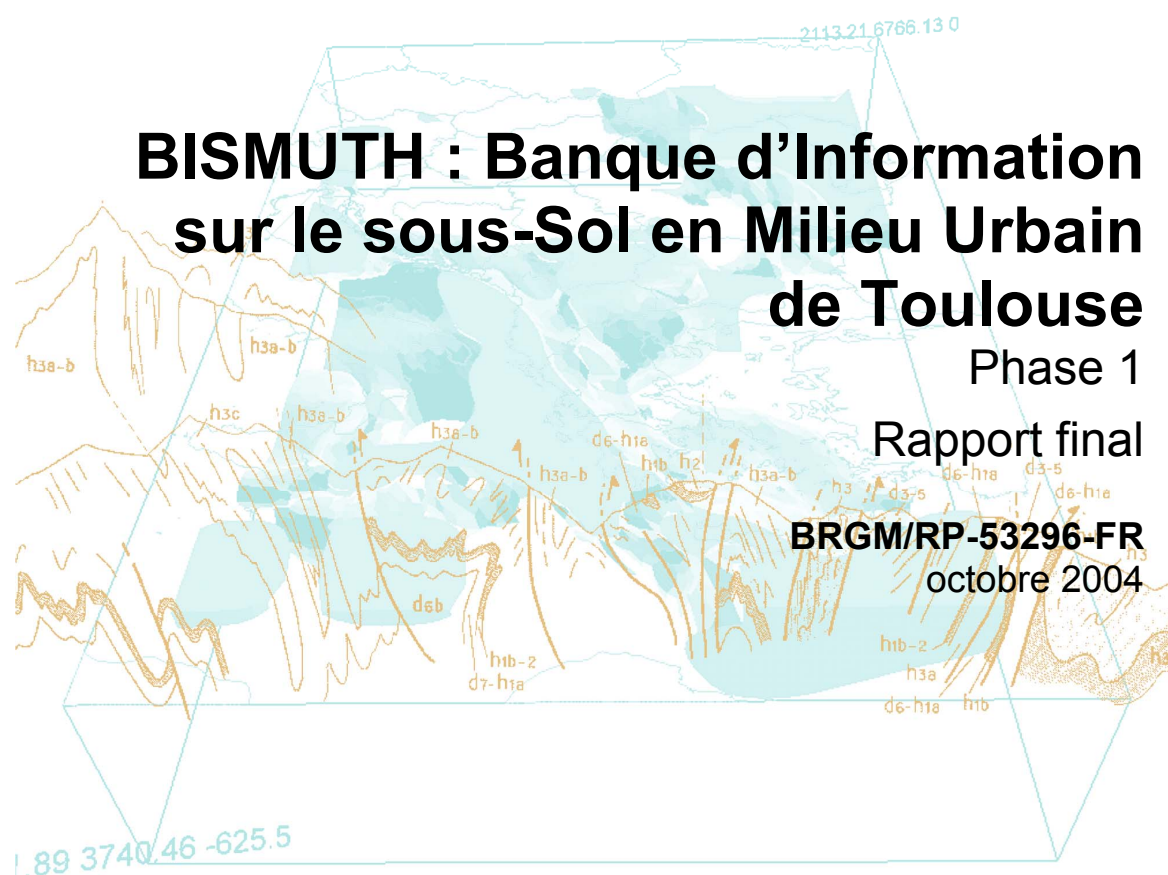




BISMUTH : Banque d'Information sur le sous-Sol en Milieu Urbain de Toulouse

Phase 1

Rapport final

BRGM/RP-53296-FR

octobre 2004

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de service public du BRGM 2003-URB-A05

**Bouroullec I., Delpont G., Dutartre Ph., Poux E.,
Ricard J., Tilloloy F., Tomera L., Thierry P.**

Vérificateur :

Original signé par : P. THIERRY

Approbateur :

Original signé par : Ph. DUTARTRE

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

Mots clés : Géologie et hydrogéologie urbaines, BISMUTH, Base de données géologiques et hydrogéologiques, Toulouse, Haute-Garonne

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

I. Bouroullec, G. Delpont, Ph. Dutartre, E. Poux, J. Ricard, F. Tilloloy, L. Tomera, P. Thierry (2004) – BISMUTH : Banque d'Information sur le sous-Sol en Milieu Urbain de Toulouse - Phase 1. BRGM/RP-53296-FR. Rapport final – 119 p., 22 ill., 9 ann.

Synthèse

La présente étude a été entreprise dans le cadre d'une convention de recherche et développement partagée entre la Ville de Toulouse et le BRGM. Les travaux ont été réalisés par le Service Géologique Régional de Midi-Pyrénées du BRGM en collaboration avec le Service de l'Urbanisme et de l'Environnement de la Ville

La Ville de Toulouse doit gérer l'impact sur le sol et le sous-sol des travaux aériens ou souterrains effectués sur son territoire. Ainsi, en octobre 2003, la Ville de Toulouse et le BRGM, ont convenu de lancer la mise en place de la **Banque d'Information sur le sous-Sol en Milieu Urbain de Toulouse géologique et Hydrogéologique (BISMUTH)**, afin de disposer pour toute décision d'aménagement d'une information géologique immédiatement accessible et directement exploitable.

L'objectif principal du projet (dans sa première phase) est de créer une base de données unique à partir des informations contenues dans la Banque des données du Sous-Sol du BRGM ou acquises à l'occasion des chantiers sous maîtrise d'ouvrage de la Ville de Toulouse. Au-delà des données dont disposent les deux partenaires, il est visé à terme, d'y intégrer tous les travaux de reconnaissance réalisés sur Toulouse.

Le second objectif est de réaliser des modélisations géologiques et hydrogéologiques 3D à partir des informations verticales validées (sondages,...) d'une part et de la mise en place d'un réseau de suivi des eaux souterraines d'autre part.

La démarche suivie s'articule autour des points suivants :

- **Conception de la base de données urbaines** : cette base est gérée et utilisée via la mise en œuvre combinée de trois outils complémentaires :
 - les logiciels standards : ACCESS et MAPINFO pour l'organisation et la représentation des données,
 - le logiciel GDM du BRGM pour le traitement des données de forages et leur modélisation.
- **Collecte des données sur le sous-sol** : les données géologiques brutes, naturellement hétérogènes, doivent être codées en corps lithologiquement et stratigraphiquement équivalents pour aboutir à une description globalement homogène des formations alluviales et molassiques qui composent le sous-sol toulousain.
- **Modélisation des données (GDM)** : s'appuyant sur la carte géologique à 1/50 000 et un MNT, les données collectées autorisent de premières représentations géologiques de la Ville de Toulouse : cartographie, coupes, modélisations géologiques 3D dont celle du niveau alluvial susceptible de permettre la réinfiltration des eaux pluviales.

- **Mise en place d'un réseau de suivi de données hydrogéologiques** : elle consiste en une sélection des puits qui atteignent ou traversent les formations alluviales aquifères.
- **Lancement du suivi du réseau** : visite de terrain des puits existants, validation des points retenus, premières campagnes de mesures.
- **Bilan et recommandations pour la deuxième phase.**

Sommaire

1. Introduction	9
2. Contexte	11
2.1. LES PROBLÈMES SPÉCIFIQUES À LA VILLE DE TOULOUSE	11
2.2. PRÉPARATION	12
2.3. CADRAGE	13
3. Module 1 : Conception de la base de données	15
3.1. STRUCTURATION DE LA BASE DE DONNÉES URBAINES	15
3.2. BASE DE SONDAGES ACCESS	15
3.3. BASE MAPINFO	15
3.4. BASE GDM	15
4. Module 2 : Collecte des données sur le sous-sol	17
4.1. LES DONNÉES	17
4.1.1. Les données issues du BRGM	17
4.1.2. Les données issues de la Ville de Toulouse	18
4.1.3. Contenu et qualité des données	18
4.2. SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE	21
4.2.1. Présentation géographique et géomorphologique de Toulouse	21
4.2.2. Description des différentes formations géologiques	23
4.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	31
4.3.1. La nappe infra-molassique	32
4.3.2. Les nappes intra-molassiques	32
4.3.3. Les nappes alluviales	32
4.3.4. Potentiel aquifère	33
4.4. COUPE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE SCHÉMATIQUE	34
4.5. DÉFINITION DU LEXIQUE D'INTERPRÉTATION LITHOLOGIQUE	35
4.5.1. Généralités	35

4.5.2. Présentation du référentiel géologique	35
4.6. MODALITÉS DE L'INTERPRÉTATION LITHOLOGIQUE.....	38
5. Module 3 : Mise en place de la base de données GDM	39
5.1. VALIDATION ET SÉLECTION DES OUVRAGES DANS LA BASE DE SONDAGES ACCESS	39
5.2. MODÉLISATION À LA DATE DU RAPPORT	41
5.2.1. Le modèle numérique de terrain (MNT)	41
5.2.2. Modifications de la carte géologique	43
5.2.3. Mode opératoire sommaire de la modélisation	44
5.2.4. Modélisation géologique	44
5.2.5. Cartographie du niveau sablo-graveleux	48
6. Module 4 : Mise en place d'un réseau de suivi de données hydrogéologiques	53
6.1. MÉTHODE DE SÉLECTION DES PIÉZOMÈTRES POTENTIELS.....	53
6.2. PRÉPARATION DES VISITES DES PUITES	55
6.3. VISITE DES PUITES SÉLECTIONNÉS	55
6.4. SAISIE DES DONNÉES.....	57
7. Module 4 bis : Initiation du suivi piézométrique	59
8. Module 5 : Bilan et recommandations.....	61
8.1. BILAN DE LA PHASE 1	61
8.2. RECOMMANDATIONS POUR LA PHASE 2	61
9. Conclusion	63
10. Bibliographie	65
11. Abréviations	67

Liste des illustrations

Illustration 1 -	Etapas de la phase 1.....	14
Illustration 2 -	Localisation des sondages utilisés pour l'étude.	19
Illustration 3 -	Carte oro-hydrographique de la commune de Toulouse.	22
Illustration 4 -	Schéma de la séquence molassique élémentaire.....	23
Illustration 5 -	Schéma de la séquence alluviale élémentaire.....	25
Illustration 6 -	Comparaison des nomenclatures et des phases glaciaires associées.....	27
Illustration 7 -	Carte des principales nappes présentes au droit de la ville de Toulouse.....	31
Illustration 8 -	Coupe géologique et hydrogéologique schématique.....	34
Illustration 9 -	Référentiel géologique élaboré sur la commune de Toulouse.....	36
Illustration 10 -	Ouvrages sélectionnés pour la modélisation.	40
Illustration 11 -	Exemple de localisation du semis de points photogrammétrique utilisé pour calculer le MNT sur la ville de Toulouse.	42
Illustration 12 -	Vue perspective de la morphologie de la commune de Toulouse.	43
Illustration 13 -	Vue perspective de la carte géologique modifiée.	44
Illustration 14 -	La butte de Jolimont –coupe n° 1 SW-NE.....	45
Illustration 15 -	Le passage de la basse terrasse à la basse plaine – coupe n° 2 W-E.....	46
Illustration 16 -	Coupe sans sondages sur une largeur de 100 m – coupe n° 3W-E.....	46
Illustration 17 -	Carte pour la recherche des sondages sur la Ville de Toulouse.	47
Illustration 18 -	Carte de l'épaisseur des formations superficielles.....	49
Illustration 19 -	Carte des isobathes du toit de la molasse.	49
Illustration 20 -	Carte d'avancement du suivi des mailles contenant les puits à visiter. (au 1 ^{er} septembre 2004).....	54
Illustration 21 -	Nombre des puits visités.	55
Illustration 22 -	Localisation des piézomètres potentiels.	56

Liste des annexes

Annexe 1 -	Description de la base de sondages ACCESS	69
Annexe 2 -	Mode d'emploi de la base GDM pour le traitement des données de forages et leur modélisation	77
Annexe 3 -	Carte géologique de la ville de Toulouse	93
Annexe 4 -	Extrait de la liste des sondages de la ville de Toulouse.....	97

Annexe 5 - Evolution morphologique des vallées de la Garonne et de l'Hers Formation des terrasses étagées.....	101
Annexe 6 - Localisation des sondages utilisés pour la modélisation sur fond de carte géologique modifiée	105
Annexe 7 - Carte des épaisseurs des formations alluviales sablo-graveleuses de la basse terrasse et de la basse plaine de la Garonne	109
Annexe 8 - Liste des puits retenus par la visite de terrain.....	113
Annexe 9 - Fiche descriptive d'un puits.....	117

1. Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une convention de recherche et développement partagée entre la Ville de Toulouse et le BRGM.

La Ville de Toulouse est dotée d'un service de l'Urbanisme et de l'Environnement chargé, notamment, de gérer l'impact sur le sol et le sous-sol des différentes réalisations aériennes ou souterraines liées à l'aménagement de son territoire. Suite au besoin de connaissances détaillées sur le sol et le sous-sol pour mener à bien ces objectifs, il a été décidé de collecter, synthétiser et organiser les données géologiques urbaines disponibles.

La Ville de Toulouse s'est ainsi rapprochée du BRGM pour la mise en place d'une banque de données géologiques urbaines dont l'objet est la création et l'exploitation d'une **Banque d'Information sur le sous-Sol en Milieu Urbain de Toulouse géologique et Hydrogéologique (BISMUTH)**. Ce programme entre dans le cadre des missions de recherche et de service public du BRGM visant à l'amélioration et la diffusion des connaissances dans le domaine des sciences de la Terre. Il s'agit en particulier de celles concernant l'acquisition d'informations, la cartographie et la modélisation, géologique et hydrogéologique.

Deux phases sont prévues pour étaler et organiser dans le temps les étapes de ce programme ambitieux. La phase 1, objet du présent rapport, vise à :

- créer la base de données à partir des informations disponibles chez les deux partenaires ;
- développer une première modélisation ;
- mettre en place un réseau de suivi des eaux souterraines ;
- et préconiser les actions à mener dans le cadre de la phase 2.

L'objectif premier de la banque d'information sur le sous-sol urbain est de rassembler dans une base unique les informations géoréférencées des sondages et ouvrages de reconnaissance réalisés sur Toulouse qui sont actuellement conservés par différents organismes ou services, sous des formes diverses (papier, numérique). Il s'agit de mettre à la disposition des techniciens, d'une part la position des données factuelles existantes et disponibles, d'autre part une synthèse interprétée et validée du contenu de ces dossiers (logs géologiques, piézométrie, ...) pour en faciliter l'exploitation.

2. Contexte

2.1. LES PROBLÈMES SPÉCIFIQUES À LA VILLE DE TOULOUSE

L'environnement géologique de la ville de Toulouse est constitué d'un substratum tertiaire de roches tendres, les formations molassiques, sur lesquelles la Garonne a déposé des alluvions au fur et à mesure de son enfoncement. En effet, le creusement croissant des cours d'eau a entraîné l'échelonnement de plusieurs terrasses d'autant plus anciennes que leur altitude relative mesurée au dessus du lit actuel est élevée. Localement, des formations superficielles variées, liées soit à des glissements ou des solifluxions, soit à des altérations en place ou encore à des épandages, compliquent ce schéma simple. Par ailleurs, et comme dans tout environnement urbain, l'action anthropique a pu modifier profondément ce même schéma.

Dans sa politique d'aménagement, la ville de Toulouse est confrontée à deux problèmes liés au sous-sol.

Le premier correspond au problème de l'implantation de bâtiments et infrastructures sur des terrains de bonne qualité. Les secteurs de molasse et de terrasses ne posent a priori pas de réels problèmes pour la recherche de fondations stables, hormis éventuellement la partie superficielle altérée qu'il est possible de définir. Il est seulement important de ne pas ignorer l'hétérogénéité naturelle de ces formations, tant lithologique que spatiale. Par contre, pour les terrains rapportés et pour les zones alluviales récentes, l'hétérogénéité d'autant plus forte du milieu rend la stabilité plus difficile à assurer. Dans les zones alluviales, la variabilité des faciès est un facteur d'incertitude lors de l'implantation d'ouvrages. En effet, si les différents faciès susceptibles d'être rencontrés sont bien connus, leur répartition et leur disposition spatiale ne le sont pas. Elles résultent des conditions hydrodynamiques et de la paléogéographie des cours d'eau au moment des dépôts. La compilation des données de sondages disponibles permettrait de mieux connaître la disposition de ces faciès, en particulier celle de niveaux spécifiques impliqués dans les désordres connus. Eu égard à l'importance de l'activité anthropique de surface oblitérant pratiquement toute possibilité de reconnaissance directe, c'est à travers une exploitation fine des données de sondages que peut être réalisé un réel progrès dans la cartographie géologique de la ville de Toulouse. Des interprétations des épaisseurs des différents faciès peuvent y être associées et apportent ainsi les premiers éléments de réponse à bon nombre des problèmes géotechniques de la ville.

Le second correspond au problème lié aux aspects quantitatifs et qualitatifs des eaux souterraines qui constituent des facteurs essentiels qu'il convient de prendre en compte lors des projets d'aménagement. La connaissance de la nappe phréatique et son évolution dans le temps est essentielle à la Ville de Toulouse pour définir des choix stratégiques, mais aussi pour évaluer sa politique environnementale, et la traduire

dans le tableau de bord de l'Environnement qu'elle met en œuvre à cet effet. Cette connaissance permettra :

- de maîtriser l'impact des aménagements sur les caractéristiques des nappes phréatiques (variations de niveau, recharge,...). En effet, si dans l'espace rural les nappes offrent surtout un intérêt en terme de ressource (AEP), dans l'espace urbain, elles représentent plus souvent une contrainte, puisque la plupart des travaux d'aménagement donnent lieu à des fouilles souterraines profondes, entraînant des risques de dénoyage des nappes. Ceci est vrai pour toutes les formations géologiques recoupées mais l'est encore plus pour les formations alluviales sédimentaires ou superficielles. Si, lors de la réalisation de travaux souterrains importants (création de parkings ou de ligne de métro par exemple), ces nappes sont touchées, une exhaure, généralement permanente, doit être mise en place. Les conséquences peuvent alors être nombreuses : par exemple, création d'un cône de rabattement de la nappe avec assèchement des puits voisins, déstabilisation des fondations des immeubles proches, drainage des réseaux fuyards et risque de pollution des sols, rejets éventuels des eaux d'exhaure dans les réseaux d'assainissement avec risque d'engorgement et diminution de l'efficacité des rendements épuratoires. Ces effets en cascade présentent un coût sensible pour la collectivité qu'il serait possible de mieux contrôler par des dispositions réglementaires ;
- de prendre en compte la protection qualitative des eaux souterraines dans le milieu urbain. La Loi sur l'Eau de 1992 s'applique et prévoit que tout pompage ou rejet dans la nappe doit s'accompagner de déclaration ou d'autorisation selon les cas. L'information des aménageurs doit donc être faite dans ce cadre législatif, mais il serait plus pertinent de prévoir et de simuler, avant la réalisation d'un aménagement significatif, l'impact des ouvrages en fonction de leurs caractéristiques techniques et de la vulnérabilité de la nappe à l'endroit de leur implantation. À terme, une fois les caractéristiques physiques et quantitatives de la nappe connues, son suivi qualitatif et l'analyse de son évolution permettront de localiser les zones touchées par une pollution accidentelle ou permanente, d'en comprendre les effets sur les milieux récepteurs et de définir des stratégies pour limiter les impacts des activités polluantes ;
- de connaître l'aptitude des sol et sous-sol à l'infiltration, d'orienter les choix techniques et d'évaluer l'impact de la politique de gestion des eaux pluviales mise en œuvre par la ville de Toulouse, qui privilégie l'infiltration/rétention des eaux.

2.2. PRÉPARATION

Le cadrage initial du projet a été réalisé lors d'une réunion de lancement qui s'est déroulée au mois de juin 2003. Un comité de pilotage est formé lors de la réunion du 22 janvier 2004, qui rassemble :

- pour la ville de Toulouse :
Eric Bouteloup représentant le directeur général du Service urbanisme et environnement
Jean-Michel Barbier (Mission eau)
Sabine Chardavoine (Mission eau)

Les élus, et, en particulier, Monsieur Philippe Dufetelle, recevront le compte-rendu des réunions et une restitution annuelle pourra leur être présentée.

- pour le BRGM - Service géologique régional Midi-Pyrénées :
Philippe Dutartre, directeur
Isabelle Bouroullec
Georges Delpont,
et ponctuellement, Pierre Thierry

Ce comité définit les objectifs, le cadre et les particularités de l'étude, assure le suivi administratif et technique de l'opération et apporte son appui tout au long de la réalisation. Il se réunit pour faire le point sur l'avancement tous les trimestres.

2.3. CADRAGE

Le projet a pour objectif de fournir à la ville de Toulouse une synthèse géologique sur son sous-sol à partir d'une base de données urbaines, intégrant les données de forages et les chroniques piézométriques et pilotée par un Système d'Information Géographique . Ce dernier permettra, outre les fonctions habituelles de mise à jour et d'enrichissement des données, la production de cartes et coupes renseignées.

Les critères suivants sont retenus :

- réalisation de l'inventaire sur tout le territoire de la commune de Toulouse, étendu à une zone tampon externe de 500 m (résolution des effets de bordure des futurs modèles),
- prise en compte de tout ouvrage ayant des données géologiques et/ou hydrogéologiques, issu de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) tenue par le BRGM et des archives du Service Etudes et Travaux Neufs à la date du début de l'étude.

La phase 1, objet du présent rapport, est composée des cinq tâches suivantes :

- module 1 : Conception de la base de données
- module 2 : Collecte des données sur le sous-sol
- module 3 : Mise en place de la base de données
- module 4 : Mise en place d'un réseau de suivi de données hydrogéologiques
- module 4bis : Début de suivi du réseau hydrogéologique
- module 5 : Bilan et recommandations.

L'illustration 1 ci-après présente le chronogramme des opérations prévues pour la phase 1 par le comité de pilotage

Principales étapes	2003			2004									
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Module 1	X	X											
Module 2		X	X	X	X								
Module 3			X	X	X	X	X						
Module 4						X	X	X	X				
Module 4bis										X	X	X	X
Module 5												X	

Illustration 1 - Etapes de la phase 1.

3. Module 1 : Conception de la base de données

3.1. STRUCTURATION DE LA BASE DE DONNÉES URBAINES

La base de données urbaines est un Système d'Information Géographique¹ gérant les données de forages et, à terme, les chroniques piézométriques. Ce système permet, outre les fonctions habituelles de mise à jour et d'enrichissement des données, la production de cartes et coupes renseignées.

La base de données urbaines est gérée et utilisée via la mise en œuvre de trois bases de données complémentaires :

- une base **ACCESS** pour la saisie des données de sondages,
- une base **MAPINFO** pour leur représentation cartographique,
- une base **GDM** (logiciel **BRGM**), pour leur traitement et leur modélisation.

3.2. BASE DE SONDAGES ACCESS

La base ACCESS est prévue pour décrire succinctement les données de sondages au moyen de champs comme l'identifiant, la localisation (coordonnées cartographiques, altitude), la nature, la profondeur, le code lithologique issu de l'interprétation des sondages.

L'annexe 1 présente de façon plus détaillée la base de sondages ACCESS.

3.3. BASE MAPINFO

La base MAPINFO permet de combiner toutes les données géoréférencées nécessaires à l'étude aussi bien en mode vecteur ou que raster : les sondages avec la géologie, le réseau hydrographique, le modèle numérique de terrain (MNT), ...

3.4. BASE GDM

Cette base est constituée d'une sélection des sondages intégrés dans la base ACCESS : les sondages validés. La base GDM est prévue pour modéliser le sous sol géologique de la ville (calcul de cartes 3D et de coupes géologiques).

Le logiciel a été installé en avril 2004 sur un ordinateur dédié de la Ville de Toulouse qui a reçu en septembre 2004 le modèle géologique de la ville.

L'annexe 2 présente de façon plus détaillée la notice d'utilisation de la base GDM.

¹ Toutes les données utilisées sont géoréférencées c'est-à-dire que toute donnée de la zone d'étude est localisée géographiquement avec un couple de coordonnées. Les données de sources et de nature différentes sont ainsi superposables et intégrables.

4. Module 2 : Collecte des données sur le sous-sol

4.1. LES DONNÉES

L'inventaire des données disponibles sur le sous-sol de Toulouse a été lancé dès juin 2003 dans le cadre d'un travail préliminaire de faisabilité confié à deux stagiaires encadrés par la Ville et par le BRGM.

Pour la phase 1, les sources de données sont exclusivement issues des archives du BRGM et de celles de la ville de Toulouse. Deux types de données sont distingués :

- les données ponctuelles de reconnaissance (sondages, tranchées, essais géotechniques, fouilles, relevés d'affleurement...)
- les données bibliographiques (rapports d'études, cartes).

Ce sont au total près de 8 000 ouvrages de reconnaissance qui ont été collectés pour une surface urbaine d'environ 118,5 km² soit une densité moyenne d'environ un point d'observation pour 0,015 km² soit 1,5 ha.

4.1.1. Les données issues du BRGM

Dans le cadre de sa mission de Service public et en application du Code minier, le BRGM recueille toutes informations sur le sous-sol, quelles soient d'ordre géologique, hydrogéologique ou géotechnique, pour alimenter la Banque de données du Sous-Sol (BSS) ainsi qu'un fond bibliographique rassemblant des rapports d'études et des cartes. Classiquement, ces données sont repérées sur des fonds topographiques à l'échelle du 1/25 000 et mis à la disposition du public.

Les données géologiques intéressant la commune de Toulouse apparaissent pour partie sur quatre des coupures régulières du programme de cartographie systématique de la France réalisé à l'échelle du 1/50 000 que supporte le BRGM : il s'agit des feuilles de Toulouse Ouest (983), de Toulouse Est (984), Muret (1009) et Villefranche de Lauragais (1010) dont les zones intéressant la commune ont été réunies sur la carte citée précédemment et présentée en annexe 3.

Les données ponctuelles intégrées dans la BSS résultent du travail de collecte systématique qu'effectue le BRGM dans le cadre de sa mission de service public, comme le préconisent les articles 131 et 132 du Code Minier. Ces derniers stipulent que les ouvrages souterrains dépassant 10 mètres de profondeur sont soumis à déclaration. Toutefois, et ce depuis de nombreuses années, cette obligation de déclaration n'est que peu respectée par les différents intervenants. Il en résulte que lorsqu'on effectue des recherches dans la BSS, les ouvrages anciens (années soixante surtout) sont plus nombreux.

La Banque de données du Sous-Sol (BSS) a permis d'identifier :

- **2013 ouvrages** déclarés sur la commune de Toulouse (cf. ill. 2) : Ces dossiers ont été consultés en priorité ;
- **309 ouvrages** déclarés situés dans la zone tampon de 500 m autour de Toulouse, pris en compte pour éviter un effet de bord, ce qui amène la surface urbaine considérée à plus de 150 km² ;
- différents rapports d'études BRGM et d'autres ouvrages (thèses..) qui ont permis d'alimenter la synthèse géologique et hydrogéologique sur Toulouse.

4.1.2. Les données issues de la Ville de Toulouse

Trois sources de données sont identifiées au sein de la ville de Toulouse :

- le Service Etudes et Travaux Neufs (SETN) ;
- le Service de l'Urbanisme et de l'Environnement ;
- le Service de l'Architecture (ARCHI).

Le Service Etudes et Travaux Neufs archive les dossiers de reconnaissances ponctuelles. Ces dossiers sont disponibles sous forme de log géologiques, parfois géotechniques, sur des supports papiers. Ils sont regroupés par secteur géographique et accompagnés de plans de localisation. Il s'agit de 5570 points d'ouvrages de reconnaissances (cf. ill. 2 et ann. 4). La dernière mise à jour de cette base date de 2004 et il est à prévoir de l'actualiser lorsque des ouvrages ultérieurs seront réalisés. Ils sont géoréférencés dans une base MAPINFO.

Les archives du Service de l'Urbanisme et de l'Environnement et du Service de l'Architecture (ARCHI) ont permis de compléter ces informations de sondages par des études de sols et des études géologiques ou hydrogéologiques.

4.1.3. Contenu et qualité des données

Le contenu et la nature des informations disponibles dans les dossiers sont très hétérogènes. Les cinq raisons suivantes peuvent être avancées.

a) L'objectif de l'ouvrage

Le degré de précision de la description géologique varie en effet largement en fonction de l'objectif de la reconnaissance. La précision géologique requise pour un sondage géotechnique est supérieure à celle demandée pour un simple ouvrage de repérage de l'épaisseur alluviale sur le substratum ou encore du niveau de l'eau. En outre, les informations décrites peuvent être partielles, comme des essais mécaniques sans description géologique, ou inversement. De même, il est possible de ne trouver que le niveau de l'eau comme seul renseignement (récurrent dans les dossiers de la Mairie) ou que les coordonnées X, Y, Z sans aucune autre information (fréquent dans les dossiers BSS).

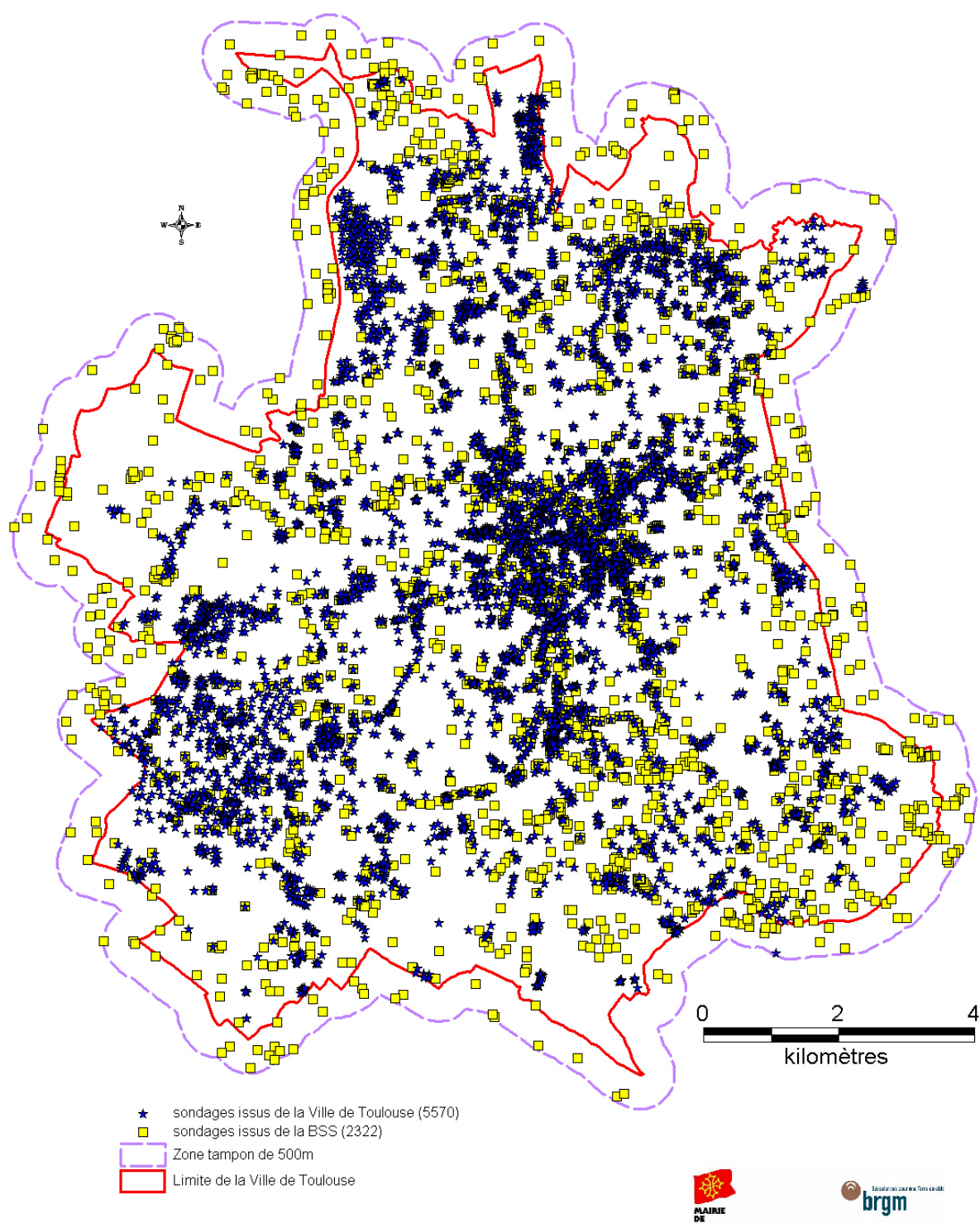


Illustration 2 - Localisation des sondages utilisés pour l'étude.

b) Le type de sondage

Trois principaux types peuvent être mentionnés :

- sondage carotté, pour lequel les formations traversées arrivent à la surface sous forme de cylindres de roche plus ou moins longs. Il permet une description très précise des formations rencontrées (lithologie, géométrie parfois) et de leur succession verticale ;
- sondage destructif, pour lequel les formations traversées arrivent à la surface sous forme de débris. La description des formations est beaucoup moins précise tant au niveau de leur lithologie qu'à celle de leur succession ;
- log pressiométrique, qui n'est que rarement décrit avec précision. Seuls les grands changements de formations sont signalés (alluvions, molasses, etc.), sans autre détail.

c) La diversité des intervenants

Plusieurs entreprises de forage ont réalisé les sondages et le type de description est souvent différent d'un sondage à l'autre. La fiabilité des descriptions et leur continuité sont donc à considérer avec prudence.

d) La présentation des logs

La présentation des logs est également très variable, allant d'une simple liste manuscrite mentionnant la profondeur et un descriptif lithologique sommaire à une fiche normalisée de sondage intégrant un figuré conventionnel, une description normalisée, une mention des éventuels travaux réalisés, une mesure du niveau d'eau, etc...

e) La variabilité temporelle des appellations

Les ouvrages présents dans les bases utilisées (Mairie et BSS) ont été réalisés entre la fin du XIX^e siècle et nos jours. Dans ce laps de temps, les noms et descriptions lithologiques ont pu varier au gré des avancées de la connaissance et se traduire par des noms différents pour un même corps géologique.

En raison de ces multiples facteurs, il a donc été indispensable de passer par une phase de tri et d'analyse critique des différents dossiers avant toute interprétation. Malgré cela, et sans autre possibilité de vérification *in situ*, l'interprétation des sondages, entièrement dépendante de ces documents, pourra souffrir de leur inhomogénéité.

Les documents utilisés étant localisés sur différents sites, ils ont été photocopiés pour constituer un dossier succinct pour chaque sondage (le plus souvent la fiche du log). Ces dossiers ont été très souvent sollicités, d'abord pour la première interprétation et, ensuite, pour d'indispensables vérifications voire des modifications de l'interprétation, en particulier à l'issue des modélisations.

4.2. SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE

La région de Toulouse, située à l'extrême est du bassin d'Aquitaine, voit sa géologie et sa morphologie de surface essentiellement conditionnées par l'orogénèse de la chaîne des Pyrénées durant l'ère tertiaire. En effet les formations détritiques continentales de l'ère primaire, résultant de l'orogénèse hercynienne, ainsi que les formations essentiellement marines de l'ère secondaire (jurassiques et crétacées) et du début de l'ère tertiaire (paléocène) ne sont pas visibles.

Elles sont totalement recouvertes par les formations du Tertiaire et du Quaternaire : ces formations de recouvrement sont surtout constituées par les molasses, produit de démantèlement des Pyrénées, et par les alluvions anciennes et récentes, contrôlées par l'évolution des cours d'eau sculptant les reliefs molassiques (ann. 3).

4.2.1. Présentation géographique et géomorphologique de Toulouse

Dans ce contexte de remplissage molassique, le site de Toulouse est situé au point d'inflexion de la direction d'écoulement de la Garonne. De SW-NE en amont, depuis les Pyrénées, l'écoulement devient SE-NW vers l'aval. Ces deux directions sont parallèles à des axes structuraux régionaux majeurs : la faille de Villefranche, qui porte le sillon houiller du Massif central, pour la première et le sillon du bassin d'Aquitaine pour le second. C'est en ce point d'inflexion que la Garonne cesse d'être un torrent sous-pyrénéen pour devenir un cours d'eau de la plaine aquitaine (Gèze et Cavaillé, 1977).

Cette disposition qui s'accompagne d'une dérive vers le NE de la Garonne a produit une vallée dissymétrique qui a entaillé, pendant le Quaternaire, le substratum molassique tertiaire. Ainsi, de part et d'autre de la Garonne, qui s'écoule à une altitude d'environ 135 m, s'opposent deux rives distinctes (ill. 3) :

- sur la rive droite, la plaine alluviale est réduite alors que prédominent les coteaux modelés dans les molasses tertiaires, qui annoncent le Lauragais. Il s'agit par exemple, au sud, des coteaux de Pech David, qui culminent entre 240 et 250 m d'altitude et dominent la plaine de plus de 100 m. Dans Toulouse même, une bute d'environ 4 km s'élève progressivement depuis le quartier de Montaudran, au Sud-Est, jusqu'à Jolimont, entre 170 et 240 m d'altitude, avant de s'abaisser en pente douce vers le faubourg Bonnefoy. Entre ces deux coteaux, le canal du Midi ainsi que les grands axes de circulation venant de la Méditerranée empruntent une large dépression qui correspond vraisemblablement à l'ancien cours de l'Hers. Ce dernier est supposé avoir rejoint autrefois la Garonne dans le quartier d'Empalot. Actuellement, cette rivière se jette dans la Garonne en aval de Toulouse (Ondes sur Garonne) et marque les limites orientales de la commune (Marconis, 1995) ;
- sur la rive gauche, la vallée de la Garonne s'étend sur plus de 20 km de large. Au cours de son enfoncement dans les molasses pendant le quaternaire, la Garonne s'est progressivement déplacée vers l'Est, formant ainsi plusieurs niveaux de terrasses étagées, depuis les hautes terrasses (280-300 m d'altitude), vers la forêt de Bouconne jusqu'à la basse plaine qui est longtemps restée inondable (140 m d'altitude).

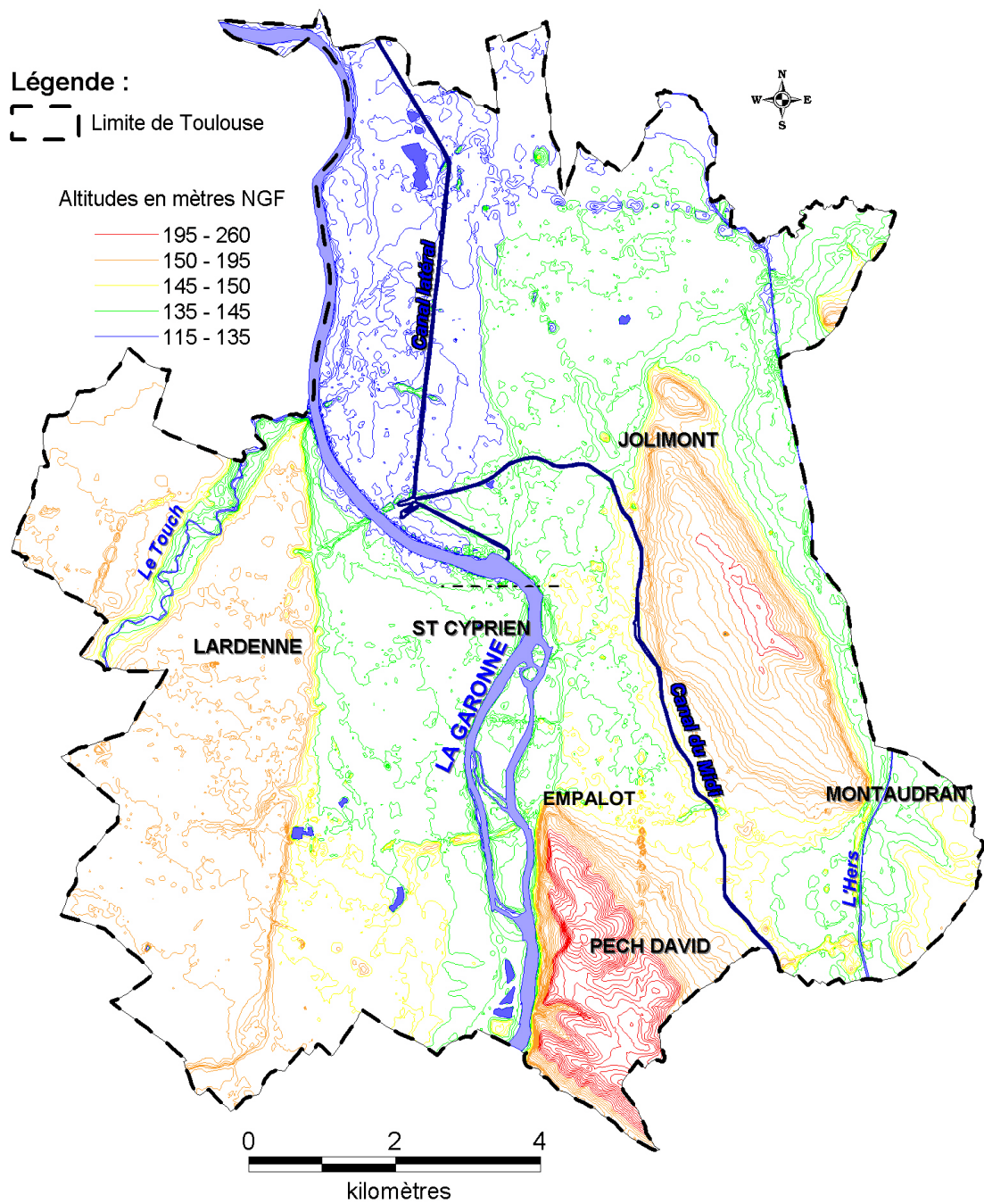


Illustration 3 – Carte oro-hydrographique de la commune de Toulouse.

La vieille ville est centrée sur la concavité du méandre de la Garonne, en rive droite. Autrefois, la Garonne était navigable depuis l'océan Atlantique jusqu'à Toulouse, où un banc calcaire, intercalé dans la molasse, constitue une barrière naturelle infranchissable (lieu dit du Bazacle). C'est d'ailleurs grâce à ce banc que les Toulousains pouvaient, avant la construction des ponts, traverser à gué la Garonne.

La ville de Toulouse s'est d'abord développée sur la basse terrasse de la rive droite en raison de sa topographie plus élevée par rapport à la basse plaine de la rive gauche, ce qui la mettait à l'abri des inondations. La rive droite est en effet plus élevée de 8 à 9 m que la rive gauche (place du Capitole à 144 m) et s'élève de 15 m au dessus du niveau de la rivière (Marconis, 1995).

4.2.2. Description des différentes formations géologiques

En dehors des deux types principaux de faciès qui s'observent aux alentours de Toulouse à savoir les formations molassiques oligo-miocènes et les formations alluviales quaternaires, il existe des formations éoliennes, des formations de pente et des formations résiduelles de plateau, ces dernières résultant le plus souvent d'une évolution des molasses. Les terrains du Tertiaire inférieur ou anté-tertiaires n'affleurent pas dans cette zone comme en témoigne la carte géologique de Toulouse (ann. 3).

a) Les formations molassiques

Les formations molassiques sont exclusivement issues du démantèlement de la chaîne pyrénéenne, en milieu continental dans un environnement fluvio-lacustre. Elles prennent vers l'aval le relais des dépôts de piedmont du type « poudingues de Palassou », formation détritique grossière localisée au pied de la chaîne.

Le phénomène de subsidence, qui a affecté le bassin aquitain au cours du remplissage tertiaire, a permis l'empilement d'une épaisseur considérable de matériel détritique sous forme de séquences répétitives de type grès/silt/argile silteuse/calcaire comme le schématise le log de l'illustration 4. Il est supposé à ce jour un maximum de 8 séquences de sédimentation (J.P. Capdeville, communication orale) qui constituent un substratum épais (2000 m à Muret), continu, occulté par les alluvions et les terrasses dans la plaine de la Garonne.

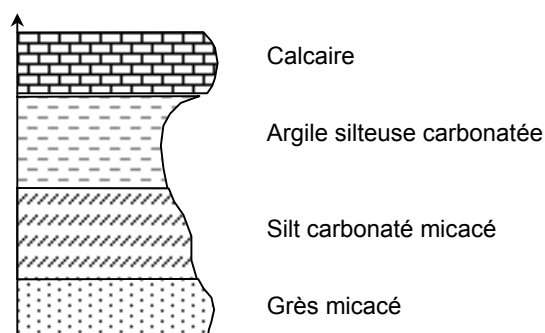


Illustration 4 – Schéma de la séquence molassique élémentaire.

D'après les cartes géologiques couvrant la commune de Toulouse, les formations molassiques affleurantes sont d'âge Aquitanien et Stampien (code géologique g2-3) sur la feuille de Toulouse Ouest (983) et Muret (1009). Elles sont d'âge Stampien (Oligocène) et comprennent quatre divisions sur la feuille de Toulouse Est (984) et Villefranche de Lauragais (1010) : Stampien terminal (code g2d), Stampien supérieur (code g2c), Stampien moyen (code g2b) et Stampien inférieur (g2a). Ces indications peuvent être retrouvées sur l'extrait des cartes géologiques et sa légende dans l'annexe 3.

Les niveaux de grès, de silts et d'argile silteuse présentent le plus souvent des paillettes de micas blancs et possèdent une fraction carbonatée importante même si elle n'est pas exprimée. (J.P. Capdeville c. o.). La structure interne des grès souvent peu indurés, montrent des stratifications à plans obliques (15 à 25°). Il n'est pas rare de rencontrer dans les couches silteuses ou argilo-silteuses des figures de pédogenèse (J.P. Capdeville c. o.).

La séquence élémentaire de ces formations montre que la granulométrie des éléments déposés est de plus en plus faible vers son sommet. Cela met en évidence une vitesse d'apport décroissante : l'adoucissement de l'orographie a en effet amené, pendant le Tertiaire, un assagissement des cours d'eau dont la capacité de transport a rapidement diminué. De la sorte ceux sont les sédiments les plus fins qui ont pu être majoritairement transportés et remplir progressivement le bassin aquitain. Une partie importante du transport s'est ainsi effectuée en suspension (Dassibat, 1969).

Les faciès fins (argiles et argiles silteuses) se sont déposés sur un système de plaine d'inondation (Capdeville, 2001). Les actions pédogénétiques ont ensuite concentrées les carbonates qui sont souvent non exprimés mais peuvent prendre l'aspect de nodules centimétriques à décimétriques. Des traces de paléosols marron peuvent être rencontrées. Les niveaux calcaires sont le plus souvent lacustres de type calcrètes (croûtes). Ces derniers sont rares à l'affleurement sur la commune de Toulouse et le plus connu est celui du gué du Bazacle (cf. ill. 3).

Il existe enfin deux faciès majeurs d'altération de la molasse (J.P. Capdeville c. o.) :

- les Boulbènes (sables micacés) : la molasse a perdu sa fraction argileuse, elle sèche très vite et est très légère (faciès correspondant aux colluvions) ;
- les Terreforts : la molasse a perdu sa fraction sableuse, elle est très argileuse, conserve l'humidité et constitue un terrain lourd.

Il est important avant de clore ce paragraphe de revenir sur les conditions de dépôt des molasses car elles conditionnent leur géométrie et explique la difficulté que représente leur cartographie, en particulier lorsqu'elle débouche sur des applications hydrogéologiques ou géotechniques.

Les matériaux constitutifs des molasses se sont mis en place dans un environnement torrentiel et fluvio-lacustre. Ceci signifie que les séquences successives se sont superposées après que les torrents transportant le matériel d'une séquence ait érodé tout ou partie des dépôts de la séquence précédente. De ce fait, le paysage résultant

est celui d'un glacis tabulaire lardé de méandres plus ou moins anastomosés et le matériel finalement obtenu montre **une extrême hétérogénéité**. Des grès d'une séquence pourront ainsi se trouver en continuité latérale avec des silts, des argiles ou des calcaires d'une autre séquence, suivante ou précédente.

Une telle géométrie explique ainsi que les aquifères de la molasse ne peuvent être que de petite taille et qu'une étude géotechnique détaillée doit être réalisée avant tout projet de construction important.

c) Les formations alluviales

Le Quaternaire va marquer l'ensemble des terrains aplanis du Plio-Villafranchien par le creusement des vallées et par les dépôts des terrasses fluviales. Le paysage, très plan lors du remplissage final du bassin, change radicalement par le biais de l'érosion pour acquérir progressivement ses caractères actuels, laissant par exemple en saillie les coteaux dominant la plaine toulousaine, tandis que le fleuve abandonne ses alluvions en fond de vallée. Ainsi, celle de la Garonne prend, en particulier au niveau de la commune de Toulouse, un profil transverse dissymétrique : elle est marquée par une grande plaine alluviale sur la rive gauche du fleuve alors que la rive droite est rapidement occupée par des collines molassiques.

Le creusement des vallées n'a pas été continu et il s'est effectué par à coups au rythme des périodes glaciaires qu'a subi la planète au cours du Quaternaire : durant la phase glaciaire, le niveau de la mer baisse fortement et le fleuve essaie de retrouver son profil d'équilibre longitudinal par le surcreusement de sa vallée. En phase interglaciaire, le niveau de la mer remonte et le fleuve alluvionne pour revenir à son profil d'équilibre. L'alternance de phases érosives et de dépôts, associées à un mouvement global de la Garonne vers l'est, ont ainsi permis la formation de terrasses étagées.

• La vallée de la Garonne

Les alluvions transportées par la Garonne se sont donc déposées suivant un système en terrasses sur les terrains molassiques tertiaires (oligo-miocènes) selon une séquence relativement répétitive à deux niveaux (ill. 5) :

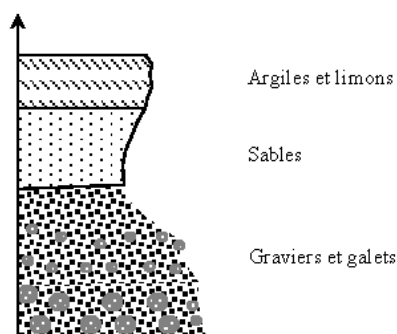


Illustration 5 – Schéma de la séquence alluviale élémentaire.

- un niveau grossier de 3 à 5 m d'épaisseur, à la base, constitué par des graviers et des galets entremêlés de sable plus ou moins argileux ;
- un niveau de granulométrie plus fine, qui vient recouvrir le précédent et qui est caractérisé par des argiles et des limons, pouvant atteindre 3 m d'épaisseur (HydroM-Environnement, 1999).

L'origine des éléments constitutifs des terrasses est essentiellement pyrénéenne (Garonne et Ariège) mais des apports en provenance de la Montagne Noire ont été délivrés par l'Hers : les galets rencontrés sont le plus souvent composés de quartz, quartzites, granites, micas.

Bien que cinq terrasses différentes soient identifiées dans la vallée de la Garonne (Capdeville et *al.*, 1997), leur composition n'en est pas moins très proche. Les divers niveaux n'ont généralement pu être distingués que d'après leur degré d'évolution : altération des cailloux et évolution pédologique des limons.

Au cours du quaternaire, le fleuve s'est enfoncé dans les molasses tandis qu'il se déplaçait vers l'est en abandonnant les alluvions. Du fait de ce mouvement, les alluvions les plus anciennes (les plus hautes) se retrouvent à l'ouest, tandis que les plus récentes, correspondant au couloir actuel, se situent à l'est, comme l'illustre le schéma de l'annexe 5.

Les différentes terrasses repérées seraient contemporaines des glaciations définies pendant le Quaternaire, à partir des observations effectuées dans le massif alpin, sur les affluents du Danube dont elles portent le nom. Il s'agit, de la plus ancienne, à la plus récente de Donau, Günz, Mindel, Riss et Würm. Ces rivières bavaroises ont permis de mettre en évidence les principaux événements glaciaires ayant marqué le Quaternaire et d'élaborer la nomenclature utilisée pour les caractériser (Campy et Macaire, 1989).

L'illustration 6 présente la nomenclature utilisée par Cavaillé en 1965, dans les notices des cartes géologiques de Toulouse ainsi que celle utilisée actuellement (Capdeville et *al.*, 1997). Il présente aussi les phases glaciaires associées par B. Gèze et A. Cavaillé dans le Guide géologique de l'Aquitaine Orientale (1977) ainsi que celles de Capdeville et *al.* (1997).

La description des terrains alluviaux présentée ci-dessous est issue des notices des cartes géologiques au 1/50 000 (Cavaillé, 1965) et sont repérées par le code géologique qu'il leur est affecté dans chaque carte. Sont distinguées, des plus anciennes aux plus récentes :

	Côte au dessus de l'étiage	Cavaillé, 1965, Gèze et Cavaillé, 1977		Capdeville et al., 1997	
		Nomenclature	Phase glaciaire	Nomenclature	Phase glaciaire
Hauts niveaux	120 à 150 m	Fv (983)	Donau et Günz	Ft	Donau
Haute terrasse	90 à 100 m	Fw (983), Fvw (984)	Mindel	Fu	Günz
Moyenne terrasse	55 à 80 m	Fx (983, 984)	Riss	Fv	Mindel
Basse terrasse	20 à 25 m	Fy, Fy1 (983), Fy, Fy1, Fy2 (984)	Würm	Fw	Riss
Basse plaine	15 m	Fz, Fz1, Fz2 (983, 984)	Post-Würm	Fx	Würm

Illustration 6 - Comparaison des nomenclatures et des phases glaciaires associées.

• Alluvions des hauts niveaux (code Fw)

Ces alluvions sont les plus élevées dans la topographie (paliers étagés de 90 à 110 m au-dessus de l'étiage). Elles se distinguent par l'importance des évolutions pétrographiques et pédologiques. Les quartzites se sont désagrégées, les schistes se sont transformés en sables fins argileux. Il ne subsiste plus que des cailloutis siliceux centimétriques hématisés.

• Alluvions des terrasses moyennes de la Garonne (code Fx)

Elles sont constituées d'éléments roulés de quartz, de quartzite, de schiste, de grès, de gneiss et de granite. Les éléments schisteux et cristallins sont très altérés, libérant d'importantes quantités de sables fins argileux qui colmatent les formations et ce, d'autant plus qu'elles sont plus anciennes. L'ensemble prend une teinte ocre ou orangée. Les couches superficielles de limon, desquelles tous les micas ont disparu, ont subi une évolution pédologique de type podzolique, ce qui les rend pratiquement imperméable.

Les plus bas paliers de ces plaines dominent l'étiage de 55 m, les plus hauts de 80 m.

• Alluvions des basses terrasses et des cours d'eau secondaires (code Fy)

Ce sont de petits éléments de plaine qui se relient topographiquement à la basse terrasse de la Garonne et dominent les rivières de 10 m à 15 m. Elles sont constituées par des alluvions limoneuses épaisses reposant sur des lits de cailloux quartzeux, restes du remaniement des alluvions garonnaises plus élevées.

• Alluvions de la basse terrasse (code Fy1)

La basse terrasse qui domine l'étiage de 22 à 30 m est recouverte d'alluvions formées comme la basse plaine ci-dessous. La couche inférieure de cailloux roulés, de 5 à 6 m

d'épaisseur, passe à des lits de sable irréguliers et à la couche de limons d'inondation fins très constants en surface. La décomposition des cailloux roulés est poussée : les grès et les schistes sont devenus pulvérulents, mais l'ensemble reste de couleur claire, grisâtre et d'un aspect assez frais.

• Alluvions du seuil de Toulouse (code Fy2)

Entre la colline de Montaudran et celle de Pech-David, une large dépression est couverte d'une couche de 2 à 3 m d'alluvions fines, dont l'origine de dépôt n'est pas strictement définie. Il est vraisemblable que ces alluvions correspondent à un ancien lit de l'Hers (voir ci-dessous l'évolution morphologique du cours d'eau).

• Alluvions des cours d'eau secondaires (code Fz)

Les cours d'eau autochtones ont déblayé de larges vallées et étalé plus ou moins les débris venus à la base des versants. Ce sont souvent des limons argileux, à éléments fins, parfois légèrement carbonatés qui nivellent le fond des vallées marécageuses.

• Alluvions quaternaires et modernes de la basse plaine (code Fz1)

Elles sont constituées par les mêmes éléments polygéniques roulés, de quartz, de quartzite, de schiste, de grès, de gneiss et de granite. Ces galets sont encore frais et le plus souvent emballés dans une formation sableuse rarement colmatée par des éléments argileux. L'ensemble peut-être surmonté par un ou deux mètres de limons. Il est possible de distinguer :

- vers le fleuve, une bande couverte par les fortes crues, formée d'une couche de cailloux de 4 à 5 m d'épaisseur recouverte par des sables peu limoneux, à 5-7 m au-dessus de l'étiage.
- au centre de la plaine, la même nappe de cailloux plus stabilisée est couverte de 1 à 2 m de limons d'inondation fins qui ont nivelé l'ensemble, à 8-9 m au-dessus de l'étiage ;
- vers l'extérieur, une zone traversée en long par la vallée de l'Hers, à 12-16 m au-dessus de l'étiage qui comprend une couche homogène de limons fins sur une nappe de cailloux de 5-6 m d'épaisseur.

En outre il faut y signaler l'existence de nombreux paléochenaux de la Garonne qui sont souvent comblés par des matériaux fins argileux souvent riches en matière organique. Les plus importants d'entre eux sont situés, selon la carte géologique, au nord de la commune entre le lit actuel de la Garonne et le canal latéral.

• Alluvions du lit majeur (code Fz2)

Ce niveau est constitué par une couche de 4 à 5 m de cailloux roulés d'origine pyrénéenne recouverte par des sables progressivement plus fins en surface. Ces alluvions ont été souvent remaniées par les crues moyennes, antérieures aux interventions humaines qui ont fixé le niveau. Les alluvions du lit majeur sont absentes lorsque la Garonne coule directement sur le substratum molassique.

Ce dernier peut affleurer entre les différentes terrasses, mais il est généralement dissimulé par des éboulis de pente provenant de la terrasse supérieure et de l'altération de la molasse.

• La vallée de l'Hers

Les alluvions de la vallée de l'Hers ont une séquence analogue à celle des terrasses de la Garonne, même si la part de matériel grossier de ces alluvions est bien moindre. Ce sont en effet des produits de l'érosion des seules formations molassiques, contrairement aux alluvions de la Garonne qui sont d'origine pyrénéenne. De la sorte se succèdent les deux éléments suivants :

- une base de matériaux grossiers (plutôt sableuse, très pauvre en graves),
- 3 à 10 m de limons argileux peu perméables (5.10^{-7} à 5.10^{-8} m/s).

L'Hers a subi une évolution quaternaire particulière. Il s'écoule en effet depuis le Seuil de Naurouze, point bas de la ligne de partage des eaux entre le bassin de la Méditerranée et celui de l'Atlantique. La position de cette ligne s'est modifiée au cours du Quaternaire, au détriment du bassin atlantique. L'Hers s'est en effet progressivement vu amputé de son haut bassin versant détourné en direction de la Méditerranée par les rivières du bassin de l'Aude.

Le cours d'eau, privé d'une partie de l'apport hydrique naturel, a perdu son énergie jusqu'à divaguer sur sa propre plaine alluviale et ne plus être en mesure de suivre l'enfoncement de la Garonne.

L'Hers a alors abandonné le lit qui lui permettait de rejoindre la Garonne, au seuil de Rangueil (Empalot), pour se jeter dans la Garonne en aval de Toulouse (Ondes sur Garonne).

Cette évolution est marquée dans la morphologie et prend place entre la basse terrasse et la basse plaine, c'est-à-dire au début du Quaternaire récent. Depuis l'Hers coule désormais dans un lit chenalisé limité par des talus d'argiles régulièrement renforcés par des enrochements (Hydro-M environnement, 1999).

• Les formations superficielles

Plusieurs types de formations superficielles sont observés sur le territoire de la commune de Toulouse :

• les dépôts d'origine éolienne (code OE sur la carte géologique)

Ces dépôts présentent nettement des caractères de Loess. Ils sont datés du Würm récent, dernière glaciation, et sont donc contemporains de la formation de la basse terrasse. Ces dépôts sont présents dans la vallée de l'Hers (est de Toulouse) et notamment sur les versants exposés au Nord des coteaux proches - versants longs- (Cavaillé et Gèze, 1977). Ces sédiments fins, apportés par le vent et piégés à flanc de versant, signalent un environnement de steppe d'où le couvert végétal avait disparu.

Dans le secteur de Ramonville, des défenses de mammoth ont été retrouvées dans des dépôts de ce type.

- **les limons de plateaux provenant de l'altération de la molasse (code m-gRe)**

Ces matériaux sont difficiles à différencier des loess en raison de leur composition voisine. Ces limons se situent sur les parties horizontales des interfluves, sur les replats, les pentes douces, les surfaces horizontales des coteaux molassiques. Ils sont issus de la décomposition, sur place, des marnes des molasses et constituent une formation de 1 à 2 m d'épaisseur, plus ou moins décalcifiée, parfois légèrement acide et pédologiquement évoluée.

- **les formations de pente, éboulis et solifluxions (code m-gRc)**

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

- **les éboulis et les solifluxions des alluvions (code FS)**

Ces formations affectent les fragments de terrasses découpées par l'incision des affluents de la Garonne, rive gauche en l'occurrence.

- **le sol historique (code X)**

Le sol historique est un niveau essentiellement constitué par plusieurs mètres d'épaisseurs de remblais, recouvrant les niveaux archéologiques gallo-romains. Par endroit toutefois, l'étude des sondages a montré que les formations alluviales, voire les molasses, se rencontrent dès les premiers centimètres.

c) Répartition des formations géologiques affleurant sur la commune de Toulouse

La carte géologique de la commune de Toulouse (ann. 3) montre bien l'emprise importante des formations alluviales de la Garonne, tant à l'ouest qu'au nord de la commune, et celle de l'Hers, vers l'est. Toutefois, les collines molassiques de Jolimont, à l'est, et de Pech-David, au sud, viennent fortement perturber cette organisation horizontale, par leur composition géologique et leur morphologie différentes.

Remarque : Il est important d'insister sur le fait que les molasses et les formations alluviales présentent de fortes hétérogénéités lithologiques et géométriques. Leur mise en place est en effet tributaire d'un régime fluvial plutôt de type torrentiel ce qui peut entraîner des surcreusements, des surépaisseurs, des variations rapides de compétences entraînant des variations tout aussi rapide de granulométrie des dépôts. De telles hétérogénéités sont bien réelles et s'expriment, tant horizontalement que verticalement, au niveau des sondages interprétés, à celui du modèle calculé et à celui des variations de perméabilités.

Quelques observations réalisées plus particulièrement au niveau des alluvions illustrent cette remarque :

- variation d'épaisseur des graves de 1 à 10 m, observée lors de l'interprétation de sondages rapprochés (effet de chenal) ;
- variation d'épaisseur des formations sablo-graveleuses entre le nord et le sud de Toulouse, de part et d'autre de la partie NW-SE du cours de la Garonne ;
- variation de la perméabilité de 10^{-3} à 10^{-5} m.s⁻¹ des formations sablo-graveleuses.

4.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Tout le réseau hydrographique de la région de Toulouse (ill. 3) dépend de la Garonne qui constitue le drain principal des eaux de la région et chaque terrasse est susceptible de constituer un aquifère avec des limites hydrogéologiques définies. Les principales nappes présentes dans l'emprise de la commune sont brièvement présentées ci-après (ill. 7).

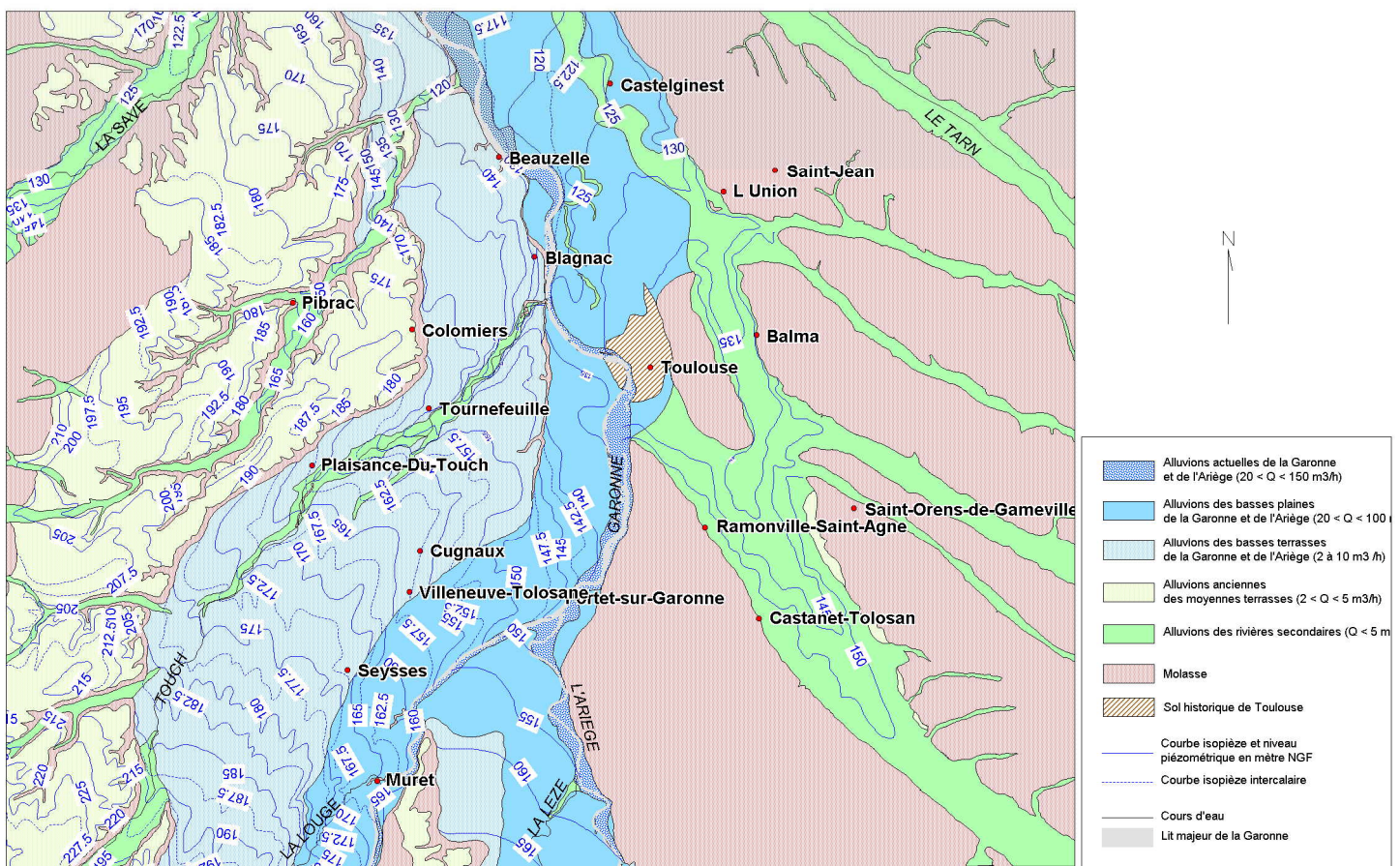


Illustration 7 - Carte des principales nappes présentes au droit de la ville de Toulouse.

4.3.1. La nappe infra-molassique

La nappe inframolassique est contenue dans des niveaux détritiques grossiers datés de l'Eocène inférieur. Elle correspond à une **nappe captive** artésienne, parfois jaillissante.

Sa transmissivité de l'ordre de $5.10^{-4} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, son débit artésien (pouvant être supérieur à $30 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$) ainsi que sa faible salinité (très inférieure à 2 g.l^{-1} au forage de Muret mais variant spatialement), en font un aquifère intéressant malgré deux inconvénients (Dassibat, 1969) :

- sa profondeur ($> 900 \text{ m}$) sur la commune de Toulouse qui rend coûteuse son accessibilité,
- la présence locale de fluor qui pourrait la rendre impropre à la consommation (détecté dans le forage de Blagnac).

Situées sous les formations récentes, alluviales et molassiques, à grande profondeur, cette nappe n'apparaît pas sur l'illustration 7.

4.3.2. Les nappes intra-molassiques

Elles sont essentiellement constituées par des lentilles sableuses dont la recherche et l'exploitation sont aléatoires. De plus, le taux de recharge de ces nappes est faible, offrant une ressource le plus souvent non renouvelable. Globalement, cette formation a un caractère imperméable (porosité de 4,7 %). Les exemples d'exploitation de ces aquifères sont donc très limités.

Localement les bancs calcaires intercalés dans les formations molassiques peuvent constituer des aquifères, à l'origine de sources connues comme celle de la Daurade, située au pied de l'église sur les quais de la Garonne, en rive droite.

4.3.3. Les nappes alluviales

Sur la commune de Toulouse, les aquifères alluviaux de la Garonne sont contenus dans les terrasses déposées durant les deux dernières glaciations :

- aquifère des **alluvions des basses terrasses** de la Garonne et de l'Hers,
- aquifère des **alluvions de la basse plaine** de la Garonne,
- aquifère des **alluvions récentes** (ou lit majeur) de la Garonne.

a) Alluvions de la Garonne

Les aquifères de la basse plaine et du lit majeur sont considérés comme en continuité hydraulique et sont confondus.

Les niveaux aquifères des alluvions sont constitués par des graviers grossiers (avec de fréquents passages argileux). Ils sont surmontés d'une couverture de 0,5 à 2 m de

limons argileux récents, due aux dépôts formés lors de crues. L'épaisseur de l'ensemble varie de 2 à 12 m.

Les graves des terrasses anciennes sont plus dégradées que les récentes. Elles présentent donc une fraction argileuse issue de l'altération des éléments granitiques plus importante que celle des alluvions récentes, ce qui induit une diminution de la perméabilité et de la productivité moyenne des forages lorsqu'on s'éloigne de la Garonne.

Les valeurs de la perméabilité des alluvions dans Toulouse sont comprises entre 1.10^{-4} et $1.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ (Cavaillé et *al.*, 1965).

De manière générale, les nappes alluviales de la Garonne sont drainées par le fleuve. La direction de l'écoulement est donc SW-NE en rive gauche et SE-NW en rive droite.

b) Alluvions de l'Hers

Résultant essentiellement de l'érosion des terrains molassiques, les dépôts de la plaine alluviale de l'Hers sont constitués surtout de sables et de quelques graviers et surmontés, comme pour la Garonne, de limons argileux récents pouvant atteindre 10 m de puissance. La fraction sableuse constitue le niveau aquifère ($K = 5.10^{-5}$ à $1.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$).

La nature peu perméable des formations de la vallée de l'Hers entraîne une prédominance des phénomènes de ruissellement au détriment de l'infiltration et de l'alimentation d'aquifères qui pourraient soutenir les débits en période sèche.

4.3.4. Potentiel aquifère

Les nappes alluviales constituent la seule ressource souterraine exploitable dans la vallée de la Garonne. Cependant, la hauteur des réservoirs, qui correspond à l'épaisseur de matériel détritique grossier, est relativement peu importante, ce qui induit une faible capacité aquifère.

Les nappes alluviales furent activement exploitées pour les cultures maraîchères et florales, comme au Nord de Toulouse. Même si ces activités ont nettement décliné au cours des deux dernières décennies face à la pression urbaine, les nappes alluviales restent une réserve fragile qui n'est pas en mesure de subvenir aux besoins en eau potable de l'agglomération toulousaine (Roche, 1966).

En outre, à Toulouse, la qualité de l'eau de la Garonne qui descend des proches Pyrénées est relativement bonne : seule sa turbidité, importante lors des périodes de crue, rend plus difficile son traitement pour la rendre potable. Il y a très peu de pollution industrielle et agricole en amont et l'eau est bien aérée.

La Garonne constitue donc une ressource en eau potable bonne et économique : deux stations sont installées en amont de Toulouse : En rive droite, Pech David, qui fournit l'essentiel de la consommation toulousaine et, sur la rive gauche, Clairfont (Portet-sur-Garonne) qui complète ce dispositif dans les périodes de forte consommation en eau.

4.4. COUPE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE SCHÉMATIQUE

Les divers renseignements recueillis au cours de ces recherches bibliographiques permettent d'établir la coupe schématique de la succession des terrains et des niveaux aquifères susceptibles d'être rencontrée (ill. 8).

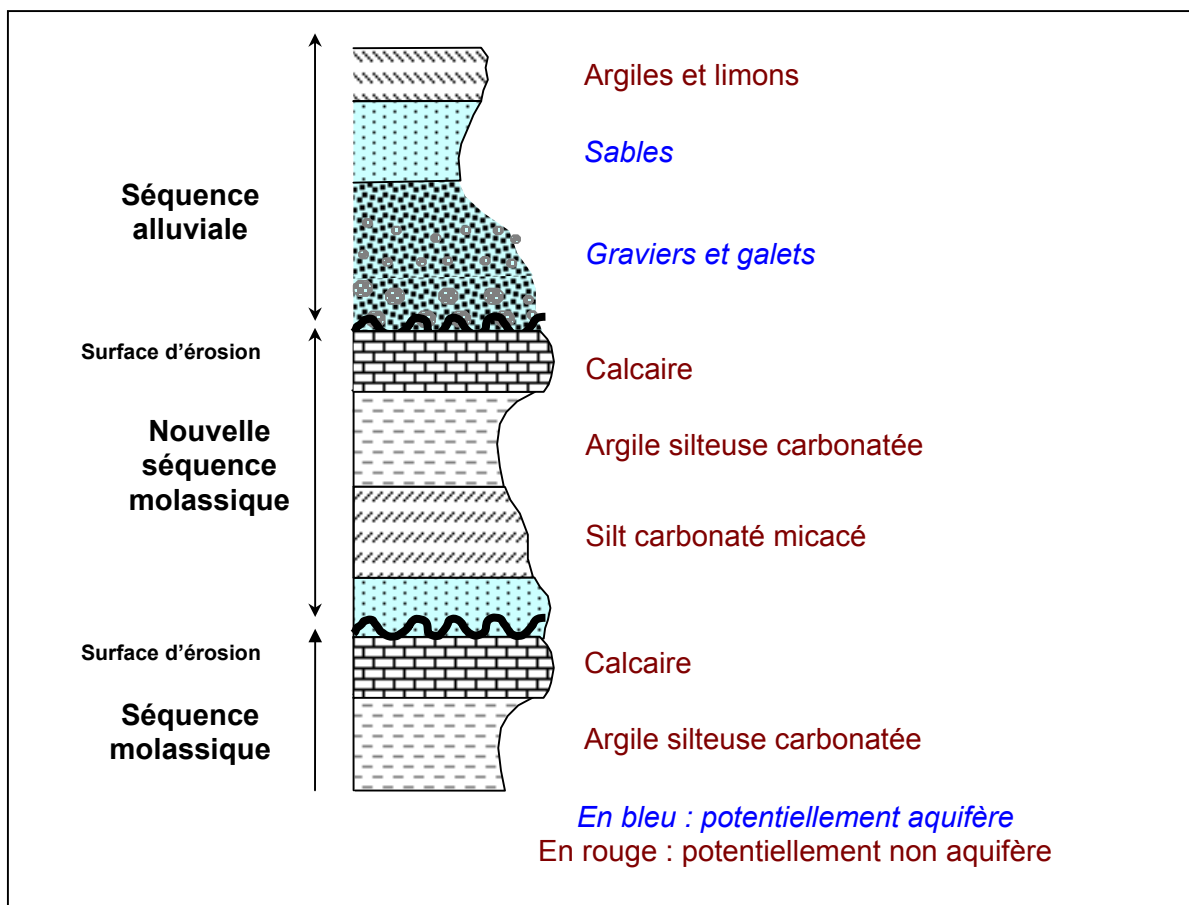


Illustration 8 - Coupe géologique et hydrogéologique schématique

4.5. DÉFINITION DU LEXIQUE D'INTERPRÉTATION LITHOLOGIQUE

4.5.1. Généralités

La forte hétérogénéité des documents disponibles et le grand nombre des faciès lithologiques en présence font qu'une codification, qui vise à uniformiser les appellations différentes utilisées pour décrire un même terrain, s'est avérée impérative, malgré la perte d'information initiale qu'elle peut impliquer. Le travail a consisté à regrouper les descriptions différentes d'une même entité au sein d'un code générique qui insiste sur les caractères lithologiques, dans une perspective d'applications tout en ménageant une approche stratigraphique sommaire. L'instruction d'un tel référentiel permet tout à la fois d'homogénéiser des dénominations disparates et, en simplifiant les appellations, d'éviter de donner une fausse impression de variabilité de faciès que les données de base de l'étude ne permettent pas.

Le référentiel géologique a été élaboré en début de programme, à dire d'expert, mais a été ajusté au fur et à mesure de l'avancement du traitement des données, pour répondre à des problèmes qui n'avaient pu être anticipés avec les seules connaissances générales des faciès.

4.5.2. Présentation du référentiel géologique

Sur des critères d'homogénéité stratigraphique, 4 groupes principaux de formations peuvent être individualisés, dans lesquels se répartissent 24 unités litho-stratigraphiques, chacune d'entre elles permettant une description détaillée du sondage.

Dans l'illustration 9, sont représentés en caractères normaux les codes initiaux établis en début d'étude et, en caractères italiques, ceux intégrés au fur et à mesure de l'acquisition des données, pour affiner l'interprétation.

a) Formation « Actuel »

La formation « Actuel » regroupe toutes les formations superficielles les plus récentes dont la position stratigraphique est, sans conteste, la plus superficielle. Le code ne fait donc référence qu'à la nature lithologique du matériel.

b) Formations alluviales « basse plaine » et « basse terrasse »

Ces formations comportent des lithologies comparables pour des niveaux stratigraphiques différents. Ainsi des alluvions argileuses et/ou limoneuses, lithologie codifiée par AL, pourront se retrouver dans les formations des basses plaines (ou alluvions modernes) et codifiées par AM ou des basses (ou premières) terrasses, codifiée par 1.

Formations	Codes des unités litho-stratigraphique	Description litho-stratigraphique	Notation utilisée dans les cartes géologiques 1/50 000
Actuel	MUR	Maçonnerie	X
	REMB	Remblais	X
	COL	Colluvions, formations de pente	m-gRc (984)
	PLAT	Formations résiduelles de plateau	m-gRe (983, 984)
	LOES	Dépôts à faciès de Loess	OE (984)
Basse plaine	AMTO	Tourbes dans les alluvions modernes	sans objet
	AMAL	Alluvions modernes argilo-limoneuses	Fz2, Fz1, Fz (983;984) Fy2 (984)
	AMAS	<i>Passée sableuse dans AMAL</i>	
	AMSG	Alluvions modernes sablo-graveleuses	
	AMSA	<i>Passée argileuse dans AMSG</i>	
	AMC	<i>Passée sableuse à la base des AMSG (chenalisation ou altération de la molasse)</i>	
Basse terrasse	1TO	Tourbes dans la première terrasse	sans objet
	1AL	Séquence argilo-limoneuse de la première terrasse	Fy1, Fy (983, 984))
	1AS	<i>Passée sableuse dans 1AL</i>	
	1SG	Séquence sablo-graveleuse de la première terrasse	
	1SA	<i>Passée argileuse dans 1SA</i>	
	1C	<i>Passée sableuse à la base des 1SG (chenalisation ou altération de la molasse)</i>	
Formations molassiques	SILT	Silts des formations molassiques	m2;m1;g2-3 (983); g2, g2d, g2c, g2b, g2a (984)
	MARN	Argiles et marnes des formations molassiques	
	SABL	Sables et grès des formations molassiques	
	MOLA	<i>Argile et sable mélangés</i>	
	CALC	Calcaires des formations molassiques	
	XMOL	<i>Molasse non décrite considérée par défaut comme imperméable</i>	
	CAV	<i>Cavité dans les grès molassiques</i>	
Indifférencié	UNDF	Non connu ou non défini	Sans objet

Illustration 9 - Référentiel géologique élaboré sur la commune de Toulouse.

(les couleurs utilisées dans le tableau font référence aux coupes géologiques présentées plus avant).

Les deux codes sont enfin accolés, le premier spécifiant l'âge et le second la lithologie. Dans l'exemple ci-dessus, les 2 codes résultants sont donc AMAL pour les alluvions argilo-limoneuses des basses plaines et 1AL pour les alluvions argilo-limoneuses des basses terrasses.

• Codes initiaux

Les formations alluviales ont toutes été constituées initialement par les lithologies suivantes :

- un caractère tourbeux, marécageux, que peuvent avoir certains faciès alluviaux de la plaine de la Garonne et notamment ceux de la vallée de l'Hers : code « TO » ;
- un caractère Argilo-Limoneux qui regroupe les lithologies de la partie supérieure de la séquence alluviale. Ces dernières sont définies comme Argileuses et/ou Limoneuses d'après la synthèse bibliographique : code « AL » ;
- un caractère plus grossier représenté par des Sables et des Gravieres à la base de la séquence alluviale : code « SG ».

• Codes rajoutés

Les codes suivants ont été rajoutés en cours d'interprétation pour affiner la caractérisation des formations alluviales (en italique dans l'illustration 9) :

- lors de l'acquisition des données, beaucoup de coupes géologiques mettaient en évidence un niveau de granulométrie plus fine (du sable en l'occurrence) à la base de la séquence alluviale de la basse plaine (sous les graviers). Il a donc été décidé de coder cette information relativement récurrente. Une interprétation possible de cette observation serait celle d'une chenalisation du toit de la molasse suivie d'un comblement par des dépôts détritiques sableux. Le tout aurait ensuite été recouvert par les dépôts d'une nouvelle terrasse.

Le nouveau code adopté pour caractériser la présence de sable à la base des graviers alluviaux est constitué par le code stratigraphique de la terrasse (« AM », « 1 »...), suivi du code descripteur du phénomène « C », comme Chenal sableux.

- Bien évidemment l'hypothèse de la chenalisation reste une interprétation qui demande à être validée avec l'acquisition de nouvelles données. En effet, il se pourrait aussi que ce niveau sableux corresponde à une altération de la molasse.
- des passages sableux ont souvent été rencontrés au sein des unités argilo-limoneuses. Pour rendre compte de ce matériel intercalé dans une unité lithologiquement différente, le code lithologique est construit de la façon suivante :
 - une lettre pour rappeler la composition de l'unité argilo-limoneuse: « A »,
 - une lettre pour caractériser la composition de la passée sablo-graveleuse « S ».

La codification complète intégrant la stratigraphie devient donc AMAS ou 1AS

- des passages argilo-limoneux ont été à l'inverse observés dans les niveaux sablo-graveleux. En suivant la même logique que précédemment, ils ont été codés « AMSA » et « 1SA ».

c) Formations molassiques

A l'instar des formations « Actuel », les formations molassiques ne posent aucun problème de stratigraphie, excepté pour les matériaux soliflués. De la sorte le code est simple et ne recèle qu'une notion de lithologie.

• Codes initiaux

En référence aux séquences classiques des molasses, décrites précédemment, les codes initiaux, selon la suite chronologique de dépôt, sont les suivants :

- « SABL » pour les niveaux sableux ou gréseux,
- « SILT » pour les niveaux silteux ou limoneux,
- « MARN » pour les marnes et les argiles, au vu de leurs propriétés physiques voisines,
- « CALC » pour les niveaux calcaires.

• Codes rajoutés

Afin de caractériser plus précisément certaines couches de la molasse, il a semblé utile de rajouter les codes suivants :

- « MOLA » qui correspond à un mélange argilo-sableux ou sablo-argileux,
- « XMOL » lorsque la molasse n'est décrite que par le vocable « molasse ».

4.6. MODALITÉS DE L'INTERPRÉTATION LITHOLOGIQUE

L'interprétation des sondages est réalisée en tâchant de rapprocher le plus précisément possible les codes préalablement définis ci-dessus de la description lithologique proposée par le sondeur. Dans la pratique, cette interprétation se fait de la manière suivante :

- affichage du site sur écran, sur fond de carte géologique scannée (échelle 1/50 000), au moyen de la base de données MAPINFO préalablement mise en place,
- recherche des éventuels sondages voisins,
- interprétation du log de sondage proprement dite en fonction de la carte géologique et des sondages les plus proches. Il est bien entendu qu'à ce stade il est également fait appel à toute information bibliographique susceptible d'éclairer le choix géologique du code. Les nombreuses contributions orales du géologue cartographe J.P. Capdeville doivent ici être soulignées.

De la sorte, il est possible de minimiser les erreurs d'attribution de nom d'unité et de mettre en évidence soit de réelles variations locales de lithologie soit des erreurs possibles de description. Il reste évident que l'absence de possibilité de contrôle sur le terrain, les milieux n'affleurant pas, et de description direct des logs de sondages constitue la difficulté de cet exercice.

5. Module 3 : Mise en place de la base de données GDM

5.1. VALIDATION ET SÉLECTION DES OUVRAGES DANS LA BASE DE SONDAGES ACCESS

Les lithologies précédemment interprétées et codées dans un référentiel unique sont validées avant de réaliser les traitements thématiques et statistiques sur la base et, in fine, la production de coupes homogènes dans le sous-sol de la ville de Toulouse.

Outre les vérifications de cohérence et d'homogénéité d'interprétation, la validation comporte un regroupement des doublons :

- dans le cas le plus simple, un doublon correspond à deux (ou plusieurs) sondages ayant les mêmes coordonnées géographiques, ou le même plan de localisation, et présentant le même log ;
- toutefois un doublon peut correspondre à deux sondages qui présentent strictement le même log avec des coordonnées différentes. De toute évidence, bon nombre de doublons sont liés à la multiplicité des sources d'information consultées ou à des données erronées ;
- enfin, il existe des cas où des logs différents comportent les mêmes coordonnées : il est apparu hasardeux de regrouper ces dossiers comme doublon.

La procédure pour mettre en évidence ces doublons consiste donc à comparer tous les dossiers des ouvrages proches. Dans cette étude, la limite d'investigation a été fixée à 150 m de rayon.

Cette méthode a évidemment des limites dues aux informations hétérogènes contenues dans chaque dossier. En effet, certains ne possèdent que très peu d'indications permettant de caractériser l'ouvrage.

La sélection des sondages pour la modélisation s'est ensuite faite selon trois critères principaux :

- le premier vise à conserver une répartition optimale sur l'ensemble du territoire de la commune de façon à conserver au modèle une vraisemblance maximale ;
- le second s'attache à ne conserver que les sondages les plus profonds, lorsque plusieurs sont présents sur un site restreint ;
- le troisième enfin ne retient que les ouvrages dont l'interprétation semble la plus vraisemblable.

Dans ces conditions, un total de 3000 sondages a été retenu pour la modélisation (ill. 10).

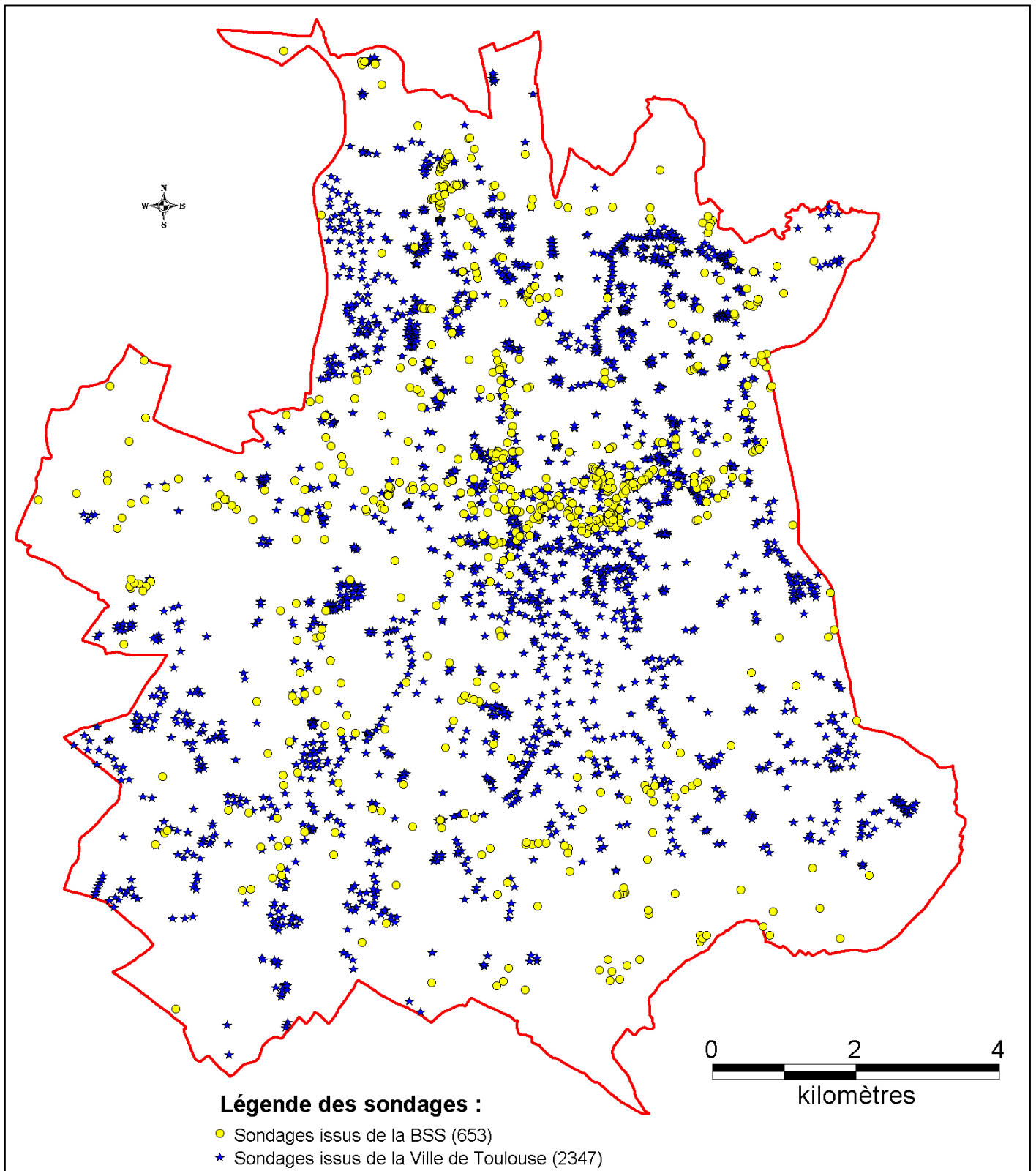


Illustration 10 – Ouvrages sélectionnés pour la modélisation.

5.2. MODÉLISATION À LA DATE DU RAPPORT

A l'origine, le projet prévoyait la réalisation d'une modélisation limitée à une zone test située au nord-est de Toulouse (Quartier de Borderouge). L'évolution du projet a fait qu'un nombre significatif d'ouvrages disponibles sur l'ensemble de la commune de Toulouse a pu être interprété et intégré dans la base ACCESS pour être utilisé par le modéleur GDM.

De la sorte, et malgré les inhomogénéités de répartition des ouvrages utilisables qui fragilisent localement le modèle calculé, il a semblé plus intéressant d'avoir une vue générale des corps alluviaux sur l'ensemble de la commune, notamment pour appuyer la définition du réseau piézométrique.

La modélisation sous GDM a été réalisée à l'aide de l'outil Multilayer, module en option de GDM. Cet outil permet la modélisation de formations géologiques « multicouches », comme par exemple les formations d'un bassin sédimentaire, à partir de données de sondages, de données de cartes géologiques ou d'observations ponctuelles. Il utilise le concept de pile stratigraphique, permettant de décrire la succession des formations ainsi que les relations liant deux formations successives, en particulier présence ou absence d'une phase d'érosion entre deux dépôts successifs.

Les résultats fournis sont un modèle géologique 3D sous forme de grille, indiquant les toits et murs des formations modélisées, ainsi que leur épaisseur. A partir de ces données, GDM est susceptible de générer des sondages prévisionnels ou d'interroger le modèle pour savoir dans quelle formation se trouve un point de coordonnées (X,Y,Z).

5.2.1. Le modèle numérique de terrain (MNT)

Le MNT est une image numérique de la surface topographique dont la précision ou résolution, dépend de la taille de la maille élémentaire, ou pixel, de l'image. Le MNT de l'IGN qui est disponible sur tout le territoire français a par exemple une résolution de 50 m en X et Y et de 10 m en Z. Cette précision a été jugée insuffisante pour les applications du présent projet.

Un MNT local a donc été calculé à partir des données disponibles auprès de la ville de Toulouse. Il s'agit de :

- un semi de points photogrammétriques (679399 points) avec une précision en Z annoncée de 0,4 à 0,5 m ;
- de points de nivellement autour des différents objets de l'urbanisme (abri-bus, arbres, regards, ...). Pour ces points, la précision annoncée de la mesure est de 0,05 m (axes de voirie) à 0,1 m.

Sur cet ensemble de points n'ont été conservés pour le calcul effectivement que 360 855 points photogrammétriques (ill. 11) et 1 703 081 points de nivellement. La sélection s'est faite en excluant les points mal renseignés (absence de coordonnées ou d'altitude et points situés hors de limites de la commune).

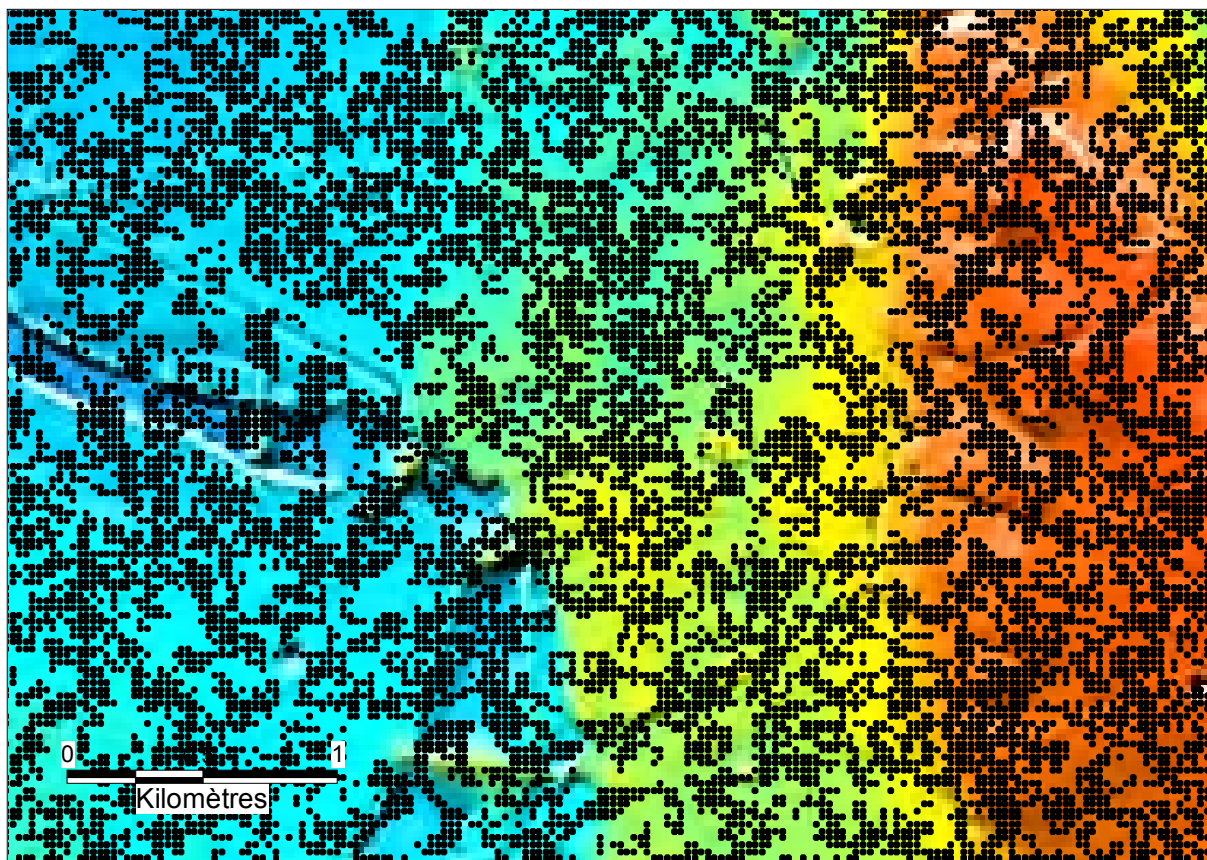


Illustration 11 – Exemple de localisation du semis de points photogrammétrique utilisé pour calculer le MNT sur la ville de Toulouse.

Au final, le MNT a été calculé par interpolation géostatistique (krigeage) sur la base de 2 063 846 points. La maille calculée est de 20 x 20 m et sa précision altimétrique de l'ordre de 0,5 à 0,8 m. Il faut toutefois souligner que cette précision reste statistique et entièrement dépendante, pour chaque maille, de leur distance aux points de référence les plus proches. Pour préciser les erreurs possibles, nous avons procédé à des calculs d'interpolation croisés entre les deux sources de données (photogrammétrie et nivellement). Si la différence moyenne calculée est voisine de 0 (0,01 m), on observe des différences maximales très importantes (-8,96 m et + 8 m). Il s'agit d'erreurs manifestes, très ponctuelles, dans les données initiales, qu'il conviendra de corriger.

La précision recherchée pour l'étude entreprise est compatible avec un MNT de 10 m ce qui nécessiterait l'acquisition de nouveaux points de nivellement, en particulier dans les régions à morphologie contrastée.

Ce MNT constituera la référence altimétrique de l'étude mais ne saurait en aucun cas être utilisé pour des applications géodésiques. En effet quelques comparaisons visuelles avec les points cotés présents sur le scan 25 de l'IGN ont montré des erreurs locales allant de 0 à 12 m.

A cette réserve près, le MNT sera utilisé dans 3 opérations différentes de l'étude :

- la représentation graphique en trois dimensions de la zone d'étude (ill. 12) ;
- l'attribution d'un niveau altimétrique homogène à tous les ouvrages référencés de l'étude, ce qui permet d'éliminer une source d'erreur, au niveau de la surface topographique, lors des interpolations des limites géologiques ;
- la limitation de l'interpolation des données à la surface topographique, au cours des calculs de modélisation.

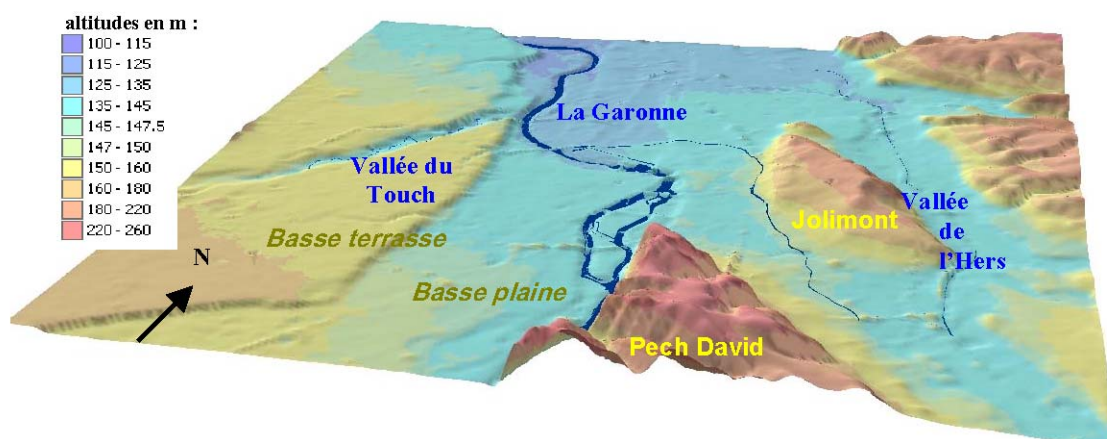


Illustration 12 – Vue perspective de la morphologie de la commune de Toulouse.

5.2.2. Modifications de la carte géologique

L'étude détaillée des sondages peut être l'occasion de constater des incohérences avec la carte géologique, qui peuvent être expliqués par le fait que le géologue chargé de la réaliser ne disposait pas d'une information aussi abondante sur le sous sol.

Dans le cadre du projet, les modifications apportées sont relatives aux alluvions du Seuil de Toulouse (Fy2) situées entre les collines molassiques de Pech David et de Jolimont. Il s'avère plus judicieux, pour des raisons de lithologie et d'épaisseur apparues à l'issue d'une première modélisation, de les attribuer aux alluvions actuelles des cours d'eau secondaires (Fz). Cette modification est tout à fait compatible avec l'hypothèse qui veut que ces formations matérialiseraient l'ancien couloir alluvial de l'Hers (visible sur le toit de la molasse) lorsque son bassin versant était plus vaste vers la Méditerranée qu'à l'époque actuelle.

Une telle carte modifiée (ill. 13) permettra une validation plus assurée de la modélisation dans cette zone. Il est bien entendu que cette modification est réalisée dans le strict cadre de l'étude. Sa validation par le Comité de la Carte Géologique de France serait nécessaire, après étude complémentaire, pour être intégrée dans le document officiel de référence.

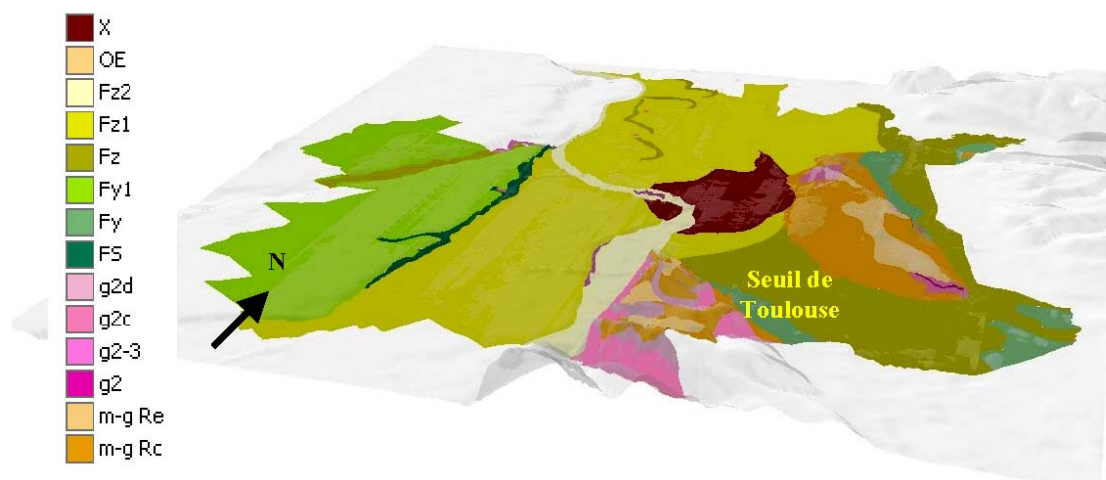


Illustration 13 – Vue perspective de la carte géologique modifiée.

5.2.3. Mode opératoire sommaire de la modélisation

Remarque préalable : avant toute interpolation des interfaces géologiques, deux contrôles ont été effectués :

- contrôle de la cohérence des interprétations entrées dans la base en fonction de la pile stratigraphique établie. Il est, par exemple, impossible de trouver en contact normal de la molasse sur des alluvions ;
- contrôle du variogramme de corrélation des sondages. Cette analyse permet de déterminer le rayon de recherche des points à corréler pour que l'interpolation soit valide.

Ces contrôles permettent la correction de données erronées et la détermination des paramètres d'interpolation. Le calcul suit alors les étapes suivantes :

- interpolation des données par codage ;
- prise en compte de points de contrainte ;
- calcul de profil ;
- combinaison des interfaces.

Ces calculs aboutissent à la constitution de grilles de valeurs grâce auxquelles des coupes sont créées.

5.2.4. Modélisation géologique

Plusieurs coupes géologiques synthétiques ont été réalisées sur le territoire de la ville de Toulouse afin de tester la validité des interpolations, et de là, celle du modèle. Leur position est visible sur la carte géologique modifiée de l'annexe 6.

Ces exemples présentent le profil topographique (MNT) de la coupe ainsi que la côte des murs des alluvions modernes et des alluvions anciennes. Cette dernière côte correspond également à la limite supérieure (ou toit) du substratum molassique. Les sondages qui apparaissent sur le profil appartiennent à une bande de 100 m de large, centrée sur l'axe de la coupe. Cette distance s'est révélée à l'usage un compromis acceptable pour obtenir un maximum de sondage sans incohérence majeure lors de l'interpolation.

La légende couleur utilisée dans les coupes ci-dessous fait référence à l'illustration 9 correspondant au référentiel géologique établi pour l'étude.

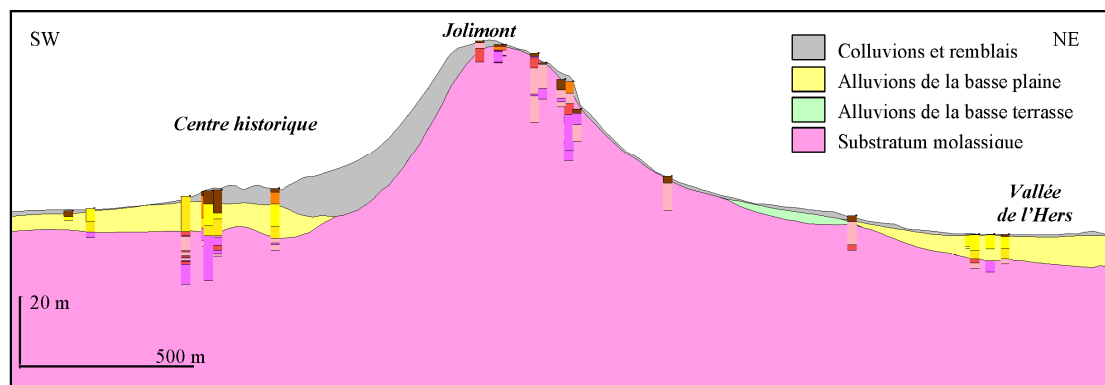


Illustration 14 – La butte de Jolimont – coupe n° 1 SW-NE.

La coupe de l'illustration 14 traverse le coteau molassique de Jolimont. Elle est limitée à l'Est par la vallée de l'Hers et à l'Ouest par la plaine alluviale de la Garonne.

Les principales observations qui peuvent être faites sont les suivantes :

- la colline de Jolimont, comme le signale la carte géologique, montre bien une composante molassique forte, associant les molasses en place et ses formations remaniées, les colluvions et les formations de pente. Une restriction toutefois est à émettre concernant l'épaisseur des colluvions qui paraît surévaluée du fait de l'absence de sondage assez proche pour contraindre le modèle au niveau du profil ;
- le modèle paraît satisfaisant pour ce qui concerne les formations de la basse terrasse et de la basse plaine dans la vallée de l'Hers ;
- quelques coupes de contrôle effectuées au travers des coteaux molassiques de Pech David et de Jolimont montrent que l'interpolation est cohérente avec la géologie connue de cette zone ;
- au niveau du centre historique de Toulouse, la formation des sols historiques est associée aux colluvions, du fait de l'échelle relativement petite de la coupe.

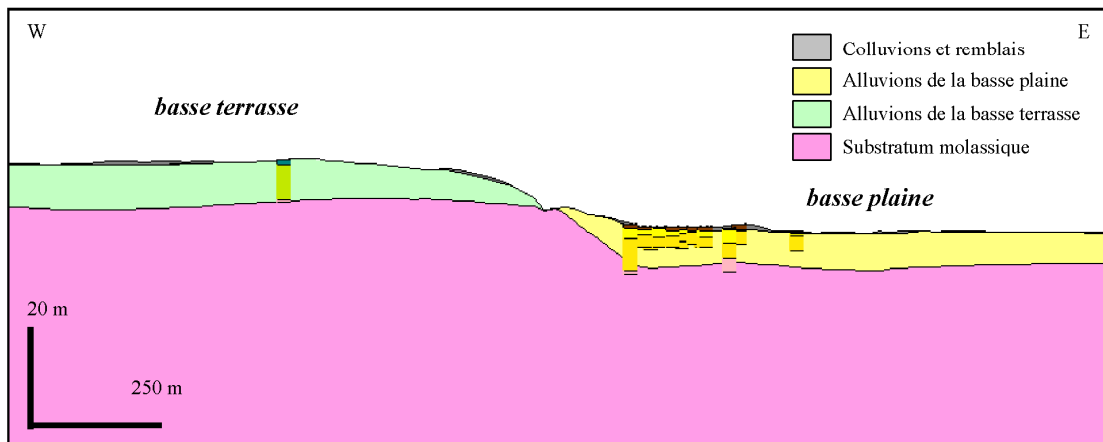


Illustration 15 – Le passage de la basse terrasse à la basse plaine – coupe n° 2 W-E.

La coupe de l'illustration 15 montre le passage de la basse terrasse à la basse plaine. Elle montre que ces deux terrasses sont étagées avec une « marche d'escalier » molassique. Ceci correspond effectivement aux observations de terrain que traduit la carte géologique. Dans ce cas, un seul sondage sur le tracé ouest de la coupe suffit à contraindre le modèle.

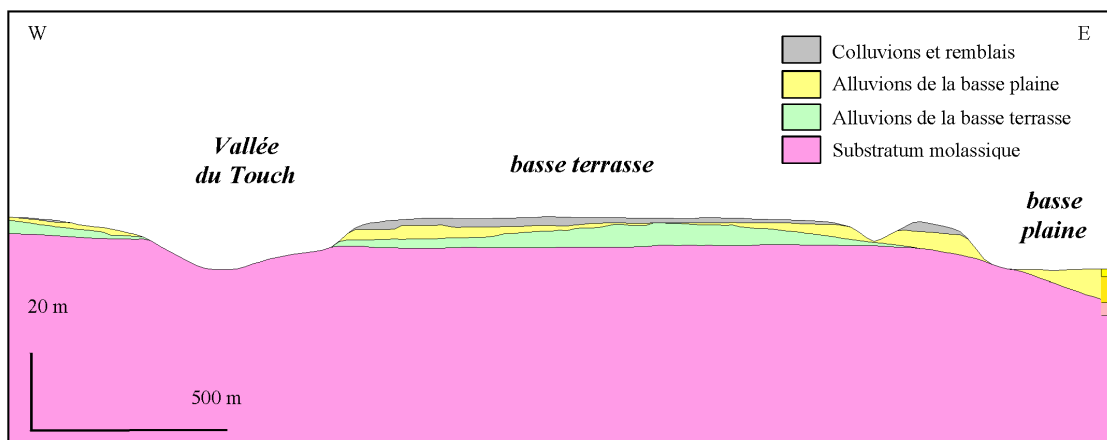


Illustration 16 – Coupe sans sondages sur une largeur de 100 m – coupe n° 3 W-E.

La coupe de l'illustration 16 constitue un exemple du résultat de l'interpolation du géomodeleur lorsqu'il n'a pas de sondage de référence dans une largeur d'au moins 100 m.

Dans ces conditions, le modèle est erroné et ne restitue pas la « réalité » géologique du secteur. En effet, la basse plaine repose sur la basse terrasse ce qui ne correspond pas au principe de terrasse étagée dont le système alluvial de la Garonne fait parti.

RECHERCHE DES SONDAGES SUR LA VILLE DE TOULOUSE

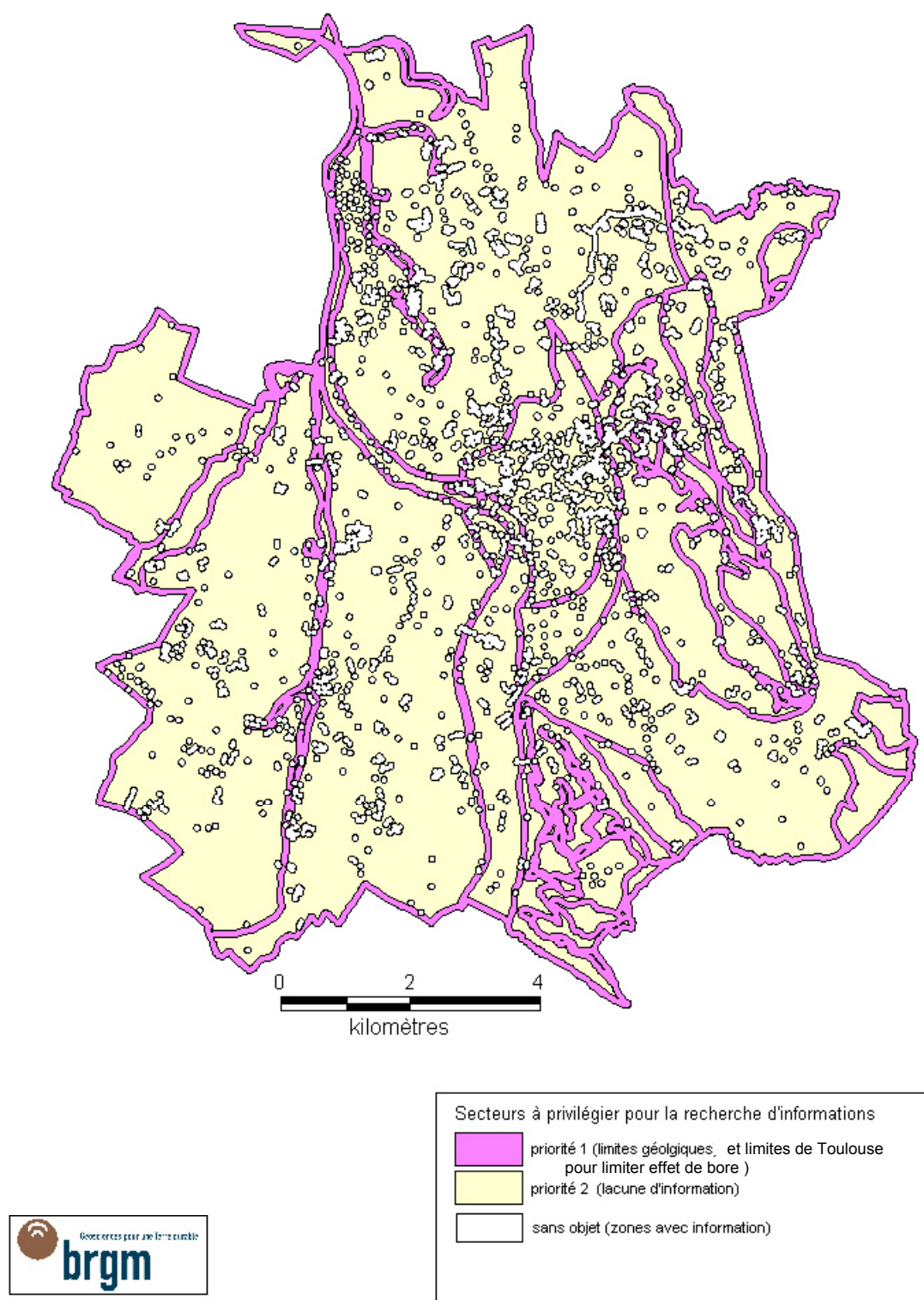


Illustration 17 - Carte pour la recherche des sondages sur la Ville de Toulouse.

Cet exemple montre bien la nécessité d'établir un réseau de sondages plus dense sur le territoire de la commune, ayant une répartition spatiale homogène et géologiquement cohérente avec l'échelle de travail souhaité, à savoir le 1/10 000. Le modèle pourra alors être suffisamment contraint pour être représentatif de la géologie de la ville de Toulouse.

Actuellement, 3 000 ouvrages de reconnaissance sont utilisés pour la modélisation soit une densité moyenne de 25 sondages par km². Il serait souhaitable d'atteindre une densité plus importante pour approcher la précision du 1/10 000. D'après les observations de terrain (J.P. Capdeville c.o.), la largeur moyenne des corps alluviaux est de l'ordre de 100 m. Selon le quadrillage adopté au chapitre 6 pour la recherche des piézomètres (mailles de 700 m de côté), le nombre idéal de sondages pour chaque maille serait donc de 49 soit au total de l'ordre de 15 000 pour toute la commune. Il est possible d'optimiser ce nombre en sélectionnant des zones clé déterminées selon deux critères, par ordre de priorité (cf. ill. 17) :

- d'abord un critère géologique : il revient à préciser les limites des formations géologiques par une recherche d'ouvrages localisés dans une bande de 50 m de part et d'autre de la limite ;
- puis, un critère de lacune d'information. Pour ce dernier critère, les zones à privilégier pour l'acquisition de nouvelles données pourront être choisies sur la base d'une étude géomorphologique des paléoméandres effectuée à l'aide de photographies aérienne anciennes : missions IGN des années 40 sélectionnées du fait de l'absence d'urbanisation dans la plaine de la Garonne.

5.2.5. Cartographie du niveau sablo-graveleux

La convention prévoyait la réalisation d'une étude géologique et hydrogéologique essentiellement appliquée à la zone de Borderouge. Cette étude est présentée dans les rapports de Déborah Martinez (2003) et de Charlene Coutin (2003). Elle s'est en particulier traduite par deux documents cartographiques qui ont permis de tester le modèle tout en relevant les cohérences et les incohérences avec les interprétations des sondages. Il s'agit :

- d'une carte de l'épaisseur des formations superficielles prises dans leur globalité (alluvions, colluvions, etc), montrée par l'illustration 18. Elle permet de souligner l'importance des colluvions, liés au démantèlement des collines molassiques, mais montre les limites de la modélisation au delà des derniers sondages pris en compte : vers les collines, elle exagère les épaisseurs et vers la Garonne elle les minimise puisqu'elle se base, dans chaque cas, sur les tendances d'évolution calculées sur les derniers puits ;
- d'une carte des isobathes du toit de la molasse (ill. 19) qui montre bien les remontées au niveau des collines de l'est de Toulouse tout en présentant bien sûr les mêmes problèmes de validité que la précédente aux limites de la zone étudiée.

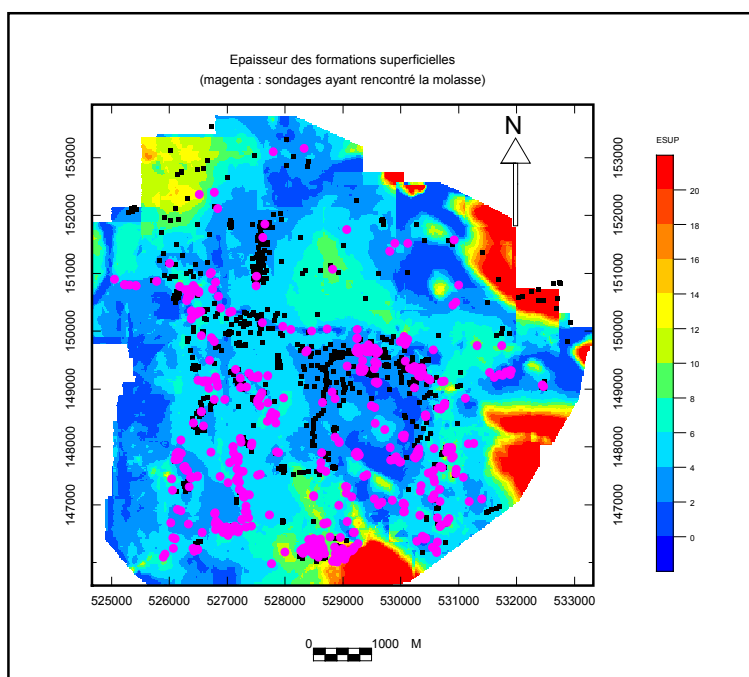


Illustration 18 – Carte de l'épaisseur des formations superficielles.

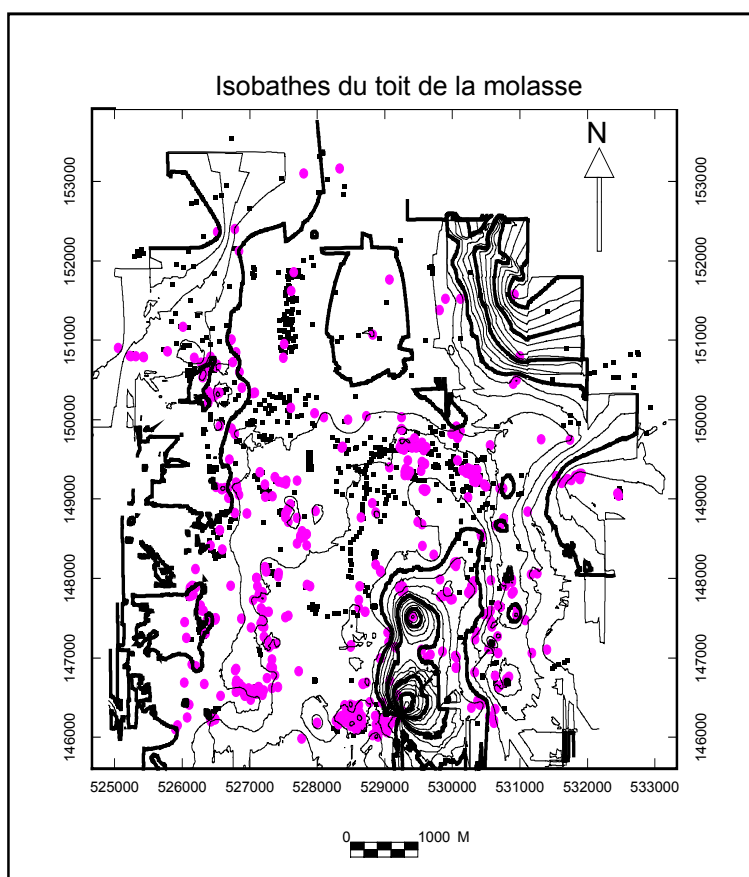


Illustration 19 – Carte des isobathes du toit de la molasse.

Il s'avère toutefois qu'à l'issue du présent projet, un nombre de sondages plus important que prévu a pu être interprété et que ces sondages couvrent l'ensemble de la commune, certes de façon parfois inhomogène. Il est donc apparu opportun d'étendre la modélisation à tout ce domaine, même si les étendues parfois importantes sans information occasionnent des imprécisions localement fortes.

La modélisation a essentiellement porté sur les 2 formations alluviales de la Garonne (basse terrasse et basse plaine) qui renferme du matériel sablo-graveleux, codé 1SG pour la première et AMSG pour la seconde, et ce, pour les raisons suivantes :

- ces niveaux, situés à la base des formations alluviales, sont les plus continus et souvent les plus épais, au sein d'une même formation ;
- ces niveaux sont les plus perméables et donc les plus potentiellement exploitables, du point de vue de la gestion de l'eau.

Ainsi, ils ont été cartographiés sans distinction puisqu'ils ont la même composition lithologique (sables et graves), bien que d'époque différente (RISS pour les niveaux 1SG formant la basse terrasse et WURM pour les niveaux AMSG de la basse plaine).

La carte résultat (ann. 7) permet de constater l'étendue des niveaux sablo-graveleux qui sont présents sur la majorité de la commune, avec des épaisseurs allant de 1 à 10 m, excepté bien sûr sur les points d'affleurements de la molasse observés sur la carte géologique ou déduite de l'interprétation des sondages. Une telle carte appelle les principales remarques suivantes :

- l'épaisseur des niveaux AMSG et 1SG varie de part et d'autre de la portion NW-SE du cours de la Garonne, entre le Pont de Blagnac et le Pont Neuf. De 2 à 5 m au nord de cette ligne, elle passe de 5 à 10 au sud. Ces valeurs calculées sont en grande partie validées, dans les deux cas, par la présence de sondages, même si des dérives sont à envisager dès leur absence (zone de Lardenne-Le Mirail, de Francazal ou de Braqueville-AZF pour des exagérations probables d'épaisseur par exemple) ;
- l'épaisseur des niveaux 1SG (basse terrasse) est globalement plus forte que celle des niveaux AMSG (basse plaine), ce qui n'est pas en accord avec la carte et qui pourrait constituer un apport intéressant de cette étude à un document déjà ancien (1965). Toutefois, la répartition inhomogène des sondages étant susceptible d'introduire des artéfacts, ce fait devra être confirmé à l'occasion de nouveaux sondages ;
- la présence de fortes épaisseurs ponctuelles de AMSG qui apparaissent sous forme de points jaunes à rouge au niveau du sol historique de Toulouse a pu être constatée au cours de l'interprétation. D'un trottoir à l'autre d'une rue a été observée une augmentation rapide de l'épaisseur de AMSG qui passe de 1 à quelques 10 m. Un tel phénomène est tout à fait compatible avec les divagations chenalisantes d'un fleuve actif comme la Garonne ;
- la présence de niveaux AMSG au sein des formations molassiques est, a priori une erreur. Il conviendrait de vérifier si cette erreur est imputable à l'interprétation, à une limite imprécise de la carte géologique ou à une absence de donnée.

Malgré les problèmes posés par cette modélisation et son imprécision, liés à une répartition non homogène des sondages sur l'ensemble de la commune de Toulouse, les premiers résultats obtenus correspondent à une grande avancée dans la connaissance du sous-sol immédiat de la plaine de la Garonne :

- ils permettent de caractériser et de cartographier des corps lithologiques alluviaux continus, à forte porosité, sur tout le sous-sol toulousain, AMSG pour les alluvions de la basse plaine et 1 SG pour ceux de la basse terrasse. La carte de ces corps servira de guide pour le choix des piézomètres de suivi de l'aquifère ;
- ils confirment le caractère discontinu, voire local, des autres formations alluviales argileuses ou sableuses et des molasses, qui ne présentent pas d'intérêt en terme d'exploitation de ressource en eau souterraine mais qui doivent être l'objet de mesures particulières lors de travaux (exhaure par exemple) ;
- ils permettent d'ores et déjà de réaliser des coupes indicatives du sous-sol en préalable à la définition de projets d'aménagement.

6. Module 4 : Mise en place d'un réseau de suivi de données hydrogéologiques

6.1. MÉTHODE DE SÉLECTION DES PIÉZOMÈTRES POTENTIELS

L'objet du module 4 est de sélectionner des puits qui atteignent ou traversent les formations alluviales, en particulier lorsque leur épaisseur est susceptible de permettre la réinfiltration des eaux pluviales.

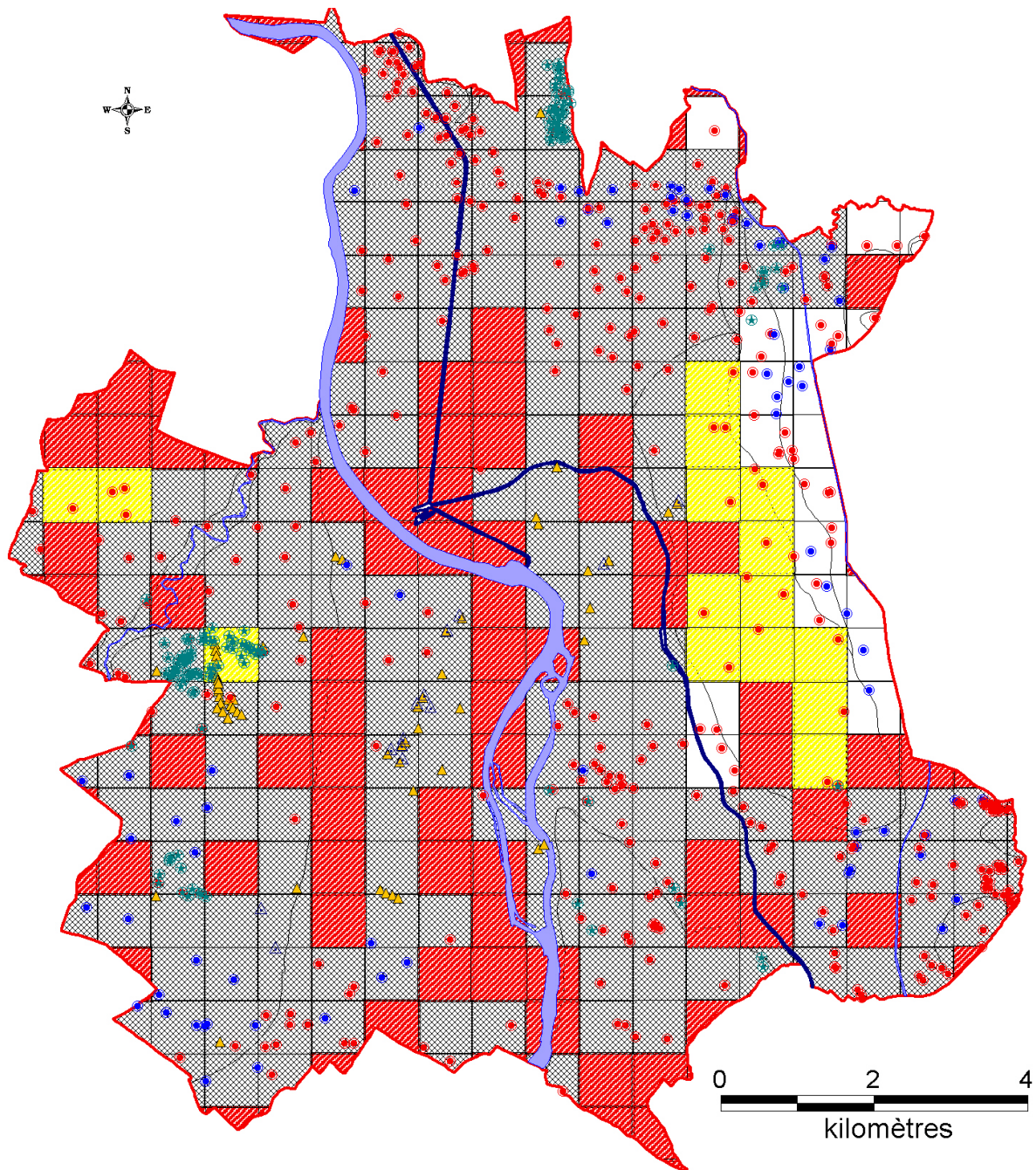
La modélisation présentée ci-dessus a permis de proposer une première description des niveaux géologiques (AMSG et 1SG), susceptibles de contenir les nappes alluviales de la basse plaine et de la basse terrasse, par le calcul de leur épaisseur et de leur répartition spatiale. C'est en s'appuyant sur la carte obtenue à l'issue de ces calculs qu'a été conduite la recherche des puits utilisables pour mettre en place le réseau de suivi hydrogéologique.

Les puits existants potentiellement utilisables au nombre de 348 sont extraits de la base de données des sondages (BSS et Ville de Toulouse), auxquels ont été ajoutés ceux figurant dans le rapport Hydro-M Environnement déjà cité. Ces ouvrages ont été sélectionnés en fonction des trois critères suivants :

- la profondeur (> 5 m) ;
- la présence d'un piézomètre (information précisée uniquement en BSS) ;
- la situation sur les nappes alluviales.

Par ailleurs, un second choix a ensuite été effectué qui visait à obtenir une répartition des puits la plus homogène possible sur l'ensemble de la zone d'étude. Pour ce faire, la surface urbaine a été quadrillée en mailles de 700 m de côté, correspondant au carroyage IGN du plan de la ville de Toulouse à l'échelle du 1/12 500. Dans la mesure du possible, un seul puits par maille est alors retenu. Malgré ces précautions, la couverture piézométrique de la ville reste irrégulière du fait de l'absence totale de puits dans de nombreuses mailles.

L'illustration 20 est un exemple des cartes d'avancement de l'opération de visites des puits en date du 1^{er} septembre 2004. Elle permet de situer les différents ouvrages qui ont été contrôlés selon le maillage évoqué ci-dessus et de suivre dynamiquement les vicissitudes des travaux de terrain : mailles sans ouvrages, mailles non visitées pour des raisons géologiques ou logistiques.



Puits issus de la BSS :

- Profondeur > 5 m (sans piézomètre)
- Profondeur > 5 m (avec piézomètre)

Puits issus de la Ville de Toulouse :

- Profondeur > 5 m

Puits issus du rapport d'HYDRO M :

- △ Piézomètres de surveillance
- ▲ Puisards

Légende des zones étudiées :

- | | |
|--|--|
|  Zones visitées |  Zones non visitées (molasse, entreprise, résidences clôturées) |
|  Zones sans puits |  Zones à visiter |



*Illustration 20 – Carte d'avancement du suivi des mailles contenant les puits à visiter.
(au 1^{er} septembre 2004).*

6.2. PRÉPARATION DES VISITES DES PUIITS

La préparation des travaux de terrain consiste essentiellement en l'édition des deux différents types de document cartographique suivant :

- des extraits du SCAN-VILLE de l'IGN à l'échelle du 1/12 500 correspondant aux mailles comportant les puits à visiter,
- pour chaque puit, un extrait des orthophotographies de la ville de Toulouse dont la grande précision a permis de localiser plus facilement les parcelles concernées et, parfois, les puits.

La visite de terrain vise ensuite à :

- vérifier l'implantation cartographique des puits (X, Y et adresse postale) ainsi que leur état actuel (accessibilité, équipement, niveau d'eau..)
- rencontrer les propriétaires des domaines privés pour obtenir une autorisation de principe quant à l'utilisation de routine de leur puit. Cet accord verbal devra être officialisé par une demande écrite de la mairie.

6.3. VISITE DES PUIITS SÉLECTIONNÉS

Les travaux de terrain qui se sont déroulés entre le 7 juin et le 1^{er} septembre n'ont permis de retrouver que **48** puits sur les **348** définis au départ, soit **12 %** des puits retenus (ill. 21 et ann. 8).

Plusieurs raisons peuvent expliquer l'impossibilité de retrouver certains puits :

- précision insuffisante de la localisation, à l'issue du dépouillement des archives ;
- disparition ou changement du nom de la rue ;
- quartier totalement réaménagé ;
- puits trop ancien voire inconnu de mémoire d'homme.

Nombre de puits sélectionnés	Nombres de puits retenus pour le suivi piézométrique	Propriétaire			Accès		
		particulier	entreprise	public	libre *	accueil **	fermé ***
348	48	31	7	10	29	2	17

* = accès libre

** = accès par un accueil

*** = accès fermé.

Illustration 21 - Nombre des puits visités.

Les puits finalement retenus pour le suivi piézométrique sont sélectionnés en fonction des critères suivants :

- l'accès,
- le niveau piézométrique,

- la profondeur,
- l'état (margelle, puit non obstrué, etc),

définis sur une fiche descriptive de terrain, comme celle figurant en annexe 9.

L'illustration 22 permet de localiser les puits retenus.

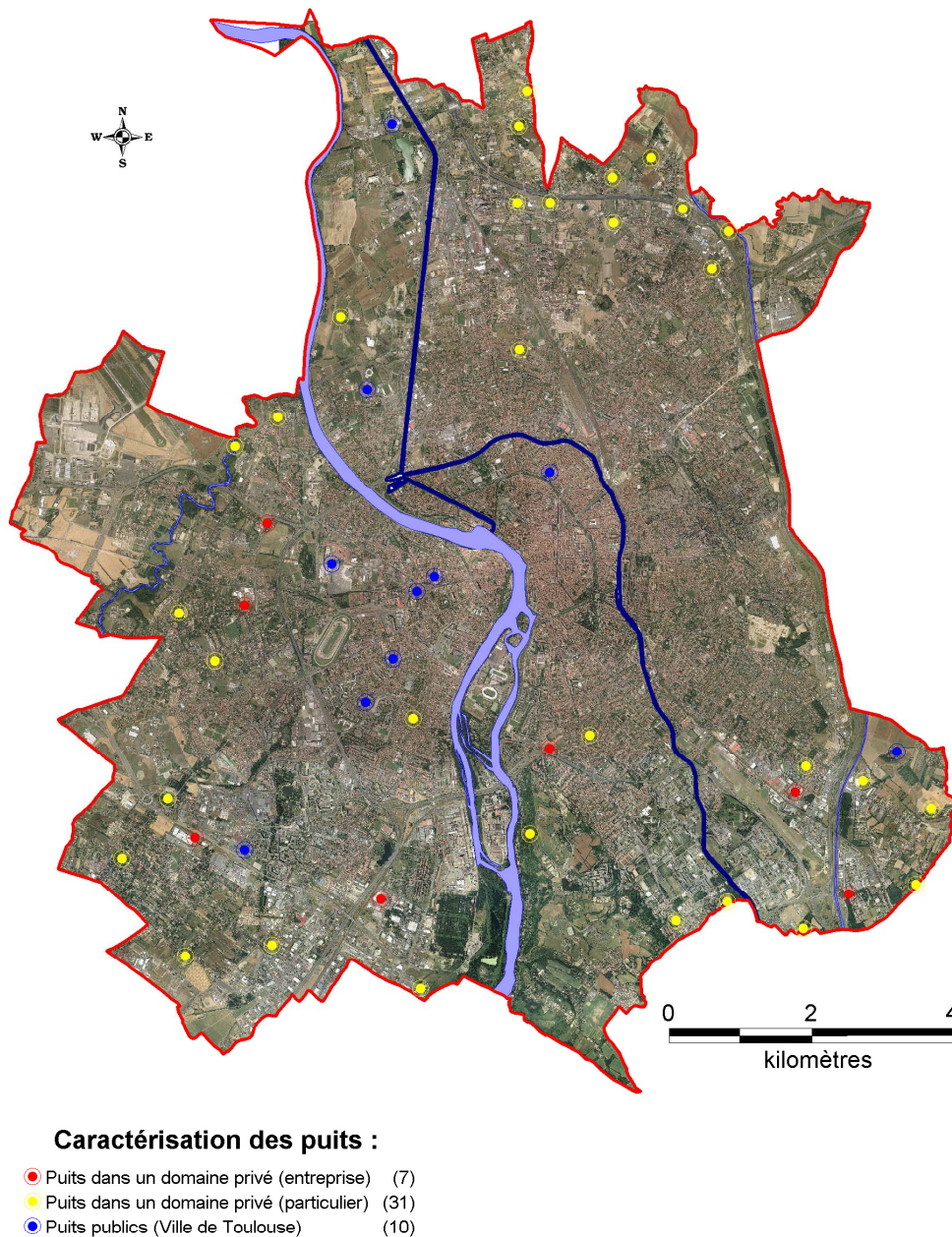


Illustration 22 – Localisation des piézomètres potentiels.

Au cours des visites de terrain un certain nombre de problèmes a été rencontré qui ont rendu indispensable d'éliminer de nombreux piézomètres potentiels. Parmi ceux là peuvent être cités :

- le refus de certains propriétaires, pour des raisons non exprimées, de laisser entrer l'enquêteur ;
- l'ancienneté de certaines données qui conduisent, du fait des modifications progressives de l'espace urbain, à des puits actuellement détruits ;
- la localisation des puits situés en zones d'accès fermé (entreprise, particuliers) ce qui peut être gênant pour la future campagne piézométrique.

Dans une perspective de suivi régulier des piézomètres, il faut aussi mentionner les importantes difficultés de déplacement et de stationnement dans le centre ville. A ces problèmes de circulations s'ajoute dans cette même perspective, la nécessité de contacter préalablement les propriétaires privés. L'éventualité d'équiper les piézomètres de système de télétransmission semble donc indispensable.

6.4. SAISIE DES DONNÉES

Les informations recueillies au cours des travaux de terrain sont ensuite synthétisé dans le tableau déjà cité (ann. 8), selon les principales rubriques suivantes :

- coordonnées x et y (Lambert III), issues de la numérisation des orthophotos IGN,
- niveau de l'eau ;
- accessibilité ;
- type de propriétaire privé (particulier ou entreprise) ou public ;
- nom et adresse postale du propriétaire...

7. Module 4 bis : Initiation du suivi piézométrique

La durée de ce module correspond à une période de trois mois au cours de laquelle les puits retenus font l'objet de premières mesures.

La réalisation de ce module est actuellement en cours. Elle se matérialise par l'envoi par la mairie, au début du mois de novembre, de conventions de mise à disposition des puits aux différents propriétaires.

8. Module 5 : Bilan et recommandations

8.1. BILAN DE LA PHASE 1

La phase 1 du projet BISMUTH a permis les avancées suivantes dans la connaissance du sous-sol toulousain et de ses applications hydrogéologiques :

- inventaire et classification des données de sondage disponibles, extraites des archives directes et indirectes de la ville de Toulouse (5 570 sondages) et des archives du BRGM (2 322 sondages) ;
- constitution d'une base de données géoréférencée en X et Y, comprenant la totalité des 7 892 sondages recensés ;
- interprétation des 3 000 sondages qui présentent des informations géologiques utilisables. Ces informations brutes, naturellement hétérogènes, ont été codées en corps lithologiquement et stratigraphiquement équivalents pour aboutir à une description globalement homogène des formations alluviales et molassiques qui composent le sous-sol toulousain ;
- modélisation du sous sol : en préalable à la modélisation, l'altitude Z, extraite du MNT, est associée à chaque ouvrage. À ce stade de l'instruction de la base, malgré les inévitables imprécisions inhérentes au calcul de modélisation, des cartes et des coupes 3D (profondeurs, épaisseurs, limites, etc) du sous sol ont été calculées. Elles permettent en particulier de caractériser un niveau alluvial très important pour la gestion des eaux souterraines du fait de son extension à tout le territoire de la commune (sauf en terrain molassique) et de sa perméabilité : le niveau sablo-graveleux des basses terrasses et basses plaines de la Garonne. Cette acquisition de connaissance correspond à une avancée significative dans la cartographie du sous-sol de la commune, depuis l'édition de la carte géologique en 1965 ;
- inventaire des piézomètres : c'est sur la base de la carte du niveau sablo-graveleux, qu'ont été choisis les sites les plus souhaitables d'implantation des piézomètres et par là sélectionnés les puits à visiter, parmi ceux qui existaient. Dans la pratique, compte tenu de leur hétérogénéité de répartition, ont été dans un premier temps retenus tous ceux qui permettaient d'accéder à une information répartie. Sur 348 puits connus dans la base de données, seuls 48 ont été retenus, l'élimination restant le fait, le plus souvent, de vétusté et d'accessibilité des sites.

8.2. RECOMMANDATIONS POUR LA PHASE 2

La phase 2 du projet BISMUTH, poursuivant les actions entreprises en phase 1, les actions suivantes pourraient être envisagées :

- augmenter significativement la densité des sondages pour améliorer la définition du modèle en se basant sur les recommandations faites au paragraphe 5.2.4 ;
- recalculer le modèle géologique pour aboutir à une cartographie géologique de précision ;
- prendre en compte l'incidence des cavités souterraines sur le modèle géologique proposé pour une meilleure approche géotechnique ;
- étendre le réseau d'observation des eaux souterraines jusqu'au nombre initialement envisagé de 100 points et poursuivre le suivi. Les nouveaux piézomètres gagneraient à être implantés dans des lieux libres d'accès et l'ensemble du réseau à être équipé de système automatique de suivi ;
- aider, par une formation du personnel spécialisé de la Mairie, à la prise en main du modèle et de l'outil GDM pour des applications urbaines.

9. Conclusion

La ville de Toulouse a ressenti la nécessité de disposer d'une connaissance géologique et hydrogéologique homogène du sous-sol de la commune, dans un contexte d'évolution urbaine continue nécessitant une adaptation permanente des aménagements.

Dans cette optique, trois axes principaux ont soutenu le présent projet :

- le premier a consisté en la mise en place d'une base de données urbaine de sondages géoréférencés, Ce sont au total quelques 3000 sondages de référence qui ont été sélectionnés parmi 8000 ouvrages de reconnaissance collectés sur une surface urbaine de 118,5 km² ;
- le second, qui s'appuie sur la base précédente, a abouti au calcul d'un modèle géologique 3D. La modélisation du sous-sol a permis de caractériser un niveau alluvial essentiel pour la gestion des eaux souterraines par son extension à tout le territoire de la commune (excepté en terrain molassique) et sa perméabilité : il s'agit du niveau sablo-graveleux des basses terrasses et basses plaines de la Garonne. Cette acquisition de connaissance correspond à une avancée significative dans la cartographie du sous-sol de la commune, depuis l'édition de la carte géologique en 1965 ;
- le troisième correspond à la mise en place d'un réseau de suivi piézométrique défini à l'aide des résultats des deux axes précédents : la base de donnée de sondages pour l'identification des puits et la carte 3D pour leur sélection. La mise en place d'un réseau piézométrique s'est appuyée sur 348 puits recensés (et intégrés dans la base) dont seuls 48 ont été retenus à ce jour pour le suivi quantitatif des eaux souterraines de la Ville. Leur sélection a pris en compte notamment la pertinence de leur représentativité, leur pérennité et leur condition d'accès. Deux campagnes de mesure ont pu être réalisées.

Les résultats de la phase 1 doivent être confortés par l'accroissement du nombre de points d'information dans la base. Ceci permettrait d'affiner le modèle géologique et d'élaborer une cartographie géologique de précision. Une telle cartographie permettrait d'étendre le réseau piézométrique en vue d'une meilleure gestion des eaux, en particulier les eaux pluviales, et de faciliter les reconnaissances préalables à la définition de grands travaux d'aménagement.

10. Bibliographie

Bonnart J.M. (1988) - Métro Toulouse ligne A. Projet de tunnel entre les stations Jean Jaures et Marengo, Synthèse des données géologiques, géotechniques et hydrogéologiques - Rapport BRGM 88MPY06, 8 p.

Campy M., Macaire J.J. (1989) - Géologie des formations superficielles – Masson.

Capdeville J.P. (2001) - Notice de la carte géologique de Valence d'Agén (903).

Capdeville J.P., Chalard P., Jarry M., Millet D., O'YI W. (1997) - Le gisement Acheuléen d'En Jacca - La Sauvegarde à Colomiers (Haute-Garonne) : nouvelles données - PALEO, n°9, p. 69-99.

Cavaillé A. (1965) - Notice des cartes géologiques de Toulouse W(983).

Cavaillé A. (1965) - Notice des cartes géologiques de Toulouse E (984).

Cavaillé C., Vanderberghe A. (1965) - Inventaire des ressources hydrauliques du territoire compris sur les feuilles topographiques au 1/20 000 Toulouse Ouest 3 (983-3) ; Rapport BRGM n° DSGR.65. A 66.

Cavaillé C., Vanderberghe A. (1965) - Inventaire des ressources hydrauliques du territoire compris sur les feuilles topographiques au 1/20 000 Toulouse Est 5 (984-5) ; Rapport BRGM n° DSGR.65.A 10.

Collin J.M., Galharague J., Robert J. (1974) - Sables et graviers de la basse terrasse en amont de Toulouse (Haute Garonne). Rapport 74SGN076MPY BRGM ou 31T662GP14940 CETE, 20 p.

Coutin Ch. (2003) - Pré-inventaire des données géologiques et hydrogéologiques, secteur nord-est de Toulouse. Contribution à l'élaboration d'une banque des données du sous-sol ; Mémoire de 3^{ième} année IGAL, Cergy-Pontoise.

Dassibat C. (1969) - Inventaire des ressources hydrauliques du territoire compris sur les feuilles topographiques au 1/20 000 Toulouse Ouest 7 et 8 (983-7 et 8) ; Rapport BRGM n° 69 SGR 165 MPY.

Gèze B., Cavaillé A. (1977) - Guide géologique régional, Aquitaine Orientale – Masson.

Hydro-M Environnement (1999) - L'eau à Toulouse ; Service Hydrologie et Environnement, Mairie de Toulouse.

Hubschman J. (1975) - L'évolution des nappes alluviales anté-rissennes de la Garonne, dans l'avant pays molassique – Bull. AFEQ, 1975-3-4, p. 149-169.

Hubschman J. (1975) - Les terrasses récentes de la Garonne et leur évolution - Bull. AFEQ, 1975-3-4, p. 137-147

Martinez D. (2003) - Pré-inventaire des données géologiques et hydrogéologiques, secteur nord-est de Toulouse. Contribution à l'élaboration d'une banque des données du sous-sol ; Mémoire de maîtrise IUP Géoingénierie de l'Environnement, UPS Toulouse.

Roche J., avec la collaboration de Grech B. et Vernet R. **(1966)** - Etude hydrogéologique de l'avant projet de déviation du Canal du Midi hors de la ville de Toulouse par la vallée de l'Hers ; Rapport BRGM n° DSGR.66. A 74.

Roche J., avec la collaboration de Grech B. et Vernet R. **(1966)** – Etude géologique détaillée d'ouvrages de grande voirie dans la ZUP du Mirail à Toulouse (Haute Garonne) - Rapport BRGM DSGR.66.A73.

Thierry P., Bourguin B. (2001) – Méthodologie de réalisation d'un système d'information géologique pour les agglomérations - Exemple sur un secteur test de l'Ouest lyonnais - Rapport BRGM RP-50964-FR, 96 p.

Thierry P., Lanini S., Baranger Ph., et al., avec la collaboration de Delpont G., Detrait G. et Pinault J.L. **(2001)** - Simulation de la production/migration des polluants dans un système urbain par la méthode des réacteurs en réseau (RER) : application au Grand Lyon - Rapport BRGM/ RP-51281-Fr.

11. Abréviations

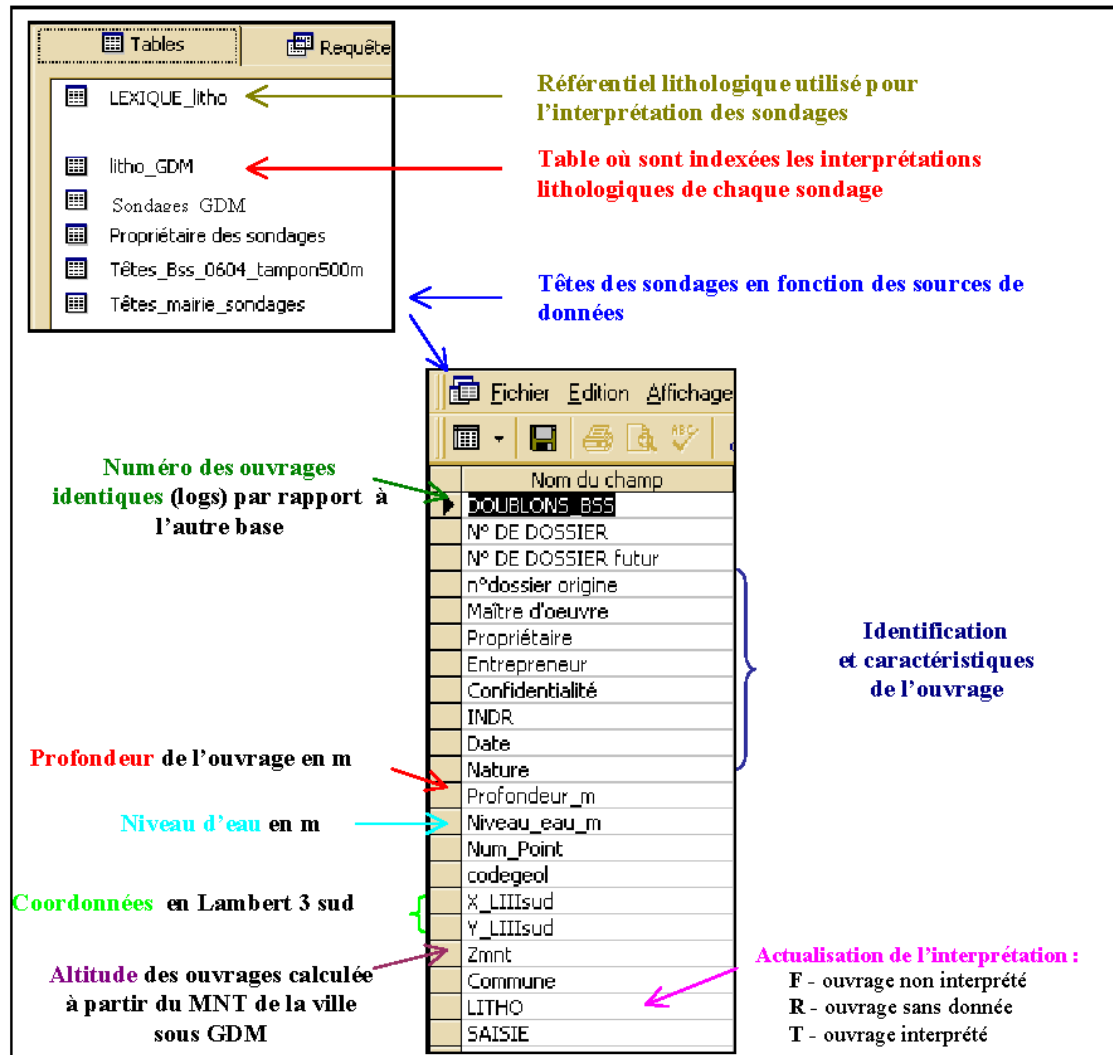
ARCHI	Service de l'Architecture de la Ville de Toulouse
BISMUTH	Banque d'Information sur le sous-Sol en Milieu Urbain de Toulouse géologique et Hydrogéologique
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BSS	Banque de données du Soul-Sol
GDM	Geological Data Management
IGN	Institut Géographique National
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MPY	Midi-Pyrénées
SETN	Service Etudes et Travaux Neufs de la Ville de Toulouse
SGR	Service Géologique Régional du BRGM

Annexe 1

Description de la base de sondages ACCESS

Description générale de la base de sondages :

La base de sondages contient différentes tables :



Les tables principales permettent de décrire pour chaque sondage :

- Têtes_ : les caractéristiques,
- Litho_ ... : la lithologie,
- Propriétaire des sondages : l'appartenance.

Le suffixe _"..." indique la source d'origine des sondages :

- _BSS : issu de la BSS,
- _GDM : servant à la modélisation,
- _mairie : issu de la mairie.

Ces tables possèdent les champs suivants :

LEXIQUE_litho :

La table Lexique_litho reprend le lexique de la lithologie utilisé par le référentiel géologique élaboré sur la commune de Toulouse (cf. ill. 9) et est structurée comme suit :

	Type	Taille	Description du champ
CODE	Texte	4	Code issu du référentiel lithologique de Toulouse
CORRESPONDANCES	Texte	255	signification des abréviations utilisées dans le code
LABEL	Texte	255	symboles utilisés sur les cartes géologiques au 1/50000
Côte de base (m) carte 983	Texte	255	côte minimale de la formation sur la carte 983
Côte de base (m) carte 984	Texte	255	côte minimale de la formation sur la carte 984

litho_GDM :

Cette table contient les descriptions des sondages utilisés pour le modèle GDM, niveau par niveau, ainsi que leurs interprétations.

	Type	Taille	Description du champ
INDR	Texte	255	Index pour l'étude numéroté : en « A+5chiffres » ou « B+5chiffres » pour la BSS ou en Num_Point (Numéro d'origine du sondage attribué par l'entreprise : 074-0119 soit « 3 chiffres-4 chiffres »)
X_LIIIsud	Numérique	Réel double	Coordonnée X en projection Lambert III sud en m
X_LIIIsud	Numérique	Réel double	Coordonnée Y en projection Lambert III sud en m
Zmnt	Numérique	Réel double	Altitude calculée grâce au MNT en m
PROF_MUR	Numérique	Réel double	Profondeur en mètre à laquelle se trouve le mur de la couche saisie
CODE	Texte	255	Code déterminé d'après le LEXIQUE_Litho
COMMENT	Texte	255	Commentaires possibles
GEOL	Texte	50	Lithologie détaillée du sondage

Sondages_GDM :

Cette table contient les caractéristiques des sondages utilisés pour la modélisation.

	Type	Taille	Description du champ
INDR	Texte	255	Index pour l'étude numéroté : en « A+5chiffres » ou « B+5chiffres » pour la BSS ou en Num_Point (Numéro d'origine du sondage attribué par l'entreprise : 074-0119 soit « 3 chiffres-4 chiffres »)
X_LIIIsud	Numérique	Réel double	Coordonnée X en projection Lambert III sud en m
X_LIIIsud	Numérique	Réel double	Coordonnée Y en projection Lambert III sud en m
Zmnt	Numérique	Réel double	Altitude calculée grâce au MNT en m
GEOL	Texte	255	Lithologie détaillée du sondage

Propriétaire des sondages :

Cette table identifie si le propriétaire des sondages est bien la ville de Toulouse.

	Type	Taille	Description du champ
INDR	Texte	255	Index pour l'étude numéroté : en « M+5chiffres » pour la ville de Toulouse ou sans objet
Num_Point	Texte	255	Numéro d'origine du sondage attribué par l'entreprise comme par exemple 074-0119 soit « 3 chiffres-4 chiffres »
Numéro de dossier Sores	Texte	255	Numéro de dossier du sondage attribué par l'entreprise ou « Pas de numéro »
Sondages appartenant à la ville de Toulouse	Texte	255	- « Oui » - « Non » - « 1 » (inconnu)

Têtes_mairie_sondages :

Cette table contient les caractéristiques des sondages de la Ville de Toulouse.

	Type	Taille	Description du champ
DOUBLONS_BSS	Texte	255	Sans objet si pas en doublon en BSS
N° DE DOSSIER FUTUR	Texte	50	N° réservé pour la BSS
n° dossier origine	Texte	50	Numéro d'origine du dossier attribué par l'entreprise (1 dossier peut contenir plusieurs sondages)
Maître d'œuvre	Texte	25	Maître d'œuvre du sondage
Propriétaire	Texte	50	Propriétaire du sondage

	Type	Taille	Description du champ
Entrepreneur	Texte	50	Exécuteur technique
Confidentialité	Texte	15	Pour savoir si le dossier est public ou non
INDR	Texte	6	Index pour l'étude
Date	Numérique	Entier long	Date de réalisation du sondage (aaaammjj)
Nature	Texte	60	Technique employée pour effectuer le sondage
Profondeur_m	Numérique	Réel double	Profondeur du sondage
Niveau_eau_m	Numérique	Réel double	Niveau d'eau mesuré dans le puit
Num_Point	Texte	11	Numéro d'origine du sondage attribué par l'entreprise
Codegeol	Texte	255	Géologie repéré d'après le symbole utilisé sur les cartes géologiques au 1/50000
X_LIIIsud	Numérique	Réel double	Coordonnée X en projection Lambert III sud en m
Y_LIIIsud	Numérique	Réel double	Coordonnée Y en projection Lambert III sud en m
Zmnt	Numérique	Réel double	Altitude calculée grâce au MNT en m
Commune	Texte	10	Nom de la commune
LITHO	Texte	2	Renseigne l'état de l'interprétation T : l'interprétation est saisie. F : non saisie. R : le dossier est illisible et ne peut être interprété D : en doublon en BSS
SAISIE	Texte	255	Renseigne l'année et/ou l'auteur de l'interprétation 2003 : D. Martinez et C. Coutin 2004 : G. Delpont 2004L : L. Toméra 2004G : G. Paris

Têtes_Bss_0604_tampon500m :

Cette table contient les caractéristiques des sondages de la BSS.

	Type	Taille	Description du champ
INDR	Texte	255	Index pour l'étude numéroté : en « A+5chiffres » ou « B+5chiffres » pour la BSS
DOUBLON_MAIRIE	Texte	50	Sans objet si pas en doublon en BSS
NUM_NATIONAL	Texte	255	N° national en BSS de type 09845A1208/S avec la désignation /S pour sondage
INDICE	Texte	255	N° national en BSS de type 09845A1208
REGION	Texte	255	Région géographique
NUM_DEPARTEMENT	Numérique	Réel double	N° de département
DEPARTEMENT	Texte	255	Nom du département

	Type	Taille	Description du champ
NUM_COMMUNE	Numérique	Réel double	N° INSEE de la commune
COMMUNE	Texte	255	Nom de la commune
LIEU_DIT	Texte	255	Nom du lieu_dit
Nature	Texte	255	Type d'ouvrage
PROF_ATTEINTE	Numérique	Réel double	Profondeur du sondage
PROF_EAU_SOL	Numérique	Réel double	Niveau d'eau mesuré par rapport au sol
DIAMETRE_TUBAGE	Numérique	Réel double	Diamètre du tubage
FIN_TRAVAUX	Numérique	Réel double	Date de fin travaux
ETAT_OUVRAGE	Texte	255	Etat de l'ouvrage
UTILISATION	Texte	255	Utilisation de l'ouvrage
DOCUMENTS	Texte	255	Documents disponibles sur l'ouvrage
REFERENCE	Texte	255	Références disponibles sur l'ouvrage
NB_IMAGES	Numérique	Réel double	Nombre de scans disponibles sur internet
COUPE_GEOLOGIQUE	Texte	255	Coupe géologique numérisée présente ou absente
DATE_DOSSIER	Numérique	Réel double	Date de réalisation du dossier BSS
X_OUVRAGE_L2E	Numérique	Réel double	Coordonnée X en projection Lambert II étendu en m
Y_OUVRAGE_L2E	Numérique	Réel double	Coordonnée Y en projection Lambert II étendu en m
X_LIIIsud	Numérique	Réel double	Coordonnée X en projection Lambert III sud en m
Y_LIIIsud	Numérique	Réel double	Coordonnée Y en projection Lambert III sud en m
Codegeol	Texte	50	Symboles utilisés sur les cartes géologiques au 1/50 000
PIEZOMETRE	Texte	255	Piézomètre présent ou absent ou sans objet
ZSOL	Numérique	Réel double	Altitude mesurée en m
Zmnt	Numérique	Réel double	Altitude calculée grâce au MNT en m
LITHO	Texte	2	Renseigne l'état de l'interprétation T : l'interprétation est saisie. F : non saisie. R : le dossier est illisible et ne peut être interprété D : en doublon en BSS
SAISIE	Texte	255	Renseigne l'année et/ou l'auteur de l'interprétation 2003 : D. Martinez et C. Coutin 2004 : G. Delpont 2004L : L. Toméra 2004G : G. Paris

Annexe 2

Mode d'emploi de la base GDM pour le traitement des données de forages et leur modélisation

**Le mode d'emploi présenté ici constitue un condensé des principales
opérations nécessaires pour l'exploitation de la base de données
BISMUTH.**

**Pour une utilisation plus approfondie du logiciel GDM, nous renvoyons le
lecteur au guide utilisateur fourni avec le logiciel.**

Ouvrir le projet GDM

Depuis l'explorateur Windows, par double-click sur le nom de fichier « BISMUTH_2004.GDM »

ou

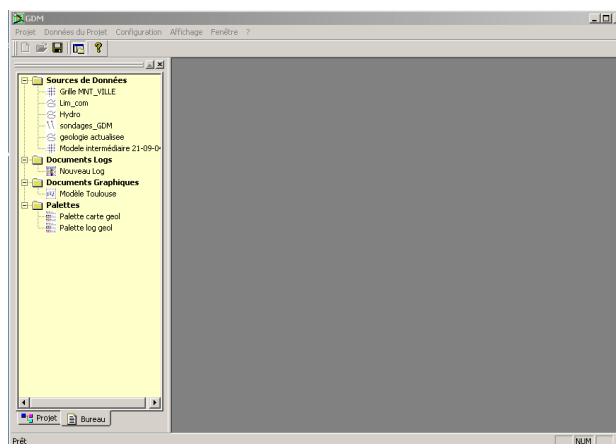
A partir de GDM, sélectionner dans le menu déroulant projet/ouvrir projet et sélectionner le fichier « BISMUTH_2004.GDM »

L'écran est divisé en deux zones :

- à gauche l'Arbre du Projet (fond bleu) ou celui du Bureau (fond jaune). On passe de l'un à l'autre en cliquant en bas sur l'onglet correspondant.
- à droite la Zone de Visualisation où vont s'afficher les fenêtres d'édition des données, et les fenêtres de visualisation des Documents Logs ou Graphiques.

Le bouton  permet de cacher / faire réapparaître la zone de gauche.

Attention : le bouton  enregistre automatiquement TOUS les éléments en cours de modification (sauf le Document Graphique et la Source de données en cours de digitalisation).

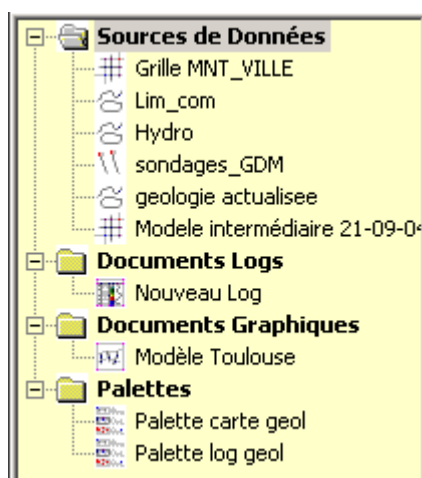


L'Arbre du Projet (fond bleu) affiche la liste (illimitée) de l'ensemble des éléments du Projet, classés en 5 catégories : Sources de données, Documents Logs, Documents Graphiques, Palettes, et Paramètres.

L'Arbre du Bureau (fond jaune) affiche la liste des Sources de données, des Documents et des Palettes *sur lesquels on est en train de travailler* (ceux qui sont « chargés ». Dans GDM, on dit « ajoutés au Bureau »).

Dans chaque catégorie les éléments sont rangés dans l'ordre de leur ajout sur le Bureau. Comme on peut « Ranger » des éléments du Bureau dans le Projet, et les « Ajouter » plus tard au Bureau, on ne voit donc pas toujours les éléments dans le même ordre.

Notion de « Source de données courante » et de « Palette courante » : c'est la Source de données ou la Palette « surlignée » en gris ou bleu dans l'Arbre du Bureau, ou si aucune Source de données ou Palette n'apparaît « surlignée », la dernière Source de données ou Palette sur laquelle on a cliqué dans cet Arbre. Cet élément « courant » est proposé par défaut, lorsque cela est possible, dans les boîtes de dialogue Nouveau Document Graphique, Ajouter couche, Nouveau log, Nouvelle colonne Log, Calage de Fond de Plan, etc.



Il existe quatre rubriques dans le bureau :

- Sources de données qui liste les données de base (base de données sondages, Modèle géologique calculé, courbes géoréférencées permettant de localiser visuellement les sondages et le modèle)
- Documents Logs : visualisation des logs de sondages
- Documents Graphiques : visualisation du modèle en cartes ou en coupes
- Palettes : tableau permettant d'associer une trame ou une couleur à un code, soit dans un log, soit sur la carte géologique.

Les sources de données disponible dans le projet BISMUTH sont de 3 natures :



Grille



Courbes



Sondages

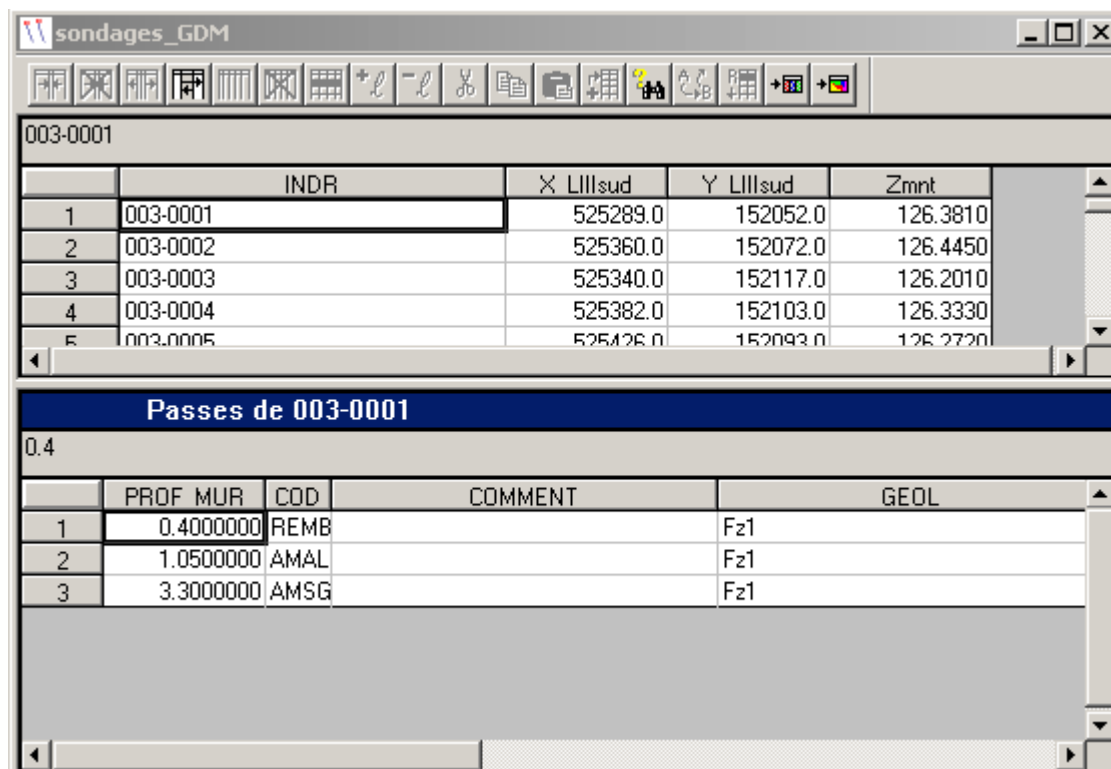
Un double-click sur :

- chacune des sources de données permet d'afficher les tableaux des valeurs alphanumériques associées. On parle alors de mode liste ;
- « Nouveau Log » permet d'afficher un log de sondage ;
- « Modèle Toulouse » permet d'afficher soit la carte soit des coupes tracées à partir du modèle.

SONDAGES AFFICHÉS EN MODE LISTE

L'affichage en mode liste des sondages se présente au travers de deux tableaux :

- le tableau supérieur comprend la liste des différents sondages enregistrés dans la base ;
- le tableau inférieur présente la description des différentes passes du sondage sélectionné par click dans le tableau supérieur.



003-0001				
	INDR	X Lillsud	Y Lillsud	Zmnt
1	003-0001	525289.0	152052.0	126.3810
2	003-0002	525360.0	152072.0	126.4450
3	003-0003	525340.0	152117.0	126.2010
4	003-0004	525382.0	152103.0	126.3330
5	003-0005	525426.0	152093.0	126.2720

Passes de 003-0001				
0.4				
	PROF MUR	COD	COMMENT	GEOL
1	0.4000000	REMB		Fz1
2	1.0500000	AMAL		Fz1
3	3.3000000	AMSG		Fz1

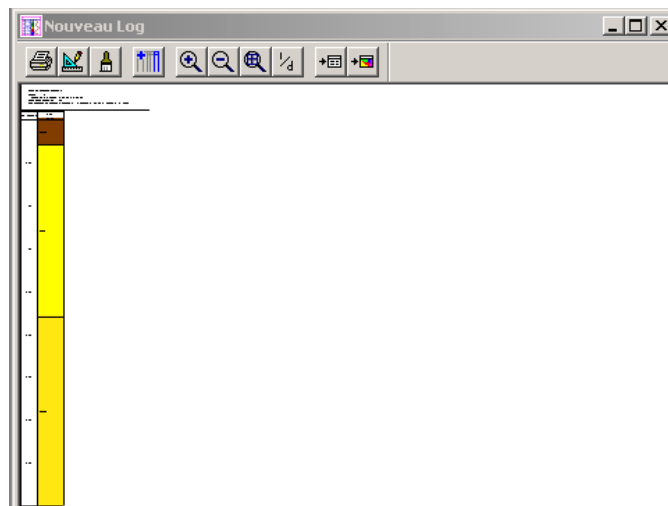
La seule action de cliquer sur un des boutons suivants   déclenche la recherche de la donnée sélectionnée à cet instant dans le Mode Liste.

 **Vers Logs** : Ce bouton n'est disponible que pour les Sources de sondages. Le document « nouveau Log » doit être en cours de visualisation dans la Zone de Visualisation. Dans le cas contraire, GDM affiche un message d'avertissement. GDM calcule et affiche le log du sondage correspondant, sans modification du facteur de zoom en cours, et trace un trait rouge horizontal à la profondeur (fin de passe) de la donnée. Quand le facteur de zoom ne permet pas d'afficher le log en entier, le trait rouge est centré automatiquement dans la hauteur de la fenêtre.

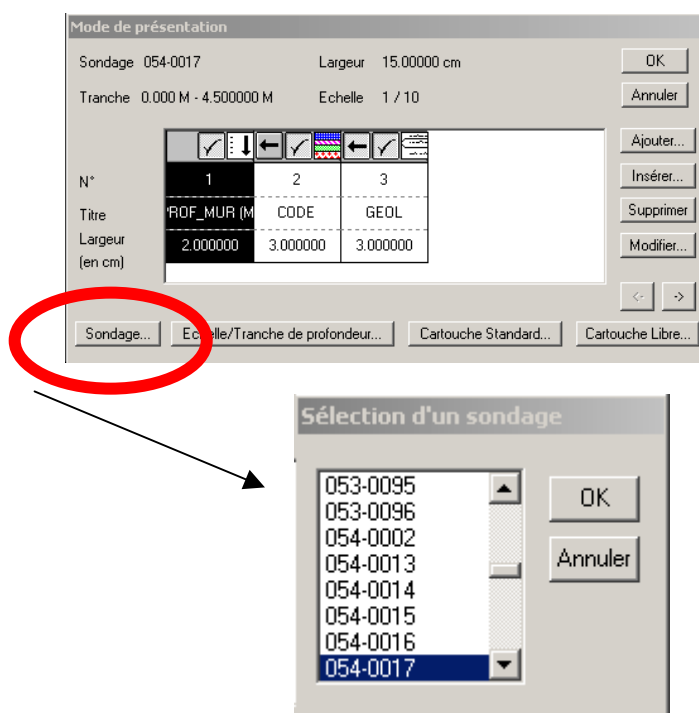
 **Vers Graphiques** : le Document Graphique « Modèle Toulouse » doit être en cours de visualisation dans la Zone de Visualisation. Dans le cas contraire, GDM affiche un message d'avertissement. Si la donnée est dans les limites X,Y,Z du Document, GDM affiche une croix rouge à l'emplacement du sondage, sans

modification du facteur de zoom en cours. Quand le facteur de zoom ne permet pas d'afficher le Document en entier, la croix rouge est centrée automatiquement dans la fenêtre. Pour chaque Document dont les limites X,Y,Z ne permettent pas de montrer la donnée, un message d'avertissement est produit.

DOCUMENT LOG « NOUVEAU LOG »



Le bouton « Modifier log » (), permet de modifier (éventuellement) le mode de représentation graphique et de sélectionner le sondage affiché.

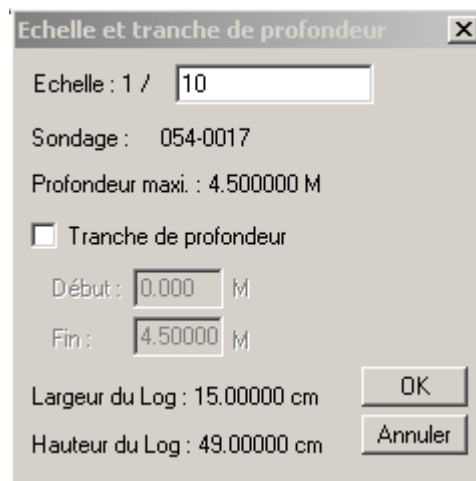


Pour visualiser la modification apportée au Document Graphique, vous devez cliquer sur le bouton « Rafraîchir le dessin » () :

Le nom du Document Graphique apparaît en rouge dans l'arbre du Bureau car le document a été modifié.

Différents boutons, (  ) permettent de modifier les caractéristiques d'affichage du document à l'écran. Pour voir les détails du dessin, utilisez le « zoom avant »  :

Il est possible de modifier l'échelle d'affichage du document « nouveau log » à partir du bouton « Définir échelle » () de la fenêtre d'affichage du log.

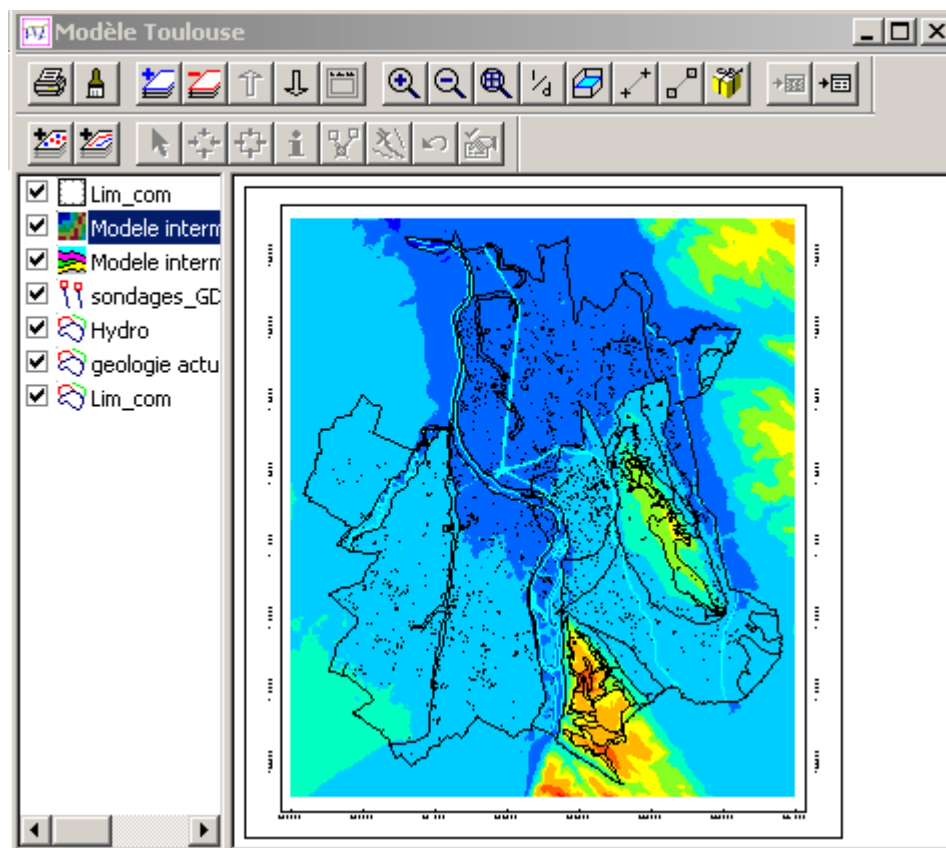


 Vers Tableau : En fonction de la colonne dans laquelle on a cliqué, GDM ouvre en Mode Liste la base de données sondages_gdm (si elle n'est pas déjà en Mode Liste) et sélectionne, dans chacun des deux tableaux, la ligne correspondant à la donnée.

 Vers Graphiques : le Document Graphique « Modèle Toulouse » doit être en cours de visualisation dans la Zone de Visualisation. Dans le cas contraire, GDM affiche un message d'avertissement. Si la donnée est dans les limites X,Y,Z du Document, GDM affiche une croix rouge à l'emplacement du sondage, sans modification du facteur de zoom en cours. Quand le facteur de zoom ne permet pas d'afficher le Document en entier, la croix rouge est centrée automatiquement dans la fenêtre. Pour chaque Document dont les limites X,Y,Z ne permettent pas de montrer la donnée, un message d'avertissement est produit.

DOCUMENT GRAPHIQUE « Modèle Toulouse »

Le document graphique présente sur le côté gauche la liste des données représentées sous forme de carte ou de coupe dans la partie droite.



Différents boutons, (  ) permettent de modifier les caractéristiques d'affichage du document à l'écran. Pour voir les détails du dessin, utilisez le « zoom avant »  :

Le modèle intermédiaire « Donnée « Modèle intermédiaire 21-09-04 » est représenté sous deux formes dans la liste des couches :

- Une couche « Grille » (). Pour une représentation en carte 2D,. Le mode de présentation par défaut est une grille de blocs colorés « arc en ciel » du bleu (valeur minimum de la grille) au rouge (valeur maximum). Ce Mode de présentation offre l'avantage de fournir instantanément un aperçu du résultat de l'interpolation, et permet de repérer d'éventuelles anomalies dans le calcul de grille qui vient d'être fait, comme par exemple la présence de blocs non colorés indiquant un voisinage trop restreint.
- Une couche Profil grille () pour l'affichage en coupe des différentes surfaces modélisées du modèle multicouche.

- A noter qu'une couche « Isovaleurs » (). Pourrait être également représentée en carte. Nous renvoyons le lecteur à la notice complète de GDM pour son utilisation.

La couche courante est celle qui est surlignée en bleu dans la liste des couches. C'est sur cette couche que vont s'effectuer les interrogations.

L'ordre des couches correspond à l'ordre de superposition dans l'affichage. La couche située en haut sera dessinée en premier puis, au fur et à mesure, les couches suivantes seront dessinées dans l'ordre.

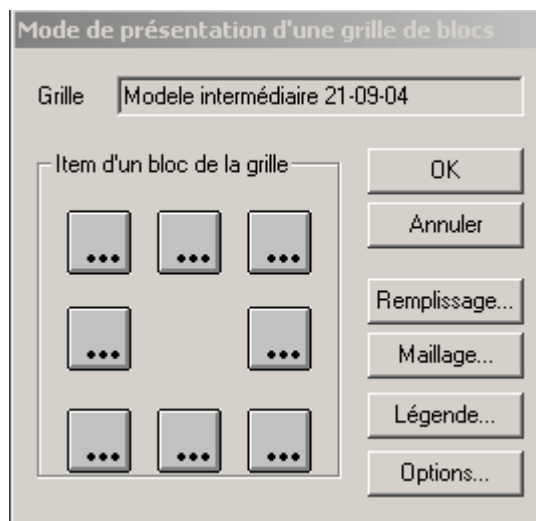
La couche Cadre () qui est toujours la première couche d'un Document Graphique, avec un mode de représentation par défaut.

Pour modifier l'ordre de ces couches, cliquez sur le bouton « Reculer la couche courante » (), puis sur le bouton « Rafraîchir le dessin » ().

A l'inverse, le bouton « Avancer la couche courante » () déplace les couches vers le premier plan du Document Graphique.

Modification de la surface affichée sur la carte.

Un double-click sur la couche grille () permet d'afficher la fenêtre suivante



Le bouton « remplissage » permet alors de sélectionner, d'une part la surface qui sera représentée sur la carte, d'autre part de modifier éventuellement les limites de représentations ainsi que les intervalles pour les différentes couleurs.

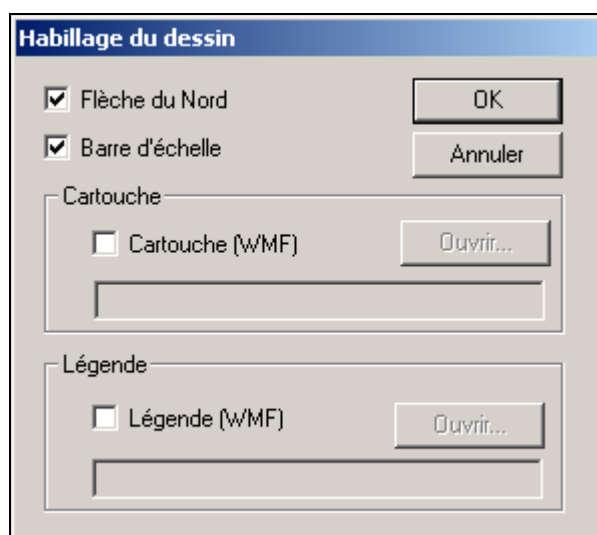
De la même manière, un double-click sur la couches sondages permettra de modifier les caractéristiques d'affichage des sondages.

Pour rechercher des informations, le bouton () Vers Tableau permet d'afficher en mode liste les valeurs au point de click de la couche courante (sondages, grille ou courbes). En particulier, GDM ouvre en Mode Liste la base de données sondages_gdm (si elle n'est pas déjà en Mode Liste) et sélectionne, dans chacun des deux tableaux, la ligne correspondant à la donnée.

Si la couche sondages est active, il est possible de visualiser les logs.

 Vers Logs : Ce bouton n'est disponible que pour les Sources de sondages. Le document « nouveau Log » doit être en cours de visualisation dans la Zone de Visualisation. Dans le cas contraire, GDM affiche un message d'avertissement. GDM calcule et affiche le log du sondage correspondant, sans modification du facteur de zoom en cours, et trace un trait rouge horizontal à la profondeur (fin de passe) de la donnée. Quand le facteur de zoom ne permet pas d'afficher le log en entier, le trait rouge est centré automatiquement dans la hauteur de la fenêtre.

Pour compléter ce Document Graphique, utilisez le bouton « Habillage » () et cochez les options « Flèche du Nord » et « Barre d'échelle ».



Pour visualiser la modification apportée au Document Graphique, vous devez cliquer sur le bouton « Rafraîchir le dessin » () :

Définir vue

La fonction Définir vue (menu contextuel sur le nom « Plan de localisation (géog.) » dans l'arbre du Bureau, ou bouton  de la barre d'outil du Document Graphique) permet de modifier les limites (coordonnées extrêmes du Document) et le type de projection (point de vue sur les données) :

Définir Vue

Type de projection :

☒ Plan Horizontal

Section Verticale :

☐ Ouest-Est (vue du Sud)

☐ Est-Ouest (vue du Nord)

☐ Sud-Nord (vue de l'Est)

☐ Nord-Sud (vue de l'Ouest)

☐ Selon une direction X-Y quelconque

Nouveau volume

Intervalle en X : (défaut = couche Cadre)

X0 519718.9 XM 534327.2

Intervalle en Y : (défaut = couche Cadre)

Y0 136593.2 YM 153428.2

Intervalle en Z : (défaut = couche Cadre)

Z0 50.0000000 ZM 200.0000000

Enveloppe des données

XMIN: 520000.0 XMAX: 534000.0

YMIN: 137000.0 YMAX: 153000.0

ZMIN: -0.4999847 ZMAX: 268.740448

Paramètres de la section

Point Début : X1 Y1

Point Fin : X2 Y2

Extensions: G. D.

Epaisseur :

Intervalle Z : Min. Max.

Ligne brisée

OK Annuler

Le cadre « **Enveloppe des données** » affiche le minimum et le maximum des coordonnées *de l'ensemble* des Sources de données utilisées par le Document Graphique.

Le cadre « **Nouveau volume** » affiche le minimum et le maximum des coordonnées du Document Graphique. Ces coordonnées sont calculées par GDM de façon à englober l'ensemble des données de la Source de données utilisée pour créer le Document. Cette Source de données est utilisée pour créer la « couche Cadre » du Document (), première couche inamovible de tout Document Graphique.

Nouveau volume

Intervalle en X : (défaut = couche Cadre)

X0 519718.9 XM 534327.2

Intervalle en Y : (défaut = couche Cadre)

Y0 136593.2 YM 153428.2

Intervalle en Z : (défaut = couche Cadre)

Z0 50.0000000 ZM 200.0000000

Si vous effacez X0 et XM, et/ou Y0 et YM, et/ou Z0 et ZM, GDM recalculera ces coordonnées à partir des coordonnées minimum et maximum de la Source de données de la couche Cadre.

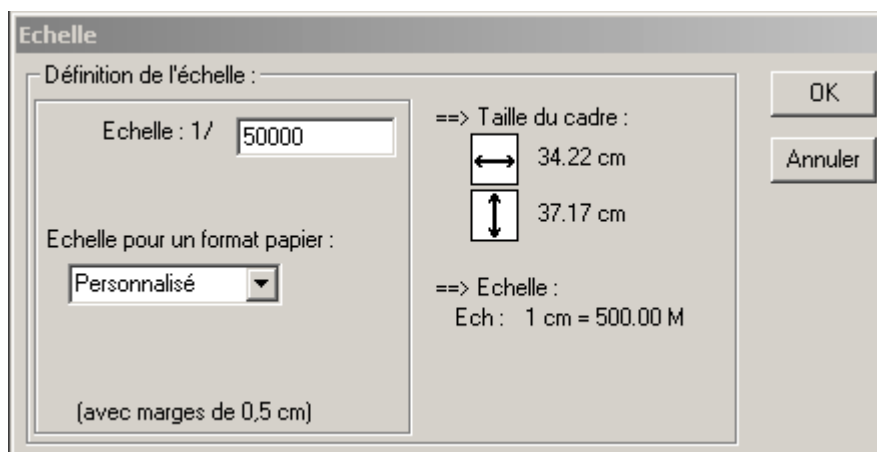
Si vous modifiez ces coordonnées, GDM modifiera les limites du Document Graphique. Ceci est vrai en particulier pour modifier les limites hautes et basses des coupes (modification de Z0 et ZM).

Le cadre « **Type de projection** » indique que le Document Graphique représente actuellement une « Projection Horizontale » des sondages (comme les sondages sont verticaux, on pourrait croire qu'il ne s'agit que d'un plan de position des têtes de sondages).

Echelle du Document Graphique

Par défaut, l'échelle du Document Graphique est calculée par GDM de façon à faire tenir le dessin dans une page « A4 Portrait ».

Ainsi, si vous cliquez sur « Définir échelle » () :



Vous constatez que l'échelle horizontale est égale à 1/50 000°. Cette échelle est modifiable. GDM vous indique la taille du document papier correspondant à la vue cartographiée. Il vous est donc possible de jouer sur les deux paramètres

- modification de la zone d'affichage ()
- modification de l'échelle de représentation () .

Cliquez sur OK, puis sur  pour visualiser la nouvelle vue avec la nouvelle échelle.

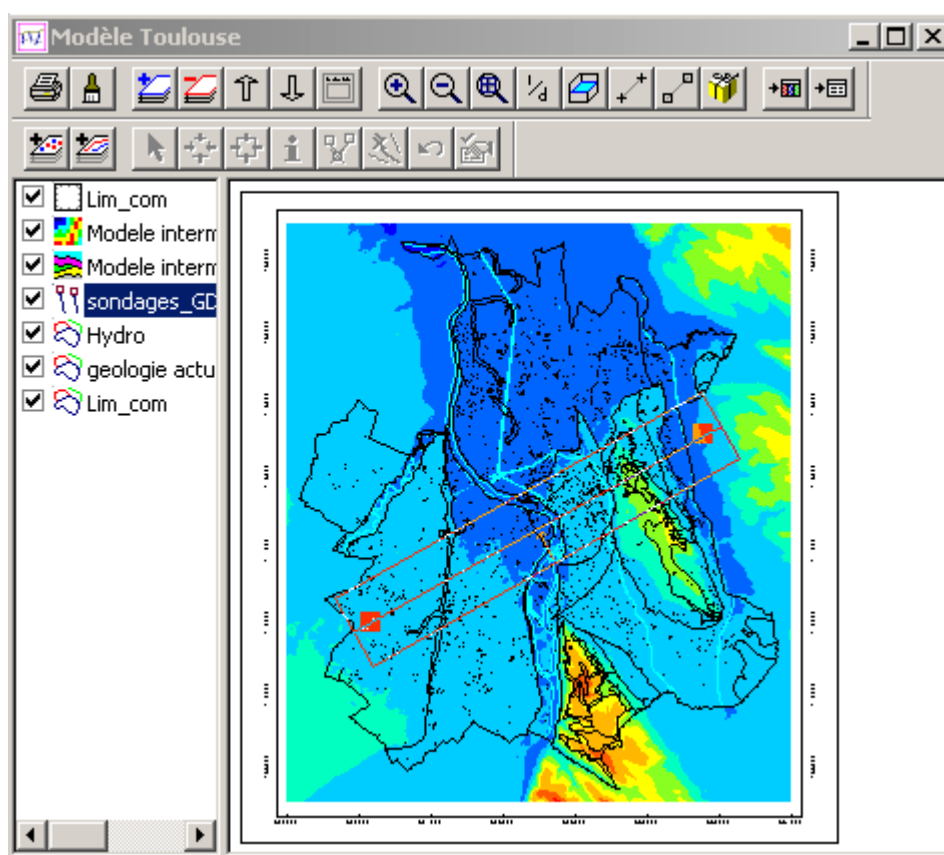
Tracé de coupes

Une section quelconque est définie à la souris en utilisant une des deux fonctions « Définir coupe » () ou « Définir coupe calée » () à partir d'une vue en projection horizontale.

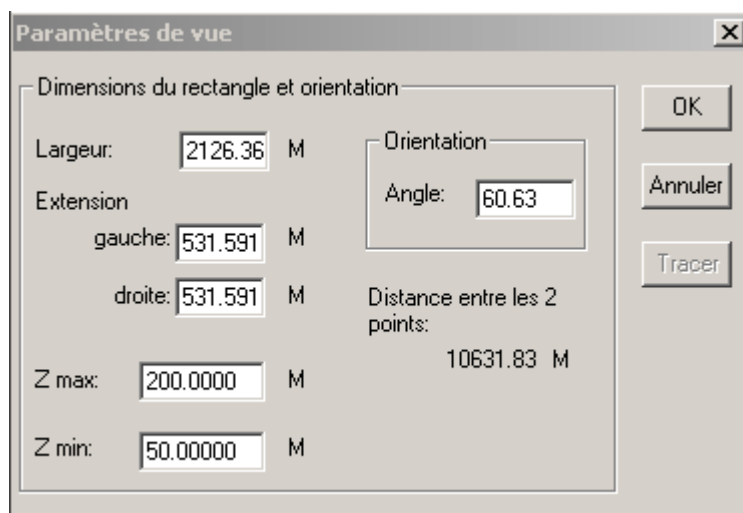
Avec « **Définir coupe** » (), vous définirez une section en cliquant successivement deux points quelconques sur le Document Graphique en projection horizontale.

La fonction n'est pas disponible (bouton grisé), si le Document Graphique a été modifié mais pas redessiné. Cliquez alors sur .

En utilisant cet outil, il est alors possible de tirer une droite sur la carte. Cette droite est représentée comme l'axe d'un rectangle. Ce rectangle correspond à l'emprise dans laquelle seront pris en compte les sondages à représenter sur la coupe. Il est important de noter que une extension latérale trop importante du rectangle conduira à intégrer d'une part un nombre trop important de sondages, d'autre part, des sondages éloignés de la section et apportant, de ce fait, une information peu pertinente.



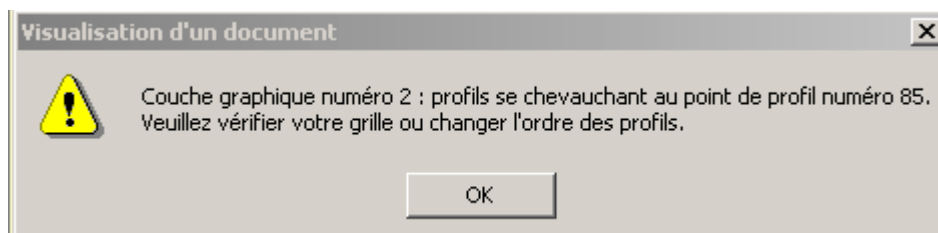
Cette matérialisation du tracé de la coupe est associée à une fenêtre de paramétrisation.



Dans cette fenêtre, il est possible de redéfinir les cotes hautes et basses de la coupe, l'extension latérale du rectangle (largeur), l'extension de part et d'autre de la ligne digitalisée (Extension droite et gauche).

Le Document Graphique a été modifié mais pas redessiné. Cliquez alors sur .

Il est possible à ce stade qu'un message d'avertissement indique un point de conflit topologique dans la coupe. Rappelons, qu'il ne s'agit à ce stade du projet que d'un modèle intermédiaire qui demandera à être finalisé ultérieurement.



Après avoir cliqué sur le bouton OK, la coupe s'affiche alors.

La fonction Définir vue bouton  de la barre d'outil du Document Graphique permet de modifier les limites (coordonnées extrêmes du Document) et le type de projection (point de vue sur les données).

Définir Vue

Type de projection :

☐ Plan Horizontal

Section Verticale :

☐ Ouest-Est (vue du Sud)

☐ Est-Ouest (vue du Nord)

☐ Sud-Nord (vue de l'Est)

☐ Nord-Sud (vue de l'Ouest)

☒ Selon une direction X-Y quelconque

Nouveau volume :

Intervalle en X : (défaut = couche Cadre)

X0 XM

Intervalle en Y : (défaut = couche Cadre)

Y0 YM

Intervalle en Z : (défaut = couche Cadre)

Z0 ZM

Enveloppe des données :

XMIN: 520000.0 XMAX: 534000.0

YMIN: 137000.0 YMAX: 153000.0

ZMIN: -0.4999847 ZMAX: 268.740448

Paramètres de la section :

Point Début : X1 521763.9 Y1 140298.2

Point Fin: X2 523108.9 Y2 140773.1

Extensions: G. 71.32058 D. 71.32058

Epaisseur : 100.0000

Intervalle Z : Min. 50.000000 Max. 200.000000

Ligne brisée :

OK Annuler

Il permet, entre autres de redéfinir les limites hautes et basses de la coupe.

En fonction de la coupe recherchée, il peut être nécessaire de « Définir échelle » () :

Echelle

Définition de l'échelle :

Horizontale : 1/ 50000

Verticale : 1/ 5000

Echelle pour un format papier :

Personnalisé

(avec marges de 0,5 cm)

==> Taille du cadre :

 28.39 cm

 6.50 cm

==> Echelle :

Horz : 1 cm = 500.00 M

Vert : 1 cm = 50.00 M

OK Annuler

Il est clair que la portion pertinente des coupes intéresse uniquement les quelques premiers mètres de la géologie toulousaine. Il sera donc souvent nécessaire, d'un part de limiter l'extension longitudinale des coupes, d'autre part de jouer sur des échelles différentes, avec extension verticale.

Pour revenir à la projection horizontale de l'ensemble des sondages sur « Modèle Toulouse » :

- cliquez sur ,
- choisissez  Plan Horizontal ,
- cliquez sur OK
- rafraîchissez le dessin ().

Avec « **Définir coupe calée** » (), vous définirez une section en cliquant successivement à proximité de deux points de données sur le Document Graphique en projection horizontale, après avoir sélectionné la couche graphique utilisant les données sur lesquelles vous voulez « caler » la coupe.

La fonction n'est pas disponible (bouton grisé) dans les cas suivants :

- la couche sélectionnée est la couche Cadre () ou une couche Profil grille (). Sélectionnez une autre couche.
- le Document Graphique a été modifié mais pas redessiné. Cliquez alors sur .

sélectionnez la couches de sondages

- cliquez sur  . Le curseur de la souris prend la forme  (curseur de digitalisation),
- cliquez à proximité d'un sondage, puis sans lâcher le bouton de la souris, déplacez le curseur. Relâchez le bouton à proximité d'un autre sondage.

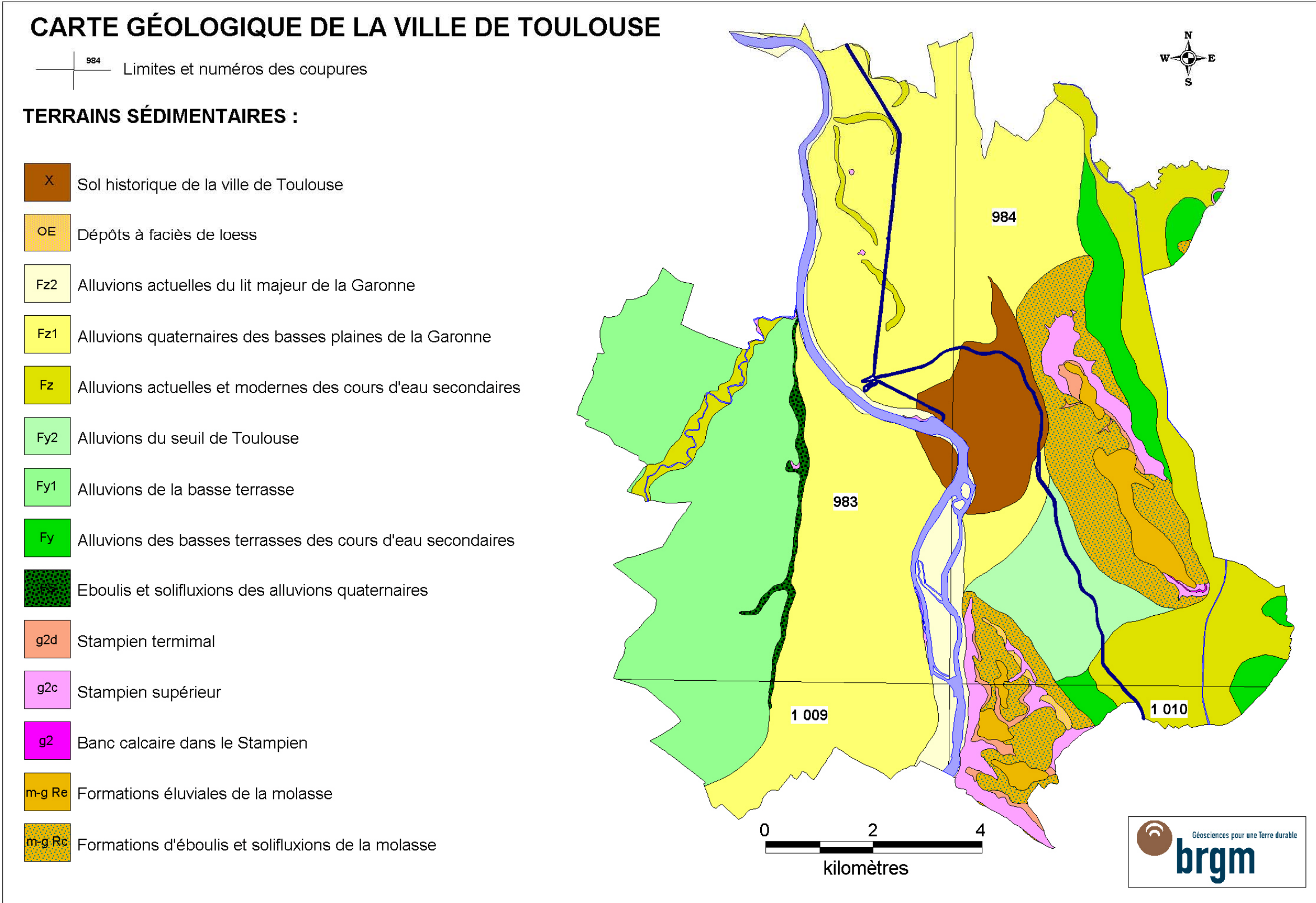
La trace de l'emprise de la section est alors dessinée sur le Document Graphique :

Le tracé de coupes sur lignes brisées implique la création, par digitalisation sous GDM, d'une base de données lignes et la création d'un nouveau document graphique au travers du menu déroulant « données du projet / nouveau document graphique ». Nous renvoyons le lecteur au guide de l'utilisateur GDM pour réaliser cette opération.

Annexe 3

Carte géologique de la ville de Toulouse

(extrait de la cartographie à l'échelle du 1/50 000^{ème})



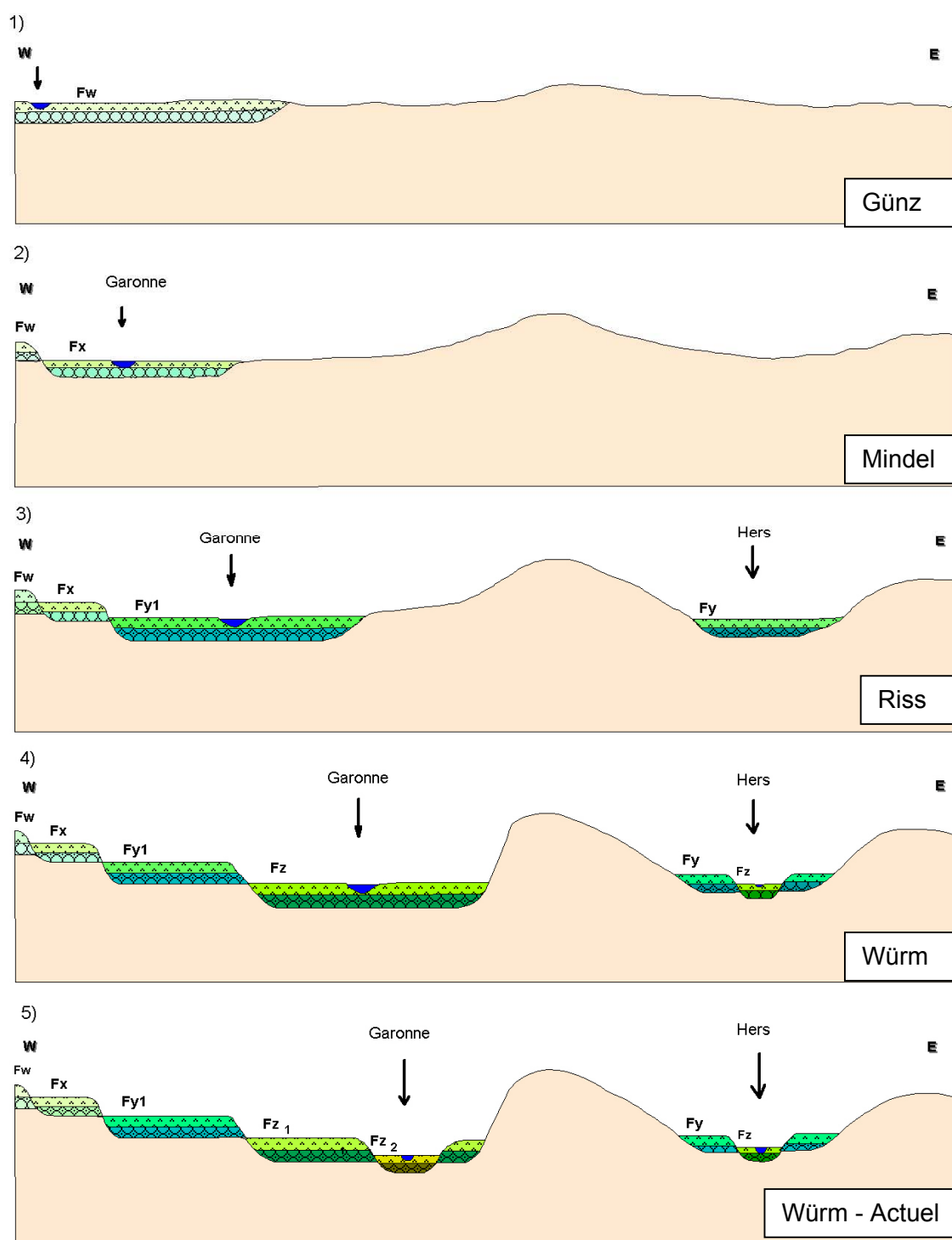
Annexe 4

Extrait de la liste des sondages de la ville de Toulouse

INDR	N° DE DOSSIER futur	X_Llilsud	Y_Llilsud	Propriétaire
M01640	09838D1985	526924	145362	Ville de Toulouse
M01639	09838D1984	526967	145374	Ville de Toulouse
M01637	09838B1470	526804	145708	Ville de Toulouse
M01627	09845A2230	527710	145708	Ville de Toulouse
M01626	09845A2229	527706	145720	Ville de Toulouse
M01625	09845A2228	527721	145730	Ville de Toulouse
M01624	09845A2227	527723	145716	Ville de Toulouse
M01623	09845A2226	527711	145706	Ville de Toulouse
M01585	09838D1965	527314	145346	Ville de Toulouse
M01584	09838D1964	527290	145358	Ville de Toulouse
M01583	09838D1963	527268	145363	Ville de Toulouse
M01582	09838D1962	527280	145312	Ville de Toulouse
M01566	09838B1441	526797	146676	Ville de Toulouse
M01565	09838B1440	526807	146716	Ville de Toulouse
M01506	09838B1420	526300	145867	Ville de Toulouse
M01505	09838B1419	526283	145844	Ville de Toulouse
M01504	09838B1418	525874	145889	Ville de Toulouse
M01503	09838B1417	525846	145876	Ville de Toulouse
M01502	09838B1416	525877	145909	Ville de Toulouse
M01501	09838B1415	525858	145895	Ville de Toulouse
M01500	09838B0816	525864	145883	Ville de Toulouse
M01499	09838B0815	525884	145908	Ville de Toulouse
M01498	09838B0814	525881	145896	Ville de Toulouse
M01497	09838B0813	525868	145901	Ville de Toulouse
M01496	09838B0812	525851	145891	Ville de Toulouse
M01466	09845A2190	529452	146042	Ville de Toulouse
M01465	09845A2189	529473	146008	Ville de Toulouse
M01464	09845A2188	529463	146030	Ville de Toulouse
M01463	09845A2187	529462	146028	Ville de Toulouse
M01363	09845A1558	528300	146075	Ville de Toulouse
M01350	09845A1552	529146	146878	Ville de Toulouse
M01343	09845A1551	528858	146267	Ville de Toulouse
M01342	09845A1550	528776	146442	Ville de Toulouse
M01340	09845A1548	528323	146247	Ville de Toulouse
M01125	09838B1337	525613	146227	Ville de Toulouse
M01124	09838B1336	525608	146213	Ville de Toulouse
M01104	09845A2027	530677	147660	Ville de Toulouse
M01103	09845A2026	530679	147059	Ville de Toulouse
M01091	09845A2016	529826	147774	Ville de Toulouse
M01088	09845A2013	529445	147977	Ville de Toulouse
M01083	09845A2008	529790	147985	Ville de Toulouse
M01082	09845A2007	529795	147975	Ville de Toulouse
M01081	09845A2006	529816	147995	Ville de Toulouse
M01080	09845A2005	529820	147988	Ville de Toulouse
M01076	09845A2001	529365	147487	Ville de Toulouse

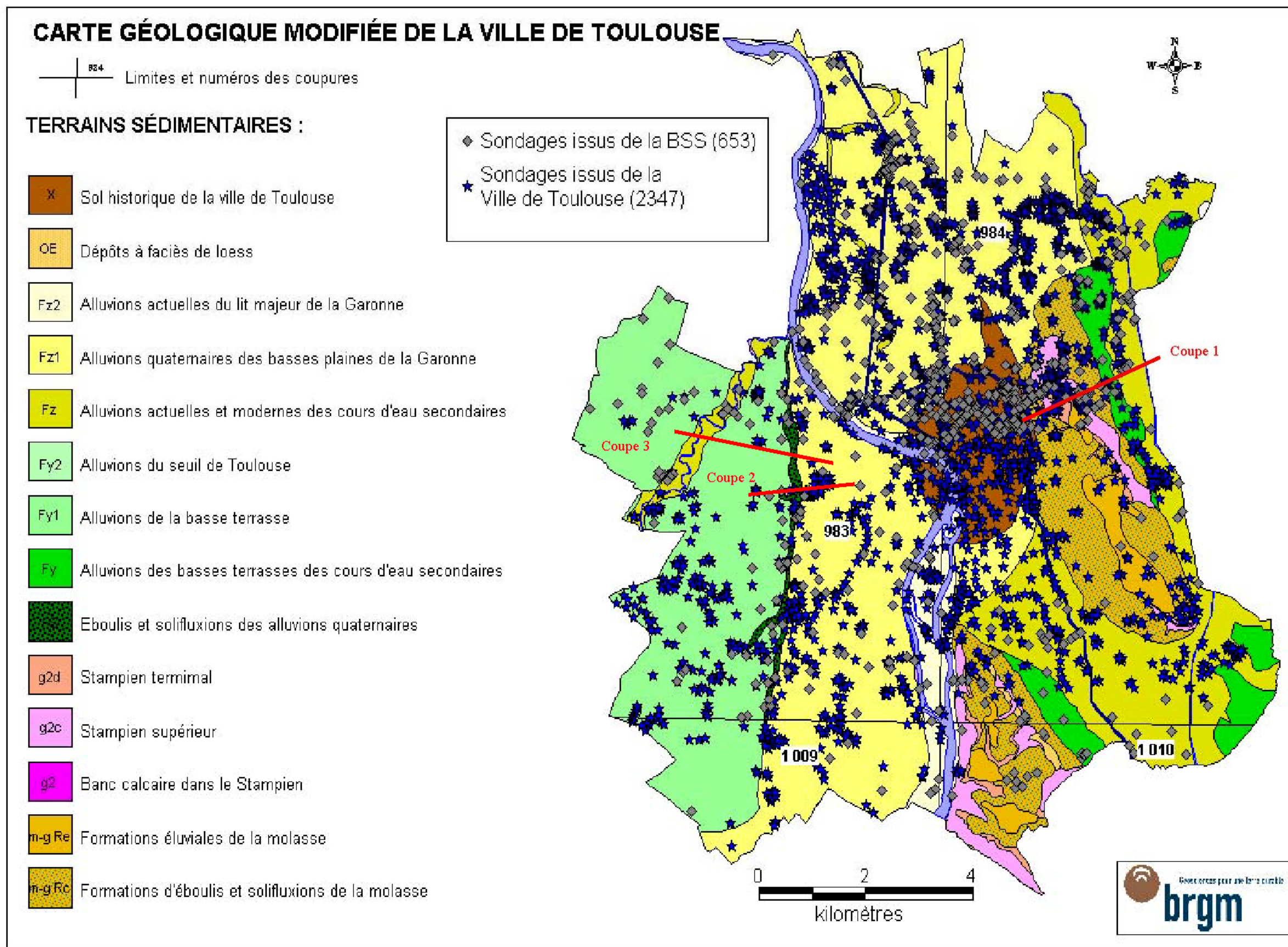
Annexe 5

Evolution morphologique des vallées de la Garonne et de l'Hers Formation des terrasses étagées



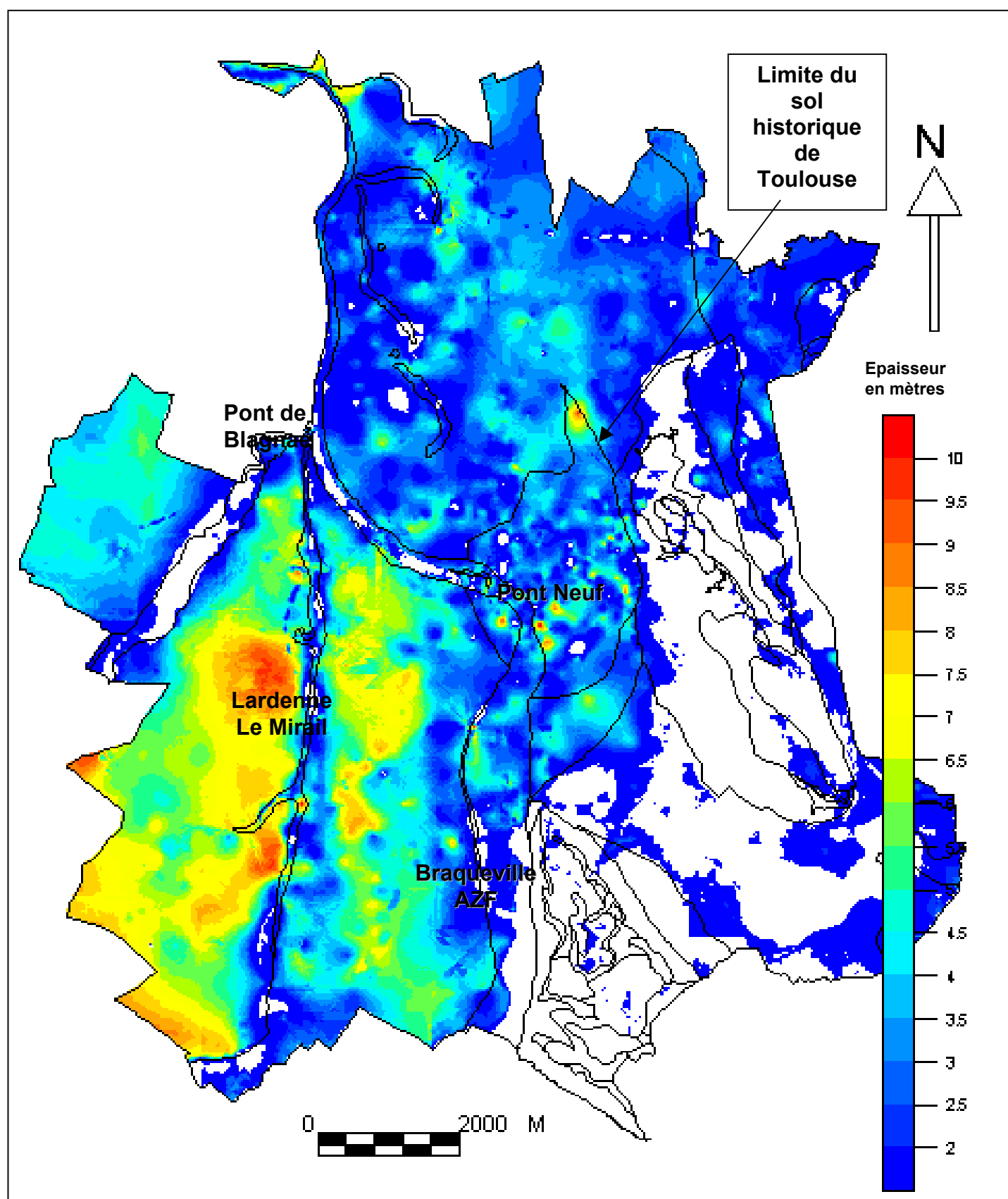
Annexe 6

Localisation des sondages utilisés pour la modélisation sur fond de carte géologique modifiée



Annexe 7

Carte des épaisseurs des formations alluviales sablo-graveleuses de la basse terrasse et de la basse plaine de la Garonne



Annexe 8

Liste des puits retenus par la visite de terrain

Indice	Date visite	Carroyage Plan de ville IGN 1:12500	Adresse (n°, rue)	Code postal	Type de propriétaire (PRive Entreprise PRive Particulier, Public)	X (report ortho- photo? en m)	Y (report ortho- photo? en m)	NP	Margell e/ Sol	Hauteur RM/Sol	Profon- deur (en m)	RM (repère margelle)	Ø ext. (m)	Ø int. (m)	Accès
09838D2493	07/06/2004	N12	7 Impasse de la Faourette	31100	PRP	526048.00	142622.83	5.05	0.15	0.15	5.88	Margelle	1.10	1.00	Libre - prendre l'impasse le long du chemin de fer (n°7)
09838D0727	07/06/2004	L12	Avenue de Lombez	31300	PU	526101.08	144421.90	5.02			10.50	Trottoir			Libre
09838D2494	16/06/2004	Q9	Avenue du Mirail	31100	PU	523679.91	140761.76	5.78	0.00	0.00	6.30	Bord fonte		0.07	Libre - choisir le n°2
10094A0114	17/06/2004	S07	319 Chemin de Tucaut	31100	PRP	522850.53	139259.09	7.30	0.00	0.00	9.20	Bord fonte	1.20	0.80	Libre - passer par derrière l'exploitation par le rond-point
10094B0134	17/06/2004	S09	20 Chemin Vouet	31100	PRP	524067.11	139416.11	3.35	0.00	0.00	6.00	Haut plaque	1.10	1.00	Fermé PO (portail ouvert)
10094B0096	17/06/2004	R11	Zone industrielle Acti Sud	31100	PRE	525591.22	140074.38	6.35	1.01	1.01	6.90	Margelle		0.90	Libre
10094B0141	18/06/2004	T12	297 Route d'Espagne	31100	PRP	526147.64	138801.36	2.55	0.44	0.44	3.90	Margelle	1.15	0.98	Libre
09838C1638	18/06/2004	Q08	105 Gen. Einsenhower	31100	PRE	522980.23	140932.65	4.25	0.00	0.00	7.80	Sol	1.20	0.80	Accueil
09838C0185	18/06/2004	Q06	30 Route St Simon	31100	PRP	521960.72	140646.46	5.04	0.40	0.40	6.50	Haut plaque	1.20	0.90	Libre
09838C1626	21/06/2004	P07	95 Route St Simon (Castel Folle)	31100	PRP	522602.80	141490.23	4.35	0.50	0.50	6.20	Grille	1.40	1.00	Fermé
09838C2495	22/06/2004	M08	25 Av Pierre Molette	31100	PRP	523264.64	143441.48	5.24	0.50	0.50	6.95	Bas plaque	1.20	1.00	Libre
09838C1514	22/06/2004	L07	44 Chemin Salinlé	31100	PRP	522760.35	144119.93	4.90	0.00	0.00	6.00	Sol		1.40	Fermé
09838C2496	23/06/2004	L09	4 Chemin Calquet	31100	PRE	523680.95	144225.03	5.45	0.20	0.20	8.80	Bord piezo	0.09	0.05	Accueil
09838D2497	23/06/2004	K10	Avenue Raymond Badiou	31100	PU	524904.47	144805.94	4.66	0.00	x.xx	7.30	Tube interieur	0.20	0.09	Libre - accès parking Zenith av Badiou
09838A0153	23/06/2004	I08	29 Impasse la Flambrère	31300	PRP	523546.84	146473.73	6.62	0.80	0.80	11.50	Margelle	1.60	1.20	Libre
09838D0156	23/06/2004	J09	5 Impasse J. Claude Godfrain	31300	PRE	523999.31	145391.79	3.50	0.00	0.00	4.80	Sol	0.80		Libre
09838D2498	24/06/2004	K12	Adolphe Coll (face n°50)	31300	PU	526341.03	144630.84	3.85	0.00	-0.08	5.42	Tube interieur	0.13	0.06	Libre
09838D2499	24/06/2004	M11	Rue Vestrepain (face n°82)	31100	PU	525763.59	143468.91	4.94	0.00	0.00	6.30	Bord fonte	0.13	0.10	Libre
09838D2500	24/06/2004	N11	Presbytère rue Saintonge	31100	PU	525376.70	142855.32	4.36	0.00	0.00	7.50	Bord fonte	0.13	0.04	Libre
09838B0152	25/06/2004	H09	2 Chemin la Flambrère	31300	PRP	524147.09	146883.84	6.19	0.55	0.55	7.60	Plaque fonte		1.00	Libre
09838B0136	25/06/2004	H11	116 rue des Troenes	31200	PU	525398.14	147278.40	4.10	0.10	0.10	7.85	Bas plaque		1.00	Fermé
09838B0144	25/06/2004	F11	48 Chemin de Ginsetous	31200	PRP	525027.44	148312.20	3.75	0.00	0.00	8.40	Feuilleure interieure	1.60		Libre
09845C0584	28/06/2004	Q14	Chemin des Canalets	31400	PRP	527683.83	140985.31	6.05	0.40	0.40	11.40	Margelle	1.50	1.10	Libre
09845C2642	30/06/2004	O15	15 Impasse Rambaud	31400	PRE	527959.52	142200.52	3.70	0.80	0.80	10.40	Margelle	1.20	1.00	Fermé
09845A3579	30/06/2004	I16	face au 13 rue du Dome	31500	PU	527959.52	146115.95	9.69	0.00	-0.08	15.70	Tube interieur	0.13	0.04	Libre
09845A0278	01/07/2004	G14	12 Impasse Barthe	31200	PRP	527535.95	147843.90	4.27	0.50	0.50	9.10	Feuilleure interieure	1.13	0.90	Fermé
09845A0286	01/07/2004	F14	62 route de Launaguet	31200	PRP	527508.63	148211.09	3.77	0.75	0.75	6.05	Feuilleure interieure	1.20	0.90	Fermé
09845A0403	05/07/2004	D17	24 Chemin Virebent	31200	PRP	529833.42	149845.77	6.00	1.10	1.10	9.35	Bord grille		1.20	Fermé
09845A0423	06/07/2004	D16	12 Impasse Bordrouge	31200	PRP	528855.95	149642.71	3.63	0.30	0.30	15.80	Bas plaque	1.10	1.00	Libre
09845A0285	06/07/2004	D15	97 Chemin des Izards	31200	PRP	527967.72	149931.96	5.15	0.90	0.90	8.70	Brique interieure	2.00		Fermé
09845A0259	07/07/2004	C16	Rue Fenelon (derrière le n°20)	31200	?	528842.18	150285.42	2.82	0.55	0.55	5.50	Haut linteau pierre	1.8	1.1	Libre
09841C0189	07/07/2004	C17	Chemin Paléficat (face n°58)	31200	?	529386.62	150560.80	2.76	0.25	0.25	6.40	Haut plaque	1.7	1.3	Libre
09845A0299	07/07/2004	D18	1 Impasse Mont Blanc	31200	PRP	530479.28	149527.62	3.67	0.00	0.00	8.20	Bord beton			Libre
09845A1701	07/07/2004	E18	50 rue Auguste Renoir	31200	PRP	530243.11	149000.00	4.8	0.8	0.8	8.00	Brique interieure	1.4	1.1	Libre
10101A0096	12/08/2004	R17	249 route de Narbonne	31400	PRP	529732.63	139766.74	4.53	0.38	0.38	?	Bord puit	1.34	0.6	Fermé
10101A0348	12/08/2004	R18	10 allée du Lieutenant Lafay	31400	PRP	530457.95	140033.29	1.04	0.00	0	3.13	Bord tuyau	0.105	0.1	Libre
10101B0028	16/08/2004	R20	Chemin du Palays	31400	PRP	531525.17	139652.60	5.38	0.50	0.5	12.2	Bord tube	0.16	0.156	Libre
10101B0110	17/08/2004	Q22	45 Chemin des Carnes	31400	PRP	533103.20	140279.33	3.25	0.31	0.3	6	Bord puit			Fermé
09845D0234	17/08/2004	P22	31 Chemin de Cavras	31400	PRP	533319.72	141345.93	8.35	0.62	0.62	14.5	Bord puit	1.65	1.35	Fermé
09845D0201	17/08/2004	O21	3 Avenue de la Marcaissonne	31400	PRP	532363.69	141739.96	3.38	0.77	0.77	5.1	Bord puit	1.12	1	Fermé
09841C0344	19/08/2004	A14	248 route de Launaguet	31200	PRP	527646.53	151498.75	3.93	0.54	0.54	14.38	Bord orifice	0.08	0.08	Fermé
09841C0324	19/08/2004	B14	294 route de Launaguet	31200	PRP	527532.70	151013.80	4.58	0.60	0.60	9.93	Bord orifice	0.08	0.08	Fermé
09834D0135	19/08/2004	B12	Accueil Terrain de tennis, Lac de Sesquieres	31200	PU	525747.41	151038.39	4.58	0.57	0.57	16.2	au milieu de la dalle	1.46		Libre
09845D0204	26/08/2004	O22	48. Chemin de Ribaute	31400	PU	532839.29	142157.54	7.75	0	0	15.2	Bord		0.42	Libre
10101B0037	26/08/2004	R21	1. Allée Jean Griffon	31400	PRE	532165.15	140142.38	3.12	0.56	0.56	5.04	Bord	1.14	0.41	Libre
09845D0610	30/08/2004	P20	70. Chemin de Payssat Z.I	31029	PRE	531411.14	141578.94	4.6	0.42	0.42	6.3	Bord béton	1.54		Libre
09845D0447	30/08/2004	O20	Montaudran Payssat	31400	PRP	531562.38	141948.28	4.8	0.15	0.15	6.8	Bord puit		0.5	Fermé
09845C1284	01/09/2004	N15	5 avenue de rangueil	31400	PRP	528522.15	142384.67	3.11	0	0	5.45	Bord puit		0.5	Fermé

Annexe 9

Fiche descriptive d'un puits utilisée lors des travaux de terrain

Point d'eau : Puits / Forage / Puisard / autre

x : ; y : ; z =

Indice national:.....

N° autre :

Adresse :

Commune :

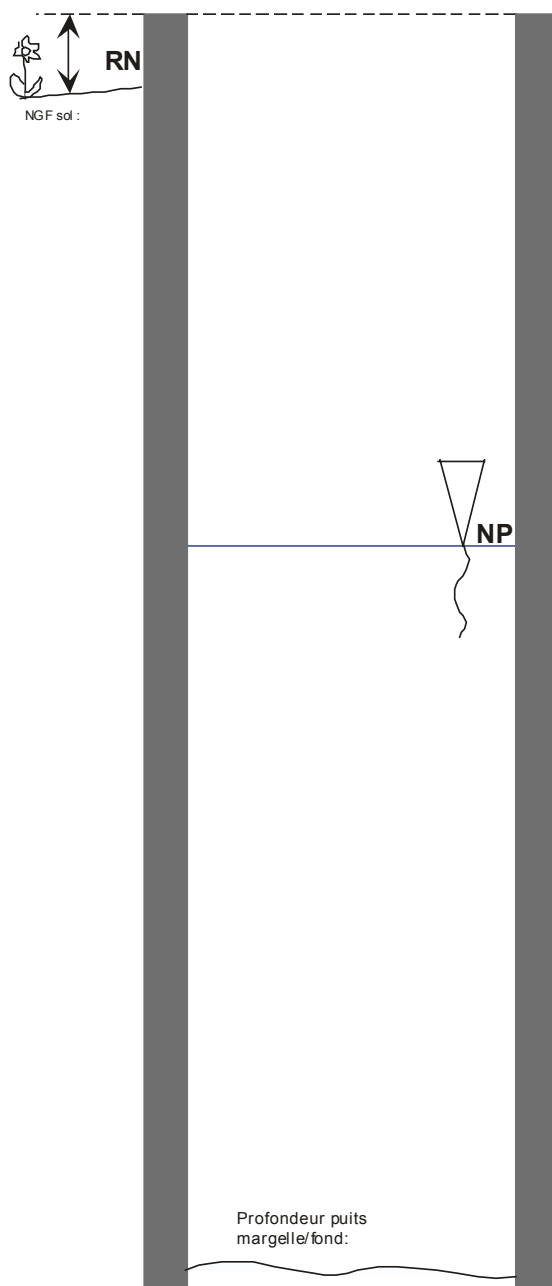
Système aquifère :

Sous-secteur hydrographique :

Carte topo 1/25 000 :

Carte géologique 1/50 000 :

RM



Inventaire terrain le :

PARAMETRES DE REFERENCE

NP : niveau piezométrique :

RN : repère de nivellement :

RM : repère de mesure :

PARAMETRES DU PUIT (m)

diamètre ext. :

diamètre int. :

hauteur margelle/sol :

profondeur puits/margelle :

PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES

NP/RM (m) :

PARAMETRES EQUIPEMENTS

puits de mesure (m) :

longueur :

diamètre ext. :

diamètre int. :

ENREGISTREUR

FONCIER

propriétaire/locataire :

adresse :

tél : D.....P.....

remarques :

auteur(s) :



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009

45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Midi-Pyrénées

3, rue Marie Curie
BP 49

31527 Ramonville Saint Agne Cedex - France
Tél. : 05 62 24 14 50