

Profondeur des entités
Hydrogéologiques et évaluation
des c**O**ntraintes à l'infiltration
des **E**aux pluviales ur**B**aines s**U**
r le territoire de Renne**S** Métropole
Projet PHOEBUS

Rapport final
BRGM/RP-68599-FR
Janvier 2019

Profondeur des entités **H**ydrogéologiques et évaluation des c**O**ntraintes à l'infiltration des **E**aux pluviales ur**B**aines s**U**r le territoire de Renne**S** Métropole Projet PHOEBUS

Rapport final
BRGM/RP-68599-FR
Janvier 2019

Étude réalisée dans le cadre d'une convention
De recherche et développement partagés

S. Pinson, V. Bault
Avec la collaboration de
G. Braibant, L. Ridel, K. Batut, G. Bodere, G. Bentivegna,
E. Decouchon, Y. Boucherat, F. Koch, C. Breuil, A. Grandemange

Vérificateur :

Nom : Y. Caballero
Fonction : Hydrogéologue
Date : 13/03/2019

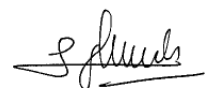
Signature :



Approbateur :

Nom : M. Bardeau
Fonction Directrice DAT Bretagne :
Date : 05/04/19

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : hydrogéologie, carte piézométrique, eaux pluviales, infiltration, PLU, règlement des eaux pluviales, analyse multicritères

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

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., 45 ill., 3 ann.

Synthèse

Dans le cadre de l'élaboration du PLUI (Plan local d'urbanisme intercommunal), les services de Rennes Métropole souhaitent pouvoir y intégrer des règles permettant de favoriser l'infiltration des eaux pluviales dans les secteurs où le milieu le permet.

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 pour répondre à cette problématique dans le cadre d'une convention de recherche et de développement avec le BRGM. Cette étude a pour but d'élaborer une carte des zones favorables et défavorables à l'infiltration des eaux pluviales pour l'agglomération de Rennes Métropole.

Les objectifs de ce projet visent donc dans un premier temps à identifier les nappes souterraines en présence sur la zone d'étude en réalisant une carte piézométrique et à en déduire l'épaisseur de la ZNS (Zone Non Saturée) qui joue un rôle très important dans les écoulements et les temps de transfert des eaux météoriques. Lors du premier mètre traversé, ces temps de transfert sont aussi conditionnés par le type de sol rencontré. La nature, la texture, la perméabilité verticale et les teneurs en eau du sol sont d'autant de paramètres supplémentaires qui vont réguler la nature et la quantité d'échanges entre la surface et la ZNS.

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. Ces mesures ont été interpolées grâce au logiciel GDM du BRGM, pour produire une grille des altitudes de la nappe au pas de 25 m. Pour calculer l'épaisseur de la ZNS, il suffit de soustraire aux altitudes du sol déduites du MNT au pas de 2 m (fourni par Rennes Métropole) les valeurs des altitudes en hautes eaux fournies par l'interpolation. Le résultat est une grille au pas de 25 m qui représente pour chaque pixel l'épaisseur de la ZNS exprimée en mètres.

Dans un second temps, différents paramètres ont été croisés pour apprécier l'aptitude des sols à laisser s'infiltrer les eaux météoriques.

Une analyse multicritère basée sur le principe de la classification et de la pondération a été réalisée à partir d'un ensemble de 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.

Ces critères naturels ont été hiérarchisés selon des contours homogènes que sont les unités fonctionnelles permettant de découper l'ensemble de la zone d'étude en polygones cohérents en terme de fonctionnement hydrologique et pédologique. La combinaison des différents paramètres aboutit à la création d'un indicateur de la capacité d'infiltration (ICI), d'une valeur maximale de 200. Afin d'être facilement utilisable, cet indicateur a ensuite été restitué sous forme de quatre classes caractérisant la possibilité d'infiltrer des eaux pluviales : pas favorable, peu favorable, assez favorable et favorable.

La carte des potentiels d'infiltration à l'échelle des unités fonctionnelles ainsi élaborée permet d'avoir une vision globale sur l'ensemble du territoire de Rennes Métropole et de servir comme de premier niveau pour sectoriser les zones où des études plus précises devront être menées. Elle a ensuite été transposée en tant que carte réglementaire intégrée dans le PLU intercommunale de Rennes Métropole.

Compte tenu des informations utilisées et de leurs échelles de validité, cette cartographie doit être considérée comme indicative. Elle ne doit pas être utilisée à une échelle inférieure au 1/25 000 et se substituer à des études à la parcelle.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. OBJECTIFS	9
1.2. LE SECTEUR D'ETUDE.....	9
1.2.1.Contexte géologique.....	9
1.2.2.Contexte hydrogéologique.....	10
2. Carte d'épaisseur de la zone non saturée	12
2.1. PREPARATION ET DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE PIEZOMETRIQUE.....	12
2.1.1.Préparation de la campagne piézométrique.....	12
2.1.2.Les mesures.....	14
2.1.3.Bilan de la campagne piézométrique	15
2.2. INTERPOLATION DE LA CARTE PIEZOMETRIQUE	17
2.2.1.Préparation des données	17
2.2.2.Elaboration de la carte piézométrique	18
2.3. PRESENTATION ET ANALYSE DE LA CARTE PIEZOMETRIQUE	22
2.3.1.Caractéristiques et limites d'utilisation de la carte piézométrique	22
2.3.2.Clé de lecture de la carte piézométrique	22
2.4. LA ZONE NON SATUREE	24
2.4.1.Calcul de l'épaisseur de la zone non saturée.....	24
2.4.2.Confrontation des résultats avec d'autres données	26
3. Les unités fonctionnelles	29
3.1. LE CONCEPT.....	29
3.2. LES TESTS DE CROISEMENT	29
3.3. LES UNITES FONCTIONNELLES RETENUES POUR CE PROJET	33
4. L'analyse multicritère	35
4.1. LES PARAMETRES RETENUS ET LES NOTES ATTRIBUEES.....	35
4.1.1.L'épaisseur de la zone non saturée.....	36
4.1.2.La perméabilité des sols.....	38
4.1.3.L'indice de susceptibilité de présence d'argiles.....	42
4.1.4.L'IDPR Indice de Développement et de Persistance des Réseaux.....	44
4.1.5.L'hydromorphie des sols.....	46
4.1.6.Les pentes	48
4.1.7.Les zones endoréiques	51

4.2. CARTOGRAPHIE DU POTENTIEL D'INFILTRATION DES EAUX PLUVIALES	53
4.3. CONTRAINTES NATURELLES ET REGLEMENTAIRES.....	57
5. Conclusion.....	59
6. Bibliographie	61

Liste des illustrations

Illustration 1 - Carte des domaines et des structures majeures du Massif Armoricaire (Balleve, 2008)	10
Illustration 2 – Entités hydrogéologiques BD Lisa niveau 3 ordre 1 *	11
Illustration 3 – schéma conceptuel des différents compartiments.....	12
Illustration 4 – Sectorisation de la zone d'étude en dix secteurs pour la campagne piézométrique	13
Illustration 5 – Chroniques piézométriques des deux points d'eau ADES de la zone d'étude ...	14
Illustration 6 – Répartition des points mesurés lors de la campagne piézométrique	16
Illustration 7 - Principe de la modélisation d'une carte piézométrique sous GDM.	18
Illustration 8 – Variogramme et modèle de variogramme.	19
Illustration 9 – Paramètres du modèle de variogramme.	19
Illustration 10 – Localisation des données utilisées pour l'interpolation des cartes piézométriques	20
Illustration 8 – Principe de modélisation de la surface piézométrique en domaine de socle (Wyns et al., 2004)	21
Illustration 11 – Exemple d'un carte piézométrique de la nappe du Lutétien en période de hautes eaux 2014 avec indication du sens d'écoulement général et des crêtes hydrogéologiques.....	23
Illustration 12 – Carte des altitudes de la nappe issues de l'interpolation	24
Illustration 13 – Grille au pas de 25 m de l'épaisseur de la zone non saturée sur le territoire de Rennes Métropole.....	25
Illustration 14 – Tableau – surfaces des pixels en fonction de différentes classes d'épaisseur .	26
Illustration 15 – Comparaison de la ZNS interpolée (à gauche) avec les zones endoréiques (au centre) et les contours des zones humides (à droite)	26
Illustration 16 – Comparaison de la ZNS interpolée (gauche) avec l'hydromorphie des sols (centre) et la ZNS Loire-Bretagne (droite).....	27
Illustration 17 – Extrait de la couche SIG des bassins versants avec une taille minimale de 10 hectares	29
Illustration 18 – Couches SIG des bassins versants (10 hectares) et de la géologie harmonisée au 1/50 000	30
Illustration 19 – Extrait du croisement entre les bassins versants (10 ha) et de la géologie harmonisée au 1/50 000	31
Illustration 20 – Couches SIG des bassins versants (10 hectares) et des UCS de l'INRA.....	32

<i>Illustration 21 – Extrait du croisement entre les bassins versants(10 ha) et les UCS de l'INRA</i>	32
<i>Illustration 22 – Extraits du découpage des bassins versants (10 ha) en rive droite, rive gauche et bassin amont.....</i>	33
<i>Illustration 23 – Les unités fonctionnelles utilisées pour cette étude</i>	34
<i>Illustration 24 – Grille de la ZNS au pas de 25 m et agrégation des données aux unités fonctionnelles</i>	36
<i>Illustration 25 – Extrait » Les ouvrages d'infiltration et la fonction filtration -recommandations à l'usage des gestionnaires – GEOSOL, 2015».....</i>	37
<i>Illustration 26 – Cartographie des notes attribuées pour l'épaisseur de la zone non saturée</i>	38
<i>Illustration 27 - La texture du sol GEPPA par Unité Cartographique Sol (UICS) source : AGROCAMPUS INRA – Cartographie des sols de Bretagne 2005 - 2011</i>	39
<i>Illustration 28 - La texture – Les classes de drainage – Cartographie des sols de Bretagne 2005 – 2011 source INRA/ AgroCampus</i>	40
<i>Illustration 29 – Tableau des combinaison entre texture et drainage – Evaluation de la perméabilité en combinant les textures et le drainage.....</i>	41
<i>Illustration 30 – Cartographie de l'évaluation de la perméabilité des sols par unité fonctionnelle à l'exception de la zone urbaine de Rennes.....</i>	42
<i>Illustration 31 – Cartographie de l'indice de susceptibilité d'argiles sur le territoire de Rennes Métropole</i>	43
<i>Illustration 32 – Cartographie par UF de la susceptibilité de la présence d'argiles (notes)</i>	44
<i>Illustration 33 – Concept de l'IDPR</i>	45
<i>Illustration 34 – Agrégation les valeurs de l'IDPR aux unités fonctionnelles : IDPR médian</i>	45
<i>Illustration 35 – Cartographie de l'évaluation de la capacité d'infiltration des eaux météoriques</i>	46
<i>Illustration 36 – Grille de L'HYDROMORPHIE des sols au pas de 50 m Source : AGROCAMPUS OUEST, UMR INRA SAS, 2011.</i>	47
<i>Illustration 37 – Cartographie des notes attribuées à chaque unité fonctionnelle pour l'hydromorphie</i>	48
<i>Illustration 38 – Cartographie des pentes moyennes calculées à partir du MNT IGN 25 m, par unité fonctionnelle.</i>	49
<i>Illustration 39 – Cartographie des notes attribuées par UF pour le paramètre « pente »</i>	50
<i>Illustration 40 – Cartographie des zones endoréiques à partir du MNT au pas de 2 m.....</i>	51
<i>Illustration 41 – Cartographie des notes attribuées par UF pour le paramètre « zones endoréiques »</i>	52
<i>Illustration 42 – Influence des paramètres sur les différents compartiments (surface et sol)</i>	53
<i>Illustration 43 – Tableau récapitulatif des notes et des poids attribués à chaque paramètre</i>	54
<i>Illustration 44 – Carte de l'indice de capacité d'infiltration des eaux pluviales.....</i>	55
<i>Illustration 45 – Carte de l'indice de capacité d'infiltration des eaux pluviales.....</i>	56

Liste des annexes

<i>Annexe 1 Campagne piézométrique</i>	63
<i>Annexe 2 Liste des données à collecter.....</i>	67

Annexe 3 Géostatistique et interpolation par la géostatistique	71
--	----

1. Introduction

1.1. OBJECTIFS

La gestion des eaux pluviales en domaine urbain est une préoccupation importante et s'intègre pleinement dans les réflexions et les actions visant à construire les stratégies de ville durable.

Dans ce domaine, Rennes Métropole est une collectivité innovante et pionnière qui a été désignée « meilleure ville durable » dans le mensuel Terra Eco en 2014.

Avec la mise en œuvre de la compétence GEMAPI (gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations) de la Loi NOTRe du 7 août 2015 (Nouvelle Organisation Territoriale de la République), la bonne gestion des eaux pluviales devient un enjeu majeur et l'infiltration de l'eau de pluie à la parcelle constitue une solution très intéressante pour limiter l'impact des surfaces imperméabilisées.

Les services de Rennes Métropole en charge de l'élaboration du PLUI (Plan local d'urbanisme intercommunal) de la collectivité souhaitent pouvoir y intégrer des règles permettant de favoriser l'infiltration des eaux pluviales dans les secteurs où le milieu le permet.

C'est dans ce cadre que Rennes Métropole a demandé au BRGM de proposer un programme permettant d'apporter des éléments de réponse spatialisés.

Les objectifs de ce projet visent donc à :

- Identifier les nappes souterraines en présence sur le territoire de Rennes Métropole, et établir une carte piézométrique sur la première nappe rencontrée en période de hautes eaux souterraines afin d'aboutir à une carte d'épaisseur de la zone non saturée (zone située entre le sol et la nappe phréatique),
- Croiser les différents paramètres permettant d'apprécier l'aptitude des terrains à l'infiltration de l'eau de pluie afin d'aboutir à une carte des zones favorables et défavorables à l'infiltration des eaux pluviales. Cette analyse doit être complétée par une identification et une cartographie des contraintes naturelles et réglementaires à la mise en œuvre de ce procédé.

Cette première phase de travaux permettra de collecter et centraliser des informations utiles à la compréhension du fonctionnement des aquifères présents au droit du territoire de Rennes Métropole.

Par ailleurs, dans l'éventualité d'une construction d'un modèle géologique urbain en 3 dimensions du territoire de Rennes Métropole, ces données pourront être à nouveau valorisées et alimenter considérablement la réflexion pour l'élaboration d'un outil d'aide à un aménagement efficace du territoire.

1.2. LE SECTEUR D'ETUDE

Le secteur d'étude correspond au territoire de Rennes Métropole qui se situe dans le département d'Ille-et-Vilaine et la région Bretagne. Cette métropole compte 438 868 habitants en 2015 selon le dernier recensement et est composée de 43 communes.

1.2.1. Contexte géologique

Le Massif Armoricain a été soumis à des phénomènes tectoniques ayant engendré la formation de chaînes de montagne (orogénèses « cadomienne » et « hercynienne »).

Ce massif est divisé en trois domaines : Les domaines Nord, Centre et Sud-Armoricains, séparés les uns des autres par deux zones de cisaillement majeures que sont : le Cisaillement Nord Armoricain (CNA) et le Cisaillement Sud Armoricain (CSA) (Illustration 9).

L'Ille-et-Vilaine se situe dans la partie orientale du Massif Armoricain à cheval sur les domaines Nord et Centre-Armoricains, séparés par le Cisaillement Nord Armoricain (CNA). Ce département est constitué principalement de roches granitiques, métamorphiques (schistes, quartzites...) et de roches sédimentaires (grès, ...). Au Sud du département, des plateaux rocheux sont constitués de schistes ou de grès armoricains séparés par des vallées où coulent les affluents de la Vilaine. Au Nord du département, des plateaux rocheux sont constitués de schistes ou de granites, alternant avec les bassins.

Illustration 1 - Carte des domaines et des structures majeures du Massif Armoricain (Ballevre, 2008)

Les roches du Massif Armoricain sont souvent très altérées en argiles. La majorité des altérites de l'Ille-et-Vilaine proviennent des schistes ou des granitoïdes.

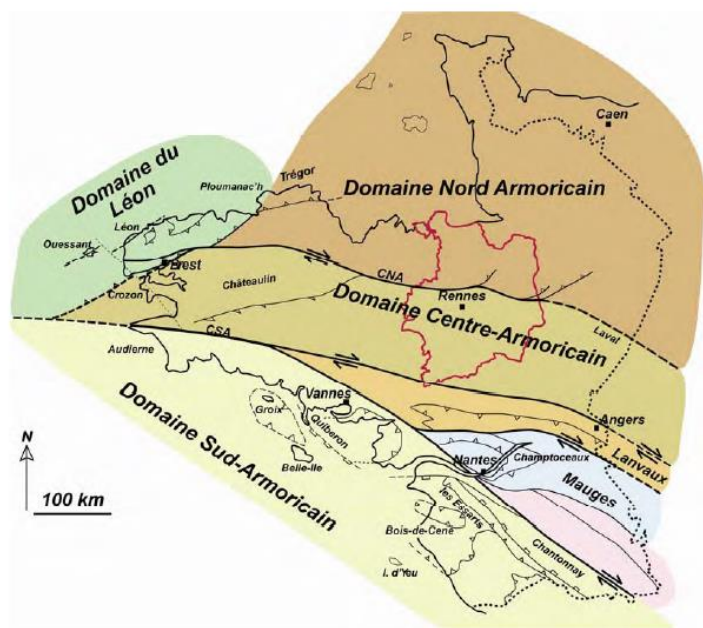
1.2.2. Contexte hydrogéologique

La présence de ressource en eau souterraine est fortement conditionnée par le substrat géologique. En Bretagne, il n'existe pas de grands aquifères, mais une mosaïque de petits systèmes imbriqués (la surface au sol de chacun d'eux n'excède pas en général quelques dizaines d'hectares), indépendants les uns des autres, du moins dans les conditions actuelles des exploitations qui en sont faites.

En complément de ces aquifères de socle, il existe également des aquifères alluviaux et des aquifères sédimentaires localisés dans de petits bassins d'âge tertiaire. L'Ille-et-Vilaine, comme la majorité du Massif Armoricain, est constitué de roches dures à faible porosité (formations "anciennes" du socle vs roches sédimentaires). De par ces caractéristiques, en dehors de quelques aquifères constitués de nappes alluviales de type sables ou graviers, pouvant constituer localement une ressource importante, le département d'Ille-et-Vilaine ne possède pas de réserve de grande capacité.

Quatre types d'aquifères sont dénombrés pour le Massif Armoricain, même si certains sont très réduits. En fonction de ces quatre types d'aquifères, il peut en exister tout un panel par combinaison, d'interaction et de superposition d'un modèle sur un autre :

- Le plus important en terme de superficie est l'aquifère de socle s.l. (1) situé dans l'altération et la fracturation d'origine latéritique, mais aussi tectonique, des roches du socle armoricain. L'altération et la fracturation ont généré un horizon meuble de roches altérées (de 20 à 30 m d'épaisseur) avec une porosité permettant l'infiltration et le stockage des eaux météoritiques vers un horizon plus compact et fissuré de 40 à 60 m d'épaisseur et soutenant le débit des cours d'eau. Cet ensemble socle-altération a subi des événements tectoniques créant de petits bassins d'effondrements tertiaires.



- Les bassins sédimentaires tels que celui de Saint-Jacut-du-Méné ou de Quessoy, et dont le plus important pour la région Bretagne est celui de Chartres-de-Bretagne, renferment des aquifères de type sédimentaire (2) dans lesquels la ressource en eau, malgré leur taille réduite, est plus importante et contenue dans les couches sédimentaires les plus perméables.
- Le troisième type d'aquifère (3) est alluvial, commun à tous les fleuves et cours d'eau. Ces aquifères sont contenus dans les alluvions des fleuves et cours d'eau et leur capacité de production d'eau (généralement utilisée pour l'eau potable) de ces aquifères est importante mais ils sont vulnérables aux pollutions.
- Enfin le dernier type d'aquifère (4), est côtier, dont une des limites est constituée par la mer et l'autre par les premiers reliefs côtiers.

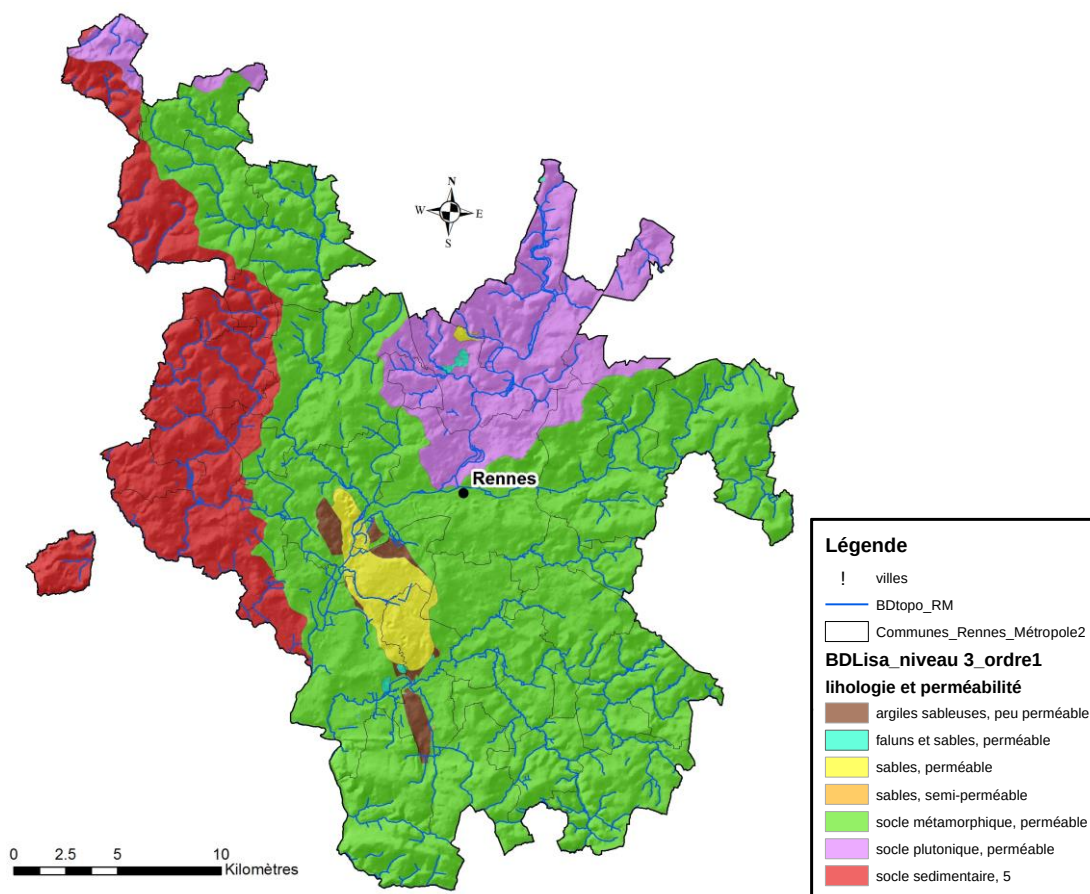


Illustration 2 – Entités hydrogéologiques BD Lisa niveau 3 ordre 1 *

Les sols et sous-sols schisteux ou granitiques sont peu perméables et défavorables à la présence d'eau souterraine. Conjugués aux pluies de climat océanique, ils confèrent une grande irrégularité au débit des cours d'eau, avec des variations saisonnières et de fortes disparités d'une année sur l'autre ; fort à très élevé en hiver avec des inondations fréquentes localement, assez faible l'été et variable selon la pluviométrie annuelle.

Néanmoins, il existe de nombreuses petites zones humides associées à des cours d'eau. Ce sont des milieux naturels favorisés par la situation géographique (climat océanique) et par leurs caractéristiques géologiques.

* La BD Lisa (Base de Donnée des Limites des Systèmes Aquifères) est un référentiel cartographique du Système d'Information sur l'Eau. Elle classe le sous-sol en entités hydrogéologiques selon différentes propriétés : aquifère ou imperméable, écoulements libres ou captifs, milieu poreux, fracturé, karstique.

2. Carte d'épaisseur de la zone non saturée

L'épaisseur de la zone non saturée (ZNS) joue un rôle important dans les temps de transfert des eaux météoriques vers le niveau de la nappe. Lors du premier mètre traversé, ces temps de transfert sont aussi conditionnés par le type de sol rencontré. La nature, la texture, la perméabilité verticale et les teneurs en eau du sol sont d'autant de paramètres supplémentaires qui vont réguler la nature et la quantité d'échanges entre la surface et la ZNS.

Pour déterminer l'épaisseur de la zone non saturée sur le territoire de Rennes Métropole, une campagne piézométrique a été réalisée en période de hautes eaux souterraines (période la plus contraignante pour l'infiltration des eaux pluviales).

Les conditions les plus défavorables pour infiltrer des eaux pluviales sont un sol saturé en eau et une nappe haute. Les capacités de stockage en eau des sols est donc réduite au minimum ainsi que l'infiltration des eaux pluviales d'où l'intérêt de connaître l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS).

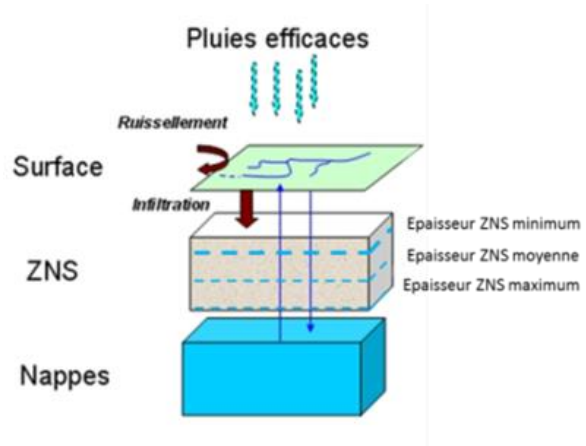


Illustration 3 – Schéma conceptuel des différents compartiments entre la surface du sol et les eaux souterraines

2.1. PREPARATION ET DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE PIEZOMETRIQUE

2.1.1. Préparation de la campagne piézométrique

Pour cette campagne piézométrique, l'ensemble des piézomètres a été recensé sur la zone d'étude à partir des bases de données suivantes, organisées et gérées par le BRGM :

- La BSS (banque du sous-sol) : toutes les données sur les ouvrages (forages, sondages, puits et sources) souterrains du territoire sont collectées pour être conservées dans une base de données ;
- Le portail ADES met à disposition les données sur la qualité de l'eau et les niveaux d'eau des eaux souterraines. Guichet unique d'accès à ces données, il constitue un outil pour suivre l'état des ressources en eaux souterraines ;
- La BSS EAU est la base de données relative aux informations sur les eaux souterraines, et respecte le format SANDRE (données sur la qualité des eaux souterraines, niveaux d'eau, prélèvements, etc...). Elle diffuse des informations spécifiques sur le descriptif du point d'eau (mode de gisement, entités hydrogéologiques et masses d'eau associées,...).

Ce recensement a permis d'identifier 800 points d'eau mais sans information sur le niveau de leur accessibilité. Un travail a été réalisé sur la sélection des points en fonction de leur profondeur avec pour objectif de cibler les premières nappes rencontrées.

Ces données ont été complétées par des données issues d'une couche SIG de Rennes Métropole, qui localise des puits de faible profondeur et qui ne sont pas forcément déclarés dans la BSS (le code minier précise que tout ouvrage de plus de 10 m doit être déclaré dans la BSS).

Statistiquement et au vu de possibles problèmes d'accès et de visibilité en milieu urbain, l'objectif de cette campagne piézométrique était de mesurer 380 à 480 points sur la zone d'étude soit une densité de 1 point tous les 1,47 km².

L'équipe de travail pour cette campagne piézométrique est composée de 10 techniciens en hydrogéologie. La zone d'étude a donc été partagée en dix secteurs pour permettre une meilleure adéquation entre les trajets et la densité de points à mesurer (cf. illustration 4).

En parallèle une campagne de communication a été mise en place avant le déroulement de la campagne de mesures afin de faciliter l'accès des techniciens aux puits et aux forages. Pour cela Une plaquette d'information a été distribuée aux population sur place, un courrier a été envoyé aux mairies des communes de Rennes Métropole associé à un mail et un communiqué de presse a été écrit à destination de la presse quotidienne régionale.

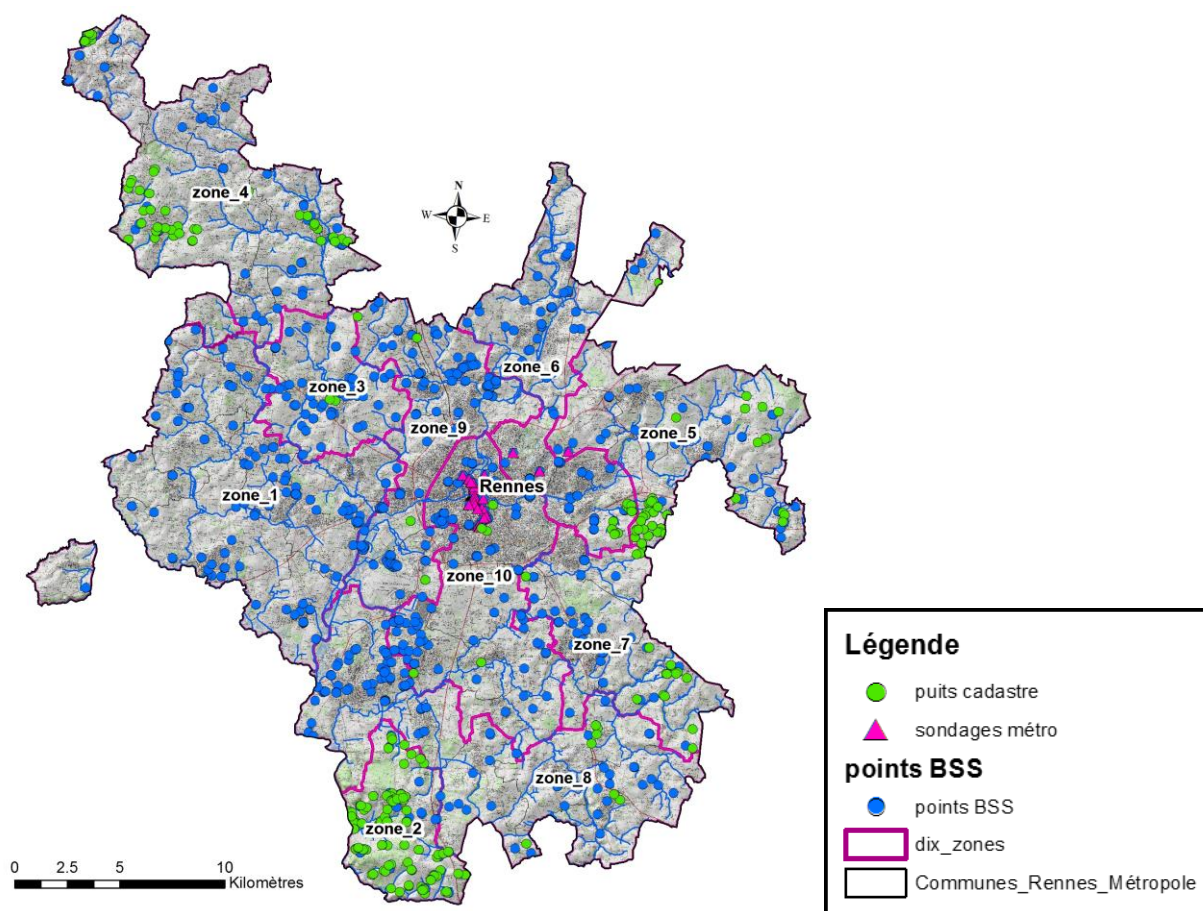


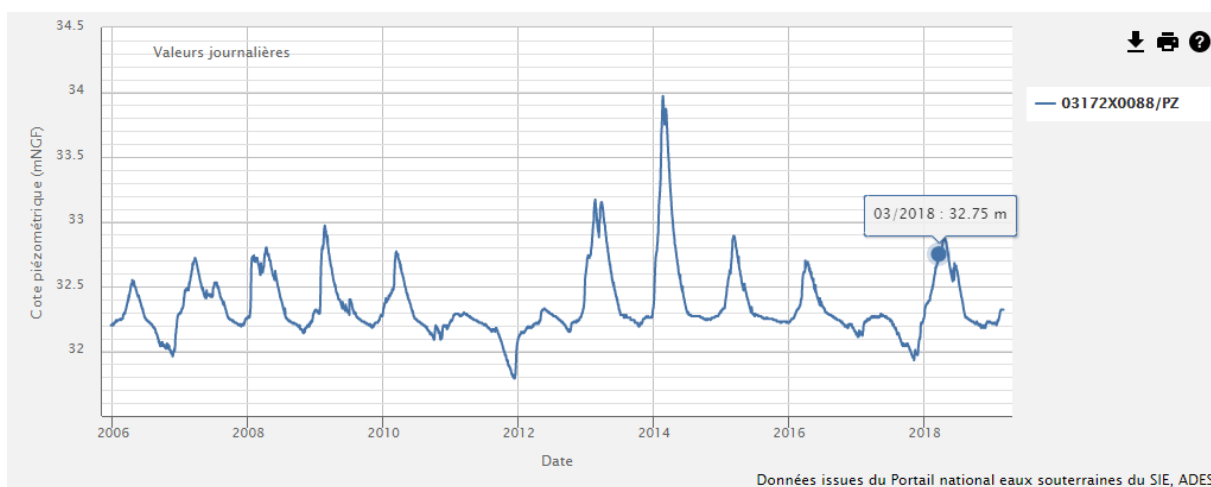
Illustration 4 – Sectorisation de la zone d'étude en dix secteurs pour la campagne piézométrique

2.1.2. Les mesures

La campagne de mesures s'est déroulée du 05 au 16 mars 2018. Pour les eaux souterraines, cette période est normalement caractéristique des hautes eaux.

Les deux piézomètres de référence dans le secteur d'étude qui ont un suivi piézométrique disponible, indiquaient effectivement une forte remontée des niveaux des nappes : bien que les niveaux les plus hauts pour 2018 n'étaient pas encore atteints, ils s'en approchaient fortement, comme le montrent les chroniques piézométriques de l'illustration 5 ci-dessous.

Localisation : St Grégoire – La petite Noë (03172X0088/PZ) / Faluns Et Sables Du Miocène Moyen À Supérieur /entité BDLisa 104C08/ profondeur d'investigation 15 m



Localisation : St Jacques de la Lande – METEO France (03172X0338/PZ) / Socle Métamorphique / entité BdLisa 174AA01 / profondeur d'investigation 60 m

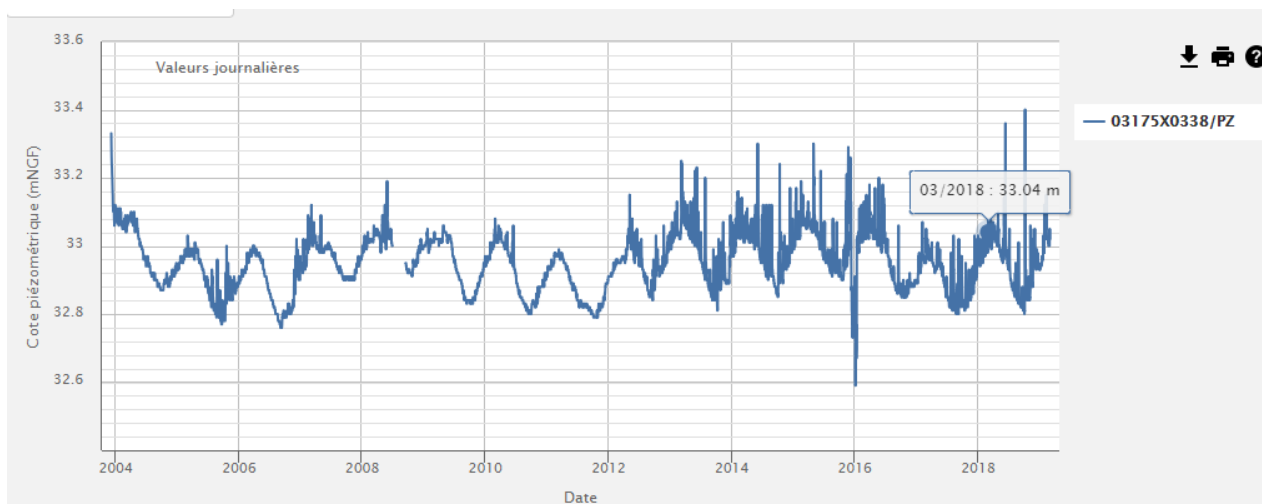


Illustration 5 – Chroniques piézométriques des deux points d'eau ADES de la zone d'étude

Les mesures réalisées sur le terrain ont été les suivantes et ont fait l'objet de fiche de terrain (Annexe 1) :

- les coordonnées X, Y du site,
- la cote topographique Z du sol
- l'identification d'un repère et mesure de sa hauteur par rapport au sol,
- le niveau piézométrique par rapport au repère de mesure (RM),
- la profondeur du puits par rapport au repère de mesure (RM),
- les photographies du site,

La cote topographique du sol, celle du repère de mesure et du niveau piézométrique, ont été déterminées par calcul à partir du Modèle numérique de terrain (MNT) de précision 40 cm fourni par les services de Rennes Métropole.

2.1.3. Bilan de la campagne piézométrique

Les premières analyses de la campagne piézométrique montrent que finalement, peu de points d'eau issus de la BSS ont été mesurés. Beaucoup de points n'existent plus ou sont inaccessibles du fait du développement de l'urbanisation dans certaines zones.

Finalement 692 points ont été mesurés par les techniciens du BRGM, entre le 05 et le 15 mars 2018 et 4 mesures ont été prises le 16 mars 2018 par un industriel à Vern-sur-Seiche. Ces 696 points sont répartis de façon homogène sur le territoire de Rennes Métropole à l'exception de la zone urbaine de Rennes, soit une densité de 1 point tous les 0.97 km² (cf. illustration 6).

Le nombre de mesures a donc été supérieur à ce qui était attendu, cela est dû principalement à la mesure de puits communaux et à une recherche minutieuse d'ouvrages directement sur le terrain. Le bilan de cette campagne est donc satisfaisant car la densité de points va permettre de réaliser une interpolation de meilleure qualité. Cette interpolation va permettre de produire une grille de l'épaisseur de la zone non saturée au pas de 25 m.

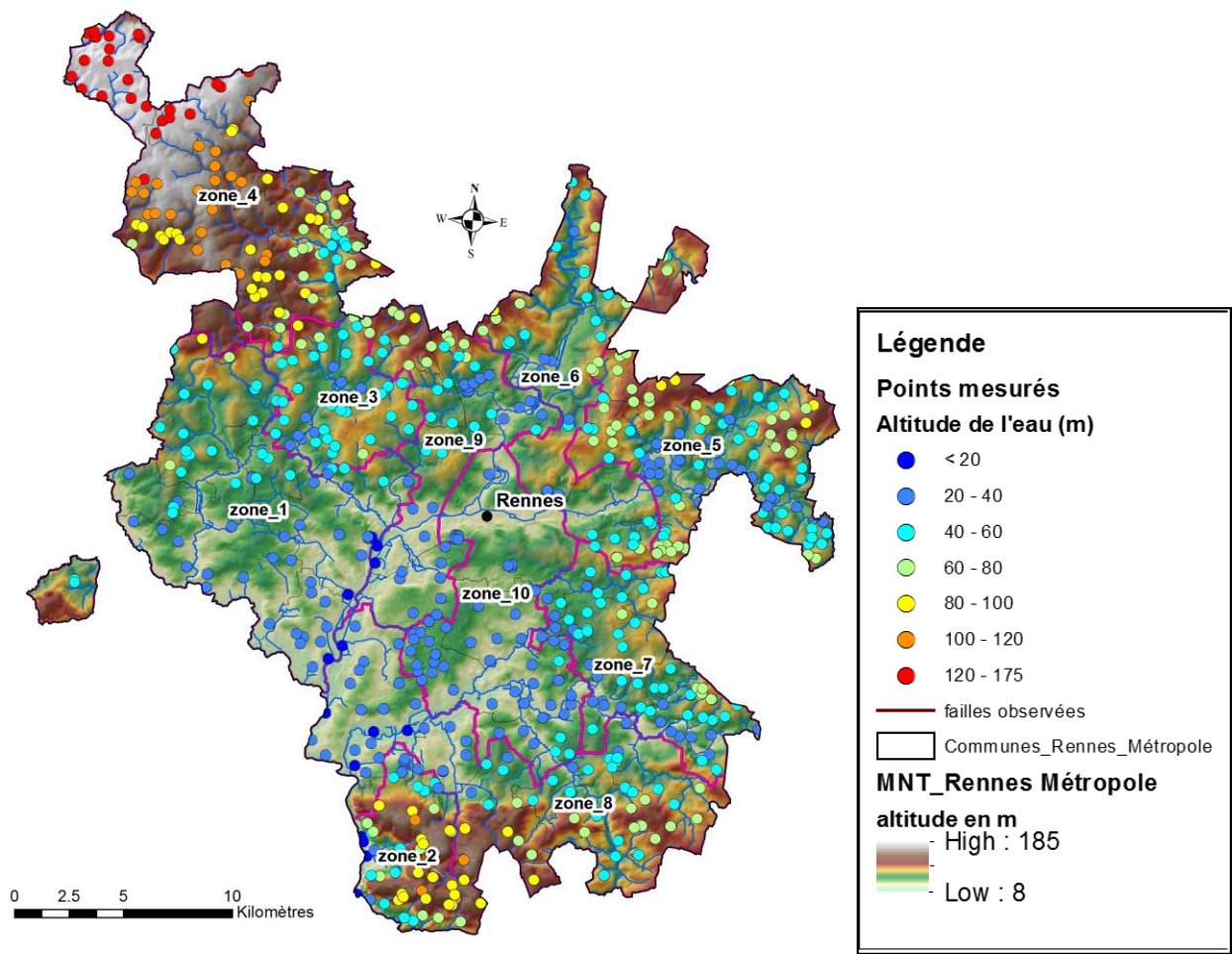


Illustration 6 – Répartition des points mesurés lors de la campagne piézométrique

2.2. INTERPOLATION DE LA CARTE PIEZOMETRIQUE

2.2.1. Préparation des données

Vérification des données de la campagne piézométrique et suppression des anomalies

Au droit de chaque ouvrage ayant fait l'objet d'une mesure du niveau statique, l'altitude du sol (Zsol) a été extraite du MNT 2 m, ayant une précision de +/- 40 cm en Z. L'altitude de la nappe a été calculée en chaque point, en prenant en compte la hauteur du repère de mesure et la profondeur de la nappe par rapport à celui-ci.

Chaque mesure du niveau piézométrique a fait l'objet d'une validation par un hydrogéologue. Certaines informations essentielles ont notamment été vérifiées, afin d'identifier les mesures ne représentant pas le niveau statique de la nappe :

- l'altitude du sol rapportée à la tête de puits en fonction de l'altitude topographique (donnée par le MNT 2 m, rééchantillonné à 25 m) ;
- les coordonnées géographiques ;
- la cohérence entre la profondeur totale mesurée du puits et l'aquifère capté ;
- les éventuelles influences...

La carte piézométrique a été dressée sur la base de 696 mesures du niveau statique validées.

Création d'une base de données

Les informations suivantes ont été intégrées dans une base de données utilisées pour la construction des cartes piézométriques :

- les 696 mesures piézométriques de la campagne 2018 ;
- le modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 2 mètres, rééchantillonné à la maille 25 mètres (source : Métropole de Rennes) ;
- des anciennes mesures piézométriques issues de la BSS EAU (1654 points) ou fournies par Rennes Métropole (126 points), servant de points de contrôle ;
- les failles géologiques ;
- les cours d'eau, représentés par 1063 points associés à une altitude et disposés le long des rivières tous les 500 m.

L'interpolation finale de l'altitude de la nappe fournit une grille au pas de 25 m. Afin d'intégrer la grille du MNT au calcul, le MNT au pas de 2 mètres a été rééchantillonné à la maille 25 mètres.

La base rassemblant les données nécessaires à l'élaboration des cartes piézométriques a été organisée de façon à utiliser les 696 mesures des piézomètres comme « points de passage » (équivalent aux données d'entrée) dans l'interpolation. L'ensemble des données est codé avec une valeur de « Zeau », correspondant au toit de la nappe.

2.2.2. Elaboration de la carte piézométrique

La carte piézométrique a été réalisée selon la démarche suivante (Illustration 7) :

- analyse et codage de données de mesures piézométriques et des points de contrainte imposés ;
- interpolation par krigeage avec modèle de variogramme de la cote piézométrique ;
- contrôle des résultats.

Les cartes piézométriques ont été réalisées en utilisant le logiciel Suite GDM 2018 (*Geological Data Management* - <http://gdm.brgm.fr>). La suite GDM 2018, développée et éditée par le BRGM, est conçue pour compiler, interpoler et visualiser des données géoscientifiques, dont des données hydrogéologiques. Le « workflow » mis en place comprend la vérification des données, la gestion des paramètres de calcul, les contrôles de cohérence entre les données, la génération automatique des interpolations des surfaces piézométriques et les restitutions graphiques en cartes des interpolations.

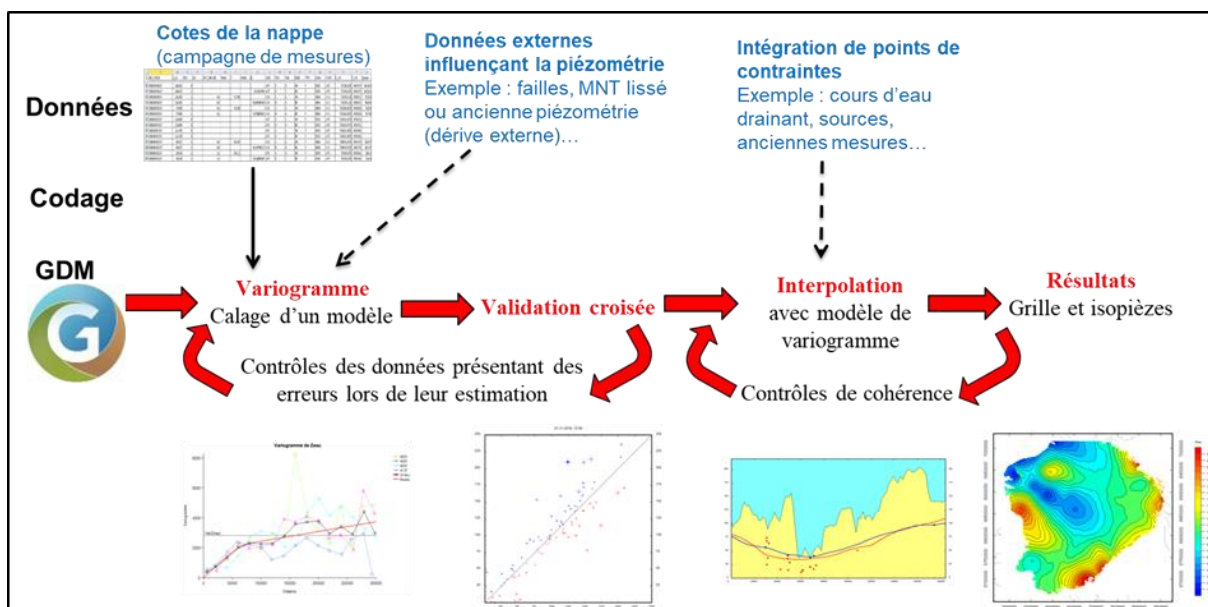


Illustration 7 - Principe de la modélisation d'une carte piézométrique sous GDM.

Interpolation de la surface piézométrique

Pour procéder à l'interpolation des surfaces piézométriques, une grille de calcul de maille 25 m par 25 m a été générée, identique à celle du MNT rééchantillonné.

L'ensemble des points de passage (Zeau) et des points de contrainte a été interpolé. La méthode d'interpolation utilisée est le krigeage, avec un modèle de variogramme pour la surface piézométrique (Illustration 8). Le variogramme permet d'évaluer la corrélation des observations en fonction de la distance qui sépare les points d'observation. La méthode d'interpolation par krigeage avec modèle de variogramme permet de procéder à une validation des estimations par la méthode nommée « validation croisée ». Cette méthode permet d'identifier rapidement des points erronés, sur ou sous-estimés. Une fois les points aberrants identifiés puis corrigés ou éliminés, un nouveau variogramme est calculé pour détecter les erreurs résiduelles. Le processus peut être réitéré plusieurs fois pour éliminer les erreurs.

Plusieurs méthodes d'interpolation, intégrant des variogrammes différents, ont été testées. Selon la connaissance du contexte hydrogéologique, le modèle de variogramme le plus approprié et robuste a été adopté. Il s'agit d'un modèle sphérique (Illustration 9), intégrant une dérive d'ordre 2. La variance est de 213 et l'écart type de 14,60.

Le variogramme des niveaux n'est pas stationnaire aux grandes distances. Les eaux souterraines sont drainées notamment par la Vilaine, en direction du centre de la zone d'étude. L'intégration d'une dérive d'ordre 2 (cuvette) permet de ramener le modèle de variogramme à un cas stationnaire et structuré.

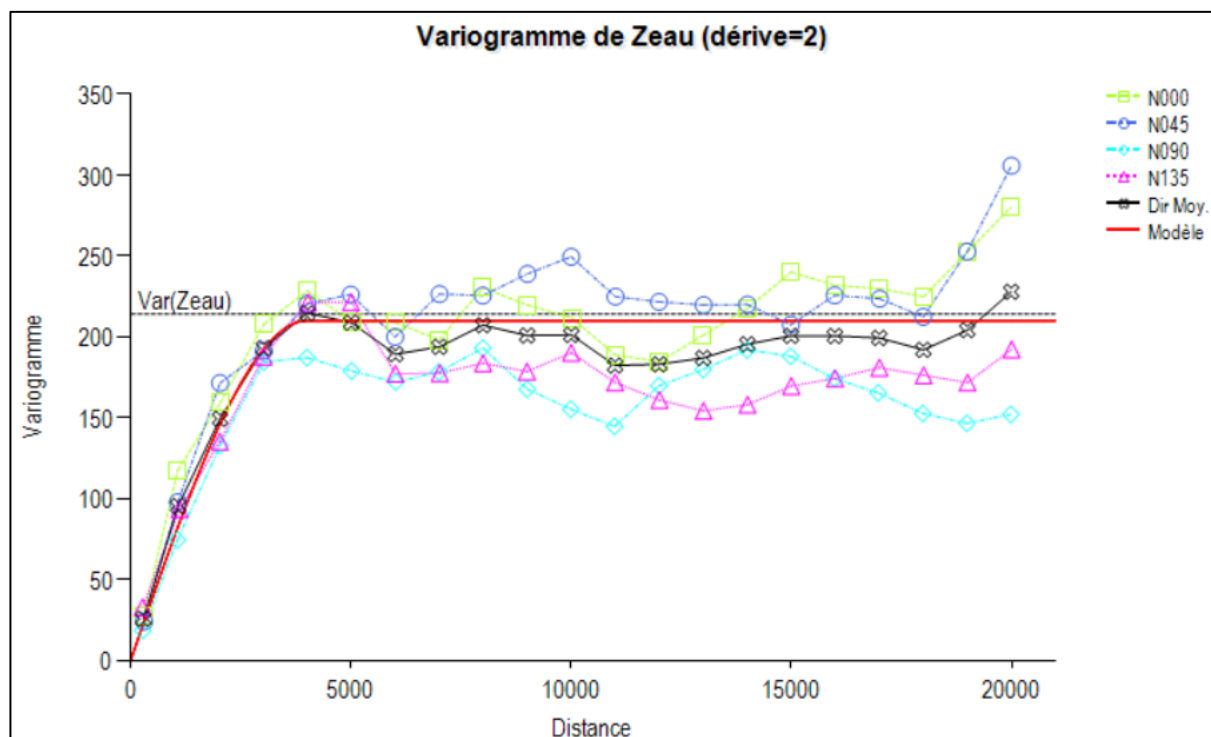


Illustration 8 – Variogramme et modèle de variogramme.

Définition du modèle de variogramme

Effet de pente :

N°	Type du modèle	Palier (ou exposant du modèle puissance)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI)	Type d'anisotropie	Direction d'anisotropie (PSI) / Nord	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI+90)	Exposant
1	Sphérique	210	4000	Isotropique			

Illustration 9 – Paramètres du modèle de variogramme.

Contrôle des interpolations et points de contrainte imposés

Plusieurs tests de cohérences ont été effectués sur les données interpolées :

- vérification du variogramme et identification des éventuels points erronés ;
- test sur les différences entre l'altitude de la topographie (Zsol) et l'interpolation de la surface de la nappe ;

- contrôle de la carte piézométrique avec les anciennes mesures piézométriques et correction par l'intégration de points de contrainte ;
- contrôle visuel des isopièzes (limites d'alimentation, drainage, artefacts, influence éventuelle des failles...) et correction par l'intégration de points de contrainte ;
- contrôle de la carte piézométrique au droit des points de contrainte imposés.

Les données d'entrée ont été contrôlées et éventuellement corrigées ou non prises en compte. La base de données finale comprend 696 points de passage (Zeau), dont 693 ont servi à l'interpolation des surfaces piézométriques (Illustration 10). Le contrôle des données et la phase d'élaboration des cartes piézométriques ont permis d'identifier et d'écarter les données incohérentes. Les niveaux au droit des ouvrages 741, z2-050 et z3-21 ont été mesurés alors que les pompes étaient actives et les niveaux étaient dynamiques d'après les mesures voisines. Ces données considérées comme non valides ou incohérentes ne sont pas prises en compte dans l'interpolation et ne sont, par conséquent, pas codées. Elles sont désactivées par un paramètre présent dans la base de données (paramètre KEEP).

Afin d'améliorer les résultats de l'interpolation et tenir compte du contexte hydrogéologique local, des points de contrainte ont été intégrés lors de l'interpolation finale (Illustration 10) :

- 935 points de représentation des cours d'eau ;
- 31 anciennes mesures piézométriques.

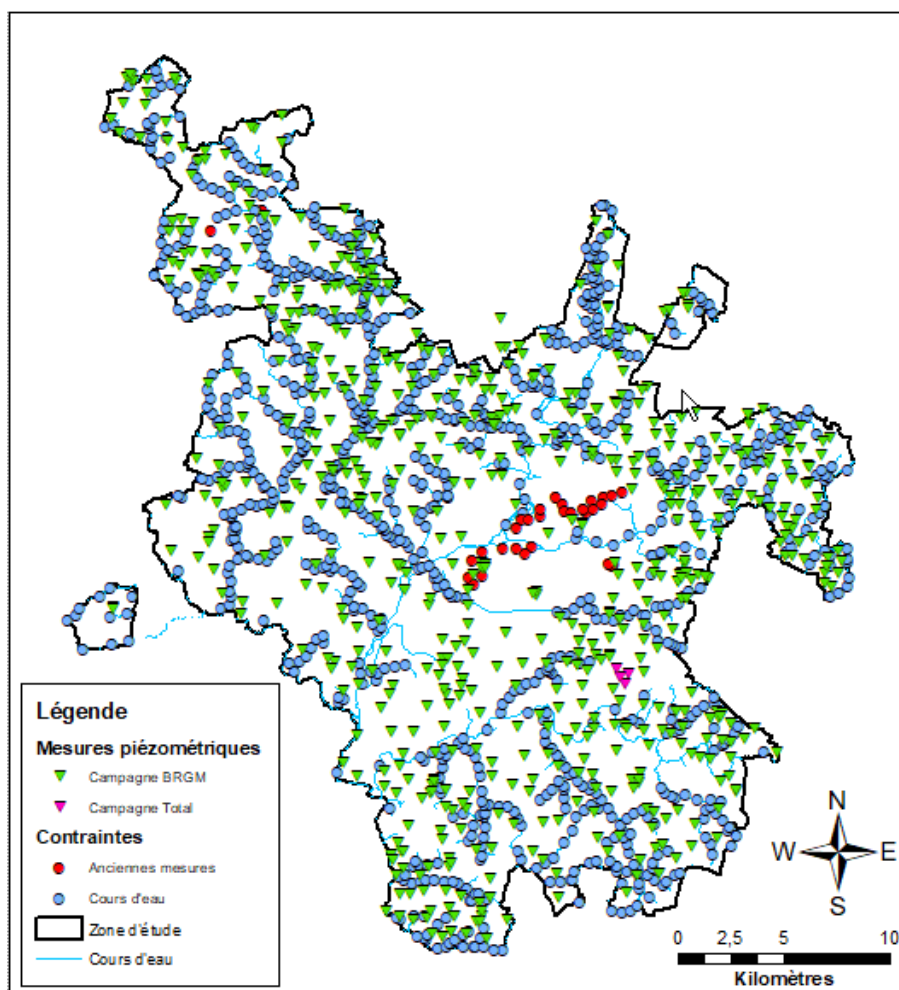


Illustration 10 – Localisation des données utilisées pour l'interpolation des cartes piézométriques

En contexte de nappe libre de socle, les cours d'eau pérennes sont considérés comme des zones d'affleurement de la surface piézométrique (Illustration 11). Les rivières représentent les exutoires de la nappe et la surface piézométrique remonte sous les plateaux. La surface piézométrique est donc toujours comprise dans l'intervalle limité vers le haut par la surface topographique et vers le bas par la surface-enveloppe des rivières pérennes (ou enveloppe de la base des thalwegs).

Au droit d'une vallée humide, l'altitude de la nappe est imposée par le niveau de la rivière lorsque celle-ci est en communication hydraulique avec la nappe. Il a été vérifié pour l'ensemble des cours d'eau si ceux-ci étaient ou non en communication hydraulique avec la nappe. Lorsque la surface piézométrique brute (tracée uniquement avec les mesures piézométriques de la campagne 2018) recoupait la topographie, 935 points à niveau piézométrique imposé ont été placés tout au long du cours d'eau drainant, pour contraindre les isopièzes à respecter cette configuration hydraulique. Ainsi, le niveau piézométrique correspondant aux altitudes de la rivière d'après le MNT 2 m fourni par la Métropole de Rennes a été imposé au niveau de ces 935 points.

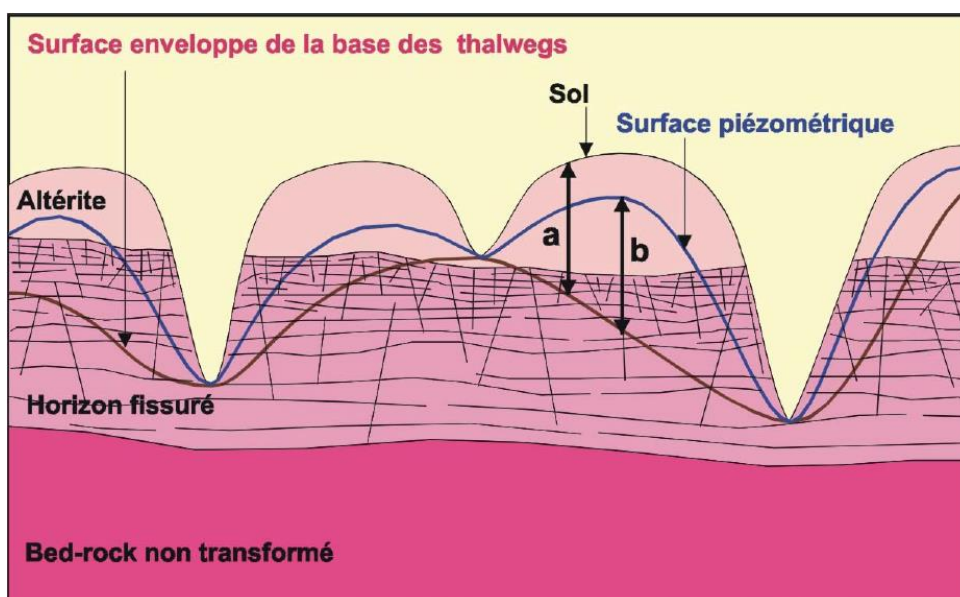


Illustration 11 – Principe de modélisation de la surface piézométrique en domaine de socle (Wyns et al., 2004)

Dans certains secteurs, il a été nécessaire de densifier les données grâce à d'anciennes mesures piézométriques. Ces niveaux ont été comparés à la situation piézométrique de début mars 2018. Au total 31 points de contrainte ont été pris en compte, notamment sur la ville de Rennes afin de mieux caractériser les écoulements.

Lors des campagnes de reconnaissance des sols réalisées entre 2009 et 2014, pour la mise en place des lignes de métro de Rennes, de nombreux niveaux piézométriques ont été relevés. Un suivi est ainsi disponible le long de la ligne B, sur 122 ouvrages, d'octobre 2009 à octobre 2014. Les mesures piézométriques réalisées au droit de 26 points, lors des campagnes du 15/04/2010 ou du 08-09/01/2014 et situés dans des zones où l'on ne disposait pas d'informations pour la campagne 2018, ont été incorporées comme points de contrainte.

Quatre piézomètres ont été suivis sur le sud de Rennes, à Chêne Moran, d'octobre 2015 à octobre 2016. Ce suivi avait été mis en place lors d'un chantier de reconversion d'une parcelle. Les niveaux de 3 points (PZ2, PZ3, PZ5), mesurés le 09/05/2016, ont été intégrés aux contraintes.

Enfin, 2 mesures disponibles en BSS EAU ont été prises en compte comme points de contrainte.

Interpolation finale de la surface piézométrique et validation des isopièzes

L'ensemble des points de passage (Zeau) et des points de contrainte ont été interpolés par krigeage, avec le modèle de variogramme.

Le résultat final se présente sous forme d'une grille des altitudes de la nappe au pas de 25 m.

2.3. PRESENTATION ET ANALYSE DE LA CARTE PIEZOMETRIQUE

2.3.1. Caractéristiques et limites d'utilisation de la carte piézométrique

Les isopièzes (courbes d'égale valeur de niveau piézométrique) ont été tracées à partir des données recueillies lors de la campagne de mesures de mars 2018. Elles représentent les niveaux d'eau en hautes eaux de la nappe du socle au droit de la Métropole de Rennes.

Les cartes piézométriques produites sont des documents de synthèse, établis à une échelle de 1 / 25 000. Leur utilisation est essentiellement scientifique pour la connaissance des eaux souterraines : ces cartes permettent de visualiser les sens d'écoulement, les gradients hydrauliques, les niveaux de hautes eaux en 2018 de la nappe contenue dans les formations de socle sous l'agglomération rennaise.

Les courbes piézométriques ont été établies lorsque les points d'observations étaient suffisamment nombreux pour permettre l'interpolation d'isopièzes. Certains secteurs ont bénéficié d'un nombre réduit de mesures compte tenu du contexte hydrogéologique (présence de nombreux cours d'eau drainant). Ainsi, l'absence de données en vallée peut engendrer la non prise en compte d'axes de drainage sur la piézométrie. De plus, l'insuffisance de mesures en limite de la zone d'étude, produit un lissage de la piézométrie lors de l'interpolation, qui peut générer une sous-estimation de l'altitude des crêtes piézométriques.

2.3.2. Clé de lecture de la carte piézométrique

Les cartes piézométriques sont une représentation cartographique, à un instant donné, de la surface des nappes libres ou de la pression hydrostatique des nappes captives. Elles peuvent être lues comme des cartes topographiques. Les courbes de niveau (ou isopièzes) correspondent aux altitudes de la nappe au moment de la mesure piézométrique. Elles donnent donc des indications sur l'état hydraulique de la nappe, le sens des écoulements en son sein et leur vitesse. L'altitude de chaque courbe de niveau (ou isopièze) est indiquée en mètres et possède le même plan de référence qui est celui du réseau de Nivellement Général de la France (NGF).

a) Etat hydraulique

Dans le socle, les nappes d'eau souterraine sont généralement libres, aucun écran imperméable ne recouvrant les formations. Par croisement entre la topographie et les surfaces piézométriques, les zones où la piézométrie est sub-affleurante ou peu profonde peuvent alors être identifiées. Au droit de ces secteurs, les eaux souterraines peuvent potentiellement alimenter les rivières et les zones humides.

b) Sens d'écoulement

Les isopièzes sont des équipotentielles : la charge hydraulique (altitude) est la même le long d'une isopièze. L'axe de l'écoulement des eaux souterraines est toujours perpendiculaire aux isopièzes

et le sens d'écoulement va dans le sens des potentiels décroissants, de la charge hydraulique la plus élevée vers la plus faible (Illustration 12). Ainsi, le trajet d'une goutte d'eau peut être déterminé en l'imaginant se déplacer le long d'un axe perpendiculaire à deux isopièzes immédiates, de l'isopièze la plus élevée vers la plus basse. Les limites des bassins versants hydrogéologiques se définissent le long des crêtes piézométriques, tandis que les points les plus bas correspondent aux axes de drainage (Illustration 12).

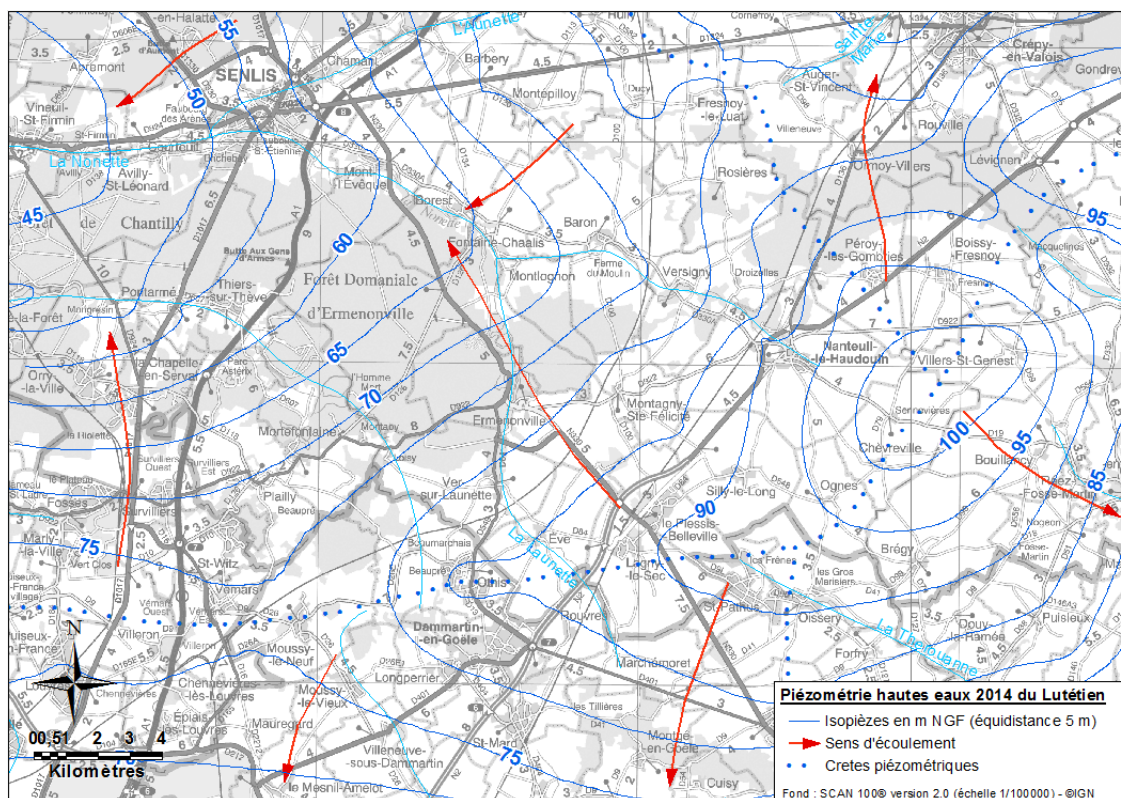


Illustration 12 – Exemple d'un carte piézométrique de la nappe du Lutétien en période de hautes eaux 2014 avec indication du sens d'écoulement général et des crêtes hydrogéologiques.

L'analyse de la piézométrie de la Métropole de Rennes montre que les lignes de courant partent généralement des plateaux et convergent vers les vallées. Ce constat prouve le rôle prédominant joué par les vallées structurantes, notamment par la Vilaine et ses affluents principaux, ces rivières drainant la nappe. Les bassins versants hydrogéologiques se superposent alors globalement aux bassins versants topographiques.

Les failles principales décrites dans la carte géologique de la région de Rennes ne semblent pas avoir une influence (drainance, barrière hydraulique) sur l'écoulement des eaux souterraines.

c) Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique entre deux points de la surface piézométrique est l'équivalent de la pente en topographie. Il est déterminé par calcul du rapport de la différence de potentiel entre deux points (différence de charge hydraulique) sur la distance séparant les deux points. Les vitesses d'écoulement des nappes sont liées à la perméabilité des aquifères et au gradient.

La nappe du socle du territoire de Rennes Métropole est fortement influencée par la topographie. Les gradients hydrauliques sont alors plus faibles au droit des plateaux et des vallées drainantes que sous les coteaux.

2.4. LA ZONE NON SATURÉE

2.4.1. Calcul de l'épaisseur de la zone non saturée

Pour calculer l'épaisseur de la zone non saturée, il suffit de soustraire aux altitudes du sol, déduites du MNT au pas de 2 m (fourni par Rennes Métropole), les valeurs des altitudes en hautes eaux fournies par l'interpolation (cf. Illustration 12). Le résultat est une grille au pas de 25 m qui représente pour chaque pixel l'épaisseur de la zone non saturée exprimée en mètres (cf. Illustration 13).

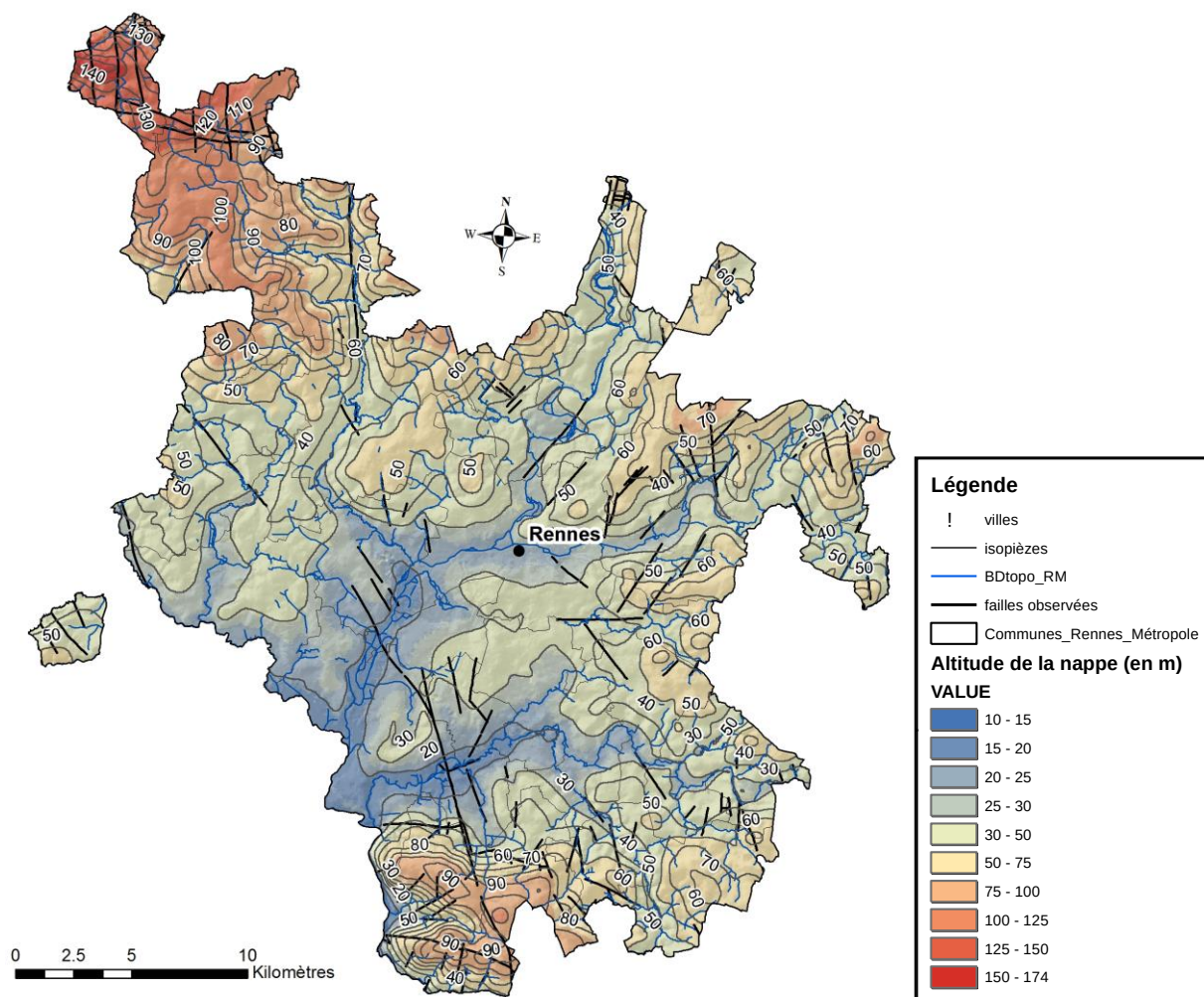


Illustration 13 – Carte des altitudes de la nappe issues de l'interpolation

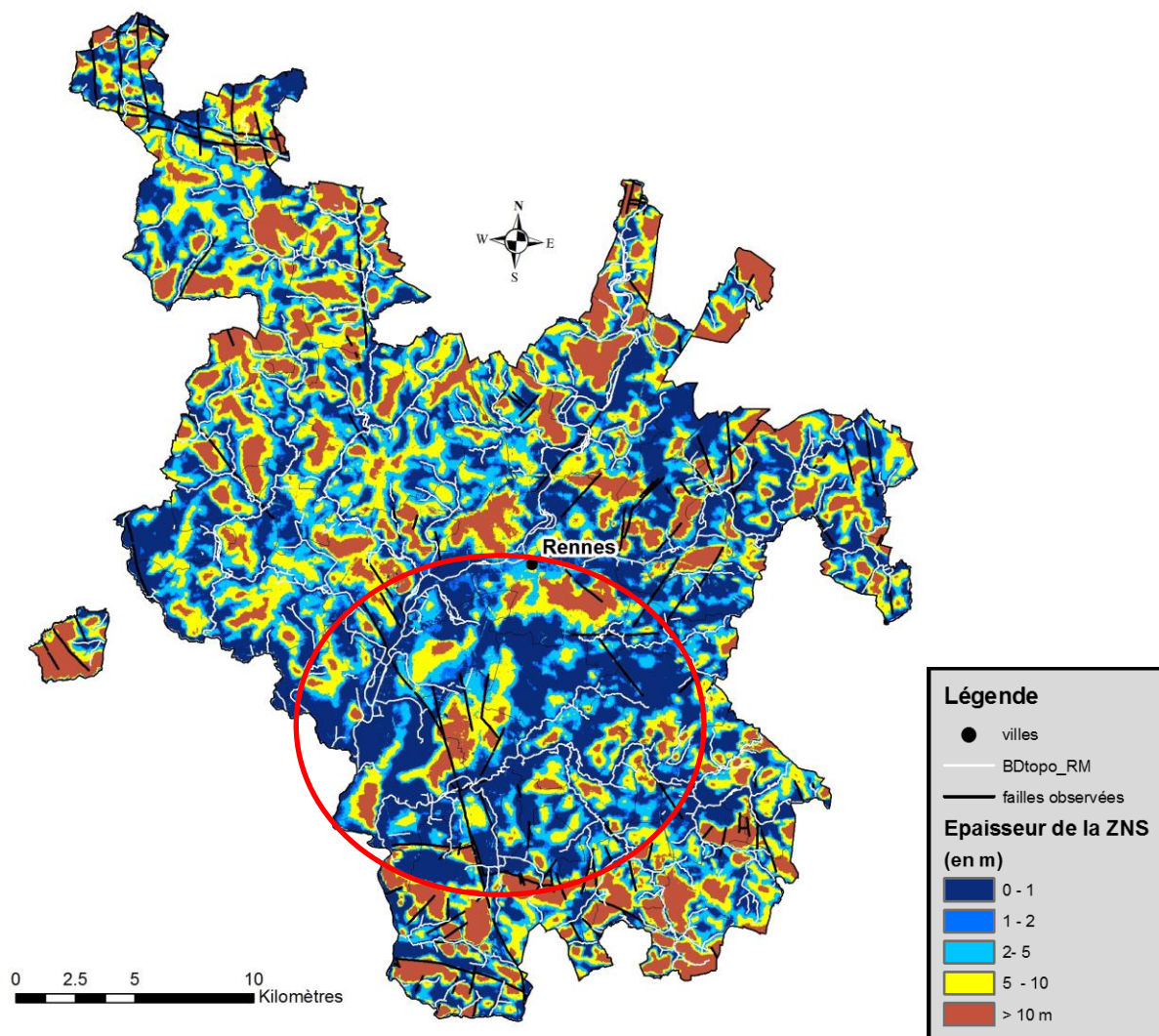


Illustration 14 – Grille au pas de 25 m de l'épaisseur de la zone non saturée sur le territoire de Rennes Métropole

Les résultats du calcul de la zone non saturée montrent logiquement une proximité des eaux souterraines de la surface des sols dans les fonds de vallées (épaisseurs inférieures à 1 m). Il s'agit le plus souvent de nappes alluviales en interaction avec les eaux de surface (cours d'eau et zones humides). Cette forte concentration des valeurs d'épaisseur de zone non saturée inférieures à 1 m (pixels bleus foncés – cercle rouge sur l'illustration 13) est localisée majoritairement dans les zones les plus basses de la zone d'étude soit au sud-ouest de la commune de Rennes et au droit des vallées alluviales. Il s'agit donc le plus souvent de nappes alluviales en interaction avec les eaux de surface (cours d'eau et zones humides).

Le tableau des statistiques (illustration 14) réalisés sur la répartition des valeurs des pixels de la ZNS interpolée, montre une majorité de pixels inférieurs à 1 m et une faible représentation des pixels compris entre 1 et 2 m. Cette classe est sous représentée du fait des variations rapides de l'épaisseur de la ZNS, dès que l'on s'éloigne des vallées alluviales.

Epaisseur de la ZNS	Surface des pixels (km ²)	Surface des pixels / surface totale de Rennes Métropole (en %)
ZNS < ou = 1 m	250.2	35.2
1 < ZNS < ou = 2 m	56.2	7.9
2 < ZNS < ou = 5 m	139.3	19.6
5 < ZNS < ou = 10 m	153.7	21.6
ZNS > 10 m	110.6	15.7

Illustration 15 – Tableau – surfaces des pixels en fonction de différentes classes d'épaisseur

2.4.2. Confrontation des résultats avec d'autres données

Si on compare les résultats de la carte de l'épaisseur de la zone non saturée (grille au pas de 25 m) avec d'autres sources d'information comme les zones endoréiques et les contours des zones humides de Rennes Métropole (cf. illustration 15), on constate une bonne adéquation de la localisation des zones en creux et des zones humides avec les secteurs où la nappe est la plus proche de la surface (inférieure à 1 m).

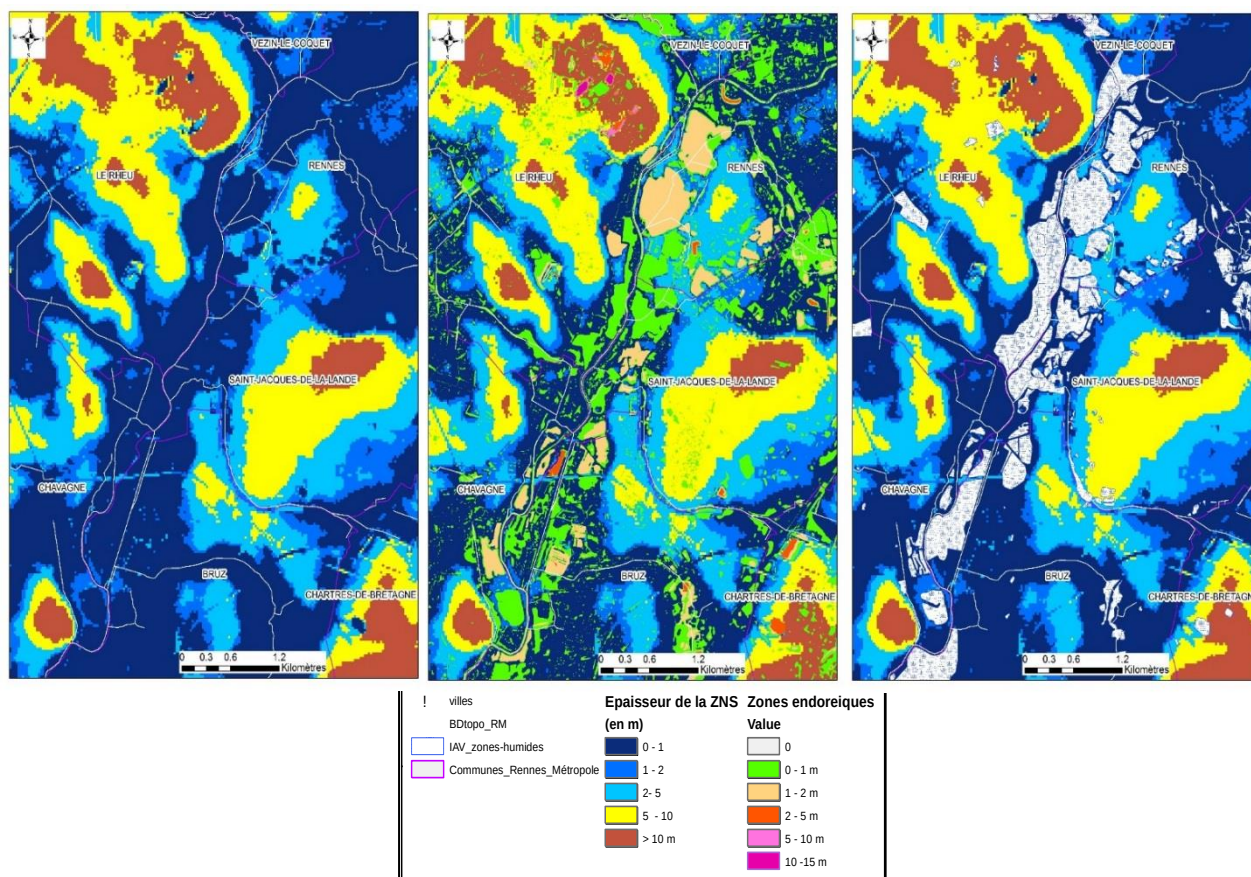


Illustration 16 – Comparaison de la ZNS interpolée (à gauche) avec les zones endoréiques (au centre) et les contours des zones humides (à droite) .

De la même manière avec la carte de l'hydromorphie des sols (INRA) au pas de 50 m et la carte de la zone non saturée (Hautes Eaux) interpolée sur le bassin Loire Bretagne, au pas de 250 m (autre étude BRGM en cours) avec une autre approche pour l'interpolation ont été comparées.

La comparaison de ces différentes grilles (illustration 16) montre une corrélation satisfaisante entre « les zones d'hydromorphie dès la surface » définie par l'INRA avec les secteurs où la nappe est proche de la surface (moins de 1 m).

La carte de la ZNS établie pour le bassin Loire-Bretagne met en évidence les mêmes secteurs où la nappe est proche de la surface. Cette carte permet aussi de voir aussi tout l'intérêt de travailler à des échelles plus grandes (secteur de Rennes Métropole) apportant de cette manière énormément de nuances et de précisions nécessaires pour les enjeux de ce territoire.

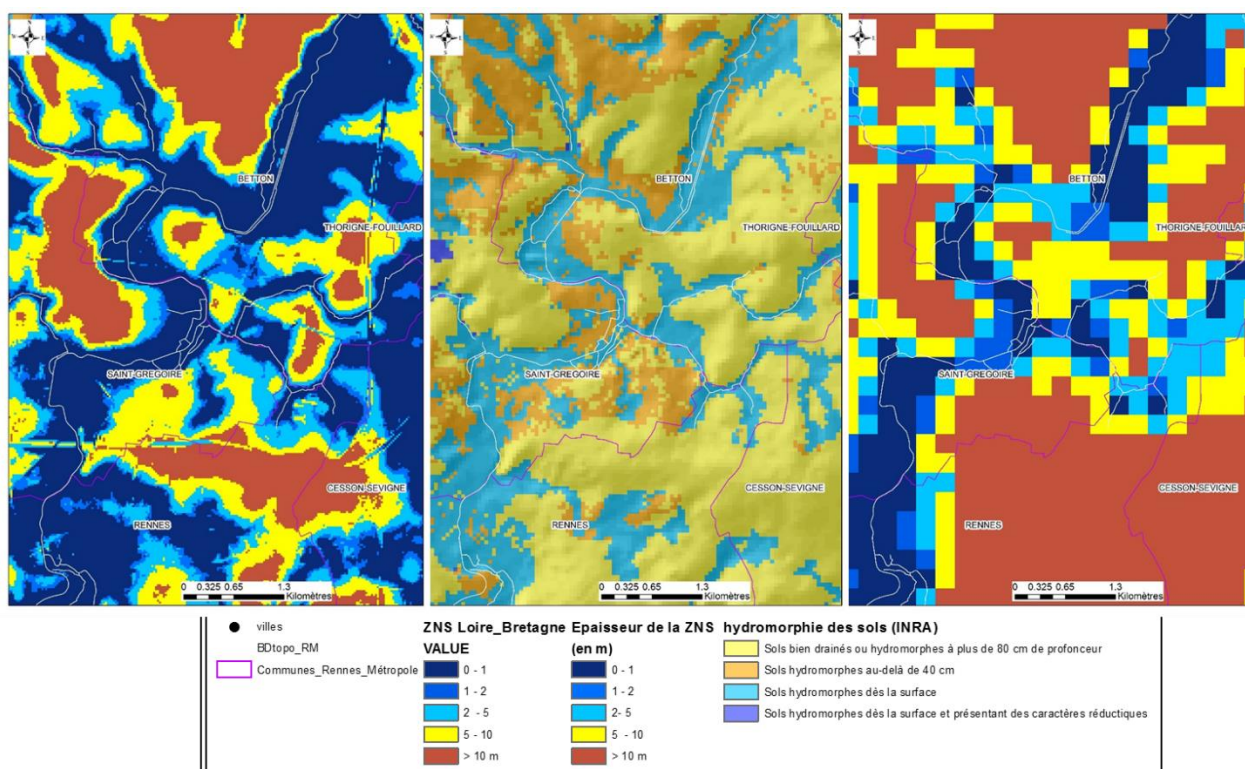


Illustration 17 – Comparaison de la ZNS interpolée (gauche) avec l'hydromorphie des sols (centre) et la ZNS Loire-Bretagne (droite).

Cette analyse des résultats de l'interpolation sur l'ensemble du territoire de Rennes Métropole ne révèle pas d'incohérence pour la suite de l'étude.

3. Les unités fonctionnelles

3.1. LE CONCEPT

Les unités fonctionnelles sont supposées avoir un comportement homogène (première approche) parce qu'elles résultent de l'intersection de couches d'informations géographiques issues de référentiels communément exploités (masses d'eau souterraine, entités hydrogéologiques, ...). Les couches d'information sont donc choisies en fonction de la thématique du projet (hydrogéologie, géologie, hydrologie...). Elles constituent le moyen d'associer des résultats à des objets aisément manipulables dans les systèmes d'informations couramment constitués dans le domaine de l'Eau.

3.2. LES TESTS DE CROISEMENT

Les données d'entrée disponibles pour répondre à cette problématique sont les entités BD Lisa (niveau 3 – ordre 1) à l'affleurement et les talwegs. Dans le socle, les unités BD Lisa correspondent aux contours des bassins versants de surface. A l'échelle de cette étude, ces contours sont inadaptés du fait de leur grande taille, il est donc nécessaire de retracer des bassins versants à partir du MNT au pas de 2 m, qui soient compatibles avec la précision des données à utiliser (données ponctuelles, grilles à différents pas, ...).

Pour reproduire au plus près une réalité équivalente à celle des cours d'eau naturels, la recherche d'une surface minimale de bassin versant susceptible d'initier un cours d'eau dans un contexte climatique moyen tel que celui du territoire national est de 62.5 hectares.

Dans le cas, de cette étude sur le territoire de Rennes Métropole deux tailles de bassins versants initiaux ont été testées : 4 et 10 hectares. Ces deux approches sont décrites ci-après :

1ère approche pour les unités fonctionnelles :

Les bassins versants sont tracés à partir du MNT de Rennes Métropole au pas de 2 m avec un calcul des talwegs selon un bassin minimal défini à dire d'experts soit 4 hectares (non représenté) ou 10 hectares (illustration 17).

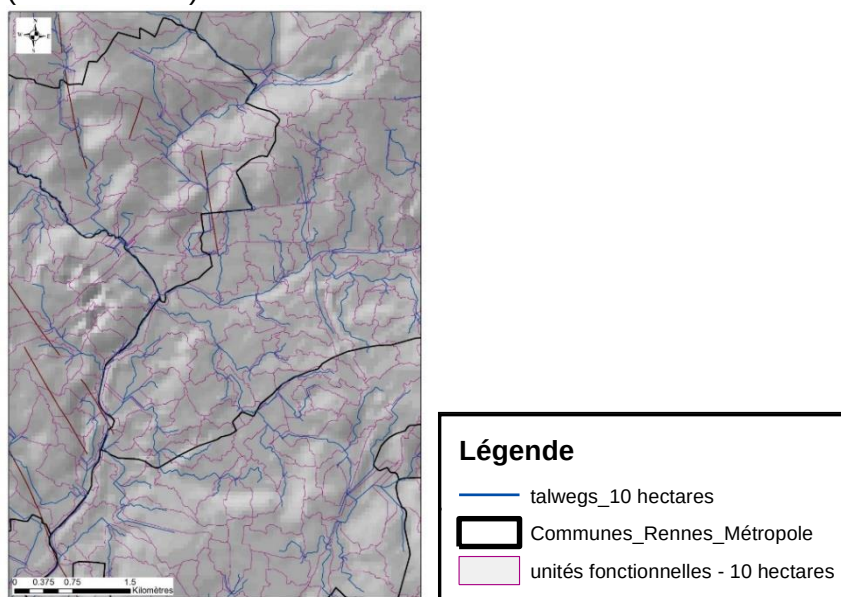


Illustration 18 – Extrait de la couche SIG des bassins versants avec une taille minimale de 10 hectares

La zone d'étude est ainsi découpée selon 9559 polygones d'une superficie moyenne de 0.075 km². Les bassins versants issus du traitement avec un bassin versant initial de 4 hectares n'ont pas été retenus pour la suite de la démarche. En effet certains bassins versants tracés automatiquement ont des contours rectilignes qui ne correspondent pas à ce que pourrait décrire dans la réalité de véritables bassins versants. Ce décalage montre que la taille initiale de 4 hectares est une limite pour ce genre de traitements géomorphologiques avec ce type de MNT précis.

2^{ème} approche pour les unités fonctionnelles :

Les bassins versants tracés sont intersectés avec d'autres couches thématiques. Deux tests ont été réalisés en utilisant dans un premier temps les contours de la géologie harmonisée au 1/50 000 (BRGM) puis dans un second temps les unités cartographiques « Sols » (UCS) produites au 1/250 000 par AgroSup /l'INRA/ Université de Rennes. Ces UCS sont décrites dans le rapport du Programme Sol de Bretagne (2005 – 2011).

Le croisement avec la géologie harmonisée (illustration 18) aboutit à une couche vectorielle constituée de 18711 polygones d'une taille moyenne de 0.038 km² (illustration 19).

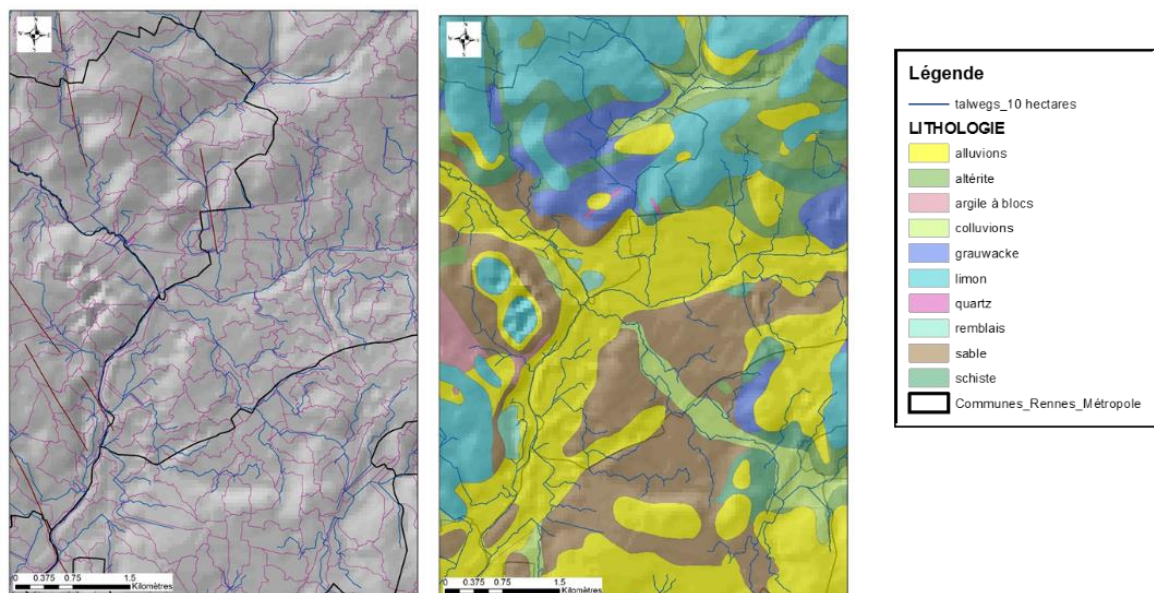


Illustration 19 – Couches SIG des bassins versants (10 hectares) et de la géologie harmonisée au 1/50 000

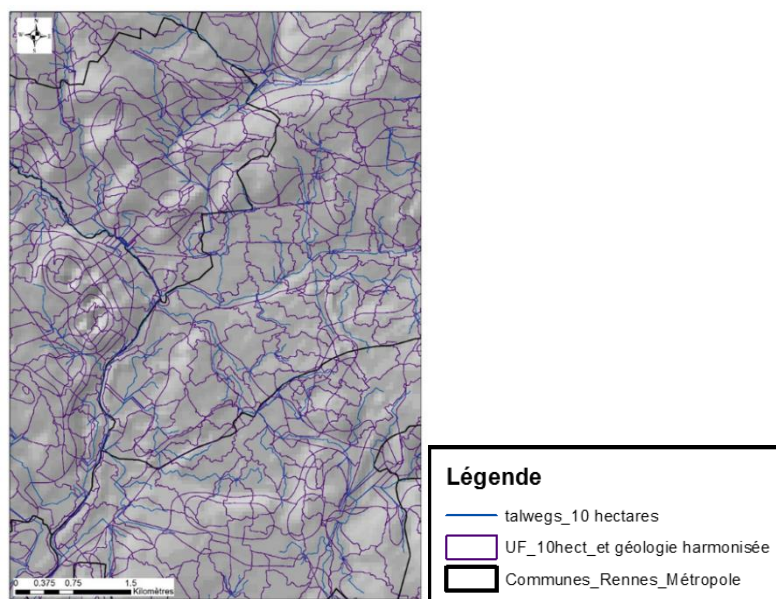
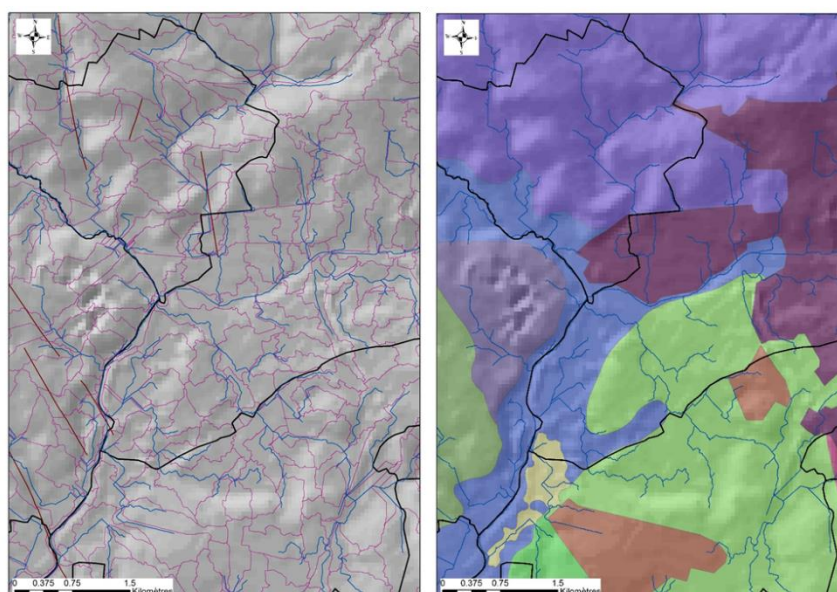


Illustration 20 – Extrait du croisement entre les bassins versants (10 ha) et de la géologie harmonisée au 1/50 000

Le croisement avec les unités cartographiques « sols » de l'INRA (illustration 20) permet la création d'une couche vectorielle constituée dans un premier temps de 11913 polygones d'une taille moyenne de 0.06 km² (illustration 21).



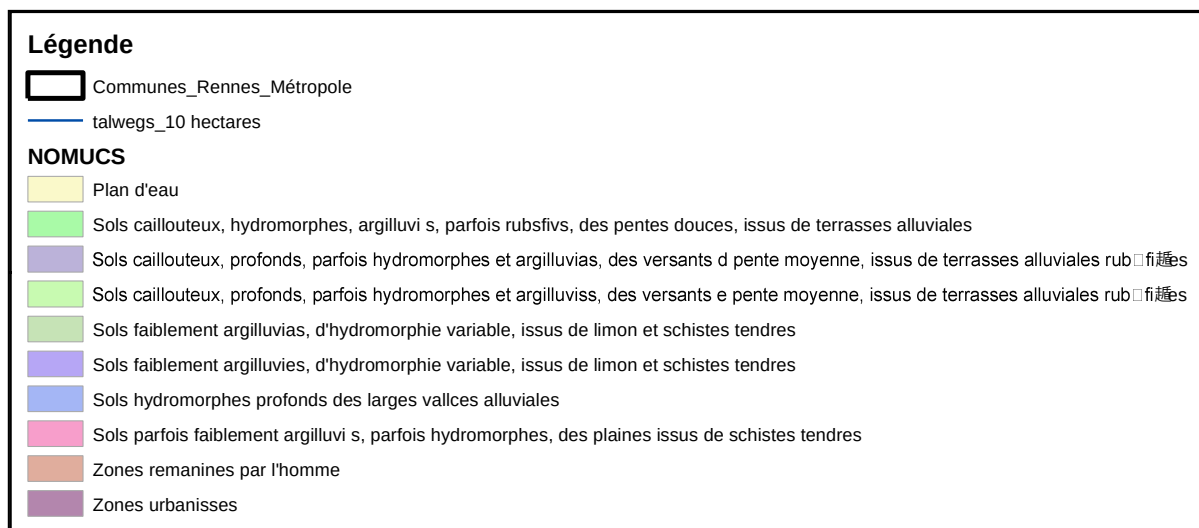


Illustration 21 – Couches SIG des bassins versants (10 hectares) et des UCS de l'INRA

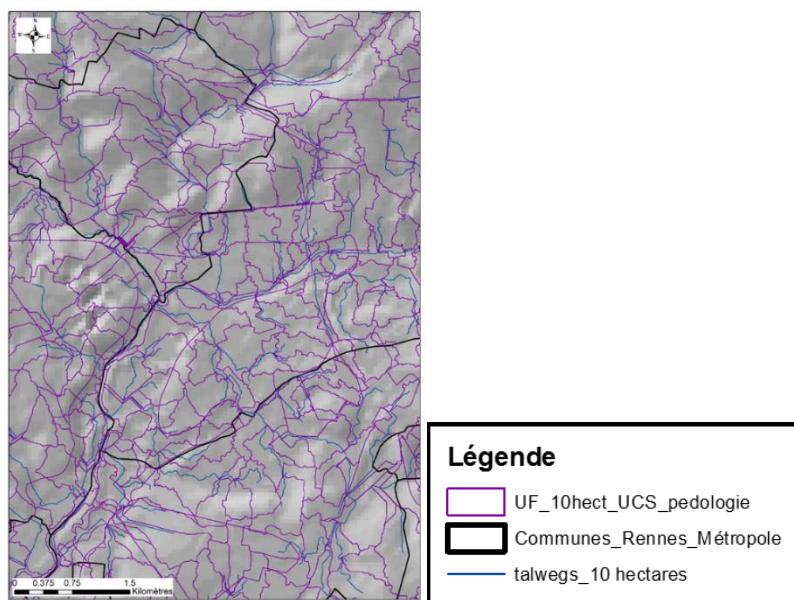


Illustration 22 – Extrait du croisement entre les bassins versants(10 ha) et les UCS de l'INRA

Le croisement retenu par le comité pilotage est celui qui concerne les unités cartographiques sols. Cela est dû principalement à l'objectif de l'étude où se sont bien les caractéristiques pédologiques (premier mètre à partir de la surface du sol) qui sont prépondérantes dans l'infiltration des eaux pluviales, ainsi que la présence ou non d'une nappe.

3.3. LES UNITES FONCTIONNELLES RETENUES POUR CE PROJET

La démarche retenue pour la construction des unités fonctionnelles se résume donc ainsi:

- Le traçage des bassins versants à partir du MNT de Rennes Métropole au pas de 2 m, avec un calcul des talwegs selon un bassin minimal défini à dire d'experts. Dans le cas de cette étude, la taille de bassin versant retenue est de 10 hectares ;
- Le redécoupage de ces bassins versants en trois parties : bassin versant rive droite, bassin versant rive gauche et bassin amont (illustration 22).

Ce nouveau découpage des bassins versants apporte une nouvelle précision sur les unités fonctionnelles en définissant des secteurs de rive droite, de rive gauche et un bassin versant amont.

- Ces bassins versants redécoupés sont ensuite intersectés avec les unités cartographiques sols, permettant ainsi d'inclure des informations sur la pédologie dans ces unités fonctionnelles.

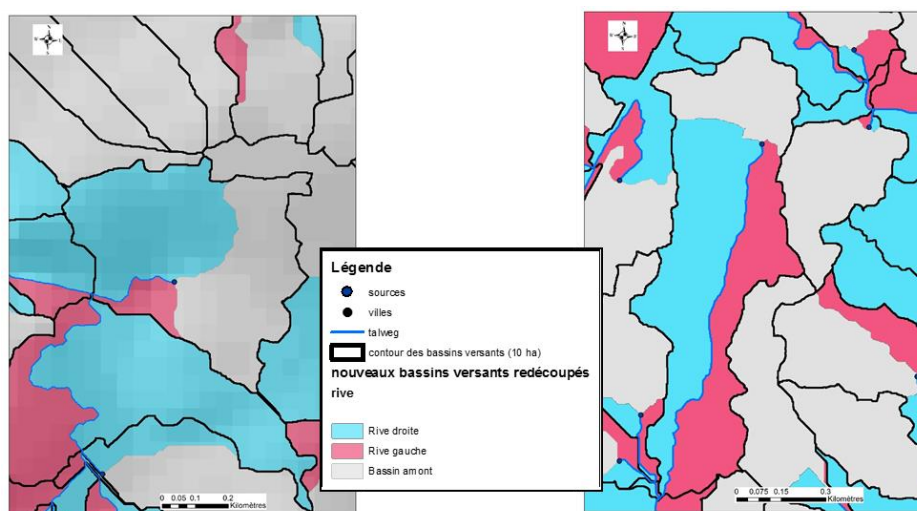


Illustration 23 – Extraits du découpage des bassins versants (10 ha) en rive droite, rive gauche et bassin amont

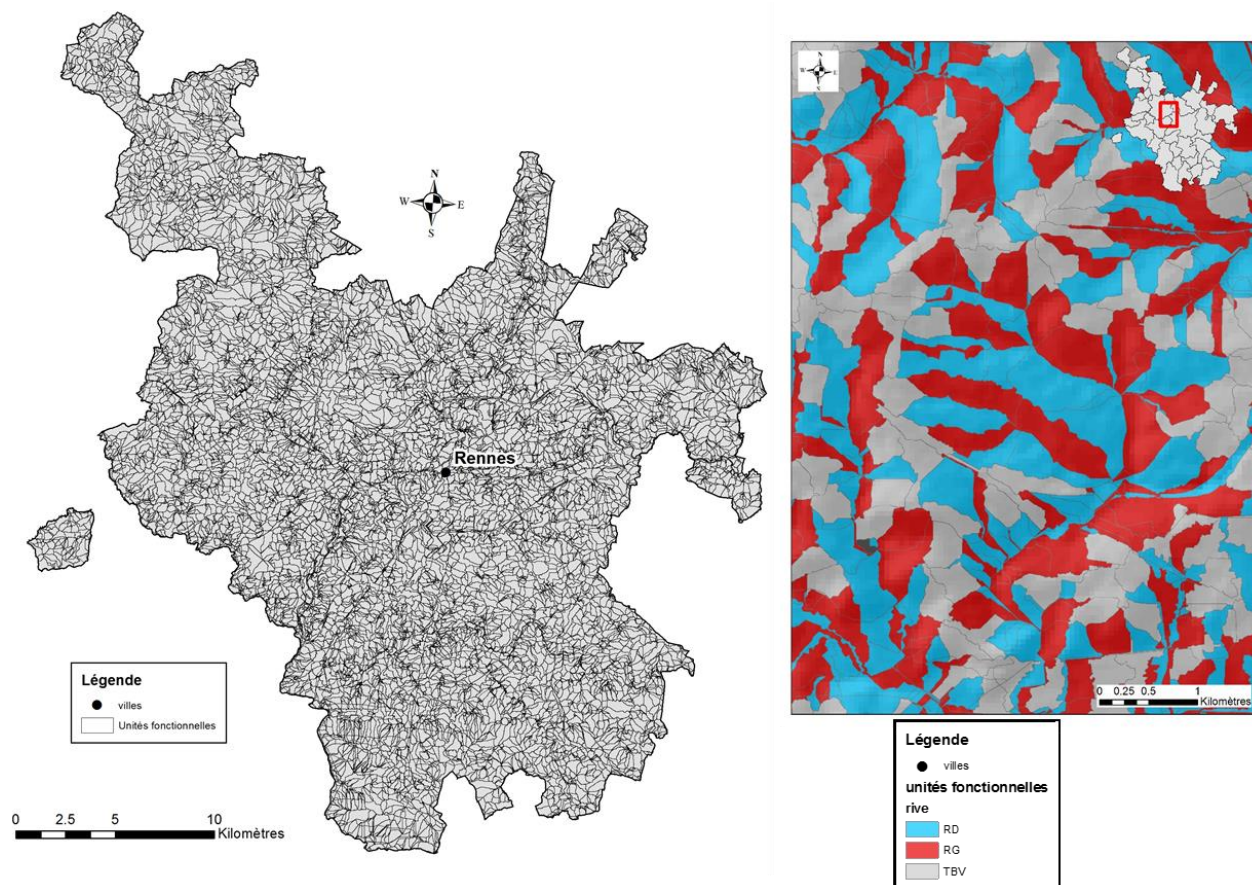


Illustration 24 – Les unités fonctionnelles utilisées pour cette étude

Au final, les unités fonctionnelles sont constituées de 13124 polygones (illustration 23) dont la surface moyenne est de 0.054 km². Ces unités contiennent des informations de pédologie (UCS) et des informations de localisation au sein des bassins versants (rive droite, rive gauche et bassin amont). Elles vont donc permettre l'utilisation des paramètres agrégés dans le cadre de l'analyse multicritère (paragraphe 4).

4. L'analyse multicritère

La réalisation de la carte des contraintes et de l'aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales se base sur une approche de cartographie à index, couplé à un système de classes pondérées.

Les méthodes de cartographies à index sont basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des paramètres se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (SIG, par exemple).

Le système de classes pondérées est basé sur l'affectation de notes aux paramètres qui sont retenus pour l'évaluation de la capacité des sols à l'infiltration des eaux pluviales, en définissant des intervalles (classes) en fonction de la variabilité de chaque paramètre. Avant l'analyse combinatoire de ces paramètres (somme ou multiplication), une pondération est attribuée à chaque paramètre, selon son importance pour l'évaluation de l'infiltration des eaux pluviales.

4.1. LES PARAMETRES RETENUS ET LES NOTES ATTRIBUEES

La réalisation d'une carte du potentiel d'infiltration est un exercice complexe, notamment si elle doit être exploitée à l'échelle parcellaire. Cela nécessite des jeux de données très denses notamment en matière de pédologie et de mesure de perméabilité à saturation en eau des sols. Or, ces informations sont rarement disponibles à l'échelle attendue. L'ensemble des données collectées est présenté en annexe n°2.

Suite au travail de collecte des informations, une analyse de chaque donnée a été réalisée pour déterminer la pertinence des données disponibles (données ponctuelles, polygones, représentativité, densité d'information, ...) pour l'élaboration de la carte du potentiel d'infiltration des eaux pluviales. Cette analyse a permis de cibler une liste de paramètres basés sur des critères naturels qui a été approuvée par le comité de pilotage. La liste des paramètres retenus est la suivante :

- L'épaisseur de la zone non saturée (grille au pas de 25 m) ;
- La perméabilité des sols (polygones) ;
- L'indice de susceptibilité de présence d'argiles (polygones) ;
- L'IDPR : Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (grille au pas de 25 m) ;
- L'hydromorphie des sols (grille au pas de 50 m) ;
- Les pentes (grille au pas de 2 m) ;
- Les zones endoréiques (polygones).

Les sept paramètres retenus sont de nature hétéroclite (grilles à différents pas et polygones) et produits à des échelles différentes. Les unités fonctionnelles (paragraphe 3) vont donc permettre d'agréger l'ensemble de ces données selon des contours précis, homogènes et cohérents pour appréhender la notion d'infiltration.

Pour chaque paramètre, il a été attribué une note variant de 0 à 10. Elles reflètent la capacité d'infiltration des eaux pluviales. Ainsi une note égale à 0 correspond à « pas infiltration possible » et une note de 10 à une « infiltration favorable ». Entre ces deux extrêmes et en fonction des classes de chaque paramètre, une ou deux notes intermédiaires ont été créées permettant ainsi d'apporter de la nuance.

4.1.1. L'épaisseur de la zone non saturée

On considère que des conditions défavorables pour infiltrer des eaux pluviales sont réunies lorsqu'un sol est saturé en eau et que la nappe est proche de la surface, d'où l'intérêt de connaître l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS). La campagne piézométrique de mars 2018 a permis de répondre à ce besoin en calculant l'épaisseur de ZNS en périodes de hautes eaux (paragraphe 2) sous forme d'une grille au pas de 25 mètres sur l'ensemble du territoire de Rennes Métropole. Les données ont ensuite été agrégées sous forme de moyenne au niveau de chaque unité fonctionnelle (illustration 24).

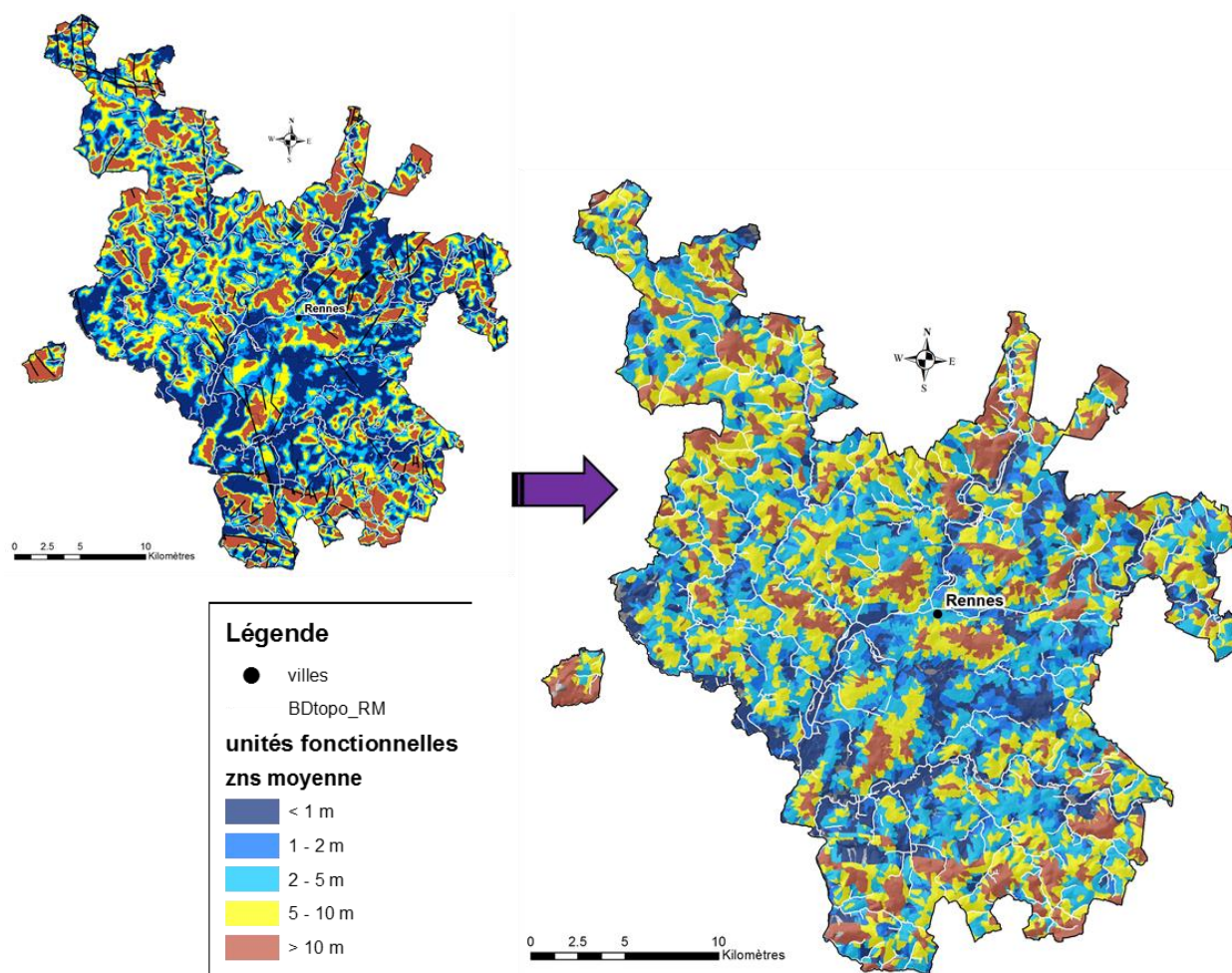


Illustration 25 – Grille de la ZNS au pas de 25 m et agrégation des données aux unités fonctionnelles

Dans le document intitulé « Les ouvrages d'infiltration et la fonction filtration - recommandations à l'usage des gestionnaires – GEOSOL » une recherche bibliographique a été réalisée sur les ouvrages et les conditions d'infiltration des eaux pluviales. Ces recommandations issues des règles de l'art notamment en géotechnique ont permis de définir des classes d'épaisseur de la zone non saturée (illustration 25).

Épaisseur minimale de zone non-saturée	Références
« La distance minimale entre la base du puits et les plus hautes eaux de la nappe doit être d'environ 1 m pour assurer une épuration correcte. »	<i>Techniques alternatives en assainissement pluvial</i> (Azzout et al., 1994).
« [...] plus haut niveau de la nappe à plus de 1,20 m du fond du bassin. »	<i>Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement</i> (Chocat, 1996).
« Pour infiltrer de l'eau, il est donc indispensable d'avoir [...] une épaisseur non-saturée suffisante pour que les phénomènes de filtration et de biodégradation puissent épurer efficacement l'eau avant qu'elle ne rejoigne la nappe. En première approche, une épaisseur de 1 m au-dessus du niveau le plus haut de la nappe paraît un minimum. On évitera systématiquement les zones karstiques et fissurées. »	<i>La ville et son assainissement. Principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau</i> (Certu, 2003).
« Il est conseillé de conserver une épaisseur de 1 m à 1,50 m de matériaux non saturés au-dessus de la nappe. »	<i>Guide méthodologique pour la prise en compte des eaux pluviales dans les projets d'aménagement</i> (MISEs de la région des Pays de la Loire, juin 2004).
« Une zone de sol non-saturée de 2 m doit être conservée entre le niveau des plus hautes eaux de la nappe et le fond de l'ouvrage. »	Fiche technique n°05 du Grand Lyon – Bassins de rétention/infiltration.
« Une épaisseur minimale de 2 m est fixée entre le toit de la nappe et la fond de la structure permettant l'infiltration. Cette épaisseur peut être ramenée à 1 m en centre urbain dense pour l'infiltration des eaux de toiture. »	Fiche technique n°00 du Grand Lyon – Méthode pour le dimensionnement des ouvrages de stockage.
« Le niveau des plus hautes eaux de la nappe est un paramètre important pour plusieurs raisons. Une nappe peu profonde peut réduire la profondeur utile de l'ouvrage et corrélativement les volumes de stockage. Elle risque par ailleurs d'être très facilement contaminée par une pollution chronique ou accidentelle avec limitation des mécanismes de rétention capillaire, de filtration et de dégradation dans la zone non saturée du sol rendue peu épaisse. [...] Une nappe est considérée comme peu profonde par rapport à l'ouvrage si le niveau piézométrique des plus hautes eaux est situé à moins de 1 m du fond de la future structure. »	<i>L'infiltration en question – Recommandations pour la faisabilité, la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain</i> (GRAIE, 2009).

Illustration 26 – Extrait » Les ouvrages d'infiltration et la fonction filtration -recommandations à l'usage des gestionnaires – GEOSOL, 2015»

Suite aux recommandations et aux études géotechniques, une classification de l'épaisseur minimum de la ZNS avec les notes associées pour infiltrer les eaux pluviales ont été validées par le comité de pilotage (illustration 26) :

- Entre 0 et 1 m : défavorable (note =0)
- Entre 1 et 2 m : assez favorable (notamment en zone urbaine) (note = 5)
- Supérieur à 2 m : très favorable (note = 10)

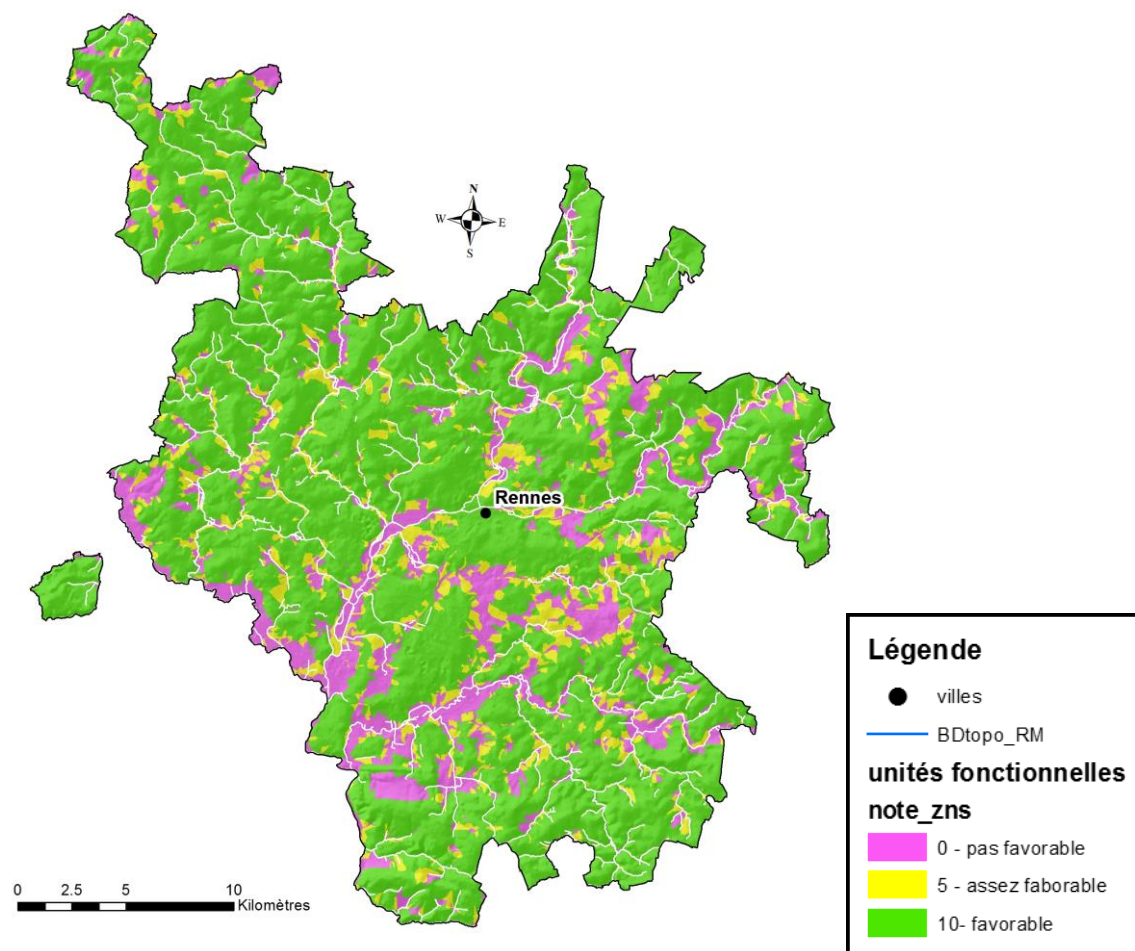


Illustration 27 – Cartographie des notes attribuées pour l'épaisseur de la zone non saturée

4.1.2. La perméabilité des sols

L'analyse de la perméabilité du sol est essentielle, elle permet en effet de déterminer si les caractéristiques du sol sont favorables (capacité d'absorption de l'eau) à l'infiltration des eaux de pluie.

Il est très complexe de définir une perméabilité des sols sur l'ensemble du territoire de Rennes Métropole. Il existe des portions du territoire qui sont couvertes par des cartes pédologiques et des données ponctuelles issues d'études à la parcelle avec des mesures de perméabilité. Ces données ne sont pas suffisantes, réparties de manière totalement inégale sur la zone d'étude, trop peu nombreuses et donc difficilement interprétables pour évaluer cette perméabilité.

Pour caractériser la perméabilité des sols en absence de mesure in situ, il a donc été décidé d'utiliser deux types d'information disponibles sur l'ensemble de la zone d'étude : la texture du sol GEPPA et la capacité de drainage du sol. Ces informations sont bien décrites pour chaque U.C.S (Unité Cartographique Sol) décrites dans le rapport du Programme Sol de Bretagne (2005 – 2011).

La texture du sol GEPPA par UCS correspond à une classification des sols en fonction d'un triangle de textures (cf. illustration 27).

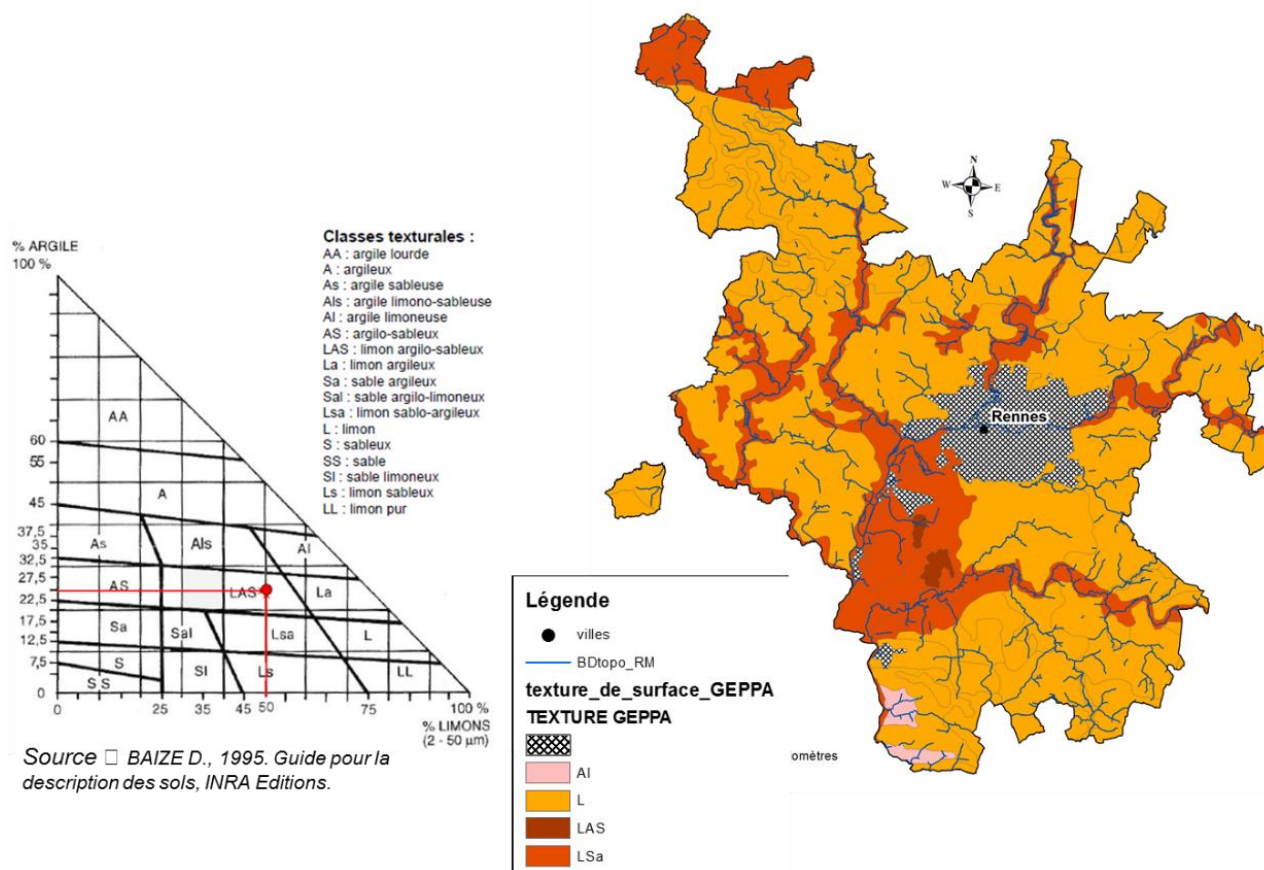


Illustration 28 - La texture du sol GEPPA par Unité Cartographique Sol (UICS) source : AGROCAMPUS INRA – Cartographie des sols de Bretagne 2005 - 2011

En fonction de la porosité du sol, l'eau circulera avec des vitesses différentes. Par exemple, lorsque l'eau s'écoule du sol beaucoup plus rapidement qu'elle n'y pénètre et que le surplus d'eau descend très rapidement dans le cas où le matériel sous-jacent est perméable, alors on peut parler de drainage rapide. Le drainage joue un rôle important dans la circulation et la saturation de l'eau dans le sol. La carte des classes de drainage est présentée ci-dessous.

La texture d'un sol est la répartition granulométrique de ses constituants. C'est la proportion entre les petites particules, les argiles, les particules de taille moyenne, les limons et particules de grande taille, les sables (dont le diamètre reste tout de même inférieur à 2 mm). Les textures sont regroupées en classes : sol argileux, limono-sableux...en fonction de ces proportions.

Dans le tableau (illustration 29) sont répertoriés les classes de drainage dominante (% le plus élevé) dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS) associées aux classes de drainage secondaire. Il s'agit du drainage naturel de l'eau au sein du sol qui peut s'exprimer par la présence ou l'absence de signes d'oxydo-réduction. La description des codes est la suivante :

- Code 1 : Drainage excessif (évacuation très rapide de l'eau dans le sol. Milieu très poreux) ;
- Code 2 : Drainage favorable (évacuation très rapide de l'eau dans le sol. Pas de phénomènes d'oxydoréduction) ;
- Code 3 : Drainage modéré (phénomènes d'oxydoréduction peu marqués. Horizon de pseudogley apparaissant en dessous de 80 cm) ;
- Code 4 : Drainage imparfait (phénomènes d'oxydoréduction modérément marqués.

Horizon de pseudogley apparaissant entre 40 et 80 cm) ;

- Code 5 : Drainage faible (phénomènes d'oxydoréduction nettement marqués ; l'aspect est bariolé. Horizon de pseudogley apparaissant à moins de 40 cm et pouvant même atteindre la surface) ;
- Code 6 : Drainage assez pauvre (phénomènes d'oxydoréduction nettement marqués dès la surface et/ou un horizon de gley apparaît en dessous de 80 cm) ;
- Code 7 : Drainage pauvre (phénomènes d'oxydoréduction très fortement marqués dès la surface et/ou un horizon de gley apparaît entre 40 et 80 cm) ;
- Code 8 : Drainage très pauvre (phénomènes d'oxydoréduction très fortement marqués dès la surface et/ou un horizon de gley apparaît à moins de 40 cm) ;
- Code 9 : Submergé (l'eau se situe à la surface du sol ou au-dessus durant de longues périodes) ;

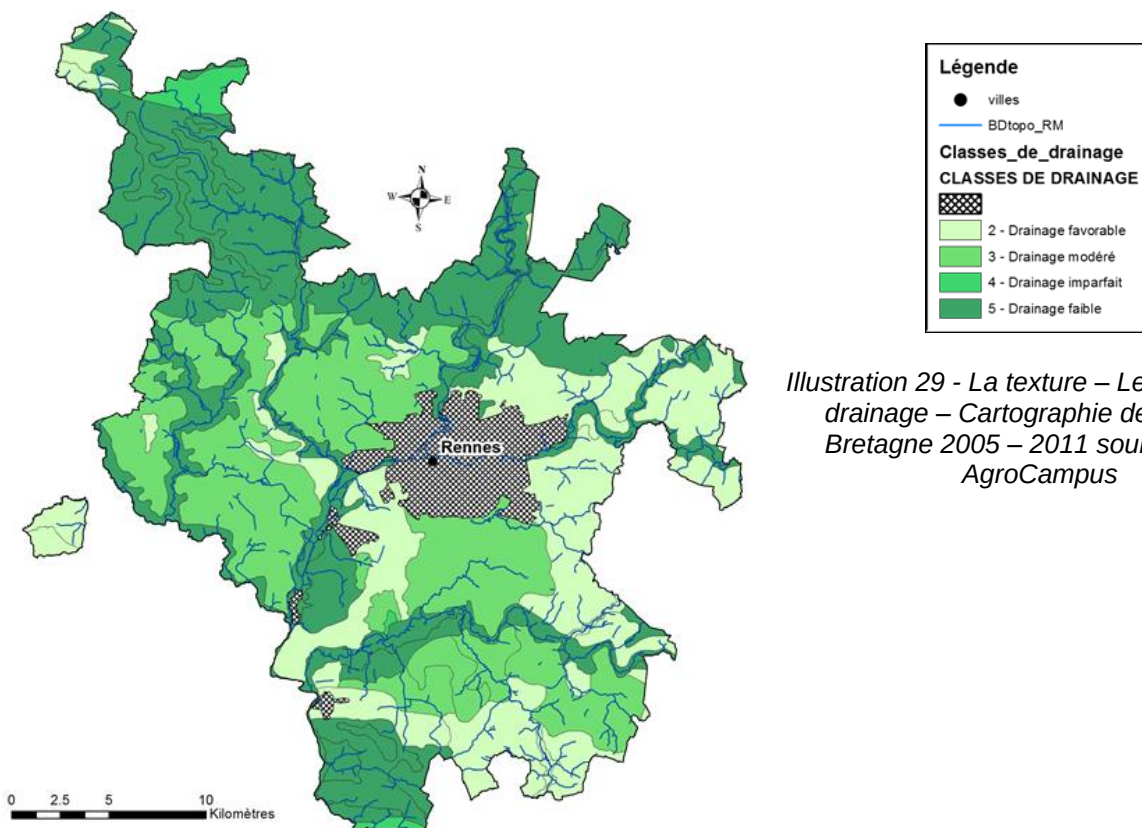


Illustration 29 - La texture – Les classes de drainage – Cartographie des sols de Bretagne 2005 – 2011 source INRA/ AgroCampus

En combinant ces deux notions (texture et drainage) et la lithologie décrite pour chaque UCS, on obtient une évaluation qualitative de la perméabilité ainsi que la note associée (cf. illustration 29).

Les caractéristiques de la classe dominante sont prépondérantes ainsi par exemple pour des alluvions sur schistes rouges, le drainage dominant de l'UCS a un code 5 (drainage faible) et le drainage secondaire un code 2 (drainage favorable) alors le drainage retenu est celui qui est considéré comme faible. La texture est composée principalement de limons et de limons sableux argileux. Au final la perméabilité du sol pour ce type d'UCS est qualifiée de faible.

GEOLOGIE	texture	drainage	Perméabilité proposée	Note associée
Alluvions	LSA/La	5 /7	Pas perméable	0
Calcaires	LAS	3	Moyennement perméable	5
Granites ou gneiss	LSA /LAS	2 /4 (colluvions)	Perméable	10
	LSA/L	4/2 (limons éoliens)	Faiblement perméable	2
	LSA/LAS	5/2 (alluvions)	Pas perméable	0
Grès	L/LSA	5/2 (schistes)	Pas perméable	0
		5/4 (alluvions)	Pas perméable	0
Limons éoliens	L/LSA	5 /4 grès et schistes briovériens	Pas perméable	0
		3/5 schistes briovériens	Moyennement perméable	5
Sables rouges	LSA/La	4/5 (alluvions)	Faiblement perméable	2
Schistes briovériens	L/LSA	2/5 (alluvions)	Perméable	10
		3/2 (alluvions)	Moyennement perméable	5
		4/2 (SCHISTE GRESEUX OU CORNEENNE)	Faiblement perméable	2
		5/2 (SCHISTE GRESEUX OU CORNEENNE)	Pas perméable	0
		5/4 (limons éoliens)	Pas perméable	0
Schiste de type ardoisier	Al/LAS	5/2 (alluvions)	Pas perméable	0
SCHISTE GRESEUX OU CORNEENNE	LSA/L	2/7	Perméable	10
Schiste rouge dur	L/LSA	5/2 (alluvions)	Pas perméable	0
	L/LA	2/5 (alluvions)	Perméable	10
Terrasses alluviales anciennes	LSA/L	2/5	Perméable	10
	LSA/LAS	5/3	Pas perméable	0

Illustration 30 – Tableau des combinaison entre texture et drainage – Evaluation de la perméabilité en combinant les textures et le drainage

Une cartographie des notes par unité fonctionnelle évaluant la perméabilité des sols est présentée page suivante (illustration 30).

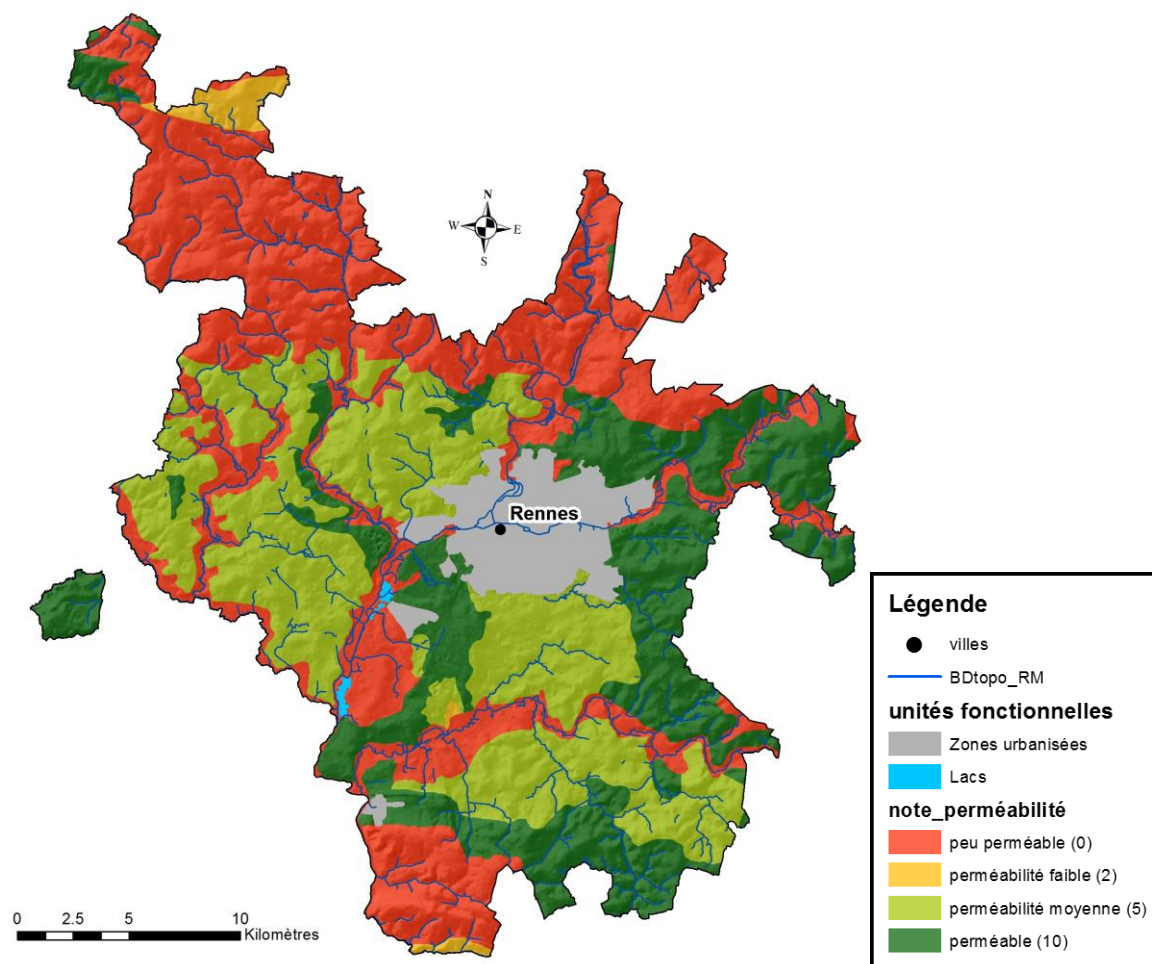


Illustration 31 – Cartographie de l'évaluation de la perméabilité des sols par unité fonctionnelle à l'exception de la zone urbaine de Rennes

4.1.3. L'indice de susceptibilité de présence d'argiles

Pour compléter l'évaluation de la perméabilité des sols, il a été intégré dans l'analyse multicritère des résultats issus de la cartographie des formations argileuses. Cette étude a été réalisée dans le cadre des cartes d'aléas Retrait Gonflement.

Dans le cette étude un indice de susceptibilité de présence d'argiles (IS) a été produit, correspondant à la moyenne de la note de lithologie (Note_Litho), de la note de minéralisation (NOTE_Min) et de la note géotechnique (NOTE_Geo), quand elle est présente. IS est donc un bon indicateur du taux d'argilosité des formations géologiques et donc du caractère imperméable des sols qui se développent dessus.

Plus cet indicateur est élevé, plus la susceptibilité de présence d'argiles dans les sols est forte. Sur le territoire de Rennes Métropole, seuls deux secteurs localisés au sud ressortent avec les valeurs les plus élevées (cf. illustration 31).

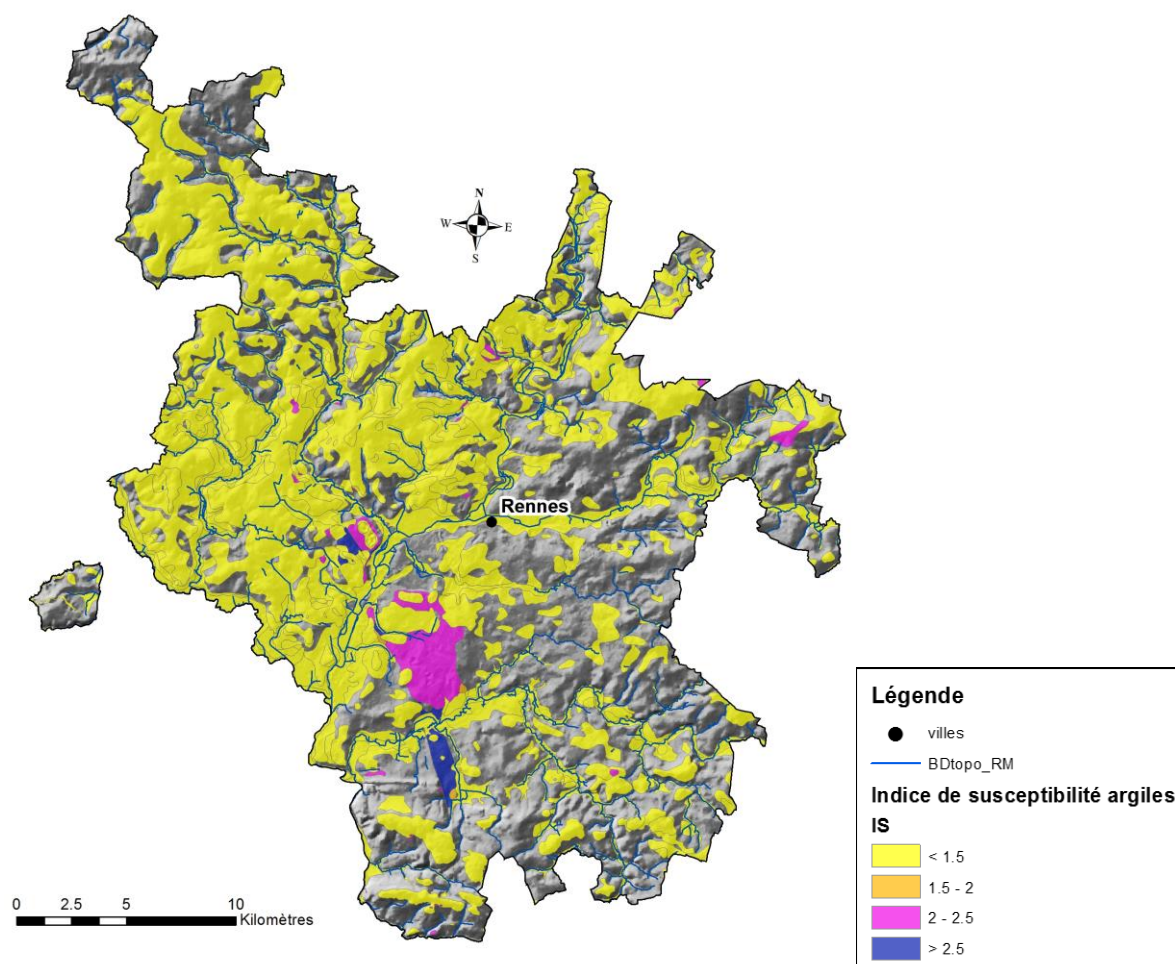


Illustration 32 – Cartographie de l'indice de susceptibilité d'argiles sur le territoire de Rennes Métropole

Ces données ont été agrégées au niveau de chaque unité fonctionnelle puis une note a été attribuée permettant de qualifier la capacité d'infiltration. La classification de l'indicateur Is moyen pour caractériser la susceptibilité de présence d'argiles est la suivante :

- IS moyen = 0 : pas d'argiles, très favorable pour l'infiltration (note =10)
- IS moyen > 0 et Is moyen <=1.5: favorable pour l'infiltration (note =5)
- IS moyen > 1.5 et Is moyen <= 2.5 : peu favorable pour l'infiltration (note =2)
- IS moyen > 2.5 pas du tout favorable à l'infiltration (notre = 0)

La répartition de ces notes sur la zone d'étude sont consultables sur l'illustration 32.

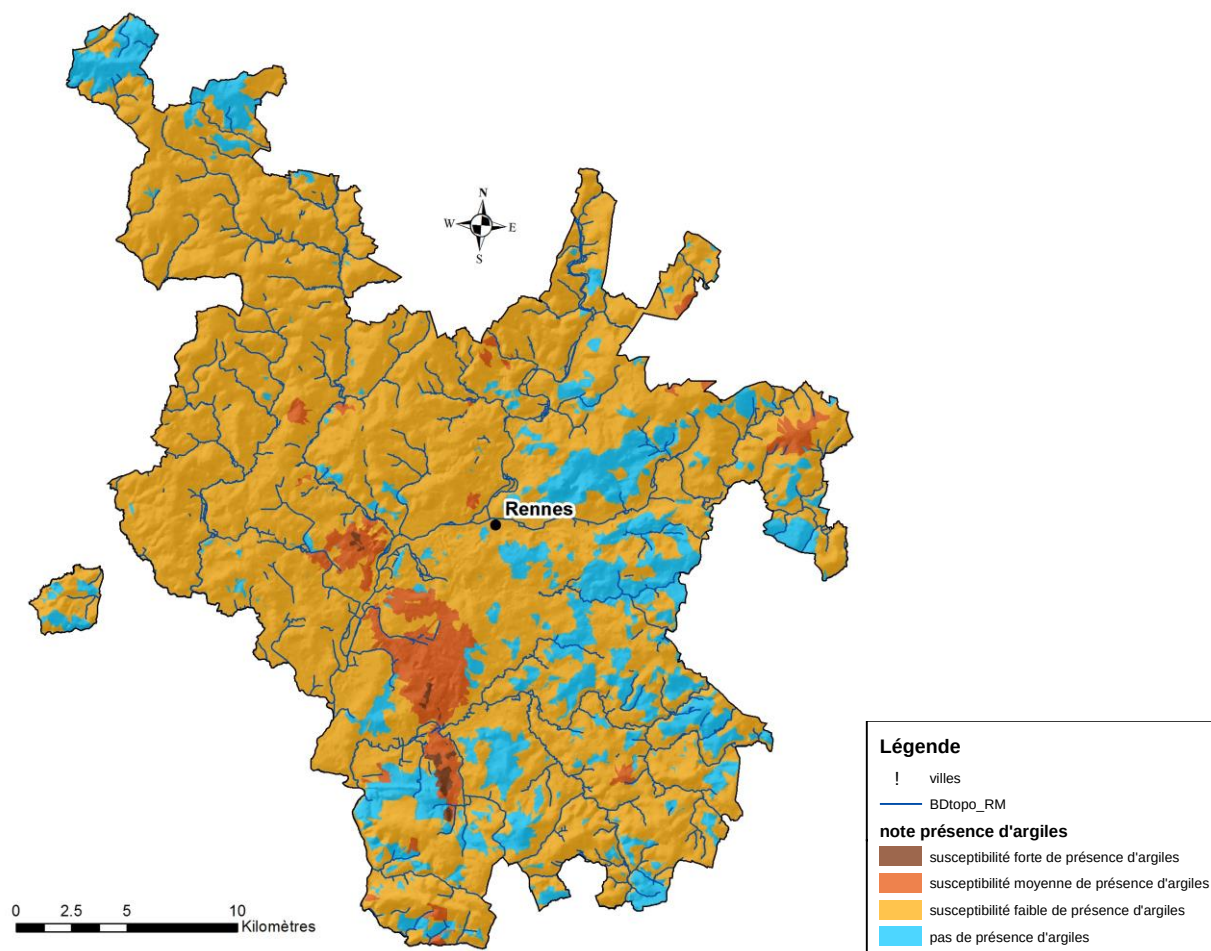


Illustration 33 – Cartographie par UF de la susceptibilité de la présence d'argiles (notes)

4.1.4. L'IDPR Indice de Développement et de Persistance des Réseaux

L'IDPR a été créé par le BRGM (Mardhel, 2005) pour qualifier un territoire en termes de « chemins empruntés » par les eaux météoriques. :

- elle ruisselle à la surface, se concentre dans les ruisseaux et les rivières et quitte le bassin à la faveur d'un exutoire de surface
- elle s'infiltre dans le sous-sol, se concentre dans un aquifère et quitte ce dernier par un exutoire souvent distinct de celui du réseau des rivières.

L'IDPR devient ainsi un moyen de quantifier ce rôle en comparant un réseau théorique établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (*indice de développement ID*), au réseau naturel mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (*de persistance des réseaux PR*). L'indice de développement et de persistance des réseaux présente une métrologie de l'écart constaté entre les deux réseaux (illustration 33). Cet indice spatial, est utilisé pour qualifier l'aptitude du milieu à laisser ruisseler ou s'infiltrer la lame d'eau météoritique

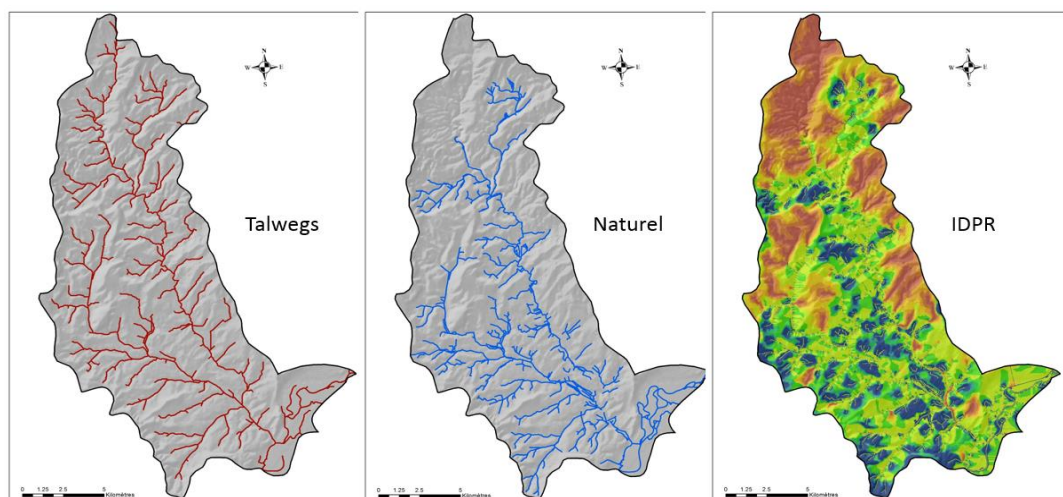


Illustration 34 – Concept de l'IDPR

L'IDPR est une grille au pas de 25 m qui a été agrégée sous forme de médiane aux unités fonctionnelles (illustration 34).

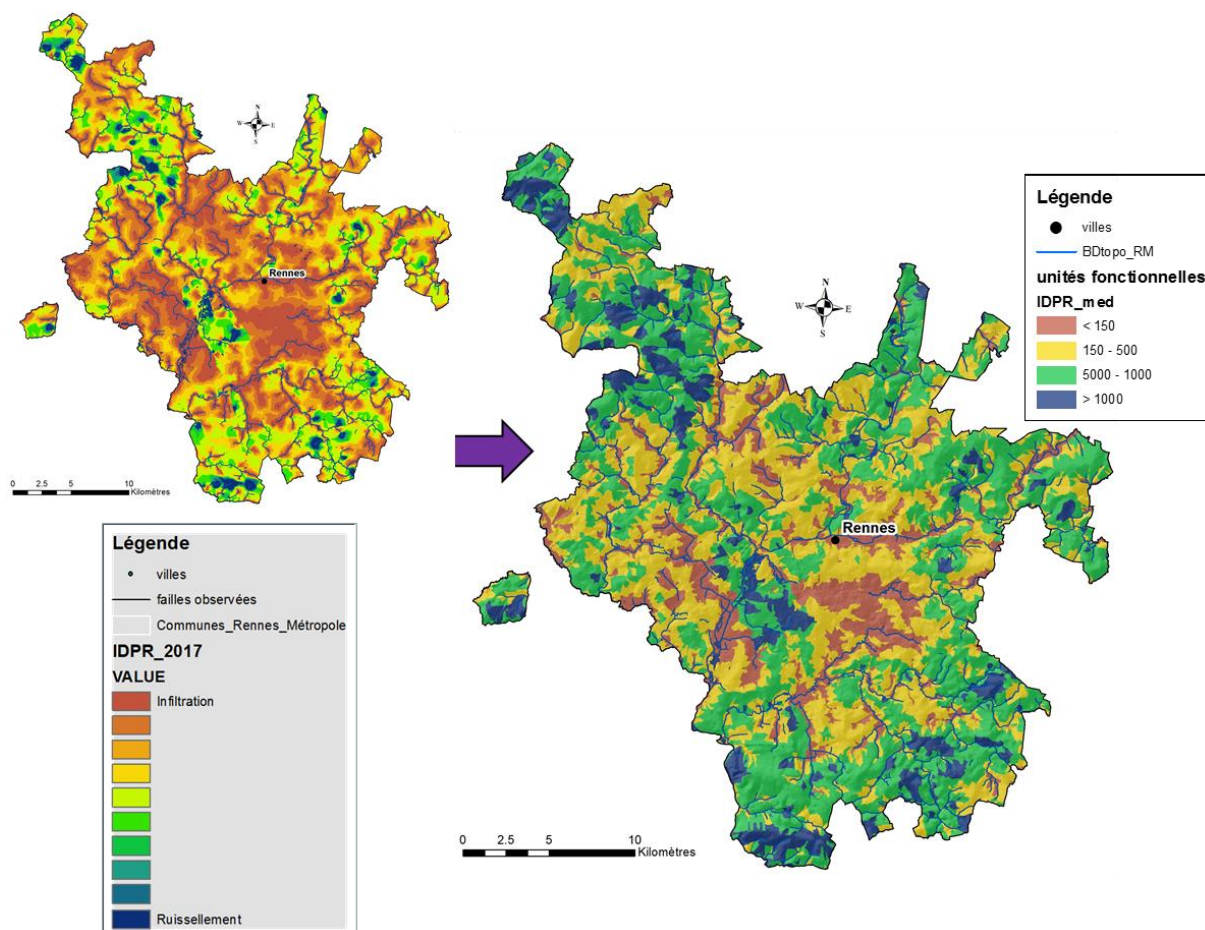


Illustration 35 – Agrégation des valeurs de l'IDPR aux unités fonctionnelles : IDPR médian

La classification retenue de IDPR médian pour caractériser la capacité d'infiltration des eaux météoriques (illustration 35) est la suivante :

- IDPR médian < 150 : très favorable (note =10)
- 150 < IDPR médian < 500 : favorable (note =5)
- 500 < IDPR médian < 1000 : moins favorable (note =2)
- IDPR médian >1000 : pas favorable (note =0)

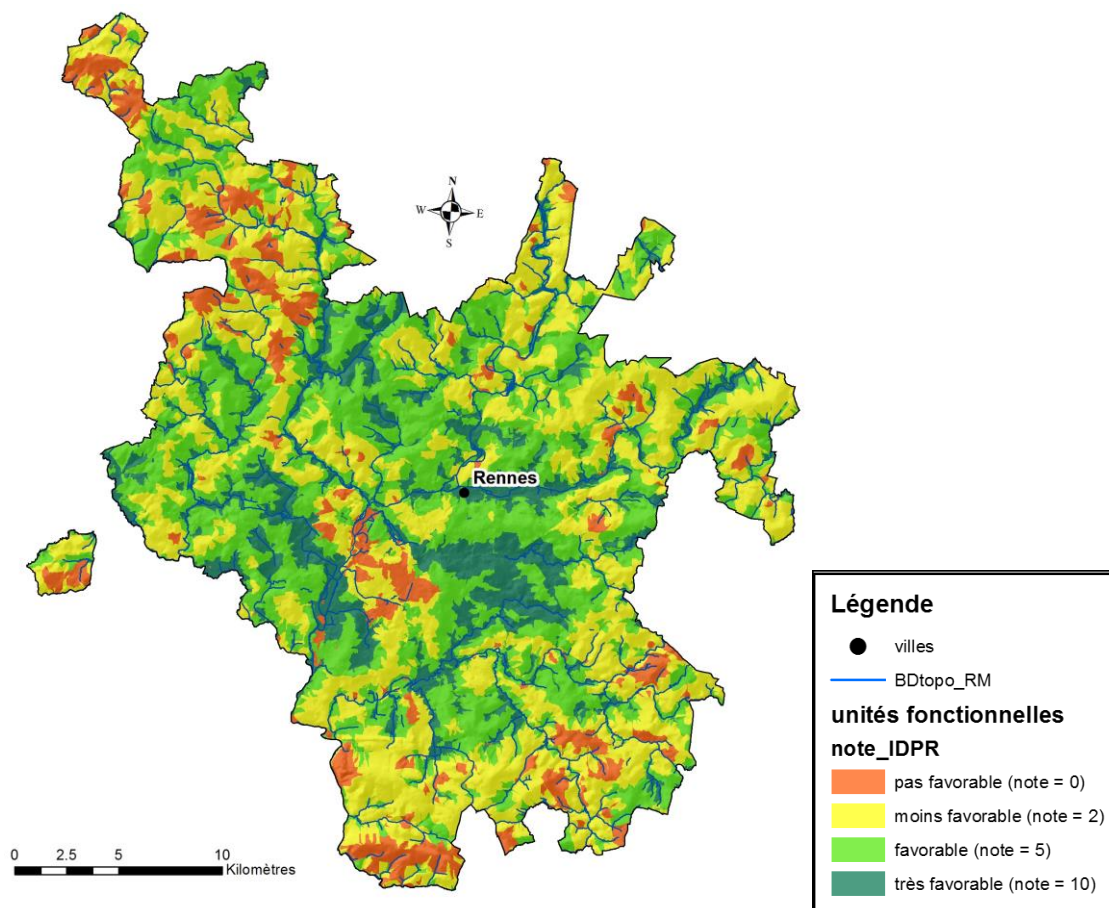


Illustration 36 – Cartographie de l'évaluation de la capacité d'infiltration des eaux météoriques

4.1.5. L'hydromorphie des sols

La carte de l'hydromorphie des sols permet de reconnaître les situations où la probabilité de rencontrer des sols affectés par différents degrés d'hydromorphie est élevée. Ces données sont issues d'observations ponctuelles de sol réalisées essentiellement dans le cadre du programme IGCS de Sols de Bretagne.

C'est une grille au pas de 50 m présentée page suivante sur le territoire de Rennes Métropoles (illustration 36).

Dans l'analyse multicritère, ce paramètre permet d'intégrer le degré de saturation des sols en eau. Ainsi un sol déjà saturé en eau sera moins favorable à l'infiltration de l'eau de pluie.

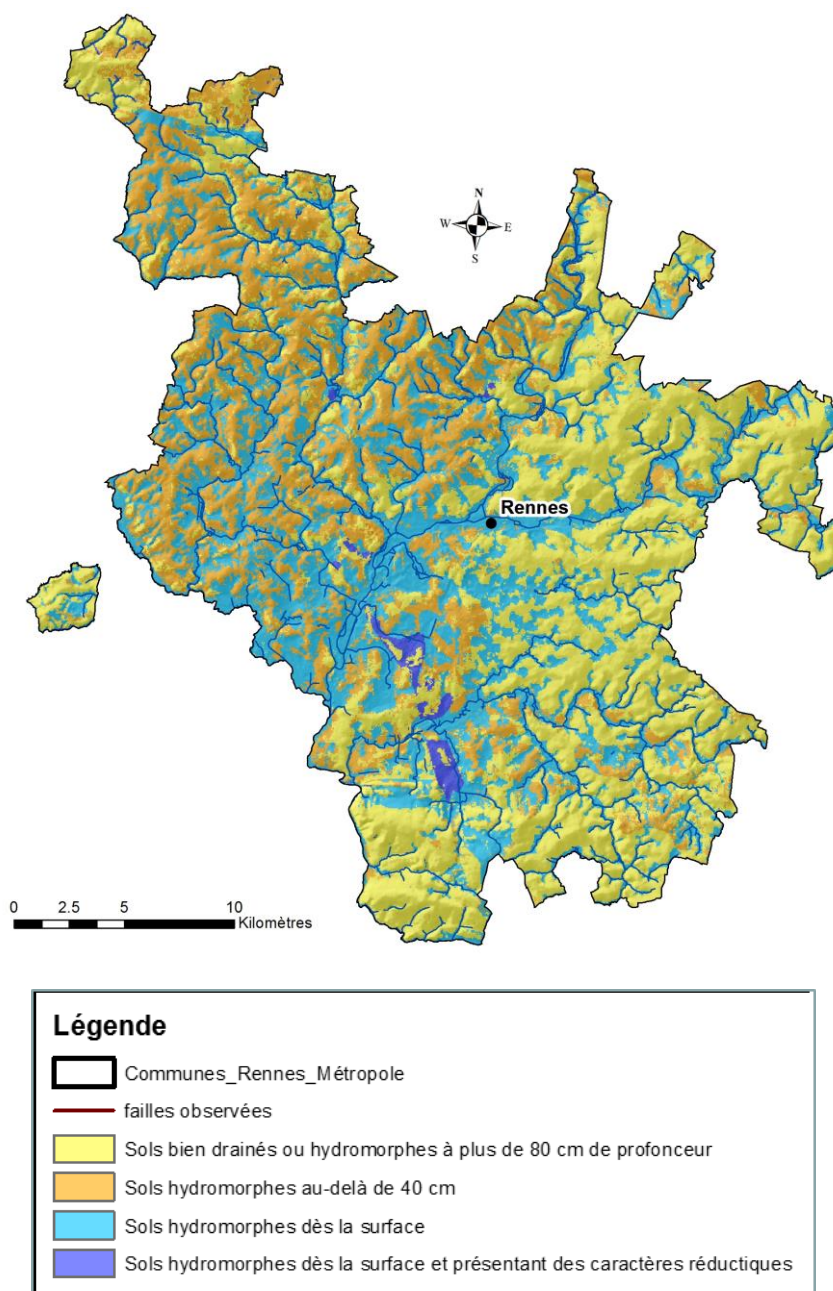


Illustration 37 – Grille de L'HYDROMORPHIE des sols au pas de 50 m Source : AGROCAMPUS OUEST, UMR INRA SAS, 2011.

Comme les paramètres précédents, les valeurs de hydromorphie des sols ont été agrégées sous forme de médiane aux unités fonctionnelles et une note a été attribuée pour caractériser l'infiltration des eaux pluviales (illustration 37).

La classification de hydromorphie des sols (médiane) pour caractériser la capacité d'infiltration des eaux dans les sols est la suivante :

- Médiane hydro = 1 : très favorable à l'infiltration (note =10)
- Médiane hydro = 2 : favorable à l'infiltration (note =5)
- Médiane hydro = 3 : peu favorable à l'infiltration (note =2)
- Médiane hydro = 4 : pas favorable à l'infiltration (note =0)

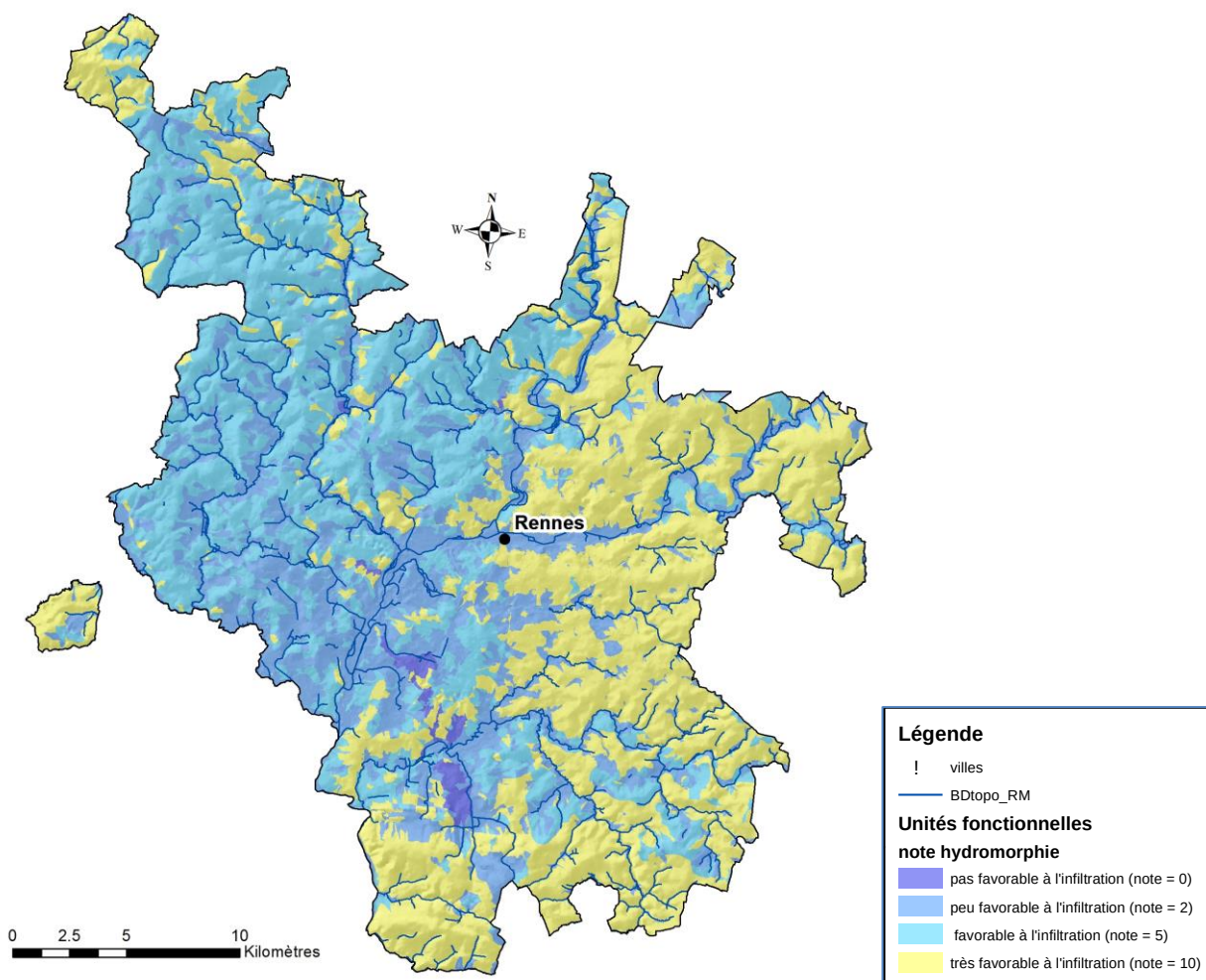


Illustration 38 – Cartographie des notes attribuées à chaque unité fonctionnelle pour l'hydromorphie

4.1.6. Les pentes

La pente du sol joue un rôle important dans les écoulements de surface mais aussi sur les capacités d'infiltration. En effet une pente trop importante empêche les stockages d'eau et réduit ainsi la possible à l'eau de pénétrer dans le sol.

Dans le cas de pente élevée l'infiltration des eaux pluviales n'est pas toujours une option adéquate car certains ouvrages dédiés ne peuvent pas être installés et il y a aussi un risque de « résurgence » des eaux infiltrées sur les secteurs situés en aval. L'apport de ces eaux infiltrées peut entraîner des phénomènes de déstabilisation du sol sur les zones périphériques.

Sur le territoire de Rennes Métropole, les pentes ont été calculées en pourcentage à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de l'IGN, puis agrégées par calcul de la valeur moyenne pour chaque unité fonctionnelle. Pour un territoire donné, la carte des pentes indique la pente surfacique en chacun des pixels. Cette carte peut donc être différente en fonction de la taille du pixel utilisé pour le calcul. Les résultats sont présentés sur l'illustration 38 page suivante.

Pour ce calcul de pentes le MNT au pas de 2 m n'a pas été utilisé car la taille du pixel entraîne sur la grille « résultat » la présence de nombreuses aspérités, détails (talus, routes, ...) qui n'ont pas d'intérêt à l'échelle des unités fonctionnelles.

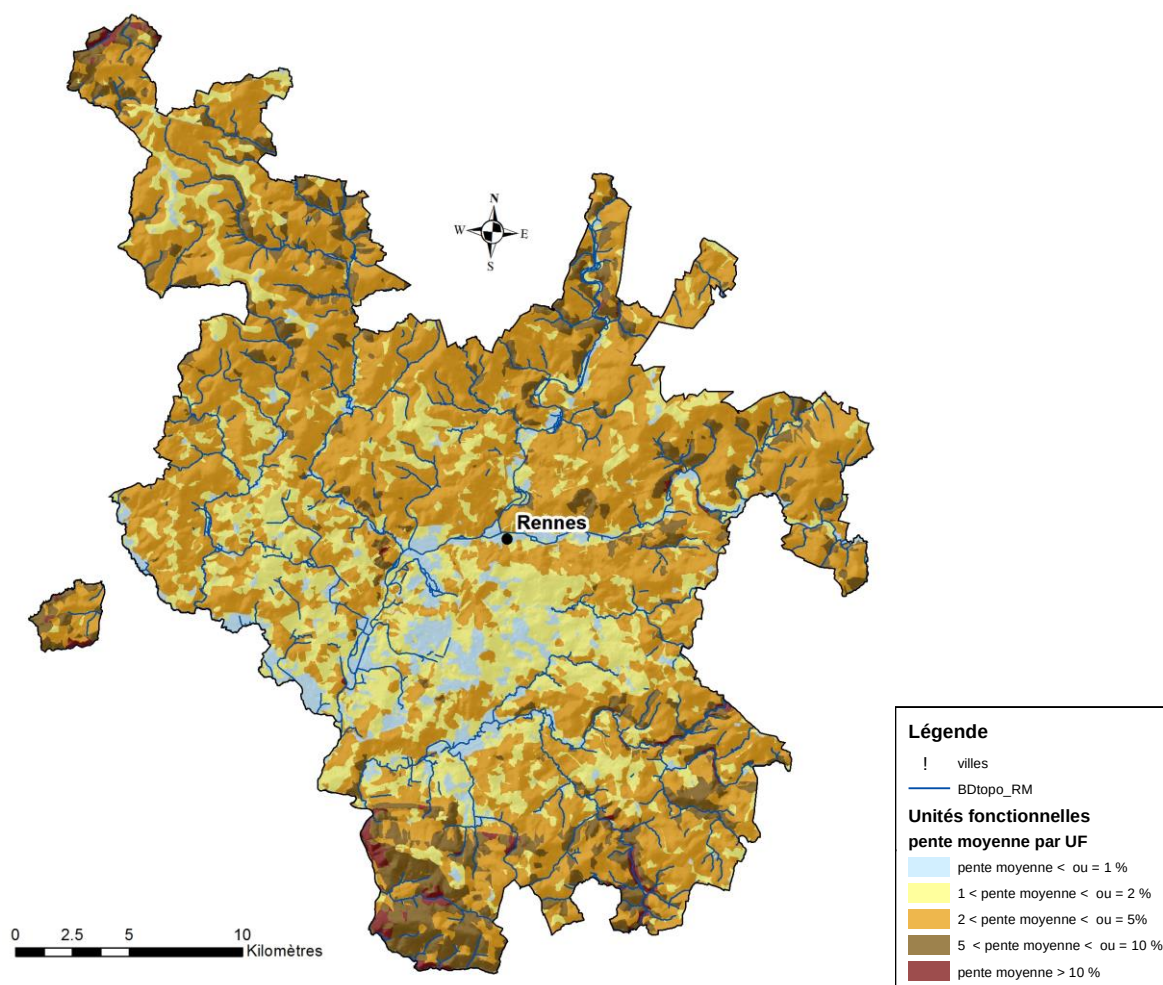


Illustration 39 – Cartographie des pentes moyennes calculées à partir du MNT IGN 25 m, par unité fonctionnelle.

En combinant différentes sources d'informations comme les études déjà réalisées sur l'infiltration des eaux pluviales (BRGM RP65025-FR Nantes, Lyon) et les recommandations géotechniques liées à la mise en place des techniques alternatives (noues, tranchées, ...) pour l'infiltration des eaux pluviales (Graie 2014, ...), une classification de la pente moyenne par UF a été arrêtée :

- Pente moyenne ≤ 2 % (note =10)
- Pente moyenne > 2 et ≤ 5 % (note = 5)
- Pente moyenne > 5 et ≤ 10 % (note =2)
- Pente moyenne > 10 % (note = 0)

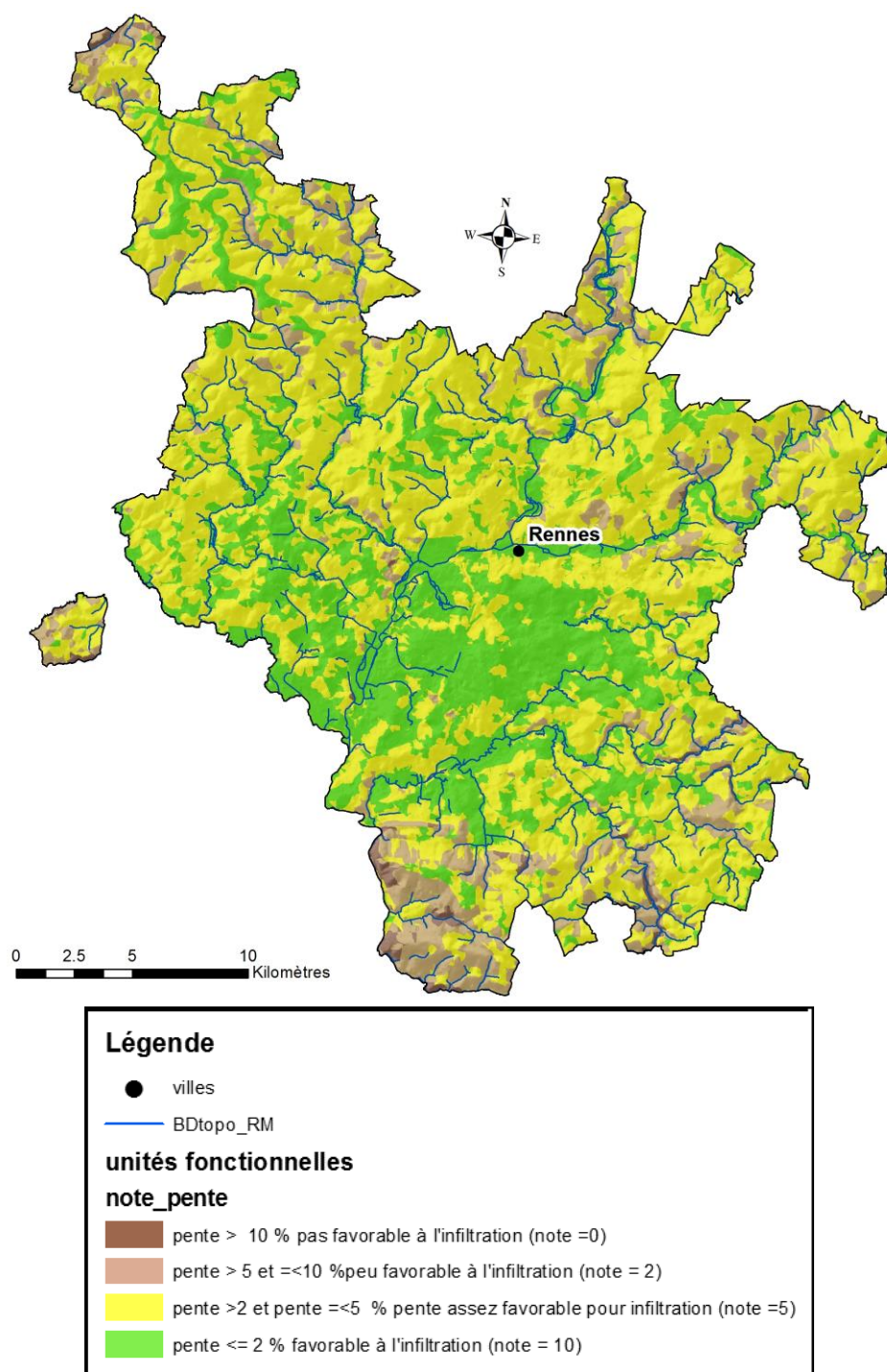


Illustration 40 – Cartographie des notes attribuées par UF pour le paramètre « pente »

4.1.7. Les zones endoréiques

Dans le traitement des MNT, les zones endoréiques, correspondent aux pixels dont l'altitude est plus basse que les 8 pixels voisins. Ces zones provoquent l'arrêt des calculs de propagation amont-aval et ne permettent pas d'extraire correctement les réseaux.

Pour le territoire de Rennes Métropole, elles ont été calculées à partir du MNT au pas de 2 m (illustration 40). Ces zones en creux représentent des secteurs où les écoulements peuvent être dirigés préférentiellement (zones d'accumulation) et où l'infiltration peut être favorisée.

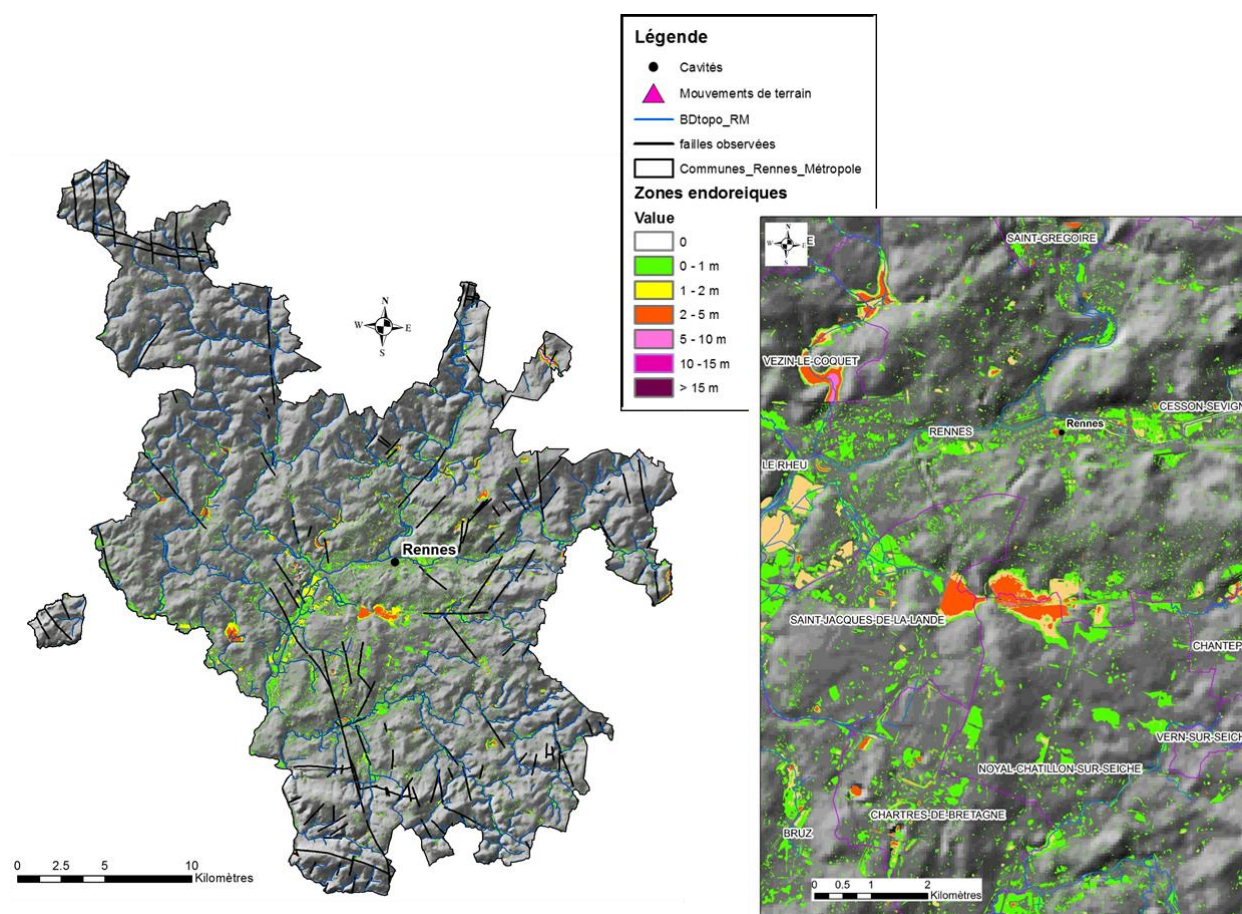


Illustration 41 – Cartographie des zones endoréiques à partir du MNT au pas de 2 m

Les polygones représentant ces zones endoréiques ont ensuite été agrégés en calculant le pourcentage de leurs surfaces en fonction de chaque unité fonctionnelle. Une classification de ces pourcentages a ensuite permis d'attribuer les quatre notes suivantes :

- | | |
|-----------------------|--|
| - % surface < 20 | infiltration pas favorable (note =0) |
| - 20 < % surface < 40 | infiltration moins favorable (note =2) |
| - 40 < % surface < 60 | infiltration favorable (note =5) |
| - % surface > 60 | infiltration très favorable (note =10) |

La carte (illustration 41) page suivante correspond aux notes attribuées à chaque UF pour ce paramètre.

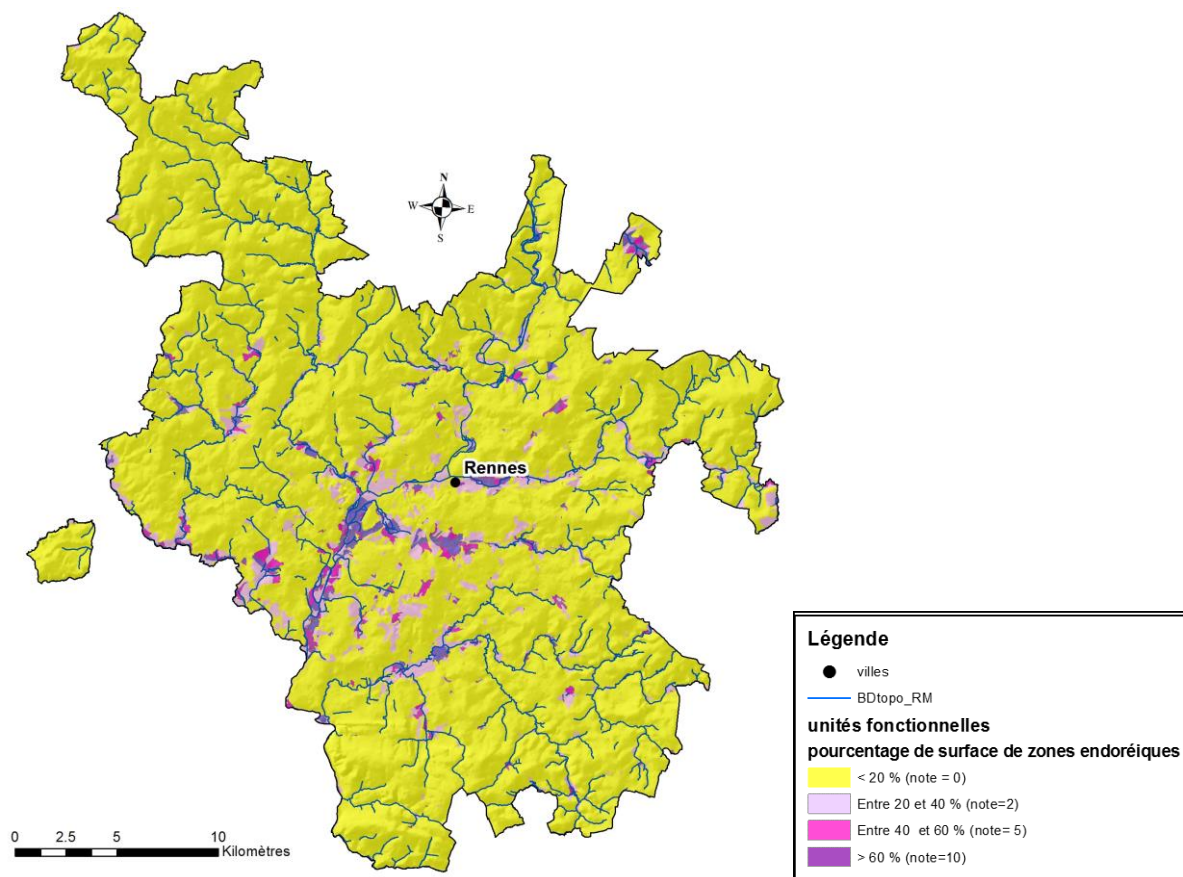


Illustration 42 – Cartographie des notes attribuées par UF pour le paramètre « zones endoréiques »

4.2. CARTOGRAPHIE DU POTENTIEL D'INFILTRATION DES EAUX PLUVIALES

Dans le paragraphe précédent, l'ensemble des paramètres utilisés pour mener l'analyse multicritères a été décrit avec le choix des notes associées pour qualifier la fonction d'infiltration des eaux pluviales.

Ces paramètres traduisent la capacité des sols à laisser pénétrer les eaux à partir de la surface, puis dans les premiers horizons du sol, pour ensuite continuer à percoler à travers la ZNS (illustration 42).

La capacité des sols à se laisser infiltrer (IDPR), les pentes et les zones endoréiques jouent un rôle important dès la surface alors que les caractéristiques telles que la perméabilité, la présence d'argiles et la saturation en eau (hydromorphie) interviennent dès le premier mètre du sol.

L'épaisseur de la ZNS joue un rôle important dans les temps de transfert des eaux météoriques vers la nappe. Lors du premier mètre traversé, ces temps de transfert sont aussi conditionnés par le type de sol rencontré. La nature, la texture, la perméabilité verticale et les teneurs en eau du sol sont d'autant de paramètres supplémentaires qui vont réguler la nature et la quantité d'échanges entre la surface et la ZNS.

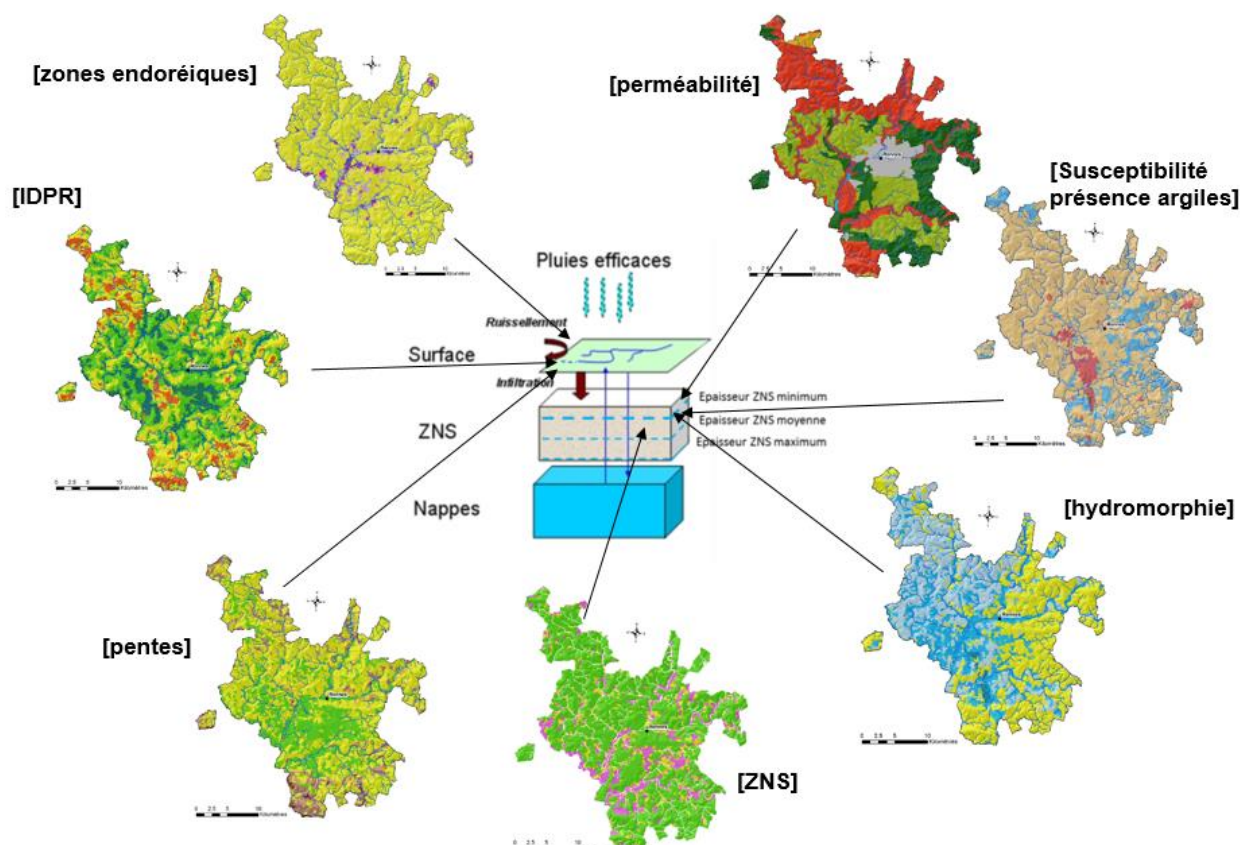


Illustration 43 – Influence des paramètres sur les différents compartiments (surface et sol)

Une hiérarchisation de ces paramètres sous forme de pondération a été élaborée et retenue par le comité de pilotage pour prendre en compte l'influence relative de ces paramètres sur le processus d'infiltration. Ceux qui ont le plus de poids sont la ZNS et la saturation en eau des sols (hydromorphie). Les poids et les notes attribués à chaque paramètre sont détaillés dans le tableau récapitulatif page suivante (illustration 43).

CRITERES NATURELS			
NOM	Type de données	Variabilité des notes	Pondération
Epaisseur de la zone non saturée	Grille au pas de 25 m	0 / 5 / 10	5
Perméabilité des sols	polygone	0 / 2 / 5 / 10	3
Indice de susceptibilité de présence d'argiles	polygone	0 / 2 / 5 / 10	2
IDPR	Grille au pas de 25 m	0 / 2 / 5 / 10	2
Hydromorphie des sols (INRA)	Grille au pas de 50 m	0 / 2 / 5 / 10	5
Pentes	Grille au pas de 25 m	0 / 2 / 5 / 10	2
Zones endoréiques	polygone	0 / 2 / 5 / 10	1

Illustration 44 – Tableau récapitulatif des notes et des poids attribués à chaque paramètre

Pour chaque unité fonctionnelle, un Indice de Capacité d'Infiltration (ICI) des eaux pluviales basé sur des critères naturels a été défini de la manière suivante :

$$\text{ICI} = 5 \times [\text{ZNS}] + 3 \times [\text{perméabilité}] + 2 \times [\text{Indice de susceptibilité d'argiles}] + 2 \times [\text{IDPR}] + 5 \times [\text{hydromorphie}] + 2 \times [\text{pentes}] + [\text{zones endoréiques}]$$

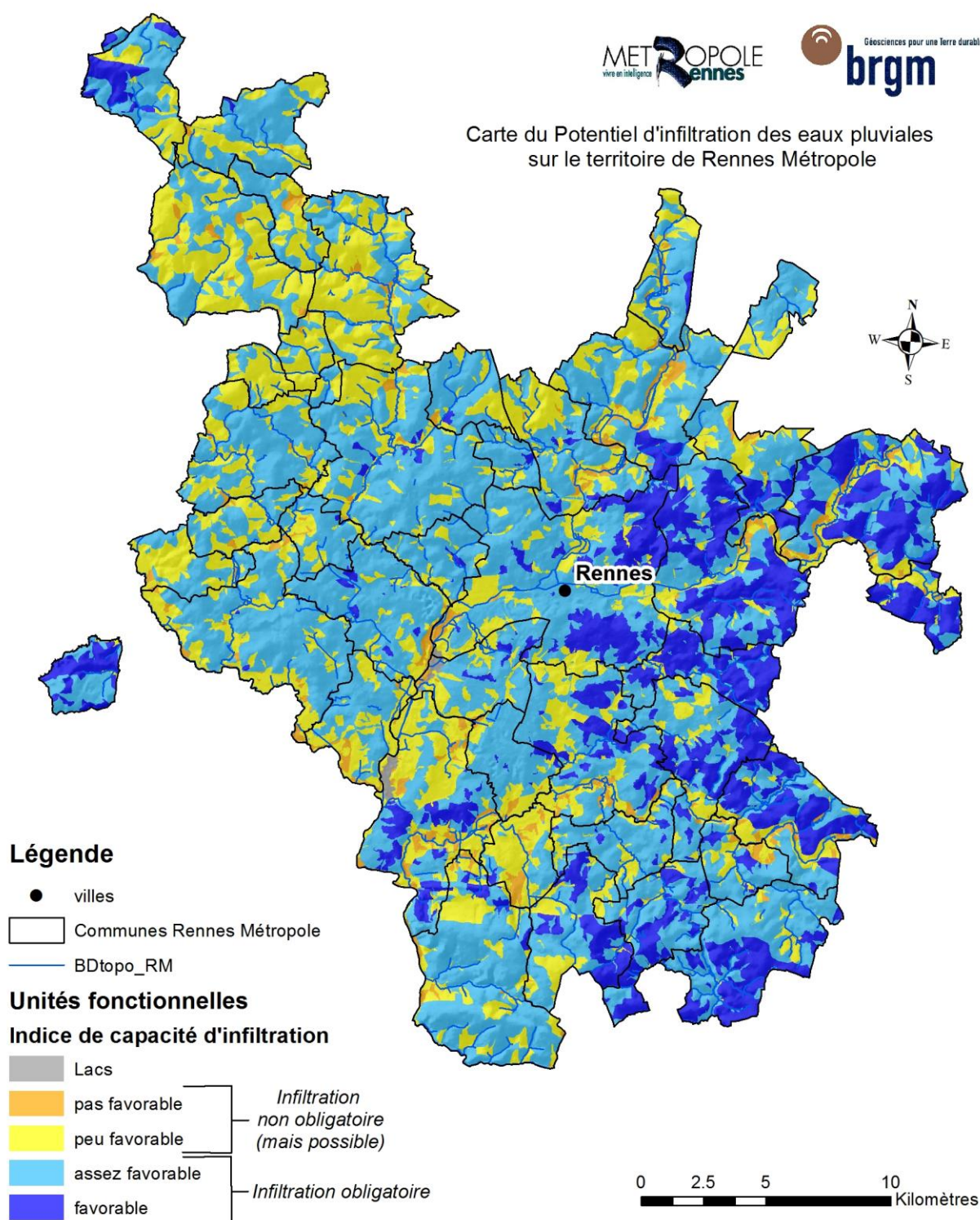
Les valeurs de cet indice sont comprises entre 0 et 200 et réparties selon la classification suivante :

- $\text{ICI} \leq 50$: zones pas favorables à l'infiltration des eaux pluviales
- $50 < \text{ICI} \leq 100$: zones peu favorables à l'infiltration des eaux pluviales
- $100 < \text{ICI} \leq 150$: zones assez favorables à l'infiltration des eaux pluviales
- $150 < \text{ICI} \leq 200$: zones favorables à l'infiltration des eaux pluviales

A la demande de Rennes Métropole, les secteurs dont l'ICI est inférieur ou égal à 100 ont été qualifiés en parallèle comme des zones où l'infiltration est non obligatoire, mais possible. Pour les valeurs ICI supérieures à 100, l'infiltration des eaux pluviales est considérée comme « obligatoire » par la collectivité.

Cet indicateur de capacité d'infiltration a ensuite été cartographié sur l'ensemble de la zone d'étude en tenant compte de la classification ci-dessus et des demandes de Rennes Métropole (illustrations 44 et 45).

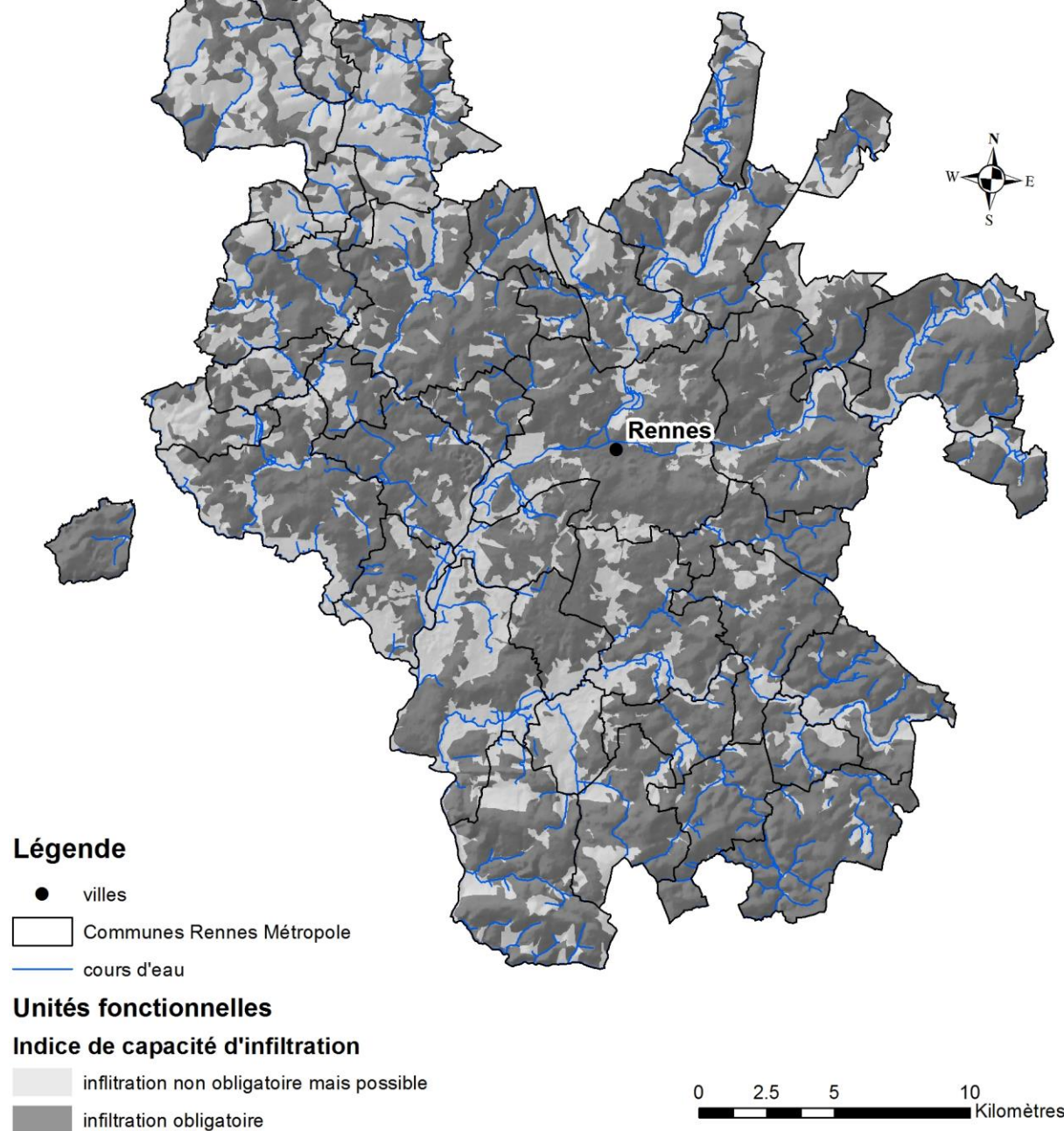
Compte tenu des informations utilisées et de leurs échelles de validité, une telle cartographie doit être considérée comme indicative. Elle ne doit pas être utilisée à une échelle inférieure au 1/25 000 et se substituer à des études à la parcelle.



Date : décembre 2018

*Illustration 45 – Carte de l'indice de capacité d'infiltration des eaux pluviales
sur le territoire de Rennes Métropole*

Carte du Potentiel d'infiltration des eaux pluviales
sur le territoire de Rennes Métropole



Date : décembre 2018

Illustration 46 – Carte de l'indice de capacité d'infiltration des eaux pluviales
sur le territoire de Rennes Métropole

4.3. CONTRAINTES NATURELLES ET REGLEMENTAIRES

La réalisation de la carte des indices de capacité d'infiltration naturelle des sols de Rennes Métropole a été couplée à une recherche des contraintes naturelles et réglementaires aux procédés d'infiltration des eaux pluviales.

Les contraintes identifiées et restituées sous forme cartographique sur le territoire de Rennes Métropole sont les suivantes :

- Présence de captages d'eau potable,
- Les périmètres de protection des captages d'eau potable,
- Les emprises de cimetières,
- Présence de sites et sols pollués (BASIAS et BASOL complétés par Rennes Métropole),
- Présence de cavités et mouvements de terrain (inventaires départementaux du BRGM),
- Aléas au retrait gonflement des argiles (carte départementale du BRGM),
- Aléas aux inondations.

Ces données spatialisées ont été fournies à Rennes Métropole sous forme de couches SIG.

Pour les périmètres de protection des captages d'eau potable, tous les arrêtés de DUP ont été examinés pour vérifier si ceux-ci comprennent des restrictions ou interdiction d'infiltration des eaux pluviales. Un champ spécifique a été ajouté dans la table attributaire de la couche SIG.

Ces contraintes pourront donc être superposées à la carte des indices de capacité d'infiltration naturelle des sols, en fonction des besoins de la collectivité.

5. Conclusion

La présente étude a été réalisée dans le cadre d'une convention de recherche et de développement partagés entre Rennes Métropole et le BRGM, afin de produire une carte du potentiel d'infiltration des eaux pluviales qui permettra d'amender le PLUI (Plan local d'urbanisme intercommunal) de l'agglomération de Rennes Métropole.

Les objectifs de ce projet visent donc dans un premier temps à identifier les nappes souterraines en présence sur la zone d'étude en réalisant une carte piézométrique et en enduire l'épaisseur de la ZNS (Zone Non Saturée) qui joue un rôle très important dans les écoulements et les temps de transfert des eaux météoriques. Dans un second temps, différents paramètres ont été croisés pour apprécier l'aptitude des sols à laisser l'eau s'infiltrer.

Lors de la campagne piézométrique réalisée en mars 2018 (période de hautes eaux), 692 points ont été mesurés répartis de façon homogène sur le territoire de Rennes Métropole à l'exception de la zone urbaine Rennes, soit une densité de 1 point tous les 0.97 km². Le nombre de mesures a donc été supérieur à ce qui était attendu, cela est dû principalement à la mesure de puits communaux et à une recherche minutieuse d'ouvrages directement sur le terrain. Le bilan de cette campagne est donc satisfaisant car la densité de points a permis de réaliser une interpolation sur le logiciel GDM du BRGM de meilleure qualité. Cette interpolation a permis de produire à partir des altitudes des nappes interpolées, une grille de l'épaisseur de la zone non saturée au pas de 25 m.

La réalisation de la carte des contraintes et de l'aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales se base sur une approche de cartographie à index couplé à un système de pondération pour sept 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.

Ces critères naturels ont été hiérarchisés selon des contours homogènes que sont les unités fonctionnelles, permettant de découper l'ensemble de la zone d'étude en polygones cohérents en termes de fonctionnements hydrologique et pédologique. La combinaison des différents paramètres aboutit à la création d'un indicateur de la capacité d'infiltration (ICI) d'une valeur maximale de 200. Afin d'être facilement utilisable cet indicateur a ensuite été restitué sous forme de quatre classes caractérisant la possibilité d'infiltrer des eaux pluviales : pas favorable, peu favorable, assez favorable et favorable.

La carte des potentiels d'infiltration à l'échelle des unités fonctionnelles ainsi élaborée permet d'avoir une vision globale sur l'ensemble du territoire de Rennes Métropole et de servir comme un premier niveau pour sectoriser les zones où des études plus précises devront être menées.

Compte tenu des informations utilisées et de leurs échelles de validité, cette cartographie doit être considérée comme indicative. Elle ne doit pas être utilisée à une échelle inférieure au 1/25 000 et se substituer à des études à la parcelle.

En accompagnement de cette carte du potentiel d'infiltration des eaux pluviales basée essentiellement sur des critères naturels, il conviendrait dans le cadre d'étude plus précise, d'acquérir des données de terrain sur la capacité d'infiltration des sols (tests d'infiltration) et de prendre en compte les contraintes réglementaires, ainsi que les données ponctuelles sur les sites pollués (BASOL) ou les anciens sites potentiellement pollués (BASIAS).

6. Bibliographie

Bouroullec I., Lambert M., (2018) – Inventaire départemental des mouvements de terrain de l'Ille-et-Vilaine. BRGM/RP-67917-FR, 121 p., 45 ill., 3 ann., 1 carte h.t.

Conil P., Plat E., (2015) – Aptitude des sols à l'infiltration sur le territoire de Rennes Métropole. BRGM/RP- 65025 – FR, 63 p., 32 ill., 2 ann.

Gerolin A., Dumont E., Degrave M., Pétillon G., Le Nouveau N. (2016). *Stormwater infiltration capacity maps: a brief international overview to question French practices*, Novatech 2016, 28 juin - 1er juillet 2016, Lyon, France, 10 p.

Lemercier ., (2011) - Programme des sols de Bretagne (2005-2010) - Rapport final, 108 p, 18 ann.

Mardhel V., Gravier A., (2005) – Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie. Rapport BRGM RP-54148-FR, 92p.

Urban S. (2011) – Cartographie de la perméabilité des formations superficielles du territoire de la CUS- Rapport BRGM RP-60275-FR, 76 p, 43 ill.

Guides et notices

Les ouvrages d'infiltration la fonction filtration -recommandations à l'usage des gestionnaires GESSOL-FAFF (2015)

Recommandations pour la gestion des eaux pluviales sur le territoire du schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) de l'Est lyonnais - Rapport de phase 2 : réalisation d'une cartographie des conditions à l'infiltration- 15 A 125- Mai 2016 Version A

Delaunois A., (2006) Guide simplifié pour la description des sols – Chambre d'agriculture du Tarn

GRAIE (2009) - Guide pour la prise en compte des eaux pluviales dans les documents de planification et d'urbanisme

Annexe 1

Campagne piézométrique

Fiche terrain et exemple de résultats

Fiche de TERRAIN

Fiche Point d'eau	
Indice	Date et heure
X WGS84	ProfondeurEau
Y WGS84	h (hauteur repère)
Z SOL	Pt (profondeur totale)
Commune	Diametre ouvrage
Adresses/Lieu dit	
Dpt	
Propriétaire	
Exploitant	

Exemple de fichier « RESULTATS »

code_BSS	Identifiant	Lat	Long	Z_sol_m	date_heure	Commune	mesure_faite	niv_stat_m	rep_sol_m	nat_rep	prof_tot_m	diam_m	pompage	Niv_dyn_m	waypt_GPS	remarque
	Z1-1	48.09625	-1.89869		05/03/2018 15:00	Mordelles	OUI	0.50	0.38	buse	3.5	>1	NON	NON	78	en remplacement de 66 et 67 juste à coté
03168X0110	85	48.07643	-1.85143	36	05/03/2018 14:30	Mordelles	OUI	2.75	-0.20	bord tubage PVC bleu	non mesurée		NON	OUI	79	équipé de pompe
	Z1-2	48.07080	-1.93268	44	06/03/2018 10:00	Le Verger	OUI	2.89	0.45	margelle de puits	5.55	>1	NON	NON	80	
	Z1-3	48.06978	-1.93265	51	06/03/2018 10:00	Le Verger	OUI	6.52	0.52	margelle de puits	11.50		NON	NON	82	
	Z1-4	48.10565	-1.87225	33	06/03/2018 11:20	Cintré	OUI	1.63	0.43	margelle de forage	7.90		NON	OUI	83	équipé de pompe
	Z1-5	48.10325	-1.87481	46	06/03/2018 11:45	Cintré	OUI	0.80	0.60	margelle de puits	6.45	>1	NON	NON	84	
	Z1-6	48.10088	-1.87499	50	06/03/2018 12:00	Cintré	OUI	0.81	0.00	tampon au sol	100		NON	NON	85	équipé de pompe
03168X0046	77	48.09376	-1.88090	46	06/03/2018 12:30	Mordelles	OUI	4.05	0.17	margelle de puits	12.32	1	NON	OUI	86	équipé de pompe
03168X0107	84	48.13373	-1.87148	43	06/03/2018 14:00	Saint-Gilles	OUI	2.50	0.30	margelle de puits	70		OUI	OUI	88	équipé de pompe
03168X0104	83	48.13575	-1.88608	48	06/03/2018 14:30	Saint-Gilles	OUI	5.15	0.66	margelle de puits	70		OUI	OUI	89	équipé de pompe
03164X0014	36	48.14993	-1.87234	37	06/03/2018 15:15	Saint-Gilles	OUI	2.21	0.28	margelle de puits	38		NON	OUI	93	
03164X0010	32	48.17321	-1.86341	86	06/03/2018 16:00	Saint-Gilles	OUI	7.45	0.03	margelle de puits	80		NON	OUI	94	
03164X0004	26	48.16609	-1.84577	61	06/03/2018 17:00	Saint-Gilles	OUI	1.85	0.27	margelle de puits	9.30	1	NON	NON	95	
	Z1-8	48.16632	-1.84621	63	06/03/2018 17:15	Saint-Gilles	OUI	2.35	0.35	margelle de puits	7.80	1	NON	NON	96	
	Z1-9	48.15380	-1.82940	54	07/03/2018 09:15	Saint-Gilles	OUI	5.85	0.55	haut du piezo	6.45	0.05	NON	NON		
	Z1-10	48.15380	-1.82914	52	07/03/2018 09:30	Saint-Gilles	OUI	4.71	0.44	haut du piezo	5.45	0.05	NON	NON	97	
	Z1-11	48.15541	-1.82807	56	07/03/2018 10:00	Saint-Gilles	OUI	4.04	0.42	margelle de puits	11.55	1	NON	NON	98	ancien puits rue du prieuré
03164X0008	30	48.14951	-1.81544	50	07/03/2018 11:00	Saint-Gilles	OUI	6.51	0.60	margelle de puits	12.75	1	NON	NON	99	
03168X0123	87	48.11774	-1.82742	42	07/03/2018 11:30	L'Hermitage	OUI	2.45	0.37	haut du piezo	11.09	0.115	NON	NON	100	
03168X0124	88	48.11732	-1.82760	48	07/03/2018 11:40	L'Hermitage	OUI	1.72	0.17	haut du piezo	18.38	0.115	NON	NON	101	
03168X0125	89	48.11713	-1.82489	51	07/03/2018 11:50	L'Hermitage	OUI	3.09	0.23	haut du piezo	23.75	0.115	NON	NON	102	
	Z1-12	48.05762	-1.81151	23	07/03/2018 11:50	Mordelles	OUI	1.33	0.15	margelle de puits	9.35	1	NON	NON	103	
03531X0051	546	48.04475	-1.77400	26	07/03/2018 14:50	Chavagne	OUI	7.49	0.42	margelle de puits	9.95	1	NON	NON	105	puits de ferme
	Z1-13	48.06808	-1.77788	28	07/03/2018 15:30	Chavagne	OUI	1.01	0.48	margelle de puits	5.50	1	NON	NON	106	
	Z1-14	48.08814	-1.75731	25	07/03/2018 16:30	Chavagne	OUI	1.90	0.60	margelle de puits	7.20	1	NON	NON	107	
03175X0422	369	48.09526	-1.75336	31	07/03/2018 17:00	Le Rheu	OUI	17.57	0.97	haut du piezo	27.20	0.115	NON	NON	108	
03164X0015	37	48.16764	-1.88844	64	08/03/2018 09:00	Saint-Gilles	OUI	3.47	0.20	margelle de puits	12.16	1	NON	NON	109	
	Z1-15	48.14083	-1.82896	49	08/03/2018 09:35	Saint-Gilles	OUI	0.95	0.15	margelle de puits	9.50	1	NON	NON	110	
03175X0404	357	48.07174	-1.76410	23	08/03/2018 10:10	Chavagne	OUI	1.88	0.00	haut du tubage	70.00	0.115	NON	NON	111	
03175X0423	370	48.09585	-1.75148	32	08/03/2018 12:15	Le Rheu	OUI	15.49	0.92	haut du piezo	23.70	0.115	NON	NON	114	
03175X0424	371	48.09588	-1.75409	37	08/03/2018 13:00	Le Rheu	OUI	20.28	0.91	haut du piezo	27.65	0.115	NON	NON	115	
	Z1-16	48.11936	-1.80437	48	08/03/2018 16:30	L'Hermitage	OUI	0.82	0.60	margelle de puits	8.60	1	NON	NON	-	
	Z1-17	48.08479	-1.81161	36	09/03/2018 10:30	Mordelles	OUI	1.03	0.73	margelle de puits	11.32	1	NON	NON	118	
	Z1-18	48.07917	-1.86437	31	09/03/2018 11:15	Mordelles	OUI	7.02	0.73	margelle de puits	12.30	1	NON	NON	119	
	Z1-19	48.08920	-1.87063	36	09/03/2018 11:25	Mordelles	OUI	0.80	0.24	margelle de puits	9.10	1	NON	NON	120	
	Z1-20	48.11463	-1.83731	44	09/03/2018 11:45	L'Hermitage	OUI	1.03	0.60	margelle de puits	12.25	1	NON	NON	121	

Annexe 2

Liste des données à collecter

Critères	Echelle	Remarques
IDPR	1/50 000	Données BRGM. A transposer à une échelle adaptée pour le territoire de Rennes Métropole
MNT	2 m (avec précision du Z $\pm$ 40 cm)	MNT disponible dans les services de Rennes Métropole sur tout le territoire. Réalisation d'une carte des pentes. MNT utilisé pour le nivellement des Zsol au niveau des ouvrages mesurés. Attention aux cotes au niveau des ponts des rivières (vérification en cours dans les services SIG de Rennes Métropole). Egalement disponibles : données LIDAR et lignes 3D
Carte géologique	1/50 000 harmonisée	Donnée BRGM
Secteurs à urbaniser		Couches vecteurs disponibles dans les services de Rennes Métropole
Zones humides	1/5000 ? (à confirmer).	Couches vecteurs disponibles dans les services de Rennes Métropole (dans le cadre des PLU : données PADD + bureaux études + inventaire des ZH).
Sites potentiellement pollués	Parcellaire	Sur la ville de Rennes : BASIAS mis à jour par Rennes Métropole. Sur le reste de l'agglomération -> Données BASIAS (Base des anciens sites industriels et activités de service). Une enquête va être menée prochainement auprès des l'ensemble des maires des communes pour identifier les secteurs potentiellement pollués.
Périmètres de protection des captages des ESO et ESU	1/5000	Voir en interne BRGM + ARS
Cavités souterraines		Données BRGM
Mouvements de terrain		Données BRGM (pour fin 2017).
Argiles gonflantes (ARG : aléa retrait gonflement)		Données BRGM
Proximité des cimetières	BD TOPO et BD TOPAGE	BRGM et Rennes Métropole
Puits identifiés sur les plans cadastraux		Données disponibles à Rennes Métropole

Tableau 1 – Tableau de données prioritaires à collecter

Couche	Echelle	Remarques
Carte pédologique	Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000	Utilisation notamment du volet "sols à caractère hydromorphe"
Carte pédologique	Existence de fragments de carte pédologiques à 1/25 000 dans le sud de l'agglomération de Rennes.	
Carte des familles de sols	Echelle 1/250 000	Réalisé par l'équipe AgroCampus « Sols de Bretagne »
Carte d'épaisseur des sols	1/250 000	Carte de l'INRA (sous-produit de la carte pédologique à 1/250 000)
Carte du drainage naturel des sols	1/250 000	Carte de l'INRA (sous-produit de la carte pédologique à 1/250 000)
Cadastre	1/5000 ou 1/1250	Couches vecteurs disponibles dans les services de Rennes Métropole, sous forme de flux.
Limite du territoire de Rennes Métropole		Données Rennes Métropole
Tracé des rivières et des bassins versants		BD CARTHAGE
Milieus potentiellement humides en France	1/100 000	Carte nationale de l'INRA et AGROCAMPUS Ouest + carte des zones humides d'Ille-et-Vilaine
Coupes géologiques	1/25 000 (et plus précis)	Forages de la Banque du Données du Sous-Sol disposant d'une description géologique (info complémentaire sur la ZNS et perméabilité en profondeur)

Tableau 2 – Tableau des données secondaires à collecter

Annexe 3

Géostatistique et interpolation par la géostatistique

6.1. DEFINITION

La géostatistique est une discipline dont l'objectif est l'étude des phénomènes « régionalisés », c'est-à-dire présentant une certaine « structure » dans l'espace (x,y,z) ou dans le temps. Par « structure » on entend la corrélation spatiale d'une variable entre deux points de mesure à l'intérieur d'une zone d'étude ou au même point en deux instants différents. Ainsi la cote piézométrique en un point A d'un aquifère est en général peu différente de la cote piézométrique en un point B très proche (au même instant) : les deux côtes piézométriques sont très « corrélées ». On comprend aisément que cette corrélation diminue lorsque la distance entre les points A et B augmente. A la limite, on conçoit qu'il y ait des cas où ces cotes piézométriques soient indépendantes l'une de l'autre lorsque les points sont suffisamment éloignés.

La cote piézométrique ou encore les formations lithologiques présentent un comportement global que l'on pourrait modéliser par une approche déterministe, néanmoins elles présentent aussi des variations et des irrégularités locales qui échappent à toute représentation fonctionnelle simple et qu'il est plus rigoureux de modéliser par une approche probabiliste.

La géostatistique est une théorie et une méthodologie, fondée sur l'analyse statistique des corrélations spatiales, pour étudier les variables dites régionalisées c'est à dire dont l'évolution dans l'espace (et/ou le temps) présente un caractère à la fois aléatoire et structuré.

Deux raisons majeures justifient la mise en œuvre d'une approche géostatistique :

- Elle permet de caractériser la variabilité spatiale du phénomène que l'on étudie, à savoir le comportement des formations retenues. L'outil utilisé est le **variogramme** qui synthétise la structure de la variable. Pour une direction donnée, il indique comment varie l'écart des valeurs prises en 2 points X et X+h en fonction de la distance h. Il renseigne sur les anisotropies éventuelles et sur le degré de régularité de la variable.
- Elle permet de résoudre le problème de l'interpolation optimale, c'est à dire de l'estimation optimale d'une valeur $Z(x_0)$ inconnue à partir des informations disponibles. L'interpolateur utilisé est le **krigeage**, seule technique qui fournit simultanément la valeur estimée et l'erreur associée caractérisée par l'écart-type de krigeage.

6.2. LE VARIOGRAMME

Dans un phénomène naturel comme la topographie ou la cote piézométrique, les cotes mesurées en différents points, bien que variables d'un point à l'autre, ne sont pas indépendantes de leur localisation. La différence de cote Z entre deux points x et x + h est d'autant plus faible que la distance h qui les sépare est petite. D'un point de vue statistique, il y a une corrélation spatiale entre les données. Cette corrélation est d'autant plus forte que les points expérimentaux sont rapprochés et que le phénomène est continu et régulier. Pour quantifier le degré de corrélation

spatiale, ou plutôt la détérioration de cette corrélation avec la distance, la géostatistique fait appel à la fonction variogramme $\gamma(h)$. Cette fonction donne, en fonction de la distance h qui sépare deux points, la valeur moyenne de $1/2[Z(x+h)-Z(x)]^2$.

La Figure 1 illustre ce calcul.

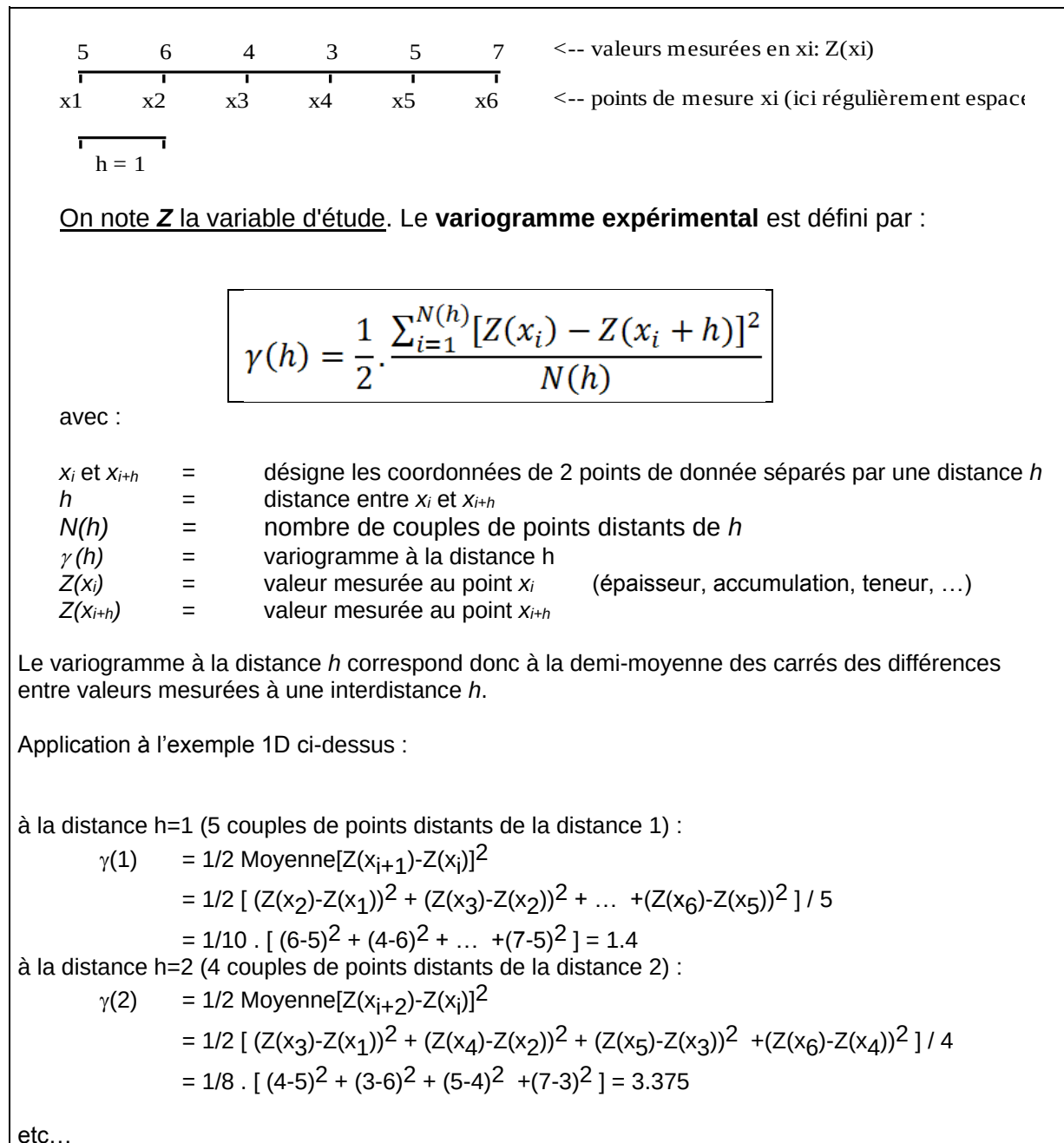


Figure 1 : Définition et exemple de calcul du variogramme expérimental

Interprétation du variogramme

Le variogramme est d'abord un outil d'analyse des phénomènes naturels. En effet, l'allure et le comportement du variogramme expérimental fournissent une image synthétique des principaux traits structuraux du phénomène étudié :

- **Continuité à l'origine.** En principe $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont égaux quand h tend vers 0. En pratique toutefois, ceci n'est pas toujours vérifié. En effet il peut exister une discontinuité apparente à l'origine, qui peut être liée soit à une erreur de mesure, soit à des variations à « petites distances », en tout cas à des distances inférieures à la maille d'échantillonnage. Cette discontinuité à l'origine est appelée « effet de pépité ». Elle traduit la part de variabilité du phénomène que l'on ne peut expliquer soit en raison de la maille d'échantillonnage, qui ne permet pas de mettre en évidence des variabilités locales, soit en raison d'erreurs de mesure. La figure A (b) ci-dessous montre un exemple d'effet de pépité.
- **Continuité spatiale au-delà de l'origine**, traduite par les observations suivantes :
 - **portée** (distance de corrélation), phénomène stationnaire - Figure 2 (a) ci-dessous ; classiquement la valeur du variogramme est plus faible à l'origine : $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont voisins quand h est faible, donc la valeur du variogramme est faible, et augmente quand la distance augmente. Au bout d'une certaine distance entre points de mesure, la différence entre $Z(x)$ et $Z(x+h)$ n'augmente plus statistiquement, car les points ne sont plus corrélés. Cette distance limite est appelée portée (distance maximale jusqu'à laquelle des points peuvent être corrélés). A partir de cette distance, la valeur du variogramme se stabilise autour d'un palier,
 - **anisotropie**,
 - **imbrication d'échelles de variabilité**,
 - **absence de portée finie** - Figure 2 (b) ci-dessous, dérive ou tendance régionale, phénomène non stationnaire.

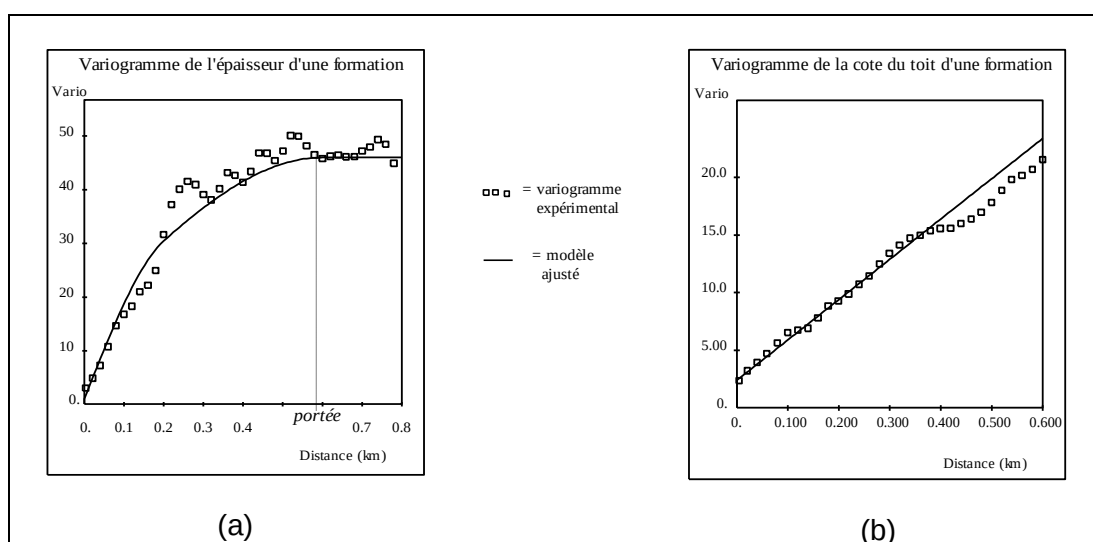


Figure 2: Exemples types de variogrammes : (a) : variable stationnaire avec portée visible, (b) : variable non stationnaire, sans portée.

6.3. LE KRIGEAGE

Le krigeage est la méthode d'interpolation spécifique à la géostatistique. Par rapport aux autres méthodes d'interpolation automatique, les algorithmes du krigeage reposent sur une interprétation du phénomène à travers l'étude variographique préalable.

Le krigeage présente un double intérêt :

- Il remplace le dessin par un calcul qui permet d'estimer en tout point la valeur la plus probable du paramètre étudié. Cette interpolation prend en compte :
 - la densité et la répartition des données sur le domaine étudié,
 - la plus ou moins grande continuité spatiale modélisée par le variogramme,
 - les diverses erreurs de mesure et incertitudes associées aux données.
- Il quantifie l'incertitude qui entache toute valeur interpolée. Cette incertitude, qui est une mesure de la qualité locale de la carte obtenue, est essentielle dans tous les projets où les risques encourus doivent être connus, et minimisés le cas échéant par de nouvelles mesures.

Formalisme du krigeage « ordinaire »

Le krigeage est une méthode d'interpolation linéaire qui permet d'obtenir une estimation non biaisée et dont l'erreur d'estimation est minimale.

Le krigeage le plus utilisé est le « krigeage ordinaire ».

La variable d'étude est notée Z . La valeur interpolée au point x_0 , notée $Z^*(x_0)$, est alors :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1,n} \lambda_i Z(x_i)$$

(avec la condition $\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$)

$Z^*(x_0)$ est donc une combinaison linéaire des données de base $Z(x_j)$ mesurées aux points x_j .

Les λ_j sont les poids respectifs (ou pondérateurs) attribués à chaque donnée $Z(x_j)$.

Ces poids sont calculés sous contrainte que leur somme soit égale à 1 (pour des conditions de non biais) et sous contrainte d'être en accord avec la structure spatiale mise en évidence par le variogramme, de façon à ce que l'erreur d'interpolation soit minimale. Lorsqu'on interpole la valeur en un point x , le poids attribué aux données environnantes sera d'autant plus fort que cette donnée est proche, tout en tenant compte de la densité de données, de leur disposition vis-à-vis des anisotropies, etc....

Le système d'équation permettant d'obtenir les poids de krigeage est donné *Figure 3*.

$$\sum_{j=1,n} \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0) \quad \forall i \text{ (n équations)}$$

$$\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$$

- n = nombre d'informations disponibles
 i, j = indices des points de mesure ; i et j varient de 1 à n
 x_i, x_j = points de mesure
 x_0 = point à estimer
 λ_i (ou λ_j) = pondérateur (ou poids) affecté à la valeur mesurée en x_i
 μ = paramètre de Lagrange
 $\gamma(x_i, x_j)$ = valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h =distance entre x_i et x_j
 $\gamma(x_i, x_0)$ = valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h =distance entre x_i et x_0 ,

Enfin la variance de l'erreur d'estimation, appelée **variance d'estimation** ou **variance de krigeage**, vaut :

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1,n} \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + \mu$$

Dans les expressions ci-dessus on voit que dans le krigeage interviennent :

- les positions des informations x_j par rapport au point à estimer x_0 , par le biais des valeurs de $\gamma(x_i, x_0)$;
- la répartition des informations entre elles, par le biais des valeurs de $\gamma(x_i, x_j)$;
- la fonction structurale variogramme γ .

Figure 3: Equations du krigeage ordinaire

Le krigeage offre trois avantages principaux par rapport aux autres méthodes d'interpolation :

- il prend en compte la structure du phénomène, à travers le variogramme : il se base donc sur une fonction d'interpolation « objective », c'est-à-dire mesurée sur les données, et non « subjective » = choisie arbitrairement,
- il permet le calcul de l'erreur d'interpolation (ou plus précisément la variance de cette erreur) : c'est actuellement la seule méthode d'interpolation qui permet cela,
- il permet d'intégrer des variables secondaires, corrélées à la variable d'étude, connues soit aux points de données, soit exhaustivement sur une grille. On peut ainsi prendre en compte le fait que la cote piézométrique est dans certains cas (nappes libres) corrélée à la cote topographique. Dans le cas où on utilise plusieurs variables corrélées, disponibles aux points de mesure, on parle de « co-krigeage ». Dans le cas où on utilise une variable connue de façon exhaustive, on utilise une technique appelée « krigeage avec dérive externe ».

Co-krigeage, krigeage « universel » et krigeage avec « dérive externe »

Les formules du krigeage ordinaire peuvent se généraliser au cas multivariable (prise en compte d'une ou plusieurs autres variables mesurées en quelques points), ainsi qu'au cas où on introduit une dérive liée à un polynôme dépendant des coordonnées (krigeage dit « universel ») ou d'une fonction corrélée connue en tout point de mesure ainsi que sur la grille à calculer (krigeage avec dérive externe).

Le but de ce document n'étant pas d'exposer en détails toute la théorie géostatistique, le lecteur est invité à se reporter à l'excellent ouvrage de Chilès (1999, ré-édité en 2012), dans lequel ces méthodes sont exposées et illustrées.

Chilès, J.P., Delfiner, P. (1999). Geostatistics: Modelling Spatial Uncertainty, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 695 p

6.4. VALIDATION CROISEE

Le principe de la validation croisée est illustré *Figure 4***Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

La validation croisée permet de contrôler que le modèle géostatistique est pertinent et de détecter d'éventuelles singularités dans les données.

La validation croisée consiste, pour chaque point de donnée, à l'enlever temporairement et à ré-estimer sa valeur à partir des données voisines. On obtient alors au point qui a été enlevé :

- la valeur réelle $Z(x)$
- la valeur estimée (interpolée) à partir des points voisins : $Z^*(x)$
- l'écart-type d'estimation $\sigma_k(x)$ si on a utilisé un modèle géostatistique.

Ce processus est répété pour tous les points x où la variable est connue : on re-estime la valeur en ce point à partir des autres données en faisant comme s'il n'existait pas.

On peut alors calculer en tout point qui disposait d'une mesure :

- l'erreur d'estimation $Err(x) = Z^*(x) - Z(x)$, et dans le cas d'une estimation par modèle géostatistique :
- l'erreur réduite : $Ered(x) = \frac{Err(x)}{\sigma_k(x)}$

Les résultats de la validation croisée sont fournis sous forme de statistiques et de cartes :

- ✓ statistiques sur les erreurs et les erreurs réduites : moyennes, nuages de corrélation, histogrammes
- ✓ cartes des erreurs $Err(x)$ ou carte des erreurs réduites $Ered(x)$ faisant apparaître les points mal re-estimés
- ✓ nuages de corrélation ($Z^*(x)$; $Z(x)$)
- ✓ nuages de corrélation ($Z^*(x)$; $Err(x)$) ou ($Z^*(x)$; $Ered(x)$)

La variable $Ered(x)$, appelée « erreur réduite », se rapproche d'une distribution gaussienne de moyenne nulle et de variance 1.

En ré-itérant la re-estimation de chaque donnée par les données voisines, on peut calculer l'histogramme de $Ered(x)$ et vérifier s'il se rapproche d'une loi gaussienne centrée normée.

Les points présentant une valeur de $Ered(x)$ s'éloignant du standard gaussien sont des points qui doivent être examinés car potentiellement liés à des erreurs (erreur de mesure, de localisation), ou à un comportement localement différent de la variable d'étude : il convient alors de vérifier et le cas échéant corriger la donnée de base. Lorsque la donnée est correcte et que le problème vient d'un mauvais calage du modèle géostatistique, ce modèle peut être amélioré ou recalculé localement.

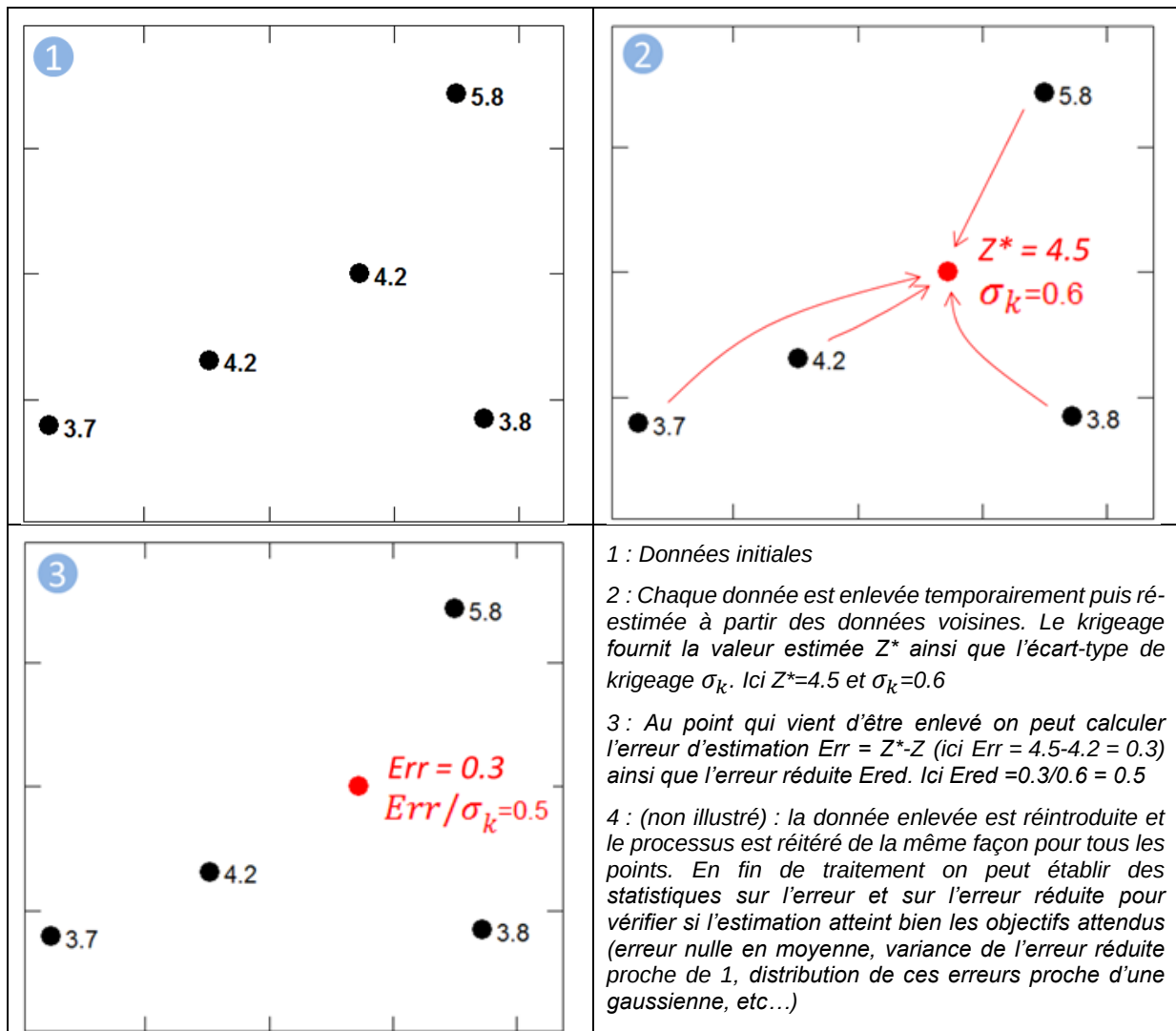


Figure 4 : Principe de la validation croisée



Centre scientifique et technique
Direction D3E Eau, Environnement et Ecotechnologies
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr