



Aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales sur le territoire de Nantes Métropole

Rapport final

BRGM/RP-65025-FR

Octobre 2015



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales sur le territoire de Nantes Métropole

Rapport final

BRGM/RP -65025-FR

Octobre 2015

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2015

P. Conil, E. Plat

Vérificateur :

Nom : SEDAN-MIEGEMOLLE olivier

Fonction : Expert D3E

Date : 15/12/2015

Signature :



Approbateur :

Nom : GOMEZ Eric

Fonction : Directeur interrégional CO

Date : 16/12/2015

Signature :



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

Mots-clés : pluie, infiltration, IDPR, Nantes Métropole,

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

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

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

Synthèse

L'aptitude des sols à permettre l'infiltration des eaux de pluies est un paramètre important pour définir la gestion de celles-ci dans le cadre des aménagements urbains et péri-urbains. En effet, si elle est favorable, il existe un ensemble d'équipements potentiels (noues, bassins d'infiltration, etc.) qui permettent de gérer les flux provenant de l'assainissement pluvial. Dans ce cadre, Nantes Métropole souhaitait disposer d'une cartographie à l'échelle de la communauté urbaine (523 km²) pour permettre de définir les secteurs où l'infiltration des eaux pluviales devra être privilégiée.

Une étude a donc été engagée en 2015, en partenariat entre Nantes Métropole et le BRGM, afin de :

- Développer une méthodologie permettant de hiérarchiser l'aptitude à la gestion des eaux pluviales par infiltration des territoires de la communauté urbaine
- Proposer une cartographie de cette aptitude sur l'ensemble du territoire de la communauté urbaine.

La méthodologie employée se base sur l'utilisation des données cartographiques correspondant aux principaux critères contribuant à l'évaluation de l'aptitude d'un terrain à l'infiltration : pente, profondeur des eaux souterraines, caractère ruisselant/infiltrant défini indirectement à partir de l'IDPR (Indice de Persistance et de Développement des Réseaux), géologie/pédologie.

Une analyse multicritère a été réalisée à partir d'un ensemble de ces données et a ainsi permis de hiérarchiser le territoire selon la plus ou moins grande aptitude à l'infiltration.

Afin d'être facilement lisible cette analyse est restituée dans la cartographie finale avec un classement du territoire selon trois classes d'aptitude : « *a priori* défavorable », « *a priori* moyennement favorable » et « *a priori* favorable ». Des informations complémentaires, importantes à prendre en compte dans le cadre de projets de gestion par infiltration (périmètres de protection, pentes,...) ont également été représentées.

La carte proposée permet d'avoir une vision homogène sur l'ensemble du territoire de Nantes Métropole et peut ainsi servir de premier niveau pour l'aide à la décision.

Toutefois, compte tenu des informations utilisées et de leurs échelles de validité, une telle cartographie doit être considérée comme indicative. En particulier elle ne doit surtout pas être utilisée à une échelle inférieure au 1/50 000 par exemple pour évaluer un projet « à la parcelle ».

Sommaire

1. Contextes de l'étude	9
1.1. CONTEXTE ET OBJECTIF	9
1.2. DEFINITIONS ET RAPPELS	9
1.2.1. Rappels sur les mécanismes de l'infiltration naturelle et le fonctionnement hydrologique / hydrogéologique	9
1.2.2. Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR)	11
1.3. LA PRISE EN COMPTE DE L'INFILTRABILITE.....	13
1.3.1. Cartographie de l'aptitude à l'infiltration à l'échelle communale.....	13
1.3.2. Cartographie sur des superficies conséquentes.....	13
1.3.3. Capacité d'infiltration utilisée dans les études de vulnérabilité :	16
1.4. PROGRAMME DE TRAVAIL	18
2. Données disponibles et mise en forme des informations	21
2.1. REFERENTIEL TOPOGRAPHIQUE	21
2.2. INDICE DE DEVELOPPEMENT ET DE PERSISTANCE DES RESEAUX (IDPR)	23
2.3. CARTES PEDOLOGIQUE ET GEOLOGIQUE.....	24
2.3.1. Carte pédologique.....	24
2.3.2. Carte géologique.....	25
2.4. ZONES HYDROGRAPHIQUES	27
2.5. EPAISSEUR DE LA ZONE NON SATUREE (ZNS).....	28
3. Analyses multicritères et hiérarchisation	31
3.1. CALCUL DE L'IDPR PAR UNITES FONCTIONNELLES	31
3.1.1. Choix de la cartographie de référence pour les unités fonctionnelles	31
3.1.2. Cartographie de l'IDPR	32
3.2. CROISEMENT DES DONNEES	35
3.2.1. Analyse avec l'hydromorphie considérée comme non rédhibitoire	37
3.2.2. Analyse avec l'hydromorphie considérée comme rédhibitoire	38
3.2.3. Evaluation de l'aptitude à l'infiltration à partir du critère le plus défavorable :	40
3.2.4. Sélection et contrôle de la méthode d'analyse	40
3.3. REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DE L'APTITUDE A L'INFILTRATION	44
3.4. INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES	46

3.5. RESTITUTION DES CARTOGRAPHIES FINALISEES	49
4. Conclusions.....	51
5. Bibliographie	53

Liste des illustrations

Illustration 1 : Infiltration et fonctionnement de la recharge des aquifères, sur un cycle annuel (tiré de JJ Collin, Les eaux souterraines).....	10
Illustration 2 : Schéma de la pondération de l'IDPR pour tenir compte de la topographie	11
Illustration 3 : exemple de comparaison entre cartographie a priori et après contrôles de terrain (in Fripiat et al. 2006).	14
Illustration 4 : Notation d'un paramètre en fonction de ses valeurs	17
Illustration 5 : Poids attribués à des paramètres dans l'exemple de la caractérisation de la vulnérabilité en milieu continu.....	18
Illustration 6 – MNT sur Nantes métropole (source : rapport BRGM RP-56938-FR).....	22
Illustration 7 – Pentes, exprimées en degrés	23
Illustration 8 : carte de répartition de l'IDPR sur le territoire de Nantes Métropole	24
Illustration 9 : carte des formations pédologiques (données IGCS).....	25
Illustration 10 – Carte des formations géologiques affleurantes	27
Illustration 11 – Zones hydrographiques définies par la BD Carthage (IGN)	28
Illustration 12 : profondeur de la nappe, en hautes eaux, sur le territoire de Nantes Métropole.	29
Illustration 13 : épaisseur de la ZNS, par classes	30
Illustration 14 : localisations des sols à caractère hydromorphe d'après la carte pédologique ..	32
Illustration 15 : IDPR par formations géologiques affleurantes	33
Illustration 16 : IDPR par unités fonctionnelles.....	34
Illustration 17 : Cartographie par classes de valeur d'IDPR par unité fonctionnelles	34
Illustration 18 : épaisseur de la ZNS représentée selon les 3 classes retenues pour l'analyse multicritère	36
Illustration 19 : aptitude 1 (somme non pondérée).....	37
Illustration 20 : aptitude 2 (somme pondérée).....	38
Illustration 21 : carte multicritères avec hydromorphie « réhibitoire » (somme non pondérée) 39	
Illustration 22 : carte multicritères avec hydromorphie « réhibitoire » (somme pondérée)	39
Illustration 23 : cartographie de l'aptitude à l'infiltration, sans regroupement de classes de notes	41
Illustration 24 : exemple 1 de superposition entre la carte « brute » d'aptitude et les zones humides	43
Illustration 25 : exemple 2 de superposition entre la carte « brute » d'aptitude et les zones humides	43
Illustration 26 : exemple 3 de superposition entre la carte « brute » d'aptitude et les zones humides	44

Illustration 27 : regroupement des classes 0-3, 4-6 et 7-10	45
Illustration 28 : regroupement des classes 0-4, 5-7 et 8-10	45
Illustration 29 : Secteurs à pentes topographiques supérieures à 7 %.	46
Illustration 30 : Cartographie de l'aléa lié aux argiles gonflantes (aléa faible en jaune, aléa moyen en orange).....	47
Illustration 31 : périmètres de protection	48
Illustration 32 : cartographie finalisée	50

Liste des annexes

Annexe 1 Tableau des notes résultant des analyses multicritères	55
Annexe 2 Contexte géologique du territoire de Nantes Métropole	59

1. Contextes de l'étude

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIF

Nantes Métropole souhaite disposer d'une cartographie à l'échelle de la communauté urbaine pour permettre de définir les secteurs où l'infiltration des eaux pluviales devra être privilégiée.

Par ailleurs le BRGM dispose de compétences pour évaluer et cartographier l'aptitude de sols à l'infiltration, et souhaite conforter les méthodologies correspondantes en les appliquant à des contextes variés.

Nantes Métropole et le BRGM sont donc convenus de mettre en place un partenariat afin d'aboutir à une cartographie de l'aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales.

Une étude a ainsi été engagée en 2015 afin de :

- Développer une méthodologie permettant de hiérarchiser l'aptitude à la gestion des eaux pluviales par infiltration des territoires de la communauté urbaine ;
- Proposer une cartographie de cette aptitude sur l'ensemble du territoire de la communauté urbaine (523 km²).

1.2. DEFINITIONS ET RAPPELS

1.2.1. Rappels sur les mécanismes de l'infiltration naturelle et le fonctionnement hydrologique / hydrogéologique

Les mécanismes de l'infiltration naturelle sont illustrés dans le livre « les eaux souterraines – Connaissance et gestion » (JJ Collin, BRGM éditions) et les paragraphes de rappels ci-après reprennent en partie les textes correspondants.

« Le devenir de l'eau apportée par une pluie diffère en fonction de nombreux facteurs, en particulier :

- Le volume et la durée de la précipitation,
- La saison (température, ensoleillement),
- La pente du terrain,
- La nature du terrain (sol et proche sous-sol), notamment sa perméabilité (dépendant de la taille et de la connexion des pores entre eux) ainsi que l'état de la végétation naturelle et les pratiques culturales. »

A l'échelle annuelle les volumes de précipitations se répartissent en deux ensembles : d'une part les pluies dites efficaces et d'autre part l'eau qui subit l'évapotranspiration du couvert végétal et du sol. La pluie efficace est la quantité d'eau, issue des précipitations, sujette à écoulement. Cette eau peut ruisseler en surface ou s'infiltrer en rechargeant la nappe.

Globalement, en été, l'eau des précipitations s'évapore ou, ayant humecté le sol, est reprise par la transpiration de la végétation. Elle retourne donc dans l'atmosphère par évapotranspiration.

En hiver, les températures sont basses et l'évaporation par conséquent très réduite. D'autre part le métabolisme des végétaux est très ralenti. L'eau des précipitations n'est donc pas reprise et soit ruisselle soit s'infiltre dans le sol.

L'illustration 1 ci-après illustre le devenir moyen des eaux de pluie au cours d'un cycle annuel.

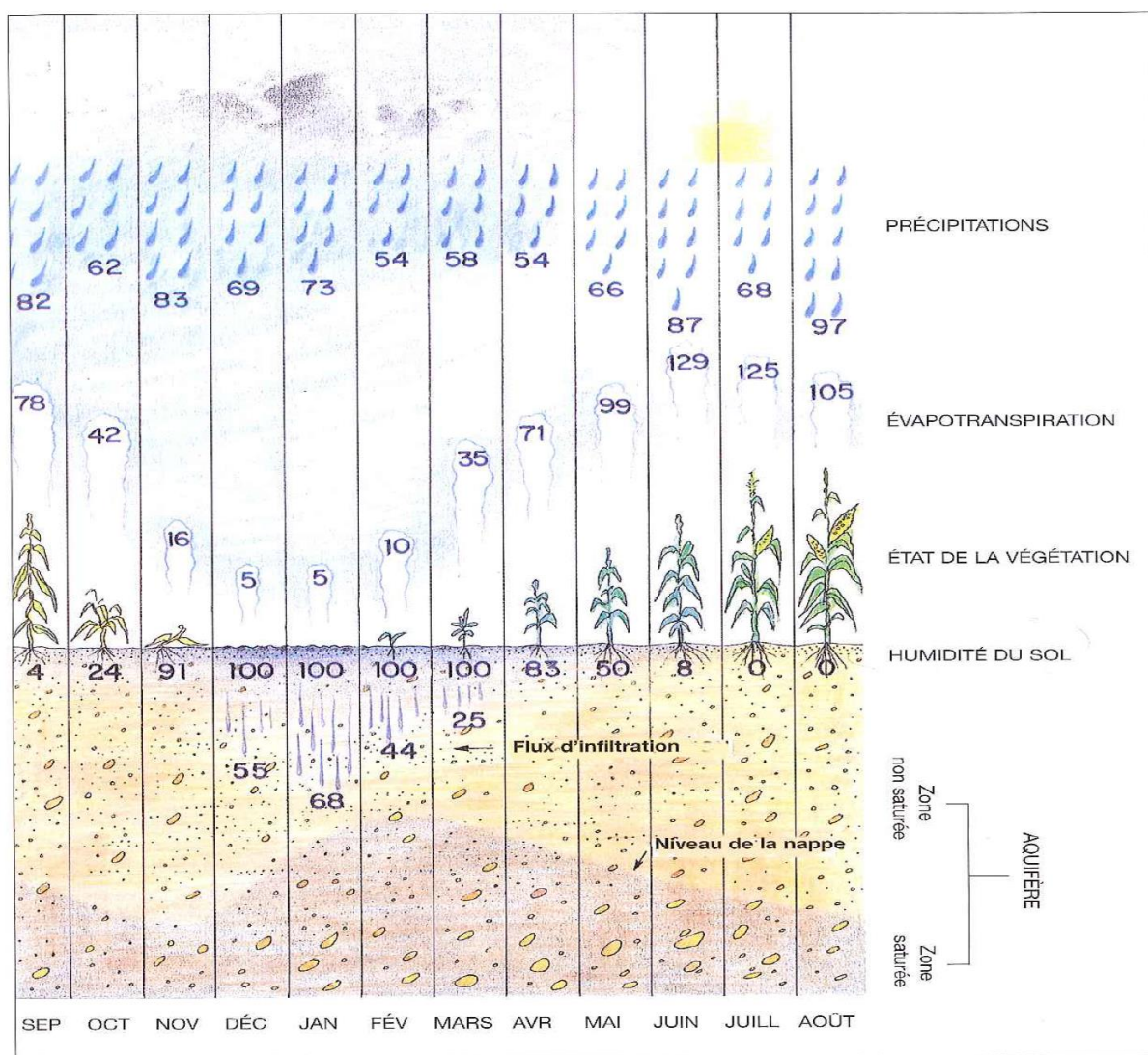


Illustration 1 : Infiltration et fonctionnement de la recharge des aquifères, sur un cycle annuel (tiré de JJ Collin, Les eaux souterraines)

Dans nos régions, sur un bilan pluviométrique annuel, l'évapotranspiration représente environ 2/3 du volume total des précipitations alors que le ruissellement et les infiltrations (les pluies efficaces) en représentent environ 1/3.

La zone non saturée (ZNS) est située entre la surface du sol et celle de la nappe. La zone saturée correspond à la partie de l'aquifère (roches pouvant contenir de l'eau souterraine) où les pores et fissures sont saturés en eau.

Du fait de son alimentation par les pluies efficaces, le niveau des nappes d'eau souterraine est variable en cours d'année et suit un cycle de recharge-décharge :

- la nappe se recharge en hiver et le niveau devient maximum (faible profondeur des eaux souterraines) en fin d'hivers/début de printemps tandis que
- la nappe se vidange à partir du printemps et en été (période d'étiage) et le niveau devient alors minimum en fin d'été, début automne.

1.2.2. Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR)

L>IDPR est un indice, calculé sur des bases morphologiques et hydrologiques (cf. rapport RP-56539-Fr), qui permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. Cette fonction d'infiltration dépend de la perméabilité verticale qui traduit la capacité d'un sol à laisser passer un fluide. Très variable, ce paramètre dépend essentiellement de la lithologie de la formation considérée.

L>IDPR compare un réseau théorique établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène au réseau mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène, il résulte du rapport, pour tout point de l'espace étudié, entre :

- La distance au plus proche cours d'eau réel,
- La distance au plus proche cours d'eau calculé.

Ces premières valeurs « brutes » de l>IDPR sont ensuite pondérées afin d'intégrer les effets liés à la topographie / aux pentes (cf. illustration 2 ci-après)

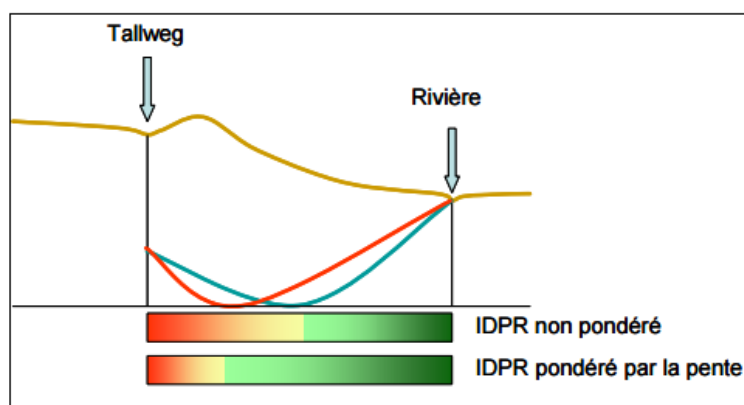


Illustration 2 : Schéma de la pondération de l'IDPR pour tenir compte de la topographie

Afin de faciliter l'interprétation et surtout d'améliorer la représentativité des résultats maillés de l>IDPR, ceux-ci sont généralement affectés à des unités fonctionnelles (petites entités cohérentes sur le plan géologique / hydrogéologique). Ces entités homogènes sont

usuellement approchées en croisant diverses couches de données, par exemple les principaux bassins versants de surface (issues de la BD Carthage), la géologie vectorisée, la pédologie...

L'IDPR est inférieur à 1000 quand le réseau théorique n'est pas repris par une rivière réelle. Ce rapport indique alors une infiltration majoritaire des eaux. Inversement, quand le réseau réel est plus dense que le réseau calculé, on est en zone de ruissellement majoritaire, l'IDPR tend vers 2000 (cf tableau 1 ci-après).



IDPR	Interprétation	
<1000	Infiltration majoritaire Par rapport au Ruissellement superficiel	Il y a non-conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés aux talwegs et les axes hydrologiques observés. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint un axe de drainage défini par l'analyse des talwegs sans que celui-ci ne se concrétise par l'apparition d'un axe hydrologique naturel. Développement d'un réseau de talweg de densité supérieure à l'expression du réseau de drainage naturel.
=1000	Infiltration et Ruissellement superficiel de même importance	Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les axes hydrologiques en place
>1000	Ruissellement superficiel Par rapport à l'infiltration vers le milieu souterrain	L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint très rapidement un axe hydrologique naturel sans que la présence de celui-ci soit directement justifiée par un talweg. Le réseau de drainage naturel est de densité supérieure à celui du réseau des talwegs.
> 2000	Majoritairement assimilable à des milieux humides	Un IDPR supérieur ou égal à 2000 traduit une stagnation permanente ou transitoire des eaux, menant à deux interprétations différentes. Quand la ZNS est faible, par exemple au niveau des cours d'eau et des zones humides, l'eau ne s'infiltre pas car le terrain est saturé. Dans le cas d'une ZNS plus importante, le refus d'infiltration semble montrer une imperméabilité des terrains naturels. On pose l'hypothèse que des valeurs d'IDPR supérieures à 2000 sont majoritairement assimilables à des milieux humides ¹ .

Tableau 1 : Interprétation générale des valeurs de l'IDPR

L'IDPR est disponible sur l'ensemble du bassin Loire-Bretagne, à une échelle de validité de 1/50 000. Les données se présentent sous la forme d'une grille de maille 50m.

1.3. LA PRISE EN COMPTE DE L'INFILTRABILITE

Une courte synthèse bibliographique a permis de faire un point sur différents modes de cartographie de l'aptitude à l'infiltration pratiqués actuellement.

1.3.1. Cartographie de l'aptitude à l'infiltration à l'échelle communale

Afin de définir l'aptitude à l'infiltration sur un territoire communal, il existe des méthodes de cartographie basées globalement sur :

- Les cartes géologiques au 1/50 000, afin de spatialiser les contours,
- Des mesures (perméabilité, ..) et / ou des investigations de terrain (fosses, forages,...)

D'autres contraintes (pentes, captages, stabilité des sols, ..) ou informations (hydrogéologie) peuvent être prises en compte.

L'attribution des classifications d'aptitude à l'infiltration se fait sur la base des interprétations à dire d'expert.

Ce mode opératoire, qui comporte des investigations de terrain, semble surtout utilisé pour de petites superficies (ex. communes de St-Hilaire du Touvet – 2013, de Thoraize - 1984,...). Il se rapproche de la méthode appelée SERP, utilisée par des bureaux d'études afin de cartographier l'aptitude potentielle à l'emploi de l'assainissement autonome, à l'échelle communale (ex. commune de St Nizier du Moucherotte – 2005). Le nom vient des critères employés lesquels concernent les Sols, l'Eau, la Roche et les Pentes :

- Sols : texture, etc.. et surtout vitesse de percolation (mesures réalisées par des tests),
- Eau : profondeur de la nappe,
- Roche : profondeur de la roche altérée ou non,
- Pentes : pente du sol.

Chaque critère d'une zone fait l'objet de notation, souvent établie par des mesures /investigations de terrain mais également interprétée à dire d'expert.

1.3.2. Cartographie sur des superficies conséquentes

En Belgique, l'étude réalisée par Fripiat et al. (2006) a retenu les six facteurs suivants pour la réalisation d'une carte d'aptitude à l'évacuation souterraine des eaux usées traitées, sur l'ensemble de la région Wallonne :

- la texture du sol. Ce paramètre a été déterminé sur la base d'une interprétation des formations géologiques et de leur cartographie ;
- la présence d'un « plancher » imperméable,
- l'épaisseur de sol non saturé. A ce sujet le rapport mentionne « Si on envisage le système d'infiltration comme traitement des eaux usées, il est nécessaire de disposer d'une épaisseur de sol non saturé en eau entre la sortie du système d'évacuation et la nappe d'au moins 100 cm afin de permettre au sol de jouer son rôle de filtre auto-épurateur (Office of Water, 2002; Grela et al., 2004). »

- la pente, en considérant 10% comme seuil limite,
- la localisation dans une zone de prévention de captage,
- la présence de phénomènes karstiques.

Ces paramètres permettent de dresser une cartographie, avec mention de zones indéterminées. Un test a été réalisé en comparant la cartographie initiale à celle corrigée à l'issue de visites de terrain réalisées par un pédologue (cf. figure ci-après extraite du rapport), et la cartographie initiale (sans travaux de terrain) apparaît satisfaisante.

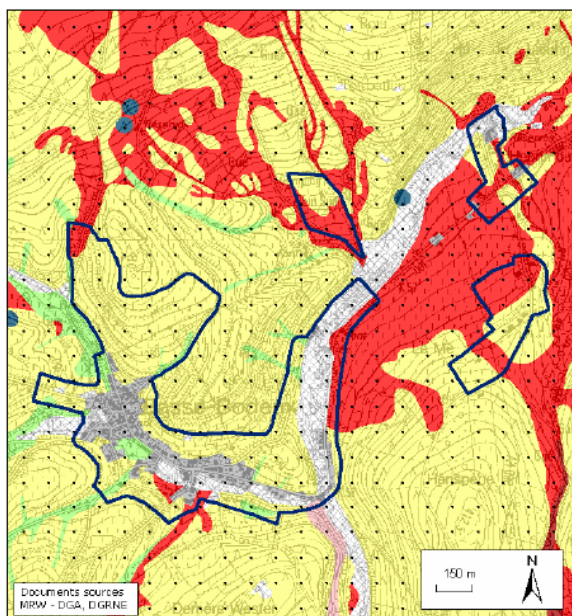


Figure 4 – Carte d'aptitude à l'évacuation souterraine des eaux usées traitées, village de Basse-Bodeux. Avant visite de terrain.



Figure 5 - Carte d'aptitude à l'évacuation souterraine des eaux usées traitées, village de Basse-Bodeux. Après visite de terrain.

Illustration 3 : exemple de comparaison entre cartographie a priori et après contrôles de terrain (in Fripiat et al. 2006).

Légende : en vert : aptitude favorable, en jaune : moyenne, en rouge : défavorable et en incolore : aptitude non déterminée.

Matrice qualitative exemple de Lille Métropole :

Une cartographie du potentiel d'infiltration, sur l'ensemble de la métropole lilloise a été établie à partir de la carte des sols et de l'épaisseur de la zone non saturée (Lille Métropole Communauté Urbaine, 2012). Une classification des sols en termes de perméabilité et une notation en fonction de la profondeur des eaux souterraines sont effectuées et une matrice d'aptitude à l'infiltration, croisant ces 2 critères, fourni la notation finale de chaque secteur. Plusieurs points clef du mode opératoire sont détaillés ci-après.

Carte des sols :

La carte des sols a été établie à partir des informations géologiques (Banque du Sous-Sol du BRGM, archives du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lille, etc.) et de données fournies par Lille Métropole. Pour chaque formation de cette cartographie un ordre

de grandeur de la perméabilité des sols a été estimé (sauf pour des formations alluviales présentant trop de variabilité). Puis une appréciation en termes de potentiel d'infiltration de la formation, selon 4 niveaux allant de favorable à défavorable (+ un « indéterminé »), a été attribuée. Le tableau 2 ci-après présente les formations, perméabilités et appréciations/notes attribuées :

FORMATIONS SUPERFICIELLES	ESTIMATION DE LA PERMÉABILITÉ	POTENTIEL D'INFILTRATION
alluvions non organiques	indéterminée	INDETERMINE
alluvions organiques	$K < 10^{-4}$ m/s	INDETERMINE
limons sableux sur sable	$10^{-8} < K < 10^{-6}$	MOYENNEMENT FAVORABLE
limons sableux sur argile	$10^{-8} < K < 10^{-6}$	MOYENNEMENT FAVORABLE
limons argileux sur sable ou argile	$10^{-9} < K < 10^{-7}$	PEU FAVORABLE
limons sableux sur craie	$10^{-8} < K < 10^{-6}$	MOYENNEMENT FAVORABLE
limons sableux sur marne et craie marneuse	$10^{-8} < K < 10^{-6}$	MOYENNEMENT FAVORABLE
sables (affleurement de substrat)	$10^{-6} < K < 10^{-3}$	FAVORABLE
argile plastique (affleurement de substrat)	$K < 10^{-9}$	DEFAVORABLE
craie (affleurement de substrat)	$10^{-7} < K < 10^{-4}$	FAVORABLE

Tableau 2 : cotation du potentiel d'infiltration des formations superficielles de Lille Métropole

Carte d'épaisseur de la ZNS :

Sur Lille Métropole, la carte d'épaisseur de la zone non saturée montre que la nappe est fréquemment proche de la surface topographique. Le potentiel d'infiltration est hiérarchisé en trois classes selon la profondeur de favorable pour une profondeur supérieure à 1m à défavorable pour une nappe affleurante (cf. tableau 3 ci-après)

PROFONDEUR DU NIVEAU SUPÉRIEUR DE LA NAPPE	POTENTIEL D'INFILTRATION
Supérieure à 1 mètre	FAVORABLE
Comprise entre 0 et 1 mètre	MOYENNEMENT FAVORABLE
Nappe affleurante	PEU FAVORABLE

Tableau 3 : cotation du potentiel d'infiltration sur Lille Métropole en fonction de la profondeur des eaux souterraines

Matrice de notation par croisement des deux critères :

La cotation finale de l'aptitude à l'infiltration est déterminée par la matrice ci-après (tableau 4) qui effectue le croisement des deux critères. Dans cette matrice, l'appréciation la plus défavorable d'un des deux critères donne la note finale (ex : défavorable par favorable donne défavorable ; moyennement favorable par peu favorable donne peu favorable).

La cartographie de cette notation finale est complétée par la représentation des contraintes complémentaires suivantes :

- Périmètre de protection d'un captage AEP,
- Périmètres des aléas mouvements de terrain liés aux cavités souterraines,
- Cimetière.

		EPAISSEUR DE LA ZONE NON SATURÉE		
		FAVORABLE	MOYENNEMENT FAVORABLE	PEU FAVORABLE
SOLS	FAVORABLE	FAVORABLE	MOYENNEMENT FAVORABLE	PEU FAVORABLE
	MOYENNEMENT FAVORABLE	MOYENNEMENT FAVORABLE	MOYENNEMENT FAVORABLE	PEU FAVORABLE
	PEU FAVORABLE	PEU FAVORABLE	PEU FAVORABLE	PEU FAVORABLE
	DEFAVORABLE	DEFAVORABLE	DEFAVORABLE	DEFAVORABLE
	INDETERMINEE	INDETERMINEE	INDETERMINEE	INDETERMINEE

Tableau 4 : Potentiel d'infiltration issu du croisement entre les sols et l'épaisseur de la ZNS

Superposition qualitative des informations : l'exemple des Hauts-de-Seine :

La cartographie de l'aptitude à l'infiltration sur le département des Hauts de Seine (cf. Guillon A. et al., 2010), a porté sur un territoire de 170 km². Dans les premiers temps, une carte multicritère « brute » a été constituée, avec comme paramètres pris en compte :

- la perméabilité du sol et du sous-sol, définie (et spatialisée) a priori à partir de la nature des formations géologiques,
- la pente du terrain, avec deux seuils fixés à 5% et 10%, une pente trop forte pouvant entraîner des exurgences à l'aval du site d'infiltration,
- la présence dans le sol ou le sous-sol de gypse,
- les risques liés à la présence d'argiles-gonflantes,
- la présence de cavités souterraines (essentiellement carrières abandonnées),
- la présence d'une nappe d'eau souterraine à faible profondeur,
- la contrainte réglementaire liée au périmètre de protection de captage d'eau potable (périmètre éloigné),
- la proximité de sites et sols pollués ou potentiellement pollués, impliquant le risque de migration des polluants dans le sol et le sous-sol.

Cette carte brute, juxtaposant les différents paramètres, s'est, d'après les auteurs, révélée satisfaisante sur le plan technique mais de lecture trop complexe pour une exploitation opérationnelle.

Une carte plus simple a donc été établie après agrégations de certains paramètres (perméabilité et profondeur de nappe par ex.), modification de certains critères (par exemple seul le seuil pentes >10% a été conservé), et masquage de paramètres « secondaires », cartographiés en arrière-plan, par les paramètres discriminants principaux, représentés au premier plan.

1.3.3. Capacité d'infiltration utilisée dans les études de vulnérabilité :

Un guide méthodologique (Délimitation des aires d'alimentation de captages d'eau souterraine et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses – Version

révisée du guide méthodologique, document BRGM/RP-63311-FR) présente un mode opératoire pour spatialiser la vulnérabilité de territoires aux pollutions diffuses, en utilisant pour le calcul une information sur la capacité d'infiltration.

Le pouvoir protecteur du sol est fonction de sa perméabilité, et de sa capacité à stocker l'eau et les fluides polluants créant ainsi un effet retard à l'infiltration ou de diffusion dans l'espace et/ou le temps, et la dégradation potentielle du contaminant. Pour l'identification de la vulnérabilité des eaux souterraines, les paramètres pris en compte dans la méthodologie proposée par le guide sont les suivants :

- Pluie efficace
- Couverture pédologique
- Capacité d'infiltration de la zone non-saturée
- Epaisseur de la zone non-saturée
- Perméabilité de l'aquifère

Capacité d'infiltration,

Pour l'évaluation de la capacité d'infiltration, la méthodologie propose, pour les aquifères homogènes (non karstiques par exemple), d'utiliser l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) (cf. définition § 1.2.2).

Epaisseur de la zone non saturée, *H*, exprimée en mètres

Dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité aux pollutions, cet indice complète l'impact de la nature des sols et des formations géologiques présentes dans la zone non saturée, en fournissant une information relative des temps de transit dans la ZNS. Ainsi, à perméabilité verticale du sol et de la ZNS équivalente, une épaisseur importante de ZNS induira une meilleure protection qu'une faible épaisseur.

Classes et cotation des différents paramètres :

Chacun des paramètres considérés fait l'objet d'une notation en fonction de classes de répartition de sa valeur. La classification des paramètres proposée par le guide pour l'IDPR et l'épaisseur de la ZNS est présentée dans le tableau ci-dessous.

Note	IDPR I	Epaisseur ZNS H (m)
4	0 – 400	<2
3	400 – 800	2 - 5
2	800 - 1200	5 - 20
1	1200 – 1600	20 - 50
0	1600 – 2000	> 50

Illustration 4 : Notation d'un paramètre en fonction de ses valeurs

Calcul de la vulnérabilité

La vulnérabilité est calculée en faisant la somme des notes des différents paramètres, chacun étant pondéré par un poids représentant l'importance du paramètre. La somme des

poids est égale à 1. Ils sont présentés sous forme de pourcentage dans le tableau ci-dessous.

Paramètre	Abrév.	Poids
Pluie efficace	P	0.10
Sol	S	0.25
Infiltration ZNS (IDPR ou autres paramètres)	I	0.30
Epaisseur ZNS	H	0.20
Perméabilité de l'aquifère	K	0.15
Total		1.00

Illustration 5 : Poids attribués à des paramètres dans l'exemple de la caractérisation de la vulnérabilité en milieu continu

En se basant sur cette pondération, la formule de calcul est la suivante :

$$\text{Vulnérabilité} = 0,1 P + 0,25 S + 0,3 I + 0,2 H + 0,15 K$$

Pour la vulnérabilité, le poids attribué à l'IDPR (0.30) est proche de celui attribué à l'épaisseur de la ZNS (0.2).

1.4. PROGRAMME DE TRAVAIL

Le programme de travail s'est organisé selon les phases suivantes :

Phase 1 : Collecte et mise en forme des données

Cette première phase vise à constituer un SIG avec les différentes informations qui seront ensuite utilisées par les analyses multicritères. Elle comprend les tâches suivantes :

- Identification des couches d'information a priori utiles à l'analyse,
- Extraction/collecte de ces couches d'information,
- Analyse et regroupement géologiques,
- Mise en forme et constitution du SIG,
- Calcul de paramètres spatialisés : carte des pentes,

Remarque : La réalisation d'une carte pédologique pour servir de référence pour la spatialisation de la nature des sols ne rentre pas dans le cadre de la présente étude.

Phase 2 : Cartographie multicritère

Une analyse multicritère est réalisée afin de permettre de hiérarchiser les secteurs du territoire d'étude. Elle comporte les étapes suivantes :

- élaboration des unités fonctionnelles
- choix des éléments de cotation des différents critères (IDPR, pentes, profondeur de la ZNS,...)
- réalisation de tests,

- réalisation d'une cartographie multicritère avec des rendus en « relatif » (plus ou moins grande aptitude à l'infiltration). Le choix du nombre de classes d'aptitude à l'infiltration est défini en concertation avec Nantes Métropole.

Remarque : Compte tenu des données utilisées, l'échelle de validité de cette cartographie multicritère est le 1/50 000 (maille de 50m).

Les travaux proposent également des éléments d'appréciation pour les secteurs non couverts par les données cartographiques de base (pointe ouest de la communauté urbaine).

Phase 3. Restitution et rapport

A l'issue de l'étude ce rapport, décrivant la méthodologie mise en œuvre et les résultats obtenus ainsi que leurs limites, est rédigé.

2. Données disponibles et mise en forme des informations

Pour mener à bien l'ensemble des tâches prévues, les principales données numériques disponibles au BRGM ou mis à disposition de ce dernier par Nantes Métropole sont les suivantes :

- Modèle Numérique de Terrain (MNT : données Nantes Métropole),
- Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR : données BRGM),
- carte géologique au 1/50 000 (données BRGM) et données pédologiques (fournies par Nantes Métropole),
- résultats de l'étude sur la profondeur des eaux souterraines sur le territoire de Nantes Métropole, (données conjointes Nantes Métropole - BRGM),

Les paragraphes ci-après présentent ces données et leurs éventuels traitements préliminaires à la phase d'analyse multicritères.

2.1. REFERENTIEL TOPOGRAPHIQUE

Afin de servir de référentiel topographique, un MNT a été fourni par Nantes Métropole. Il correspond à des données au pas de 1 m. Ce MNT très précis n'a pas été exploité étant donné la « lourdeur » des données à gérer et surtout l'échelle de validité des autres données de l'étude. C'est *in fine* l'utilisation du MNT au pas de 20 m (données Nantes Métropole, avec la mention 2005) qui a été choisie. L'illustration 6 ci-après présente une restitution de ce MNT.

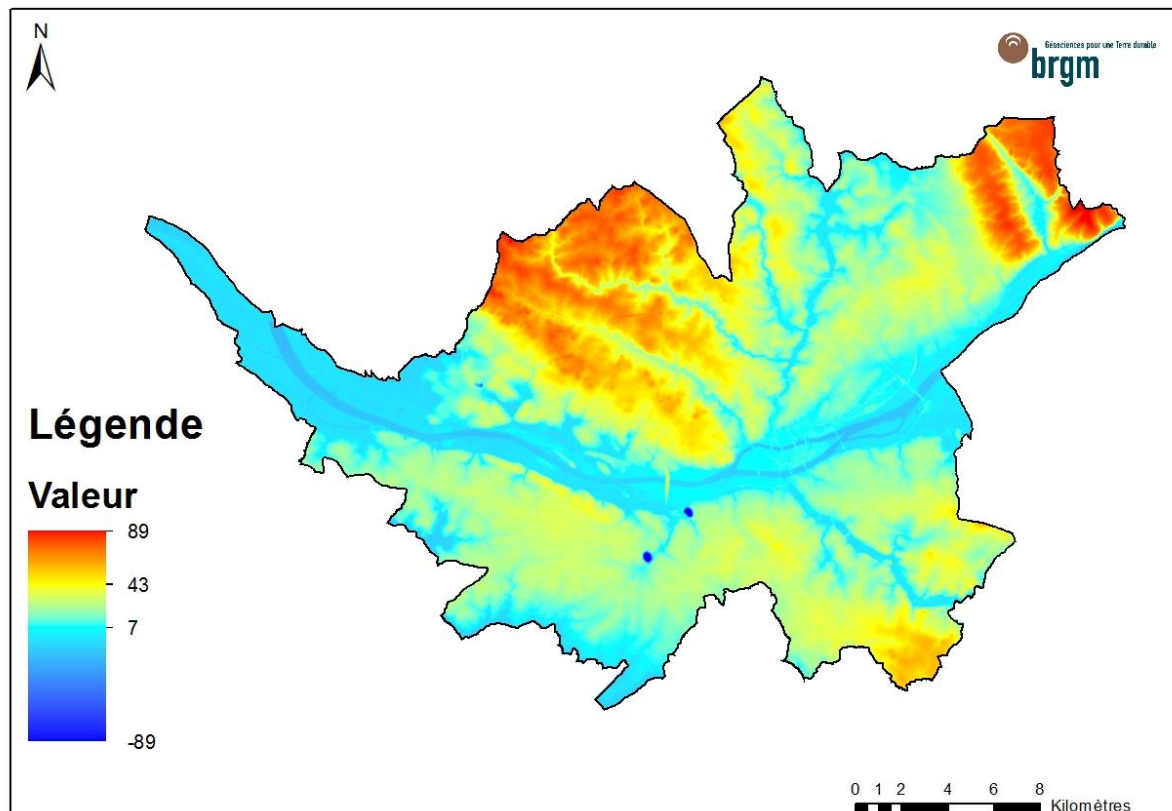


Illustration 6 – MNT sur Nantes métropole (source : rapport BRGM RP-56938-FR)

Comme les pentes topographiques constituent un paramètre intervenant dans l'infiltration et/ou sur le caractère favorable du territoire à la mise en place de dispositifs d'infiltration, ces données de MNT ont fait l'objet d'un traitement afin de permettre de réaliser une carte des pentes.

Ces dernières ont donc été calculées point par point (à partir d'une grille de 20m) grâce aux outils d'interpolation d'ArcGIS.

L'illustration 7 ci-après présente la carte des pentes exprimées en degré, en échelle de couleur (le pôle de couleurs rouges représentent les pentes élevées et le bleu foncé le pôle proche ou égal à l'horizontale).

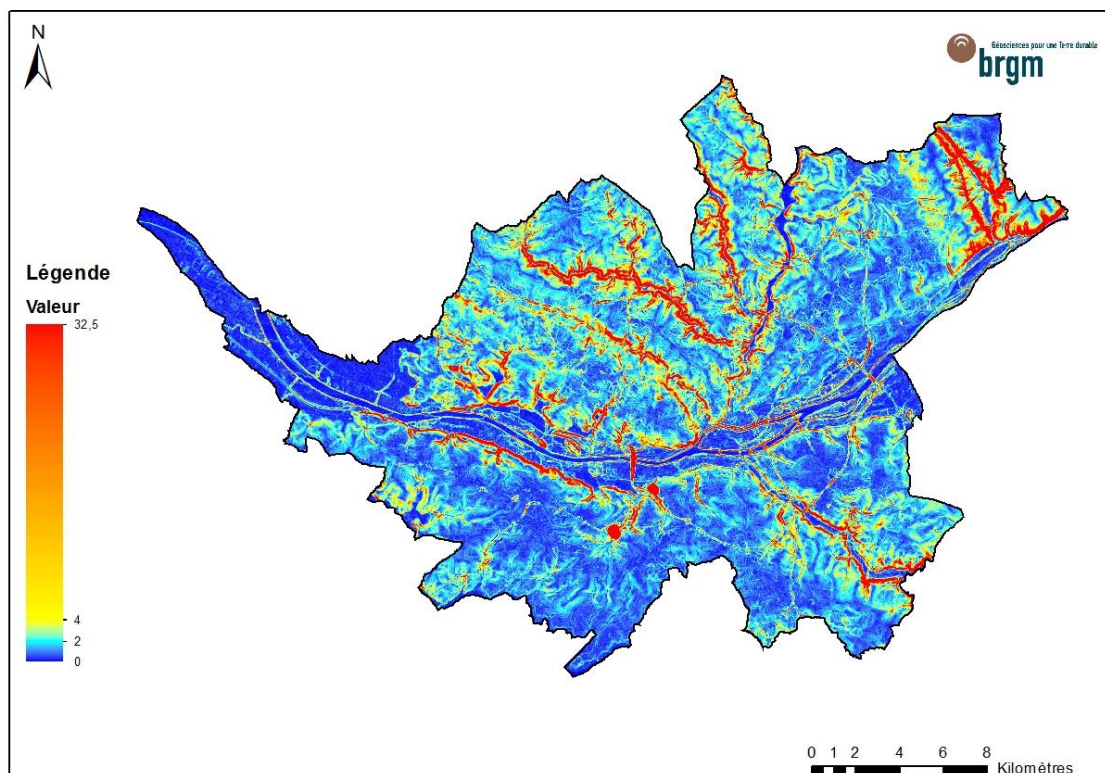


Illustration 7 – Pentes, exprimées en degrés

2.2. INDICE DE DEVELOPPEMENT ET DE PERSISTANCE DES RESEAUX (IDPR)

L'IDPR, défini au paragraphe 1.2.2, est disponible sur l'ensemble du bassin Loire-Bretagne, à une échelle de validité de 1/ 50 000. Les données se présentent sous la forme d'une grille de maille 50m. Les valeurs correspondant au territoire de Nantes Métropole ont été extraites et mises en forme.

L'illustration 10 ci-après présente la cartographie de l'IDPR sur le territoire de Nantes Métropole. Les valeurs ponctuelles se révèlent assez étalées et couvrent la gamme allant de 0 (pôle infiltrant, cf tableau 1) à 2000 (pôle ruisselant). A ce stade il est néanmoins trop tôt pour pouvoir en dégager une interprétation car, pour celle-ci, il est nécessaire de calculer la moyenne de l'IDPR par unité homogène.

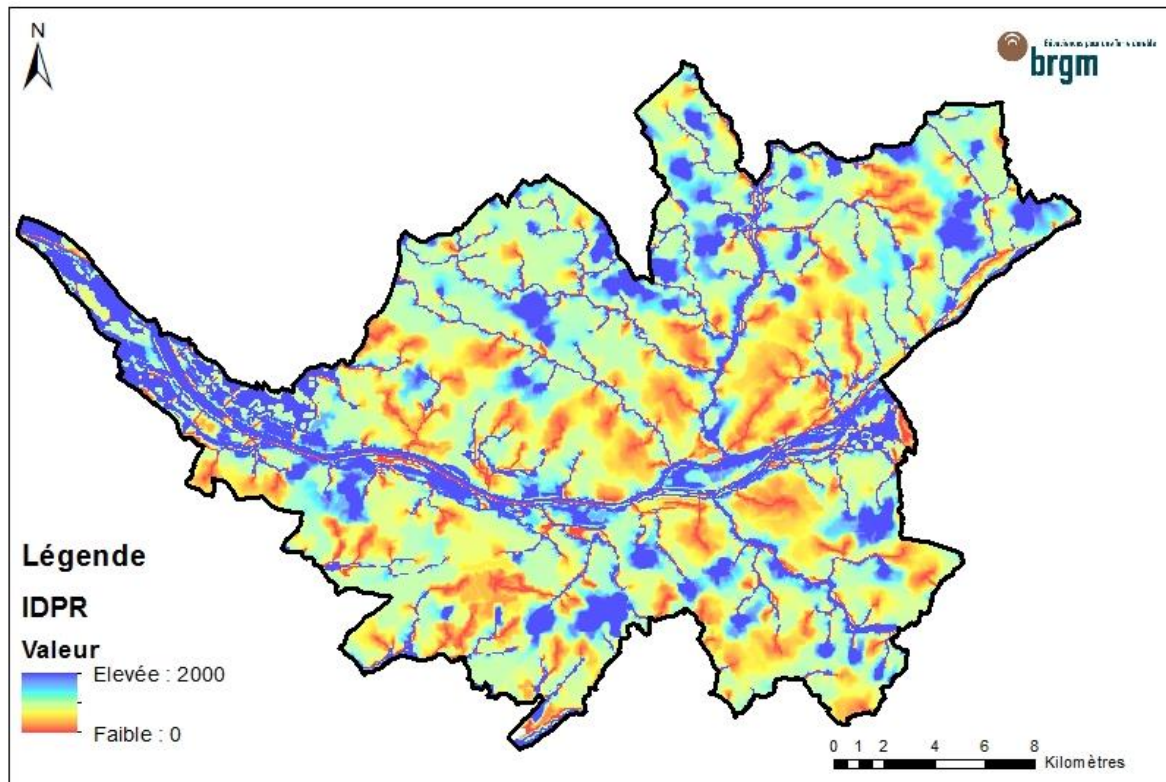


Illustration 8 : carte de répartition de l'IDPR sur le territoire de Nantes Métropole

2.3. CARTES PEDOLOGIQUE ET GEOLOGIQUE

2.3.1. Carte pédologique

Nantes Métropole a transmis au BRGM une carte pédologique de son territoire. Cette carte correspond à un extrait de la base de données pédologique régionale, réalisée dans le cadre du programme IGCS (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols)

Une représentation de cette cartographie est présentée illustration 11.

Dans cette cartographie, une part significative du territoire, qui correspond à des secteurs fortement anthropisés, est figurée sous la mention « zone urbanisée », sans distinction de caractères pédologiques.

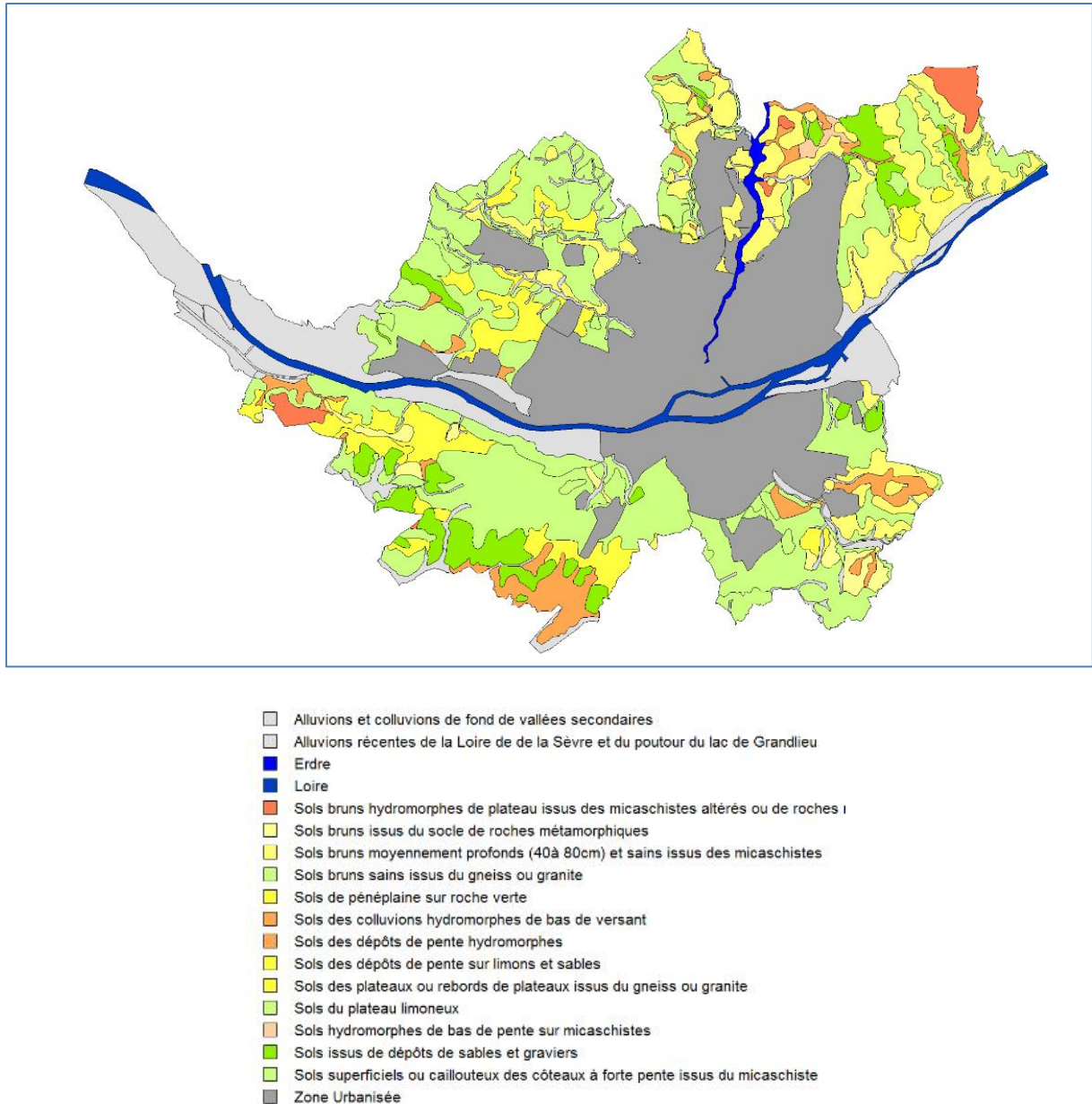


Illustration 9 : carte des formations pédologiques (données IGCS)

2.3.2. Carte géologique

Le contexte géologique du territoire de Nantes Métropole est rappelé en annexe (cf Annexe 2).

La carte géologique au 1/50 000 harmonisée du département de Loire Atlantique a été utilisée comme base cartographique. Les contours des formations présentes sur le territoire de Nantes métropole ont été extraits de cette carte départementale.

Puis une carte de synthèse des formations géologiques affleurantes a été réalisée dans le cadre de la présente étude. Cette synthèse a été effectuée :

- d'une part par regroupement d'un ensemble de formations géologiques sur la base de leur lithologie et
- d'autre part, pour les formations superficielles, par l'intégration d'informations complémentaires (nature, etc.) provenant notamment de l'étude sur le potentiel géothermique sur Nantes Métropole (rapport BRGM/RP- 56333 – FR) et de la carte des formations argileuses réalisée dans le cadre de la cartographie de l'aléa retrait-gonflement (rapport BRGM/RP-56818-FR).

A l'issue de ces travaux, la synthèse géologique permet d'aboutir à un total de 22 formations distinctes sur l'ensemble du territoire de Nantes Métropole. Ces formations sont listées dans le tableau ci-dessous, lequel présente également la superficie totale de chacune d'elles. En termes de cartographie, ces 22 formations se subdivisent en 1001 polygones.

La cartographie de ces différentes formations géologiques affleurantes est présentée ci-après, illustration 12.

ID	Description	Surface (km2)
1	Remblais anthropiques	11,9
2	Alluvions actuelles et récentes	97,7
3	Dépôts vaseux et tourbes	2,3
4	Alluvions anciennes	17,7
5	Dépôts complexes des plateaux	6,1
6	Colluvions de pente et de fond de vallon	26,2
7	Colluvions indifférenciées	1,5
8	Sables et graviers d'âge éocène et plio-quaternaire	1,0
9	Sables et marnes sableuses du Miocène moyen au Pliocène	43,9
10	Argiles d'âge éocène à pliocène	0,3
11	Altérites indifférenciées du socle proterozoïque et paléozoïque	3,2
12	Micaschistes altérés (kaolinisés) du Protéro-Paléozoïque	102,9
13	Micaschistes	79,6
14	Granites et gneiss altérés du Paléozoïque	7,1
15	Granites et gneiss altérés (kaolinisés) du Paléozoïque	56,7
16	Granites et grano-diorites	25,7
17	Gneiss et leptynites	21,3
18	Amphibolites et gabbros altérés du Paléozoïque	15,0
19	Amphibolites	6,0
20	Peridotites et serpentinites altérés du Paléozoïque	0,1
21	Mylonites	7,4
22	Corneenne	0,1

Tableau 5 : Liste des regroupements par lithologie

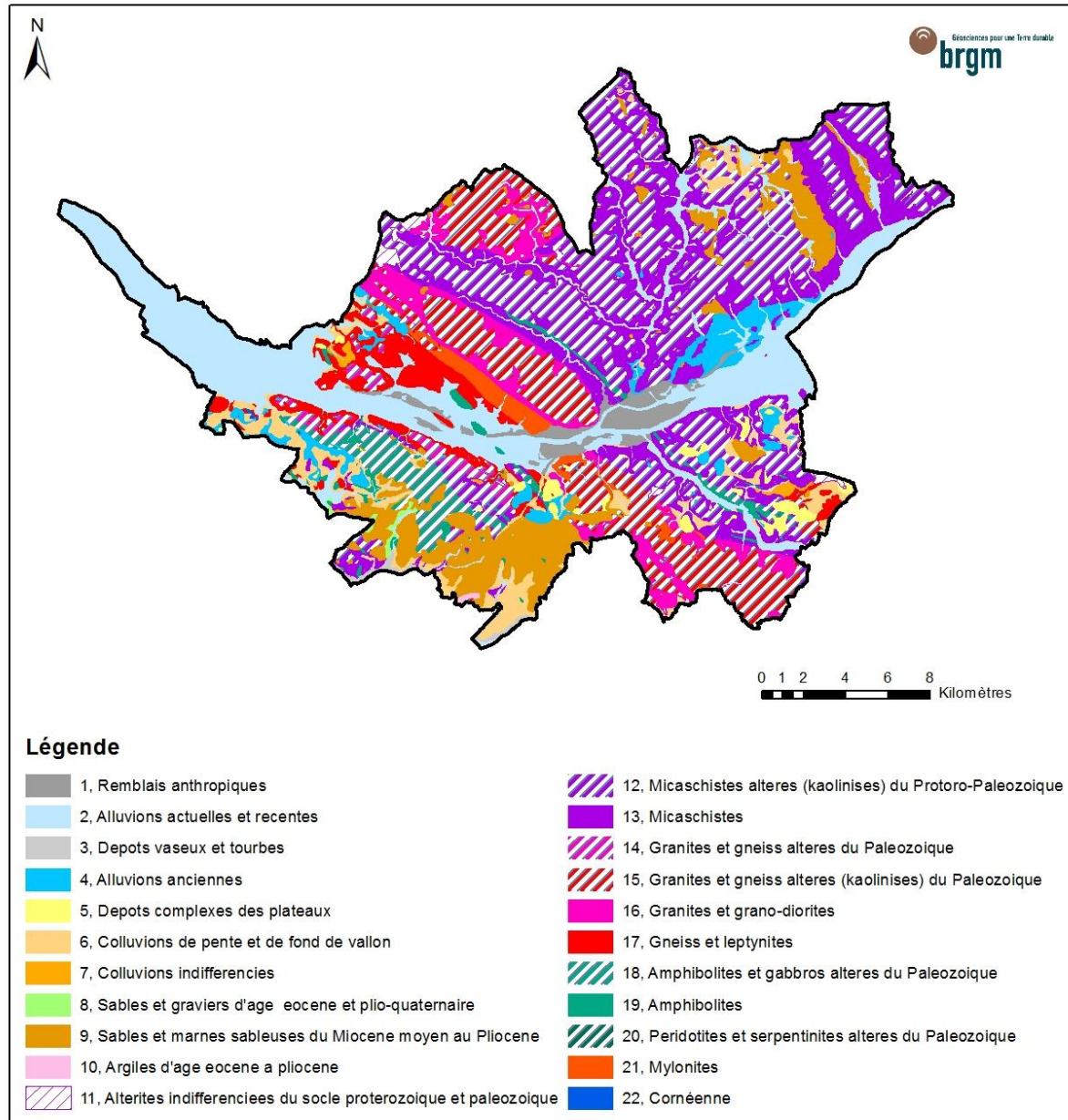


Illustration 10 – Carte des formations géologiques affleurantes

2.4. ZONES HYDROGRAPHIQUES

Plusieurs options étaient envisageables pour définir un découpage en zones hydrographiques :

- Une délimitation de bassins versants et sous bassins versants à partir d'un traitement de la topographie. Pour ce faire l'utilisation du MNT est alors nécessaire. Toutefois cette option s'est révélée confrontée à plusieurs difficultés : lourdeur du MNT, complexité de la réalisation d'un maillage de polygones couvrant l'intégralité du territoire, échelle trop fine, etc.

- Une utilisation des bassins versants hydrographiques définis dans la BD Carthage (IGN). Cela présente l'avantage d'une couverture de tout le territoire, avec une échelle de validité de l'information au 1/50 000, cohérente avec les autres sources d'information.

C'est cette dernière option qui a été retenue.

La cartographie correspondante est présentée illustration 14 ci-après. Le territoire de Nantes Métropole est, au total, concerné par 13 zones hydrographiques.

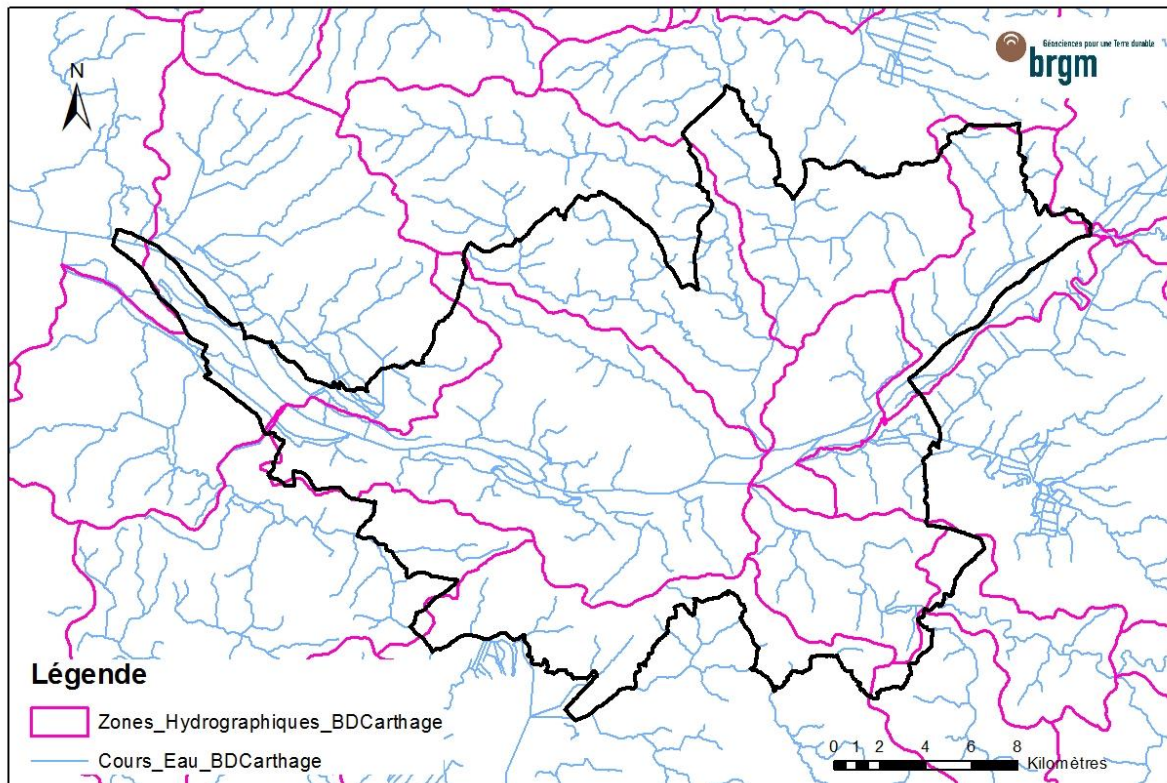


Illustration 11 – Zones hydrographiques définies par la BD Carthage (IGN)

2.5. EPAISSEUR DE LA ZONE NON SATURÉE (ZNS)

L'information cartographique sur l'épaisseur de la zone non saturée utilisée dans la présente étude provient des travaux réalisés en 2008 en partenariat BRGM-Nantes Métropole : « Profondeur des eaux souterraines sur le territoire de Nantes Métropole » (rapport RP-56938-FR, Conil et al., 2008).

Comme il s'agissait d'obtenir des informations sur la profondeur à partir de laquelle des travaux sont susceptibles de rencontrer des eaux souterraines, l'étude de 2008 portait sur l'identification du niveau « haut » des nappes.

Dans le cadre de la présente étude, la piézométrie en hautes eaux est exactement l'information recherchée, puisqu'elle permet de prendre en compte l'épaisseur réellement utile de la ZNS en vue de l'infiltration.

Comme les profondeurs calculées en 2008 proviennent de valeurs mesurées lors d'une période de hautes eaux conforme aux moyennes historiques (cf. rapport RP 56938-FRF), l'information est tout à fait pertinente.

En accord avec Nantes Métropole, les travaux de 2008 correspondaient à environ 510 km² et concernaient l'ensemble du territoire de la communauté urbaine à l'exception de son extrémité ouest. Le niveau des eaux souterraines dans l'extrémité ouest a donc été extrapolé en fonction de la topographie et de l'hydrographie.

La profondeur à laquelle se trouve le sommet de la nappe (en hautes eaux), autrement dit l'épaisseur de la zone non saturée, est présentée illustration 15. Elle varie entre 0.00 et 30.00 m. L'illustration 16 présente cette même épaisseur de la ZNS mais après répartition selon 3 classes d'épaisseur : 0 à 2 m, 2 à 5 m et plus de 5 m.

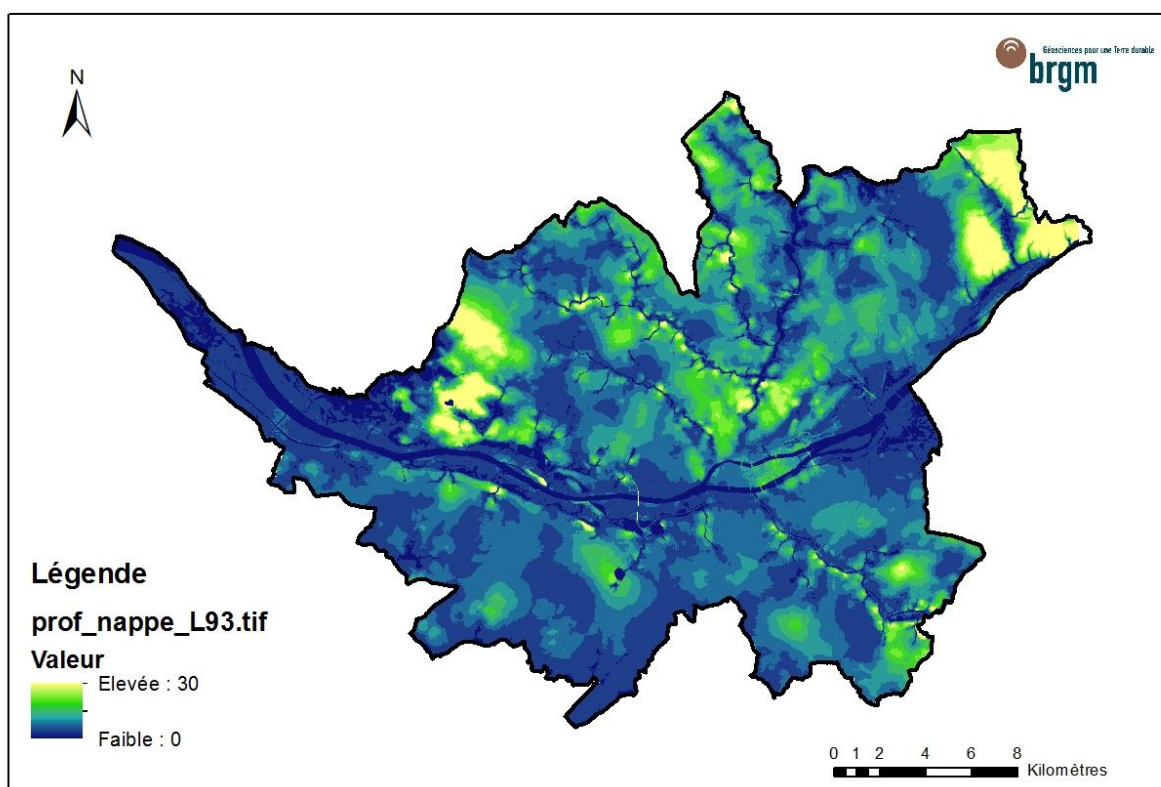


Illustration 12 : profondeur de la nappe, en hautes eaux, sur le territoire de Nantes Métropole.

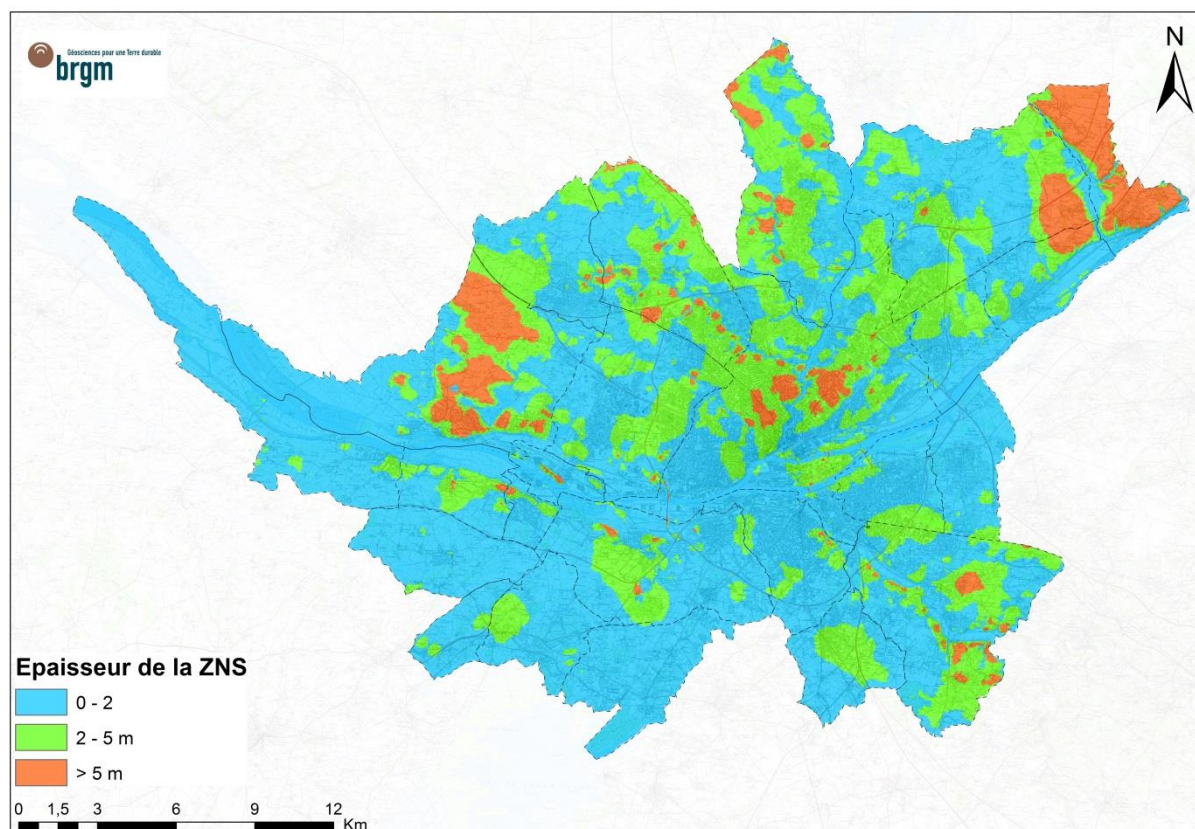


Illustration 13 : épaisseur de la ZNS, par classes

3. Analyses multicritères et hiérarchisation

3.1. CALCUL DE L'IDPR PAR UNITES FONCTIONELLES

Afin de représenter leur caractère ruisselant ou infiltrant, l'IDPR corrigé peut être affecté à des unités spatiales homogènes, de référence.

3.1.1. Choix de la cartographie de référence pour les unités fonctionnelles

Dans le cas de la carte pédologique IGCS, une partie significative du territoire de Nantes Métropole, urbanisée, ne dispose pas de descriptif de sols.

D'autre part, la réalisation de cette cartographie pédologique utilise des données de la carte géologique au 1/50 000 (complétées bien sûr par un ensemble de travaux). Elle intègre dans ses classifications de contour des critères liés aux pentes, alors que les pentes sont déjà prises en compte dans l'IDPR. Enfin, elle a une validité d'échelle de 1/250 000.

Compte tenu de cela, il a été préféré dans le cadre de la présente étude d'utiliser en référentiel la carte géologique des formations affleurantes.

Toutefois, l'information pédologique sur la présence de sols hydromorphes (sol hydromorphe : « sol qui s'est formé dans une zone saturée d'eau de façon permanente ou périodique » selon la définition du dictionnaire de géologie) est importante dans le cadre de la présente étude. Les polygones de la carte pédologique correspondant aux sols présentant un caractère hydromorphe ont donc été extraits et agrégés, afin de pouvoir utiliser ultérieurement ce paramètre lors de l'analyse multi-critères. La localisation de ces sols est présentée illustration 14 ci-après.

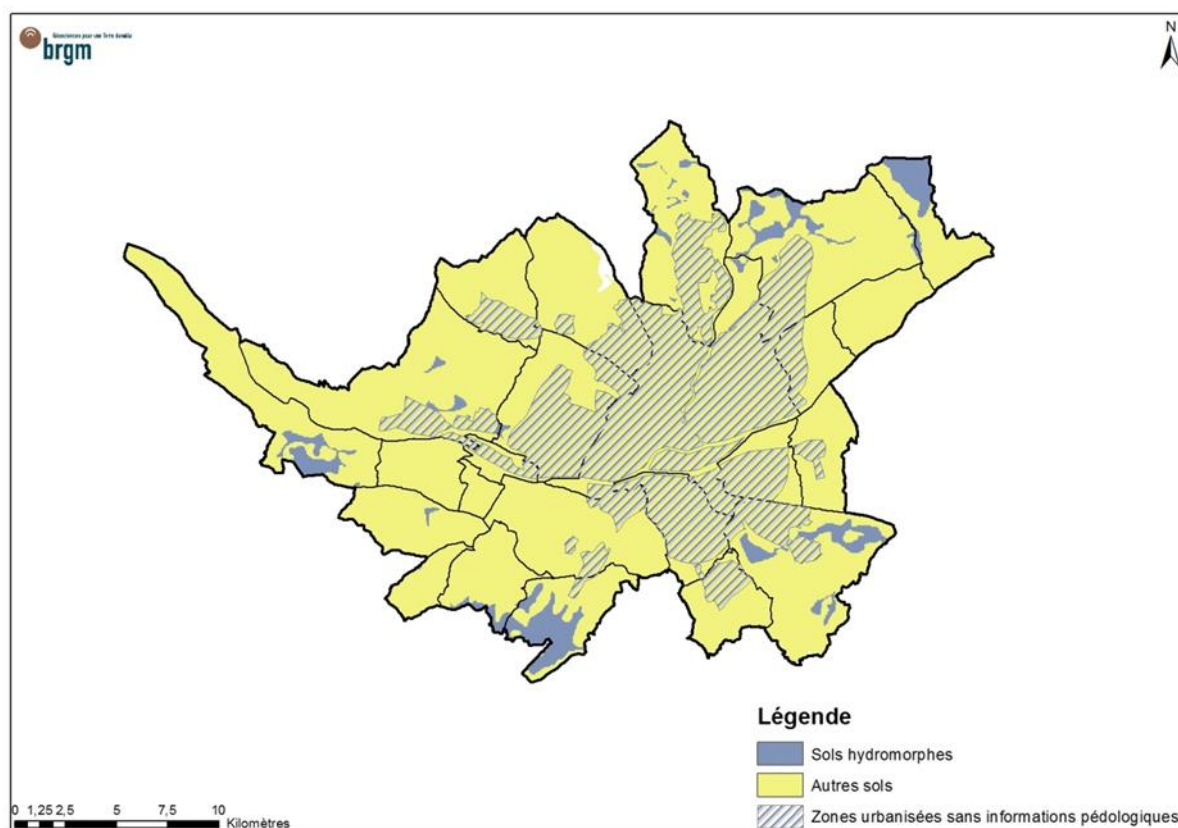


Illustration 14 : localisations des sols à caractère hydromorphe d'après la carte pédologique

3.1.2. Cartographie de l'IDPR

En calculant la moyenne de l'IDPR pour les différents polygones correspondant aux formations géologiques affleurantes, une appréciation de leur caractéristique intrinsèque est attendue. Le résultat de ce calcul est présenté sur la carte suivante.

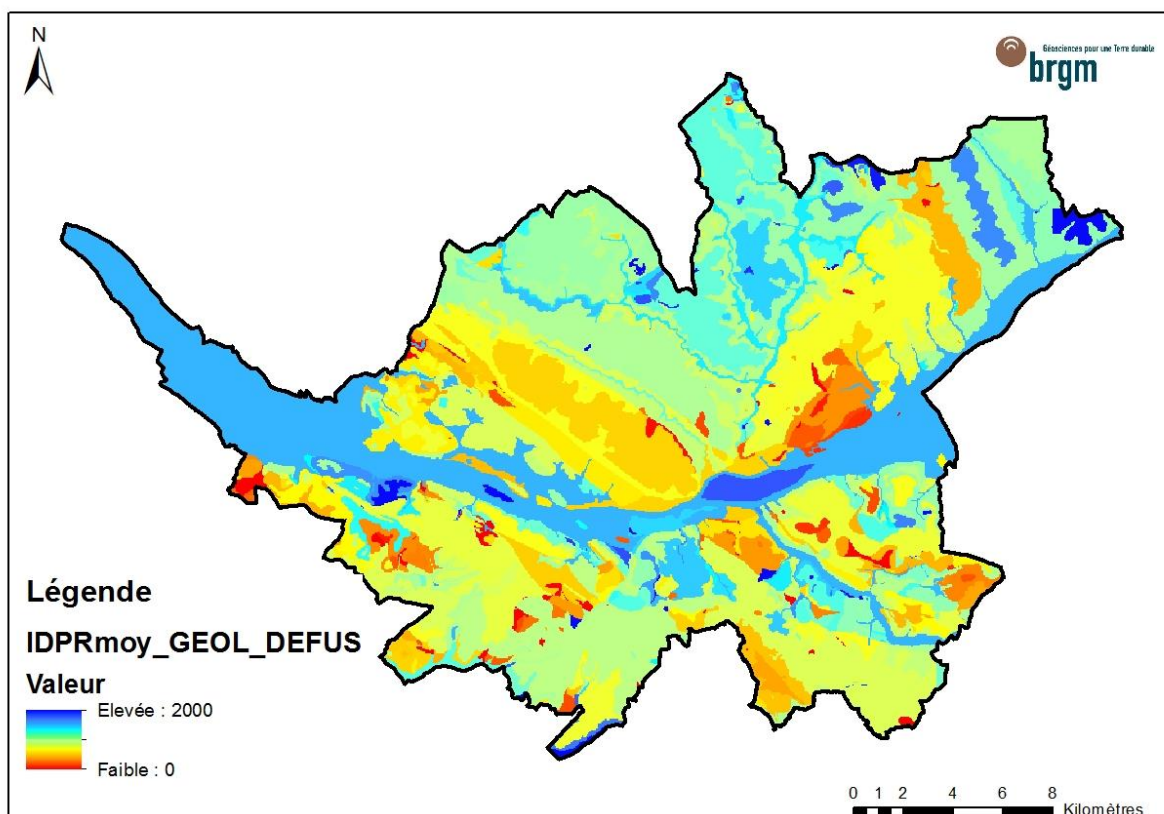


Illustration 15 : IDPR par formations géologiques affleurantes

Comme des formations géologiques peuvent se répartir sur plusieurs bassins versants, le même traitement a été réalisé après croisement des formations géologiques avec les subdivisions hydrologiques décrites au paragraphe 2.4. Le résultat de l'union entre les formations géologiques et les subdivisions hydrogéologiques forment des « unités fonctionnelles », composées de 1405 polygones. L'intérêt de calculer un IDPR moyen par unité fonctionnelle est d'affecter cette valeur d'IDPR à des entités qui sont censées avoir une réponse homogène en termes d'infiltration.

Cela permet ainsi de calculer un IDPR moyen par portion de formation affleurante de chaque bassin versant.

La cartographie correspondante est présentée en illustration 16 (représentation en échelle continue de valeurs) et illustration 17 (représentation selon 5 classes de valeurs) ci-après.

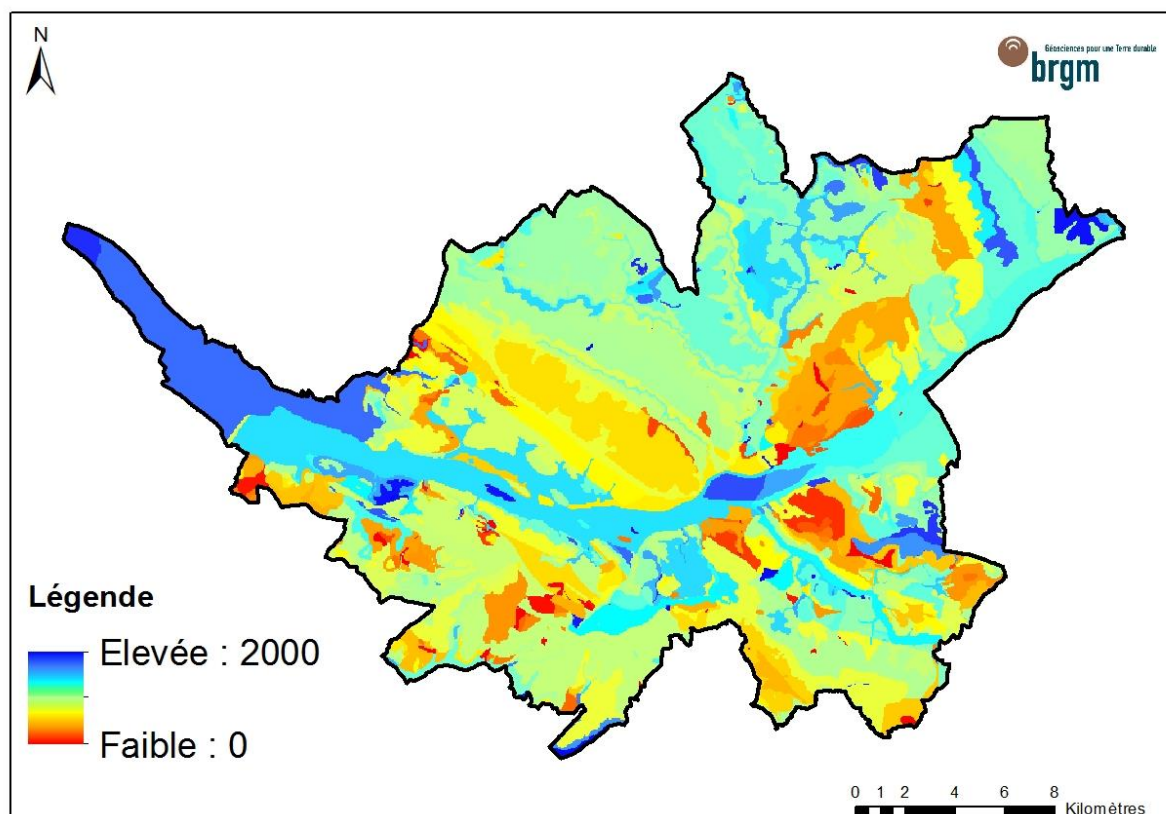


Illustration 16 : IDPR par unités fonctionnelles

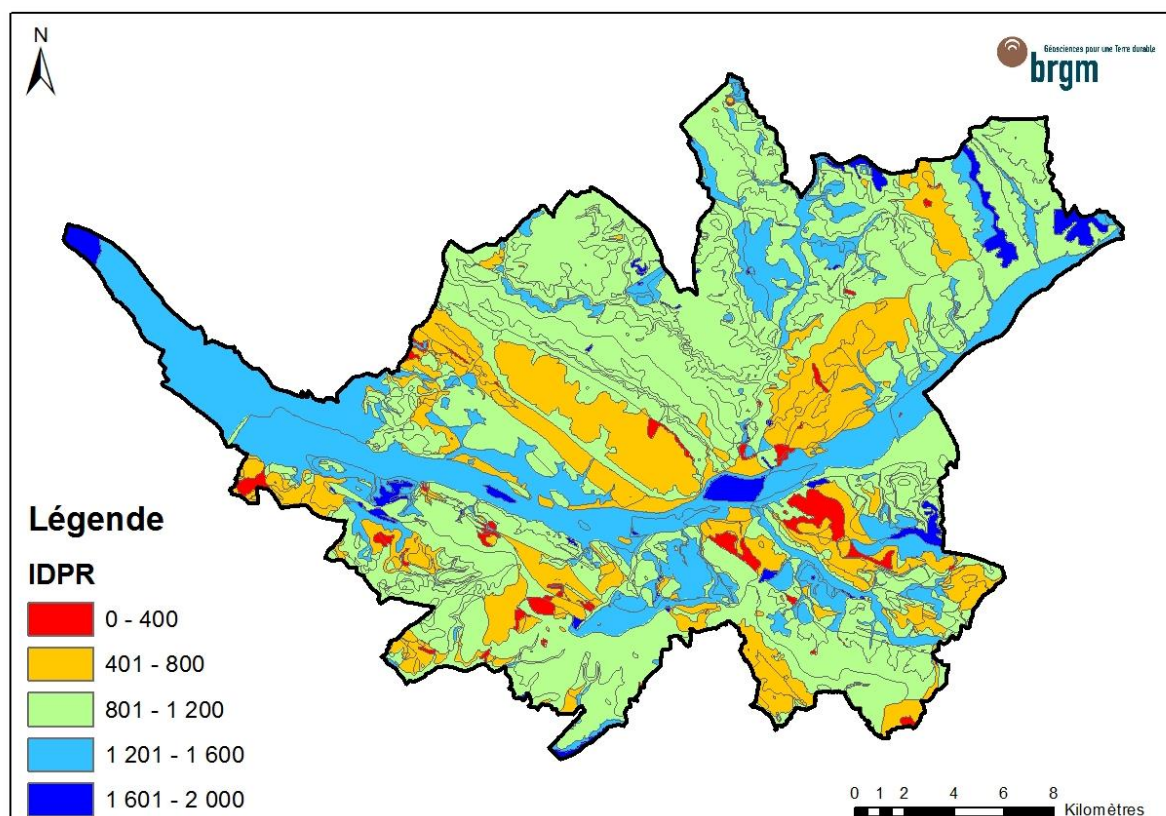


Illustration 17 : Cartographie par classes de valeur d'IDPR par unité fonctionnelles

3.2. CROISEMENT DES DONNEES

Les données retenues pour l'analyse multicritère sont :

- L'IDPR, calculé par zones homogènes (cf. § 3.1, illustration 17)
- L'épaisseur de la ZNS,
- Les sols à caractère hydromorphe de la carte pédologique.

L'influence de la topographie étant déjà utilisée pour pondérer l'IDPR, elle n'a pas été employée dans le croisement de données destiné à évaluer l'aptitude à l'infiltration, afin de ne pas être « comptabilisée » deux fois. Néanmoins les délimitations des secteurs à pentes importantes sont proposées comme couche d'information complémentaire, en vue d'établir d'éventuelles recommandations (cf. chapitre 3.4).

Afin de permettre le croisement des deux informations spatialisées, IDPR et ZNS, une notation de ces dernières selon 5 classes, allant de la note 1 (défavorable) à 5 (très favorable), a été effectuée.

Les bornes proposées pour les 5 classes de l'IDPR (de 2000 à 1600, de 1600 à 1200, de 1200 à 800, de 800 à 400 et inférieure à 400) sont celles utilisées dans le guide méthodologique d'évaluation de la vulnérabilité (BRGM/RP-63311-FR) et rappelées en illustration 4.

Pour l'épaisseur de la zone non saturée, et après concertation avec Nantes Métropole, il a été considéré qu'une nappe quasi affleurante est un facteur défavorable mais que, à partir d'un mètre de profondeur, la présence d'une nappe ne gênait guère la mise en place de dispositifs d'infiltration superficiels (noues, etc.). Il est donc proposé que la classe la plus défavorable aille jusqu'à 1m (entre 0 et 1m). (Ce choix est différent de celui de Lille Métropole qui est dans un contexte hydrogéologique très particulier). Les autres classes d'épaisseur de la zone non saturée sont : de 1 à 2m (moyen) et supérieure à 2m (favorable). La carte de l'illustration 18 présente l'épaisseur de la ZNS selon les trois classes retenues.

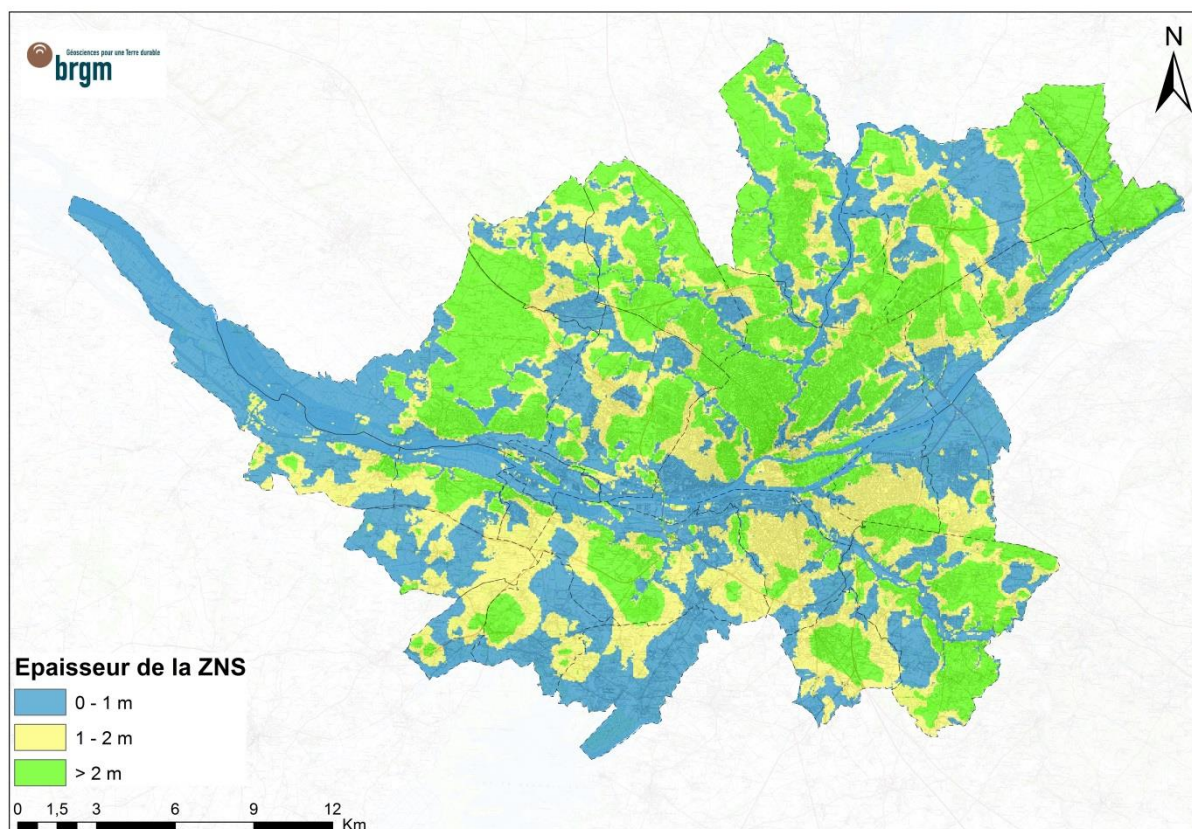


Illustration 18 : épaisseur de la ZNS représentée selon les 3 classes retenues pour l'analyse multicritère

Le tableau ci-après présente les notes et les bornes de valeurs correspondant aux deux paramètres.

	Classes	IDPR	ZNS
Défavorable à Favorable	1	1600-2000	0 à 1 m
	2	1200-1600	
	3	800-1200	1 à 2 m
	4	400-800	
	5	<400	>2 m

Tableau 6 : Classes de notation proposées

Le caractère hydromorphe des sols représentés par la carte pédologique a été pris en compte de deux manières distinctes : en effet les partenaires souhaitaient pouvoir comparer les cartographies obtenues en considérant :

- soit l'hydromorphie des sols comme un critère négatif, mais non rédhibitoire (possibilité d'envisager une infiltration si les autres critères aboutissent à une note favorable)
- soit comme un critère d'exclusion (classement automatique de tous les sols à caractère hydromorphe en « très défavorable »)

La prise en compte de ces deux cas est décrite dans les paragraphes 3.2.1 et 3.2.2 ci-après

3.2.1. Analyse avec l'hydromorphie considérée comme non rédhibitoire

Ce premier cas a été réalisé en apportant une correction à la note obtenue: cette correction vaut -2 lorsqu'un sol est hydromorphe et est nulle si non.

Dans un premier temps, la cotation de l'aptitude à l'infiltration a été déterminée par la somme des notes IDPR corrigé et ZNS, non pondérées (un « poids » similaire a été attribué à chacun des 2 facteurs) :

$$\text{Aptitude1} = \text{IDPRc} + \text{ZNS}$$

Du fait des classes sélectionnées, les notes d'aptitude s'échelonnent de 2 à 10 (9 classes). La carte correspondante est présentée illustration 19. En tenant compte de la correction pour « hydromorphie », les notes peuvent s'échelonner entre 0 et 10 (En pratique entre 1 et 10, aucune configuration ne conduisant à la note 0).

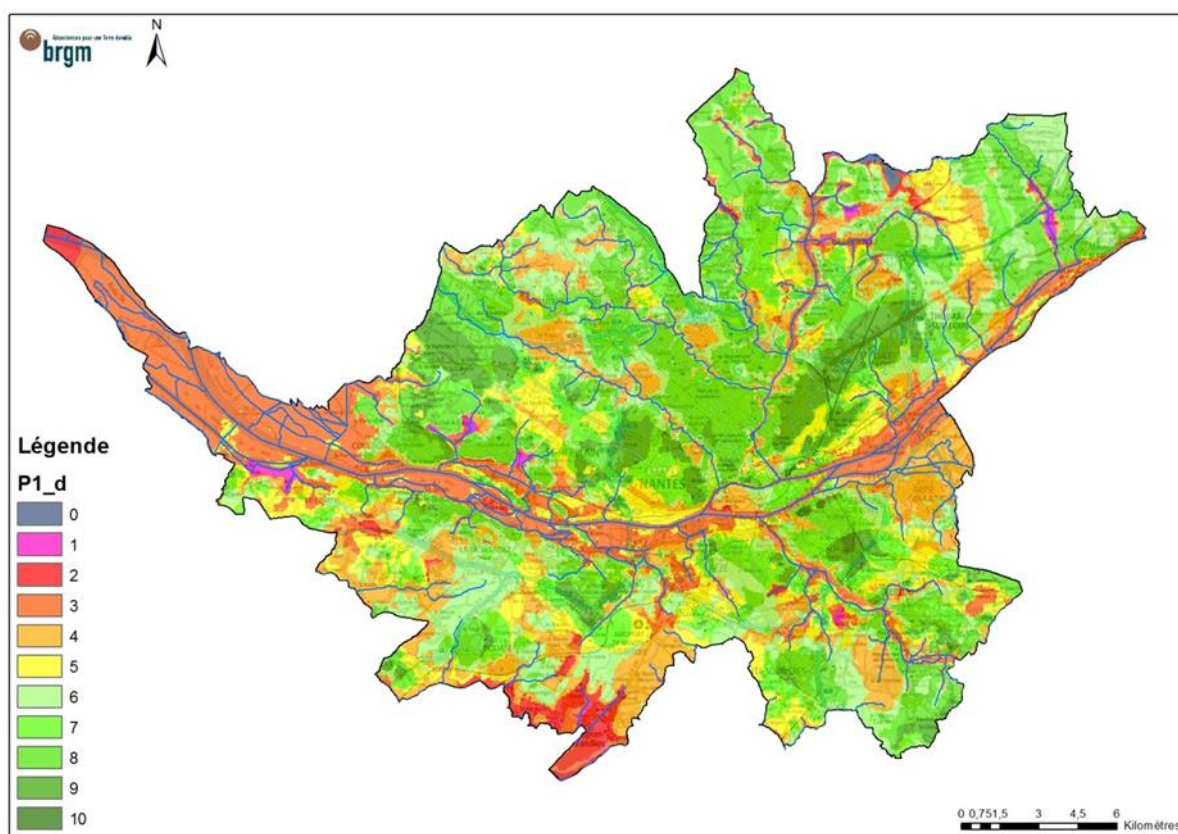
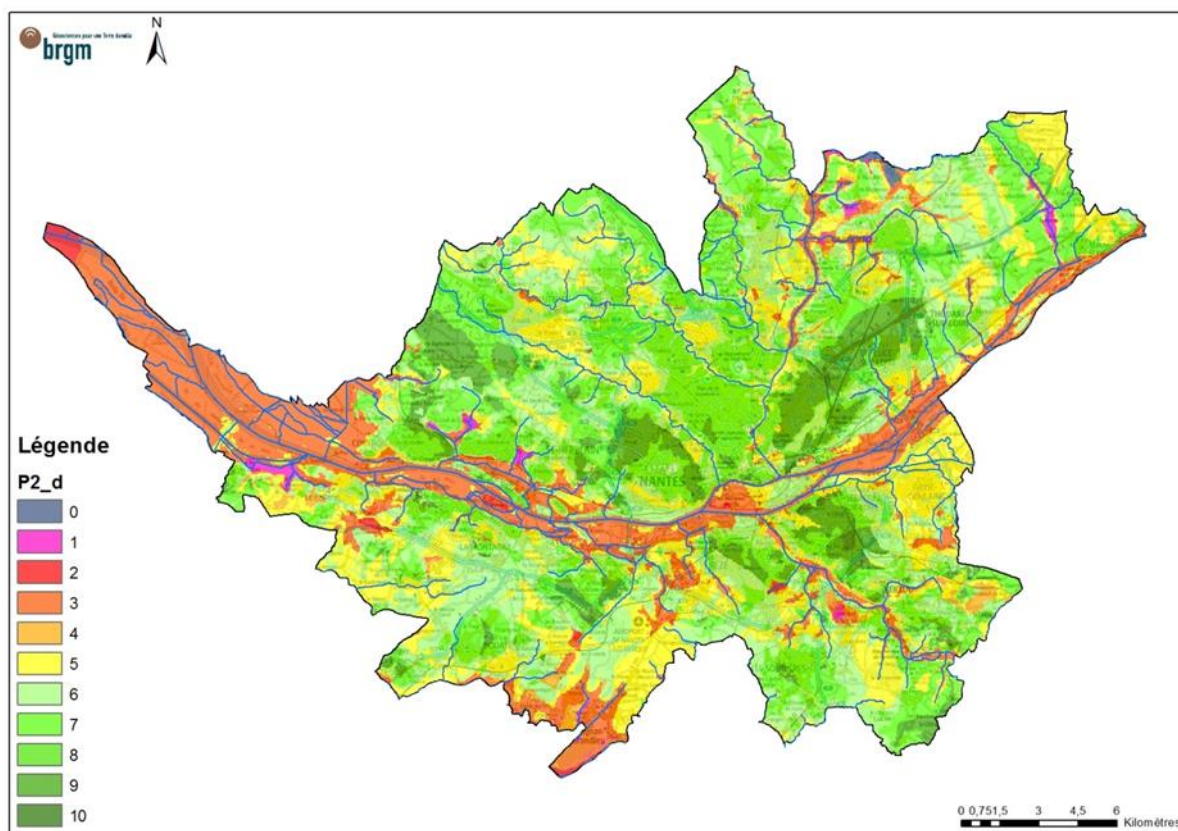


Illustration 19 : aptitude 1 (somme non pondérée)

Dans un deuxième temps, comme il ressortait des discussions avec Nantes Métropole que, pour le territoire et en terme d'aptitude à la mise en place de dispositifs d'infiltration, la perméabilité des sols a une importance supérieure à la profondeur des eaux souterraines, une cotation de l'aptitude à l'infiltration en considérant un poids double au paramètre IDPR par rapport au paramètre ZNS a été effectué. Un coefficient multiplicatif a par ailleurs été rajouté afin de ramener les notes d'aptitude entre 2 et 10 et permettre ainsi la comparaison avec l'aptitude1.

$$\text{Aptitude2} = (2 \cdot \text{IDPRc} + \text{ZNS}) \cdot 10/15$$

La carte correspondante est présentée illustration 20.



3.2.2. Analyse avec l'hydromorphie considérée comme rédhibitoire

Cette deuxième catégorie a été réalisée en apportant une correction à la note obtenue : lorsque le sol présente un caractère hydromorphe (selon la carte pédologique § 2.3.3) la note attribuée au polygone correspondant est automatiquement de 1 (aptitude la plus défavorable). Les notes s'échelonnent donc entre 1 et 10.

Ce mode opératoire a été appliqué selon les deux évaluations d'aptitude présentées ci-dessus (somme et somme pondérée). Cela permet d'aboutir aux deux cartographies (illustrations 21 et 22) présentées ci-après :

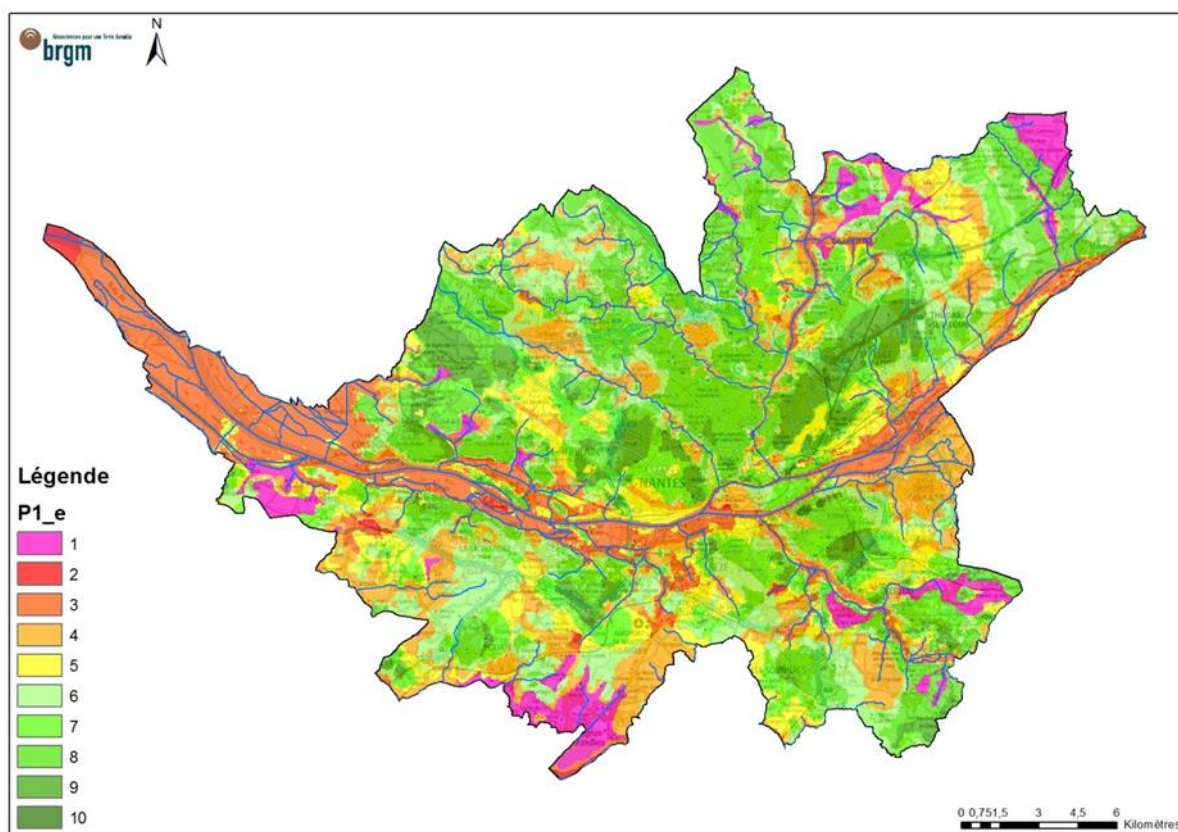


Illustration 21 : carte multicritères avec hydromorphie « rédhibitoire » (somme non pondérée)

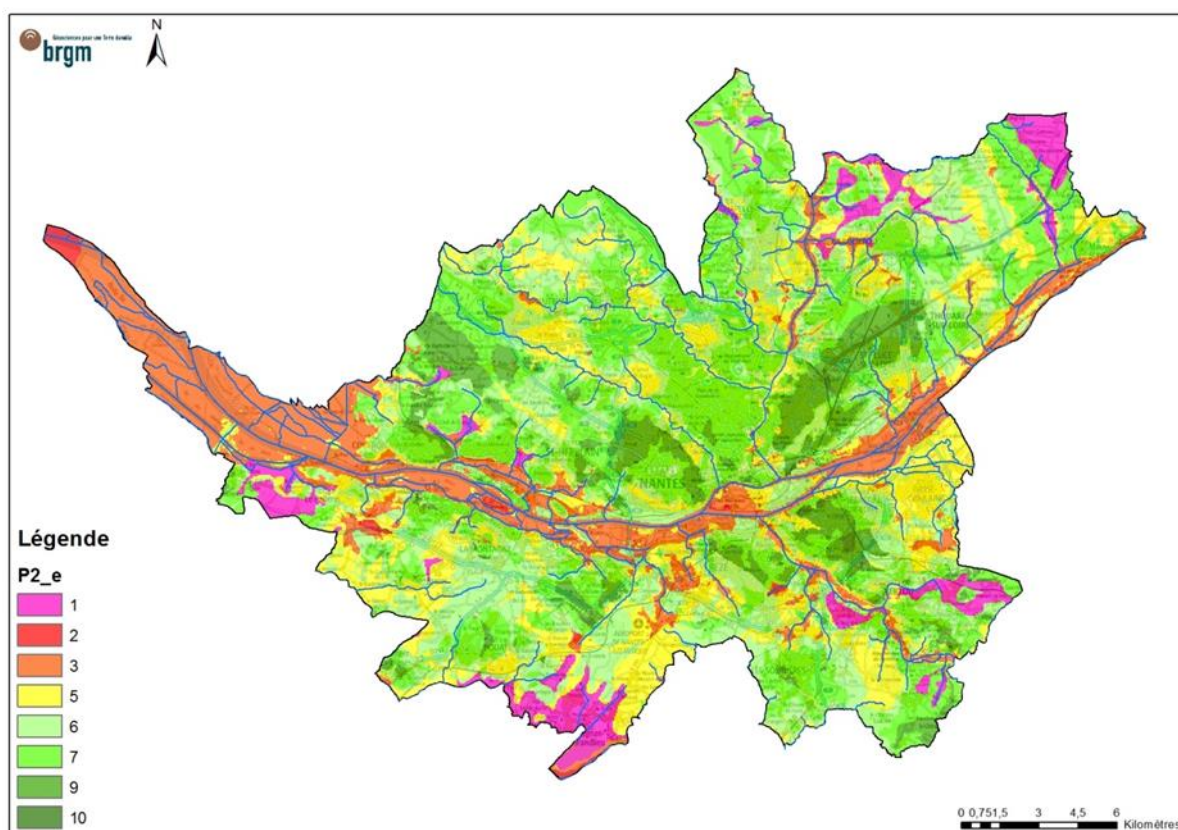


Illustration 22 : carte multicritères avec hydromorphie « rédhibitoire » (somme pondérée)

3.2.3. Evaluation de l'aptitude à l'infiltration à partir du critère le plus défavorable :

Pour prendre une approche similaire à celle suivie par Lille Métropole, l'aptitude à l'infiltration est considérée comme correspondant à la note la plus défavorable entre celle du critère « IDPR et formations hydromorphes » et celle de la « profondeur de la nappe » :

Aptitude = minimum des différents critères

Cette approche, après discussion avec Nantes Métropole, n'a finalement pas été retenue car elle correspond à une approche trop restrictive par rapport aux possibilités d'infiltration.

3.2.4. Sélection et contrôle de la méthode d'analyse

Il est important de rappeler que les cartes présentées ci-avant sont, à ce stade, des documents de travail, notamment car la représentation des 9 classes d'aptitude à l'infiltration rend la lecture « opérationnelle » de la carte trop complexe.

D'autre part il est important de rappeler qu'il s'agit d'une cartographie multicritère avec des rendus en « relatif » (plus ou moins grande aptitude à l'infiltration).

La représentation de l'aptitude par une somme pondérée, avec le paramètre « sol hydromorphe » comme facteur déclassant (mais non rédhibitoire) apparaît comme la plus conforme à la représentation d'une aptitude à l'infiltration en vue de la mise en place de dispositifs de gestion des eaux pluviales pouvant être peu profonds, ne nécessitant pas de protection particulière vis-à-vis des eaux souterraines).

La cartographie de l'aptitude à l'infiltration a été superposée à celle des zones humides, afin d'évaluer la cohérence de cartographie entre ces dernières et des zones analysées comme peu favorables.

Les illustrations ci-après présentent d'une part la cartographie sur l'ensemble du territoire (illustration 23) et d'autre part des zooms sur plusieurs secteurs sur lesquels la superposition entre les zones humides (données DREAL) et l'aptitude a été effectuée (illustrations 24 à 26). La cohérence entre les informations se révèle satisfaisante.

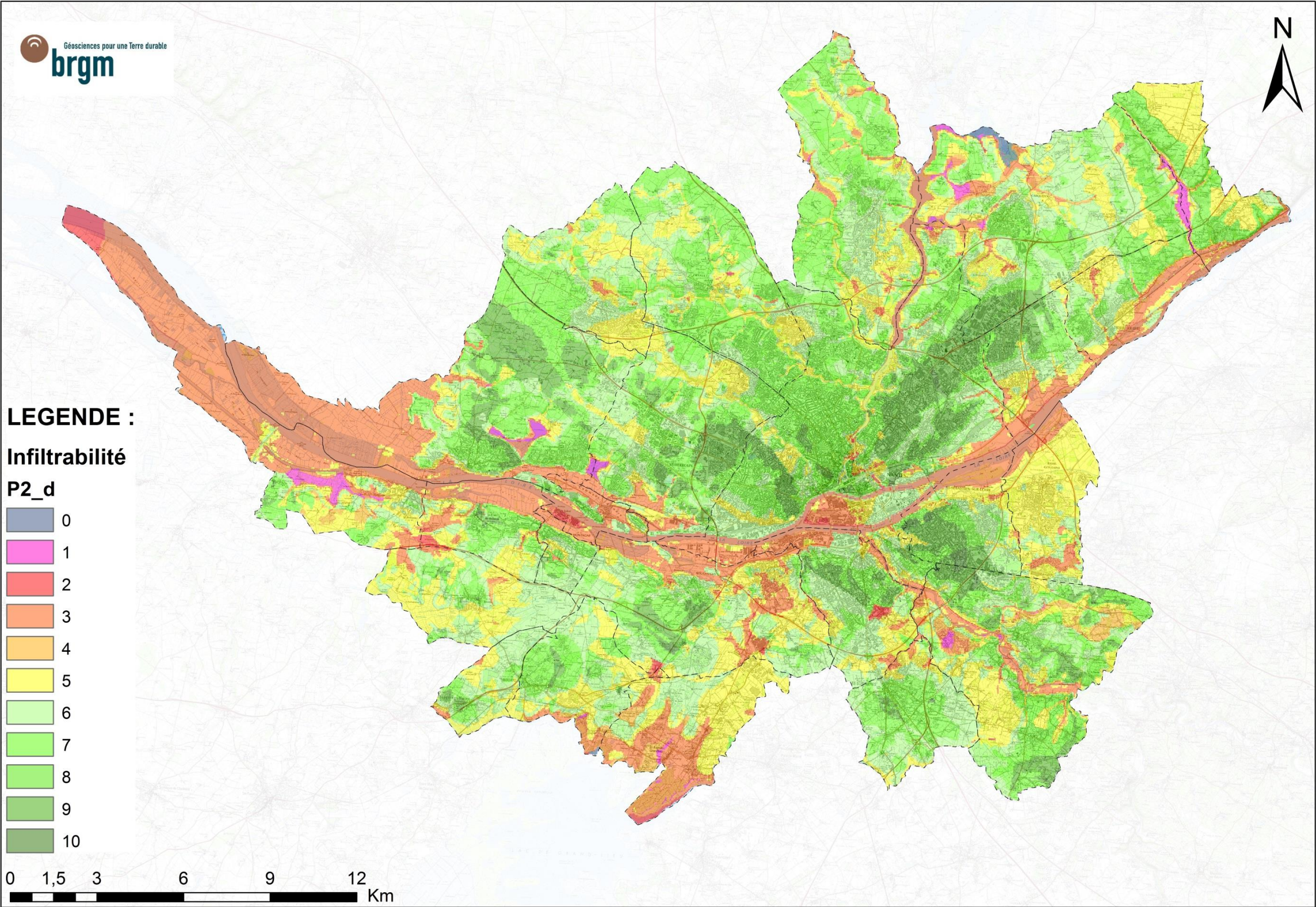


Illustration 23 : cartographie de l'aptitude à l'infiltration, sans regroupement de classes de notes

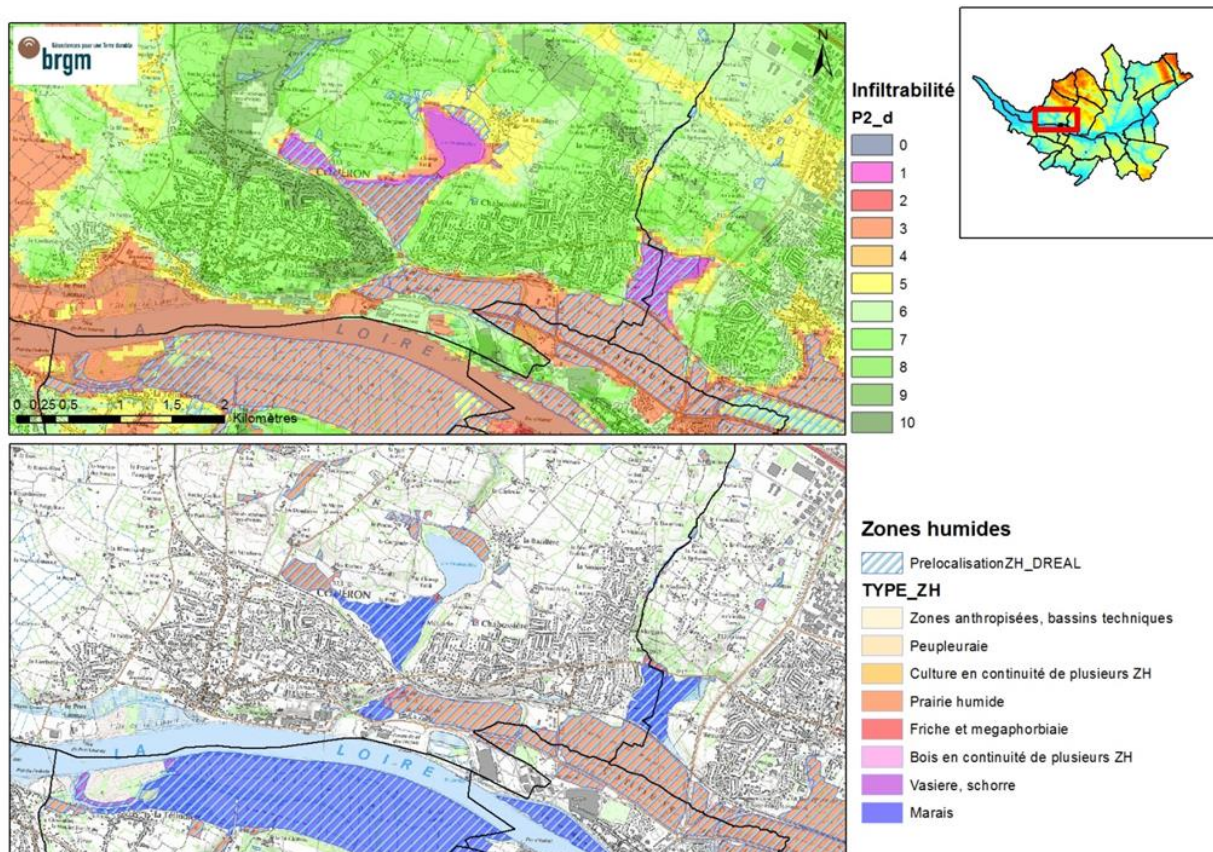


Illustration 24 : exemple 1 de superposition entre la carte « brute » d'aptitude et les zones humides

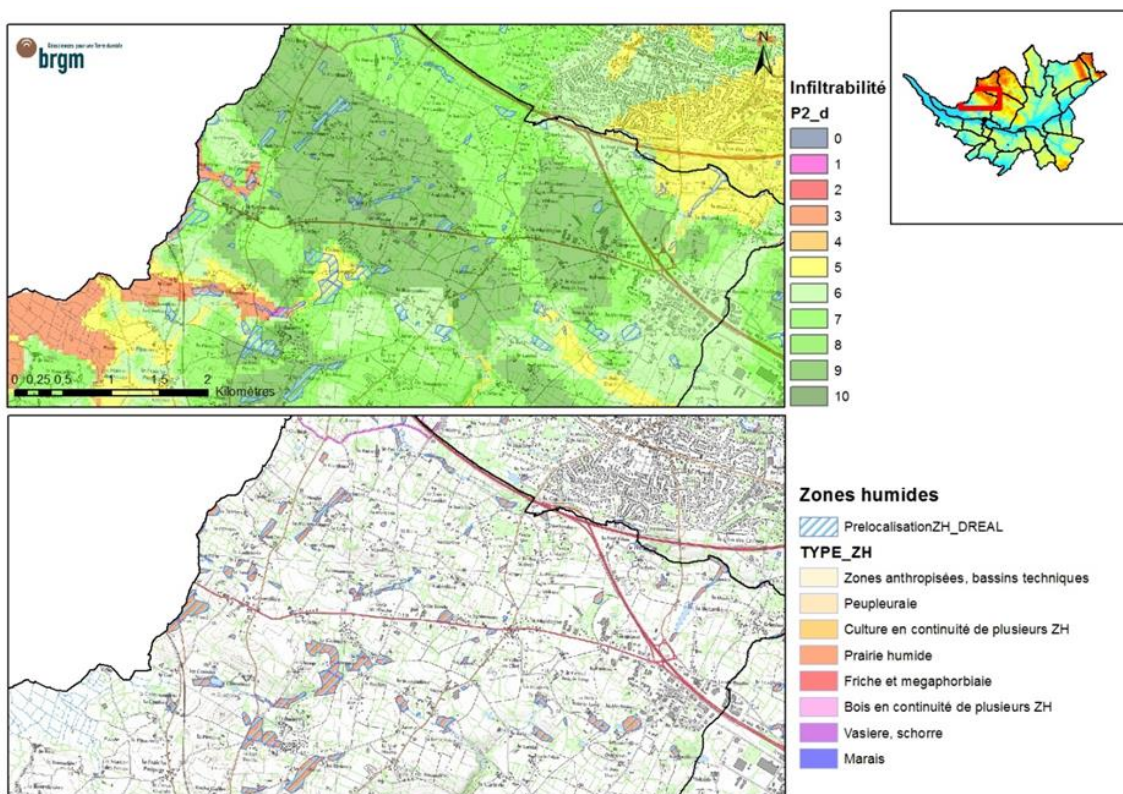


Illustration 25 : exemple 2 de superposition entre la carte « brute » d'aptitude et les zones humides

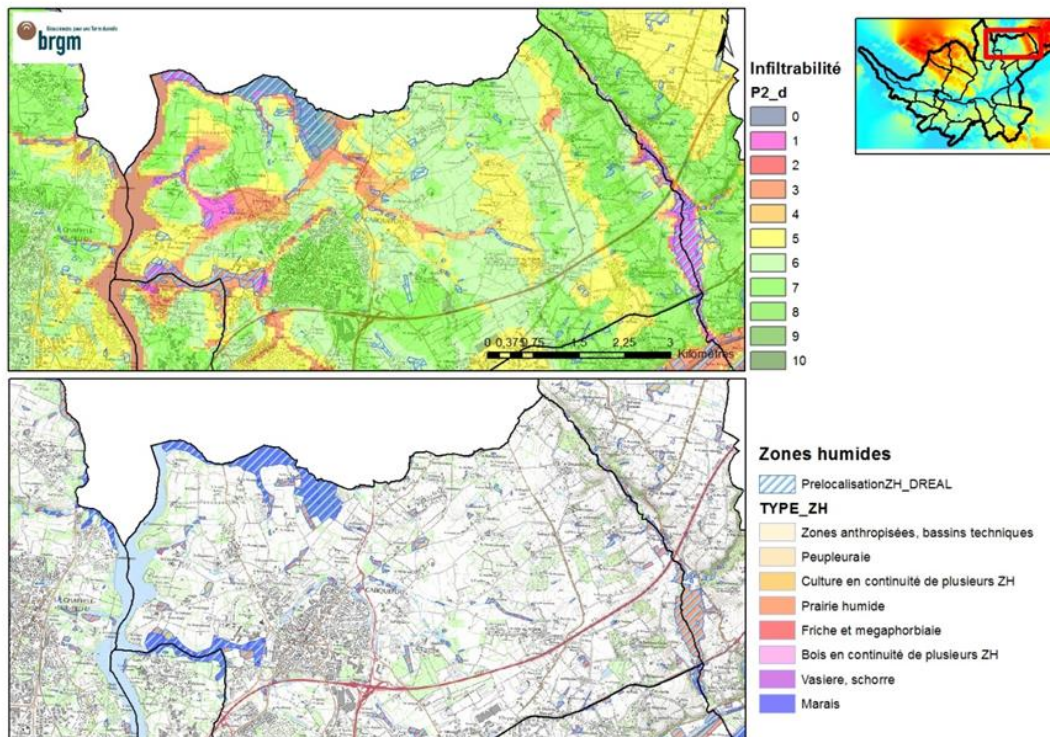


Illustration 26 : exemple 3 de superposition entre la carte « brute » d'aptitude et les zones humides

3.3. REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DE L'APTITUDE A L'INFILTRATION

Afin de transformer cette information en une cartographie simplifiée, plus opérationnelle, il est nécessaire de regrouper certaines classes de notes. Le choix du nombre final de classes d'aptitude à l'infiltration et les regroupements ont été définis en concertation avec Nantes Métropole.

Il a été choisi de réaliser la représentation simplifiée en regroupant les 10 classes initiales en 3 catégories : « a priori défavorable », « a priori moyennement favorable » et « a priori favorable ».

Plusieurs cartographies ont été effectuées avec différents choix de bornes de regroupement :

Notes de 0 à 3 : a priori défavorable
 Notes de 4 à 6 : a priori moyennement favorable
 Notes de 7 à 10 : a priori favorable

cf. illustration 27

Notes de 0 à 4 : a priori défavorable
 Notes de 5 à 7 : a priori moyennement favorable
 Notes de 8 à 10 : a priori favorable

cf. illustration 28

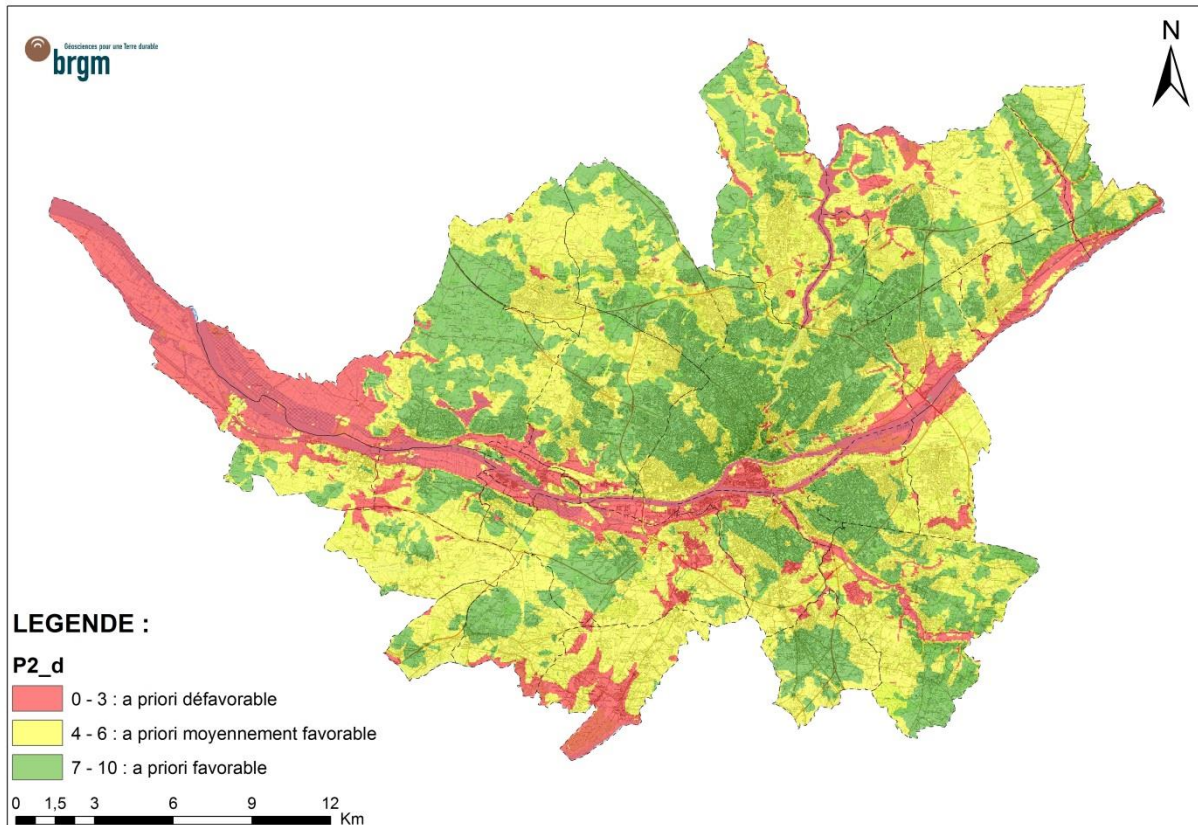


Illustration 27 : regroupement des classes 0-3, 4-6 et 7-10

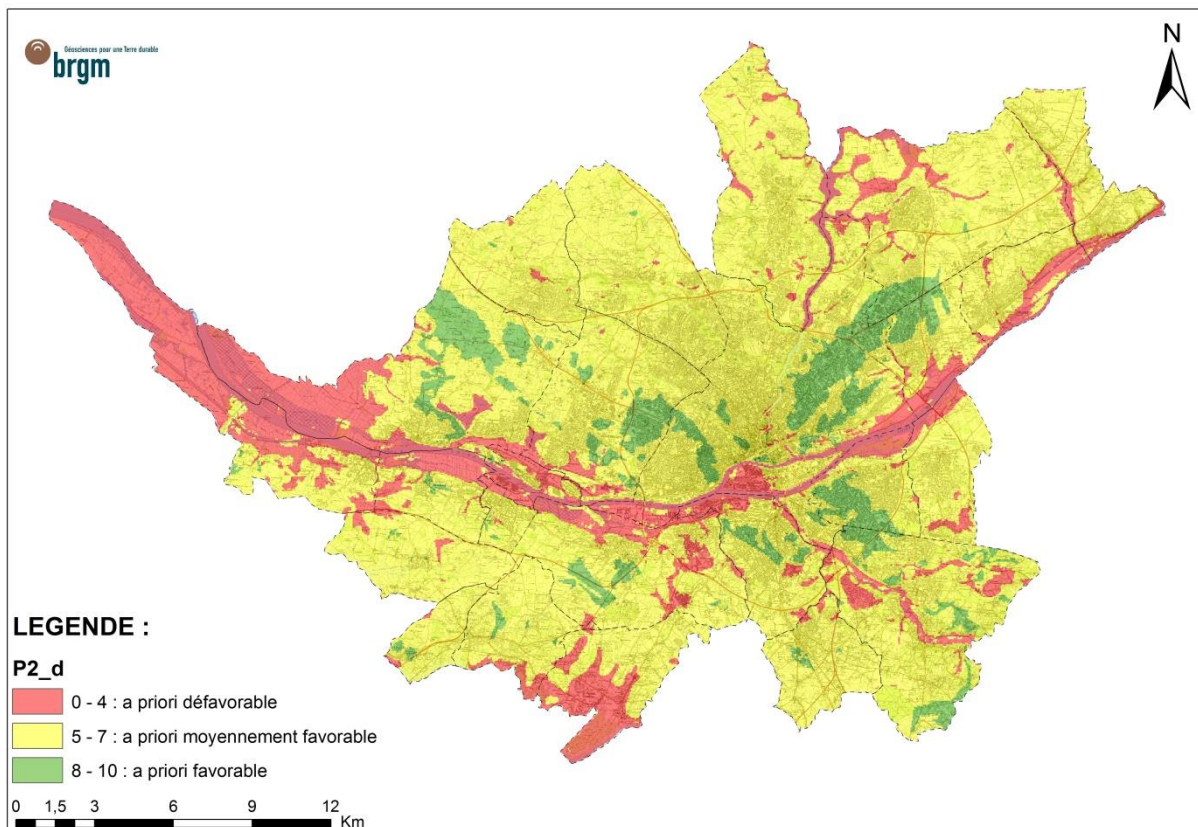


Illustration 28 : regroupement des classes 0-4, 5-7 et 8-10

Après évaluation des notes correspondant aux différents caissons (cf. annexe 1), c'est cette dernière représentation (correspondant à l'illustration 28) qui a été retenue à l'issue d'une réunion de travail Nantes Métropole – BRGM.

3.4. INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES

La bibliographie (cf. § 1.3) a montré que des informations complémentaires étaient fréquemment utilisées dans la cartographie de l'aptitude à l'infiltration : pentes, délimitation de certaines formations géologiques susceptibles de générer des aléas (ex. : gypse, argiles gonflantes), etc. Les principaux critères sont mentionnés dans les paragraphes ci-après et ont été évalués en fonction du contexte du territoire de Nantes Métropole. Ceux qui apparaissent comme les plus pertinents ont été intégrés à la cartographie finale.

Pentes :

Les pentes supérieures à 7 % sont considérées comme défavorables à l'infiltration, d'une part parce que cette topographie favorise le ruissellement et d'autre part parce qu'en terrain penté, certains dispositifs d'infiltration peuvent générer des résurgences en particulier en pied de pente.

L'illustration 29 ci-après présente la localisation des pentes supérieures à 7 % sur le territoire de Nantes Métropole.

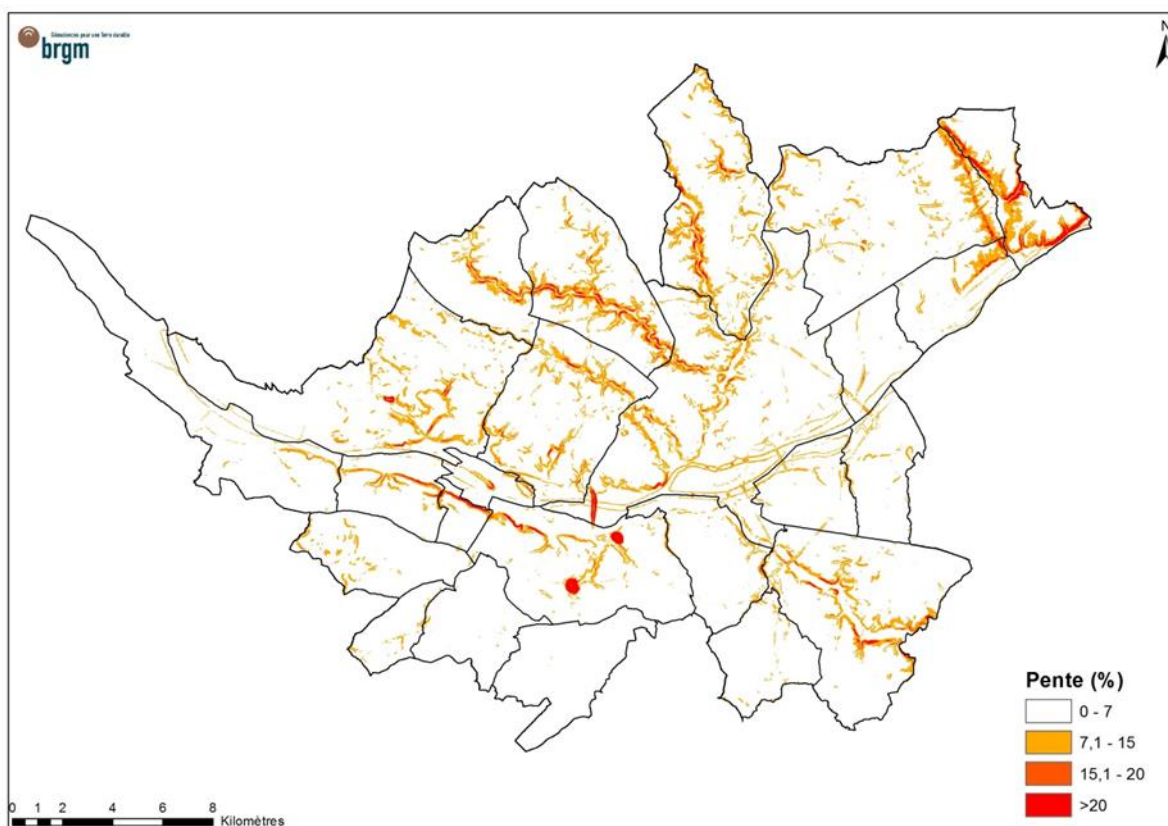


Illustration 29 : Secteurs à pentes topographiques supérieures à 7 %.

Dans le cas de la présente étude, l'aspect ruissellement est déjà pris en compte dans la cartographie multicritère, par le biais de l'IDPR. Il est donc proposé de simplement sur-rajouter, à titre informatif, les polygones correspondant aux secteurs à pentes supérieures à 7 % (cf. paragraphe 2.1) afin d'attirer l'attention sur cette contrainte pour les éventuels projets d'infiltration.

Formations géologiques susceptibles de générer des aléas ; Cavités.

La présence de gypse ou d'argiles gonflantes a été prise en compte dans la bibliographie dans le contexte de terrains situés dans le bassin parisien. Sur le territoire de Nantes Métropole il n'y a pas de formation gypseuse et les argiles gonflantes potentiellement présentes dans les formations argileuses n'engendrent pas un aléa significatif (cf. étude de l'aléa retrait gonflement sur le département de Loire-Atlantique BRGM/RP-56818-FR, Le Guern C. *et al.* 2009). Il n'apparaît donc pas de contrainte majeure liée à ces paramètres.

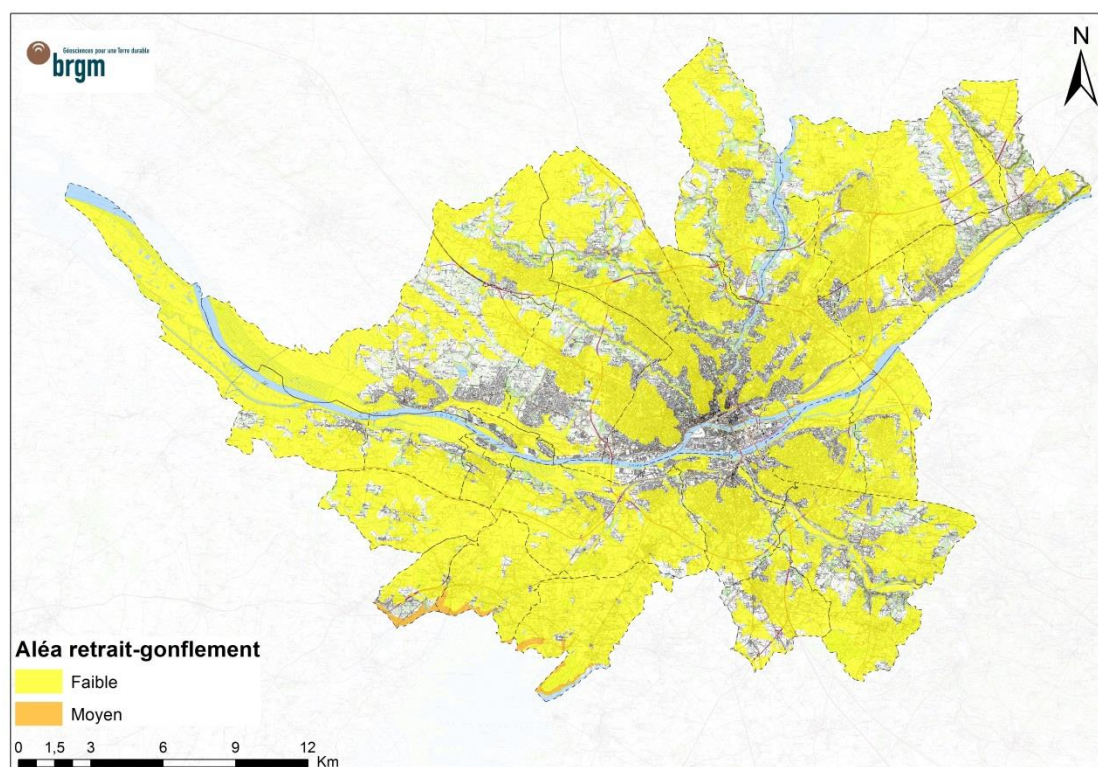


Illustration 30 : Cartographie de l'aléa lié aux argiles gonflantes (aléa faible en jaune, aléa moyen en orange)

Par ailleurs, il a été recensé très peu de cavité souterraine et aucune d'une taille suffisante (de type carrière souterraine) pour être prise en compte.

Contraintes liées à l'usage de l'eau souterraine :

Un champ captant contribue à l'alimentation en eau potable de Nantes Métropole et est situé sur la commune de Basse Goulaine. Le périmètre de protection rapproché de ce captage

AEP est figuré sur l'illustration 31 ci-après. Il couvre une superficie de 765 hectares (arrêté du 9 juillet 2002).

Toutefois, deux nappes sont présentes : une supérieure, contenue dans une formation sableuse, entre 2 et 10m de profondeur et une nappe inférieure, contenue dans des formations sablo-graveleuses entre 15 et 25 m de profondeur. Ces deux nappes sont séparées par un niveau argileux à argilo-sableux et seule la nappe inférieure, semi-captive et présentant ainsi une vulnérabilité considérée comme faible, est utilisée pour l'eau potable. La nappe supérieure est en relation avec la Loire.

Un deuxième périmètre de protection rapproché de captage AEP est partiellement localisé sur le territoire de Nantes Métropole (cf. illustration 31). Situé sur la partie sud-est de la commune de Mauves sur Loire, il concerne la protection d'eaux de surface (et non pas d'eaux souterraines) liées à une prise d'eau en Loire.

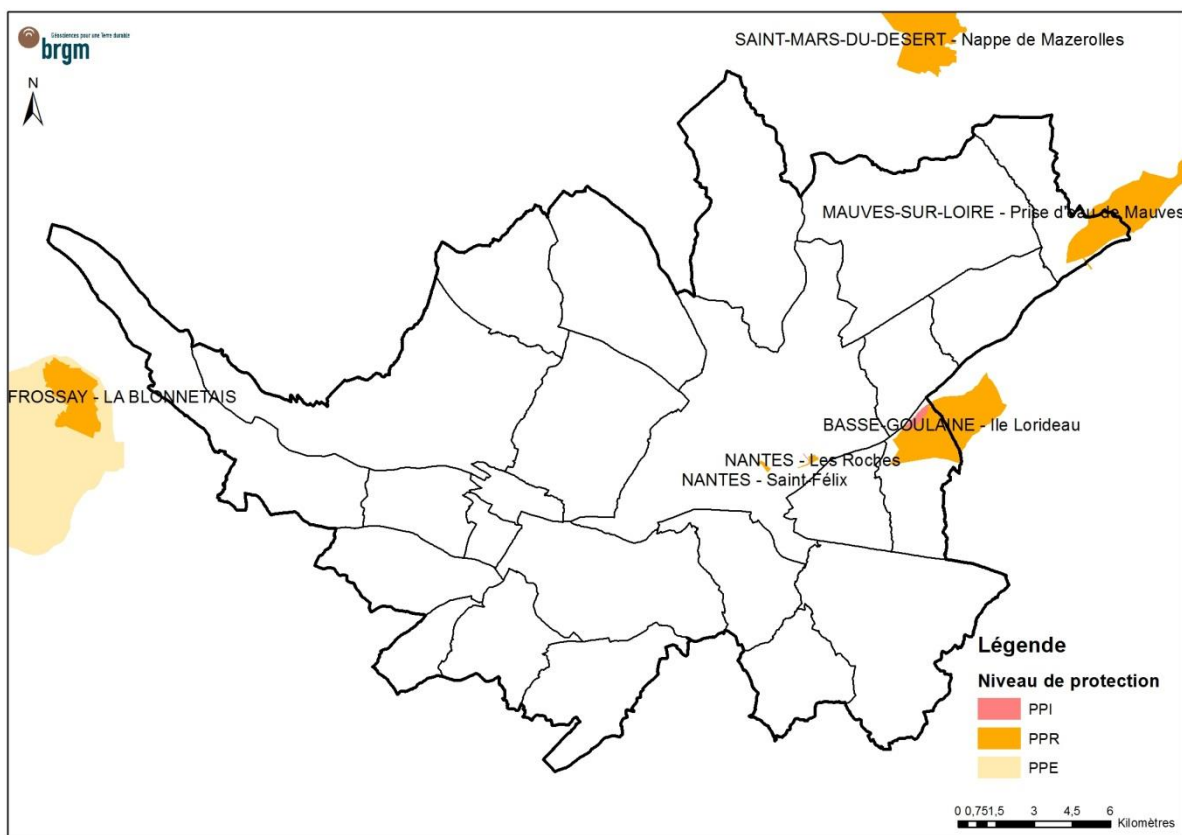


Illustration 31 : périmètres de protection

Contraintes liées à l'usage des sols : cimetières, sites et sols pollués :

Certaines cartographies tiennent compte de la présence de cimetière, qui est un paramètre défavorable en vue de projets d'infiltration. Compte tenu de l'échelle de l'étude, ce paramètre n'a pas été pris en compte dans la présente cartographie mais sera éventuellement à considérer à l'échelle de projets ponctuels.

Guillon *et al.* (2010) fait intervenir la présence de sites et sols pollués dans l'appréciation de l'aptitude à l'infiltration, du fait des possibilités de favoriser la mobilité d'éventuels polluants

présents dans les sols. Les sites correspondants sont recensés dans la base de données BASOL (Base de données sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif). Pour ces sites, et en fonction de l'évolution des connaissances et des travaux les concernant, des arrêtés préfectoraux peuvent règlementer les usages et servitudes.

L'information présente dans BASOL étant évolutive (découverte de nouveaux cas, évolution de la connaissance et de la situation pour un site donné (investigation, travaux, site dépollué mais surveillé, ...)) cartographier les sites correspondant à une date donnée rendrait la carte réalisée très rapidement obsolète. Il a donc été décidé de ne pas représenter les sites à une date donnée, mais plutôt de recommander aux pétitionnaires, dans le cadre de leur projet, de consulter la base de données afin de disposer d'une information à jour.

3.5. RESTITUTION DES CARTOGRAPHIES FINALISEES

Afin de permettre une localisation aisée, la restitution des cartographies d'aptitude à l'infiltration est présentée sur un fond scan 25 (© IGN).

La restitution finalisée comprend :

- La carte de l'ensemble du territoire (format pdf), présentée en format réduit (A3) en illustration 32 ci-après,
- Les fichiers au format MapInfo avec les métadonnées correspondantes,
- Un atlas des communes (format pdf).

Ces informations sont transmises à Nantes Métropole sur support numérique en complément du présent rapport.

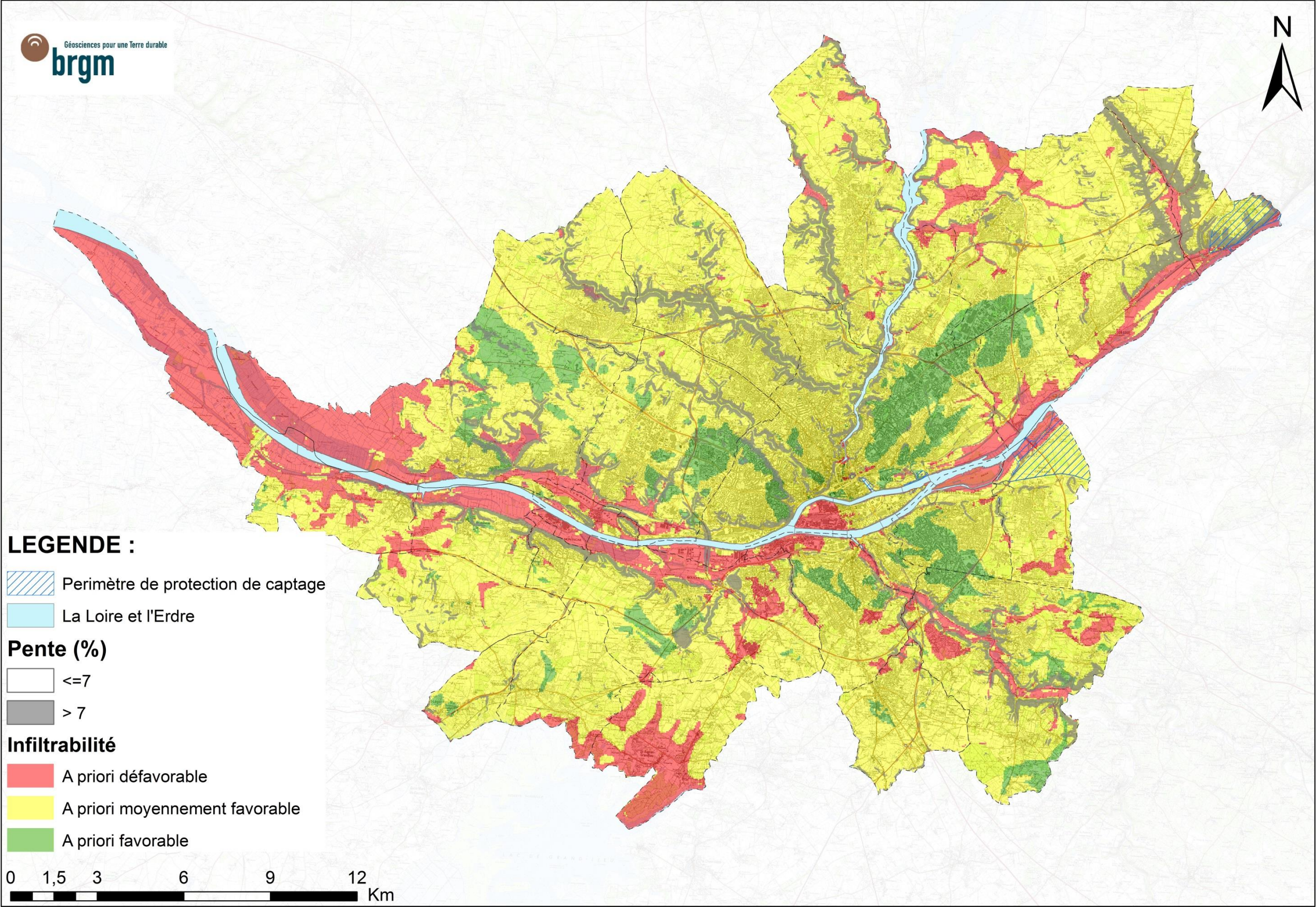


Illustration 32 : cartographie finalisée

4. Conclusions

La présente étude a été réalisée en partenariat entre Nantes Métropole et le BRGM, afin de permettre à la communauté urbaine de disposer d'une cartographie pouvant lui servir de base afin de définir les secteurs où, dans le cadre de la gestion des eaux pluviales, l'infiltration pourrait être privilégiée.

Cette cartographie portant sur l'ensemble du territoire de Nantes Métropole, correspond à une superficie importante : 523 km². Compte tenu de cette échelle, les partenaires ont choisi de se baser sur l'utilisation de données existantes, sans réalisation de mesures et notamment sans investigations pédologiques détaillées, qui auraient conduit à un surcoût très important du fait de la superficie.

La méthodologie employée se base sur l'utilisation des données cartographiques correspondant aux principaux critères contribuant à l'évaluation de l'aptitude d'un terrain à l'infiltration : pente, profondeur des eaux souterraines, caractère ruisselant/infiltrant défini indirectement à partir de l'IDPR (Indice de Persistance et de Développement des Réseaux), géologie/pédologie.

Une analyse multicritère a été réalisée à partir d'un ensemble de ces données et a ainsi permis de hiérarchiser le territoire selon la plus ou moins grande aptitude à l'infiltration.

Afin d'être facilement lisible cette analyse est restituée dans la cartographie finale avec un classement du territoire selon trois classes d'aptitude : « *a priori* défavorable », « *a priori* moyennement favorable » et « *a priori* favorable ». Des informations complémentaires, importantes à prendre en compte dans le cadre de projets de gestion par infiltration (périmètres de protection, pentes,...) ont également été représentées.

La cartographie réalisée fournit une vision homogène sur l'ensemble du territoire de Nantes Métropole et permet ainsi de servir de premier niveau pour l'aide à la décision.

Toutefois, compte tenu des informations utilisées et de leurs échelles de validité, une telle cartographie doit être considérée comme indicative. En particulier elle ne doit surtout pas être utilisée à une échelle inférieure au 1/50 000 par exemple pour évaluer un projet « à la parcelle ».

Il est donc recommandé de faire des reconnaissances précises avant tout projet prévoyant d'utiliser la capacité d'infiltration du sol.

En accompagnement des cartes, il conviendrait de rappeler les informations non intégrées aux cartographies et qu'il serait important de prendre en compte. Par exemple il pourrait être recommandé aux opérateurs envisageant un projet de consulter les bases de données BASOL (pour les sites à pollution avérées) et BASIAS (pour les anciens sites potentiellement pollués), afin de s'assurer de la présence ou non de tels sites (et donc des contraintes potentielles associées) à proximité.

Perspectives

Il convient de rappeler que la cartographie réalisée dans le cadre de la présente étude constitue une première étape.

En effet, comme mentionné ci-avant, elle permet de hiérarchiser les parties du territoire de Nantes Métropole les uns par rapport aux autres, en termes d'aptitude des terrains à l'infiltration, avec des critères à la fois homogènes et objectifs. Elle constitue donc en cela un apport significatif pour la gestion des territoires.

Toutefois, il serait intéressant, dans une phase ultérieure, de relier ce classement relatif à des données de perméabilité.

Pour ce faire il pourrait par exemple être proposé de collecter les informations de perméabilité des terrains, géo-localisées, à l'occasion de dossier de travaux, afin de constituer une base d'information. Lorsqu'un ensemble de données sera disponible, il sera alors possible d'effectuer des comparaisons statistiques, par secteur, entre les mesures et les notations de la carte d'aptitude afin, *in fine*, de pouvoir positionner l'échelle des notes relatives d'aptitude par rapport à des valeurs quantitatives de perméabilité.

5. Bibliographie

Collin J.J., Les eaux souterraines – Connaissance et gestion. Hermann ed., BRGM Editions, ISBN 2 7056 6474 2.

Conil P., Rouxel E., Toutain J., Wuilleumier A., avec la collaboration de Bourguine B., Baudouin V., Jegou J-P. (2008) - Profondeur des eaux souterraines sur le territoire de Nantes Métropole - Rapport final - BRGM/RP-56938-FR - 49 p., 1 tabl., 15 fig., 4 pl., 2 ann.

Frippiat, C., Hulpiau, A., Vandenberghe, C., Marcoen, JM. (2006). Carte d'aptitude du sol à l'évacuation souterraine des eaux usées traitées, Phases 1 et 2. Rapport rédigé pour le groupe technique – assainissement approprié au milieu rural, Cabinet du Ministre de l'Agriculture, de la Ruralité, de l'Environnement et du Tourisme.

Guillon A., Roux Ch., Bertrand C., Pierlot D., (2010) - Cartographie de l'infiltrabilité à l'échelle du Département des Hauts-de-Seine (170km²) pour l'aide au choix d'une technique de maîtrise des eaux pluviales à la source, NOVATECH 2010.

BE Jeannolin (2005) – Aptitude des sites à l'assainissement non collectif - Commune de ST NIZIER DU MOUCHEROTTE (38) Rapport d'étude géologique.

Le Guern C. *et al.* (2009), Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Loire-Atlantique. Rapport final. BRGM/RP-56818-FR, 131 p., 5 ann., 3 cartes HT.

Lille Métropole Communauté Urbaine (2012), Guide de gestion durable des eaux pluviales de Lille Métropole, parties 1 et 2.

Vernoux J.F., Wuilleumier A. Perrin J. (2014) – Délimitation des aires d'alimentation de captages d'eau souterraine et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Version révisée du guide méthodologique, rapport BRGM/RP-63311-FR, 133 p., 69 illustrations, 1 annexe.

Wuilleumier A., Monnot P., Conil P., Prognon F., Lacquement F., Bourguine B., Baudouin V. (2008) – Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole. Rapport Final. BRGM/RP-56333-FR, 233 pages, 42 figures, 16 tableaux et 22 annexes.

Annexe 1

Tableau des notes résultant des analyses multicritères

Traitements réalisés et notations adoptées

Quatre analyses multi-critères ont été réalisées (cf. rapport) :

Poids identiques ZNS et IDPR : **P1** = ZNS + IDPR

Poids double IDPR par rapport à la ZNS : **P2** = (ZNS + 2*IDPR)*10/15 (coefficient pris pour ramener les valeurs entre 2 et 10)

Pour chacune de ces deux catégories de formule de calcul de « l'aptitude », prise en compte de la pédologie (secteur à caractère hydromorphe) par :

- déclassement (_d) :
 - o **P1_d** = P1 + Pedo
 - o **P2_d** = P2 + Pedo
- exclusion (_e) :
 - o **P1_e** = P1 si pedo = 0 et 1 si pedo = -2
 - o **P2_e** = P2 si pedo = 0 et 1 si pedo = -2

Parmi ces 4 analyses multi-critères, l'analyse P2-d (somme pondérée et caractère hydromorphe déclassant mais non rédhibitoire) a été retenue par les partenaires.

Résultats numériques

Le tableau ci-après détaille les résultats numériques des analyses multi-critères et mentionne la surface (en %) concernée par chaque cas.

Nb Pixel	Pourcentage Superficie	ZNS (3 classes)	pedo (1 classe)	idpr (5classes)	P1	P2	P1_d	P1_e	P2_d	P2_e
289	0,1%	1	-2	1	2	2	0	1	0	1
1364	0,6%	1	-2	2	3	3	1	1	1	1
13	0,0%	3	-2	1	4	3	2	1	1	1
10	0,0%	1	0	1	2	2	2	2	2	2
1324	0,6%	1	0	1	2	2	2	2	2	2
31384	14,7%	1	0	2	3	3	3	3	3	3
3327	1,6%	1	-2	3	4	5	2	1	3	1
79	0,0%	1	0	2	3	3	3	3	3	3
1204	0,6%	3	0	1	4	3	4	4	3	3
468	0,2%	3	-2	2	5	5	3	1	3	1
283	0,1%	5	-2	2	7	6	5	1	4	1
823	0,4%	3	-2	3	6	6	4	1	4	1
1081	0,5%	1	-2	4	5	6	3	1	4	1
7550	3,5%	3	0	2	5	5	5	5	5	5
31067	14,6%	1	0	3	4	5	4	4	5	5
2425	1,1%	5	-2	3	8	7	6	1	5	1
2285	1,1%	5	0	1	6	5	6	6	5	5
5	0,0%	3	0	2	5	5	5	5	5	5
10	0,0%	5	0	1	6	5	6	6	5	5
60	0,0%	1	0	3	4	5	4	4	5	5
745	0,3%	3	-2	4	7	7	5	1	5	1
45	0,0%	1	-2	5	6	7	4	1	5	1
8457	4,0%	5	0	2	7	6	7	7	6	6
12284	5,8%	1	0	4	5	6	5	5	6	6
30219	14,2%	3	0	3	6	6	6	6	6	6
56	0,0%	5	0	2	7	6	7	7	6	6
9	0,0%	3	0	3	6	6	6	6	6	6
11	0,0%	1	0	4	5	6	5	5	6	6
44719	21,0%	5	0	3	8	7	8	8	7	7
421	0,2%	5	0	3	8	7	8	8	7	7
12023	5,6%	3	0	4	7	7	7	7	7	7
1445	0,7%	1	0	5	6	7	6	6	7	7
148	0,1%	5	-2	4	9	9	7	1	7	1
2	0,0%	3	-2	5	8	9	6	1	7	1
35	0,0%	3	0	4	7	7	7	7	7	7
1	0,0%	1	0	5	6	7	6	6	7	7
6	0,0%	5	-2	5	10	10	8	1	8	1
14841	7,0%	5	0	4	9	9	9	9	9	9
1821	0,9%	3	0	5	8	9	8	8	9	9
2	0,0%	3	0	5	8	9	8	8	9	9
606	0,3%	5	0	5	10	10	10	10	10	10
212947										

Annexe 2

Contexte géologique du territoire de Nantes Métropole

La région nantaise, traversée d'est en ouest par la Loire, présente un relief faible (de 0 à 80 m). Morphologiquement, cette zone est constituée par deux plateaux situés de part et d'autre du fleuve et entaillés par de nombreux cours d'eau formant vallées et vallons.

Le contexte géologique du territoire de Nantes Métropole est guidé par la mise en place de la Loire (dépôts argilo-sableux à caillouteux) sur les unités de socle constituant le substratum. Celui-ci est également recouvert localement par les sables pliocènes (dépôts sédimentaires).

La diversité des roches composant ce substratum s'explique par la complexité de l'histoire géologique régionale qui s'inscrit dans celle du Massif armoricain et celle du seuil du Poitou.

Les formations de socle et du Pliocène

Les unités de socle se répartissent en bandes de largeur variable, parallèlement au Cisaillement Sud Armoricain :

- L'unité située au sud-ouest du territoire de Nantes Métropole correspond à la Formation des Mauves. Elle est essentiellement constituée de micaschistes et correspond au substrat des communes de Mauves-sur-Loire, Carquefou, La Chapelle-Sur-Erdre, Thouaré-sur-Loire, Saint-Luce-Sur-Loire, Basse-Goulaine, Saint-Sébastien-sur-Loire, le nord et l'est de Nantes, le nord de la commune de Vertou, le sud de la commune d'Orvault et le centre de la commune de Sautron.
- Vers le sud-ouest, après une fine bande d'amphibolite (Formation de Drain), traversant les communes de Vertou, Nantes et Saint-Herblain, on passe à la Formation de Landreau constituée de micaschistes et de gneiss à biotite et muscovite. Ce niveau forme une bande partant du sud de la commune de Sautron et passant par Saint-Herblain, Nantes, Rezé pour se terminer à Vertou.
- Le nord des communes d'Orvault et de Sautron, ainsi qu'une bande partant du nord de la commune de Couëron pour passer par Saint-Herblain, l'extrémité sud-ouest de Nantes, l'est de Bouguenais, le sud-ouest de Rezé, l'ensemble de la commune des Sorinières et l'extrémité sud de Vertou ont un substrat granitique traversé par le Cisaillement Sud Armoricain à l'origine de la déformation intense des granites.
- Vers l'ouest, la Formation de Pellerin-Montaigu, constituée de gneiss feuilletés à muscovite et de leptynite, forme l'essentiel du substrat du territoire des communes de Couëron, Indre-Sur-Loire, du sud-ouest de Saint-Herblain, d'une partie des communes de Bouguenais, La Montagne, Saint-Jean-de-Boiseau, Brain et le Pellerin ainsi que de l'extrémité orientale de la commune de Vertou. Elle est associée à la Formation de Paimboeuf, constituée de gneiss leptynitique à sillimanite qui est présente sur les communes de Couëron et de Saint-Herblain.
- Au sud de la commune de Vertou est présent le massif de Château-Thébaud marqué par des granodiorites et des diorites. Les formations de Saint-Paul-en-Pareds, constituées par des micaschistes à biotite, de Chauvé-l'Angle-Mervent constituées d'orthogneiss à deux micas et la Formation de Montaigu, constituée d'amphibolite massive, constituent le substrat affleurant des villes du sud-ouest de la communauté urbaine.

- Les massifs de l'Ortay et du Bignon correspondent à des massifs granitiques à deux micas et sont présents sur les communes de Rezé, Bouguenais et les Sorinières. La Formation de Champtoceaux est présente à l'est de la commune de Vertou sous la forme leptynite à biotite et muscovite.
- Il existe d'autres faciès associés essentiellement à des filons comme les filons de quartz, de pegmatites ou encore de péridotites et de serpentinites. Ils représentent de très faible surface sur la carte (moins de 1 %).

Après l'orogénèse hercynienne, la région est soumise à une intense érosion permettant l'aplanissement progressif de la topographie. Les dépôts sableux et rouges du Pliocène recouvrent une surface marquée par une topographie localement accusée.

Le long de la Loire et au niveau des communes situées dans la partie occidentale de la zone d'étude, les formations quaternaires, fluviatiles et fluvio-marines recouvrent de manière importante le substratum pour le masquer.

Les formations alluviales

Creusée à peu près dans son état actuel avant le Pliocène, la gouttière rocheuse de la Loire a été déblayée et remblayée au cours des régressions et des transgressions eustatiques, au Quaternaire.

Les alluvions fluviatiles anciennes (Würm)

Les alluvions de la Loire déposées lors de la dernière glaciation (le Würm) recouvrent partout le lit rocheux du fleuve, A l'amont de Nantes, elles forment une terrasse entre Chouzé et Saumur (a + 5 m d'altitude relative), puis elles passent sous les alluvions actuelles. A Nantes, elles gisent sous les alluvions fluvio-marines récentes (Flandrien), entre - 13 et - 27 m de profondeur (NGF). Le thalweg rocheux descend de - 27 m à Nantes jusqu'à - 37 m environ à la Martinière, et - 50 m à Mindin. Epaisse de 14 m en moyenne à Nantes, ces alluvions sont constituées par du sable siliceux, du gravier, des galets de roches cristallines non altérées.

Les alluvions fluviatiles modernes

a) La Loire

Le remblaiement récent de la vallée de la Loire est connu par de nombreux sondages (Nantes, Ile Cheviré, Pé de Buzay), il est principalement constitué de sédiments fins, fluvio-estuariens (sables, vase, graviers, argiles).

b) L'Erdre

En bordure de l'Erdre ainsi que dans les cours inférieurs et moyens de ses tributaires se sont déposées des alluvions grises, argileuses ou argilo-sableuses. Les dépôts ont moins d'un mètre et sont toujours entaillés par le lit mineur. Dans les vallons des ruisseaux, ces dépôts se réduisent à un voile de limon d'inondation qu'il est difficile de délimiter par rapport aux colluvions des berges. Leur âge est holocène à historique.

Les terrasses

Un lambeau résiduel d'une **haute terrasse** culmine à 33 m au Sud de Basse-Goulaine. La fraction argileuse est plus importante dans ces sédiments que dans les alluvions plus récentes.

Sur la rive droite de la Loire, une **moyenne terrasse** (25 m NGF) s'étend largement au pied du Sillon de Bretagne, où elle atteint 8 m d'épaisseur. Les alluvions ont été arrachées par l'érosion des vallons, mais peuvent atteindre 6 m d'épaisseur au sommet de l'interfluve.

A Sainte-Luce et à l'Est de Nantes, subsistent des restes d'une nappe alluviale formant une **basse terrasse** (+12 m NGF) emboîtée dans la moyenne terrasse. Le sédiment qui la compose est plus sableux et les galets plus petits que dans la moyenne terrasse.

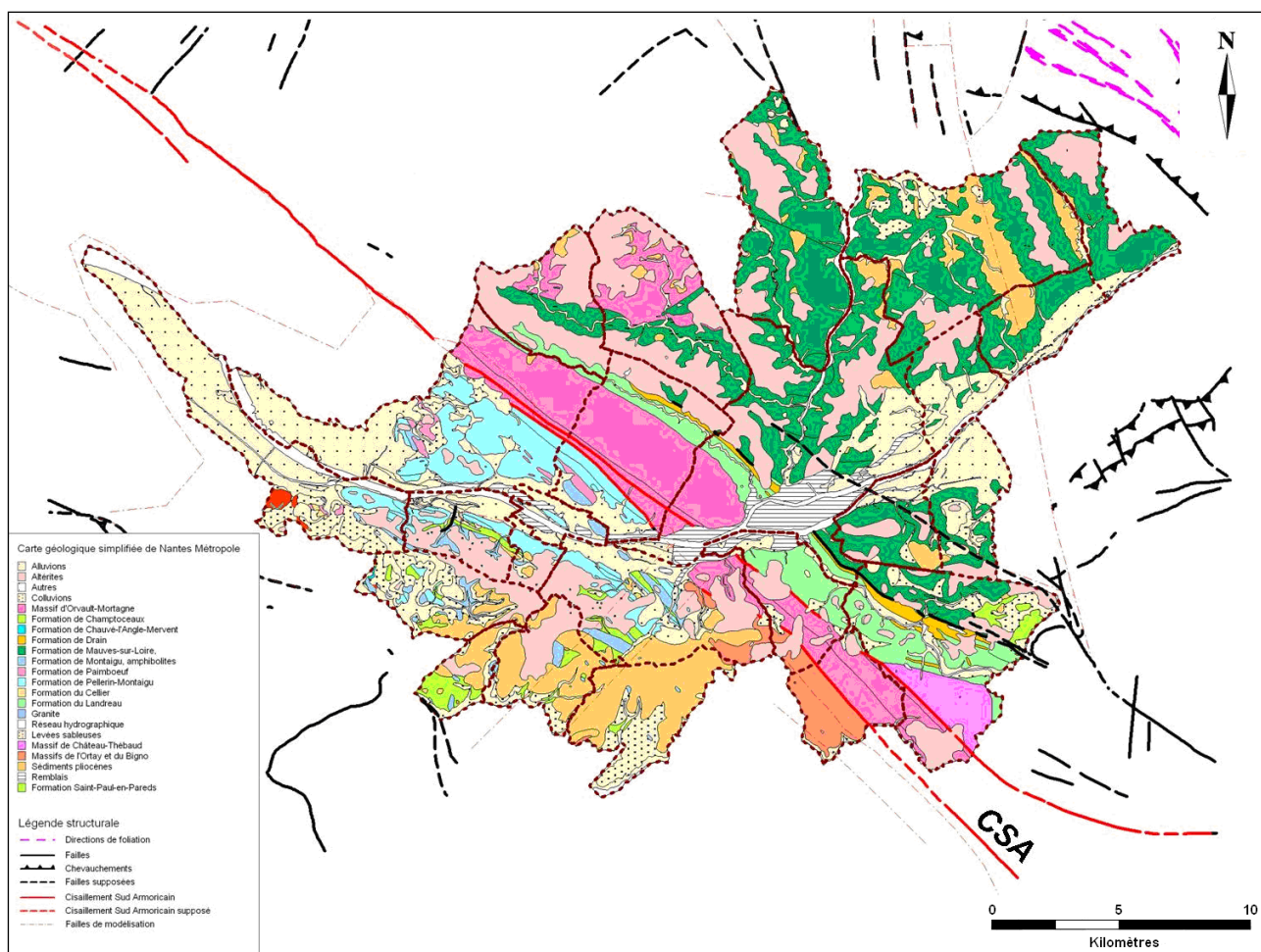


Planche 1 - Carte géologique simplifiée du territoire d'étude



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale des Pays de la Loire

1, rue des Saumonières
BP 92342

44323 Nantes Cedex 3 – France

Tél. : 02 51 86 01 51