



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Document à accès immédiat

CAPacité d'Infiltration des eaux pluviales du territoire de TOULouse Métropole (CAPITOUL)

Rapport final

BRGM/RP71904-FR

Version 1 du 24 mai 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

Belbeze Stephane

Vérificateur :

Nom : Sandrine LEMAL

Fonction : Responsable d'unité

Date : 07/06/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : Anne-Valérie HAU BARRAS

Fonction : Directrice régionale déléguée

Date : 04/07/2022

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr

toulouse
métropole

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : Perméabilités, Infiltration, Eaux pluviales, Urbain, Métropole, Toulouse, Occitanie.

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

Belbeze Stephane (2022) avec la collaboration de Assy Y., Le Cointe P. et Rame E. – CAPacité d'Infiltration des eaux pluviales du territoire de TOULouse Métropole (CAPITOUL). Rapport final V1. BRGM/RP71904-FR, 72 p., 45 fig., 14 tab.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-20/01/2022

Synthèse

La gestion des eaux pluviales connaît un changement de paradigme à l'œuvre depuis deux décennies. Le temps du tout-tuyau, qui a prévalu au XX^e siècle, laisse peu à peu la place à des techniques moins lourdes et moins onéreuses remettant l'eau au cœur de l'aménagement urbain. Ce nouveau paradigme est basé sur une gestion intégrée des eaux pluviales privilégiant la gestion à la source par les techniques alternatives. Ce nouveau mode de gestion permet un grand nombre d'externalités positives en contribuant à la nature en ville, au bien-être en ville, à la lutte contre les îlots de chaleur urbain et à la préservation de la ressource par l'infiltration et l'abattement des pollutions véhiculées par les eaux pluviales.

Afin de s'inscrire dans cette démarche, une convention de recherche et développements partagés a été signée entre Toulouse Métropole et le BRGM dans le but de mettre à disposition de la direction du Cycle de l'eau, un système d'information sur les eaux souterraines permettant de renseigner la protection et la conservation des eaux superficielles et souterraines ainsi qu'une carte de zonage du sous-sol de la métropole indiquant le niveau de susceptibilité (niveau très favorable à peu favorable) à l'infiltration des eaux pluviales. Cette étude constitue une action préparatoire à l'élaboration du schéma directeur de gestion des eaux pluviales (SDGEP) de la métropole. Elle constitue un préalable à une évaluation des potentiels de désimperméabilisation, et à la réalisation d'un zonage pluvial sectorisé, annexé au PLUIH, dont les prescriptions seront notamment basées sur la capacité d'infiltration des sols.

Plusieurs développements innovants ont été réalisés dans ce programme CAPITOUL : un système de gestion de base de données (SGBD) inédit des données géotechniques, un métamodèle de remontée des eaux souterraines, un modèle tridimensionnel de la perméabilité des sols. Le calcul de l'indice de capacité d'infiltration (ICI) a été calculé en valorisant au maximum les données disponibles. Il s'agit d'un calcul complexe qui doit être adapté aux caractéristiques hydrogéologiques de la métropole étudiée et aux données disponibles. La méthode retenue et proposée par le BRGM a été validée sur les points de contrôle de la métropole et produit un zonage comparable à celui de la méthode « Phoebus » de la ville de Rennes. Elle s'avère adaptée comme outil d'aide à la décision incitative. À court terme, elle alimentera le travail d'instruction des permis de construire et d'accompagnement des pétitionnaires que réalise le service Eau & Aménagement de la Direction du Cycle de l'Eau

La principale difficulté rencontrée est l'absence de suivi de long terme du niveau des eaux souterraines et de réseaux piézométriques denses au droit de la métropole toulousaine. Dans le cadre de sa compétence de gestion des eaux usées déléguée, la métropole projette de se doter d'un réseau d'une quarantaine d'ouvrages avec un suivi régulier. Les résultats de ce projet ont conduit à quelques suggestions pour son design.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Le secteur d'étude.....	11
2.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE	11
2.1.1. Les formations molassiques tertiaires.....	11
2.1.2. Les formations alluviales quaternaires.....	12
2.1.3. Les autres formations quaternaires.....	14
2.2. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE.....	14
2.2.1. Alluvions de la Garonne.....	15
2.2.2. Alluvions de l'Hers et des rivières secondaires	15
2.3. DOMAINES GÉOMORPHOLOGIQUES.....	16
3. La capacité d'infiltration et l'indice de capacité d'infiltration.....	19
3.1. L'ÉPAISSEUR DE LA ZONE NON SATURÉE (ZNS).....	19
3.2. LE TYPE DE PLUIE ET D'OUVRAGE D'INFILTRATION CHOISI	20
3.3. LA PERMÉABILITÉ	21
3.4. LES ZONES À EXCLURE.....	23
3.5. L'INDICE DE CAPACITÉ D'INFILTRATION (ICI).....	23
3.6. LA MÉTHODE PHOEBUS	24
3.6.1. La méthode PHOEBUS de la métropole rennaise	24
3.6.2. Remarques.....	25
4. Base de données géotechniques de la métropole toulousaine	27
4.1. CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNÉES	27
4.2. LE LIDAR.....	29
4.3. LES OUVRAGES SUPPLÉMENTAIRES	29
5. Préparation des couches de données nécessaires au calcul des ICI.....	33
5.1. ÉTABLISSEMENT DE LA CARTE DE PERMÉABILITÉ DE LA MÉTROPOLE	33
5.1.1. Les perméabilités du modèle BISMUTH de 2007	33
5.1.2. Les données perméabilités de la base de données	33
5.1.3. La correction des perméabilités mesurées par les BE	37
5.2. ÉTABLISSEMENT DES HAUTES EAUX (HE) PAR LES BE	43
5.3. LA MODÉLISATION GÉOLOGIQUE DES SOLS DE LA MÉTROPOLE.....	43

5.4. CARTES D'ÉPAISSEUR DE LA ZONE NON SATURÉE	46
5.4.1. Données hautes eaux de la Métropole	46
5.4.2. Calcul de la ZNS	53
5.5. CALCUL DES EAUX EXCEPTIONNELLES PAR MÉTAMODÈLE	54
5.5.1. Construction du métamodèle des hautes eaux exceptionnelles (HEE).....	54
5.5.2. Résultats du métamodèle des hautes eaux (HE).....	58
5.5.3. Évaluation de l'estimation par quantile des HEE	59
6. Carte de l'indice de capacité d'infiltration (ici)	61
6.1. PARAMÈTRE RETENUS	61
6.1.1. Perméabilités des sols calculées pour la métropole	61
6.1.2. IDPR	62
6.1.3. Zones des Sites et sols pollués	62
6.1.4. Autres sources d'informations : pentes, zones endoréiques	63
6.2. PRODUCTION DE LA CARTE D'ICI	63
6.2.1. Cartes « brutes ».....	64
6.2.2. Contrôle qualité de la justesse du plan d'ICI.....	64
6.2.3. Plan d'ICI simplifié et purgé des désaccords	65
6.3. CARTE D'INFILTRATION SELON LE PROTOCOLE PHOEBUS	67
7. Conclusion	69
8. Bibliographie.....	71

Liste des figures

Figure 1 : Périmètre d'étude sur la carte géologique harmonisée au 1/50 000.	11
Figure 2 : Schéma de la séquence molassique élémentaire. RP-55361-FR.	12
Figure 3 : Terrasses alluviales de la Garonne et de l'Hers RP-55361-FR.	12
Figure 4 : Schéma de la séquence alluviale élémentaire.	12
Figure 5 : Schéma d'une tranchée d'infiltration sous accotement.	21
Figure 6 : Schématique des diverses configurations d'essais de perméabilité utilisés en géotechnique... ..	22
Figure 7 : Carte d'indice de capacité des eaux pluviales sur le territoire de Rennes Métropole.	25
Figure 8 : Informations mises à disposition par Toulouse Métropole. Décompte par quadras.	27
Figure 9 : Schéma de la base de données et dénombrement des données collectées.	28
Figure 10 : Snapshot des onglets de la base Excel réalisée par BRGM pour la métropole.	29
Figure 11 : Ouvrages supplémentaires proposés pour compléter les données de perméabilité disponibles. ..	30
Figure 12 : Dispersogrammes des perméabilités mesurées par les bureaux d'études géotechniques par unité litho-stratigraphique « Bismuth » et colorées selon les classes de la carte géologique harmonisée au 1/50 000.	34
Figure 13 : Croisement Lithographie simplifiée et Géo morphologie.	35
Figure 14 : Domaines géomorphologiques identifiés pour la métropole toulousaine (BISMUTH adapté). ..	35
Figure 15 : Croisement entre les perméabilités mesurées par les BE, les unités litho stratigraphiques étendues et colorées selon les classes de la carte géologique harmonisée au 1/50 000.	36
Figure 16 : Perméabilité en m/s mesurée par les bureaux d'étude sur les domaines géomorphologiques. ..	37
Figure 17 : Perméabilités retenues comparées aux mesurées et repartition de ces perméabilités retenues selon les unités litho-stratigraphiques Bismuth et étendues.	39
Figure 18 : Perméabilités retenues comparées aux mesurées et répartition de ces perméabilités retenues selon les unités litho-stratigraphiques Bismuth de 2007 et colorées selon les classes de la carte géologique harmonisée au 1/50 000.	41
Figure 19 : Sondages de sol disponibles pour l'étude.	43
Figure 20 : Paramètres du modèle de transiogrammes pour les trois principales directions.	44
Figure 21 : Coupes horizontale des faciès modélisés pour la métropole de Toulouse.	45
Figure 22 : Vue 3D du modèle multi faciès de la métropole toulousaine.	45
Figure 23 : Suivi piézométrique de la nappe alluviale de la Garonne.	47
Figure 24 : Représentation fiable des fluctuations piézométriques sur le territoire de Toulouse et son agglomération (BISMUTH).	48
Figure 25 : Suivi des piézomètres du réseau « mod 31 » sur le territoire de Toulouse Métropole.	49
Figure 26 : Chronique piézomètre 09838D0727/F.	49
Figure 27 : Campagne piézométrique HE 2007 : Soustraction de l'écart HE 10 ans – HE 2 ans + 1 m à la profondeur mesurée - Méthode estimation HE annuelle = Moyenne mensuelle maximale. ..	52
Figure 28 : Campagne piézométrique HE 2007 : Soustraction de l'écart HE 10 ans – HE 2 ans + 1 m à la profondeur mesurée - Méthode estimation HE annuelle = Valeur journalière maximale. ..	52
Figure 29 : Détermination de l'épaisseur de la ZNS de base par utilisation des HE2007.	53
Figure 30 : La construction d'un métamodèle au BRGM d'après Betancourt et al. (2020).	54
Figure 31 : Validation croisée du métamodèle.	55

Figure 32 : Modèle des hautes eaux (Marthe 2007) et Zoom sur la couverture de la zone d'intérêt par le modèle 2007.	56
Figure 33 : Ajustement d'une loi entre les plus hautes eaux en 2007 et celles mesurées en 2018 sur les piézomètres disponibles et estimatifs des hautes eaux mesurées en 2018 par application de la dérive déterminée avec les 13 piézomètres disponibles.	56
Figure 34 : Paramètres Géo (géologie) , ALT (altitude), EAU (distances aux points d'eau) du métamodèle.....	57
Figure 35 : Variogramme des résidus et modèle de fonction d'erreur spatiale « f ».....	57
Figure 36 : HE2021 prédictions des quantiles par métamodèle en mNGF.....	58
Figure 37 : Comparaison des HE2021 Q70 avec les HEE du bureau d'étude FONDASOL mesurées en juillet et août 2018.	59
Figure 38 : Classement de perméabilités des horizons Argilo-Limoneux (AL) et Sablo-Graveleux (SG) de Toulouse Métropole.	61
Figure 39 : Classement de l'IDPR de Toulouse Métropole.	62
Figure 40 : Classement SSP de Toulouse Métropole.	63
Figure 41 : Calcul d'ICI par cumul du maximum d'information, légende incitative.....	64
Figure 42 : Points marquant du contrôle qualité du plan d'ICI.	65
Figure 43 : Calcul d'ICI, final par cumul du maximum d'information.	66
Figure 44 : Calcul d'ICI final par cumul du maximum d'information, échelle métropole.	66
Figure 45 : Calcul d'indice de capacité d'infiltration selon la méthode Phoebus adaptée aux spécificités de la métropole Toulousaine.	67

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Référentiel Géologique de la ville de Toulouse (BRGM/RP-56505-FR).....	17
Tableau 2 : Indice de Capacité d'Infiltration de divers projets (Rennes, Haut de Seine, envisageable pour Toulouse)	23
Tableau 3 : Résultats des tests de perméabilité sur les trois ouvrages supplémentaires réalisés.....	31
Tableau 4 : Résumé des mesures et des retenues pour les unités litho-stratigraphique (BISMUTH)	39
Tableau 5 : Résumé des mesures et des retenues pour les unités litho-stratigraphique étendues.....	40
Tableau 6 : Harmonisation des perméabilités des unités litho-stratigraphiques mesurées par les BE et BISMUTH	42
Tableau 7 : Statistique des niveaux des HE 10 ans et HE 2 ans	50
Tableau 8 : Analyse des HE avec période de retour 2 ans / 10 ans.....	51
Tableau 9 : Moyennes par terrasse	51
Tableau 10 : Paramètres de la fonction d'erreur spatiale f du métamodèle (dite de résidus).....	57
Tableau 11 : Comparaison entre le Quantile 70 du métamodèle et les piézomètres disponibles	59
Tableau 12 : Appréciation des perméabilités	61
Tableau 13 : Appréciation de l'IDPR selon Phoebus	62
Tableau 14 : Appréciation des zones SSP	62

1. Introduction

La gestion des eaux pluviales connaît un changement de paradigme à l'œuvre depuis deux décennies. Le temps du tout-tuyau, qui a prévalu au XX^e siècle, laisse peu à peu la place à des techniques moins lourdes et moins onéreuses remettant l'eau au cœur de l'aménagement urbain. Ce nouveau paradigme est basé sur une gestion intégrée des eaux pluviales privilégiant la gestion à la source par les techniques alternatives. Ce nouveau mode de gestion permet un grand nombre d'externalités positives en contribuant à la nature en ville, au bien-être en ville, à la lutte contre les îlots de chaleur urbain et à la préservation de la ressource par l'infiltration et l'abattement des pollutions véhiculées par les eaux pluviales.

Dans ce cadre, la métropole de Toulouse – précédemment la Communauté Urbaine du Grand Toulouse – a mis en place depuis 2002 un règlement d'assainissement pluvial évolutif et a favorisé l'émergence puis la mise en œuvre d'une gestion intégrée des eaux pluviales par les techniques alternatives. Cependant la connaissance, l'acculturation et les moyens disponibles sont encore parfois insuffisants pour réaliser pleinement ce changement de paradigme et tendre vers une gestion à la source et une ville perméable.

L'infiltration des eaux pluviales permet également de recharger la nappe alluviale de la Garonne et ainsi favoriser le soutien d'étiage en période de sécheresse, en différant le transfert de ces eaux pluviales au fleuve. Cette infiltration en milieu urbain et péri-urbain doit être maîtrisée afin de garantir la qualité des milieux aquatiques.

Pour ce faire et, afin de favoriser l'infiltration des eaux pluviales partout où le milieu le permet, les services de Toulouse Métropole souhaitent disposer d'une **connaissance plus fine des potentiels d'infiltration** pour utiliser différents leviers à savoir :

- à très court terme (par la présente étude) :
 - alimenter le travail d'instruction des permis de construire et d'accompagnement des pétitionnaires que réalise le service Eau & Aménagement de la Direction du Cycle de l'Eau,
 - constituer la connaissance de base à un partenariat projeté avec le CEREMA pour réaliser une carte des potentiels de débitumisation ;
- à moyen terme (2023-2024) :
 - contribuer à la réalisation d'un zonage pluvial sectorisé, annexé au PLUI (Plan local d'urbanisme intercommunal), dont les prescriptions seront notamment basées sur la capacité d'infiltration des sols.

L'objectif premier du programme est d'aboutir à une carte de zonage du sous-sol de la métropole indiquant la susceptibilité (niveau très favorable à peu favorable) à l'infiltration des eaux pluviales dans le cadre d'un schéma directeur. À l'échelle de tout projet d'aménagement, ce zonage ne se substituera en rien à la nécessité de faire réaliser par un bureau d'études de sol des essais *in situ* afin de connaître la capacité d'infiltration du sol, qui conditionnera le mode de gestion des eaux pluviales par infiltration à retenir et son dimensionnement. De même, les facteurs socio-économiques qui pourraient s'avérer limitants ne sont pas considérés dans cette appréciation.

L'objectif second est de mettre à **disposition de la direction du Cycle de l'eau un système d'information sur les eaux souterraines permettant de renseigner la protection et la conservation des eaux superficielles et souterraines.**

2. Le secteur d'étude

2.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Le périmètre couvre Toulouse Métropole (Figure 1) et recoupe les formations décrites par quatre cartes géologiques à 1/50 000 à savoir : 0983-TOULOUSE (OUEST) - 0984-TOULOUSE (EST) - 1009-MURET et 1010- VILLEFRANCHE-DE-LAURAGAIS. Le contexte géologique de la métropole toulousaine est détaillé dans les rapports du BRGM n° BRGM/RP-53296-FR et RP-55361-FR, livrables de l'étude dénommée BISMUTH et réalisée en 2004-2005 pour laquelle une modélisation géologique avait été réalisée.

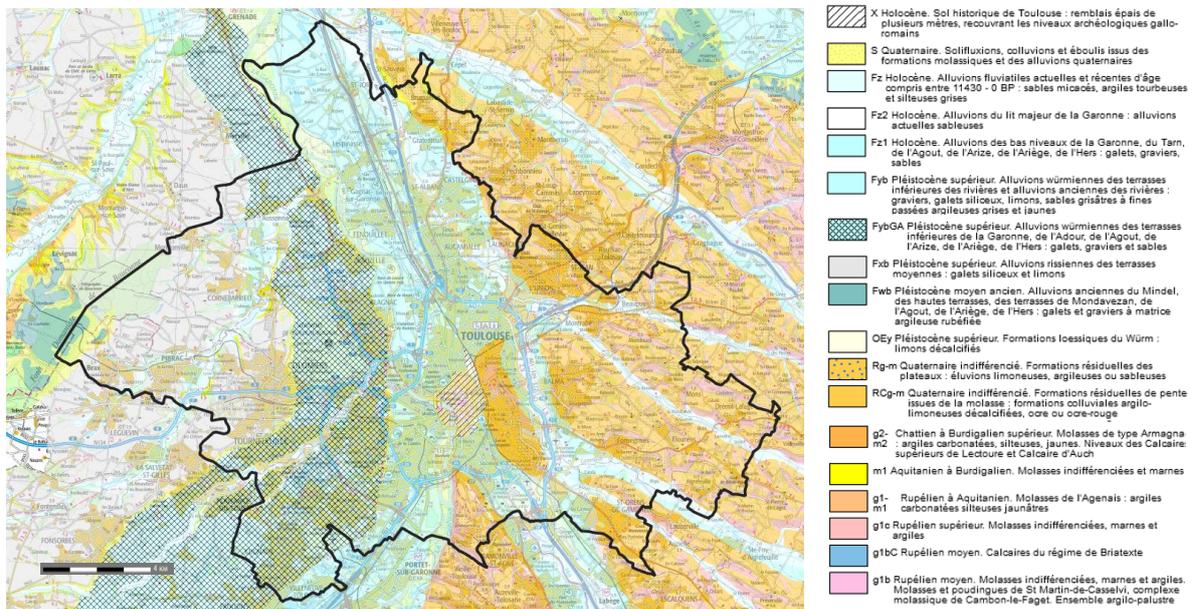


Figure 1 : Périmètre d'étude sur la carte géologique harmonisée au 1/50 000.

La géologie et la morphologie de surface de la région toulousaine sont essentiellement conditionnées par l'orogénèse de la chaîne des Pyrénées durant l'ère tertiaire. Les formations anté-tertiaires sont principalement recouvertes par les formations molassiques du Tertiaire et les alluvions déposées au Quaternaire.

2.1.1. Les formations molassiques tertiaires

Les molasses sont des produits du démantèlement des Pyrénées, datées du Tertiaire. Elles sont formées d'une alternance de séquences répétitives de type grès/silt/argile silteuse/calcaire (Figure 2). Ces matériaux se sont mis en place dans un environnement fluvio-lacustre. De fait, ils présentent d'importantes variations latérales de faciès suite aux phases d'érosions et de dépôts successifs.

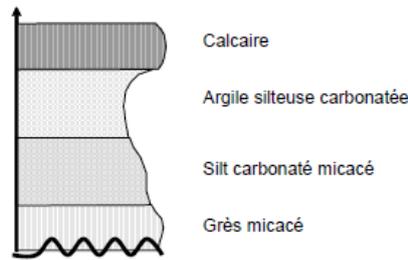


Figure 2 : Schéma de la séquence molassique élémentaire. RP-55361-FR.

2.1.2. Les formations alluviales quaternaires

Deux formations alluviales du Quaternaire se retrouvent sur Toulouse : les alluvions de la Garonne et celles de l'Hers. Durant les deux dernières glaciations, l'alternance de phases érosives et de dépôts, associée à un mouvement global de la Garonne vers l'est, a ainsi permis la formation de terrasses étagées (Figure 3) pour la Garonne et l'Hers.

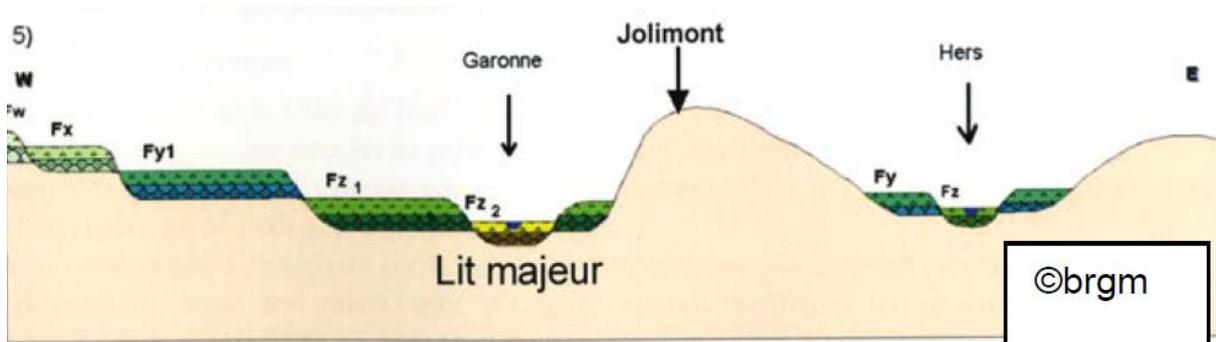


Figure 3 : Terrasses alluviales de la Garonne et de l'Hers RP-55361-FR.

Qu'il s'agisse des alluvions de la Garonne ou de l'Hers, les terrasses sont identifiées par : la basse plaine, la basse terrasse, la moyenne terrasse, la haute terrasse.

La séquence élémentaire des alluvions de la Garonne (Figure 4) est constituée par :

- à la base, un niveau grossier de 3 à 5 mètres d'épaisseur, constitué par des graviers et des galets de granite, de gneiss, d'ophite et de schiste 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 mètres d'épaisseur.

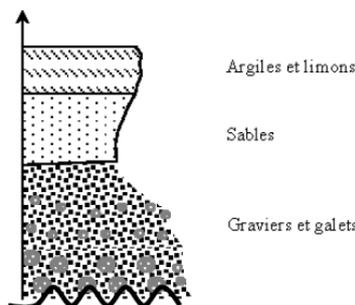


Figure 4 : Schéma de la séquence alluviale élémentaire.

La composition des différentes terrasses identifiées est très proche. Les divers niveaux n'ont généralement pu être distingués que d'après leur degré d'évolution : altération des galets et altération pédologique des limons.

Des éboulis et des solifluxions des alluvions sont observables sur les pentes des terrasses.

Les alluvions du lit majeur (LM) sont constituées 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. Les alluvions du lit majeur sont absentes lorsque la Garonne coule directement sur le substratum molassique.

Les alluvions quaternaires et modernes de la basse plaine (BP) sont constituées de galets 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 (d'après BISMUTH) :

- 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 signaler l'existence de nombreux paléo-chenaux 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.

Dans les basses terrasses (BT), les alluvions sont de même composition que celles de la basse plaine (BP) mais avec un certain degré d'altération. Ainsi les granites se transforment en arènes et les schistes se décomposent en argile et en limon.

Les alluvions de la moyenne Terrasse (MT) 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 imperméables. Les plus bas paliers de ces plaines dominant l'étiage de 55 m, les plus hauts de 80 m.

Les alluvions de la haute Terrasse (HT) 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 hématésés.

Les alluvions de la vallée de l'Hers présentent une séquence similaire à celles des terrasses de la Garonne :

- à la base, séquence grossière sableuse, pauvre en graves ;
- au sommet, 3 à 10 mètres de limons argileux peu perméables.

La part de matériel grossier de ces alluvions est moindre car ce sont des produits de l'érosion des formations molassiques, contrairement aux alluvions de la Garonne, d'origine pyrénéenne.

Au Quaternaire, le cours de l'Hers s'est vu amputé de son haut bassin versant détourné en direction de la Méditerranée par les rivières du bassin de l'Aude. 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.

2.1.3. Les autres formations quaternaires

D'autres formations géologiques datant du Quaternaire sont également présentes sur Toulouse :

- le sol historique de Toulouse (X), niveau constitué par plusieurs mètres de remblais (REMB) surmontant les niveaux archéologiques gallo-romains ;
- les dépôts à faciès de loess (LO), sédiments fins d'origine éolienne. Ces sédiments fins ont été apportés par le vent et piégés à flanc de versant dans la vallée de l'Hers (est de Toulouse) et notamment sur les versants exposés au nord des coteaux proches ;
- les limons des plateaux (LP) difficiles à différencier des loess et issus de la décomposition, sur place, des marnes des molasses sur 1 à 2 m d'épaisseur ;
- les colluvions (COL). Ces formations affectent la majorité des versants à faible pente des ensembles molassiques. Ils correspondent à des matériaux argilo-limoneux et peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur au pied des pentes (Capdeville *et al.*, 1997) ;
- les alluvions modernes du Touch (AMT) et des cours d'eau secondaires constituées le plus souvent par des limons argileux ;
- les alluvions du seuil de Toulouse (AST), sont constitués de 2 à 3 m d'alluvions fines dont l'origine n'est pas clairement définie et qui correspondent vraisemblablement à un ancien lit de l'Hers.

2.2. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Dans la région toulousaine, les ressources en eau sont étroitement liées à la présence de la Garonne qui constitue le drain principal des eaux à l'échelle régionale. Les nappes présentes sont les suivantes (de haut en bas) :

- les nappes alluviales : elles circulent dans les formations alluviales présentes sur les différentes terrasses (nappes phréatiques) ;
- les nappes intra-molassiques : elles sont contenues dans les lentilles sableuses ou gréseuses des terrains molassiques peu perméables. La recharge de ces nappes est faible ;
- la nappe profonde infra-molassique : elle est présente à la base des formations molassiques. C'est une nappe captive souvent artésienne qui est à environ 900 m de profondeur.

Le calcul de la capacité d'infiltration des sols s'intéresse plus particulièrement à la nappe superficielle contenue dans les alluvions des terrasses de la Garonne et de l'Hers. Au droit de Toulouse, les aquifères alluviaux en présence sont les suivants :

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

Ces nappes alluviales sont alimentées par les eaux météoriques et par le déversement des nappes des terrasses anciennes dans les terrasses plus récentes par l'intermédiaire d'écoulements diffus et/ou de sources de débordement, le plus souvent masqués par les colluvions de pente. Il n'existe donc pas une continuité hydraulique de flux entre la basse plaine et la basse terrasse en raison d'affleurements ponctuels de molasse.

2.2.1. Alluvions de la Garonne

Les aquifères de la basse plaine et du lit majeur sont considérés comme en continuité hydraulique. La Garonne qui entaille ces formations draine la nappe qu'ils contiennent. En période de crue, localement, des inversions de flux sont possibles au niveau des alluvions du lit majeur. Les niveaux aquifères se situent dans les sables à graviers grossiers de la base de la série dont la puissance varie entre 2 et 7 m. Ils sont surmontés d'une couverture de 0,5 m à 2 m de limons argileux récents, due aux dépôts formés lors des crues. Les transmissivités sont de l'ordre de 5.10^{-4} m²/s et peuvent atteindre 1.10^{-3} m²/s dans des chenaux d'écoulements.

Les anciens méandres de la Garonne sont généralement remplis de formations plus limoneuses et sont moins perméables. Les alluvions de la basse plaine peuvent offrir des débits relativement importants, de plusieurs dizaines de m³/h.

À proximité des terrasses plus anciennes, l'aquifère est parfois « chargé » en sédiments fins liés à la présence de bourrelets molassiques, induisant des perméabilités plus faibles. Dans les alluvions du lit majeur les débits peuvent être très importants (> 100 m³/h) mais restent étroitement liés aux écoulements de la Garonne.

Sur le territoire de Toulouse, la basse terrasse se développe essentiellement en rive gauche de la Garonne, au sud-ouest. Elle domine la Garonne d'une vingtaine de mètres à l'étiage, l'aquifère se déversant dans la terrasse de la basse plaine. Les sables graveleux aquifères qu'elle contient sont plus dégradés que dans la basse plaine. Ils présentent donc une fraction argileuse issue de l'altération des éléments granitiques plus importante que celle des alluvions récentes. Ceci induit une diminution de la perméabilité (K de l'ordre de 1.10^{-4} m²/s) et de la productivité moyenne des forages lorsqu'on s'éloigne de la Garonne du fait d'une épaisseur aquifère sensiblement plus faible. Les débits espérés sont généralement inférieurs à 10 m³/h, mais peuvent néanmoins atteindre 10 à 20 m³/h localement.

2.2.2. Alluvions de l'Hers et des rivières secondaires

Résultant essentiellement de l'érosion des terrains molassiques, les dépôts de la plaine alluviale de l'Hers sont principalement constitués de sables et de quelques graviers. Ils sont surmontés de limons argileux récents pouvant atteindre 10 mètres de puissance. La fraction sableuse constitue le niveau aquifère.

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 de l'aquifère susceptible de soutenir les débits de la rivière en période sèche. L'Hers coule au droit des formations molassiques et draine ponctuellement cette nappe. Les relations nappe /rivière sont très limitées.

Les quelques valeurs de perméabilité recensées sont de l'ordre de 1.10^{-5} m²/s avec des puissances aquifères souvent limitées entre 2 et 3 mètres. Les débits espérés sont généralement de quelques m³/h au maximum.

Les alluvions des autres rivières secondaires sont très peu développées. Les cours d'eau ayant creusé leur lit dans le substratum molassique permettent de participer au drainage de ces nappes alluviales. Les débits espérés sont négligeables (inférieurs à 1 m³/h).

2.3. DOMAINES GÉOMORPHOLOGIQUES

En 2008, un modèle géologique 3D de la ville de Toulouse a été réalisé par le BRGM (rapport BRGM/RP-56505-FR de décembre 2008). Les données collectées (4 895 points) étant hétérogènes, les unités litho-stratigraphiques de même âge et/ou de même lithologie avaient été rassemblées (Tableau 1) :

- les « basses plaines de la Garonne et de l'Hers Mort » sont regroupées dans la formation « basse plaine » ;
- le « seuil de Toulouse », qui correspond vraisemblablement à un ancien lit de l'Hers et présente une lithologie similaire à la basse plaine de l'Hers, est intégré à la « basse plaine » ;
- les « alluvions modernes du Touch » et le « lit majeur de la Garonne » sont décrits comme de la « basse plaine » ;
- les « basses terrasses de la Garonne et de l'Hers Mort » sont regroupées dans la formation « basse terrasse ».

Formations (Codes)	Codes	descriptions litho-stratigraphiques	Notation cartes géologiques
Actuel (ACTU)	MUR	Maçonnerie	X
	REMB	Remblais	X
	COL	Colluvions, formation de pente	FS(983), m- gRc(984)
	PLAT	Formations résiduelle de plateau	m-gRe (983,984)
	LOES	Dépôts à faciès de Lœss	OE (984)
Basse Plaine (BP)	AMAL	Alluvions modernes argilo-limoneuses	
	AMAS	Passée sableuse dans AMAL	
	AMSG	Alluvions modernes sablo-graveleuses	Fz2, Fz1, Fz (983,984), Fy2 (984)
	AMSA	Passée argileuse dans AMSG	
	AMC	Passée sableuse à la base des AMSG (chenalisation ou altération de la molasse)	
Basse Terrasse (BT)	1AL	Séquence argilo-limoneuse de la première terrasse	
	1AS	Passée sableuse dans 1AL	
	1SG	Séquence sablo-graveleuse de la première terrasse	Fy1, Fy(983,984)
	1SA	Passée argileuse dans 1SG	
	1C	Passée sableuse à la base des 1SG (chenalisation ou altération de la molasse)	
Formations molassiques (MOLA)	SILT	Silts des formations molassiques	
	MARN	Argiles et marnes des formations molassiques	
	SABL	Sables et grés des formations molassiques	++++g2-3 (983), g2, g2d, g2c (984)
	MOLA	Argiles et sables mélangés	
	CALC	Calcaires des formations molassiques	
	XMOL	Molasse non décrite	
	CAV	Cavité dans les grés molassiques	
Indifférencié	UNDF	Non défini ou inconnu	Sans objet

Tableau 1 : Référentiel Géologique de la ville de Toulouse (BRGM/RP-56505-FR).

3. La capacité d'infiltration et l'indice de capacité d'infiltration

La capacité d'infiltration (intuitivement une vitesse d'infiltration de l'eau dans les sols) dépend de l'épaisseur de la Zone Non Saturée (ZNS), du type de pluie, de l'ouvrage d'infiltration choisi, de la perméabilité des sols.

3.1. L'ÉPAISSEUR DE LA ZONE NON SATURÉE (ZNS)

La Zone Non Saturée correspond au sous-sol compris entre la surface du sol et la surface de la nappe libre qui oscille annuellement entre des niveaux hauts (*hautes eaux*) et des niveaux bas (*basses eaux*). L'épaisseur de cette ZNS est un des paramètres clefs du dispositif d'infiltration. Elle s'obtient par calcul des hautes eaux (HE) puis soustraction de celles-ci au Modèle Numérique de Terrain (cote de la surface du sol). Si le MNT s'obtient directement par levé LIDAR tel que celui réalisé pour le compte de la métropole, les hautes eaux doivent être mesurées ou calculées.

Il existe quelques cadres référentiels publics définissant le calcul des hautes eaux. La diversité des valeurs trouvées dans les différentes sources met en évidence la difficulté du sujet et l'absence de consensus. On peut citer :

- a. la norme française P11-221-1 (DTU 14.1), d'origine géotechnique, utilisé pour le cuvelage des bâtiments,
- b. le guide de repères à destination des instructeurs de la police de l'eau et des milieux aquatiques, réalisé par le CEREMA, en 2014
- c. la doctrine de gestion des eaux pluviales de la DREAL Grand Est, datant de février 2020,
- d. le guide technique francilien de la DRIEE d'Île de France, datant d'août 2020.

La NF P11-221-1 (DTU 14.1) de mai 2000 distingue :

- le niveau des plus basses eaux « EB » qui donne les actions permanentes ;
- le niveau des hautes eaux « EH » qui correspond à la crue pouvant se produire au moins une fois tous les 10 ans. La différence avec le niveau EB donne les actions variables ;
- le niveau exceptionnel et conventionnel de l'eau « EE » qui correspond au niveau des plus hautes eaux connues et/ou prévisibles. La différence avec le niveau « EB » donne les actions accidentelles.

Le guide du CEREMA de 2014 destinés aux services instructeurs mentionne les PHEC (plus hautes eaux connues) sans pour autant les caractériser en termes de mesure ou de période de retour associée.

La doctrine de la DREAL Grand Est, de février 2020, associe la période de retour décennale aux plus hautes eaux.

Enfin, le guide technique francilien de la DRIEE, d'août 2020, associe la détermination des hautes eaux aux résultats donnés par les chroniques par les mesures effectuées pendant une année.

Lorsque les données bibliographiques sont suffisantes, le niveau des plus hautes eaux (HE) est calculé par la formule suivante :

$$HE = BE + A + S + C + B$$

Avec :

- HE : Niveau des Plus Hautes Eaux (m NGF),
- BE : Niveau d'étiage de la nappe (m NGF),
- A : Influence de l'onde de crue (m). Ici cela serait l'influence des variations marémétriques et des crues de la Garonne (A), amorties dans l'aquifère selon la distance,
- S : Battement saisonnier de la nappe (m),
- C : Rabattement ou relèvement de la nappe aux ouvrages existants autour du site (m). Cela peut être des pompages existants à proximité du site qui créent un rabattement de la nappe ou dans le cas d'un doublet géothermique (forage de rejet) une augmentation du niveau piézométrique (charge). L'infiltration des eaux pluviales dans des bassins proches peut également engendrer un relèvement de la nappe,
- B : Effet barrage des infrastructures qui seront sous l'eau (m). L'effet barrage des bâtiments induit une hausse du niveau de la nappe.

Pour obtenir le niveau des Eaux Exceptionnelles (EE), un coefficient de 0,5 est ajouté à la valeur du HE influencé (conformément à la DTU 14.1), soit :

$$EE = HE + 0.5 \text{ (m NGF)}$$

Lorsque les données bibliographiques sont insuffisantes, le bureau d'étude réalise une étude hydrogéologique pour justifier son estimation de HE ou tout autre paramètre. Cela entraîne la rédaction de closes limitantes telles que :

- ces résultats sont à interpréter avec précaution compte tenu de l'absence de données au droit du projet ;
- des investigations complémentaires pourraient être envisagées pour préciser ces niveaux au droit du site ;
- les niveaux des Plus Hautes Eaux et le niveau d'Eaux Exceptionnelles sont donnés dans le contexte urbain actuel, pour le présent projet. Il peut être modifié du fait de la réalisation de nouvelles infrastructures souterraines.

3.2. LE TYPE DE PLUIE ET D'OUVRAGE D'INFILTRATION CHOISI

Le type de pluie et le type d'ouvrage d'infiltration choisi dépendent du projet. Pour mémoire :

- la pluie courante est une pluie faible correspondant à minima à une lame d'eau de 10 mm tombée sur une période de 24 h (période de retour de l'ordre de 1 mois). Elle correspond au volume minimum de pluie à infiltrer ou réutiliser dans l'enceinte d'un projet, dans les 24h ;
- la pluie forte (à minima pour une période de retour de 10 ans) considère une lame d'eau plus importante. Les ouvrages de stockage peuvent commencer à déborder, et on peut avoir une inondation des chaussées par exemple, mais pas des habitations. Plusieurs jours (< 4) sont nécessaires pour évacuer l'eau ;
- la pluie exceptionnelle, de période de retour au-delà de la pluie forte retenue, et à minima 30 ans, correspond à un risque fort pour la sécurité des populations.

L'ouvrage d'infiltration peut varier principalement par sa surface et sa profondeur ; il en existe de multiples : puits, tranchée (Figure 5), noue de stockage/infiltration, bassin d'infiltration, plaine inondable. Par principe, il met en contact les eaux et un horizon favorable à l'infiltration.

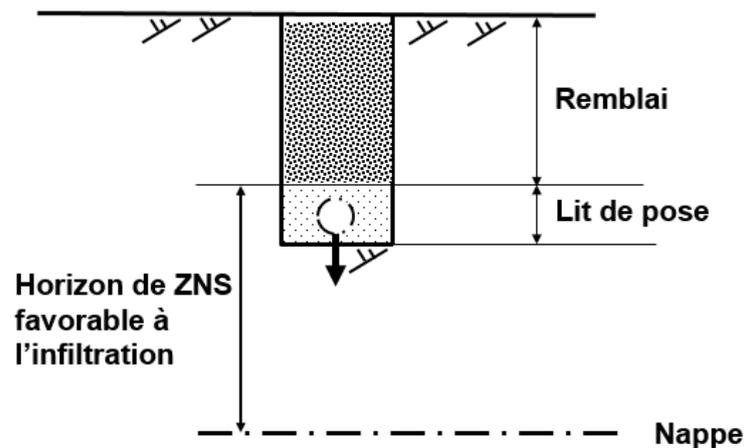
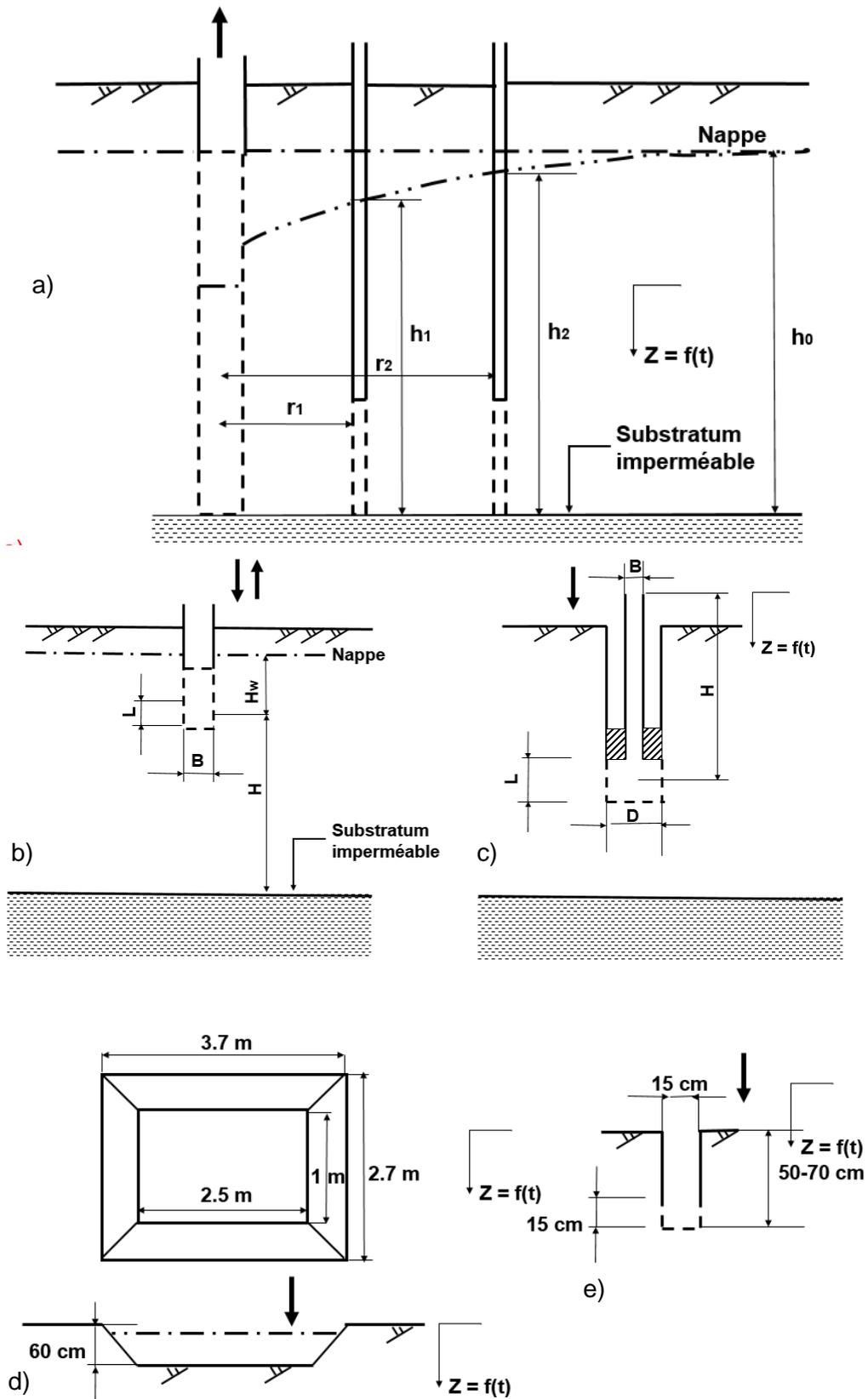


Figure 5 : Schéma d'une tranchée d'infiltration sous accotement.

3.3. LA PERMÉABILITE

Avec la ZNS, la perméabilité des sols est le second paramètre clefs du calcul de capacité d'infiltration. Lorsque les données bibliographiques sont suffisantes, le bureau d'études (BE) les utilise. Dans le cas contraire, le bureau d'étude réalise des mesures (Figure 6), voire une étude hydrogéologique pour justifier son estimation :

- des tests de pompages sur des puits ou piézomètres existants donnent une valeur précise de la perméabilité de l'aquifère. Ils sont réalisés par palier ou longue durée et interprétés avec des logiciels comme OUAIP du BRGM ;
- des essais de type Lefranc à charge constante (régime permanent) ou charges variables interprétés selon la norme NF EN ISO 22282-2 anciennement NFP 94-132. Ces essais sont réalisés de manière courante en géotechnique de projet. Le diamètre de l'ouvrage est souvent moindre que celui des puits ou piézomètres et les perméabilités doivent être corrigées pour tenir compte du colmatage inhérent de cette méthodologie d'essai. De fait, ces mesures sont sensibles à l'hétérogénéité du milieu ;
- des essais de type Nasberg qui sont une variante de l'essai Lefranc par injection pour un milieu non saturé courante en géotechnique. L'interprétation est différente de celle des essais Lefranc (Cassant, M, 2005). Elles doivent elles-aussi être corrigées et sont aussi sensibles à l'hétérogénéité du milieu ;
- des essais de type Porchet selon la norme (NF XP DTU 64.1.1). Ils reposent sur la mesure du volume d'eau nécessaire pour maintenir, pendant 10 minutes, un niveau constant de 15 cm dans une cavité dont la profondeur est choisie en fonction de l'étude (généralement de 50 à 70 cm). La mesure se fait après saturation initiale du sol pendant au moins 4 heures. Le respect de ce délai est important car l'objectif est de mesurer la conductivité hydraulique à saturation. Les essais double anneau sont des variantes de l'essai Porchet qui permettent de mesurer au moyen d'anneaux de 50 ou 70 cm de diamètre que l'on fixe au sol que l'on remplit. Après saturation initiale du sol, la durée minimum d'un essai est de 30 min, pour approcher le plus près possible d'une saturation complète. À la différence des essais Lefranc ou Nasberg, ces deux essais n'intéressent que la première couche du sol et une faible profondeur. Ils sont très sensibles à l'hétérogénéité du milieu ;
- des essais de type Matsuo se réalisent dans une fouille que l'on remplit et dont on mesure la vitesse d'abaissement du niveau. Il existe des abaques selon la taille de la fouille. C'est un essai peu adapté pour déterminer une « perméabilité vraie ». Il donne visuellement une idée du comportement future d'une tranchée d'infiltration.



Avec a) Essai de pompage, b) essai Lefranc, c) essai Nasberg, d) essai Matsuo, e) essai Porchet.

Figure 6 : Schématique des diverses configurations d'essais de perméabilité utilisés en géotechnique.

Si les mesures sont insuffisantes au droit du projet, il est possible d'estimer la perméabilité au moyen d'autres couches d'information comme la perméabilité générale des couches géologiques, la susceptibilité de la présence d'argiles, l'IDPR (Indice de Développement et Persistance des Réseaux), l'hydromorphie des sols. C'est cette approche qui a été retenue pour Rennes. Elle est décrite dans le chapitre suivant.

3.4. LES ZONES À EXCLURE

Enfin, les zones où l'infiltration peut être proscrite :

- à l'intérieur d'un périmètre rapproché de protection de captage ;
- en cas de sols pollués ;
- en cas de présence de roches solubles comme du Gypse ;
- en cas de pentes supérieures à 7 % ou de sols réputés instables (PPRN -GT) ;
- en cas d'activité industrielle à risque de pollution élevé.

3.5. L'INDICE DE CAPACITE D'INFILTRATION (ICI)

La capacité d'infiltration a la dimension d'une vitesse d'infiltration dans le sol. L'indice de capacité d'infiltration (ICI) porte dans sa légende un avis d'expert qui se veut une caractéristique « moyenne » de cette vitesse. Il s'agit d'un jugement subjectif. Ainsi, un sol très peu à pas perméable pour un hydrogéologue peut avoir un très bon ICI si l'ouvrage est grand (bassin) ET une pluie modérée.

Le Tableau 2 présente divers cas réels d'indices de capacité d'infiltration obtenus avec une même perméabilité ou régime de pluie.

Perméabilité	K (m/s)	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	
Horizon infiltré		graviers			sables graviers	et	Sable fin, Limon argileux			Argile limoneuse			
Pluies faibles		Excellente				Moyenne				faible			
Pluies forte		Excellente				Moyenne				faible			
Indice de Capacité infiltration PHOEBUS (Rennes)		Favorable à assez favorable (une validation par une étude dédiée est recommandée)						Possible (nécessite des espaces dédiées)					
Indice de Capacité infiltration SEPIA (Haut de seine)		Infiltration a priori possible						déconseillée		Expertise nécessaire		Infiltration interdite	
Indice de Capacité infiltration PHOEBUS sur TLSE (jugée anxiogène)		Assez favorable				peu favorable				Non favorable			
Indice de Capacité infiltration favorisante TLSE		Très favorable				favorable		modérée		Zone a attention particulière			

Tableau 2 : Indice de Capacité d'Infiltration de divers projets (Rennes, Haut de Seine, envisageable pour Toulouse).

Le choix de la sémantique de la carte d'ICI dépend de son usage futur comme aide à la décision. Toulouse Métropole souhaite un indice de type « favorisant ».

3.6. LA METHODE PHOEBUS

3.6.1. La méthode PHOEBUS de la métropole rennaise

Le projet PHOEBUS (Profondeur des entités Hydrogéologiques et évaluation des contraintes à l'infiltration des Eaux pluviales urbaines sur le territoire de Rennes Métropole) a été monté dans le cadre d'une convention de recherche et de développement avec le BRGM (rapport n° RP-68599-FR).

Cette étude avait pour but d'élaborer une carte des zones favorables et défavorables à l'infiltration des eaux pluviales pour l'agglomération de Rennes Métropole (Figure 7).

Pour ce faire, une analyse multicritère basée sur le principe de la classification et de la pondération a été réalisée sur les critères : l'épaisseur de la ZNS calculée, la perméabilité des sols, la susceptibilité de la présence d'argiles, l'IDPR (Indice de Développement et Persistance des Réseaux), l'hydromorphie des sols, les pentes et les zones endoréiques :

- la campagne de mesures des niveaux d'eau de la première nappe rencontrée, réalisée en mars 2018 a permis le tracé précis d'une carte piézométrique en période de hautes eaux souterraines (HE). À partir de cette carte, l'épaisseur de la ZNS a été déduite par soustraction de ces hautes eaux aux du MNT ;
- dans un second temps, différents paramètres permettant d'estimer la perméabilité des sols ont été croisés pour apprécier l'aptitude des sols à laisser s'infiltrer les eaux météoriques. La combinaison des différents paramètres aboutit à la création d'un indicateur de la capacité d'infiltration (ICI), d'une valeur maximale de 200 ;
- cet indicateur a ensuite été restitué sous forme de quatre classes caractérisant la susceptibilité d'infiltrer des eaux pluviales : pas favorable, peu favorable, assez favorable et favorable ;
- la légende de la carte a ensuite été reprise pour sectoriser les zones où des études plus précises devront être menées.

Les limitations de la cartographie PHEOBUS sont les suivantes : cette cartographie doit être considérée comme indicative. Elle ne doit pas être utilisée à une échelle inférieure au 1/25 000 et ne peut se substituer à des études à la parcelle.

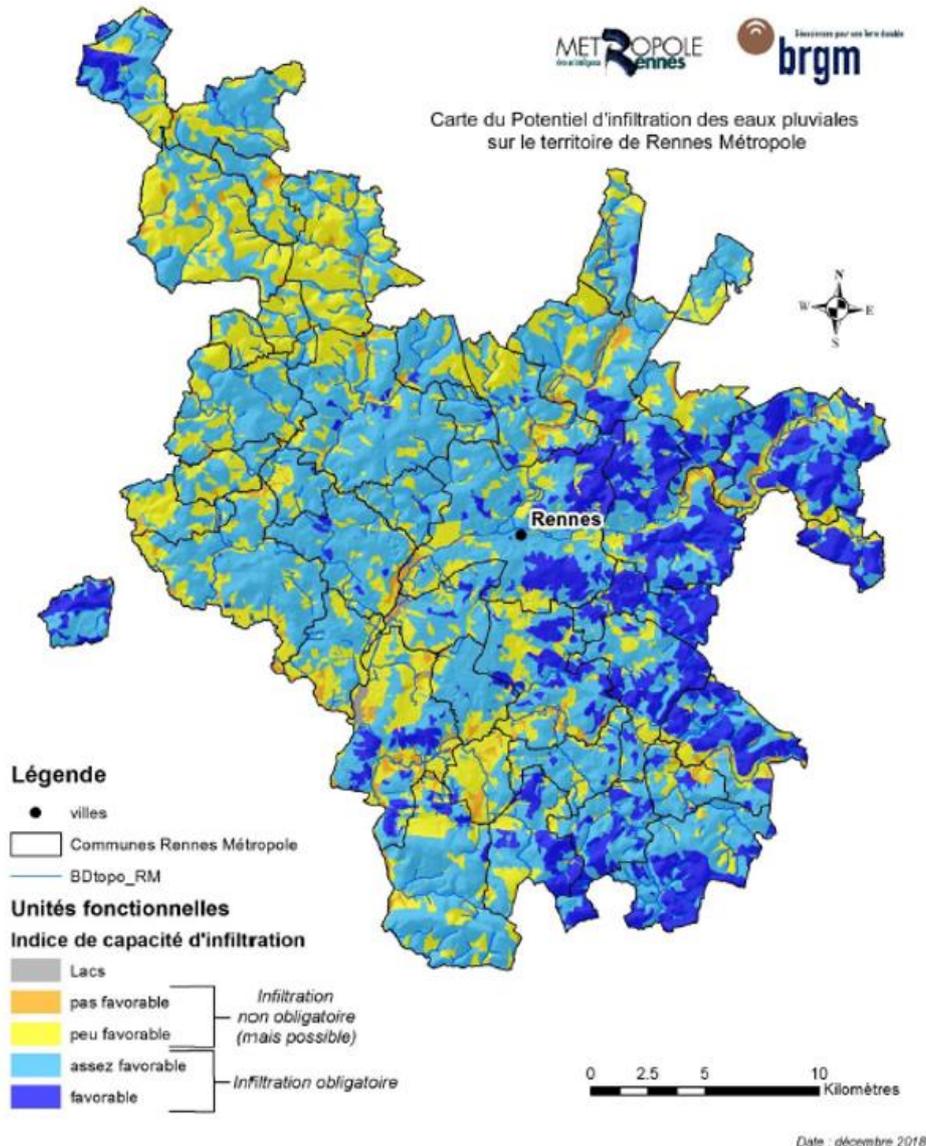


Figure 7 : Carte d'indice de capacité des eaux pluviales sur le territoire de Rennes Métropole.

3.6.2. Remarques

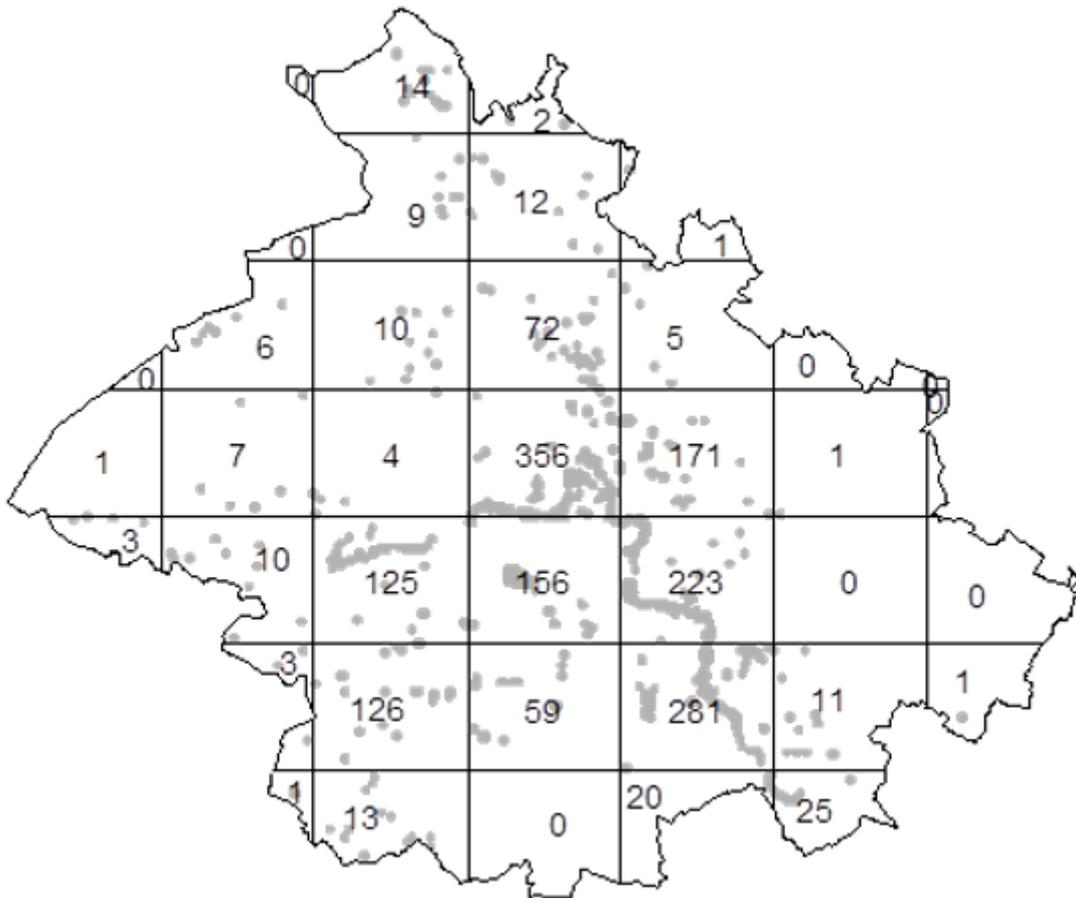
Cette méthode a donné pour la métropole rennaise une carte d'indices de capacité infiltration dite directrice (obligatoire/non obligatoire). On peut noter que cette méthodologie de calcul était adaptée au contexte rennais où des mesures de nappes souterraines étaient disponibles mais avec peu de mesures directes de la perméabilité ; ce qui a conduit à l'estimer à l'aide de covariables comme la géologie locale, la susceptibilité de la présence d'argiles, l'IDPR (Indice de Développement et Persistance des Réseaux), l'hydromorphie des sols.

On peut aussi noter que cette métropole a une géologie et géomorphologie différente de la métropole toulousaine ; ce qui laisse supposer des changements méthodologiques.

4. Base de données géotechniques de la métropole toulousaine

4.1. CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNÉES

Cette première étape a consisté à recenser, trier par format les données géotechniques de la ville et de la métropole mises à disposition (Figure 8), le cadastre, la topographie LiDAR, l'IHU, l'hydrographie, les données piézométriques du BRGM et de tiers, etc.



Note : Chaque rapport est un point gris

Figure 8 : Informations mises à disposition par Toulouse Métropole. Décompte par quadras.

Au total, les données intéressaient plus de 277 sites répartis sur l'ensemble de la métropole et sur lesquels une étude géotechnique avait été réalisée (disponible en PDF) et dont il fallait saisir les principaux résultats. Cette phase a été très chronophage principalement du fait de l'absence de géo-référencement des études et ouvrages réalisés. Il a fallu les estimer et les saisir manuellement. À l'issue de cette phase, plus de 2 400 ouvrages, logs de sondages et essais ont été rassemblés (Figure 9).

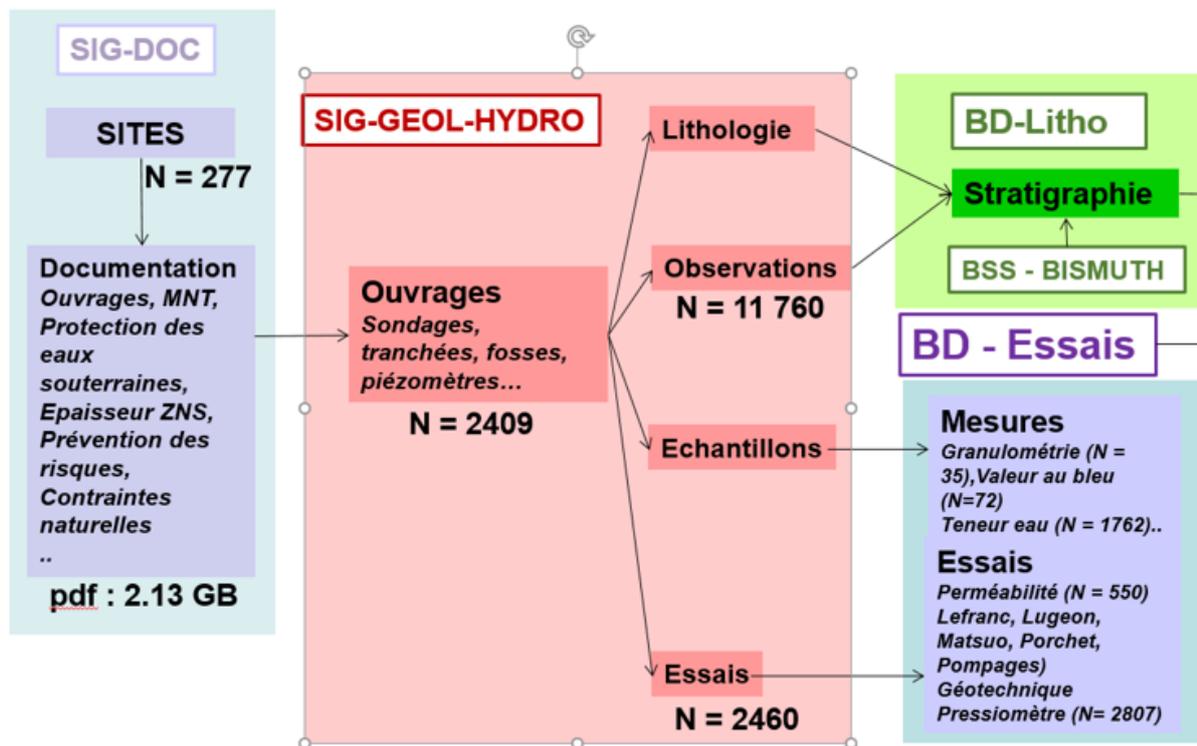


Figure 9 : Schéma de la base de données et dénombrement des données collectées.

Pour faciliter l'accès à ces données, l'ensemble a été conditionné dans un classeur XLSX « Excel » de données Géo-référencées munies de 9 onglets (Figure 10) :

- Sites fournisseur des données ;
- Têtes de sondages ;
- Relevés lithologiques ;
- Essais géotechniques ;
- Essais pressiométriques ;
- Mesures de perméabilités ;
- Têtes de piézomètres ;
- Mesures des hauteurs de nappe ;
- Lexique géologique.

Cet Excel permet une prise en main facile et des mises à jour par copier-coller. Ce qui permet aux données d'être actualisées. Pour autant, si la base venait à dépasser les 100 000 têtes de sondages, il conviendrait de basculer le système en SGBD de type « oracle ».

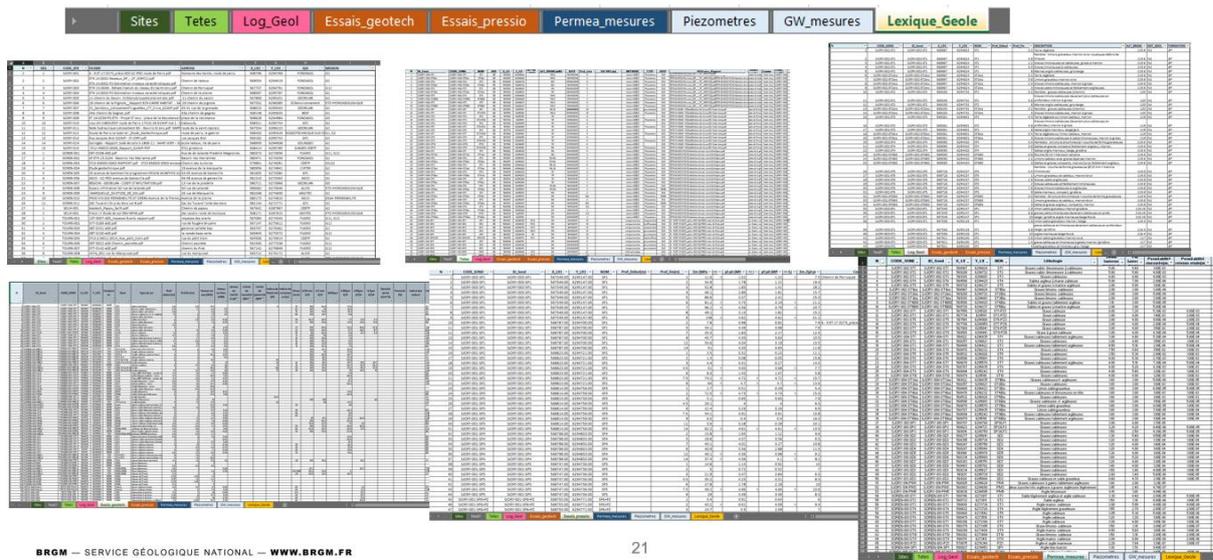


Figure 10 : Snapshot des onglets de la base Excel réalisée par BRGM pour la métropole.

4.2. LE LIDAR

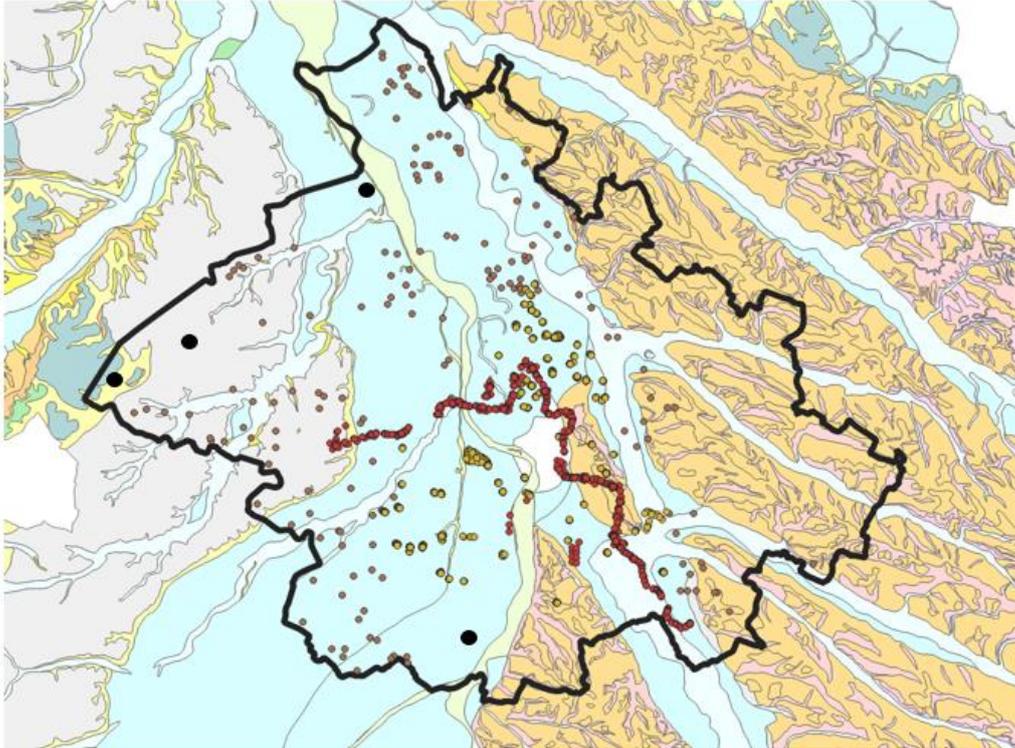
Toulouse Métropole disposait d'un relevé tuilé généré sur un pas de 0,2 m à partir d'un levé LIDAR de 2021. De forte taille (plusieurs T octets), le fichier n'était ni filtré ni classifié et non triangulé en DEM. Ces données ont dû être traitées au moyen de la suite R et de l'utilitaire LASTOOLS pour produire des raster 1 m x 1m (4.4 G octets), 5 m x 5 m (64M octets) et 10 m x10 m (16M octets) utilisables en support de modélisation pour un Intel P5.

4.3. LES OUVRAGES SUPPLÉMENTAIRES

De manière à obtenir un plan de perméabilité couvrant toute la métropole, certaines zones à géologie particulière sont peu échantillonnées (Figure 8) et doivent l'être. Aussi, le programme prévoit de réaliser des forages avec réalisation d'essais complémentaires. La Figure 11 présente la localisation proposée. Elle comprenait initialement quatre sites :

- nord de Pibrac, forêt de Bouconne ;
- est de Cornebarrieu ;
- nord-est de Seilh ;
- Portet-sur-Garonne vers Francazal.

Le nombre de site a été ramené à trois. Celui de la forêt de Bouconne (site classé) nécessitait des délais d'obtention d'autorisation ONF/Ministère non compatible avec le chronogramme du projet a été écarté.



Note : Chaque rapport géotechnique est un point. Les points noirs sont les sites proposés.

Figure 11 : Ouvrages supplémentaires proposés pour compléter les données de perméabilité disponibles.

Le programme d'essai réalisé par l'entreprise FONDASOL a été le suivant :

- foration de trois sondages de reconnaissance jusqu'au toit du substratum molassique marneux sur trois sites sur le territoire de Toulouse Métropole (Seilh, Cornebarrieu, Toulouse) ;
- réalisation de deux tests de perméabilité par sondage : un en milieu non saturé et un en milieu saturé ;
- mise en place des équipements piézométriques au droit des trois sondages réalisés ;
- relever les coordonnées des points d'implantation des sondages par un géomètre.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 3. Ils ont été ajoutés à la base de données et sont en cohérence avec les connaissances acquises : une couche peu perméable en surface qui s'épaissit de Seilh à Cornebarrieu. La couche sous-jacente plus graveleuse est plus perméable et aquifère.

		ST1	ST2	ST3
		Seilh	Toulouse	Cornebarrieu
	X L93	566716.60	569845.56	563287.97
	Y L93	6290314.11	6272789.19	6286077.26
	TA NGF	234.6	151.10	180.40
	NS/TA	1.4	3	5
		Argiles graveleuses	Graves Limoneuses	Argiles Graveleuses
1-2 m	K injection	3.70E-06	8.10E-06	1.10E-06
	K retour	1.40E-07*	6.50E-06	1.50E-07*
		Sables graveleux	Graves sableuses	graves argileuses
2.8-3.8	K injection	2.50E-05	3.50E-05	3.00E-06
	K retour	1.00E-05	1.80E-05	1.40E-07*

Une * signale un colmatage du test. La donnée ne peut être retenue.

Tableau 3 : Résultats des tests de perméabilité sur les trois ouvrages supplémentaires réalisés.

5. Préparation des couches de données nécessaires au calcul des ICI

5.1. ÉTABLISSEMENT DE LA CARTE DE PERMÉABILITE DE LA MÉTROPOLE

5.1.1. Les perméabilités du modèle BISMUTH de 2007

À l'occasion de la réalisation du modèle bismuth en 2007, seuls trois horizons avaient été modélisés :

- un composite des formations AMSG, AMSA et AMC pour les alluvions de la basse plaine. Celle-ci comprend aussi les alluvions du lit majeur et des anciens chenaux. Ce faisant, les perméabilités sont importantes et de l'ordre de 1.10^{-3} m/s ;
- un composite de 1SG, 1SA, 1C pour les alluvions de la basse terrasse de perméabilité moyenne 1.10^{-4} m/s ;
- un composite des formations molassiques SILT, MARN, SABL, MOLA, CALC, XMOL, CAV. Ces formations sont peu perméables (10^{-6} m/s en moyenne).

Des corrections avaient ensuite été appliquées aux toits des alluvions :

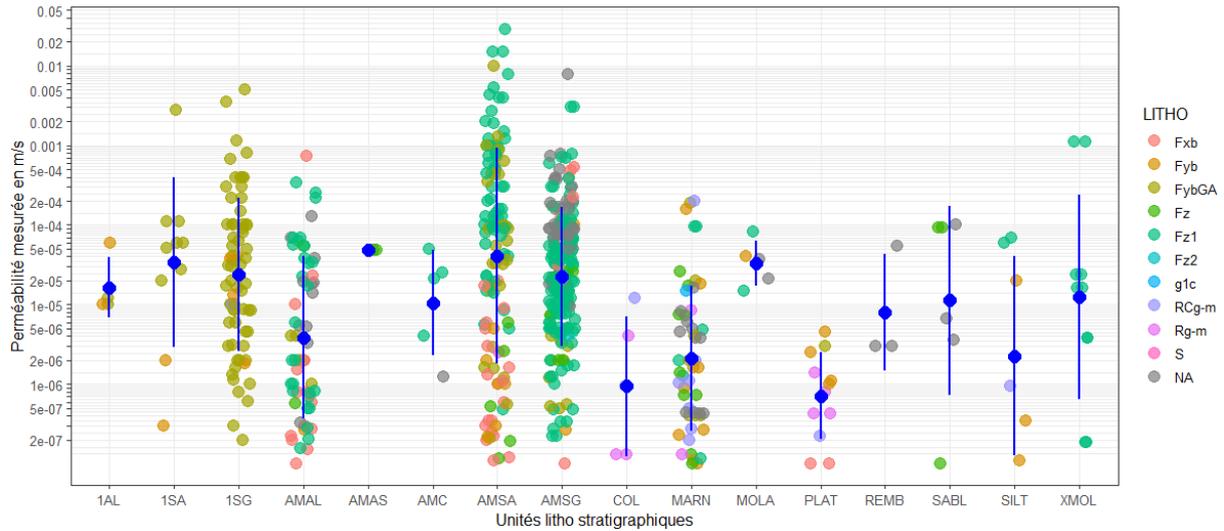
- au niveau du TOUCH, les toits des alluvions avait été fixé à la topographie moins 1,5 mètres de limons de recouvrement ;
- pour les molasses affleurante, le toit est fixé à la topographie – 0,2 mètres de limons de recouvrement.

5.1.2. Les données perméabilités de la base de données

La Figure 12 suivante présente les dispersogrammes des perméabilités mesurées par les bureaux d'études géotechniques par unité litho-stratigraphique « Bismuth » et colorées selon les classes de la carte géologiques harmonisée au 1/50 000. Son examen montre une cohérence avec les modélisations passées de Bismuth et apporte des données supplémentaires intéressantes pour la future modélisation des capacités d'infiltration :

- les remblais (REMB) sont perméables à 1.10^{-5} m/s ;
- les colluvions (COL) et les limons de plateaux (PLAT) peu perméables à 1.10^{-6} m/s ;
- les molasses semblent scindées en deux domaines : les couches silteuses (SILT) et marneuses (MARN) peu perméable à 1.10^{-6} m/s et un horizon de sable (SABL), sables et argiles (MOLA) et indifférenciée (XMOL) plus perméable 1.10^{-5} m/s du moins en tête où ils sont toujours observés ;
- les alluvions argilo-limoneux (AMAL, 1AL) sont en moyenne moins perméables que le sablo-graveleux aquifère (2.10^{-5} m/s). Pour la couche sableuse (AMSA), on constate que deux domaines (Fx – terrasse moyenne et Fy Basse terrasse) sont séparables pour des perméabilités bonnes (1.10^{-4} m/s) en basse terrasse et faibles pour la moyenne terrasse (1.10^{-6} m/s).

CAPacité d'Infiltration des eaux pluviales du territoire de TOULOUSE Métropole (CAPITOUL)



Avec Fxb : alluvions rissiennes des terrasses moyennes ; Fyb : alluvions wurmiennes des terrasses inférieures des rivières ; FybGA : alluvions wurmiennes des terrasses inférieures de la Garonne et de l'Hers ; Fz : alluvions fluviatiles actuels ; Fz1 : alluvions des bas niveaux de la Garonne et de l'Hers ; Fz2 : alluvions du lit majeur de la Garonne ; g1c : Molasses indifférenciées ; RCg-m : Formation résiduelle de pentes ; Rg-m : Formation résiduelle de plateaux ; S : Solifluxions, colluvions et éboulis ; NA : non affecté. Ainsi que : 1AL : argilo-limoneux de la basse terrasse ; 1SA : passée argileuses de la basse terrasse ; 1SG : sablo graveleux de la basse terrasse ; AMAL : alluvions modernes argilo-limoneuse de la basse plaine ; AMAS : passée sableuse dans AMAL ; passée argileuse dans AMSG ; AMSG : alluvions modernes sablo graveleuses de la basse plaine ; COL : Colluvions ; MARN : argiles et marnes des molasses ; MOLA : argile et sables mélangés ; PLAT : limon des plateaux ; REMB : remblais ; SABL : Sables et grés des formations molassiques ; SILT : silts des formations molassiques ; XMOL : Molasse non décrite.

Figure 12 : Dispersogrammes des perméabilités mesurées par les bureaux d'études géotechniques par unité litho-stratigraphique « Bismuth » et colorées selon les classes de la carte géologique harmonisée au 1/50 000.

De fait, il va être intéressant d'enrichir la modélisation de bismuth en considérant sur plusieurs domaines (Basse plaine, Lit majeurs, Hers, molasse) une couche de REMB, COL ou PLAT suivie au moins de deux couches : une moins perméable (AL) recouvrant une plus perméable (SG) avec une molasse en tête MOL1 localement plus perméable que la marne sous-jacente (MOL2).

Sur la base des informations précédentes, de l'extension du périmètre et de la disposition en terrasse des alluvions, une carte géomorphologique simplifiée à 27 classes peut être alors produite par croisement (Figure 13). La carte résultante (Figure 14) sera utilisée et codée pour le calcul des perméabilités et pour la relecture des rapports géotechniques de Toulouse Métropole.

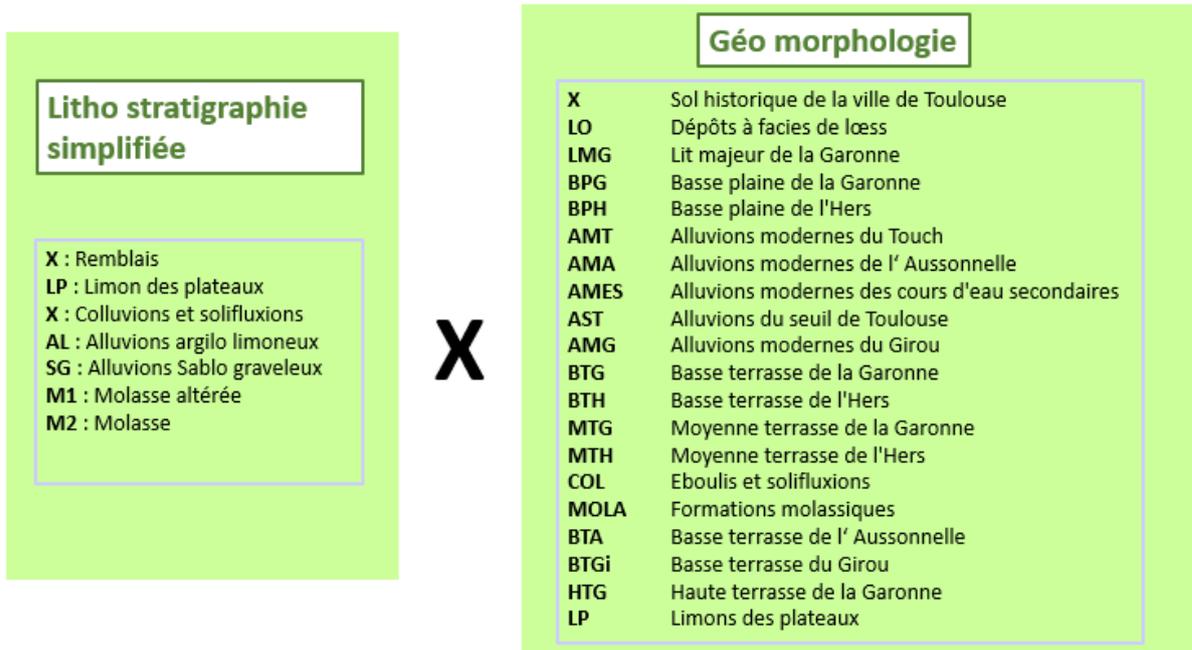


Figure 13 : Croisement Lithographie simplifiée et Géo morphologie.

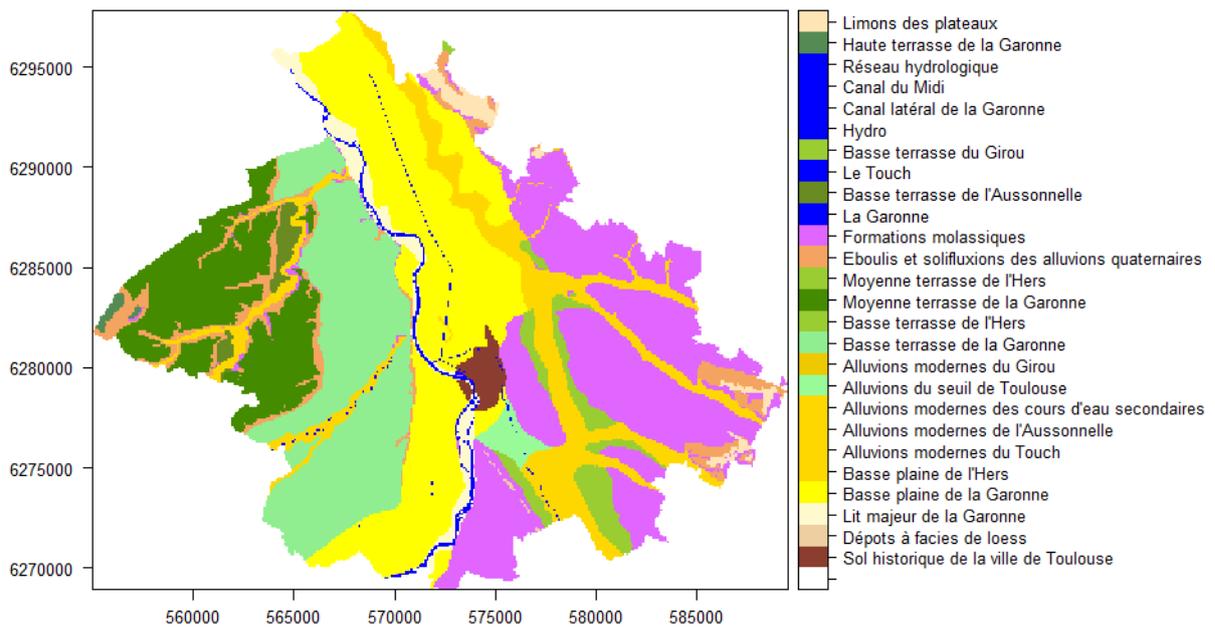
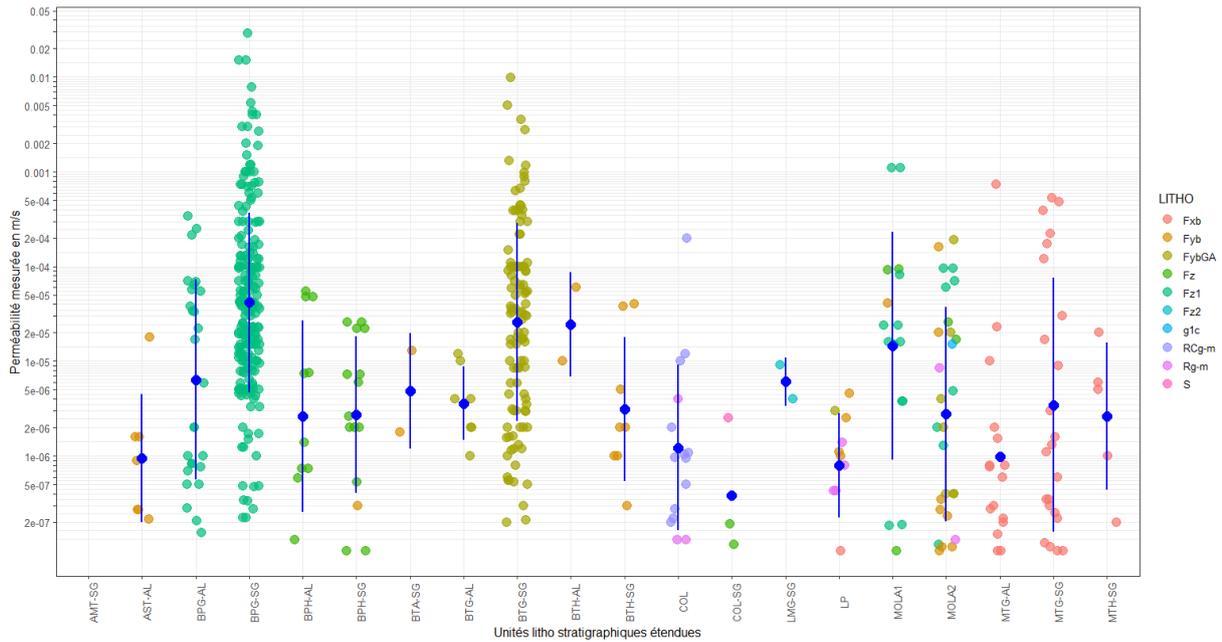


Figure 14 : Domaines géomorphologiques identifiés pour la métropole toulousaine (BISMUTH adapté).

On peut, en première approche, réaliser un croisement entre les domaines morphologiques (Figure 14) et les lithologies (Figure 13) pour obtenir les unités litho-stratigraphiques étendues de la Figure 15.

CAPacité d'Infiltration des eaux pluviales du territoire de TOULOUSE Métropole (CAPITOU)



Avec Fxb : alluvions rissiennes des terrasses moyennes ; Fyb : alluvions wurmiennes des terrasses inférieures des rivières ; FybGA : alluvions wurmiennes des terrasses inférieures de la Garonne et de l'Hers ; Fz : alluvions fluviales actuels ; Fz1 : alluvions des bas niveaux de la Garonne et de l'Hers ; Fz2 : alluvions du lit majeur de la Garonne ; g1c : Molasses indifférenciées ; RCg-m : Formation résiduelle de pentes ; Rg-m : Formation résiduelle de plateaux ; S : Solifluxions, colluvions et éboulis ; NA : non affecté. Ainsi que : AMT – alluvions modernes du Touch ; AST – alluvions du seuil de Toulouse ; BPG basse plaine de la Garonne ; BPH : basse plaine de l'Hers ; BTA : basse terrasse de l'Aussonnelle ; BTG : Basse terrasse de la Garonne ; BTH : Basse terrasse de l'Hers ; COL : Eboulis et solifluxions ; LMG : Lit majeur de la Garonne ; LP : Limons des plateaux ; MOLA1 : Formations molassiques altérée ; MOLA2 : Formations molassiques, MTG : Moyenne terrasse de la Garonne ; MTH : Moyenne terrasse de l'Hers ; AL : Alluvions argilo limoneux ; SG : Alluvions Sablo graveleux.

Figure 15 : Croisement entre les perméabilités mesurées par les BE, les unités litho stratigraphiques étendues et colorées selon les classes de la carte géologique harmonisée au 1/50 000.

On constate une grande dispersion de la classe des SG de la basse plaine de la Garonne, de la basse terrasse et moyenne terrasse non résolue par le croisement. Sur la Figure 16, la moyenne terrasse semble plus perméable au sud qu'au nord, mais sur les autres terrasses, des points de plusieurs décades d'écart sont voisins. On constate aussi que certaines lithologies ne sont pas échantillonnées comme par exemple la vallée du Girou.

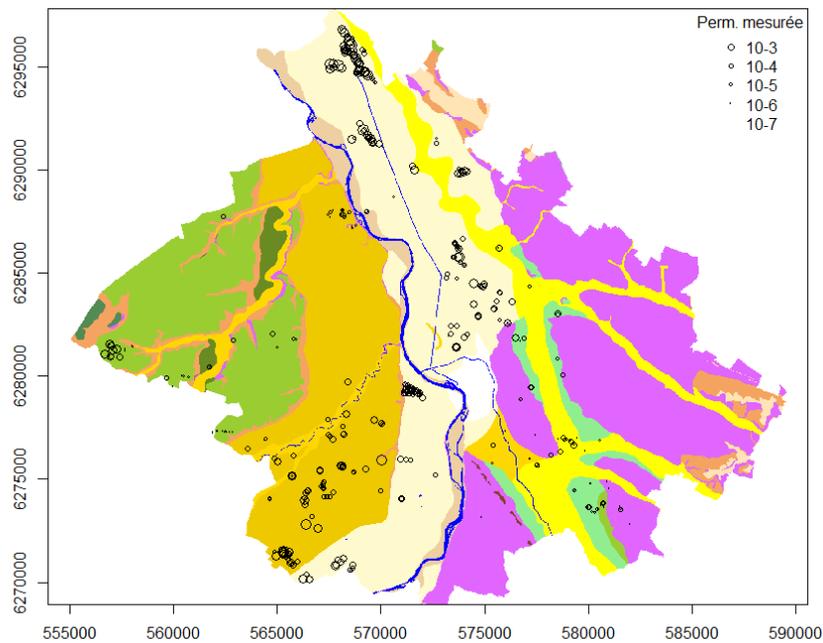


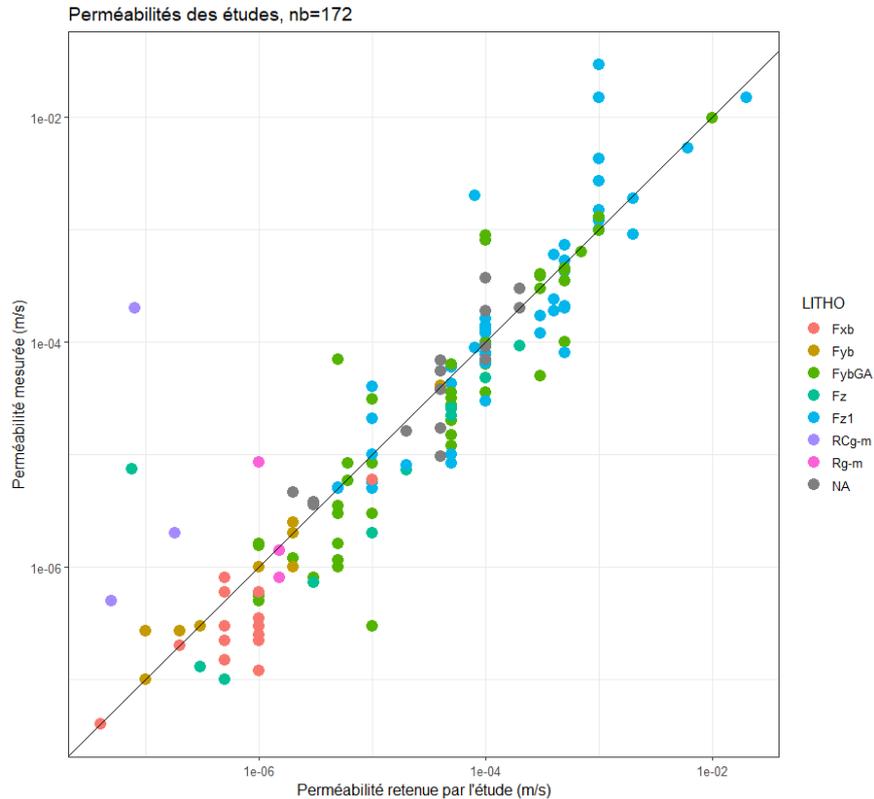
Figure 16 : Perméabilité en m/s mesurée par les bureaux d'étude sur les domaines géomorphologiques.

5.1.3. La correction des perméabilités mesurées par les BE

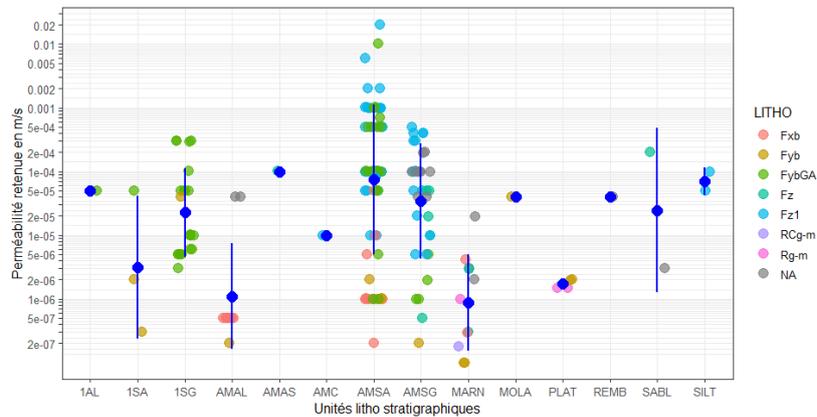
Rarement, le BE utilise directement la perméabilité qu'il a mesurée. Il corrige la valeur selon son expérience. Il est intéressant de regarder la façon dont les BE traitent leurs perméabilités mesurées pour choisir la perméabilité retenue dans l'étude (Figure 17).

On constate sur ces graphiques que les BE corrigent leurs résultats par rapport à des référentiels internes ou BRGM. De manière générale et à des fins sécuritaires, les perméabilités mesurées sont ramenées à leur ordre de grandeur et les valeurs très basses de l'ordre de 10^{-7} m/s considérées plutôt comme des erreurs de prise. De plus, les tests préférentiellement réalisés dans les horizons sablo-graveleux peuvent être contaminés par des argiles ou des limons les précédant.

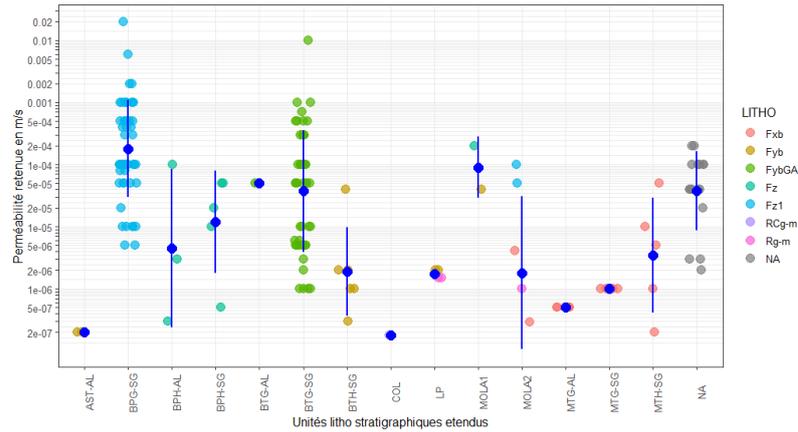
CAPacité d'Infiltration des eaux pluviales du territoire de TOULouse Métropole (CAPITOUL)



Avec Fxb : alluvions Rissiennes des terrasses moyennes ; Fyb : alluvions wurmiennes des terrasses inférieures des rivières ; FybGA : alluvions wurmiennes des terrasses inférieures de la Garonne et de l'Hers ; Fz : alluvions fluviatiles actuels ; Fz1 : alluvions des bas niveaux de la Garonne et de l'Hers ; Fz2 : alluvions du lit majeur de la Garonne ; g1c : Molasses indifférenciées ; RCg-m : Formation résiduelle de pentes ; Rg-m : Formation résiduelle de plateaux ; S : Solifluxions, colluvions et éboulis ; NA : non affecté.



Avec : 1AL : argilo-limoneux de la basse terrasse ; 1SA : passé argileuses de la basse terrasse ; 1SG : sablo graveleux de la basse terrasse ; AMAL : alluvions modernes argilo-limoneuse de la basse plaine ; AMAS : passée sableuse dans AMAL ; passée argileuse dans AMMSG ; AMMSG : alluvions modernes sablo graveleuses de la basse plaine ; COL : Colluvions ; MARN : argiles et marnes des molasses ; MOLA : argile et sables mélangés ; PLAT : limon des plateaux ; REMB : remblais ; SABL : Sables et grés des formations molassiques ; SILT : silts des formations molassiques ; XMOL : Molasse non décrite.



Avec : AMT – alluvions modernes du Touch ; AST – alluvions du seuil de Toulouse ; BPG basse plaine de la Garonne ; BPH : basse plaine de l’Hers ; BTA : basse terrasse de l’Aussonnelle ; BTG : Basse terrasse de la Garonne ; BTH : Basse terrasse de l’Hers ; COL : Éboulis et solifluxions ; LMG : Lit majeur de la Garonne ; LP : Limons des plateaux ; MOLA1 : Formations molassiques altérées, ; MOLA2 : Formations molassiques, MTG : Moyenne terrasse de la Garonne ; MTH : Moyenne terrasse de l’Hers ; AL : Alluvions argilo limoneux; SG : Alluvions Sablo graveleux.

Figure 17 : Perméabilités retenues comparées aux mesurées et repartition de ces perméabilités retenues selon les unités litho-stratigraphiques Bismuth et étendus.

On obtient les deux tableaux statistiques suivants pour les deux systèmes d’unités litho-stratigraphiques (Tableau 4 et Tableau 5).

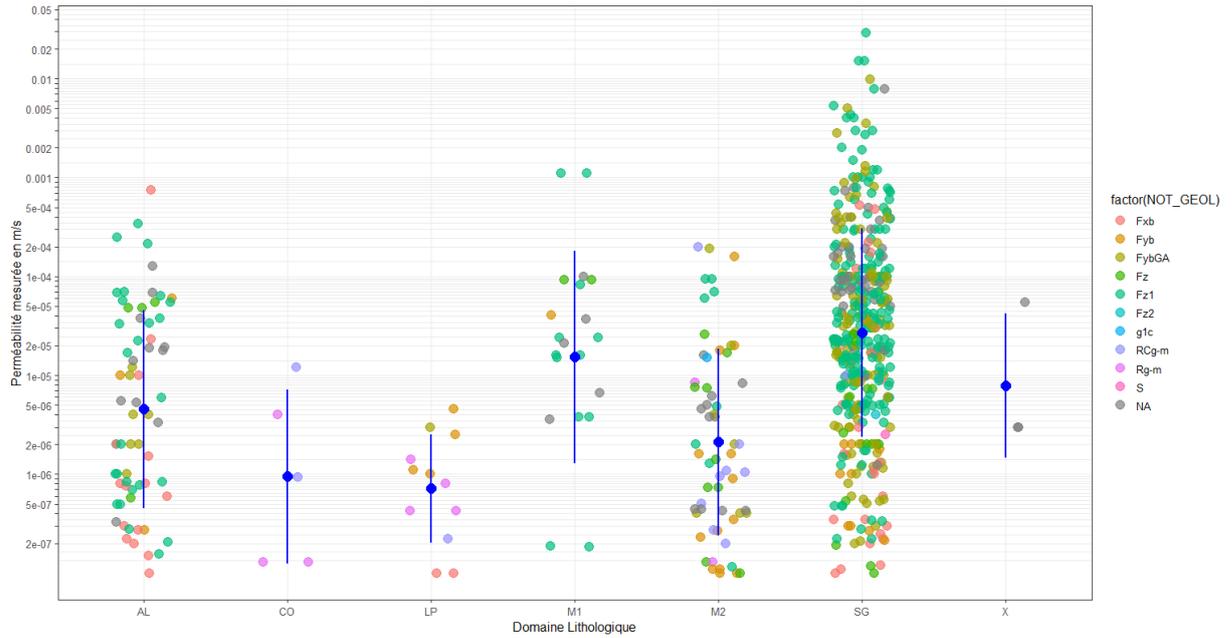
Unités litho-stratigraphique (BISMUTH)	mesuré			Retenu		
	médiane	min	max	médiane	min	max
1AL	1.10E-05	1.00E-05	6.00E-05	5.00E-05		
1SA	5.55E-05	3.00E-07	2.80E-03	2.00E-06	3.00E-07	5.00E-05
1SG	2.00E-05	1.00E-07	5.00E-03	1.00E-05		
AMAL	1.30E-06	0.00E+00	7.43E-04	5.00E-07	2.00E-07	4.00E-05
AMAS	4.79E-05	4.78E-05	4.80E-05	1.00E-04		
AMC	2.10E-05	1.20E-06	5.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05
AMSA	6.38E-05	0.00E+00	2.90E-02	1.00E-04	1.00E-04	2.00E-02
AMSG	2.20E-05	0.00E+00	7.83E-03	5.00E-05	2.00E-07	5.00E-04
COL	9.00E-07	1.00E-07	1.20E-05			
MARN	1.10E-06	0.00E+00	2.00E-04	3.00E-07	0.00E+00	2.00E-05
MOLA	3.70E-05	1.50E-05	8.25E-05	4.00E-05		
PLAT	9.00E-07	1.00E-07	4.60E-06	1.80E-06	1.50E-06	2.00E-06
REMB	3.00E-06	3.00E-06	5.50E-05	4.00E-05		
SABL	4.98E-05	1.00E-07	1.00E-04	1.02E-04	3.00E-06	2.00E-04
SILT	1.00E-06	1.00E-07	7.00E-05	7.50E-05	5.00E-05	1.00E-04
XMOL	1.61E-05	2.00E-07	1.10E-03			

Tableau 4 : Résumé des mesures et des retenues pour les unités litho-stratigraphiques (BISMUTH).

Unités litho-stratigraphique étendues	mesuré			Retenu		
	médiane	min	max	médiane	min	max
AMT-SG	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-07			
AST-AL	9.00E-07	2.00E-07	1.80E-05	2.00E-07		
BPG-AL	2.00E-06	0.00E+00	3.39E-04			
BPG-SG	3.30E-05	0.00E+00	2.90E-02	1.00E-04	5.00E-06	2.00E-02
BPH-AL	7.00E-07	1.00E-07	5.47E-05	3.00E-07	1.00E-07	1.00E-04
BPH-SG	2.60E-06	1.00E-07	2.60E-05	2.00E-05	5.00E-07	5.00E-05
BTA-SG	7.40E-06	1.80E-06	1.30E-05			
BTG-AL	4.00E-06	1.00E-06	1.20E-05	5.00E-05		
BTG-SG	3.20E-05	2.00E-07	9.82E-03	5.00E-05	1.00E-06	1.00E-02
BTH-AL	5.00E-06	0.00E+00	6.00E-05			
BTH-SG	2.00E-06	3.00E-07	4.00E-05	1.50E-06	3.00E-07	4.00E-05
COL	1.00E-06	1.00E-07	2.00E-04	1.00E-07	0.00E+00	2.00E-07
COL-SG	2.00E-07	0.00E+00	2.50E-06			
LMG-SG	6.60E-06	4.00E-06	9.20E-06			
LP	1.00E-06	1.00E-07	4.60E-06	1.80E-06	1.50E-06	2.00E-06
MOLA1	2.01E-05	1.00E-07	1.10E-03	1.20E-04	4.00E-05	2.00E-04
MOLA2	2.00E-06	0.00E+00	1.90E-04	1.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
MTG-AL	3.00E-07	0.00E+00	7.43E-04	5.00E-07		
MTG-SG	1.10E-06	0.00E+00	5.27E-04	1.00E-06		
MTH-SG	3.00E-06	0.00E+00	2.00E-05	3.00E-06	0.00E+00	5.00E-05

Tableau 5 : Résumé des mesures et des retenues pour les unités litho-stratigraphiques étendues.

Enfin, il est possible de comparer ces dernières à celles obtenues par le calage du modèle BISMUTH (Figure 18). On constate de fortes variations. Les valeurs retenues, et à défaut, mesurées par BE doivent être corrigées par BISMUTH pour certaines (Harmonisation).



Avec AL : alluvions argilo limoneux, SG : alluvions sablo graveleux, M1 : Molasse altérée, M2 : Molasse, X : remblais, LP : limon des plateaux, COL : colluvion et solifluxions.

Figure 18 : Perméabilités retenues comparées aux mesurées et répartition de ces perméabilités retenues selon les unités litho-stratigraphiques Bismuth de 2007 et colorées selon les classes de la carte géologique harmonisée au 1/50 000.

Au final, le Tableau 6 présente l'harmonisation finale entre nos deux sources de perméabilité (perméabilités retenues par le BE, Perméabilité BISMUTH de 2007), le tout selon les unités litho-stratigraphiques étendues. Ces valeurs cohérentes entre elles pourront être affectées aux classes d'un modèle géologique multifaciés de la métropole.

Unités litho- stratigraphique étendues	Retenues et à défaut mesuré par BE	Perméabilités BISMUTH (Nord, Mediane, Sud, Limite SUD)				Harmonisées
X				1.00E-05		1.00E-05
LOESS				1.00E-06		1.00E-06
LMG-AL				5.00E-04		5.00E-04
LMG-SG	6.60E-06			8.00E-04		8.00E-04
BPG-AL	2.00E-06					1.00E-05
BPG-SG	1.00E-04	2.00E-03	1.10E-03	9.00E-05	1.00E-03	variable N/M/S
BPH-AL	3.00E-07			5.00E-07		3.00E-07
BPH-SG	2.00E-05			1.00E-04		1.00E-05
AMT-AL	2.00E-07					2.00E-07
AMT-SG	1.00E-07					1.00E-04
AMA-AL	5.00E-05					5.00E-05
AMA-SG	5.00E-05	1.00E-04				1.00E-05
AMES-AL				1.00E-05		1.00E-05
AMES-SG				1.00E-03		1.00E-03
AST-AL				1.00E-06		1.00E-06
AST-SG				1.00E-04		1.00E-04
AMGi				5.00E-05		5.00E-04
BTG-AL		2.00E-05			2.00E-04	variable N/M/S
BTG-SG				1.00E-04		1.00E-04
BTH-AL	5.00E-06					5.00E-06
BTH-SG	1.50E-06					1.00E-05
MTG-AL	5.00E-07					1.00E-06
MTG-SG	1.00E-06	5.00E-04	4.00E-04	2.00E-03		variable N/M/S
MTH-AL						1.00E-06
MTH-SG	3.00E-06			1.00E-05		1.00E-05
COL	1.00E-07			1.00E-03		1.00E-06
MOLA1	1.20E-04					1.00E-05
MOLA2	1.00E-06			1.00E-06		1.00E-06
BTA-AL						1.00E-06
BTA-SG	7.40E-06			1.00E-04		1.00E-05
HTG				2.00E-03		2.00E-03
LP	1.80E-06					1.80E-06

Tableau 6 : Harmonisation des perméabilités des unités litho-stratigraphiques mesurées par les BE et BISMUTH.

5.2. ÉTABLISSEMENT DES HAUTES EAUX (HE) PAR LES BE

Les constats sur la base de la consultation de 227 rapports géotechniques sont les suivants :

- s'il n'y a pas une mesure des hautes eaux (HE) proche, le BE mesure les eaux souterraines pendant un an et en déduit une HE puis l'épaisseur de ZNS ;
- les hautes eaux exceptionnelles (HEE) sont estimées par une règle simple (HE +1m) ;
- les perméabilités sont majoritairement estimées sur un forage de faible diamètre par essai (Lefranc/ Nasberg) ;
- l'ouvrage est dimensionné en conséquence et ancré dans les couches de sables et graviers sous la couche de surface.

La lecture de ces rapports montre que la méthode utilisée pour la fixation des HE n'est pas une approche fréquentielle et se base sur les minimums/maximums d'une année. Ce n'est pas spécifique à la métropole toulousaine. La métropole rennaise par exemple a utilisée pour son ICI les données piézométriques 2018.

Afin de procéder de manière plus scientifique, le BRGM va s'attacher à situer en fréquence ses hautes eaux et utiliser un métamodèle pour estimer les HEE (*cf. chapitre 5.5*).

5.3. LA MODÉLISATION GÉOLOGIQUE DES SOLS DE LA MÉTROPOLE

La métropole toulousaine a une géologie et géomorphologie en terrasses qui conditionnent l'évaluation de l'indice de capacité d'infiltration. Une modélisation fine des sols urbains (25x25x1) sur une profondeur de 10 m a été réalisée au moyen des ouvrages géotechniques recensés (2 800), associés à ceux du modèle Bismuth de 2007 (Figure 19).

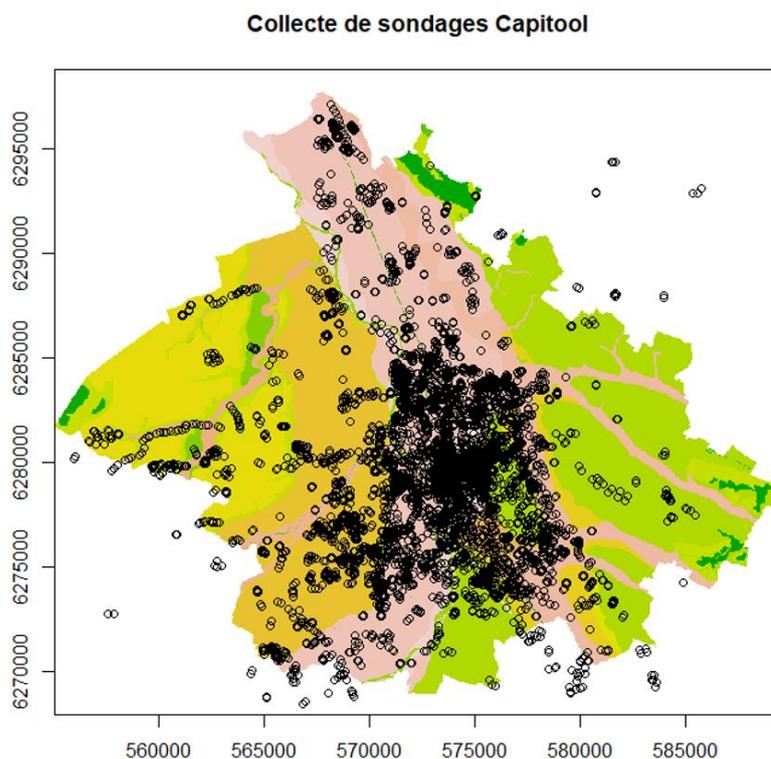


Figure 19 : Sondages de sol disponibles pour l'étude.

Deux techniques ont été utilisées en parallèle pour donner sensiblement les mêmes résultats : les gaussiennes tronquées et la simulation markovienne. Cette dernière a été retenue. Cette méthode mathématique s'appuie sur les mathématiques des chaînes de Markov (Carle, 1996, 1999) et s'intéresse aux probabilités pour une maille ou variable « Z » à un emplacement « u » d'avoir un faciès ou une activité donnée « k », sachant la nature de ses voisins « u_k ».

Cette méthode donne de bon résultats pour les données multi-catégorielles trop délicates ou nombreuses pour être co-krigées. Cette modélisation a été réalisée au moyen d'algorithmes dits du MCMC (Ii, 2007 et 2007b) en langage R (Sartore, 2013). Récemment, la méthode a été améliorée par Carle et Fogg (2020) pour prendre en compte les données auxiliaires.

La modélisation comprend trois étapes : en premier lieu les transiogrammes sont calculés pour l'ordonnancement des faciès et les trois directions principales. Un modèle est calé à chaque transiogramme (Figure 20), par suite la chaîne de Markov est déployée sur une grille fine dont peuvent être extraites les coupes planes (Figure 21).

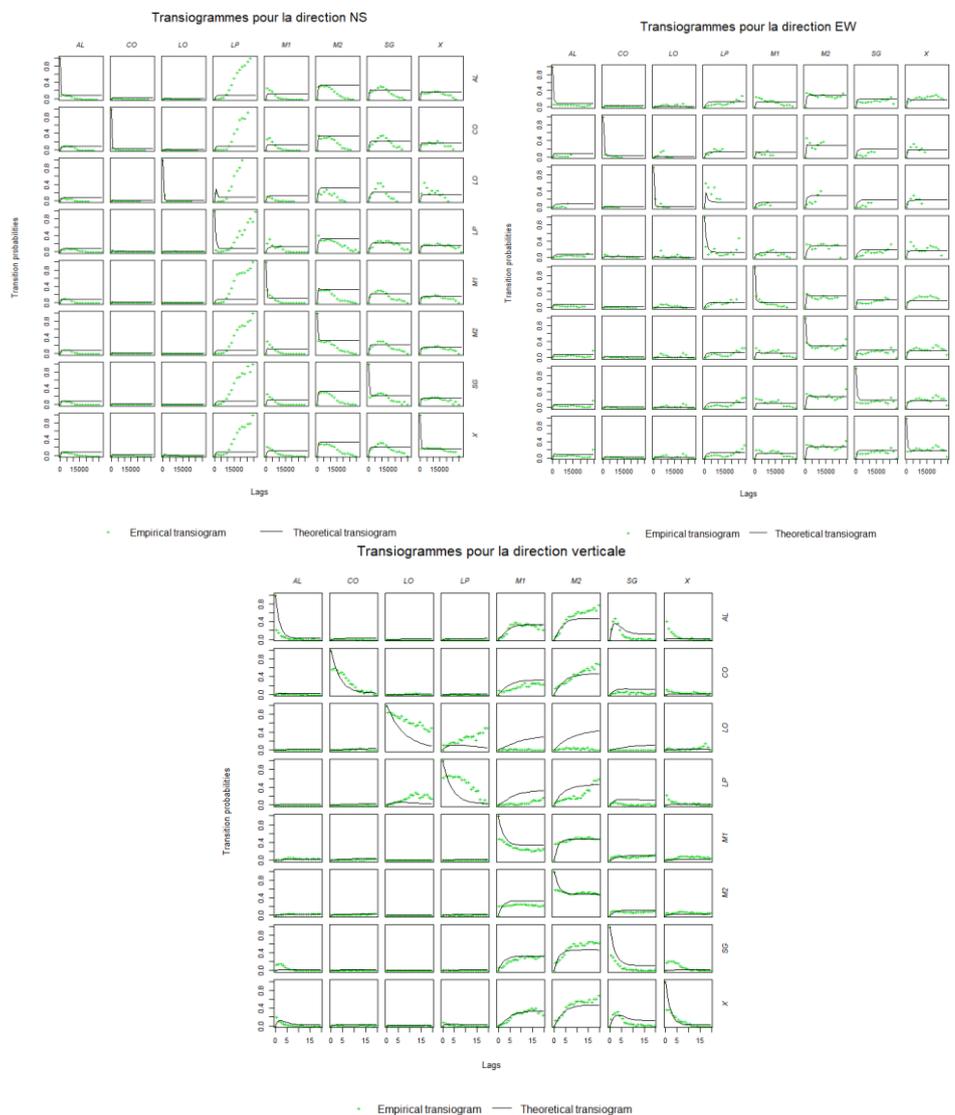


Figure 20 : Paramètres du modèle de transiogrammes pour les trois principales directions.

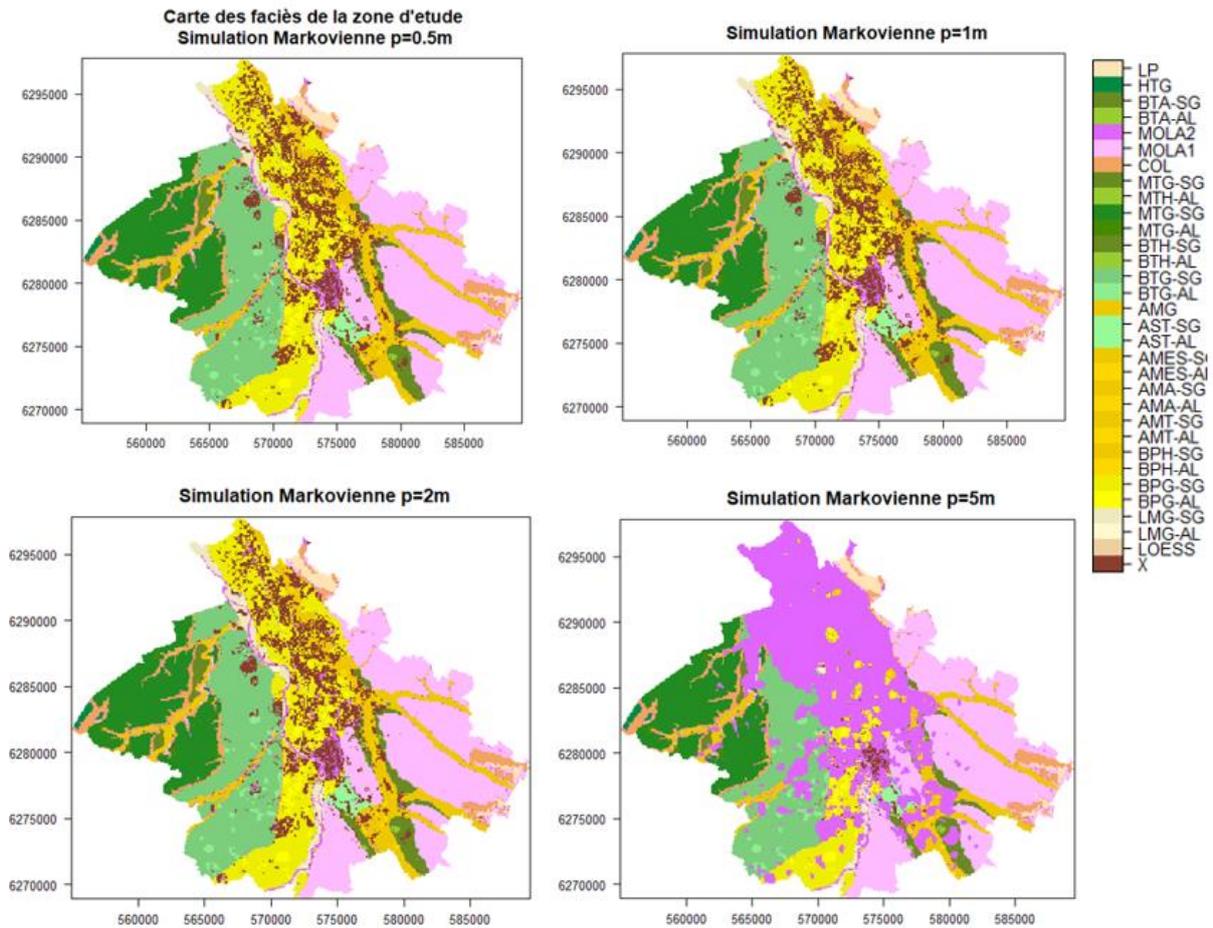


Figure 21 : Coupes horizontales des faciès modélisés pour la métropole de Toulouse.

Enfin un modèle tridimensionnel (Figure 22) présente les résultats d'ensemble.

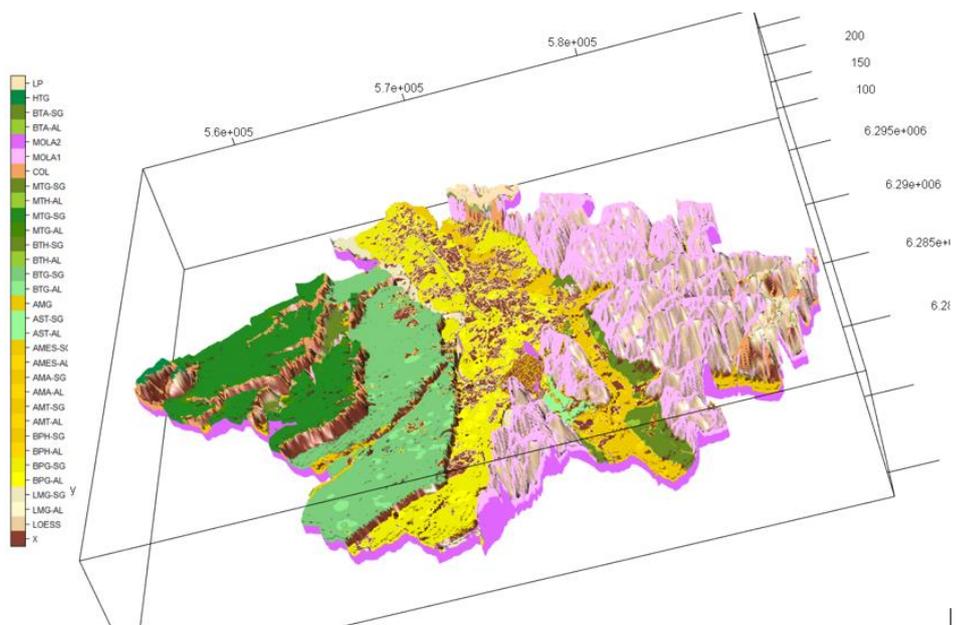


Figure 22 : Vue 3D du modèle multi-faciès de la métropole toulousaine.

Extraite par intégration sur colonne de ce modèle tridimensionnel, les cartes dérivées des formations limono-argileuses de surface et des alluvions sous-jacentes sablo graveleuses vont être le plus utile pour dériver les cartes de perméabilités pour le calcul de l'ICI.

5.4. CARTES D'ÉPAISSEUR DE LA ZONE NON SATURÉE

5.4.1. Données hautes eaux de la Métropole

a) BISMUTH – BISMUTH2

Les seules mesures denses des niveaux d'eaux à l'échelle de la métropole datent de 2007 – 2008 (BISMUTH – BISMUTH2). Ce suivi, limité dans le temps (Figure 23), comprenait :

- 5 campagnes piézométriques réalisées sur 120 ouvrages entre février 2007 et juin 2008 (BISMUTH 2) ;
- la représentation fiable des fluctuations piézométriques sur le territoire de Toulouse et son agglomération.

Les résultats du projet ont été concluants et ont permis de produire divers livrables hautes résolutions :

- modèle géologique Bismuth qui ne couvre que la partie centrale du périmètre métropole ;
- la mise en place d'un réseau quantitatif de connaissances des eaux souterraines de Toulouse ;
- les cartes précises de Basses Eaux et Hautes Eaux (Figure 24) ;
- un avis technique du BRGM sur l'étude réalisée par la Ville de Toulouse en vue de la mise en œuvre d'un plan de prévention du risque sécheresse.

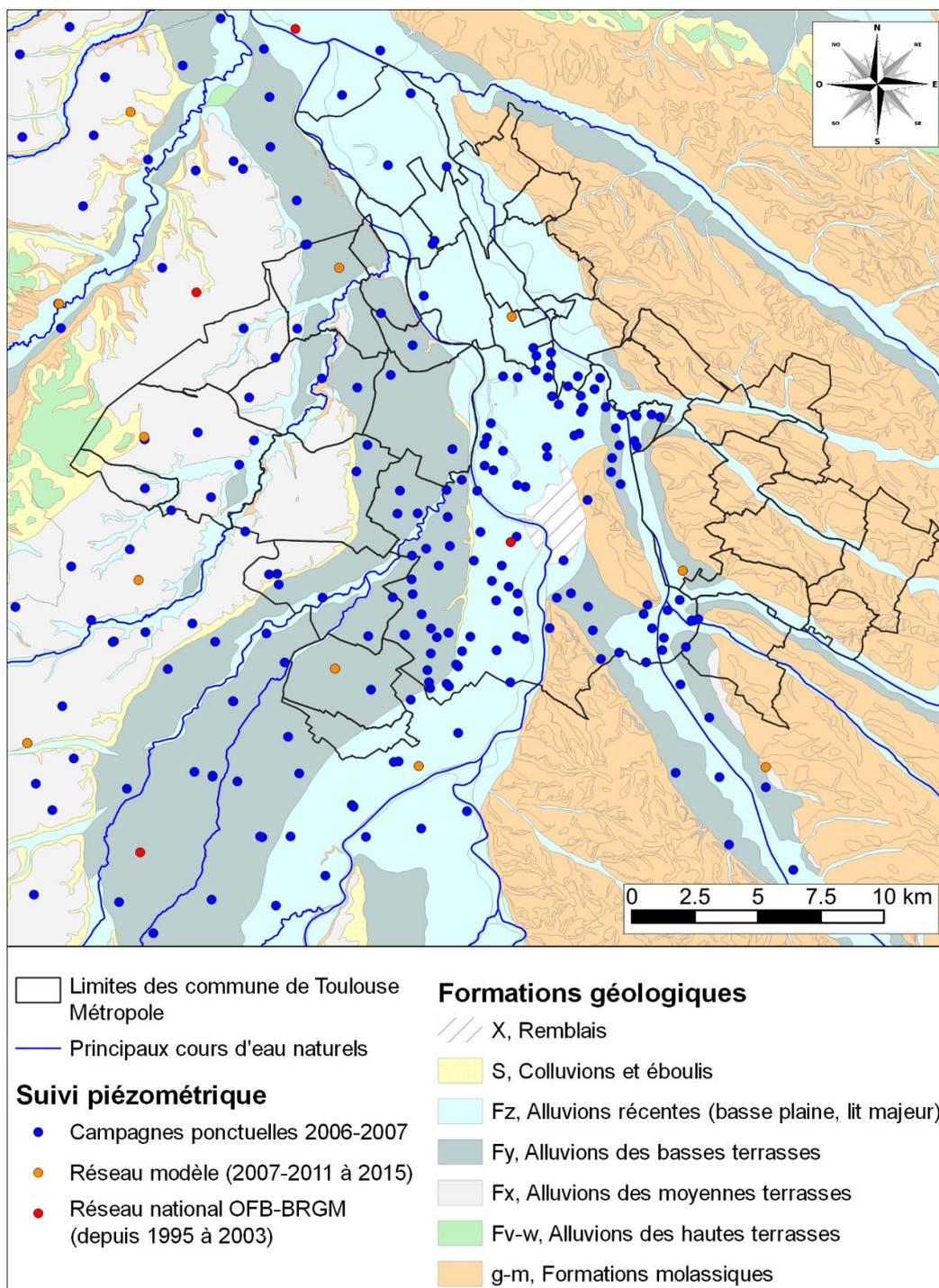


Figure 23 : Suivi piézométrique de la nappe alluviale de la Garonne.

Le suivi des 120 piézomètres a été arrêté en 2009 et n'a pas été repris par la ville de Toulouse. Seul un suivi par le BRGM de 5 piézomètres pour le projet MOD 31 a pu être maintenu quelques années.

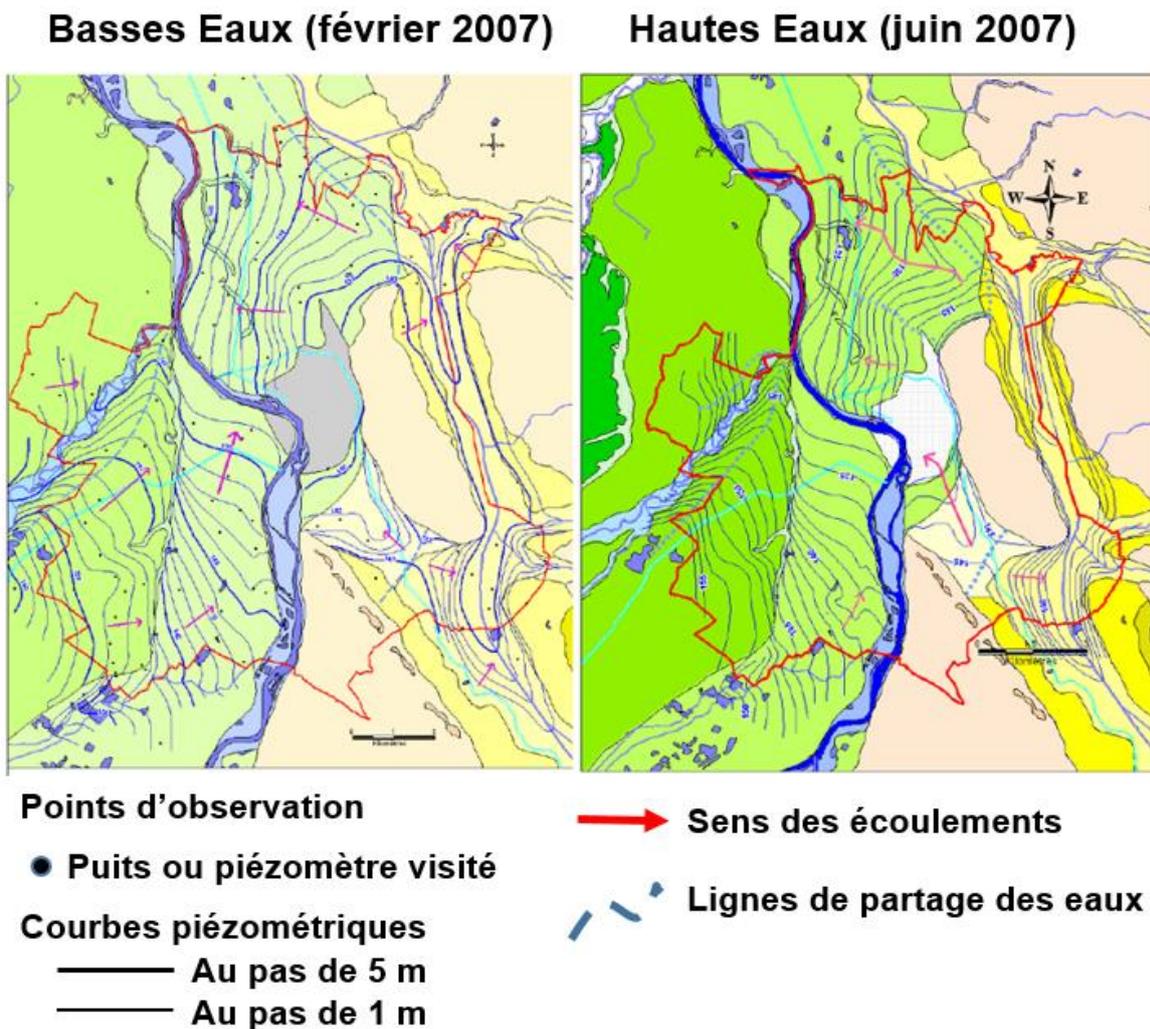


Figure 24 : Représentation fiable des fluctuations piézométriques sur le territoire de Toulouse et son agglomération (BISMUTH).

b) Réseau de surveillance urbain

Le réseau de suivi MOD 31 ne comprend que cinq piézomètres sur le territoire de Toulouse Métropole. Il a été installé dans le cadre de la modélisation de la nappe alluviale de la Garonne en Haute-Garonne à :

- Balma : Basse Plaine, rive droite ;
- Aucamville : Basse Plaine, rive droite ;
- Cugnaux : Basse Terrasse, rive gauche ;
- Aussonne : Basse Terrasse, rive gauche ;
- Pibrac : Moyenne Terrasse, rive gauche.

Ce suivi a été conduit entre juin 2007 et mars 2011 (Figure 25). L'enregistreur de Cugnaux est resté en place.

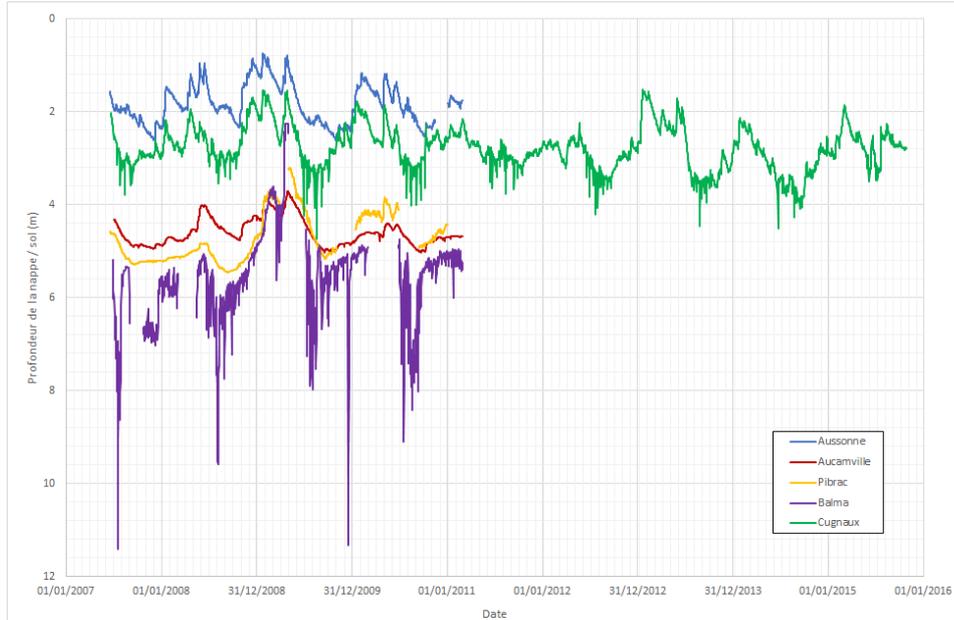


Figure 25 : Suivi des piézomètres du réseau « mod 31 » sur le territoire de Toulouse Métropole.

c) Piézomètre Avenue du Lombez (09838D0727/F)

Le seul point de suivi de la nappe alluviale avec une chronique longue (25 ans) au sein de Toulouse Métropole est le piézomètre de l'avenue du Lombez. Lui seul peut nous apporter un caractère fréquentiel aux hautes eaux calculées (Figure 26).

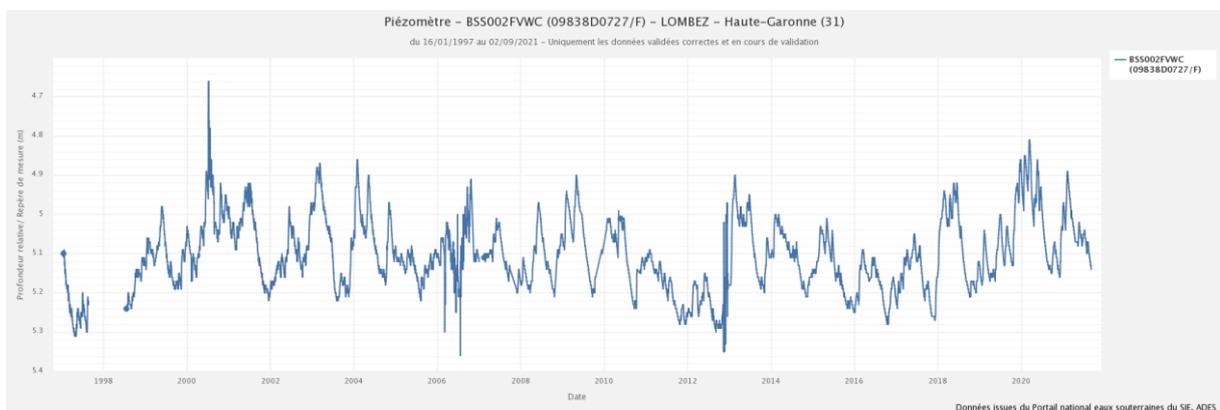


Figure 26 : Chronique piézomètre 09838D0727/F.

Pour estimer la période de retour « 2 ans » des hautes eaux à partir de la chronique du piézomètre de l'Avenue du Lombez (09838D0727/F), les données suivantes ont été extraites pour chaque année à savoir :

- le maximum des 12 niveaux moyens mensuels ;
- le maximum des 365 (366) niveaux maximum journaliers.

d) Détermination de la fréquence des HE2007

Notre hypothèse est que nos HE2007 sont des HE de fréquence 2 ans (fréquence de 0,50). Le piézomètre de l'Avenue du Lombez est suivi depuis 1997. Deux séries de 25 ans ont donc été obtenues et triées (niveau le plus bas au rang 1) :

- concernant les maxima des niveaux moyens mensuels, l'année 2007 se situe au 10^e rang, à égalité avec les 9^e et 11^e rang. Cela correspond à une fréquence empirique de 0,34 à 0,42. La fréquence de 0,50, correspondant à une période de retour de 2 ans, correspond à un niveau supérieur de 1 cm au niveau de l'année 2007 ;
- concernant les maxima des niveaux maximums journaliers, l'année 2007 se situe au 7^e rang, à égalité avec le 8^e rang. Cela correspond à une fréquence de 0,26 à 0,31. La fréquence de 0,50, correspondant à une période de retour de 2 ans, correspond à un niveau supérieur de 4 cm au niveau de l'année 2007.

Sur la base du suivi du piézomètre de l'Avenue du Lombez, les hautes eaux 2007 correspondent donc à des hautes eaux très légèrement inférieures à la moyenne, mais à quelques centimètres près des hautes eaux ayant une période de retour de 2 ans. Enfin, la campagne de mesures 2007 a été effectuée en juin, ce qui correspond bien au mois où ont été enregistrées la moyenne mensuelle maximale et le maximum journalier de l'année.

Les HE2007 sont donc des HE de fréquence 2 ans (fréquence de 0,50).

Pour mémoire, les dépassements de ces HE de fréquence 2 ans (fréquence de 0,50) ont été calculés et sont les suivants :

- Max des moyennes mensuelles : HE 2 ans dépassées 41 mois sur 284 (soit 14 % du temps) ;
- Max annuel journalier : HE 2 ans dépassées 667 jours sur 8 294 (soit 8 % du temps).

e) Situation des HE2007 par rapports à des HEE de période retours plus importants (10 et 50 ans)

La taille de l'échantillon (25 ans) est trop faible pour définir des HEE de période de retour 50 ans. Nous ne pouvons que comparer au HE 10 ans (Tableau 7).

L'écart HE 10 ans – HE 2 ans est faible : 11 cm (12 à 15 cm avec HE 2007 pour Toulouse et estimé de 50 - 70 cm pour la basse plaine et les terrasses). Il s'agit là sans doute de la raison pour laquelle les bureaux d'études ajoutent sur la métropole 1 m à leur HE pour déterminer les HEE.

	Maximum annuel des moyennes mensuelles		Maximum annuel journalier	
	Année(s)	Niv. Piézo. (m NGF)	Année(s)	Niv. Piézo. (m NGF)
HE 2007				
= Année campagne piézo.	2007	133.98	2007	133.99
HE période de retour 2 ans	2002 ; 2014	133.99	2002 ; 2008 ; 2012	134.03
= Année HE médiane				
HE période de retour 10 ans	2003	134.1	2019	134.14

Tableau 7 : Statistique des niveaux des HE 10 ans et HE 2 ans.

f) Comparaison Av. Lombez avec les huit autres piézomètres (hors TM) suivant la nappe alluviale de la Garonne

Le Tableau 8 présente les maximums statistiques collectés par terrasse alluviale, et leur examen montre :

- des résultats très proches (à quelques cm près) pour la Basse et la Moyenne Terrasse ainsi que deux piézomètres sur quatre dans la Basse Plaine ;
- un écart conséquent (de l'ordre du mètre) pour le Lit Majeur qui traduit l'influence des crues de la Garonne sur la nappe ;
- un écart intermédiaire (30-50 cm) pour les deux autres piézomètres de la Basse Plaine.

Terrasse Alluviale	Piézomètre	Max Moy. Mensuelles	Max. Annuel
Lit Majeur	Ondes	1	1.9
	Lilou	1.3	2.69
Basse Plaine	Le Fauga	0.27	0.28
	Av. Lombez	0.11	0.11
	Boutoli	1.39	1.71
	St-Porquier	1.22	1.73
Basse Terrasse	St-Elix	0.8	0.74
Moyenne Terrasse	Lamasquère	0.42	0.5
	Tuileries	0.51	0.55

Tableau 8 : Analyse des HE avec période de retour 2 ans / 10 ans.

L'écart HE10 ans - HE 2ans a été calculé par terrasses (Tableau 9) pour ces ouvrages de manière à évaluer la pratique des bureaux d'étude (Ajout de 1 m aux HE de leur mesures). On constate des valeurs proches du mètre retenu.

Terrasse Alluviale	Nombre piézos	Ecart HE 10 ans - HE 2 ans (m)	
		Max Moy. Mensuelles	Max. Annuel
Lit Majeur	2	1.15	2.3
Basse Plaine	4	0.75	0.96
Basse Terrasse	2	0.61	0.62
Moyenne Terrasse	1	0.51	0.55
Toutes terrasses	9	0.78	1.13

Tableau 9 : Moyennes par terrasse.

Un calcul de ZNS HE2ans peut servir de base de calcul pour ensuite translater de 1 m pour obtenir la ZNS HE10ans. Si l'on s'intéresse maintenant à la localisation des points à faible écart HE2 ans –HE10 ans +1 m (Figure 27 et Figure 28) qui traduirait les exceptions à la simplification statistique, on obtient sur 138 points de mesures :

- le nombre de points « problématiques » (épaisseur ouvrage d'infiltration < 0,5 m) :
 - 10 points (7 %) avec estimation HE annuelles = Moyenne mensuelle maximale,

- 14 points (10 %) avec estimation HE annuelles = Valeur journalière maximale ;
- le nombre de points « limites » ($0,5\text{ m} < \text{épaisseur ouvrage d'infiltration} < 1\text{ m}$) :
- 23 points (17 %) avec estimation HE annuelles = Moyenne mensuelle maximale,
- 28 points (20 %) avec estimation HE annuelles = Valeur journalière maximale.

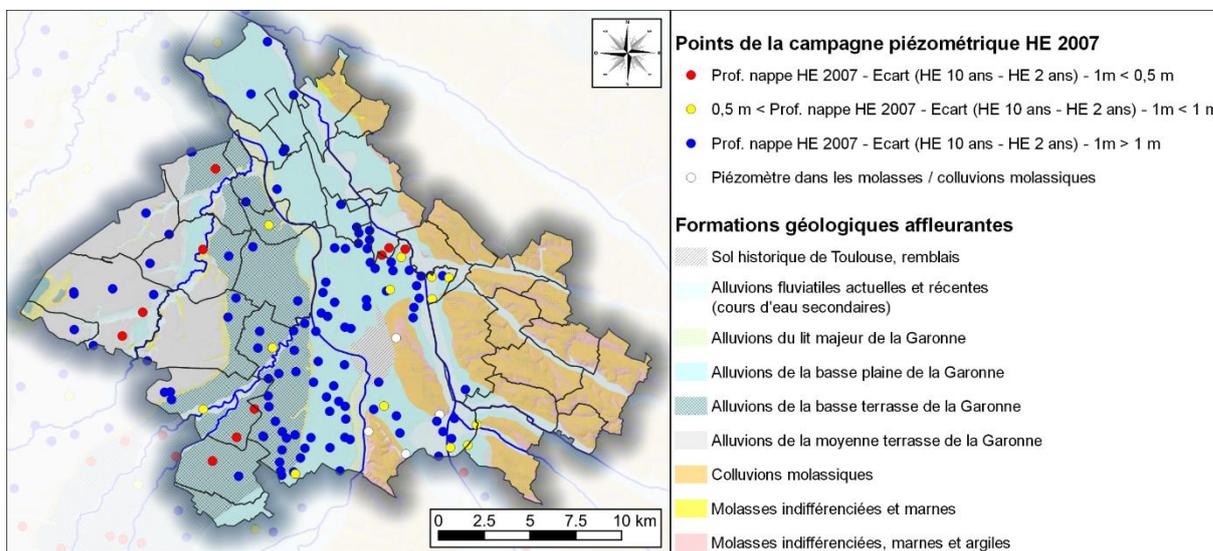


Figure 27 : Campagne piézométrique HE 2007 : Soustraction de l'écart HE 10 ans – HE 2 ans + 1 m à la profondeur mesurée - Méthode estimation HE annuelle = Moyenne mensuelle maximale.

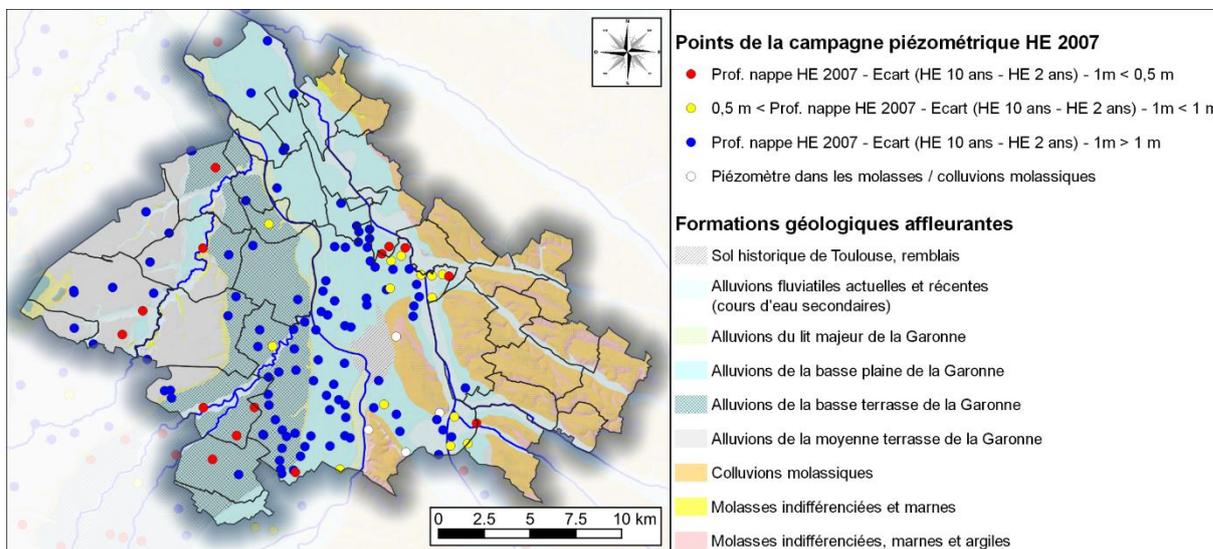


Figure 28 : Campagne piézométrique HE 2007 : Soustraction de l'écart HE 10 ans – HE 2 ans + 1 m à la profondeur mesurée - Méthode estimation HE annuelle = Valeur journalière maximale.

Les trois secteurs problématiques principaux identifiés sont :

- Vallée de l'Aussonnelle ;
- Basse Terrasse à l'est de la vallée du Touch ;
- nord-est de Toulouse : quartiers Paléficat, Croix-Daurade, Gabardie, Montredon, Bouaysetto.

Ces secteurs devront faire l'objet d'une attention particulière vis-à-vis de leur possibilité d'infiltration.

g) Limites de la méthode

L'utilisation des écarts moyens HE 10 ans / HE 2 ans n'est pas forcément pertinente pour tous les secteurs. La campagne de mesures couvrant la métropole est ancienne (2007). Des données plus récentes montrent une nappe affleurante / sub-affleurante au nord de l'agglomération.

5.4.2. Calcul de la ZNS

Conformément aux discussions précédentes, le calcul de la ZNS a été réalisé à partir du plan des HE2007 et des données lidar traitées (Figure 29).

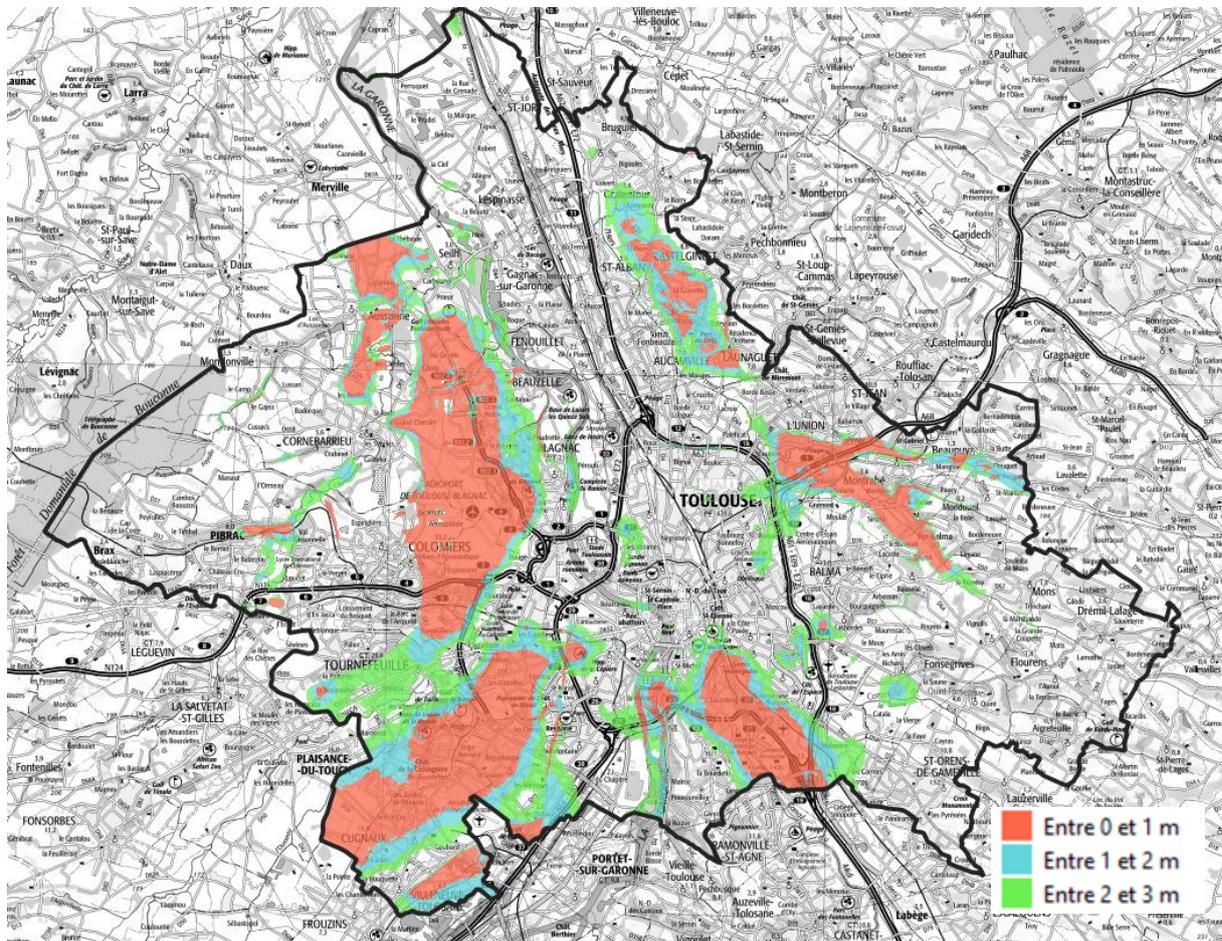


Figure 29 : Détermination de l'épaisseur de la ZNS de base par utilisation des HE2007.

5.5. CALCUL DES EAUX EXCEPTIONNELLES PAR MÉTAMODÈLE

Comme on l'a vu, les bureaux d'étude n'utilisent pas la méthode fréquentielle pour calculer les hautes eaux et se contentent d'ajouter 0,5 à 1 m à leurs valeurs mesurées. Disposant des données de Toulouse Métropole, il était intéressant de tester une méthode scientifique de calcul de ces hautes eaux exceptionnelles.

5.5.1. Construction du métamodèle des hautes eaux exceptionnelles (HEE)

Les Métamodèles (ou « Surrogates ») s'attachent à modéliser la surface de réponse de modèles existants à partir d'un jeu d'entraînement restreint (Figure 30). Leur mécanique est généralement multi-gaussienne avec des formulations proches des calculs de diffusions d'informations (Betancourt *et al.*, 2020).

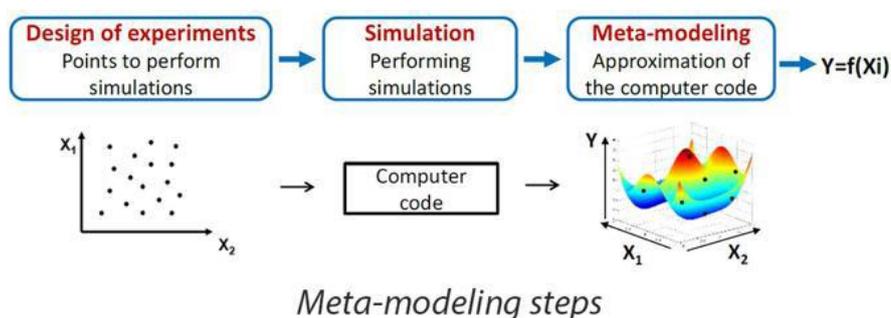


Figure 30 : La construction d'un métamodèle au BRGM d'après Betancourt *et al.* (2020).

Pour le cas de Toulouse Métropole et pour gagner du temps, un métamodèle géostatistique a été réalisé pour reproduire le modèle par différences finies (MARTHE) produit par le BRGM en 2007 (BISMUTH2).

Pour produire la haute eau (HE), le métamodèle prend pour paramètre en chaque point « xi » de la métropole : la formation géologique (GE), l'altitude du point (ALT) et EAU, la distance au point d'eau le plus proche (Garonne, Touch etc..) et une erreur spatialisée modélisée par géostatistique (f).

$$HE_i \sim GEO_i + ALT_i + EAU_i + f(x_i, \text{modèle} = \text{géostatistique})$$

Ce modèle reproduit les hautes eaux 2007 à plus de 97 % et les résultats de la validation croisée sont présentés en Figure 31. Hormis quelques particularités hydrogéologiques, le métamodèle se comporte bien.

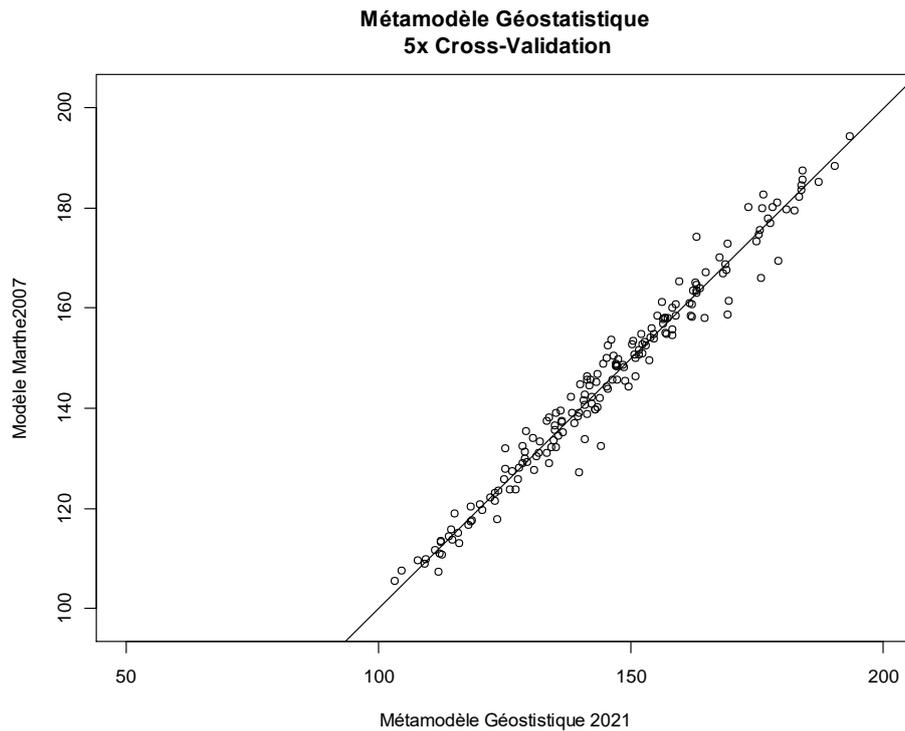
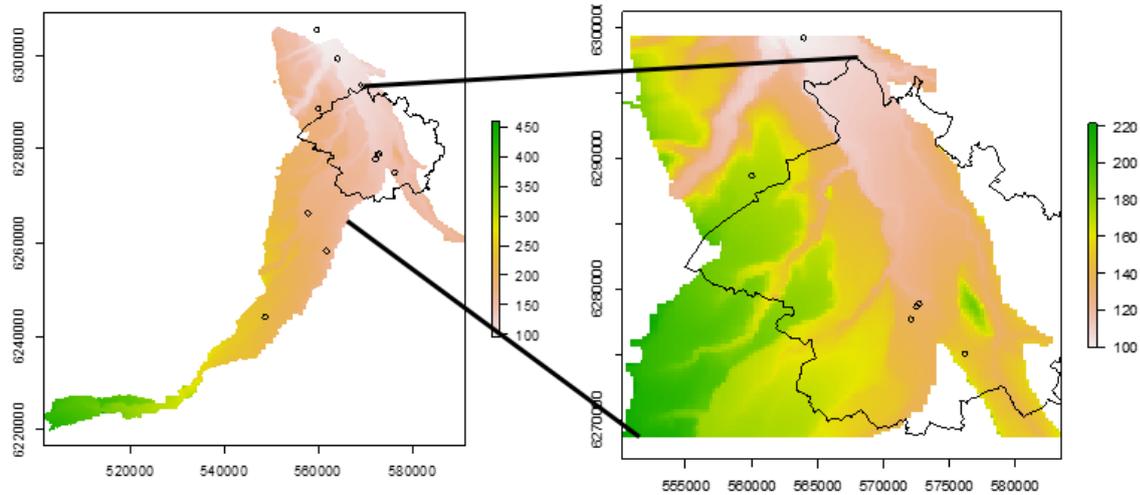


Figure 31 : Validation croisée du métamodèle.

Les figures suivantes présentent le fil des opérations de construction du métamodèle :

- prise en main du modèle 2007 et découpage de la zone d'intérêt (Figure 32) ;
- ajustement d'une loi entre les plus hautes eaux 2007 et 2018 et application de cette loi au modèle 2007 pour obtenir une estimation des hautes eaux 2021 (Figure 33) ;
- préparation des couches auxiliaires à la prédiction GEO, ALT et EAU (Figure 34) ;
- détermination de l'erreur spatiale f , et en particulier de son variogramme (Figure 35, Tableau 10) ;
- application du modèle pour obtenir la médiane de prédiction et simulations stochastiques conditionnelles pour déterminer la médiane, les quantiles 90 et 95 (Figure 36).

Modèle Marthe HE2007 (BISMUTH)



Note : Les points noirs sont les points de suivis 2008-2021. Les coteaux molassiques ouest et sud non aquifères ne sont pas modélisés.

Figure 32 : Modèle des hautes eaux (Marthe 2007) et Zoom sur la couverture de la zone d'intérêt par le modèle 2007.

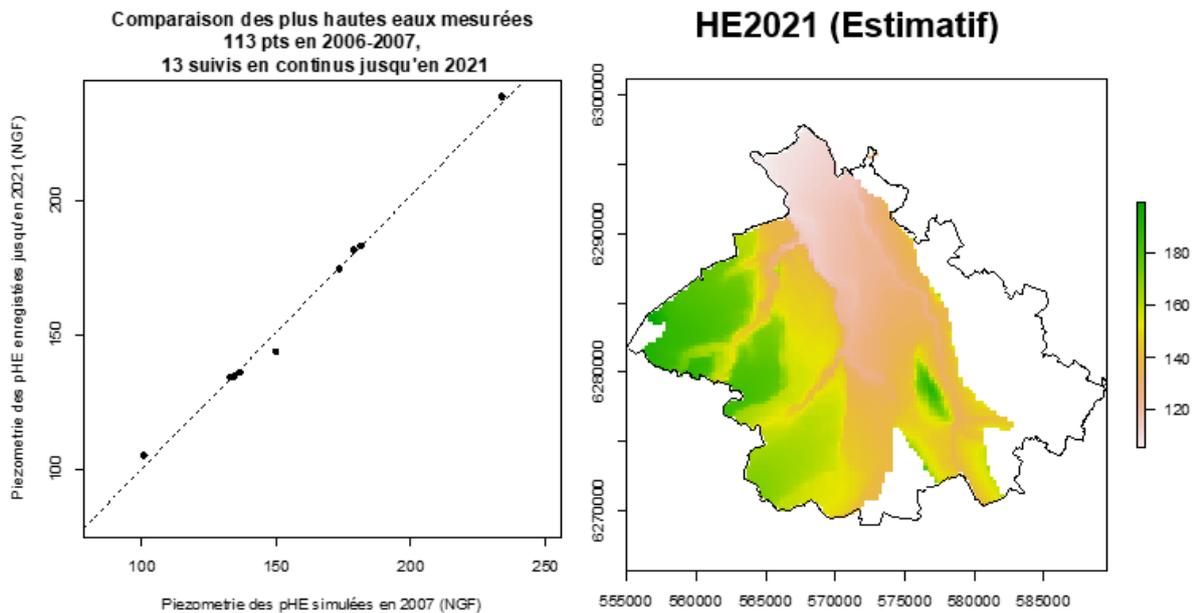


Figure 33 : Ajustement d'une loi entre les plus hautes eaux en 2007 et celles mesurées en 2018 sur les piézomètres disponibles et estimatifs des hautes eaux mesurées en 2018 par application de la dérive déterminée avec les 13 piézomètres disponibles.

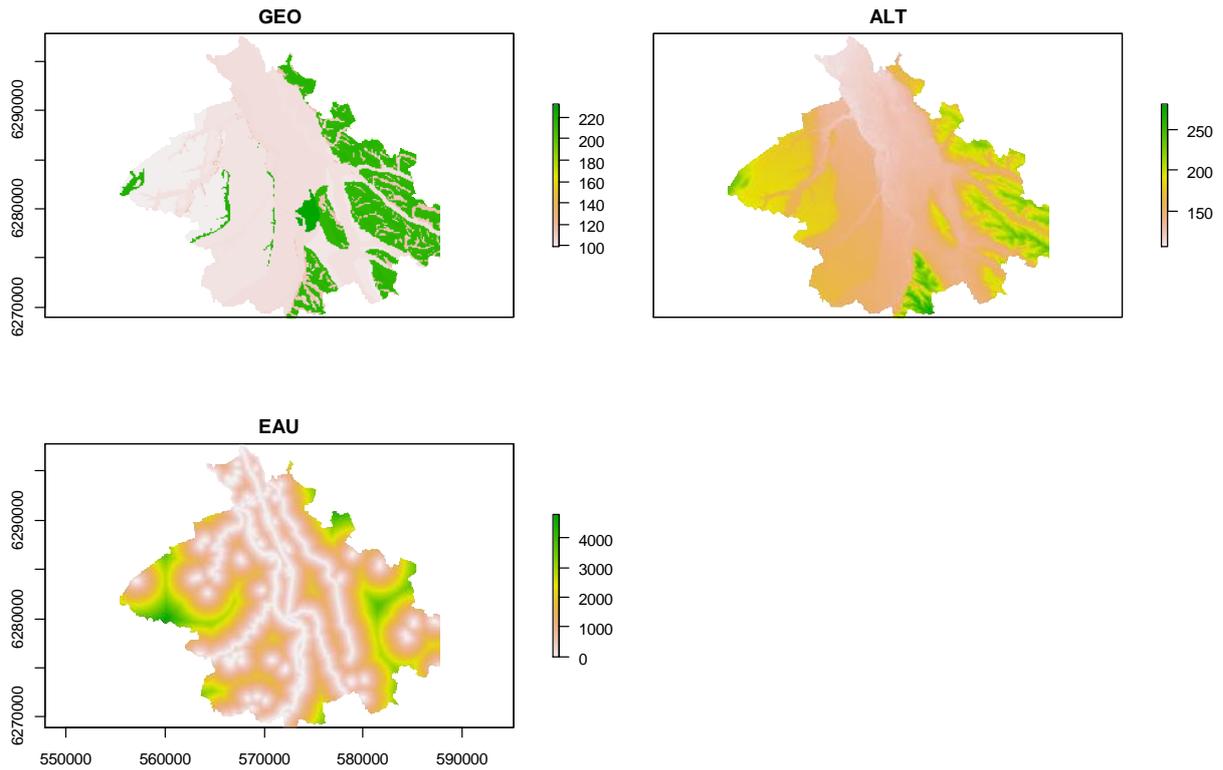


Figure 34 : Paramètres GEO (géologie) , ALT (altitude), EAU (distances aux points d'eau) du métamodèle.

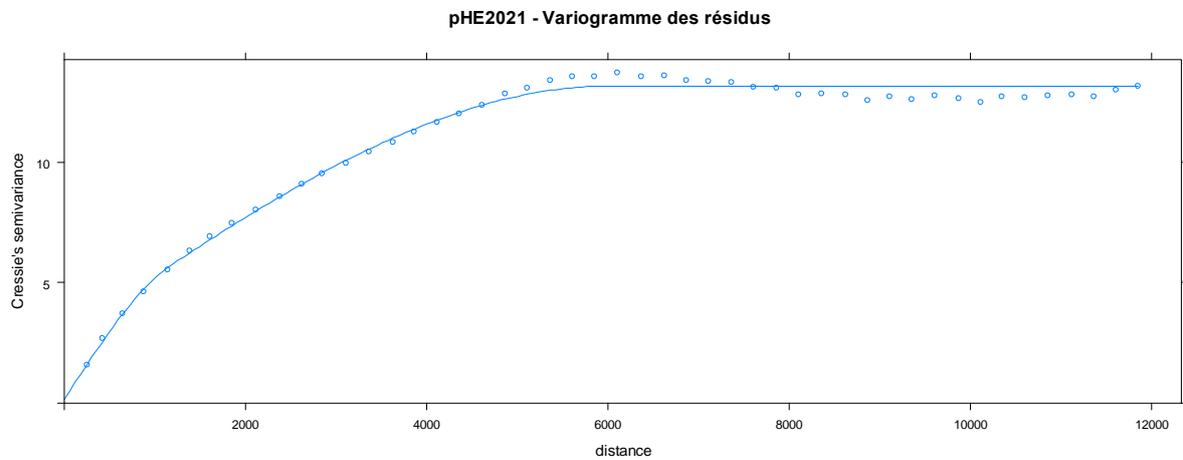


Figure 35 : Variogramme des résidus et modèle de fonction d'erreur spatiale « f ».

Modèle	Palier (« sill »)	Portée (« range »)
Pépite	0.16	
Sphérique	2.52	1 177 m
Sphérique	10.47	6 031 m

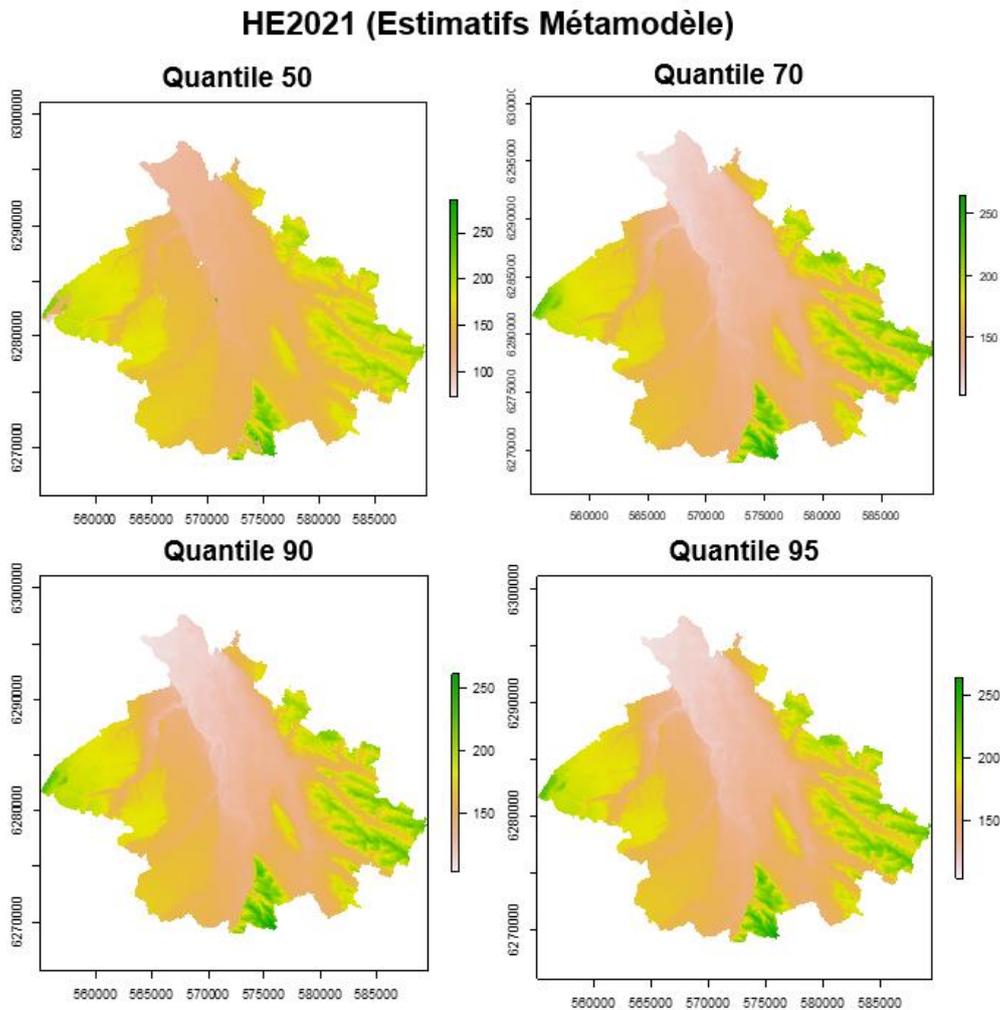
Tableau 10 : Paramètres de la fonction d'erreur spatiale f du métamodèle (dite « de résidus »).

Les résultats de méta-modélisation ont été sortis en Geotiffs de bonne résolution du fait du calage réussi de la fonction (f).

5.5.2. Résultats du métamodèle des hautes eaux (HE)

Les simulations conditionnelles (Figure 36) permettent d'estimer les hautes eaux HE avec un quantile plus important (comme le Q95). Ces calculs sont délicats à réaliser du fait de leur demande importante en mémoire machine (> 9 Go pour 100 simulations). Au final, 200 simulations ont été réalisées et traitées pour en extraire les quantiles 70, 90 et 95 au format Geotiff.

Le plan médian Q50 correspond à une estimation pour une espérance de 50 %. Il correspond en quelque sorte à un krigeage à dérive externe des hautes eaux de 2018 que l'on aurait prédites avec les 113 piézomètres alors qu'en fait, seuls 13 ont été suivis jusqu'à ce jour. Ce plan médian lisse toutefois fortement les données et il convient de réaliser des simulations stochastiques pour mieux prendre en compte la variabilité des Hautes Eaux. Parmi ces simulations, il est délicat d'en choisir une comme HEE, et c'est plus sur avis des hydrogéologues que le choix se porte vers le Q70. Le Q95 étant jugé trop extrême.



Note : pour les zones sans aquifères la cote HE par ce type de modèle est mise à la Topo.

Figure 36 : HE2021 prédictions des quantiles par métamodèle en mNGF.

5.5.3. Évaluation de l'estimation par quantile des HEE

Les données les plus fiables de HEE pour la métropole toulousaine sont celles de la campagne FONDASOL de juillet et août 2018 réalisée pour la 3^e ligne de métro pour le compte de Tisséo qui a mis à disposition du BRGM les données.

La comparaison aux résultats de la campagne Fondasol de juillet et août 2018 (Figure 37) montre que les données calculées (Q70) sont majoritairement supérieures à celles mesurées.

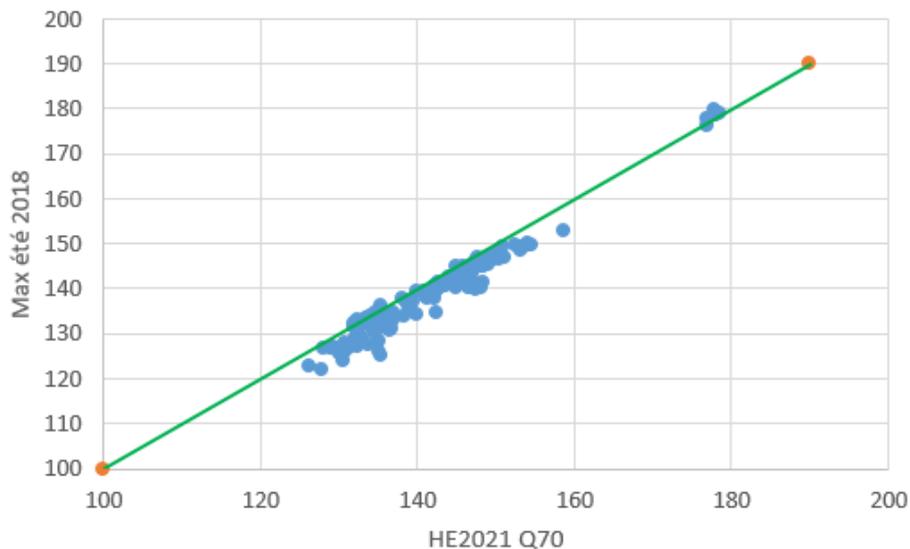


Figure 37 : Comparaison des HE2021 Q70 avec les HEE du bureau d'étude FONDASOL mesurées en juillet et août 2018.

La comparaison aux données disponibles dans le portail d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES) (les 5 piézomètres) montre que les données calculées (Q70) sont supérieures au max des niveaux au droit des cinq piézomètres suivis et celui de l'avenue de Lombez (Tableau 11).

	09834D0135	09834X0660	09838X3247	09838X3249	09845B0384	09838D0727
Max	125.49	126.17	128.46	129.92	140.27	134.25
Min	124.75	125.3	127.95	128.52	137.68	133.55
Moyenne	125.12	125.67	128.16	129.57	139.09	133.8
Ecart type	0.23	0.27	0.15	0.29	0.78	0.09
Nombre de valeurs	10	14	51	29	14	7621
Q70	127.26	128.31	130.44	131.74	145.32	135.43
Ecart (Q70-max)	1.77	2.14	1.98	1.82	5.05*	1.18

*Ce piézomètre urbain varie peu, comparé à ce qu'il devrait et calculé par métamodèle.

Tableau 11 : Comparaison entre le Quantile 70 du métamodèle et les piézomètres disponibles.

En conséquence, la carte Q70 est une HEE conforme aux calculs de type BE rencontré sur la métropole et localement plus sévère (de type HE +1, HE+2). Elle reste toutefois à prendre avec précaution car, vu le faible nombre de données de suivi dans le secteur, il ne s'agit pas de considérer qu'en tous points, le niveau d'eau ne sera jamais plus haut que celui calculé.

6. Carte de l'indice de capacité d'infiltration (ici)

Les travaux précédents ont permis d'obtenir des données haute résolution de perméabilité, un modèle géologique, des HE et HEE ainsi que l'épaisseur de la ZNS. Un calcul de l'ICI peut être entrepris.

6.1. PARAMÈTRE RETENUS

6.1.1. Perméabilités des sols calculées pour la métropole

Un examen du modèle géologique de Toulouse Métropole montre que sa surface est majoritairement recouverte d'une couche argilo-limoneuse (AL) peu perméable mais l'infiltration possible est employée dans la région dans l'horizon sous-jacent de sables et graviers (SG).

Le tableau de classement (Tableau 12) reprend l'appréciation des hydrogéologues concernant les perméabilités (favorable à non favorable). On obtient alors les plans de la Figure 38 pour la couche argilo-limoneuse (AL) de surface et l'horizon sablo-graveleux (SG) qui va être recherché par l'ouvrage d'infiltration.

Perméabilité (m/s)	Perméabilité	Note
10-1 à 10-3	Favorable	10
10-3 à 10-5	Assez favorable	5
10-5 à 10-6	Peu favorable	2
10-6 à 10-11	Non favorable	0

Tableau 12 : Appréciation des perméabilités.

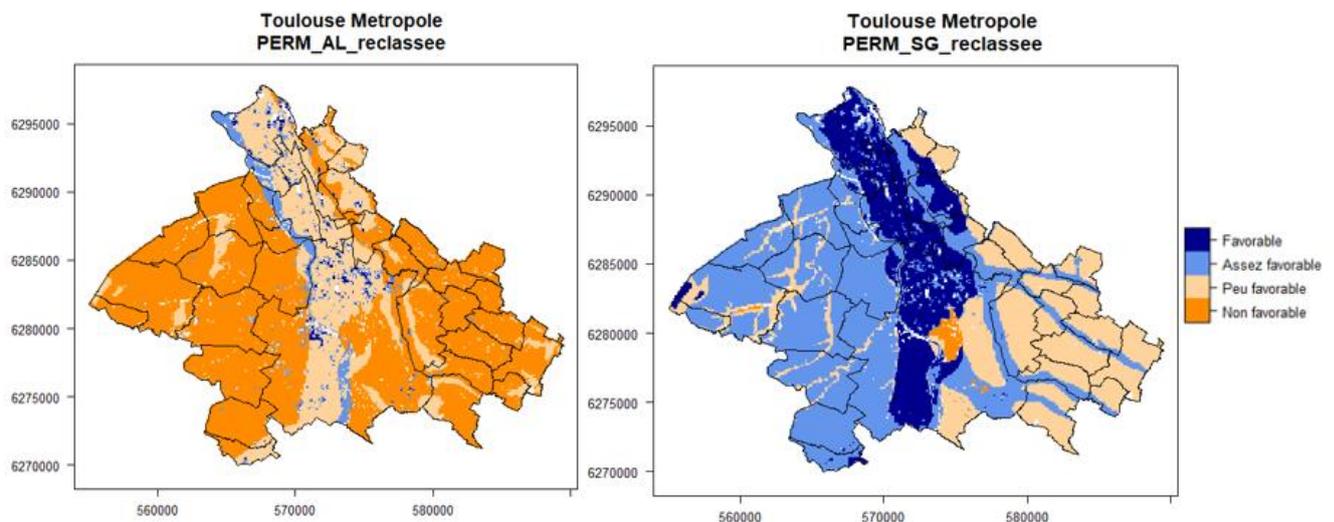


Figure 38 : Classement de perméabilités des horizons Argilo-Limoneux (AL) et Sablo-Graveleux (SG) de Toulouse Métropole.

6.1.2. IDPR

L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) a été créé par le BRGM (Mardhel, 2005) pour qualifier un territoire en termes de « chemins empruntés » par les eaux météoritiques. Il est utilisé pour qualifier l'aptitude du milieu à laisser ruisseler ou s'infiltrer la lame d'eau météoritique. Cet indice a été utilisé pour le projet rennais. Sur Toulouse Métropole, l'eau aura tendance à ruisseler sur la couche AL de surface. Comme on infiltre dans l'horizon SG, l'IDPR n'apporte pas grand-chose et celui-ci est par ailleurs corrélé à plus de 28 % avec PERM SG. Le tableau de classement (Tableau 13) reprend l'appréciation du projet PHOEBUS. On obtient alors le plan de la Figure 39 pour l'IDPR.

IDPR	Infiltration	Note
< 150	Très favorable	10
150 à 500	Favorable	5
500 à 1000	Moins favorable	2
> 1000	Défavorable	0

Tableau 13 : Appréciation de l'IDPR selon Phoebus.

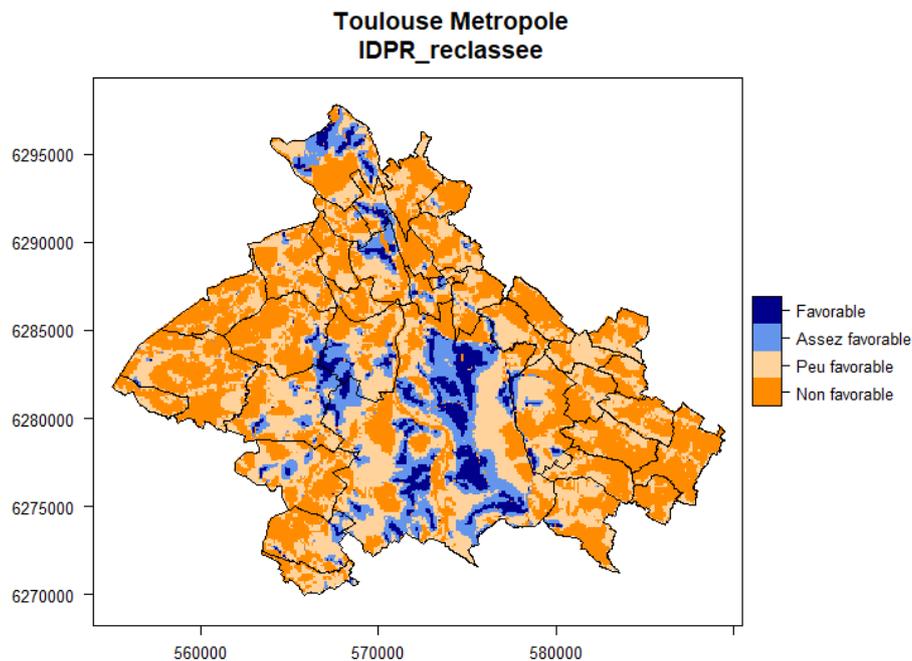


Figure 39 : Classement de l'IDPR de Toulouse Métropole.

6.1.3. Zones des Sites et sols pollués

Les zones SSP sont consultées par les services à l'instruction des permis de construire et doivent faire l'objet d'une vigilance par ces services. En conséquence, une notation binaire (Tableau 14) a été appliquée donnant la Figure 40.

Zonage SSP	Infiltration	Note
Egal à 1	Défavorable	0
Egal à 0	Favorable	10

Tableau 14 : Appréciation des zones SSP.

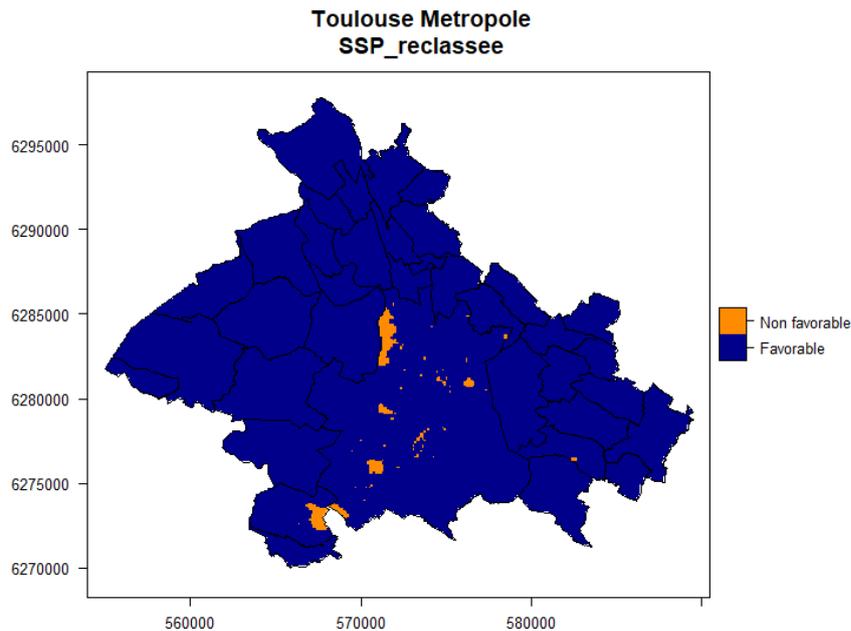


Figure 40 : Classement SSP de Toulouse Métropole.

6.1.4. Autres sources d'informations : pentes, zones endoréiques

Compte tenu des particularités géomorphologiques de la métropole toulousaine, l'utilisation des données de pentes et des zones endoréiques sont redondantes avec l'utilisation des données de perméabilité telle qu'elles ont été définies pour la métropole toulousaine :

- pentes sur coteaux molassiques peu perméables ;
- plateaux constitués d'alluvions perméables ;
- sols perméables recouverts par des limons imperméables.

Ces particularités génèrent de la redondance entre le plan d'information géologique pour les pentes où l'ICI est faible et les zones où l'eau s'accumule et peut s'infiltrer (endoréiques). Les pentes et zones endoréiques de stagnation jouent peu de rôle car elles sont corrélées avec les plans géologiques.

6.2. PRODUCTION DE LA CARTE D'ICI

Compte tenu de la redondance entre les paramètres exposés précédemment, le calcul de la carte de l'Indice de Capacité d'Infiltration va être réalisée en cumulant les plans de paramètres à maximum d'informations. Un contrôle qualité de l'estimation sera effectué avec les données de la métropole :

- épaisseur ZNS < 1m ou ZNS < 2m ;
- perméabilités sables et graviers (SG) ciblées par les dispositifs d'infiltration ;
- données de contrôle de la métropole.

6.2.1. Cartes « brutes »

Deux cartes « brutes » détaillées sont alors obtenus (Figure 41) Par volonté de Toulouse Métropole, la légende de présentation se veut incitative : i.e. allant de faible à très favorable.

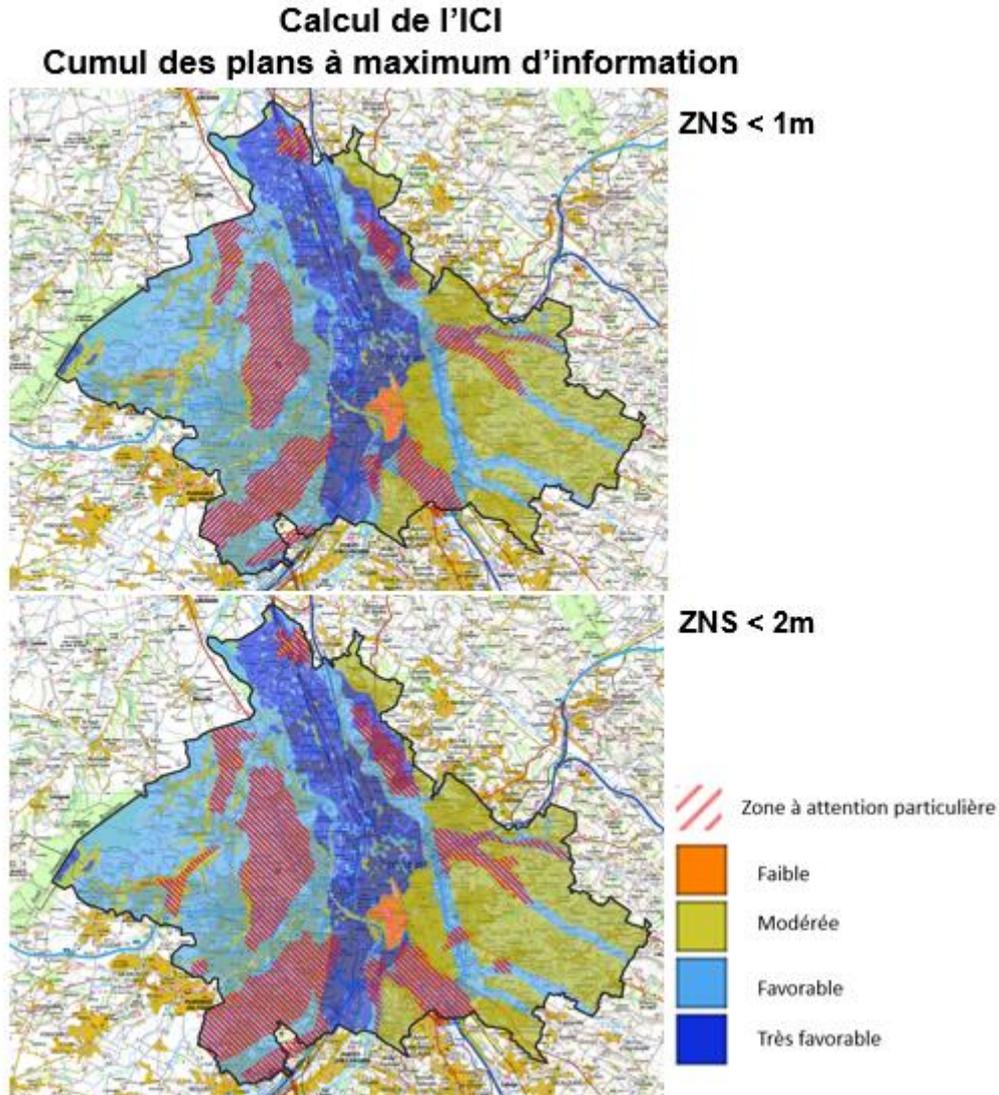


Figure 41 : Calcul d'ICI par cumul du maximum d'information, légende incitative.

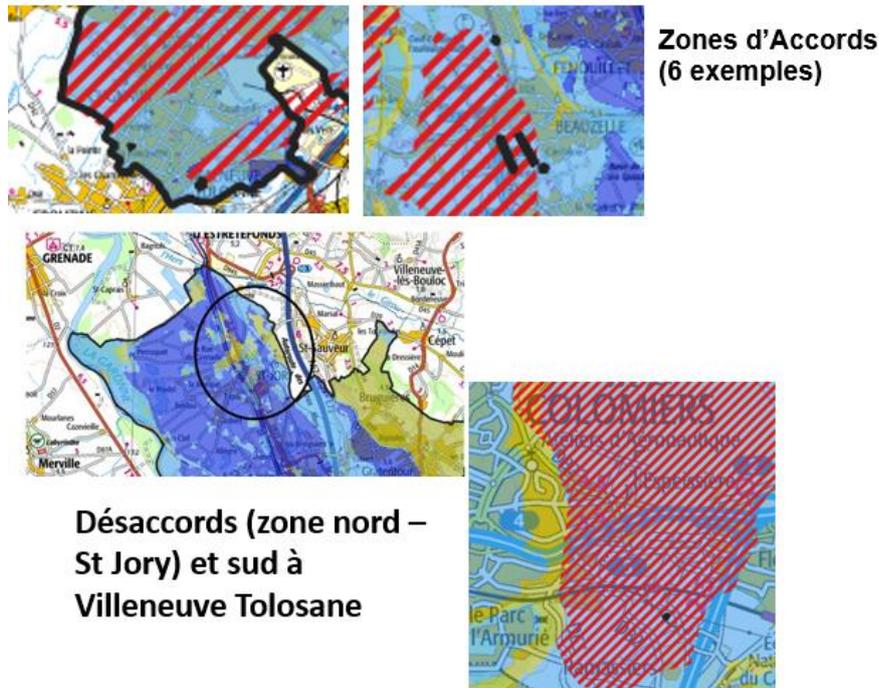
Considérant que la légende est incitative, le critère plus strict (ZNS < 2 m) est recommandé par le BRGM de manière à équilibrer la carte au plus neutre.

6.2.2. Contrôle qualité de la justesse du plan d'ICI

La métropole dispose de 13 ouvrages d'infiltration dont le comportement est suivi, jugé favorable, ou à attention particulière, et sur lesquels, il est possible de contrôler le classement du plan d'ICI.

Considérant les données de la Métropole, seulement 2 anomalies sont constatées sur les 13 points de contrôle (Figure 42).

Contrôle qualité de l'ICI par Cumul des plans à maximum d'information



Note : les données de la ville sur les infiltrations constatées sont : des points et traits noirs (favorables) et un cercle noir (défavorable). Les données ICI sont soit bleu (favorable), soit hachurées pour une attention particulière.

Figure 42 : Points marquant du contrôle qualité du plan d'ICI.

Ce contrôle amène les conclusions suivantes :

- pour le nord, Saint-Jory est signalé comme zone de vigilance particulière par la métropole. Ce point n'est pas détecté par le calcul d'ICI par cumul d'informations. Pour autant, une anomalie de perméabilité apparait sur ce secteur sur la carte SG. Lors de la fusion, cette zone devra apparaitre hachurée rouge ;
- pour le sud (au sud de Villeneuve-Tolosane), un point est signalé comme zone où l'infiltration se passe bien. Il est pourtant détecté par le calcul comme zone de vigilance particulière. Il est néanmoins en bordure de domaine de la zone concernée, où les erreurs d'interpolation se concentrent. A priori, il ne semble pas nécessaire d'altérer les couches d'information ;
- pour les autres (11/13), il y a accord. Ce qui tend à montrer une bonne justesse du plan d'ICI.

6.2.3. Plan d'ICI simplifié et purgé des désaccords

Le plan d'ICI produit par cumul d'informations a, en premier lieu, été purgé de ses désaccords avec les données de contrôle disponibles à ce jour. Il a, par la suite, été simplifié pour devenir un outil d'aide à la décision qui ne supplée pas à la réalisation des études de sol réglementaires.

Ces contours simplifiés au format « shape » (Figure 43 : Calcul d'ICI final par cumul du maximum d'information.) permettent à la métropole d'y ajouter au besoin des zones à exclure pour raisons

administratives et éventuellement d'adapter facilement les contours des zones de vigilance particulières si de nouvelles données le rendaient nécessaire.

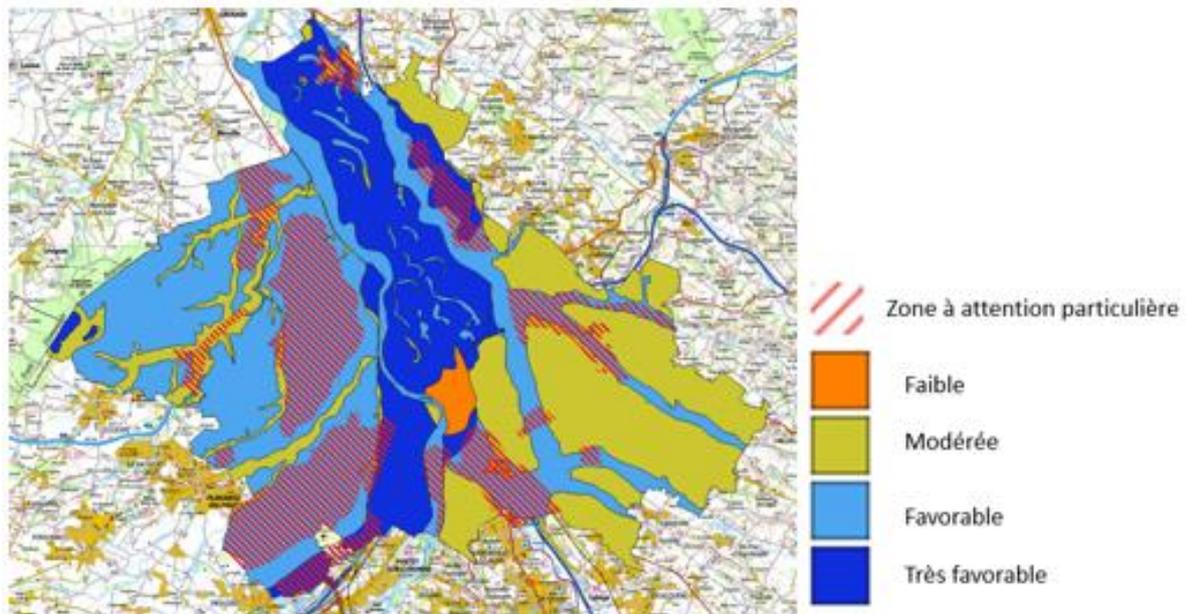


Figure 43 : Calcul d'ICI final par cumul du maximum d'information.

Les services eau & aménagement de Toulouse Métropole se sont ensuite appropriés cette cartographie et ont travaillé sur une charte couleur privilégiant des tons pastel et présentée en Figure 44.

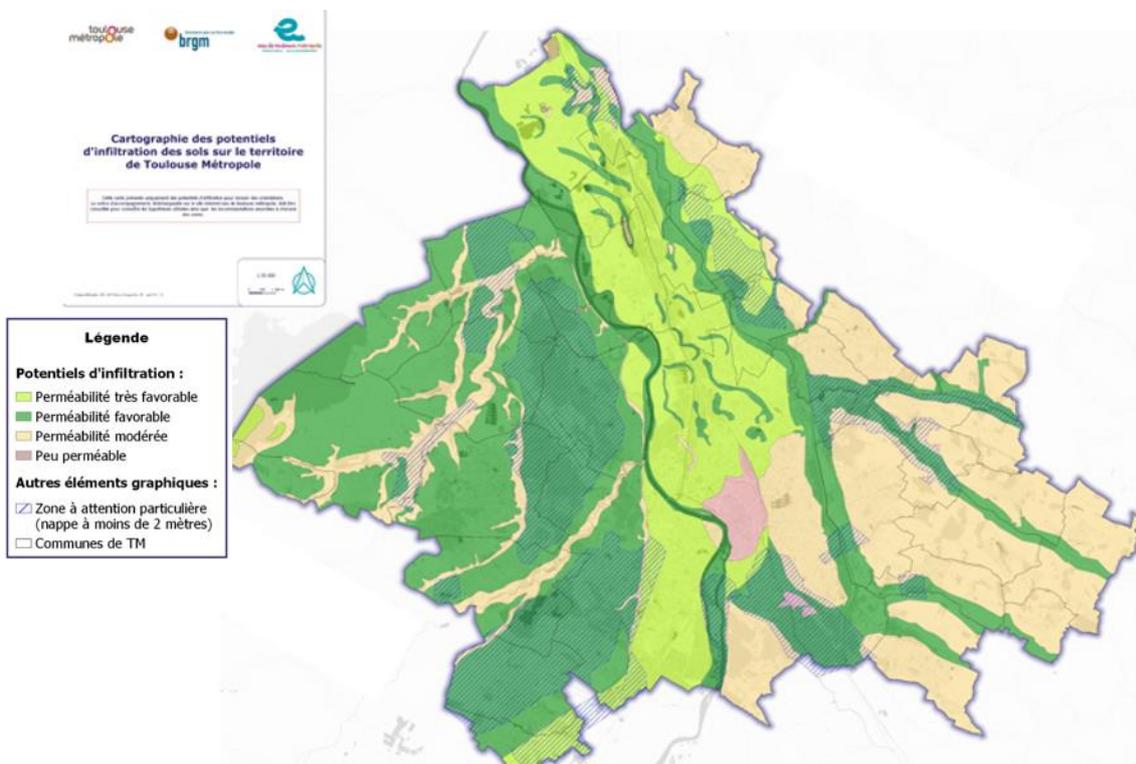


Figure 44 : Calcul d'ICI final par cumul du maximum d'information, échelle métropole.

6.3. CARTE D'INFILTRATION SELON LE PROTOCOLE PHOEBUS

Le protocole Phoébus ayant été validé par la ville de Rennes, il est intéressant de comparer un résultat de ce protocole avec notre méthode toulousaine. Pour cela, la pondération la plus proche de celle réalisée sur phoebus est la suivante :

$$\text{ICI} = 5 * \text{ZNS_HE_2ans} + 1 * \text{ZNS_HE_Q70} + 3 * \text{PERM_SG} + 2 * \text{PERM_AL} + 5 * \text{SSP} + 2 * \text{IDPR} + 1.5 * \text{PENTES} + 0.5 * \text{ENDOR}$$

On obtient alors le plan de la Figure 45 que l'on peut comparer au plan précédent. Les deux méthodes convergent sur le découpage territorial pour la métropole toulousaine.

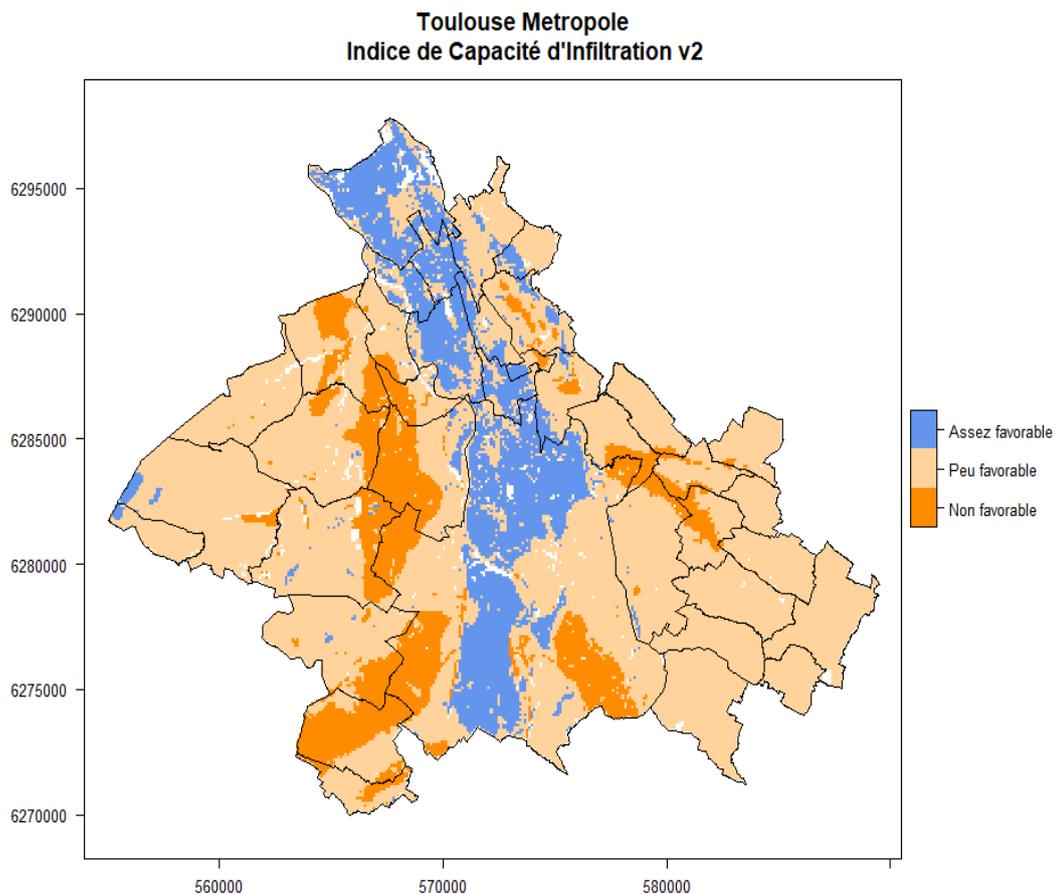


Figure 45 : Calcul d'indice de capacité d'infiltration selon la méthode Phoebus adaptée aux spécificités de la métropole Toulousaine.

La notation Phoebus serait la suivante :

- pour les zones non favorables et peu favorables, l'infiltration est quand même possible (nécessite des études et espaces dédiés) ;
- pour les zones assez favorables voire favorables, l'infiltration validée par une étude dédiée est recommandée.

On constate ici un glissement sémantique par rapport au plan d'ICI final par cumul du maximum d'informations. Le plan d'ICI final par cumul du maximum d'informations reste toutefois moins contre-intuitif puisqu'il prend acte que même sur des zones non favorables, le protocole Phoebus juge l'infiltration néanmoins possible.

7. Conclusion

La capacité d'infiltration des sols dépend de l'épaisseur de la Zone Non Saturée (ZNS), du type de pluie, de l'ouvrage d'infiltration choisi, de la perméabilité des sols.

Pour ce projet, plusieurs développements innovants ont été réalisés : un SGBD inédit des données géotechniques, un métamodèle de remontée des eaux souterraines, un modèle tridimensionnel de la perméabilité des sols. Le SGBD a été construit sous Excel de manière à faciliter son accès et sa maintenance par la direction du Cycle de l'eau.

La fixation des hautes eaux (HE) et hautes eaux exceptionnelles (HEE) pour ce projet s'est révélée particulièrement délicate compte tenu de l'absence de suivi long terme et de réseaux piézométriques denses pour la métropole toulousaine, le dernier suivi complet datant de 2007.

Le calcul de l'indice de capacité d'infiltration (ICI) a été ensuite possible à partir de ces variables déterminées et mises en plan (épaisseur de la ZNS, modèle géologique, modèle tridimensionnel de la perméabilité). Ce calcul a été validé par les points de contrôle fournis par la métropole. Il donne des résultats comparables à ceux de la méthode PHOEBUS tout en étant plus incitatif. Il s'agit toutefois d'un calcul complexe qui doit être adapté aux caractéristiques hydrogéologiques de la métropole étudiée et aux données disponibles.

La méthode retenue et proposée par le BRGM par cumul d'informations s'avère adaptée comme outil d'aide à la décision incitatif et donne des orientations en terme de potentiel d'infiltration pour les études préliminaires. La carte des potentiels d'infiltration constitue un préalable à une évaluation des potentiels de désimperméabilisation et à la réalisation d'un zonage pluvial sectorisé, annexé au PLUIH, dont les prescriptions seront notamment basées sur la capacité d'infiltration des sols.

Elle ne se substitue pas :

- à l'obligation du porteur de projet de réaliser des études hydrogéologiques au droit du projet avec la caractérisation du niveau de nappe et des tests de perméabilité ;
- au cadre légal et aux obligations réglementaires au titre du code de l'environnement ;
- à la prise en considération d'autres prescriptions (PPR inondation, mouvement de terrain, retrait-gonflement d'argiles, ...).

8. Bibliographie

Betancourt et al. (2020) - Gaussian process metamodeling of functional-input code for coastal flood hazard assessment. *Reliability Engineering and System Safety*, Elsevier, 2020, 198, doi:10.1016/j.ress.2020.106870.hal-01998724v2.

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

Bouroullec I., Ricard J., Marty F. (2005) - BISMUTH – Mise en place d'un réseau quantitatif de connaissance des eaux souterraines de Toulouse (Haute-Garonne). Rapport final. BRGM/RP-54008-FR. 35 p., 8 ill., 2 ann.

Carle (1999) Carle S. F, (1999) - T-PROGS: Transition Probability Geostatistical Software, 1999. AQUAVEVO, GMS software.

Carle et Fogg (1996)- Carle S. F, Fogg G. E, (1996), Transition probability-based indicator geostatistics. *Mathematical Geology*, 28, 453-476.

Carle et Fogg (2020)- Carle SF, Fogg Ge, (2020), Integration of soft data into geostatistical simulation of categorical variables. *Front. Earth Sci.* 8:565707. doi: 10.3389/feart.2020.5657707.

Cassan M. (2005) - Les essais de perméabilité sur site dans la reconnaissance des sols. Edition Presse des Ponts. 568 pages.

CEREMA (2014). Procédures d'autorisation et de déclaration des projets d'aménagement au titre du Code de l'environnement. Rubrique 2.1.5.0 Rejets d'eaux pluviales. Repères à destination des instructeurs de la police de l'eau et des milieux aquatiques. 40 pages.

Doctrine Grand Est (2020). Groupe technique Grand Est « Eaux Pluviales ». La gestion des eaux pluviales en région Grand-Est. Note de doctrine. Dossiers Loi sur l'eau – IOTA. 74 pages.

Gandolfi J.M., Bouroullec I. avec la collaboration de Marty F., Porquet M. (2008) - BISMUTH : Banque d'Information sur le sous-Sol en Milieu Urbain de Toulouse - Phase 2. BRGM/RP-56505-FR. Rapport final – 240 p., 49 ill., 14 ann.

Gandolfi J.-M., Bouroullec I., Marty F., et Porquet M. (2008) - BISMUTH : Banque d'Information sur le sous-Sol en Milieu Urbain de Toulouse - Phase 2. BRGM/RP-55514-FR. Rapport d'avancement – 119 p., 31 ill., 7 ann.

Guide technique Francilien (2020). Groupe de travail de la Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Energie d'Île-de-France. Élaboration et instruction des dossiers relatifs à la gestion et aux rejets des eaux pluviales. Guide technique Francilien. 70 pages.

NF P11-221-1 (DTU 14.1) (mai 2000) - Travaux de bâtiment - Travaux de cuvelage - Partie 1 : Cahier des clauses techniques +Erratum (novembre 2000) (Indice de classement : P11-221).

Pinson S., Bault V., (2019) - Profondeur des entités Hydrogéologiques et évaluation des cOntraintes à l'infiltration des Eaux pluviales urBaines sUr le territoire de RenneS Métropole Projet PHOEBUS. Rapport final. BRGM/RP-68599-FR, 74 p., 45 ill., 3 ann.

Sartore L., (2013) - spMC: Modelling Spatial Random Fields with Continuous Lag Markov Chains. The R Journal, 5(2):16-29, Dipartimento di statistica, Università degli Studi di Padova, Padova, Italia.

Vincent M., Delpont G., Saplairoles M. (2007) - Avis technique du BRGM sur l'étude réalisée par la Ville de Toulouse en vue de la mise en Auvre d'un Plan de prévention du risque sécheresse. Rapport BRGM/RP-55361-FR, 23 p., 1 ill., 1 ann.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

Direction Eau Environnement Procédés et Analyses

3, avenue Claude-Guillemin - BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Occitanie – site de Toulouse

3 rue Marie Curie - BP 49

31527 Ramonville-Saint-Agne Cedex - France

Tél. : 05 62 24 14 50

www.brgm.fr