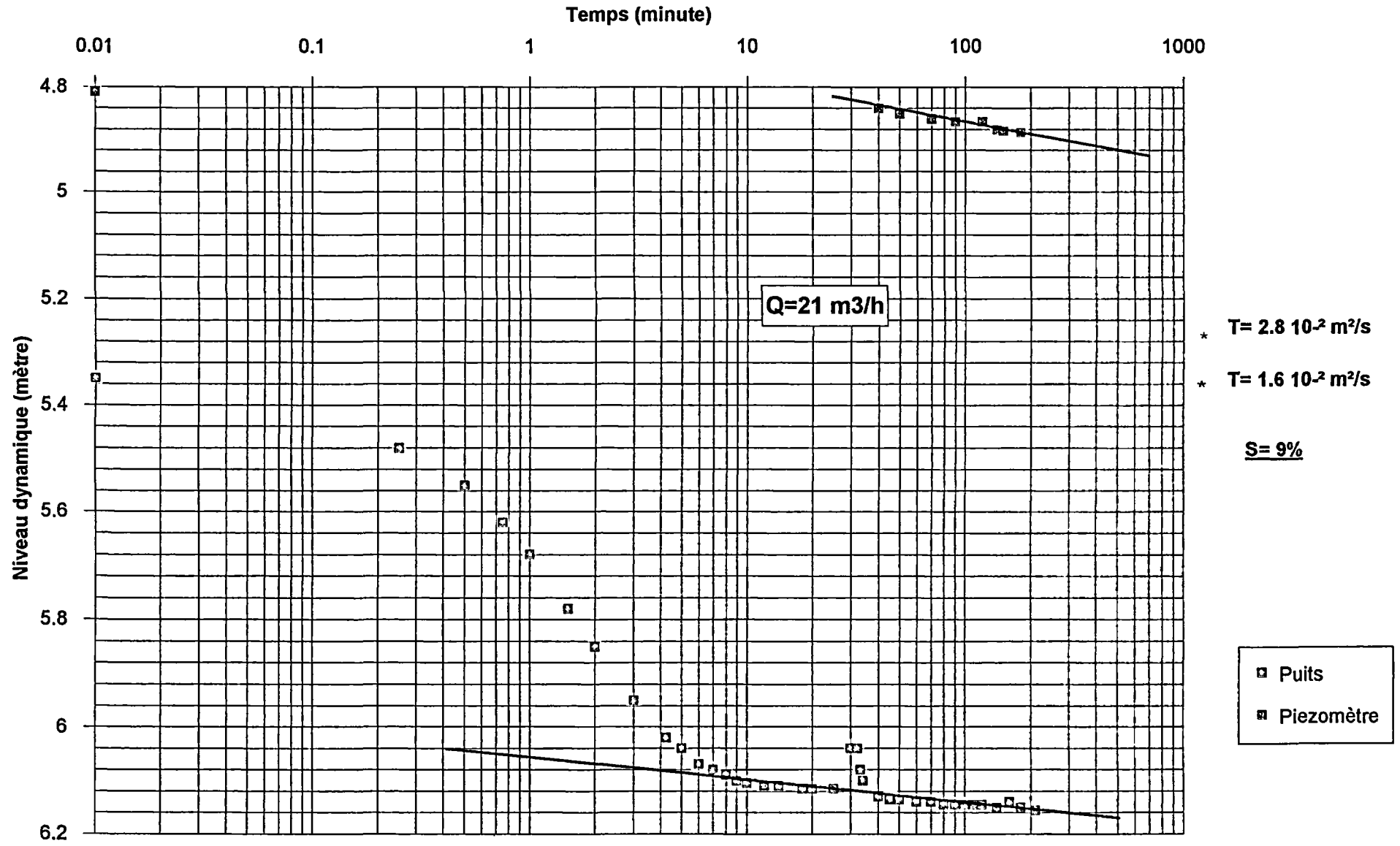
N° identification	Lieu dit	Débit(m ³ /h)	Distance puits-piézo(m)	T descente(m ² /s)	T remontée(m ² /s)	S(%)
1 (puits)	"Graves"	83	13.2	2.3E-2	2.8E-2	
1 (piezomètre)				2.1E-2	2.6E-2	16
2 (puits)	"Sainte-Livrade"	21	18.8	2.8E-2	1.6E-2	
2 (piezomètre)				1.6E-2	1.5E-2	9
3 (puits)	"Clos de Mourlan"	30	11.2	1.1E-2	2.3E-2	
3 (piezomètre)				1.4E-2	4.6E-2	24
4 (puits)	"Mourlan"	42	12.4	3.5E-2	4.4E-2	
4 (piezomètre)				3.3E-2	4.6E-2	23
6 (puits)	"Franquet"	30	12.9	6.2E-3	7.0E-3	
6 (piezomètre)				1.0E-2	9.8E-3	1
7 (puits)	"Le Pot Fendu"	2,3	12.3	3.2E-3	1.9E-3	
7 (piezomètre)				1.1E-3	2.2E-3	4
8 (puits)	"Pradet"	12	12.7	9.0E-3	1.1E-2	
8 (piezomètre)				1.1E-2	1.3E-2	8

Récapitulatif des résultats des essais de pompage

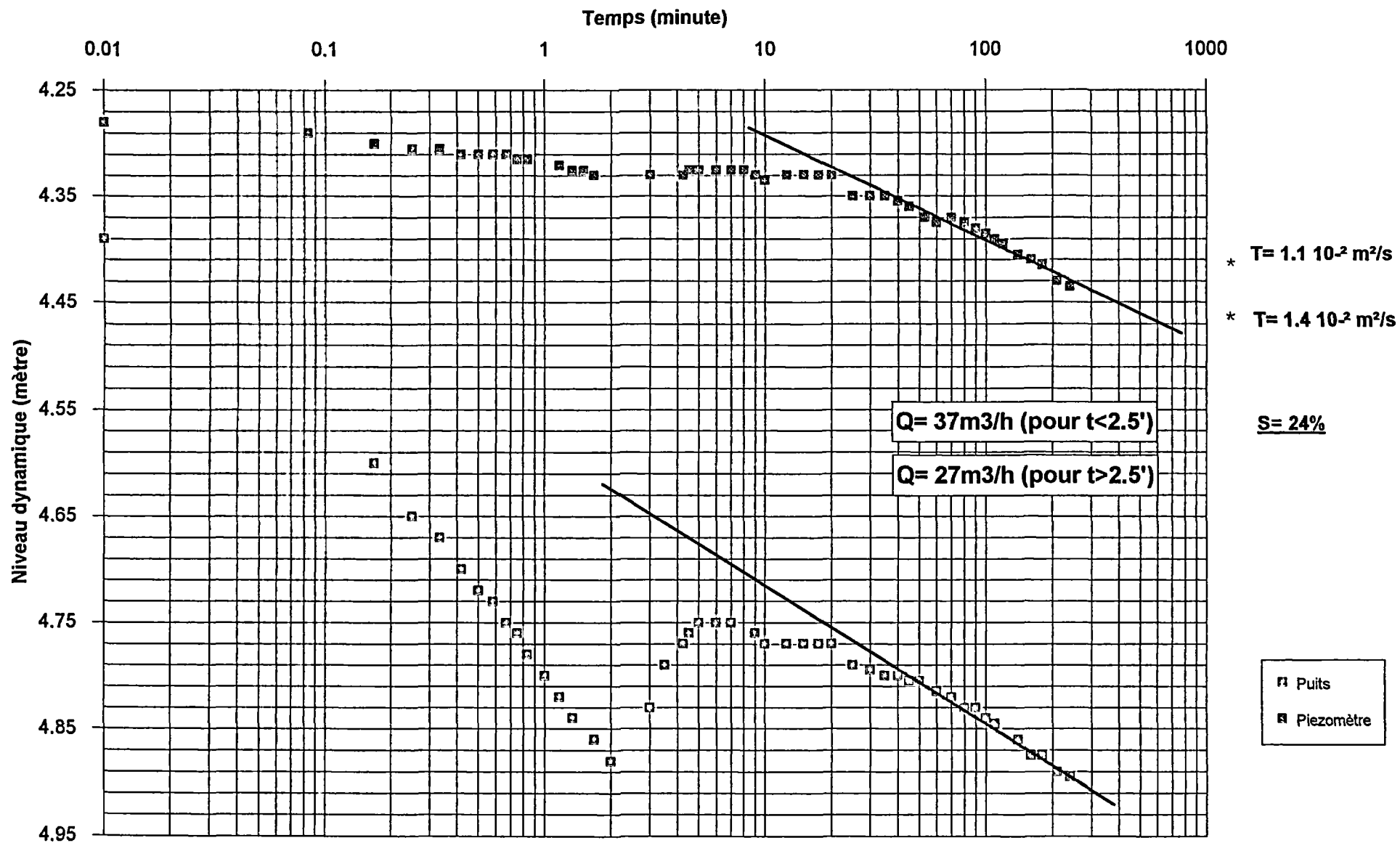
Courbes de descente 1("Graves")



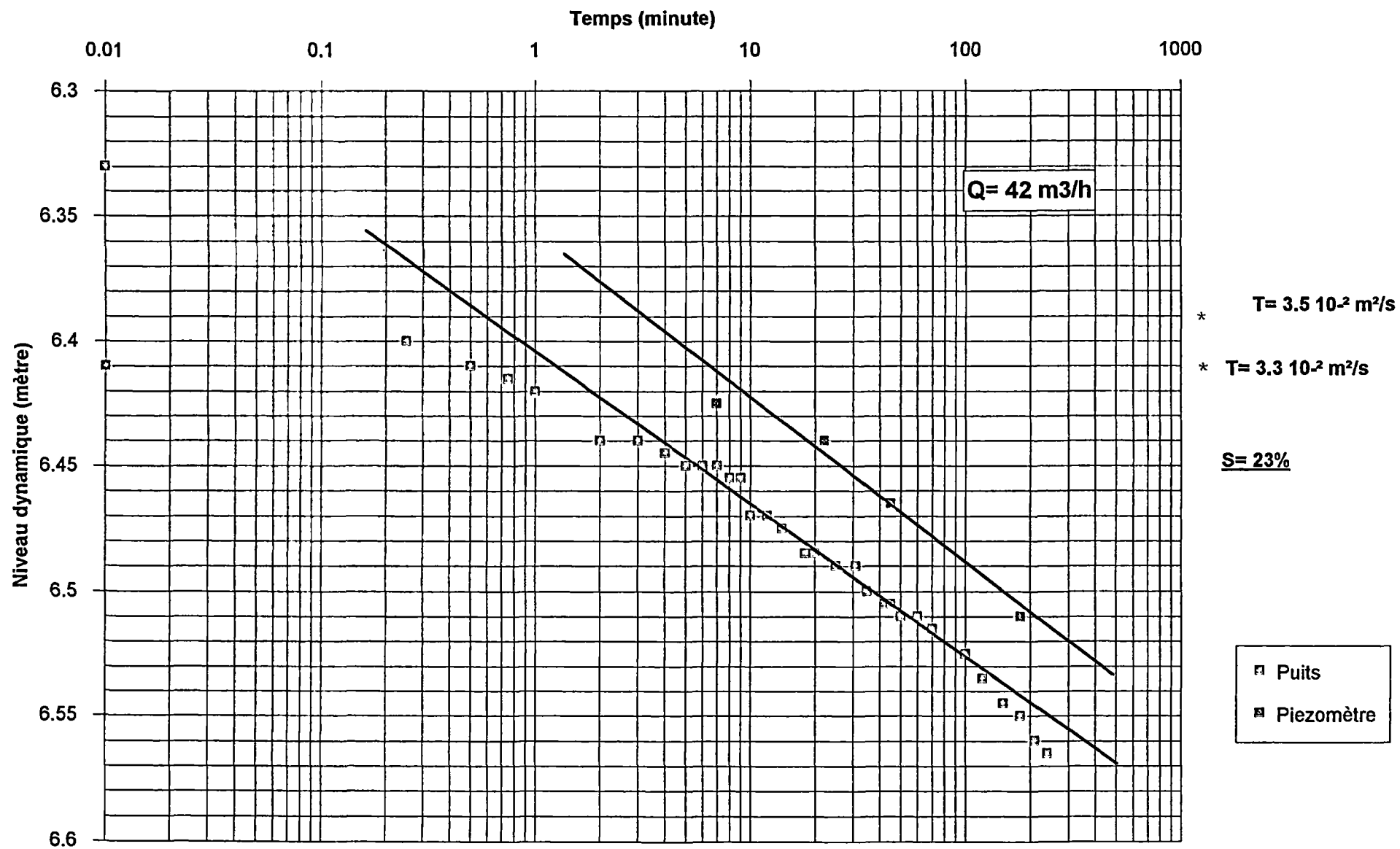
Courbes de descente 2("Sainte-Livrade")



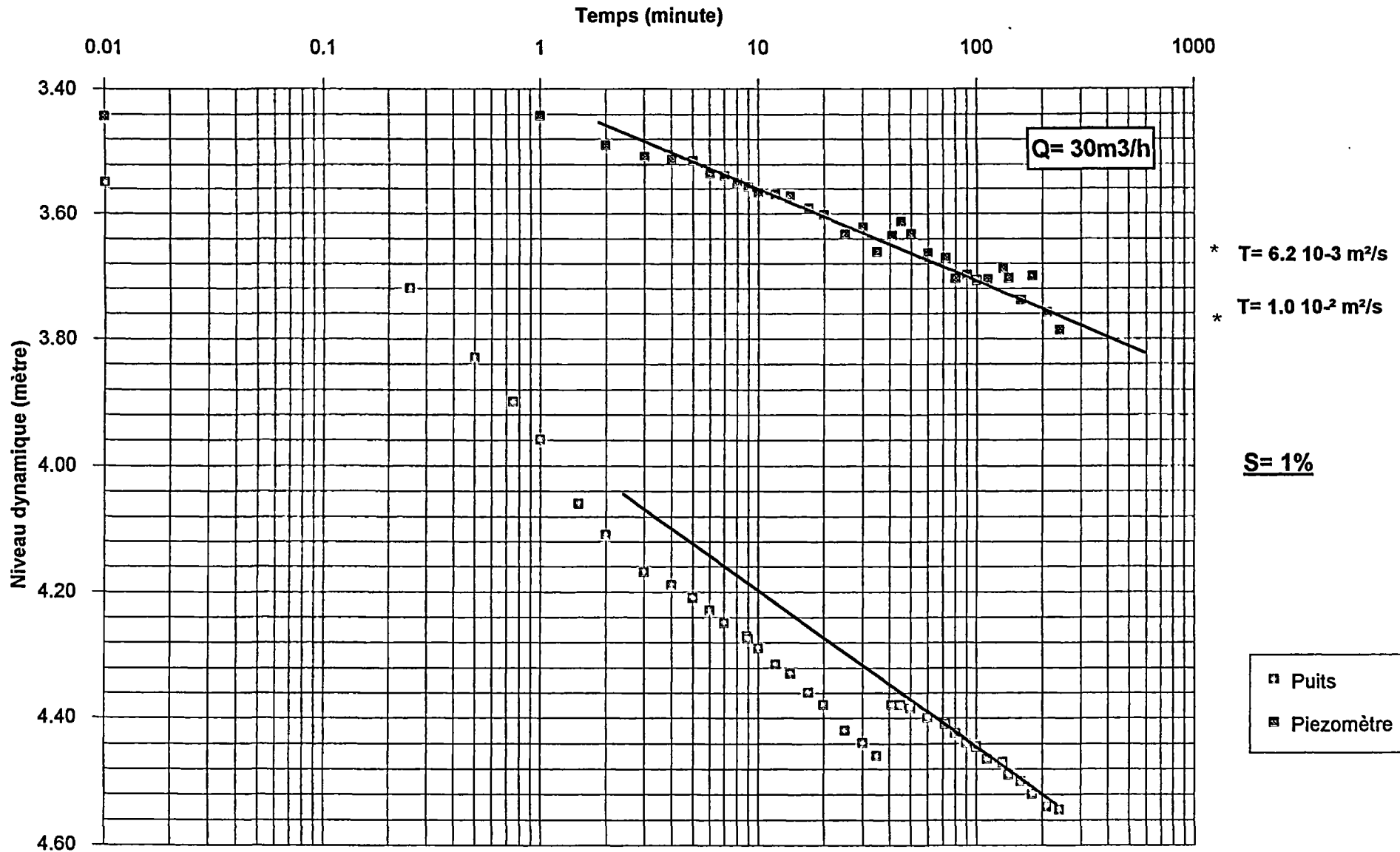
Courbes de descente 3("Clos de Mourlan")



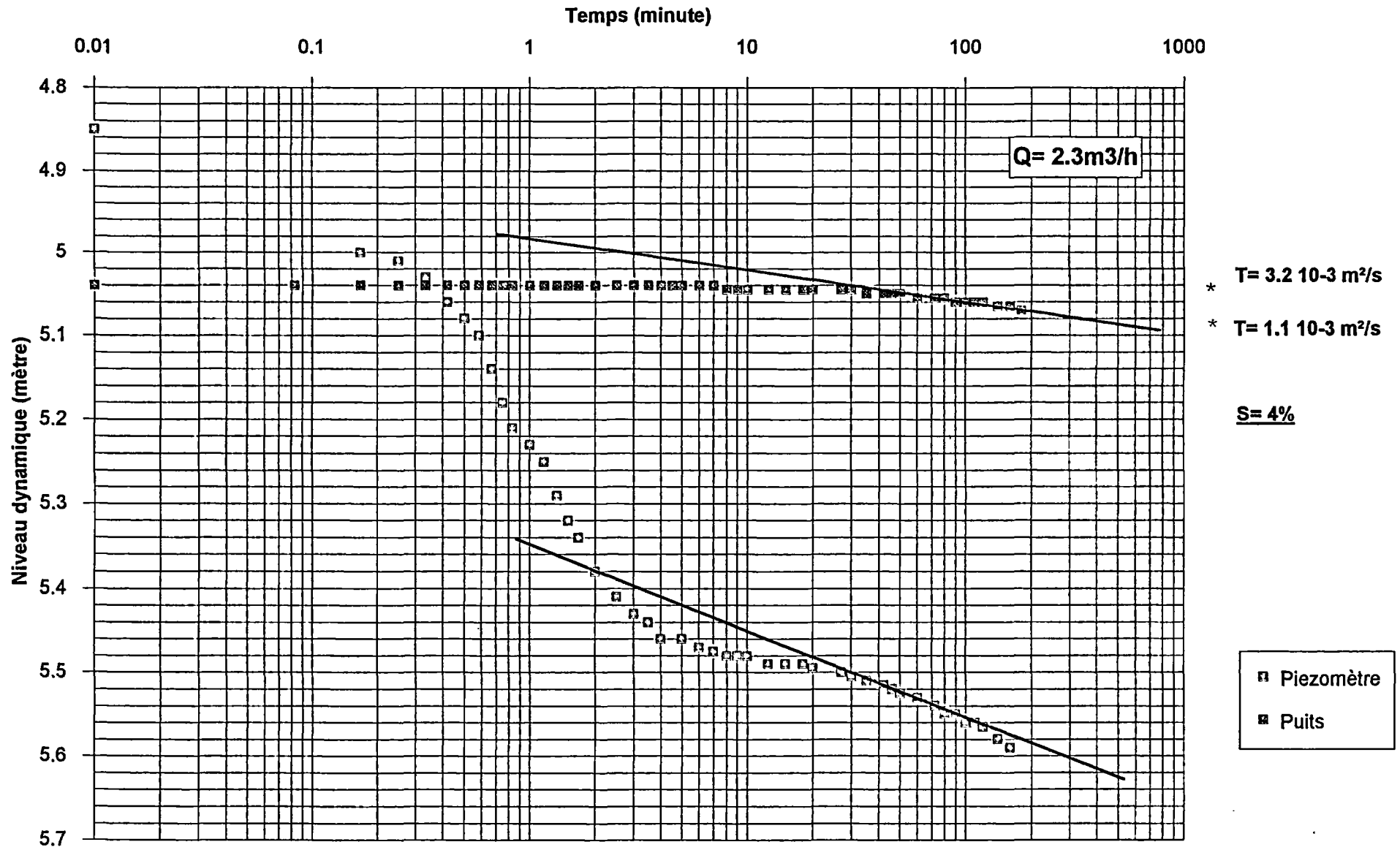
Courbes de descente 4("Mourlan")



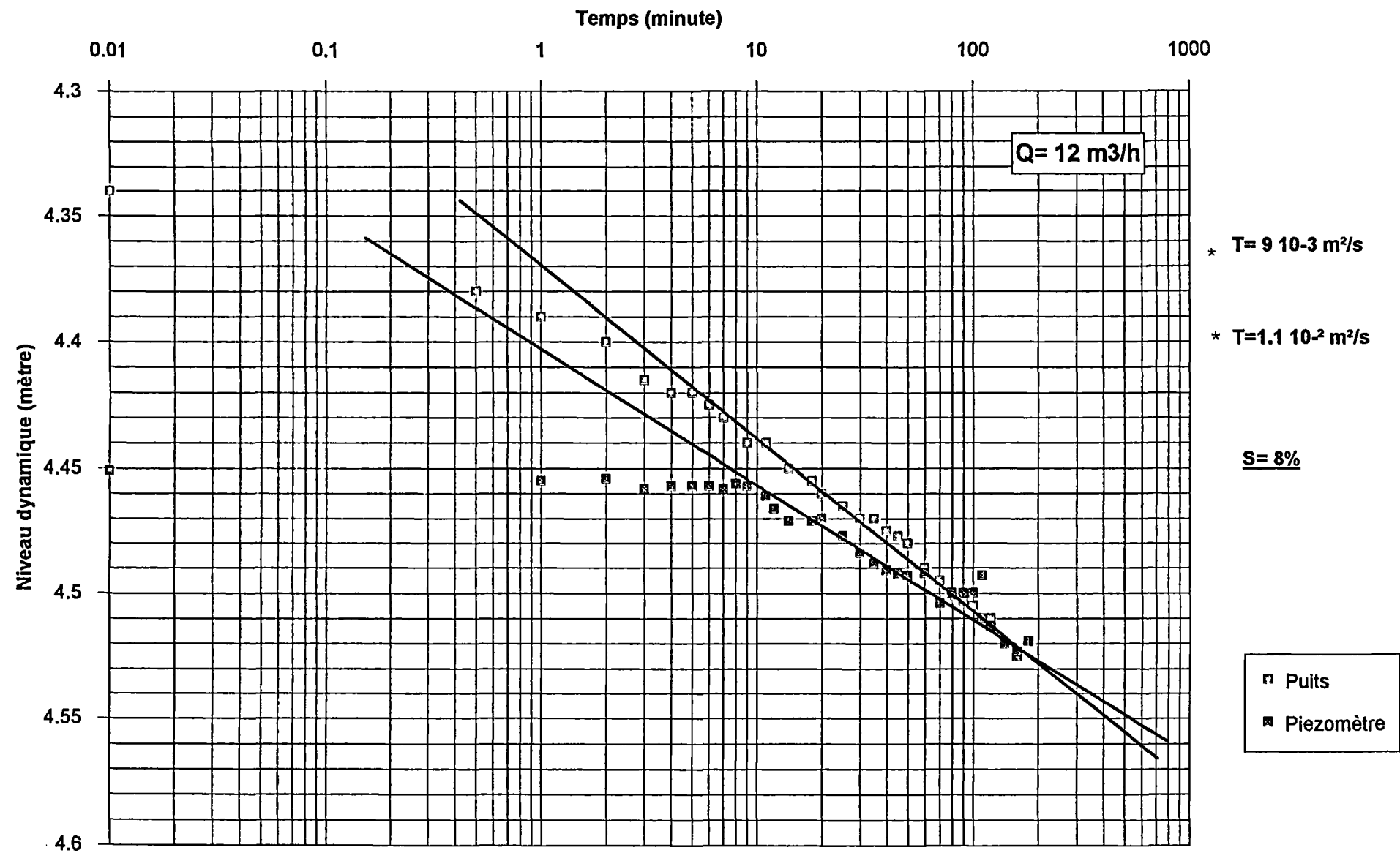
Courbes de descente 6("Franquet")



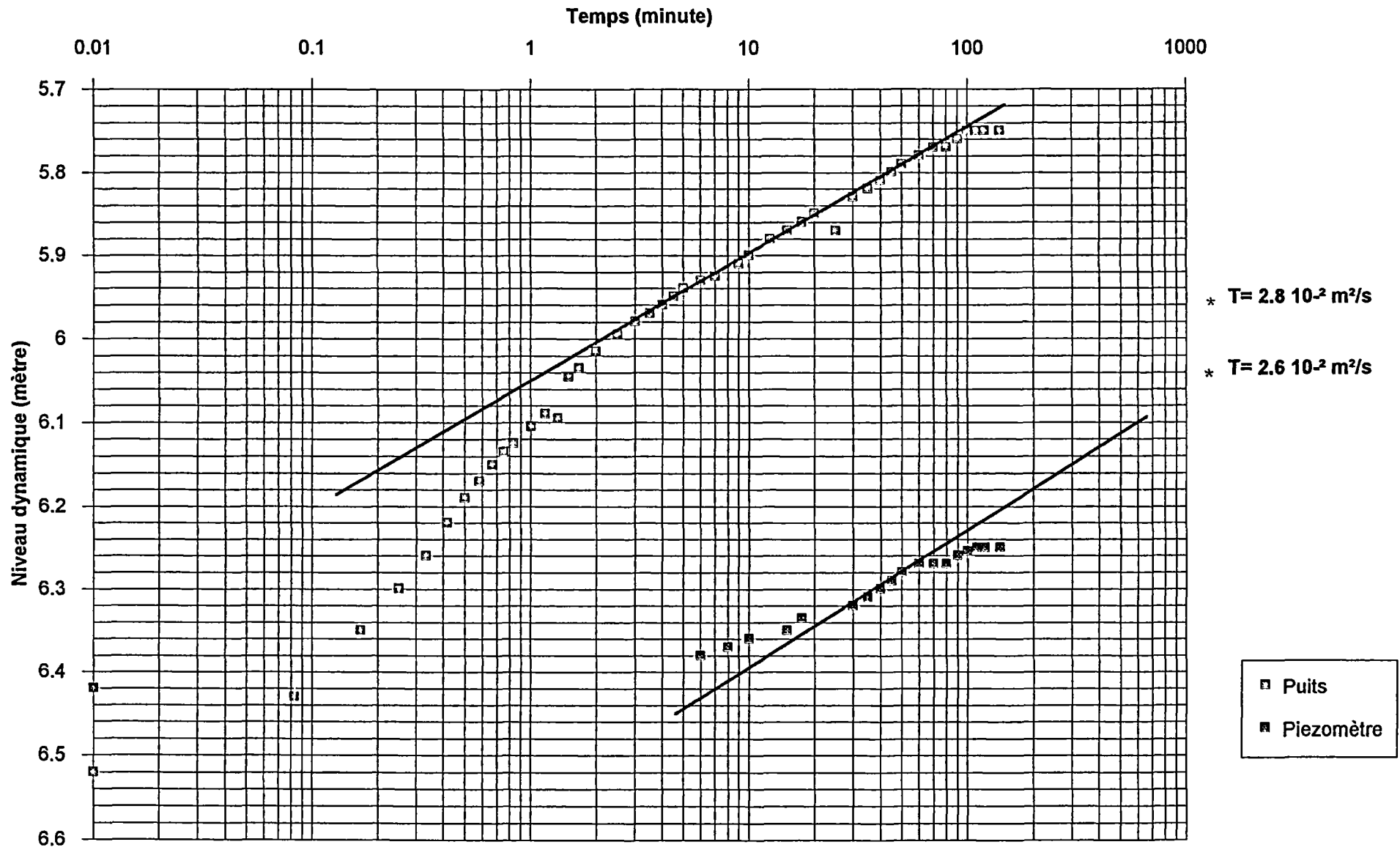
Courbes de descente 7("Le Pot Fendu")



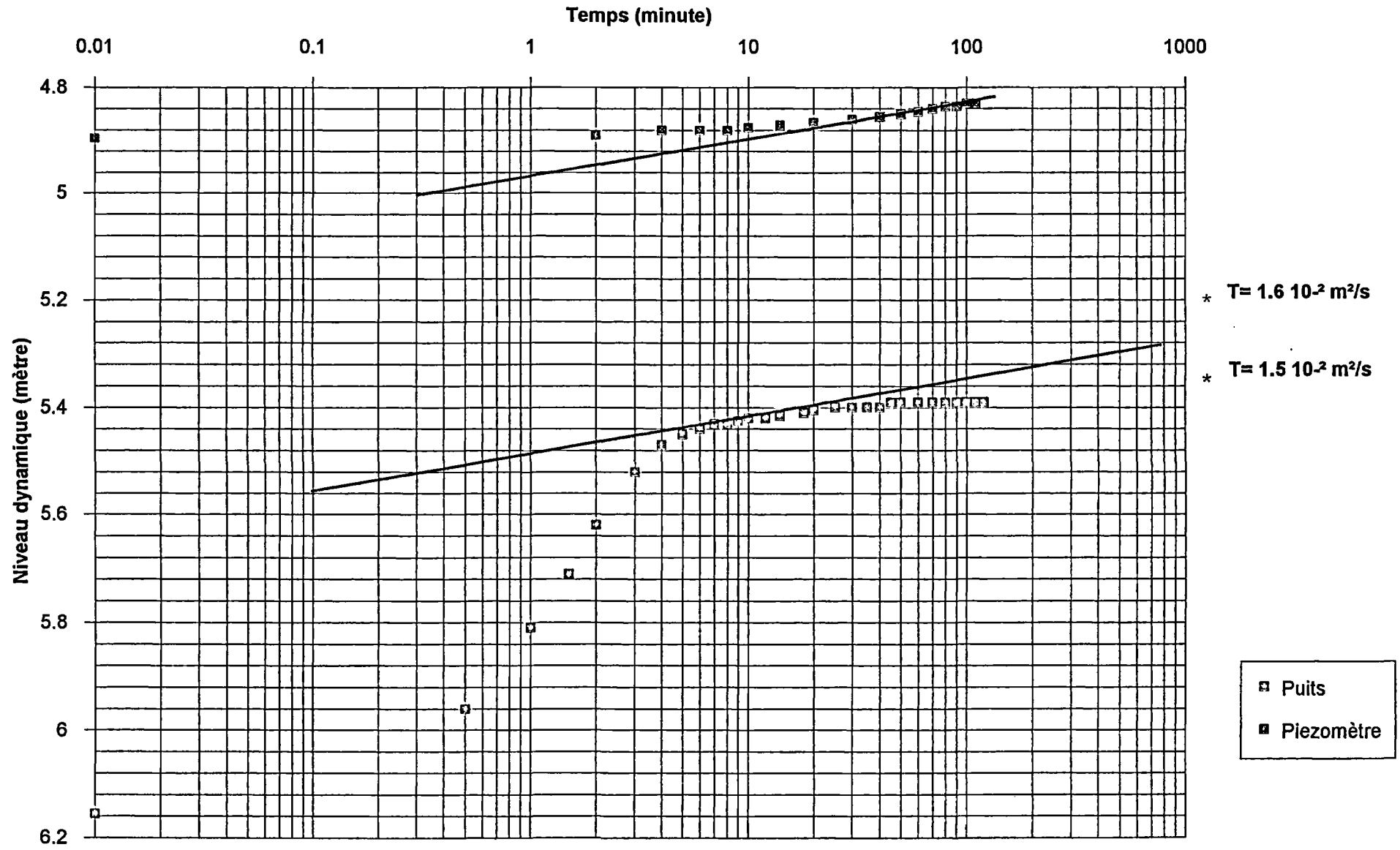
Courbes de descente 8("Pradet")



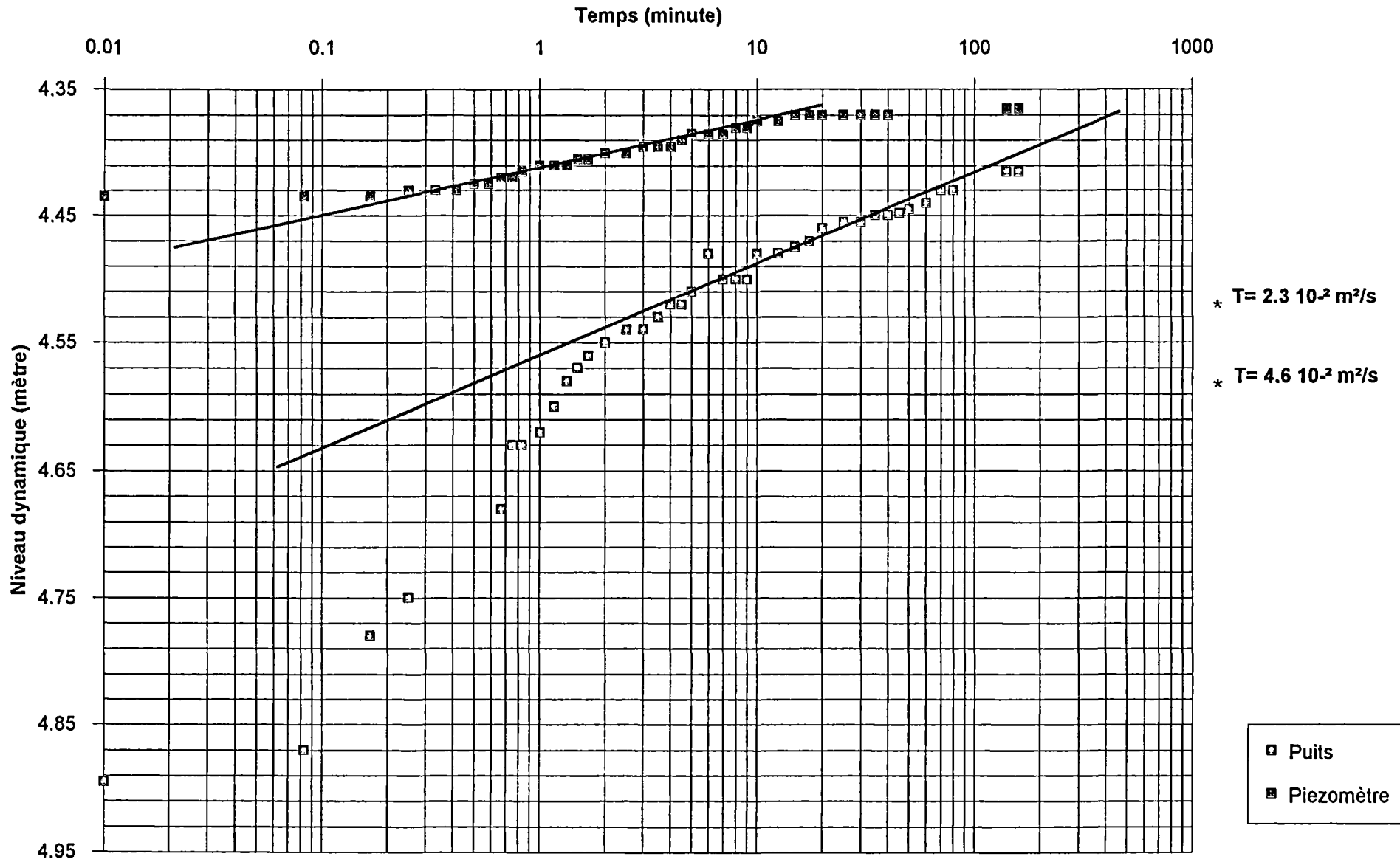
Courbes de remontée 1("Graves")



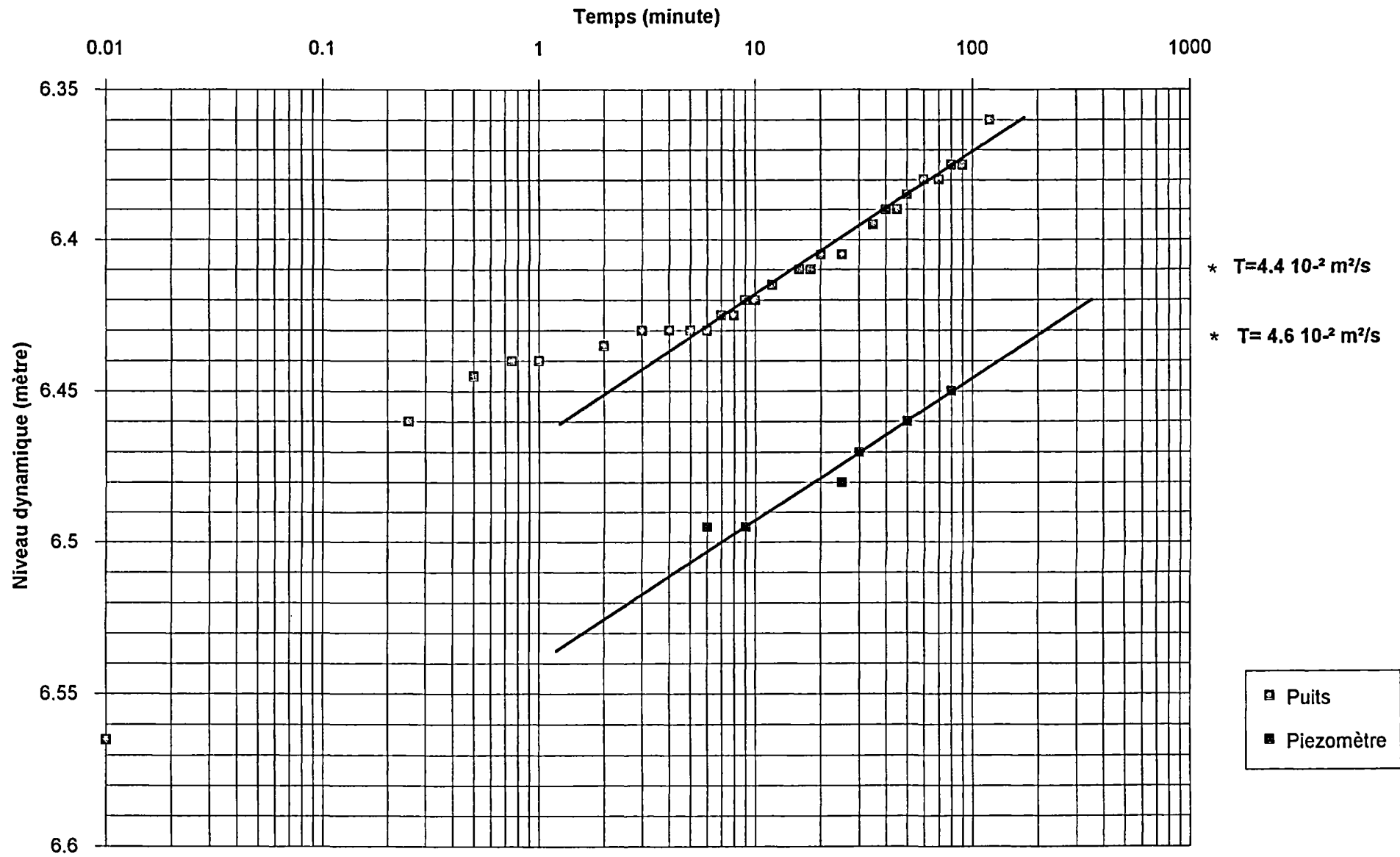
Courbes de remontée 2("Sainte-Livrade")



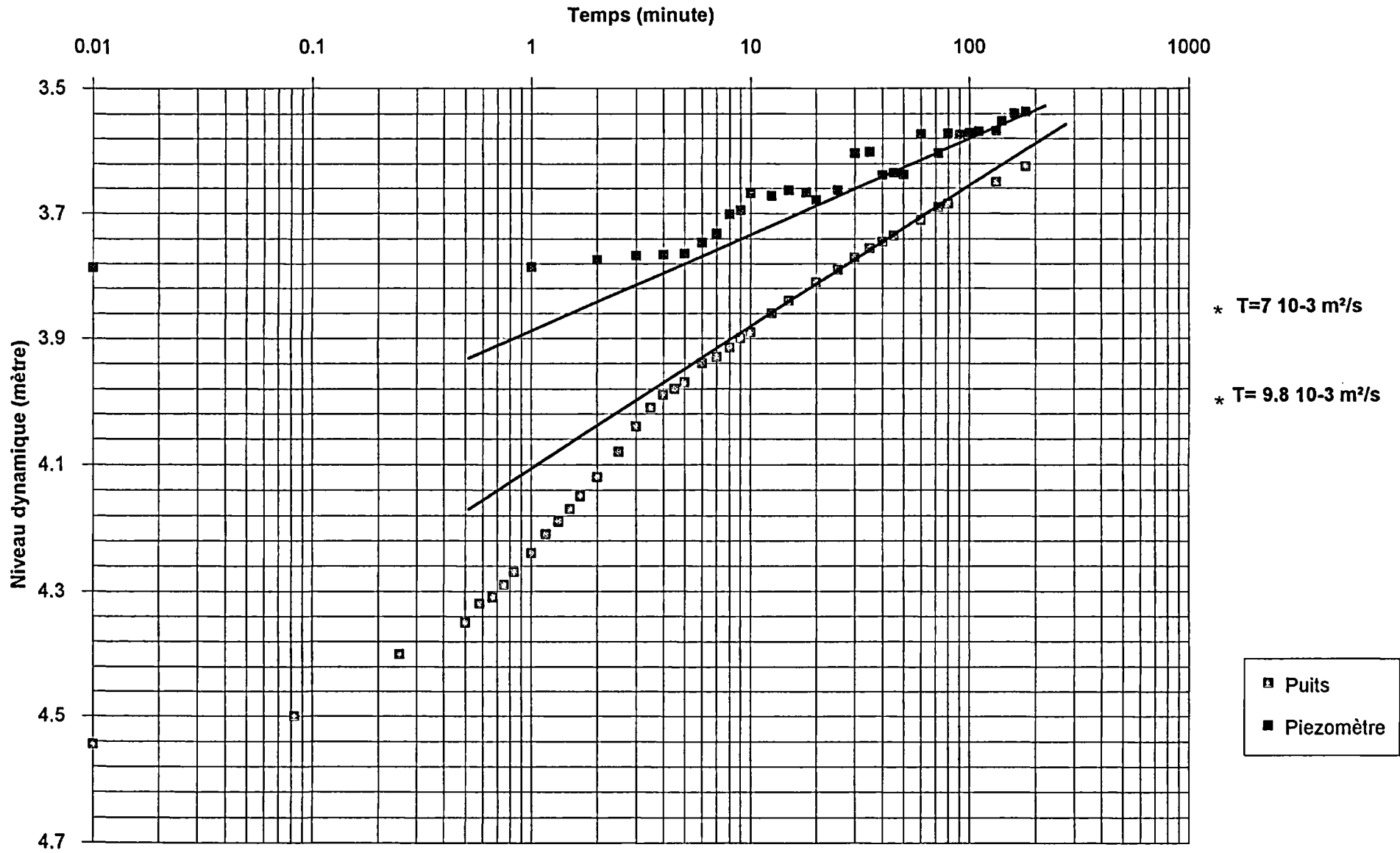
Courbes de remontée 3("Clos de Murlan")



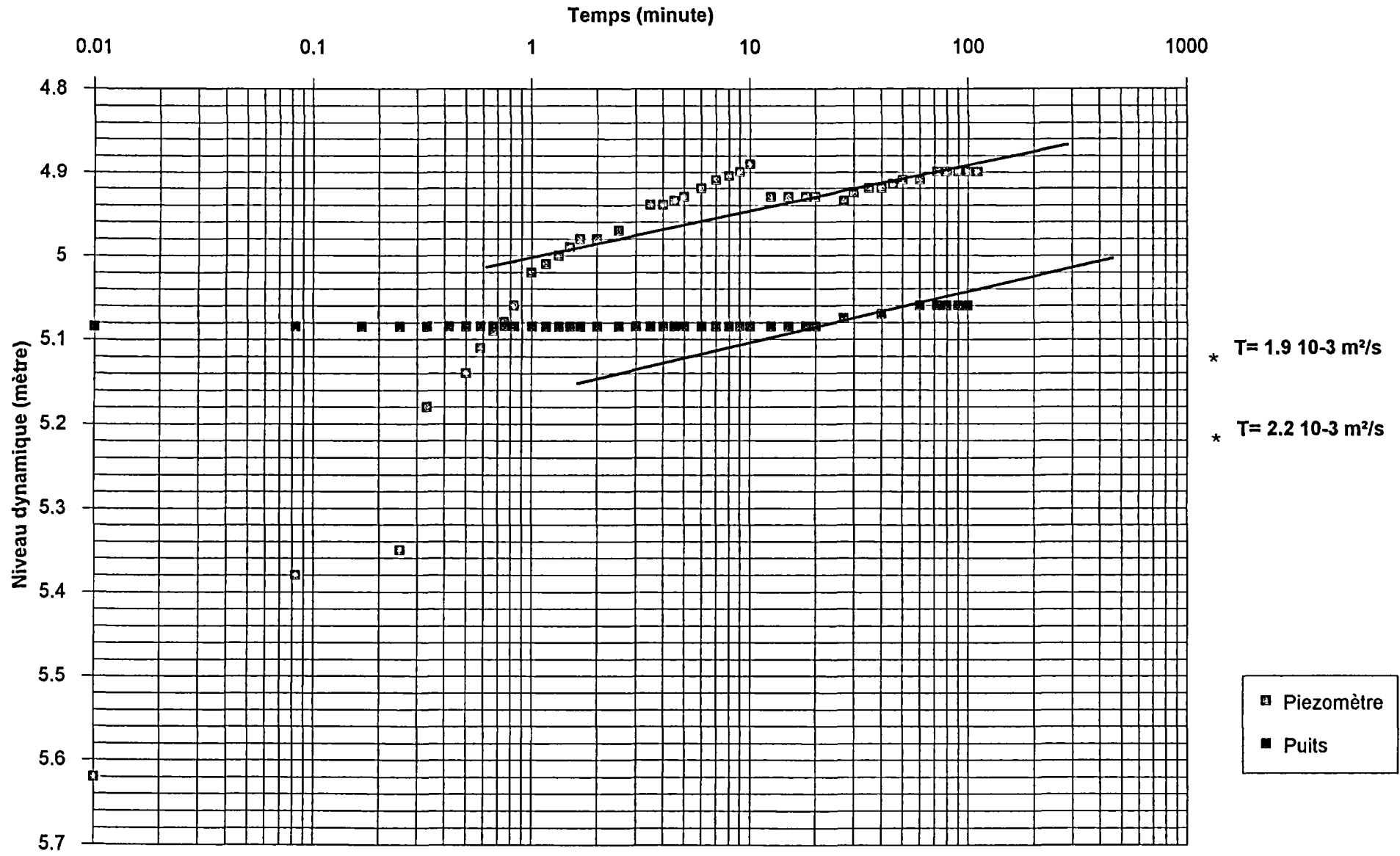
Courbes de remontée 4("Mourlan")



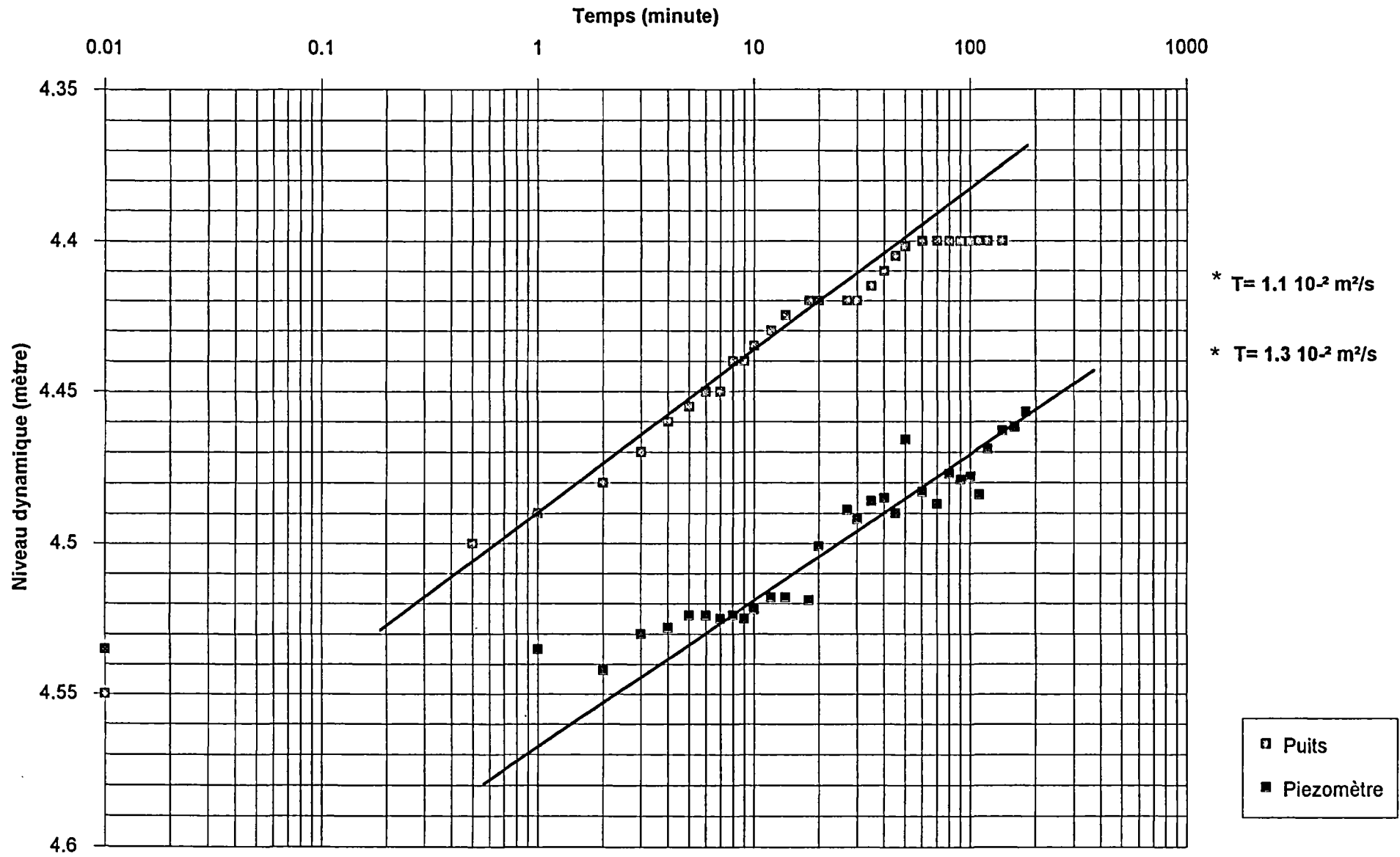
Courbes de remontée 6("Franquet")



Courbes de remontée 7("Le Pot Fendu")



Courbes de remontée 8("Pradet")

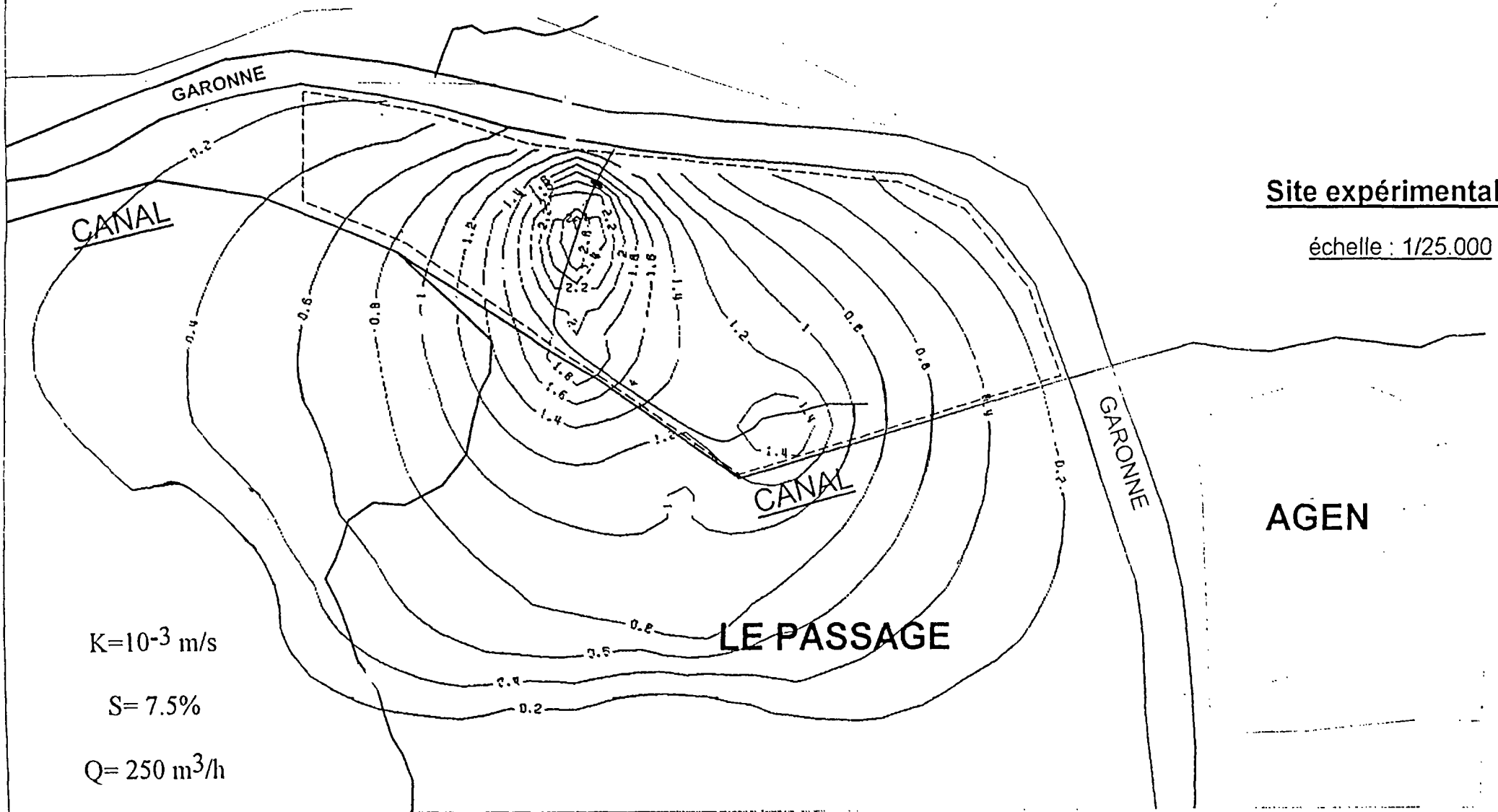


ANNEXE 8

RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION PRÉLIMINAIRE DU PROCESSUS DE RECHARGE ARTIFICIELLE

PRE-MODELE

COURBES D'ISO-REHAUSSEMENT APRES 3 MOIS D'INJECTION
(régime permanent)



Site expérimental

échelle : 1/25.000

AGEN

$K=10^{-3}$ m/s

$S=7.5\%$

$Q=250$ m³/h

LE PASSAGE

ANNEXE 9

RÉSULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES

Expérimentation de recharge artificielle de la nappe alluviale de la Garonne

No du formulaire QAL015

BRGM - ANALYSE
ETUDE C1133B -DE000855- Le 3-JAN-96

Ech. / N.	Ele.	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	CO ₃	Cl	SO ₄
	UNIT	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
	BINF	0.1	0.1	0.1	0.3	6.	6.	0.1	0.1
	BSUP	10000.0	10000.0	10000.0	10000.0	10000.	10000.	10000.0	10000.0
CANAL 1	0001	61.2	7.0	23.8	4.3	204.	-6.	33.1	30.2

Ech. / N.	Ele.	NO ₃	Cu	Zn	Pb	Cd	NKJ	OXYD
	UNIT	mg/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	mg/l	mg/l
	BINF	0.1	10.	5.	5.	5.	1.	0.5
	BSUP	10000.0	10000.	10000.	10000.	10000.	10000.	10000.0
CANAL 1	0001	8.6	-10.	-5.	-5.	-5.	-1.	-0.5

No du formulaire QAL015

BRGM - ANALYSE
ETUDE C1133C -DE000856- Le 3-JAN-96

Ech. / N.	Ele.	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	CO ₃	Cl	SO ₄
	UNIT	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
	BINF	0.1	0.1	0.1	0.3	6.	6.	0.1	0.1
	BSUP	10000.0	10000.0	10000.0	10000.0	10000.	10000.	10000.0	10000.0
MOURLAN 2	0001	103.9	15.1	13.2	1.3	284.	-6.	27.9	42.4

Ech. / N.	Ele.	NO ₃	Cu	Pb	Zn	Cd	NKJ	OXYD
	UNIT	mg/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	mg/l	mg/l
	BINF	0.1	10.	5.	5.	5.	1.	0.5
	BSUP	10000.0	10000.	10000.	10000.	10000.	10000.	10000.0
MOURLAN 2	0001	41.6	-10.	-5.	19.	-5.	-1.	-0.5

No du formulaire QAL015

BRGM - ANALYSE
ETUDE C1133D -DE000857- Le 3-JAN-96

Ech. / N.	Ele.	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	CO ₃	Cl	SO ₄
	UNIT	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
	BINF	0.1	0.1	0.1	0.3	6.	6.	0.1	0.1
	BSUP	10000.0	10000.0	10000.0	10000.0	10000.	10000.	10000.0	10000.0
PRADET/3	0001	46.5	6.1	15.9	2.8	162.	-6.	20.6	24.5

Ech. / N.	Ele.	NO ₃	Cu	Pb	Zn	Cd	NKJ	OXYD
	UNIT	mg/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	mg/l	mg/l
	BINF	0.1	10.	5.	5.	5.	1.	0.5
	BSUP	10000.0	10000.	10000.	10000.	10000.	10000.	10000.0
PRADET/3	0001	6.7	-10.	-5.	-5.	-5.	-1.	-0.5

Expérimentation de recharge artificielle de la nappe alluviale de la Garonne

No du formulaire 0AL015

BRGM - ANALYSE
 ETUDE B1133A -DE000852- Le 5-OCT-95

Ech. / N.	Ele.	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	CO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	NH ₄	NO ₂
	UNIT	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
	BINF	0.1	0.1	0.1	0.3	6.	6.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.01
	BSUP	10000.0	10000.0	10000.0	10000.0	10000.	10000.	10000.0	10000.0	10000.0	10000.0	10000.00
CANAL	0001	36.6	4.2	12.6	1.6	118.	-6.	12.5	24.1	5.1	-0.1	-0.01
PRADET	0002	125.5	19.9	15.2	3.2	227.	-6.	21.0	73.0	122.0	-0.1	-0.01
MOURLAN	0003	104.2	19.6	16.0	1.4	263.	-6.	26.2	57.5	48.7	-0.1	-0.01
GARONNE	0004	43.2	8.3	19.6	2.5	141.	-6.	19.6	29.4	8.4	0.5	0.22

Ech. / N.	Ele.	F	PO ₄	SiO ₂	Al	Fe	Mn	As	Cd	Cu	Pb	Zn	B
	UNIT	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l
	BINF	0.1	0.1	0.5	0.03	0.02	5.	10.	5.	10.	5.	5.	20.
	BSUP	10000.0	10000.0	10000.0	10000.00	10000.00	10000.	10000.	10000.	10000.	10000.	10000.	10000.
CANAL	0001	-0.1	-0.1	1.9	-0.03	0.02	-5.	-10.	-5.	-10.	-5.	30.	20.
PRADET	0002	-0.1	0.3	18.7	-0.03	0.03	-5.	-10.	-5.	-10.	-5.	81.	24.
MOURLAN	0003	-0.1	-0.1	18.6	-0.03	-0.02	-5.	-10.	-5.	-10.	-5.	18.	29.
GARONNE	0004	-0.1	0.7	4.1	-0.03	0.02	7.	-10.	-5.	-10.	-5.	16.	52.

Ech. / N.	Ele.	Be	Cr	Co	Ni	Sr	Ag	Ba	Li	Hg	H.T.
	UNIT	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	mg/l	ug/l	ug/l	mg/l	ug/l	mg/l
	BINF	5.	10.	10.	10.	0.01	5.	5.	0.01	0.5	0.1
	BSUP	10000.	10000.	10000.	10000.	10000.00	10000.	10000.	10000.00	10000.0	10000.0
CANAL	0001	-5.	-10.	-10.	-10.	0.12	-5.	21.	-0.01	-0.5	-0.1
PRADET	0002	-5.	-10.	-10.	-10.	0.29	-5.	54.	-0.01	-0.5	-0.1
MOURLAN	0003	-5.	-10.	-10.	-10.	0.28	-5.	70.	-0.01	-0.5	-0.1
GARONNE	0004	-5.	-10.	-10.	-10.	0.16	-5.	34.	-0.01	-0.5	-0.1

 * EDITION DE LA BALANCE IONIQUE *

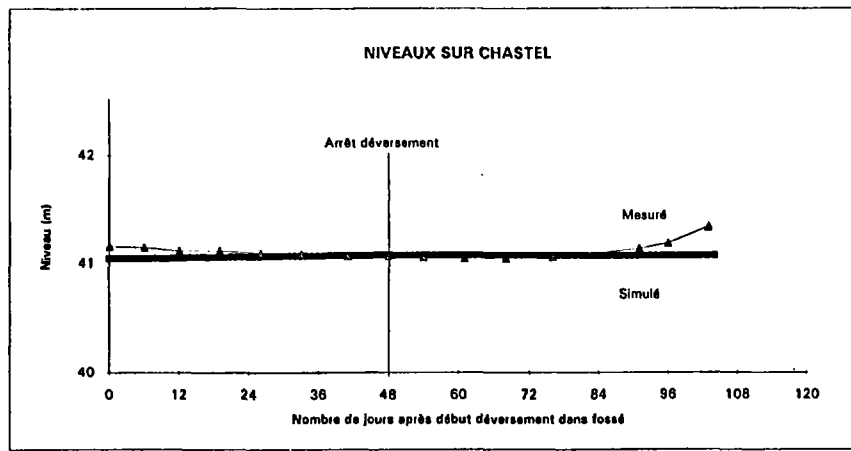
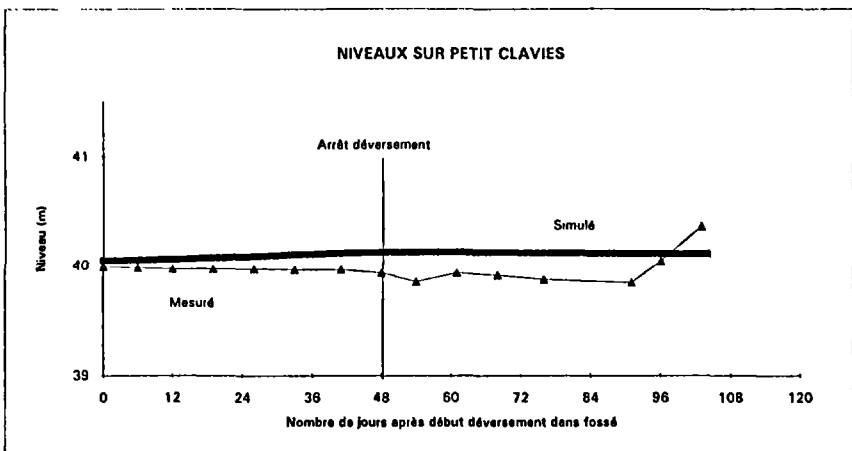
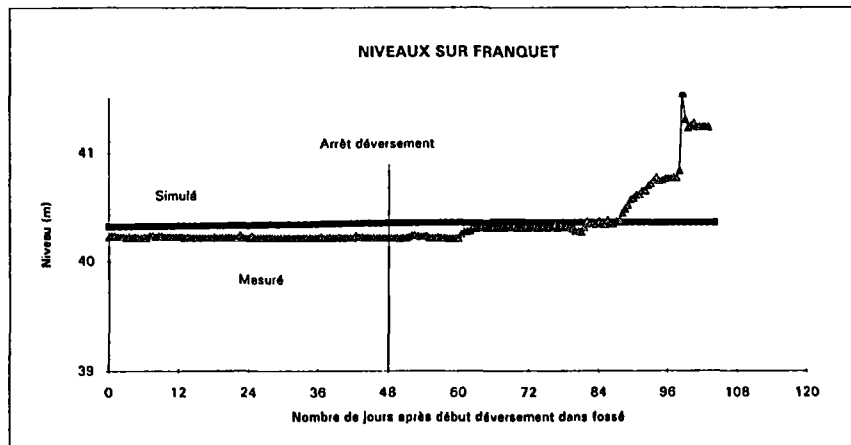
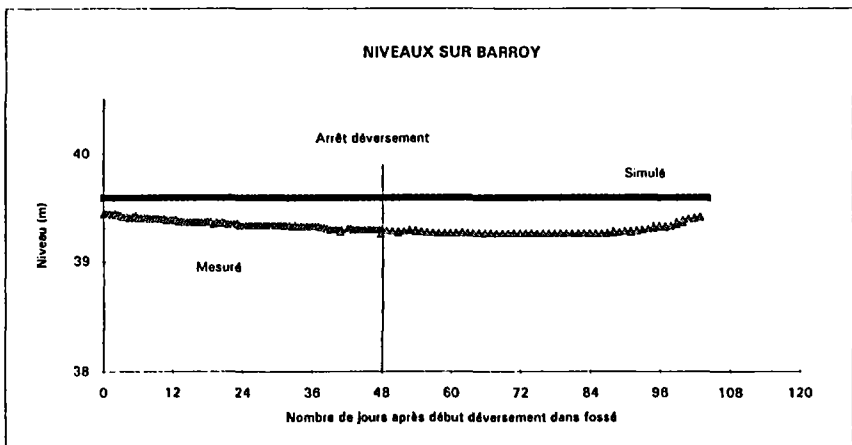
NMGA	ANIONS	CATIONS	DIFFERENCE
0001	-2.87	2.76	3.94 ‰
0002	-7.81	8.65	9.68 ‰
0003	-7.03	7.55	6.82 ‰
0004	-3.64	3.79	3.77 ‰

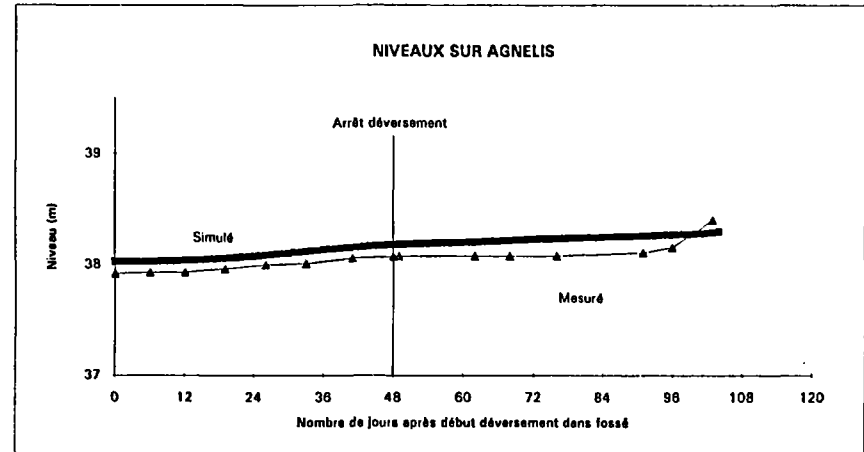
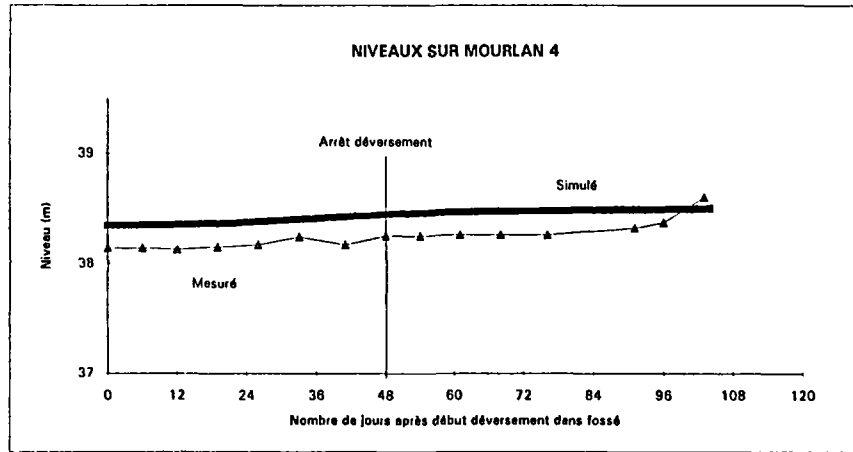
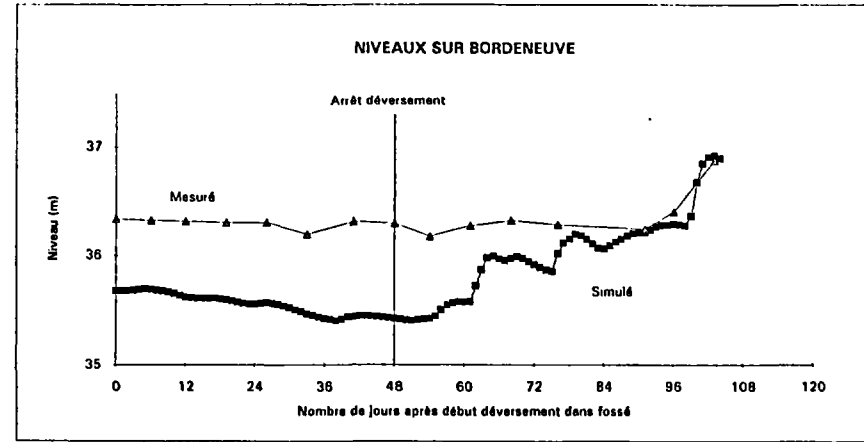
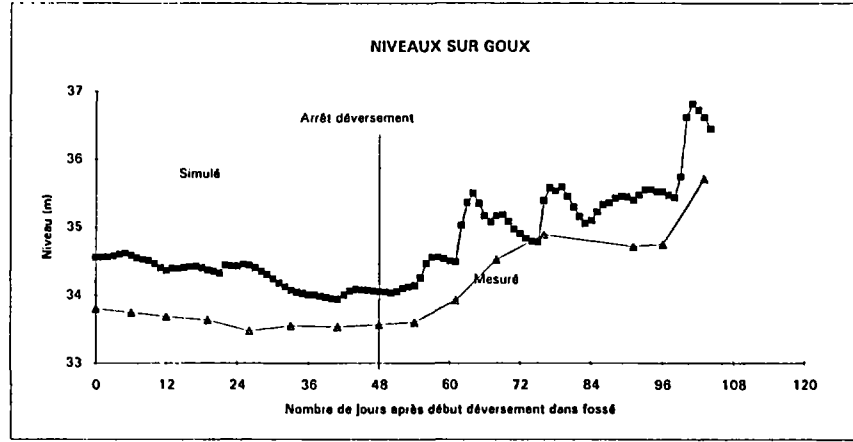
 * EDITION EN MILLIEQUIVALENTS/LITRE *

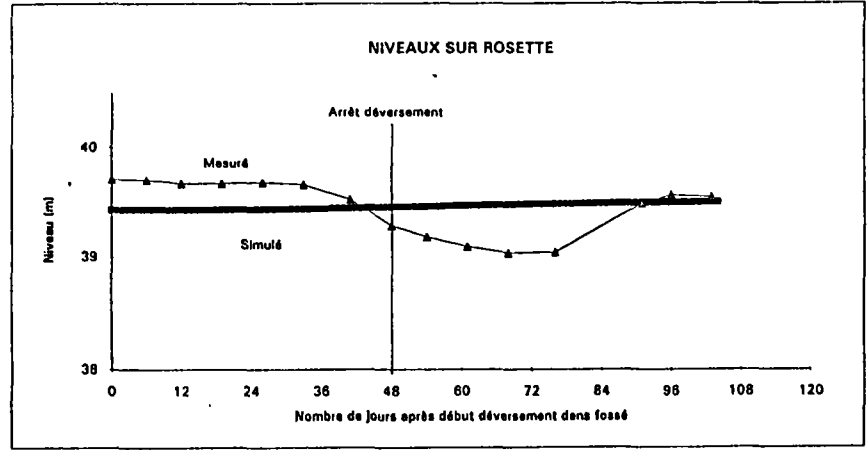
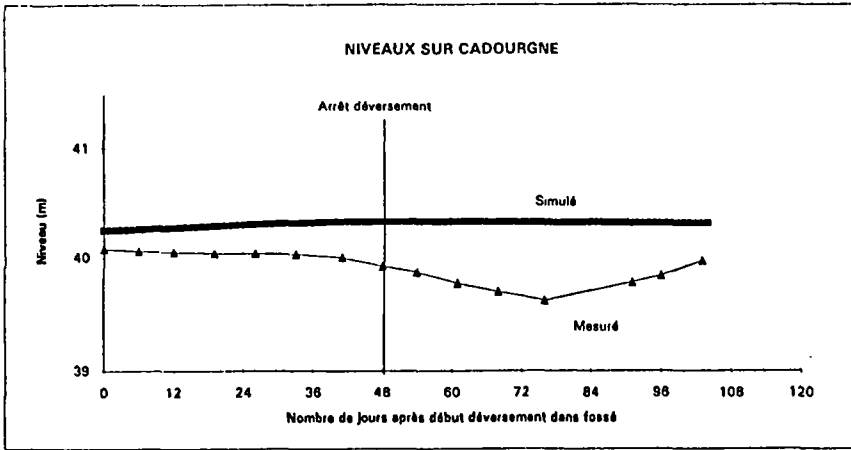
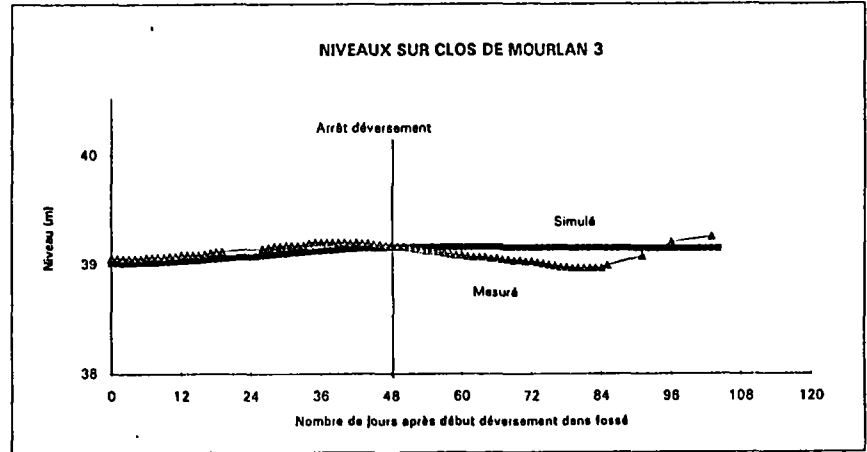
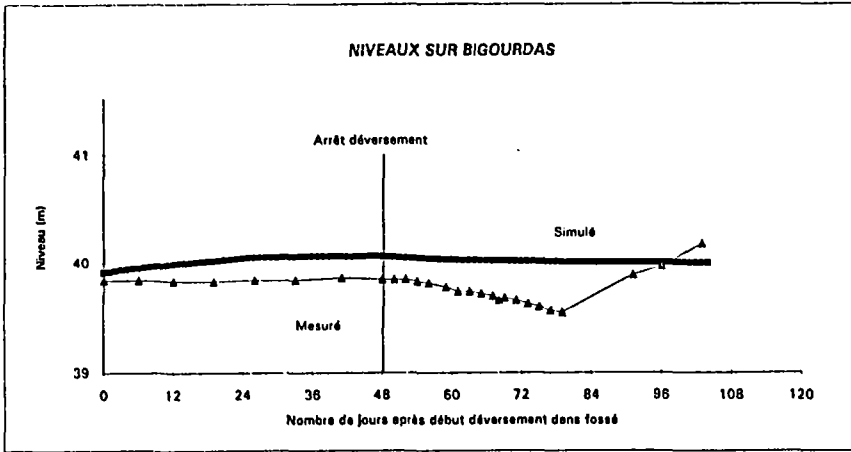
NMGA	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	CO ₃	CL	SO ₄	NO ₃	NH ₄	NO ₂	F	PO ₄	B	SR
0001	1.83	0.35	0.55	0.04	-1.93	0.00	-0.35	-0.50	-0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0002	6.26	1.64	0.66	0.08	-3.72	0.00	-0.59	-1.52	-1.97	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01
0003	5.20	1.61	0.70	0.04	-4.31	0.00	-0.74	-1.20	-0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
0004	2.16	0.68	0.85	0.06	-2.31	0.00	-0.55	-0.61	-0.14	0.03	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00

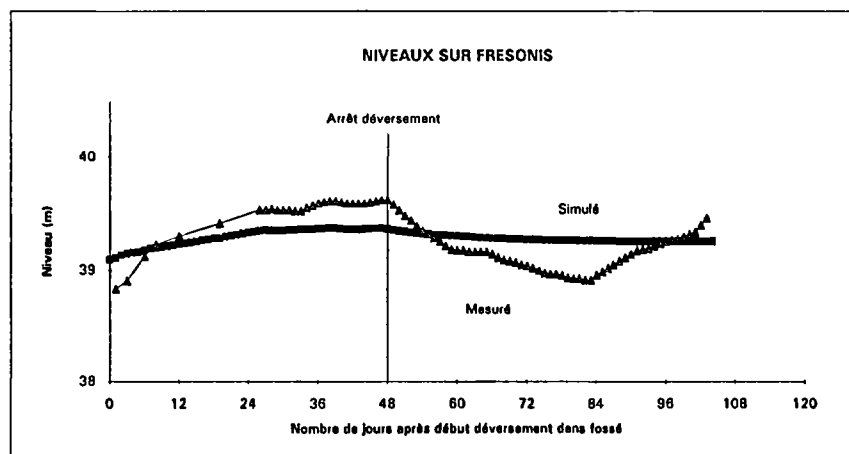
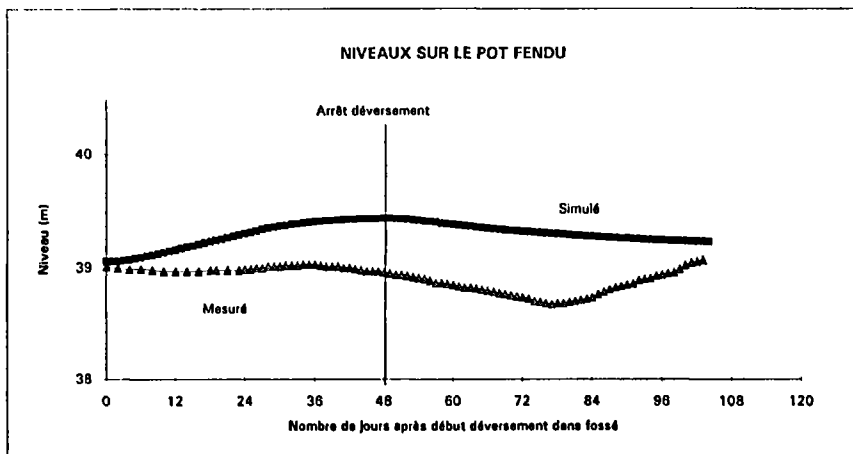
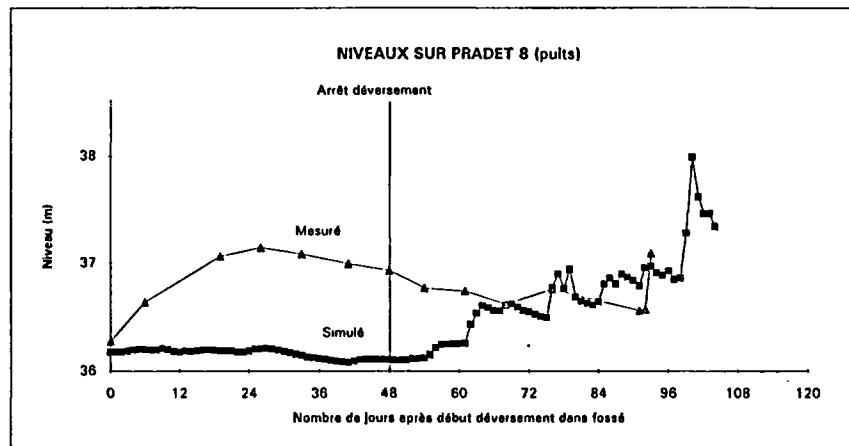
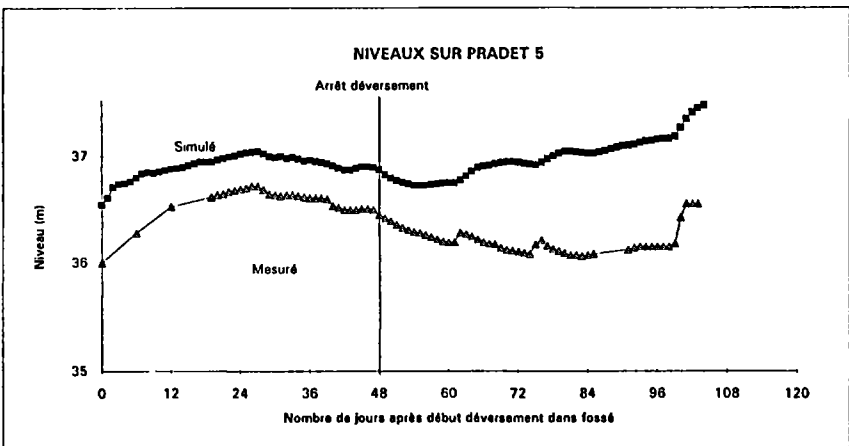
ANNEXE 10

RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DU PROCESSUS DE RECHARGE ARTIFICIELLE Évolution des niveaux observés et calculés



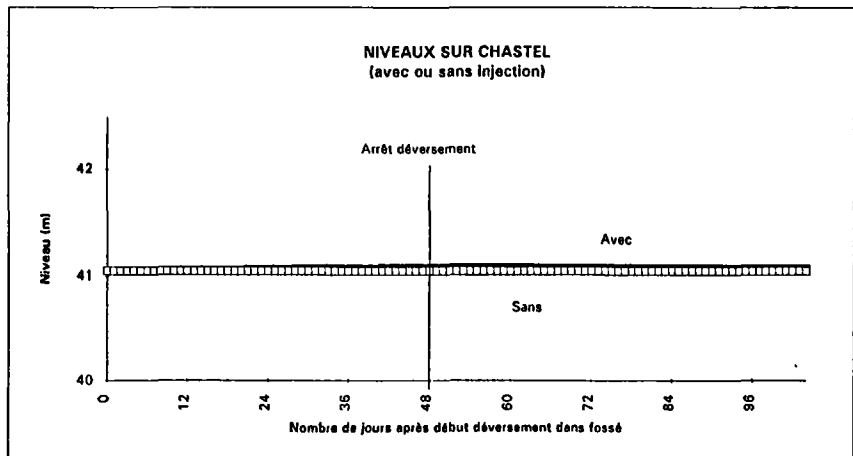
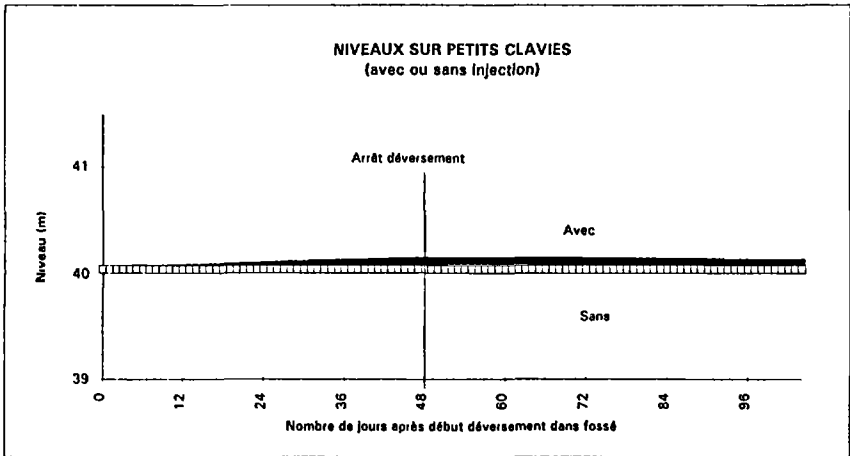
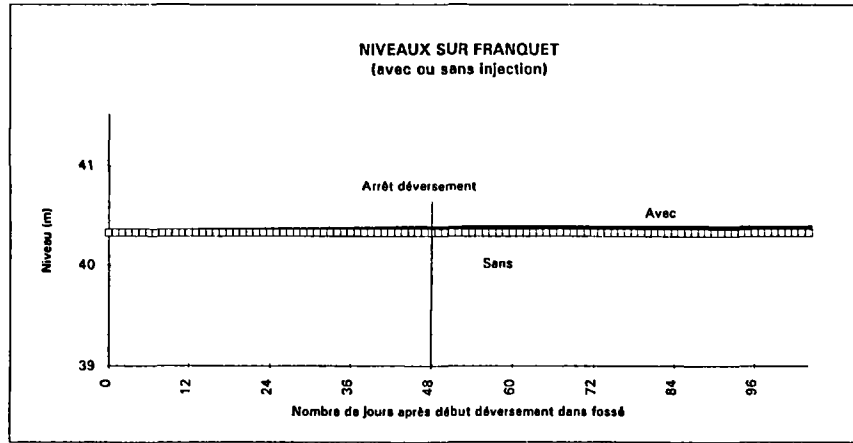
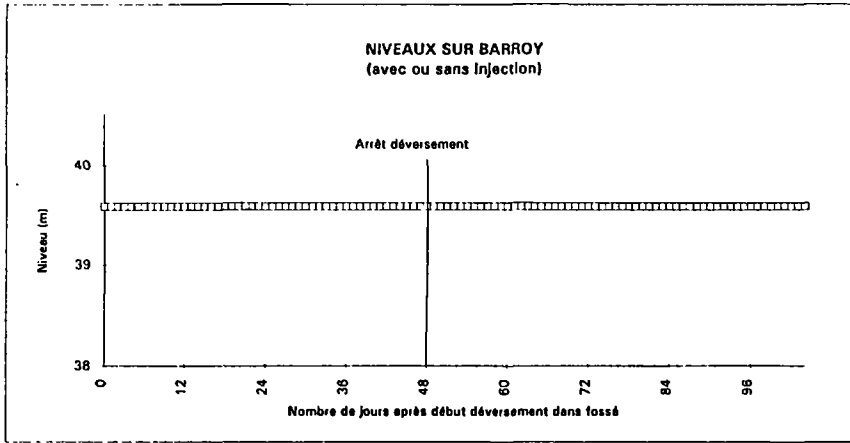


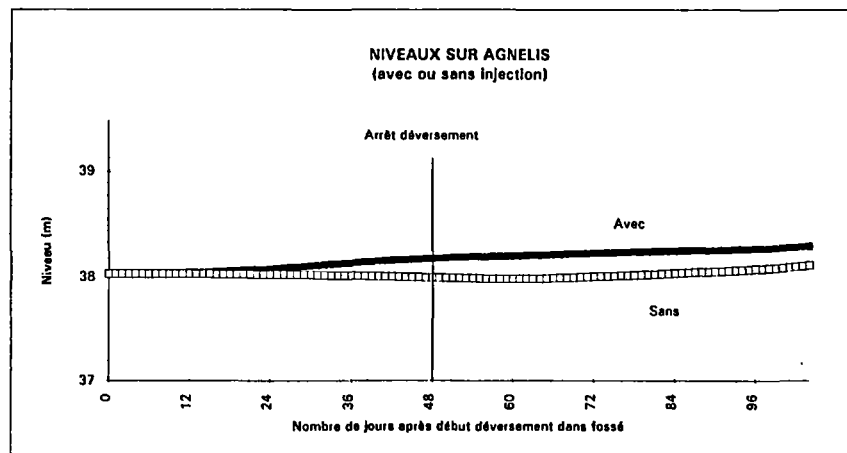
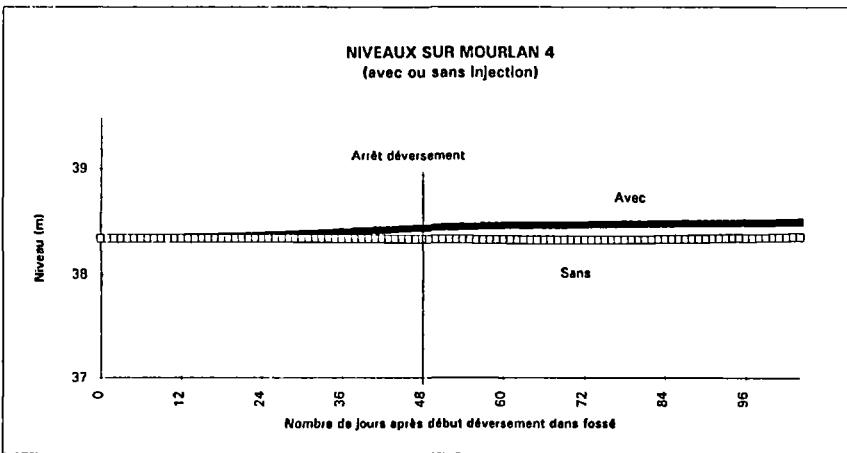
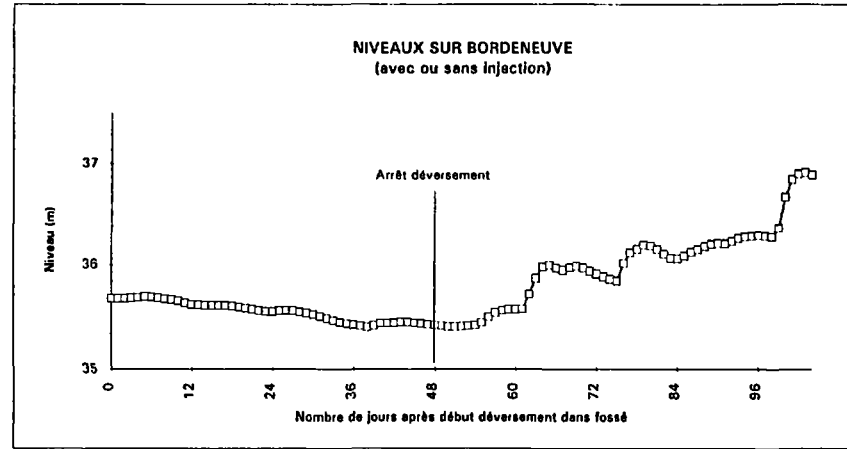
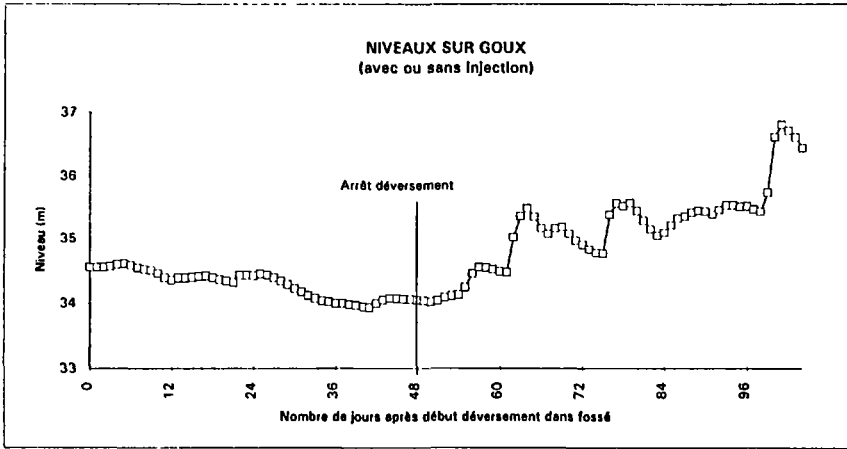


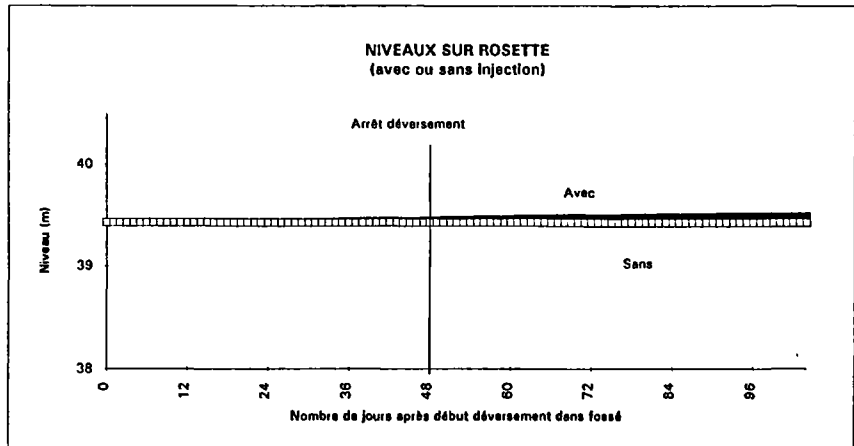
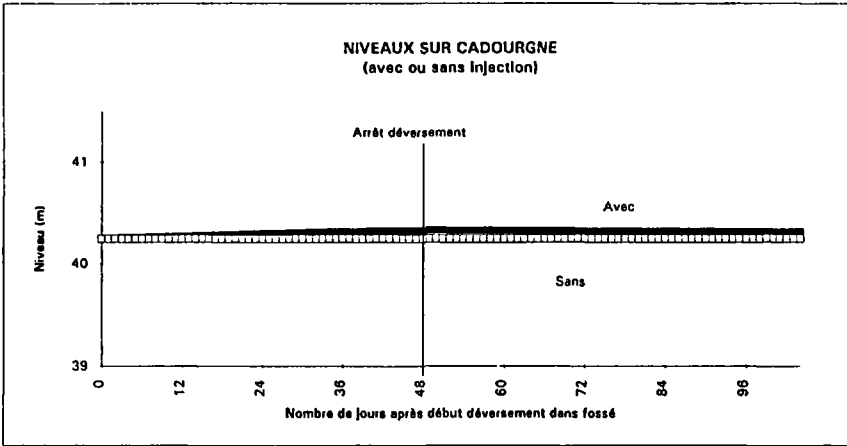
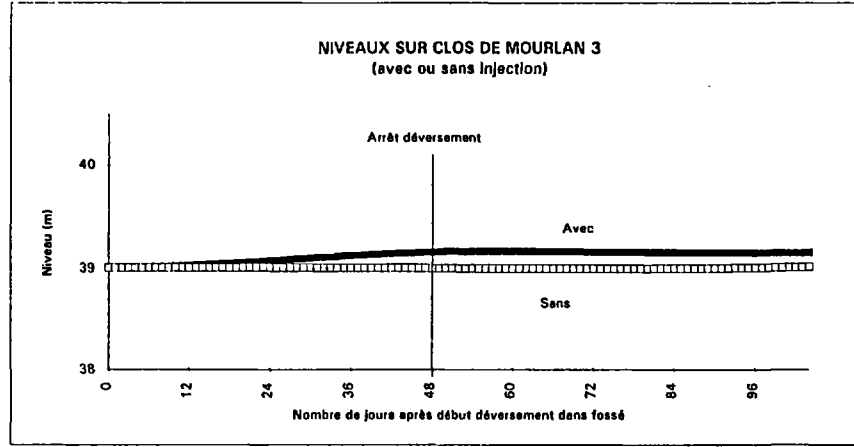
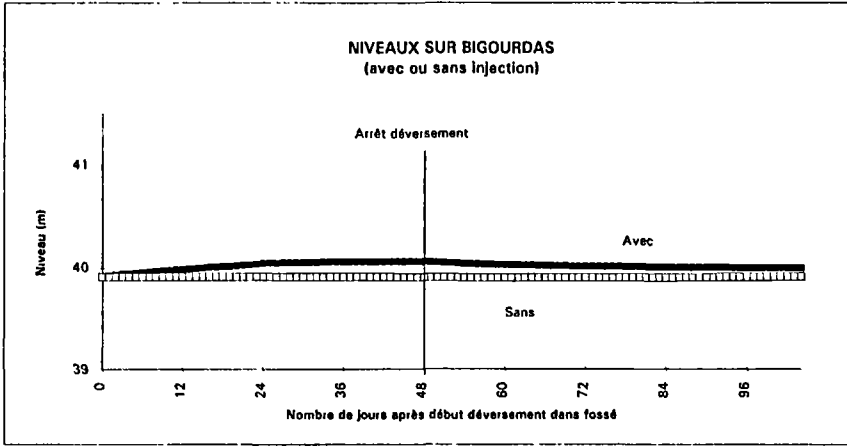


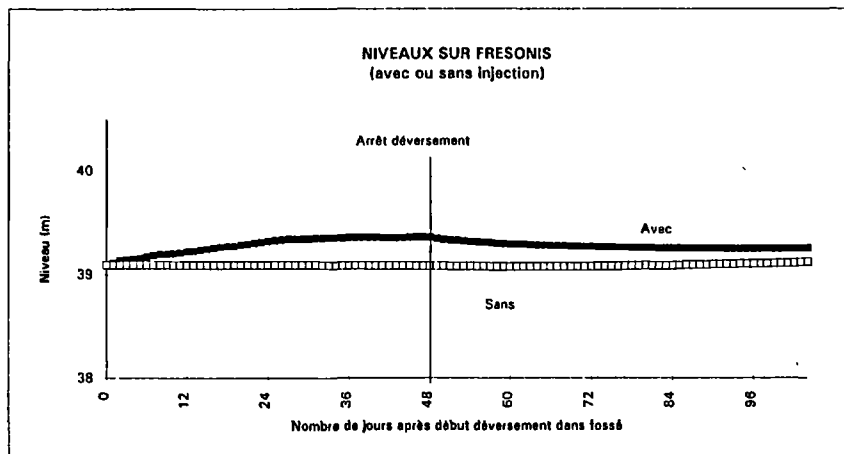
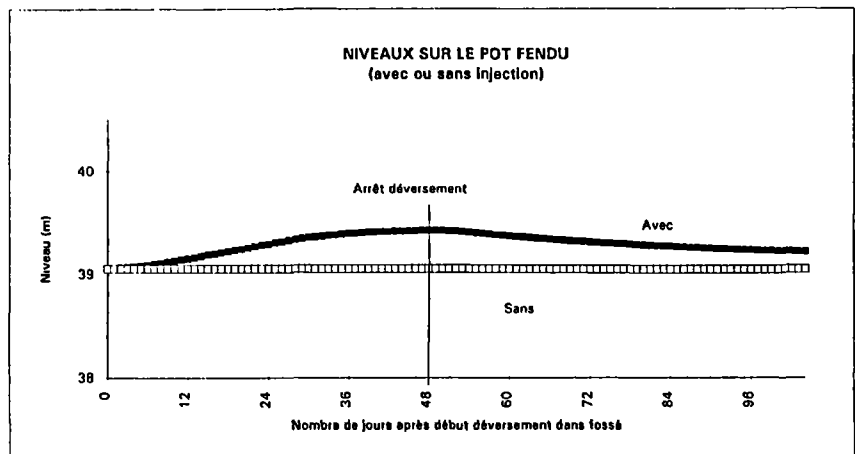
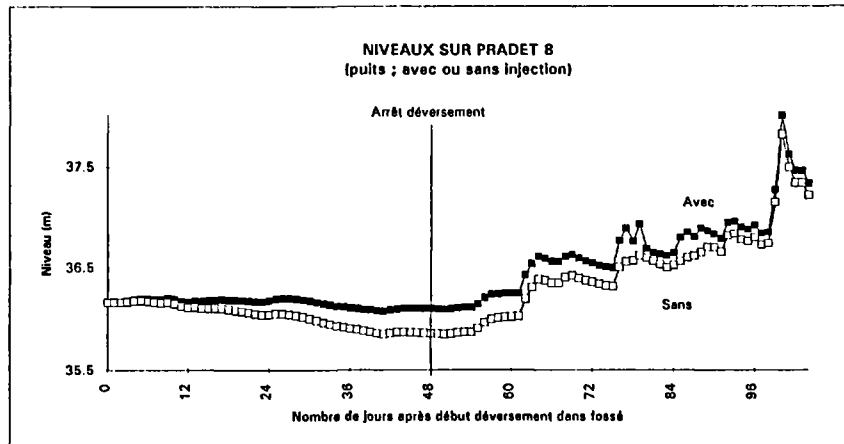
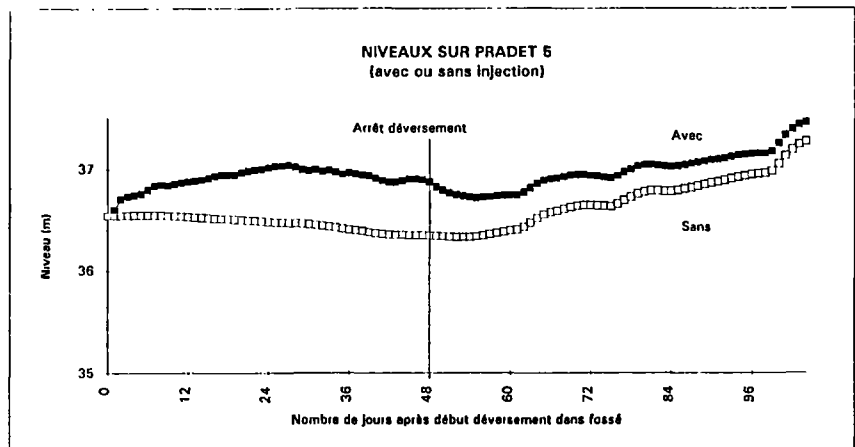
ANNEXE 11

RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DU PROCESSUS DE RECHARGE ARTIFICIELLE Évolution des niveaux calculés avec et sans injection









ANNEXE 12

SIMULATION PROCESSUS DE RECHARGE ARTIFICIELLE
Évolution des niveaux calculés sur 200 jours
(4800 m³/j pendant 100 j).

