



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



**Métropole
du Grand Paris**



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Cartographie du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire de la Métropole du Grand Paris

Rapport final

**BRGM/RP-71139-FR
Version 6 janvier 2022**

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

**Maragna Charles, Armandine Les Landes Antoine, Durst Pierre, Dupaigne
Timothée**

**Avec la participation d'Eva Frangiamone (Métropole du Grand Paris) et
Matthieu Mefflet-Piperel (ADEME)**

Vérificateur :

Nom : Maurel Camille

Fonction : Ingénieur en hydrogéologie

Date : 22/11/2021

Signature :

Approbateur :

Nom : Eric Gomez

Fonction : Directeur Ile-de-France

Date : 07/01/2022

Signature :

**Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr**

Avertissement

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

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

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

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

Votre avis nous intéresse

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

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire mis à votre disposition.

Mots clés : Géothermie de surface, géothermie de minime importance, pompes à chaleur géothermiques

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

Maragna Charles, Armandine Les Landes Antoine, Durst Pierre, Dupaigne Timothée (2022) – Cartographie du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire de la Métropole du Grand Paris. Rapport final V2. BRGM/RP-71139-FR, 96p., 80 fig., 5 ann.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-31/08/2021

Synthèse

Le 12 novembre 2018, le Conseil de la Métropole du Grand Paris a adopté son Plan Climat Air Energie Métropolitain (PCAEM). Ce document stratégique a pour objectif d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et vise l'accélération de la transition énergétique, avec un parc immobilier bâti 100% bas-carbone et un mix énergétique composé à 60% d'énergies renouvelables et de récupération en 2050, dont 30% produites localement.

La géothermie de surface consiste à exploiter les 200 premiers mètres de sol pour produire de l'énergie thermique (chauffage, eau chaude sanitaire, rafraîchissement, climatisation), souvent au moyen d'une pompe à chaleur. Le programme d'étude s'inscrit dans le cadre de la Convention signée en date du 16 mars 2020 entre le BRGM et la Métropole. Il comporte deux phases principales :

- La première phase consiste à établir un **argumentaire** sur la géothermie de surface (0 - 200 m) à partir des retours d'expérience des opérations de géothermie sur le territoire de la Métropole du Grand Paris (action en partie BRGM en lien avec APUR, et en partie ADEME et Métropole).
- La seconde phase consiste à mener une **étude du potentiel de développement** de la géothermie de surface sur le territoire de la Métropole du Grand Paris.

La première phase a abouti à la création d'un Webservice permettant de visualiser la localisation des installations existantes et d'un plaidoyer pour la géothermie de surface ancrée dans le territoire de la Métropole.

En ce qui concerne l'étude du potentiel de développement, trois aquifères de proche surface (Lutétien, Yprésien-Cuisien et Craie) peuvent être exploités pour couvrir les besoins en énergie thermique grâce aux solutions dites de doublet sur nappe (encore appelées solutions en boucle ouverte) utilisant des forages de production et d'injection. Cette étude a été l'occasion de mettre à jour les connaissances relatives à ces 3 aquifères, en termes de température, conductivité hydraulique et piézométrie. En ce qui concerne les sondes géothermiques verticales, le peu de données disponibles (une vingtaine de tests de réponses thermiques), ne permet pas d'établir une relation claire entre la conductivité thermique des terrains traversés et la lithologie.

Une méthodologie a été mise en place pour estimer l'adéquation entre ressources géothermales et besoin énergétique en surface. Cette méthodologie s'appuie sur des modèles simplifiés visant à estimer un taux de couverture par sondes et par doublets sur nappe.

A l'échelle de la métropole, la consommation actuelle en énergie thermique, i.e. en chauffage, eau chaude sanitaire et en froid, a été estimée à **50,94 TWh/an** (données BURGEAP). Par la présente étude, on estime que la géothermie de surface pourrait couvrir **29,75 TWh/an (soit 58%)** de la consommation actuelle. La géothermie de surface pourrait ainsi contribuer à remplacer les chaudières au gaz ou au fioul pour couvrir la consommation de chaud (i.e. chauffage et Eau Chaude Sanitaire), tout en donnant la priorité au remplacement des chaudières par un raccordement aux réseaux de chaleur et à leurs éventuelles extensions. Dans ces conditions, la géothermie pourrait remplacer de l'ordre de **10,71 à 13,92 TWh/an de la consommation de gaz**. C'est ainsi de l'ordre de **22 % à 29 % de la consommation de chauffage actuellement assurée par du gaz qui pourrait être couverte par de la géothermie de surface, après avoir donné priorité aux réseaux de chaleur existant** et à leurs éventuelles extensions, qui pourraient s'étendre à 250 m autour des réseaux. Ce taux de remplacement est d'autant plus marqué que

l'on se situe en périphérie de la métropole où la densité de consommation est moins élevée, le foncier disponible plus important, et les grands réseaux de chaleur urbains plus éloignés. En ce qui concerne les équipements actuels de production de froid, le taux de remplacement n'a pas été calculé : en effet, dans la BD de BURGEAP, on ne dispose d'aucune information sur les moyens de production de froid (climatisation centralisée, etc.), ni sur les consommations électriques afférentes.

Sommaire

1. Introduction	12
1.1. Contexte et objectifs de l'étude	12
1.2. Technologies d'exploitation de la ressource géothermale de surface	13
1.2.1. <i>Côté sol</i>	14
1.2.2. <i>La pompe à chaleur</i>	15
2. Phase préalable : construction d'un argumentaire sur la géothermie de surface	17
2.1. Réalisation du plaidoyer pour la géothermie de surface	17
2.2. Réalisation de service de données pour la localisation des ouvrages de géothermie de surface	18
3. Evaluation des besoins énergétiques : données BURGEAP	19
3.1. Origine des données et tendance générale	19
3.2. Focus sur les consommations de chaud et ECS	21
3.2.1. <i>Consommation dans le résidentiel</i>	22
3.2.2. <i>Consommation dans le tertiaire</i>	22
4. Cadre réglementaire pour le développement de la géothermie	23
4.1. Les réglementations liées à la géothermie de surface	23
4.1.1. <i>Les textes de loi définissant la géothermie de minime importance</i>	23
4.1.2. <i>Les procédures réglementaires et règles de positionnement des échangeurs relevant de la GMI</i>	26
4.1.3. <i>Les zones réglementaires dans la Métropole du Grand Paris</i>	27
4.2. Réglementations liées à la gestion des eaux et aux usages du sous-sol	29
4.2.1. <i>SDAGE et SAGE</i>	29
4.2.2. <i>Ressources stratégiques</i>	34
4.3. Servitude d'utilité publique ou restriction d'usage	35
5. Contexte géologique et hydrogéologique	36
5.1. Contexte géologique et hydrogéologique : études précédentes	36
5.2. Données du sous-sol disponibles au niveau de la métropole du grand Paris	38
5.2.1. <i>Modèle géologique et connaissances hydrogéologiques globales</i>	38
5.2.2. <i>Aquifères identifiés et piézométries existantes</i>	40
5.2.3. <i>Paramètres du sous-sol</i>	48
5.2.4. <i>Caractéristiques hydrodynamiques</i>	49
5.2.5. <i>Température de l'eau</i>	59
5.2.6. <i>Données issues des tests de réponse thermiques</i>	62
6. Méthode d'estimation du potentiel géothermique sur nappe et sondes	67
6.1. Méthodologie pour la définition du potentiel géothermique sur nappe	67
6.1.1. <i>Description</i>	67
6.1.2. <i>Limites de l'étude</i>	69
6.1.3. <i>Propriétés du modèle considérés lors des simulations</i>	69
6.1.4. <i>Conditions aux limites et conditions initiales</i>	70
6.1.5. <i>Résultats des simulations</i>	73
6.2. Estimation du potentiel géothermique sur sondes	79
6.3. Croisement entre les besoins énergétiques sur sondes et sur nappe pour estimer le potentiel géothermique	80
7. Résultats et analyse	83

7.1. Statistiques à l'échelle de la métropole et restitution Cartographique	83
7.2. Statistiques à l'échelle des communes et des IRIS	88
7.3. Reconversion des chaudières au gaz par géothermie.....	88
8. Conclusion.....	94
9. Bibliographie.....	95
10. Annexes	97

Liste des figures

Figure 1 : Gauche : Champ de sondes géothermiques verticales (SGV). Droite : doublet sur nappe	14
Figure 2 : Fonctionnement de la PAC en mode chauffage (haut) et climatisation (bas)© BRGM	16
Figure 3 : Répartition de la consommation en énergie thermique sur l'ensemble de la Métropole du Grand Paris. Données : BURGEAP. Traitement : BRGM.	20
Figure 4 : Densité de consommation d'énergie thermique agrégée à l'IRIS (log10). Données : BURGEAP. Traitement : BRGM.....	20
Figure 5 : Distribution de la densité de consommation d'énergie thermique à la parcelle par usage. Données : BURGEAP. Traitement : BRGM.	21
Figure 6 : Sources d'énergie pour la consommation de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Données : BURGEAP. Traitement : BRGM.	22
<i>Figure 7 : Illustration des cartes réglementaires de la géothermie de minime importance au niveau de la Métropole du Grand Paris pour la géothermie sur échangeurs ouvert (gauche) et fermé (droite) et pour les profondeurs 50 m (haut), 100 m (milieu) et 200 m (bas) – Source : cartographie réglementaire (Rapport BRGM/RP67102)</i>	<i>28</i>
Figure 8 : Etat chimique des eaux souterraines sur le bassin Seine-Normandie (Agence de l'eau Seine-Normandie, 2019)	30
Figure 9 : SAGE en application au niveau de la Métropole du Grand Paris	32
Figure 10 : Périmètre de vigilance relatif au gisement hydrothermal d'Enghien-les-Bains	33
Figure 11 : Sage Nappe de Beauce et milieux aquatiques associés	34
Figure 12 : Carte géologique de la France au millionième sur le centre du Bassin parisien.....	36
Figure 13 : Coupe schématique du Bassin parisien.....	36
Figure 14 : Echelle stratigraphique et principaux aquifères (Schomburgk et al., 2005).....	38
Figure 15 : Coupe schématique géologique NE-SO de la région Ile-de-France	39
Figure 16 : Profondeur (m) du toit de l'aquifère des calcaires grossiers du Lutétien estimée à partir de la différence entre la surface topographique et l'altitude du toit de l'aquifère du Lutétien. Source : Modèle géologique Ile-de-France	41
Figure 17 : Distribution statistique des épaisseurs (m) pour l'aquifère des Calcaires Grossiers du Lutétien sur le secteur de la Métropole du Grand Paris (Source : Modèle géologique Ile-de-France).....	41

Figure 18 : Extension des Sables de Cuise sur le secteur de la Métropole du Grand Paris (d'après la cartographie de la BD Lisa).....	42
Figure 19 : Profondeur (m) du toit de l'aquifère de l'Yprésien estimée à partir de la différence entre la surface topographique et l'altitude du toit de l'aquifère de l'Yprésien (Source : Modèle géologique Ile-de-France).....	42
Figure 20 : Distribution statistique des épaisseurs (m) pour l'aquifère de l'Yprésien sur le secteur de la Métropole du Grand Paris. Source : Modèle géologique Ile-de-France	43
Figure 21 : Zone d'exploitabilité de la craie, correspondant à la zone de la craie sous faible recouvrement (vert). Source : Modèle géologique Ile-de-France	44
Figure 22 : Profondeur (m) du toit de l'aquifère de la Craie estimée à partir de la différence entre la surface topographique et l'altitude du toit de l'aquifère de la Craie sur le territoire de la Métropole du Grand Paris. Source : Modèle géologique Ile-de-France.....	44
Figure 23 : Distribution statistique des épaisseurs (m) pour l'aquifère de la Craie dans la zone d'exploitabilité sur le secteur de la Métropole du Grand Paris. Source : Modèle géologique Ile-de-France.....	45
Figure 24 : Coupe schématique sud-nord montrant la géométrie des nappes aquifères du Lutétien et de l'Yprésien supérieur (gauche) et entité cartographiée BD Lisa 113AT03 des argiles de Laon semi-perméables sur le secteur de la Métropole du Grand Paris (marron image de droite).	46
Figure 25 : Yprésien Basses-eaux 2013 (courbes isopiézométriques (m)) et interpolation (surface piézométrique). Source RP-64887-FR et BSS.	46
Figure 26 : Lutétien Basses eaux 2013 (courbes isopiézométriques (m)) et interpolation (surface piézométrique) Source RP-64887-FR et BSS.	47
Figure 27 : Yprésien Hautes eaux 2014 (courbes isopiézométriques (m)) et interpolation (surface piézométrique). Source RP-64887-FR et BSS.	47
Figure 28 : Lutétien Hautes eaux 2014 (courbes isopiézométriques (m)) et interpolation (surface piézométrique) Source RP-64887-FR et BSS.	48
Figure 29 : Piézométrie de l'aquifère de la Craie (courbes isopiézométriques (m)) et interpolation (surface piézométrique) Source RP-64887-FR et BSS.	48
Figure 30 : Localisation des ouvrages possédant des informations sur les propriétés intrinsèques des aquifères. Les couleurs correspondent à l'aquifère (Orange : Lutétien ; Bleu : Yprésien et Vert : Craie). Source : BSS et ADES	49
Figure 31 : Gauche : Zonation du lutétien en fonction de trois classes de transmissivité (1E-2 : Bleu ; 1E-3 : Vert et 1E-4 m ² /s : Orange). Droite : Distribution statistique des valeurs de transmissivité pour chaque zone identifiée dans le Lutétien. Source : BSS.	50
Figure 32 : Distributions statistiques des valeurs de conductivité hydraulique pour les trois zones identifiées dans le Lutétien. Source : BSS.....	51
Figure 33 : Distribution du gradient hydraulique moyen dans l'aquifère du Lutétien estimé à partir des périodes de basses eaux et hautes eaux. Source RP-64887-FR et BSS.....	52
Figure 34 : Vitesses d'écoulement estimées pour chaque zone identifiée dans l'aquifère du Lutétien sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.....	53
Figure 35 : Distribution statistique des valeurs de débit maximal exploitable pour l'aquifère du Lutétien. Source : BSS.....	53
Figure 36 : Distribution statistique des valeurs de transmissivité pour l'aquifère de l'Yprésien sur le territoire de la métropole. Source : BSS.....	54

Figure 37 : Distribution statistique des valeurs de conductivité hydraulique pour l'aquifère de l'Yprésien sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.	55
Figure 38 : Distribution du gradient hydraulique moyen dans l'aquifère de l'Yprésien (bleu) estimé à partir des périodes de basses eaux et hautes eaux sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.	56
Figure 39 : Distribution statistique des vitesses d'écoulement estimées pour l'aquifère de l'Yprésien.....	56
Figure 40 : Distribution statistique des valeurs de débit maximal exploitable pour l'aquifère de l'Yprésien sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.	57
Figure 41 : Distribution statistique des valeurs de transmissivité pour l'aquifère de la Craie sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.....	57
Figure 42 : Distribution statistique des valeurs de conductivité hydraulique pour l'aquifère de la Craie sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.	58
Figure 43 : Distribution du gradient hydraulique moyen dans l'aquifère de la Craie (vert) estimé à partir de la carte piézométrique de l'atlas hydrogéologique sur le territoire de la métropole. Source RP-53306-FR et BSS.	58
Figure 44 : Distribution statistique des vitesses d'écoulement estimées pour l'aquifère de la Craie sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.....	59
Figure 45 : Distribution statistique des valeurs de débit maximal exploitable pour l'aquifère de la Craie sur le territoire de la métropole. Source : BSS.	59
Figure 46 : Ouvrages disposant de mesures de température pour les aquifères cibles (Lutétien, Yprésien et Craie) autour de la Métropole du Grand Paris Source : BSS et ADES.....	60
Figure 47 : Chronique de température (°C) mesurée sur l'ouvrage BSS000NHAE à la Courneuve. Source : ADES	61
Figure 48 : Exemples de chroniques de température pour chaque aquifère: Craie (Théméricourt), Villeron (Lutétien) et Penchard (Yprésien), source ADES.....	62
Figure 49 : Coupes géologiques des 25 sondes géothermiques verticales traversées et conductivité thermique correspondante. Source : Modèle géologique Ile-de-France et Banque de données du sous-sol.	63
Figure 50 : Conductivité thermique λ_m et température T_0 mesurées sur les 25 sondes géothermiques verticales pour lesquelles on dispose d'un rapport de Test de Réponse Thermique. Source : Banque de données du sous-sol.	64
Figure 51 : Erreur sur la conductivité thermique prédite par le modèle. Traitement des données de la Banque de Données du Sous-sol.....	65
Figure 52 : Erreur quadratique moyenne mesurée sur l'ensemble des TRT en fonction de la valeur de conductivité mesurée. Traitement des données BSS	66
Figure 53 : Température initiale mesurée T_0 en fonction de la profondeur du forage. Source : BSS	66
Figure 54 : Exemple de plan d'expérience à deux variables. Chaque point correspond à une combinaison pour laquelle le modèle doit être évalué. Le plan est produit par un hypercube latin, où chacune des 10 lignes et 10 colonnes ne contient qu'un seul point à évaluer.....	68
Figure 55 : Courbe monotone du bâtiment considéré pour la détermination de la taille des panaches de doublets. (GRETA project, 2017). L'axe vertical représente la puissance normalisée.	68

Figure 56 : Conditions de type Dirichlet appliquées sur les bords du modèle. (Source : Modèle développé par le BRGM dans le cadre de ce projet)	71
Figure 57 : Exemple des conditions initiales de pression imposées à partir d'un gradient hydraulique de 0.25% suivant l'axe X. Pression en Pa.....	72
Figure 58 : Localisation des puits producteur (bleu) et injecteur (jaune)	72
Figure 59 : Différentiel de température entre source chaude et froide (à gauche) et débit imposés (à droite) pour le cas d'exploitation n°32.....	73
Figure 60 : Champs de température autour du puits injecteur à différents pas de temps (à l'état initial, après 1, 5 et 10 ans de cycle de chauffage/rafraîchissement) montrant l'évolution de la bulle froide au sein de l'aquifère	74
Figure 61 : Vue aérienne du champ de température autour du puits de réinjection après 10 ans de cycle de chauffage/rafraîchissement.....	75
Figure 62 : Exemple de la méthode utilisée pour déterminer la zone perturbée thermiquement (cas n°32 au dernier pas de temps) : 1- Traçage du contour de température de 10°C (correspondant à un différentiel de température de 2°C dans cette étude) ; 2- Calculs des distances x et y permettant d'obtenir la taille du panache thermique dans les deux directions..	76
Figure 63 : Résultats des 133 simulations : dimension du panache dans les directions transversale d_{\perp} et longitudinale d_{\parallel} à l'écoulement. Chaque point représente le résultat d'une simulation.....	76
Figure 64 : Influence de chaque paramètre sur la dimension du panache dans les directions longitudinale d_{\parallel} transversale d_{\perp} . Les étoiles représentent les valeurs de références décrites en Tableau 4.	78
Figure 65 : Synoptique du traitement cartographique.....	81
Figure 66 : Exemple de tests des positions des puits d'un doublet en fonction de la direction et de la vitesse de l'écoulement.....	82
Figure 67 : Consommation de chaud et de froid couvrable ou non couvrable par géothermie (GTH)	83
Figure 68 : Énergie que peut fournir la géothermie en chauffage sur chaque commune en GWh/an, sans prise en compte de la priorité à donner aux réseaux de chaleur.	84
Figure 69 : Taux de couverture des besoins de chauffage par géothermie, sur chaque commune normalisé entre 0 et 1. Pas de prise en compte de la priorité à donner aux réseaux de chaleur.	85
Figure 70 : Énergie que peut fournir la géothermie en froid sur chaque commune en GWh/an.	86
Figure 71 : Taux de couverture des besoins de froid par géothermie, sur chaque commune normalisé entre 0 et 1	87
Figure 72 : Taux de couverture de la consommation de chaud τ_E en fonction de la densité de consommation ρ_E à l'échelle des IRIS (à gauche) et des communes (à droite)	88
Figure 73 : Consommation de chaud actuel, faisant apparaître les consommations de gaz et ce qui est couvert par géothermie, après avoir donné priorité aux réseaux.	89
Figure 74 : Contribution de la géothermie de surface au remplacement des chaudières au gaz naturel, après avoir donné priorité aux réseaux de chaleur avec extension de 50 m. Représentation par commune (en haut) et par IRIS (en bas).....	90
Figure 75 : Énergie actuellement livrée par les réseaux de chaleur (ligne pointillée bleue) dans chaque EPT, et consommation actuelle de tous les bâtiments dont la parcelle recoupe un tampon	

autour du tracé de ce réseaux, pour une épaisseur de tampon comprise entre 50 m et 500 m (ligne pointillée rouge).....	91
Figure 76 : Consommation de chaud actuelle, faisant apparaître les consommations de gaz et ce qui est couvrable par géothermie, par agrégat de consommation de chaud demandé (échelle de la métropole).	92
Figure 77 : Sources d'énergie par parcelle. Le chiffre placé à droite représente le nombre de parcelles qui actuellement couvertes par du gaz, à plus de 250 d'un RC, qui pourraient être équipées de géothermie (échelle de la métropole).	92
Figure 78 : Agrégat de consommation de chaud demandé, par EPT. Légende identique à la Figure 73. Les étendues des agrégats sont mentionnées dans la Figure 76, et sont identiques pour tous les EPT.....	93
Figure 79 : Maillage utilisé pour simuler l'exploitation géothermique sur nappe dans le cas n°1 avec en bleu la partie réservoir, utile à l'écoulement et en jaune les parties moins perméables	99
<i>Figure 80 : Illustration du maillage en prisme et du raffinement utilisé autour des forages de production et d'injection.....</i>	<i>99</i>

Liste des annexes

Annexe 1	Description des modèles thermo-hydrodynamiques numériques de doublets	98
Annexe 2	Cartographie du potentiel par EPT - Chaud	100
Annexe 3	Taux de couverture par EPT – Chaud	113
Annexe 4	Cartographie du potentiel par EPT – Froid	125
Annexe 5	Taux de couverture par EPT - Froid	137

1. Introduction

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Le 12 novembre 2018, le Conseil de la Métropole du Grand Paris (MGP) a adopté son Plan Climat Air Energie Métropolitain (PCAEM). Ce document stratégique a pour objectif d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et vise l'accélération de la transition énergétique, avec un parc immobilier bâti 100% bas-carbone et un mix énergétique composé à 60% d'énergies renouvelables et de récupération en 2050, dont 30% produites localement.

Pour concrétiser cette ambition, la Métropole a inscrit parmi ses priorités d'actions l'élaboration d'un schéma directeur énergétique métropolitain pour coordonner l'évolution des réseaux de distribution d'électricité, de gaz, de chaleur et de froid dans un cadre de renforcement de la maîtrise de la demande d'énergie, et de développement de la production locale d'énergies renouvelables et de récupération.

Dans ce contexte, la Métropole du Grand Paris a réuni l'ADEME, l'APUR et le BRGM le 30 mars 2018 pour accompagner la transition énergétique, au travers du développement des énergies renouvelables (photovoltaïque, méthanisation, géothermie, ...) suivant une approche globale, incluant l'identification des ressources, la maîtrise de la demande, les questions d'aménagement et d'urbanisme, les contraintes techniques et opérationnelles.

Concernant la mobilisation des ressources du sous-sol, la Métropole du Grand Paris souhaite être en mesure de faire émerger des projets de géothermie de surface sur les secteurs favorables de son territoire, permettant de répondre aux objectifs du Plan Climat métropolitain, étant données les ressources considérables dont dispose le territoire. Ces ressources sont actuellement exploitées par environ 900 opérations de géothermie de surface (source : observatoire de la géothermie de surface à fin Août 2021, sur la base des données présentes en banque du sous-sol¹).

Afin d'établir un plan d'exploitation opérationnel à l'horizon 2021 pour la géothermie de surface sur nappe (parfois appelée géothermie de surface sur aquifère²) et sondes verticales, l'étude envisagée ici vise à :

- i) estimer et actualiser la cartographie de la ressource géothermique de surface³ sur nappe et sur sondes (pour le potentiel sur nappe, il s'agit d'actualiser la cartographie des ressources existante en intégrant les nouvelles données acquises, pour le potentiel sur sondes, il s'agit de prendre en compte des données qui ne figuraient pas dans ces cartographies existantes)

¹ <https://www.geothermies.fr/viewer>

² Les formations géologiques qui composent le sol ont, lorsqu'elles sont assez perméables et poreuses, la capacité de permettre les écoulements verticaux et transversaux de l'eau et de l'emmagasiner. Elles constituent alors des aquifères dans lesquels le comportement des eaux souterraines est très variable selon les caractéristiques physiques et structurales des terrains. Dans la **zone saturée** de l'aquifère, l'eau occupe la totalité des vides disponibles (fissures, pores des sédiments ou des roches), il s'agit de la nappe.

³ On nomme ressource géothermique de surface la chaleur disponible dans le sous-sol pouvant être exploité pour satisfaire les besoins énergétiques. On nomme potentiel l'estimation de la quantité d'énergie pouvant être valorisée grâce à une solution technologique (ici via les sondes géothermiques verticales ou bien les doublets sur nappe).

- ii) réaliser un croisement entre l'énergie pouvant être produite à partir de la valorisation des ressources géothermiques profondes et les besoins énergétiques identifiés en surface pour les bâtiments existants et les nouveaux projets d'urbanisme.

Le programme d'étude envisagé comporte deux phases principales.

La première phase consiste à établir un **argumentaire** sur la géothermie de surface (0 - 200 m) à partir des retours d'expérience des opérations de géothermie sur le territoire de la Métropole du Grand Paris (action menée en partie par le BRGM en lien avec APUR, et en partie par l'ADEME et la Métropole). Cette action a conduit à la production d'un plaidoyer pour la géothermie de surface adapté au territoire de la Métropole du Grand Paris et à la production d'un service web permettant la localisation des installations de géothermie de surface sur le secteur.

La seconde phase consiste à mener une **étude du potentiel de développement** de la géothermie de surface sur le territoire de la Métropole du Grand Paris. Cette phase a permis d'estimer le potentiel d'exploitation de la ressource géothermique au droit de la Métropole avec les systèmes de type sondes géothermiques et avec les systèmes de type doublets sur nappe puis de croiser ces résultats avec les estimations de besoins énergétiques.

1.2. TECHNOLOGIES D'EXPLOITATION DE LA RESSOURCE GÉOTHERMALE DE SURFACE

La géothermie désigne l'ensemble des technologies qui permettent d'exploiter la chaleur de la terre.

On considère conventionnellement comme ressource géothermale de surface la source d'énergie (calories et frigories) utilisable et contenue dans le sol à une profondeur comprise entre 0 et 200 m et une température généralement inférieure à 30°C. La valorisation de cette ressource nécessite généralement la mise en place d'une pompe à chaleur qui élève ou abaisse la température extraite du sol pour la production de chaleur ou de froid. On distingue deux types de ressources : l'énergie présente directement dans le sol et l'énergie contenue dans l'eau des aquifères souterrains.

La production de chaud vise principalement à alimenter les infrastructures en eau chaude sanitaire (et chauffage des piscines), à assurer le chauffage des bâtiments et la production de chauffage pour les procédés industriels.

La production de froid vise principalement au rafraîchissement ou à la climatisation des bâtiments.

Le dispositif permettant de valoriser les ressources géothermales de surface est constitué de trois composants :

- Le côté sol : pour valoriser l'énergie présente dans le sous-sol ;
- La pompe à chaleur : appareil thermodynamique qui permet de transférer l'énergie thermique d'une « source froide » vers une « source chaude ». En d'autres termes la pompe à chaleur permet d'amener un fluide à la température souhaitée via un dispositif utilisant de l'électricité ;
- Le côté bâtiment : équipement situé à l'intérieur des bâtiments qui transfère le chaud ou le froid vers la destination finale (pièces, process industriel, piscine, etc.).

1.2.1. Côté sol

Côté sol, plusieurs types d'échangeurs géothermiques permettent d'échanger de la chaleur entre le sous-sol et l'installation de surface.

Les **sondes géothermiques verticales** (SGV) sont des forages parcourus par un ou deux tubes en U dans lesquels un fluide caloporteur (eau ou un mélange d'eau et de mono-propylène glycol) circule pour échanger du chaud ou du froid par diffusion (cf. Figure 1 gauche). Les sondes servent autant à de petites installations, comme des maisons individuelles (SGV unique ou multiples), que des installations plus importantes : hôtels, résidences, bureaux, complexes sportifs ou ZAC (champs de SGV). **Les systèmes SGV sont particulièrement efficaces s'ils servent à des fins de chauffage et de refroidissement combinés.** En effet la chaleur injectée dans le sol pendant l'été en périodes de refroidissement peut être réutilisée pour le chauffage en hiver. Par conséquent, les champs de SGV sont très efficaces dans les bâtiments dont la demande de refroidissement est relativement élevée, comme les bureaux ou les hôpitaux.

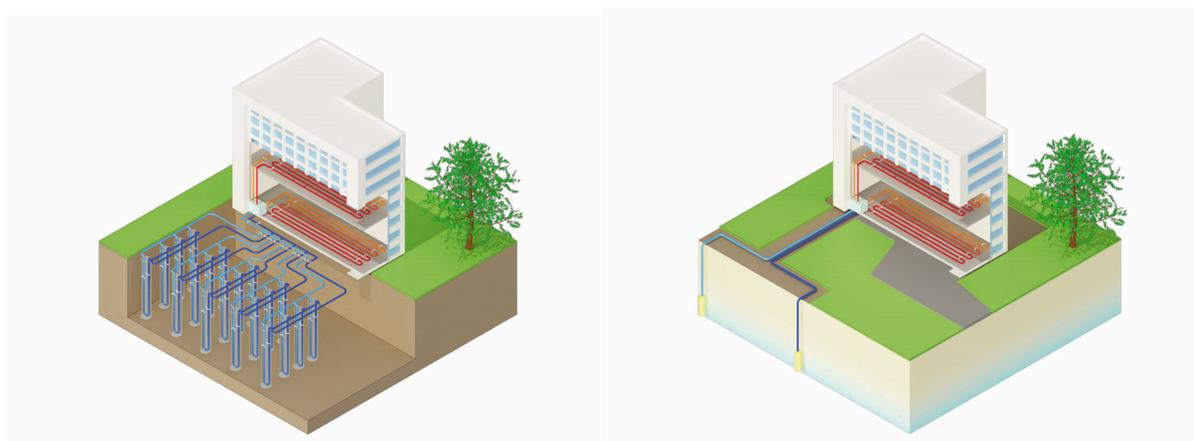


Figure 1 : Gauche : Champ de sondes géothermiques verticales (SGV). Droite : doublet sur nappe

Les **systèmes en boucle ouverte** (aussi nommés **doublets sur nappe**) échangent la chaleur directement avec l'eau souterraine, extraite par un ou plusieurs puits producteurs et généralement réinjectée dans le même aquifère par un ou plusieurs autres puits injecteurs (cf. Figure 1 droite). Le système est nommé « ouvert » car le fluide qui parcourt le dispositif est prélevé dans un aquifère sous-terrain et réinjecté également dans ce même aquifère (contrairement aux SGV où un fluide secondaire circule en boucle fermée). Les caractéristiques des masses d'eau souterraine, comme leur profondeur, leur température et la vitesse d'écoulement de la nappe, influencent la performance de l'installation de surface. Ainsi, l'installation d'un système en boucle ouverte nécessite des connaissances hydrogéologiques spécifiques à l'échelle locale. Si un aquifère productif est disponible à une profondeur raisonnable, l'utilisation de systèmes en boucle ouverte présente des avantages par rapport aux systèmes en boucle fermée. L'échange direct de chaleur avec l'eau souterraine permet en effet **une performance supérieure** par comparaison avec des systèmes en boucle fermée et est **plus avantageux du point de vue économique**.

En outre, la géothermie de surface peut permettre de valoriser directement (sans apport de la pompe à chaleur) la température du sous-sol pour le rafraîchissement naturel d'un bâtiment en été. Cette technique s'appelle le **géocooling**. Il s'agit d'un mode de refroidissement très efficace, et les seules consommations électriques sont dues aux pompes de puits et aux circulateurs du circuit de distribution. La pompe à chaleur n'étant pas sollicitée, cela rend cette solution particulièrement économique. Le géocooling peut être mis en place pour le refroidissement de machines et de procédés industriels, de centres de données, le confort thermique dans les

bâtiments, etc. Néanmoins, si les besoins de frais dépassent les capacités du sous-sol, par exemple si la température du sous-sol soit est trop élevé pour l'usage souhaité, alors la mise en place d'une pompe à chaleur pour la production du froid devient nécessaire.

Enfin, il existe également un troisième type d'échangeur géothermique, les **échangeurs très superficiels**. Tout comme les sondes géothermiques verticales, ce sont des échangeurs en boucle fermée. Ils sont installés à une profondeur d'environ un à quatre mètres et fréquemment utilisés pour des maisons individuelles puisque leur installation nécessite une zone non construite d'une surface du même ordre de grandeur que la surface chauffée du bâtiment. Il s'agit par exemple des échangeurs horizontaux et corbeilles. La présente étude n'est pas pertinente pour ce type d'échangeurs dans la mesure où ces échangeurs se prêtent peu à des zones urbaines denses.

1.2.2. La pompe à chaleur

En mode chauffage (cf. Figure 2 haut), la pompe à chaleur consomme de l'électricité pour transférer la chaleur présente dans le sol (température d'entrée) au bâtiment. La plage typique de températures d'entrée se situe entre 0 et 5 °C pour les sondes géothermiques verticales (SGV) et entre 10 et 15 °C pour l'utilisation de l'eau souterraine. Les niveaux de température du côté bâtiment se situent dans la plage entre 25 et 35 °C pour le chauffage par le sol dans des bâtiments modernes et jusqu'à 45 à 60 °C pour l'eau chaude sanitaire. Le ratio entre la chaleur fournie au bâtiment et l'électricité consommée par la pompe à chaleur est appelé coefficient de performance (COP) ou, lorsqu'il est calculé sur la saison entière, coefficient de performance saisonnier (SPF). Ces coefficients sont très dépendants des niveaux de température de la source chaude et de la source froide : plus l'écart de température est faible entre le sol et le côté bâtiment, plus la performance du système est élevée. La pompe à chaleur (PAC) peut aussi produire du froid par climatisation (cf. Figure 2 bas).

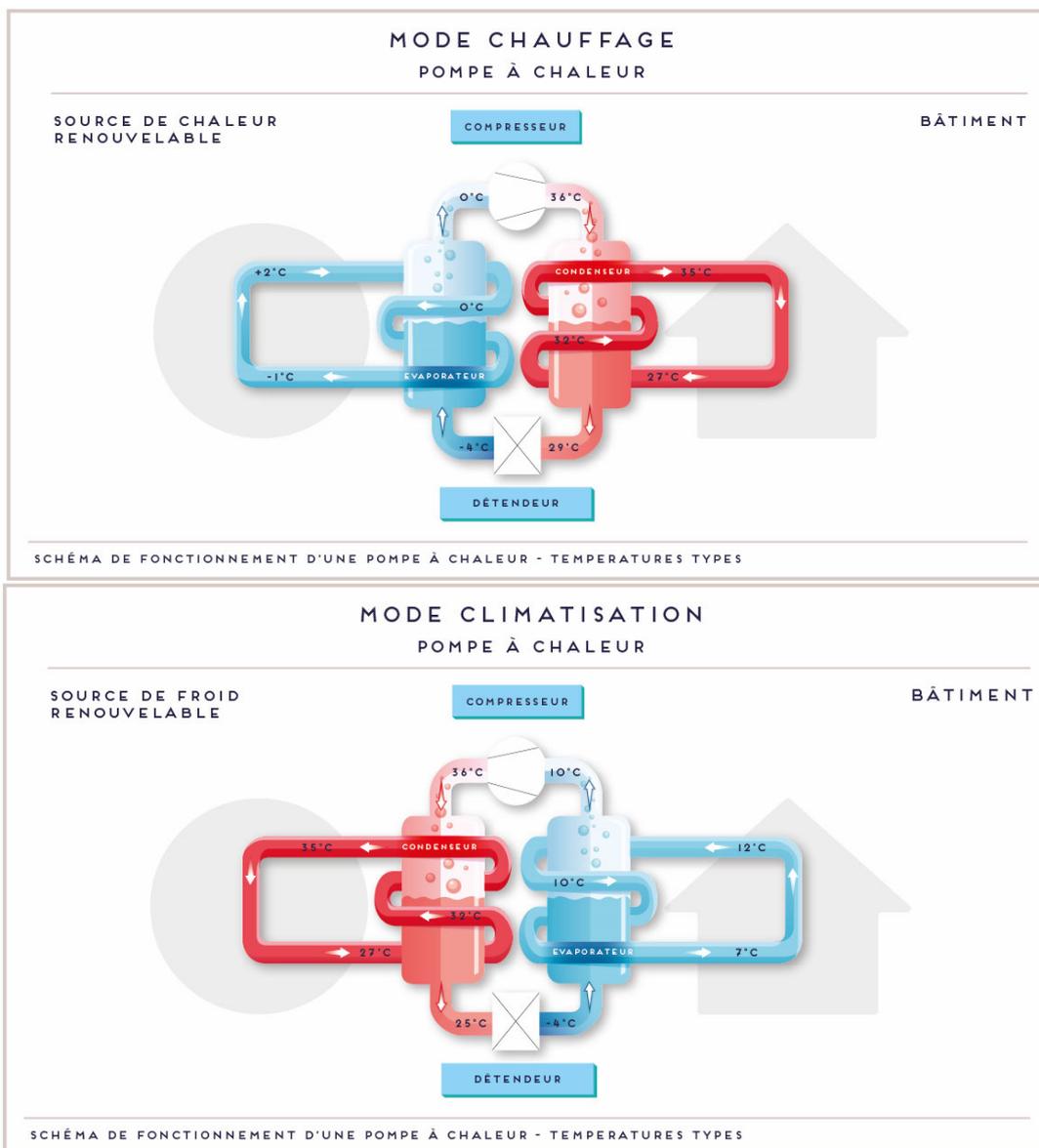


Figure 2 : Fonctionnement de la PAC en mode chauffage (haut) et climatisation (bas)© BRGM

2. Phase préalable : construction d'un argumentaire sur la géothermie de surface

2.1. RÉALISATION DU PLAIDOYER POUR LA GÉOTHERMIE DE SURFACE

Le plaidoyer pour la géothermie de surface a été adapté du guide national « *6 bonnes raisons de choisir la géothermie* », et a été réalisé conjointement par la Métropole du Grand Paris, l'ADEME et le BRGM. Le guide national est disponible à l'adresse suivante : <https://www.geothermies.fr/outils/guides/geothermie-une-energie-performante-et-durable-pour-les-territoires-6-bonnes-raisons>.

Le plaidoyer produit dans le cadre de la convention permet de « régionaliser » les arguments construits à une échelle nationale initialement et ainsi d'adapter les cartes et illustrations, les arguments chiffrés, le choix de certains témoignages et l'ajout d'un argument, celui de la facilité de développement des projets grâce à la réglementation.

La mise en forme a été effectuée de manière à afficher une cohérence graphique entre le plaidoyer national et ce document régional.

Le guide « ***La géothermie de surface : une énergie performante et durable pleinement adaptée au territoire de la Métropole du Grand Paris – 7 bonnes raisons de choisir la géothermie*** » est présenté sur le site Géothermies.fr, dans la rubrique Spécificités régionales de l'Espace régional Ile de France⁴.

Ce guide repose sur sept arguments :

1. Une facture énergétique maîtrisée
2. L'exemplarité environnementale
3. La promotion des ressources locales
4. Une énergie adaptable pour anticiper les futurs défis
5. Une énergie qui s'intègre harmonieusement à son environnement
6. Une technologie qui a fait ses preuves
7. Un développement des projets facilité par la réglementation

Les arguments sont illustrés par une série de témoignages choisis de manière à être représentatifs :

- représentativité de tous les types de bâtis existants ;
- représentativité des différentes nappes déjà exploitées ;
- représentativité de la répartition du nombre d'opérations sur sonde ou sur nappes ;
- choix de projets de petites tailles et d'autres plus conséquents ;
- répartition géographique des opérations la plus homogène possible.

⁴https://www.geothermies.fr/sites/default/files/inline-files/brochure-geothermie%20Metropole%20Grand%20Paris_7%20bonnes%20raisons%20de%20choisir%20le%20gth_VF2_0.pdf

2.2. RÉALISATION DE SERVICE DE DONNÉES POUR LA LOCALISATION DES OUVRAGES DE GÉOTHERMIE DE SURFACE

Le service de données produit est un Webservice visant à diffuser un « Inventaire des opérations de géothermie de surface en fonctionnement sur le territoire de la Métropole du Grand Paris ». Ce service va permettre la prise en charge à distance de données pour leur affichage et leur stockage. Il peut être consommé sur un espace cartographique ou bien par un logiciel de type SIG pour visualiser directement les données qu'il contient. Cet inventaire préfigure la mise en place d'un Observatoire de la géothermie de surface en cours de développement à l'échelle nationale, en partenariat avec l'ADEME et l'AFPG (association française des professionnels de la géothermie).

La première étape de cet inventaire a été d'opérer un recensement des informations disponibles en Banque de données du Sous-Sol (BSS, la banque de données de référence pour les informations sur la géothermie, gérée par le BRGM), et de les compléter à l'aide des données disponibles via d'autres canaux tels que les informations collectées par l'AFPG, l'ADEME et grâce aux échanges avec les professionnels de la filière (foreurs, bureaux d'études, maîtres d'ouvrage). Cette première étape a permis de passer de 417 forages de géothermie de surface (sondes et aquifères confondus) recensés en début de projet (mai 2020) à 1138 forages en fin de projet (septembre 2021).

La seconde étape a servi à réaliser les requêtes informatiques permettant d'afficher les différentes informations désirées, et à les mettre en forme. Les adresses des trois services ainsi constitués sont⁵ :

- Forages / Sondes géothermiques – dossiers **finalisés** :
http://infoterre.brgm.fr/geoserver/BSS_GTHSURF_MGP_FINALISE/ows?
- Forages / Sondes géothermiques – dossiers **confirmés** :
http://infoterre.brgm.fr/geoserver/BSS_GTHSURF_MGP_CONFIRME/ows?
- Forages / Sondes géothermiques – dossiers **déclarés** :
http://infoterre.brgm.fr/geoserver/BSS_GTHSURF_MGP_DECLARE/ows?

Les services concernant les forages déclarés et confirmés ne présentent que leur localisation. En revanche le service concernant les forages finalisés présente les données disponibles pour ces forages, principalement : Identifiant BSS, numéro de déclaration, profondeur, type de géothermie (nappe ou aquifère), nappe captée (si géothermie sur nappe).

⁵ Attention, il ne s'agit pas d'adresses de site internet pouvant être consultés sur un navigateur web mais de webservices à saisir dans les logiciels de type SIG, ou sur des services cartographiques. Ces informations sont également accessibles sur l'espace cartographique <https://www.geothermies.fr/viewer/> grâce à la fonction import en copiant les liens ci-dessus dans l'onglet Couches/Import/ et en cochant WMS puis en cliquant sur Importer et en cochant le GeoServer Web Map Service à importer ou bien en ajoutant les éléments directement dans l'onglet Couches (menu à droite) puis en se plaçant dans +Ajout/ Géothermie de surface/Opération.

3. Evaluation des besoins énergétiques : données BURGEAP

3.1. ORIGINE DES DONNÉES ET TENDANCE GÉNÉRALE

Les caractéristiques de besoin et de consommation d'énergie thermique ont été estimées par le bureau d'étude BURGEAP dans le cadre du diagnostic du Schéma Directeur Energétique Métropolitain (SDEM) réalisé par la Métropole du Grand Paris et son AMO BURGEAP. BURGEAP a communiqué ces données à la demande de la Métropole au BRGM.

Dans ce qui suit, on qualifiera d'énergie thermique les consommations en chauffage, eau chaude sanitaire (ECS) et climatisation. Les données communiquées couvrent 581 885 parcelles identifiées par leur « identifiant parcellaire » ou IDU, dont 508 543 avec au moins une consommation en énergie thermique. Chaque ligne de la base de donnée correspond à une parcelle. Chaque ligne la consommation en énergie thermique fait apparaître cinq catégories :

- le chauffage résidentiel (champ CONSOR_CHAUF_REELFINAL de la base de données communiquée par BURGEAP) ;
- l'eau chaude sanitaire pour le résidentiel (champ CONSOR_ECS_REELFINAL) ;
- le chauffage tertiaire (champ CONSOT_CHAUF_REELFINAL) ;
- l'eau chaude sanitaire pour le tertiaire (champ CONSOT_ECS_REELFINAL) ;
- la climatisation pour le tertiaire (champ CONSOT_CLIM_REELFINAL).

Les parcelles sont regroupées par entités de taille décroissante :

- dans 11 Établissement Public Territoriaux (EPT), et la Ville de Paris ;
- dans 150 communes, chaque arrondissement de Paris étant assimilé à une commune ;
- dans 2861 IRIS (Îlots Regroupés pour l'Information Statistique).

La consommation en énergie thermique de la Métropole du Grand Paris (somme des 5 champs mentionnés ci-dessus) est de l'ordre de **50,9 TWh/an** (cf. Figure 3). Pour chaque IRIS, on peut définir la densité de consommation comme le ratio entre la consommation sur cet IRIS et la superficie de l'IRIS. Cette consommation varie typiquement d'un facteur 1 à 100. Elle est bien plus importante dans Paris intra-muros et en proche couronne que dans les communes périphériques, ce qui s'explique par une plus grande densité de construction dans le cœur de la Métropole du Grand Paris (cf. Figure 4). On retrouve une tendance similaire à la parcelle (cf. Figure 5).

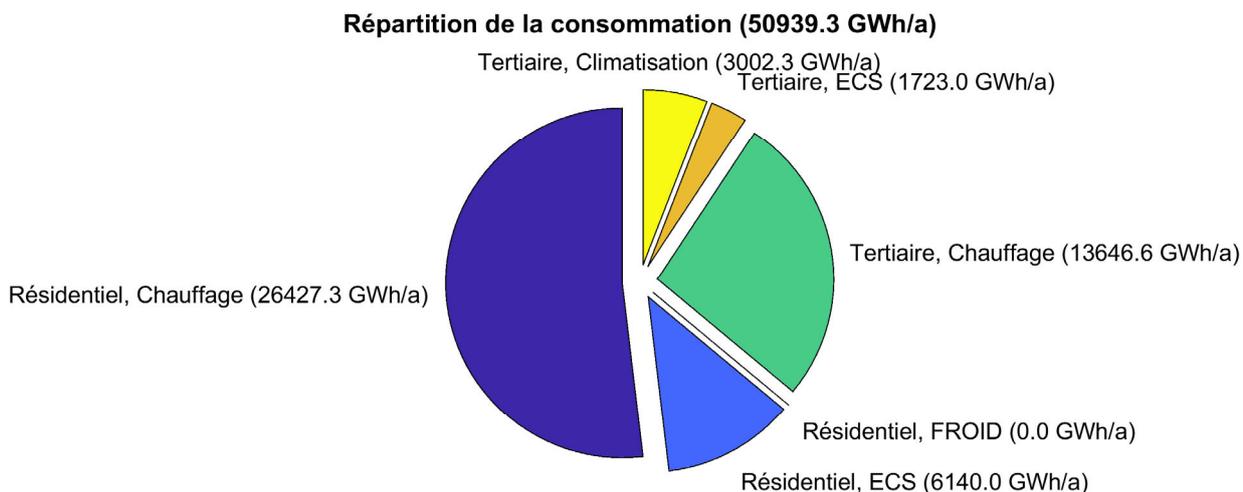


Figure 3 : Répartition de la consommation en énergie thermique sur l'ensemble de la Métropole du Grand Paris. Données : BURGEAP. Traitement : BRGM.

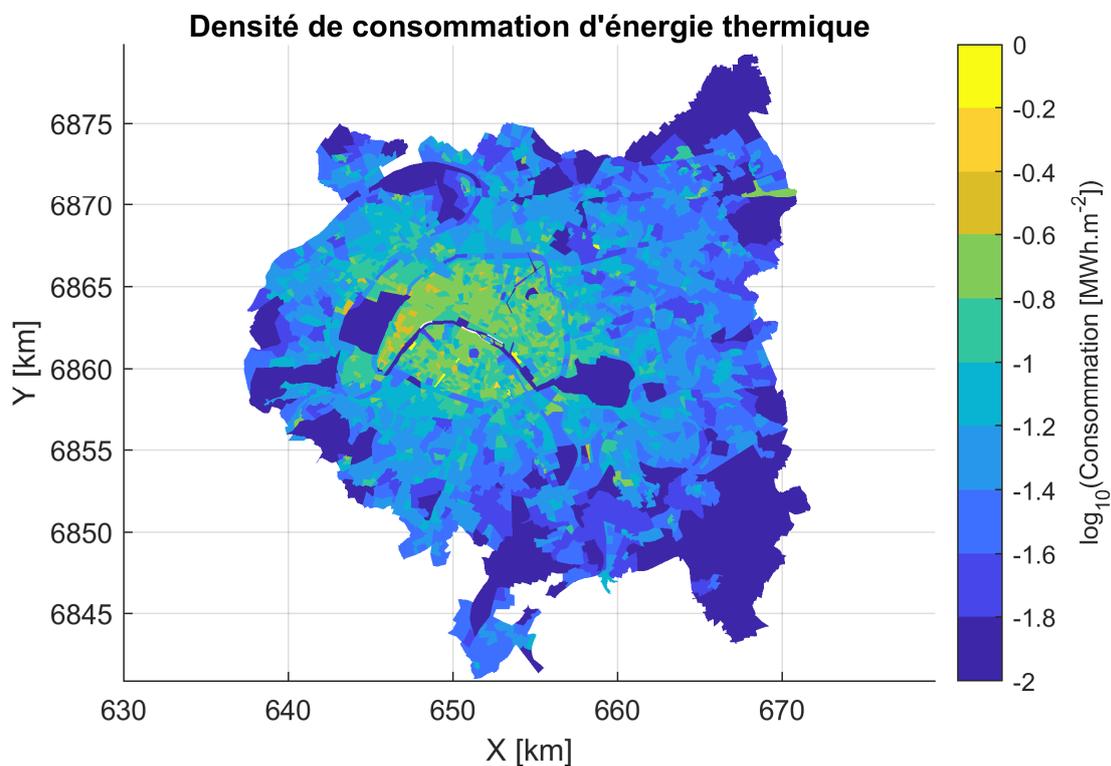


Figure 4 : Densité de consommation d'énergie thermique agrégée à l'IRIS (\log_{10}). Données : BURGEAP. Traitement : BRGM.

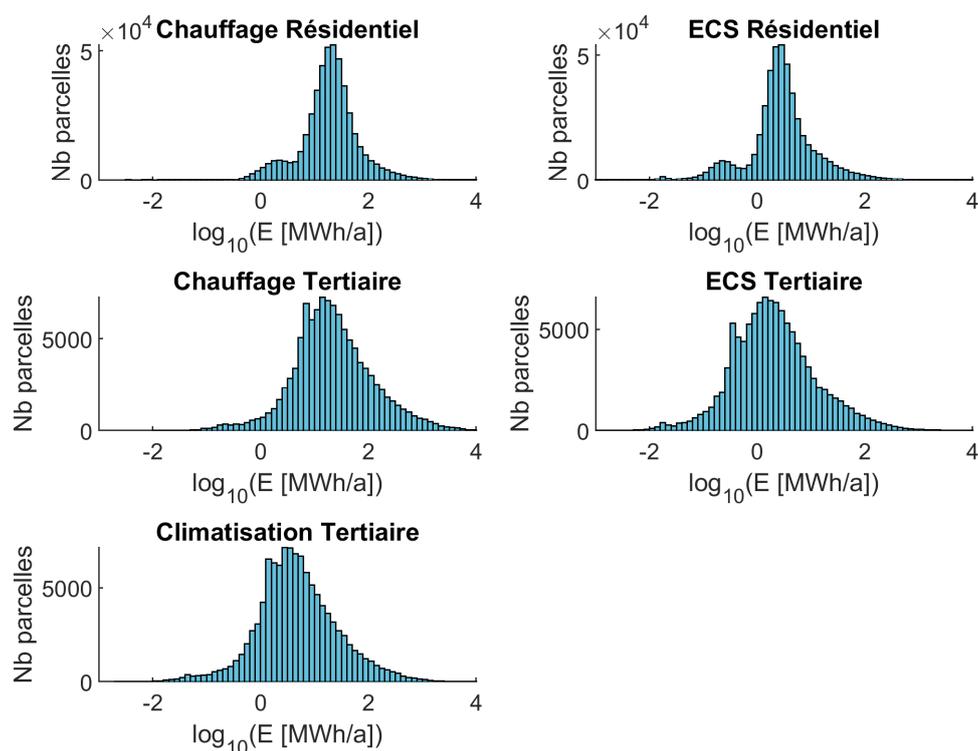


Figure 5 : Distribution de la densité de consommation d'énergie thermique à la parcelle par usage. Données : BURGEAP. Traitement : BRGM.

3.2. FOCUS SUR LES CONSOMMATIONS DE CHAUD ET ECS

D'après les estimations de BURGEAP, la consommation de chauffage et d'eau chaude sanitaire est majoritairement couverte par du gaz, aussi bien dans le tertiaire que le résidentiel (cf. Figure 6). BURGEAP a communiqué une consommation de gaz totale ; or une partie du gaz est utilisée pour la cuisson des aliments. La consommation pour la cuisson est estimée suivant la méthode décrite aux § 3.2.1 et 3.2.2, et est retranchée de la consommation globale de gaz pour estimer le gaz utilisé pour le chauffage et la production d'ECS qui apparaît dans la Figure 6

La consommation d'électricité pour le chauffage n'était pas fournie dans les données de BURGEAP, la Figure 6 suppose donc que cette valeur correspond à la différence entre la consommation globale et les consommations couvertes par le gaz, les réseaux de chaleur, le fioul et le bois-énergie.

Ainsi, la consommation en chauffage et ECS des logements et des locaux tertiaires serait couverte à hauteur de :

- 62 % par du gaz,
- 18 % par de l'électricité,
- 12 % par les réseaux de chaleur,
- 6 % par du fioul, (la consommation de fioul est de 2,33 TWh/an pour le résidentiel et 0,61 TWh/a pour le tertiaire).
- 2 % par du bois.

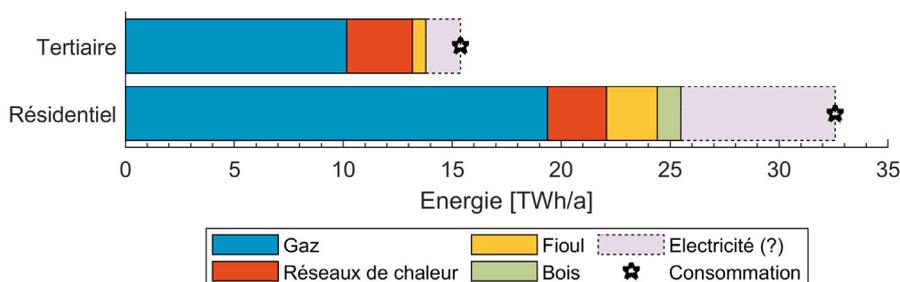


Figure 6 : Sources d'énergie pour la consommation de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Données : BURGEAP. Traitement : BRGM.

3.2.1. Consommation dans le résidentiel

La consommation de gaz dans le résidentiel est estimée à 20,91 TWh/an (champ CONSOR_GAZ). La consommation d'énergie pour la cuisson des aliments est estimée à 2,32 TWh/an (champ CONSOR_CUISS_REELFINAL). En supposant que si un logement dispose de gaz (CONSOR_GAZ non nul), celui-ci est utilisé pour la cuisson et pour les besoins de chauffage et d'ECS, l'exploitation de la base de données BURGEAP montre qu'environ 1,54 TWh/an de gaz sert à la cuisson.

La consommation de chauffage et l'ECS du résidentiel (32,27 TWh/an) serait couverte :

- par le gaz à hauteur de 19,37 TWh/an (i.e 20,91 TWh/an auxquels on déduit 1,54 TWh/an servant pour la cuisson), soit environ 59 % de la consommation de chauffage et ECS cumulé ;
- par les réseaux de chaleur à hauteur de 2,71 TWh/an, soit environ 8 % de la consommation.

3.2.2. Consommation dans le tertiaire

La consommation de gaz dans le tertiaire est estimée à 10,92 TWh/an (champ CONSOT_GAZ). La consommation d'énergie pour la cuisson des aliments est estimée à 1,24 TWh/an (champ CONSOT_CUISS_REELFINAL) dont 0,83 TWh/an par gaz.

La consommation de chauffage et d'ECS du tertiaire (15,31 TWh/an) serait couverte :

- par le gaz à hauteur de 10,09 TWh/an, soit environ 56 % de la consommation de chauffage et ECS cumulé.
- par les réseaux de chaleur à hauteur de 3,02 TWh/an, soit environ 19 % de la consommation.

4. Cadre réglementaire pour le développement de la géothermie

4.1. LES RÉGLEMENTATIONS LIÉES À LA GÉOTHERMIE DE SURFACE

Pour que le cadre réglementaire de la géothermie de minime importance (GMI) s'applique à une installation, des conditions d'implantations et des prescriptions doivent être respectées.

Le site d'implantation de l'installation ainsi que les techniques de forage et de terrassement de l'échangeur géothermique, en boucle ouverte et en boucle fermée, doivent :

- préserver la ressource en eau locale ;
- prendre en compte les enjeux sanitaires ;
- respecter les autres usages ou ouvrages locaux du sous-sol.

Ces conditions d'implantations et prescriptions sont précisées dans l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance. Les différentes considérations réglementaires et prescriptions à prendre en compte et leur application sur le territoire de la Métropole du Grand Paris sont présentés dans les paragraphes suivants.

Sont présentés ici les textes de loi relatifs à la géothermie de « minime importance » et les procédures de déclaration des installations et activités associés.

4.1.1. Les textes de loi définissant la géothermie de minime importance

a) Décret n°2015-15 du 8 janvier 2015 et Code Minier

Le principal texte applicatif de la géothermie dite de « minime importance » (GMI) est le **décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015**⁶ qui précise notamment les conditions d'appartenance des exploitations à la géothermie de minime importance et les contraintes et zones réglementaires associées.

Ce texte a été adopté en application **des articles L. 112-1⁷ et L. 112-3⁸ du Code Minier** et il modifie le **décret n° 78-498 du 28 mars 1978**⁹ modifié relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie, le **décret n° 2006-649 du 2 juin 2006**¹⁰ modifié relatif aux travaux miniers, aux

6

https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=EC3A8E5ACDE68FAF8741D36411C70C0F.tpdj_o03v_1?cidTexte=JORFTEXT000030073515&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id&idJO=JORFCONT000030073299

7

https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do;jsessionid=3648590E7B12FDD3CB583E49202528E3.tplgfr35s_2?idArticle=LEGIARTI000025560263&cidTexte=LEGITEXT000023501962&categorieLien=id&dateTexte=

8

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000025557143&cidTexte=LEGITEXT000023501962&dateTexte=20181011>

9

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000864366&categorieLien=cid#LEGIARTI000032773812>

¹⁰ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000609345>

travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains, l'annexe de l'article R. 122-2 et l'article R. 414-27 du code de l'environnement.

Le décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015 définit les activités ou installations de géothermie dite "de minime importance" qui n'ont pas d'incidence significative sur l'environnement et il en élargit le périmètre. Ainsi, sont exclus du régime du code minier les puits canadiens, les géo-structures thermiques, les échangeurs géothermiques fermés d'une profondeur inférieure à 10 mètres et les échangeurs géothermiques ouverts dont au moins un échangeur fonctionne en circuit ouvert répondant aux conditions mentionnées au II de l'article 3 du décret n° 78-498 du 28 mars 1978 modifié, et dont aucun des ouvrages de prélèvement ou de réinjection ne dépasse la profondeur de 10 mètres.

L'article 3 du décret n°78-498¹¹ relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie modifié par décret n°2016-835 du 24 juin 2016 définit les différents gîtes géothermiques relevant de la minime importance comme suit :

« II.-Pour l'application de l'article L. 112-3 du code minier, sont considérées comme des exploitations de gîtes géothermiques à basse température **relevant du régime de la minime importance les activités géothermiques ci-après** :

1° Pour les activités ne recourant qu'à des **échangeurs géothermiques fermés**, celles qui remplissent les conditions suivantes :

- a) La **profondeur du forage est inférieure à 200 mètres** ;
- b) La **puissance thermique maximale** échangée avec le du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est **inférieure à 500 kW** ;

2° Pour les activités recourant au moins à un **échangeur géothermique ouvert**, celles qui remplissent les conditions suivantes :

- a) La **température de l'eau prélevée** en sortie des ouvrages de prélèvement est **inférieure à 25 °C** ;
- b) La **profondeur du forage est inférieure à 200 mètres** ;
- c) La **puissance thermique maximale** échangée avec le du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est **inférieure à 500 kW** ;
- d) Les **eaux prélevées sont réinjectées dans le même aquifère et la différence entre les volumes d'eaux prélevés et réinjectés est nulle** ;
- e) Les débits prélevés ou réinjectés sont inférieurs au seuil d'autorisation fixé à la rubrique 5.1.1.0 de l'article R. 214-1 du code de l'environnement (à savoir, 80 m³/h).

Toutefois, les activités mentionnées aux 1° et 2° ne relèvent pas de la minime importance lorsqu'elles sont situées dans des **zones rouges** [voir section b) ci-dessous], **où les activités géothermiques présentent des dangers ou inconvénients graves, définies à l'article 22-6 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers**, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains.

III.-Les modalités de calcul ou la définition des caractéristiques mentionnées au II sont précisées par un arrêté conjoint des ministres chargés des mines et de l'environnement. »

11

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000864366&categorieLien=cid#LEGIARTI000032773812>

b) Les arrêtés du 25 juin 2015

En application du Code Minier, du décret n°78-498 du 28 mars 1978 et du décret 2006-649 du 2 juin 2006 modifié, quatre arrêtés du 25 juin 2015 encadrent les pratiques et la reconnaissance d'une compétence en matière de forage géothermique :

- **Arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance** : l'arrêté précise, outre les conditions relatives à l'implantation d'une installation de géothermie de minime importance, les mesures à mettre en œuvre lors de la réalisation de l'ouvrage géothermique, son exploitation et sa cessation d'exploitation ainsi que les modalités de surveillance et d'entretien de l'installation. Ces dispositions visent à garantir la pérennité des installations et de prévenir les risques sur l'environnement notamment pour protéger le patrimoine bâti et les ressources en eau.
- **Arrêté du 25 juin 2015 relatif à la qualification des entreprises de forage intervenant en matière de géothermie de minime importance** : l'arrêté vise à s'assurer que les ouvrages réalisés dans le cadre de la géothermie de minime importance soient mis en œuvre selon les prescriptions générales applicables et les règles de l'art par des entreprises de forage disposant des compétences professionnelles, techniques et financières afin de préserver les intérêts mentionnés à l'article L.161-1 du code minier. Ces dispositions sont d'application obligatoire pour les entreprises qui réalisent les travaux de forage lors de l'ouverture des travaux d'exploitation d'un gîte géothermique de minime importance ou qui réalisent les mesures d'arrêt des travaux d'exploitation.
- **Arrêté du 25 juin 2015 relatif à la carte des zones réglementaires en matière de géothermie de minime importance** : l'arrêté fixe la carte des zones de géothermie de minime importance ainsi que la méthodologie d'élaboration de la carte et les modalités de sa révision.

On retrouve ainsi les zones suivantes :

- les **zones rouges** qui sont les zones où la réalisation d'ouvrages GTH est réputée présenter des dangers et inconvénients graves et ne peuvent bénéficier du régime de la minime importance (régime simplifié déclaratif) ;
 - les **zones oranges** sont des zones ne présentant pas de dangers graves mais pour lesquelles il est exigé la production d'une attestation de compatibilité d'un projet de GMI rédigé par un expert agréé prévue à l'article 22-2 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié ;
 - les **zones vertes** sont des zones réputées sans aucun dangers ou inconvénients soumise à un simple régime déclaratif.
- **Arrêté relatif à l'agrément d'expert en matière de géothermie de minime importance** : l'arrêté expose le cadre et les modalités d'agrément des experts, les modalités dans lesquels ce dernier établit l'attestation de compatibilité d'un projet géothermique prévue dans la déclaration d'ouverture des travaux d'exploitation d'une activité de géothermie de minime importance. Le texte précise les compétences requises pour obtenir cet agrément.

c) Normes AFNOR

Pour mettre en œuvre un système géothermique de surface de qualité, il est requis de faire appel à des professionnels spécialisés en géothermie et qualifiés qui installeront, selon les règles de l'art, des équipements de qualité certifiés. Les normes suivantes doivent être appliquées lors de la conception et de la réalisation de votre installation de géothermie de surface :

- NF X10-960-1 à NF X10-960-4 (Mars 2013) relative aux sondes géothermiques verticales

- NF X10-970 (Janvier 2011) relative aux sondes géothermiques verticales – Réalisation, mise en œuvre, entretien et abandon ;
- NF X10-999 (aout 2014) relative à la réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages.

4.1.2. Les procédures réglementaires et règles de positionnement des échangeurs relevant de la GMI

Suite à la mise en application du décret n°2015-15 du 8 janvier 2015, **toutes les installations géothermiques relevant de la minime importance (voir définition en section 4.1.1 paragraphe a)) doivent être déclarés via le service de téléservice (aussi appelé télé-déclaration) de la GMI¹²**, à l'exception des puits canadiens, des fondations thermiques (pieux) et des installations géothermiques installées à une profondeur inférieure à 10 mètres.

L'article 22-2 du décret 2006-649 du 2 juin 2006 modifié précise les pièces constituant la déclaration de l'ouverture des travaux d'exploitation d'un gîte géothermique de minime importance. Le pétitionnaire déclare l'ouverture de travaux d'exploitation sur le téléservice. Il reçoit un récépissé de déclaration et la qualification de la zone d'implantation du projet vis-à-vis de la carte des zones réglementaires (cf. arrêté du 25 juin 2015 relatif à la carte des zones réglementaires en matière de géothermie de minime importance).

D'après l'Arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance, dans un **contexte général, les échangeurs ne peuvent pas être implanté** :

- **dans les périmètres de protection immédiate et rapprochée des captages d'eau** destinée à la consommation humaine et des sources des eaux minérales naturelles conditionnées ;
- **à moins de 35 mètres** ;
 - o d'un **ouvrage souterrain de prélèvement d'eau** destinée à la consommation humaine ;
 - o des **stockages** d'hydrocarbures, de produits chimiques, de produits phytosanitaires ou autres produits susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines ;
 - o des **bâtiments d'élevage** et leurs annexes relevant des rubriques 2101 [élevage, transit, vente de bovins], 2102 [porcs], 2110 [lapin], 2111 [volailles], 2112 [couvoirs], 2113 [carnassier à fourrure], 2120 [chiens] de la nomenclature des installations classées ainsi que des zones de stockage des déchets de l'exploitation d'élevage ;
 - o des **ouvrages de traitement des eaux usées** collectifs ou non collectifs ;
- **à moins de 200 mètres d'une installation de stockage de déchets** relevant de la rubrique 2760 de la nomenclature des installations classées [i.e. autre que « Installation de stockage de déchets résultant de la prospection, de l'extraction, du traitement et du stockage de ressources minérales ainsi que de l'exploitation de carrières (site choisi pour y accumuler ou déposer des déchets solides, liquides, en solution ou en suspension), installations de stockage de déchets dangereux ou non dangereux non inertes »].

¹² <https://www.géothermie.developpement-durable.gouv.fr/?timeout=timeout>

Toujours d'après l'arrêté, la réalisation **d'échangeurs géothermiques fermés requiert d'être positionner à moins de 5 m** :

- **de la limite de propriété la plus proche**, à défaut d'un accord écrit préalable des propriétaires voisins autorisant la réalisation de l'échangeur géothermique de minime importance ;
- **de conduites, collectives ou non collectives, d'eaux usées** ou transportant des matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines¹³.

Les échangeurs géothermiques ouverts ne peuvent être positionnés :

- dans un **périmètre de protection géothermique** institué en application de l'article L. 124-5 du code minier ni dans un volume d'exploitation d'activités géothermiques défini en application de l'article L. 134-6 du code minier ;
- **à moins de 5 mètres de conduites d'assainissement individuelles ou collectives d'eaux usées** ou transportant des matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines, lorsque qu'une étanchéité entre les conduites d'assainissement et les horizons géologiques exploités existe ou est mise en place. En l'absence d'une telle étanchéité naturelle ou artificielle, cette distance minimale est portée à 35 m.

4.1.3. Les zones réglementaires dans la Métropole du Grand Paris

Dans l'objectif d'avoir une cartographie plus précise à l'échelle régionale, la DRIEE, les opérateurs (ADEME Ile-de-France, BRGM) et la région ont souhaité engager une révision, conformément à l'arrêté du 25 juin 2015 relatif à la carte des zones réglementaires en matière de géothermie de minime importance (GMI), qui prévoit la possibilité de réviser la carte nationale à l'échelon régional afin d'apporter plus de précisions en fonction des phénomènes redoutés de la carte.

Cette révision régionale permet une **délimitation des zones réglementaires beaucoup plus précise** et d'apporter également plus de précision en matière de connaissance et de localisation des phénomènes redoutés. Au total **6 nouvelles cartes réglementaires de la GMI ont été réalisées au niveau de la région Ile-de-France couvrant les gammes de profondeur suivantes [10 m-50 m], [10 m-100 m] et [10 m-200 m] pour les systèmes ouverts et fermés à la maille de 500 mètres de côté** (Figure 7).

Les travaux de révision de cette cartographie réglementaire de la GMI sur le territoire de la région Ile-de-France ont été conduits par le BRGM en application du guide national ministériel en 2017-2018.

Les zones réglementaires de la GMI s'appuient sur **9 phénomènes géologiques, hydrogéologiques et environnementaux redoutés** (surrection ou affaissement lié aux évaporites, aux cavités minières et cavités naturelles, aux mouvements de terrains, pollutions des sols et nappes, aux phénomènes d'artésianisme, à la mise en communication d'aquifères, à la remontée de nappe et au biseau salé). **Le phénomène redouté le plus prégnant pour la Métropole du Grand Paris est le risque d'affaissement/effondrement lié au gypse**. Concernant les cavités, la présence au niveau d'une maille d'une cavité cartographiée par l'IGC entraîne à elle seule le classement de la maille en zone orange.

¹³ Consultation possible du site reseaux-et-canalizations.gouv.fr

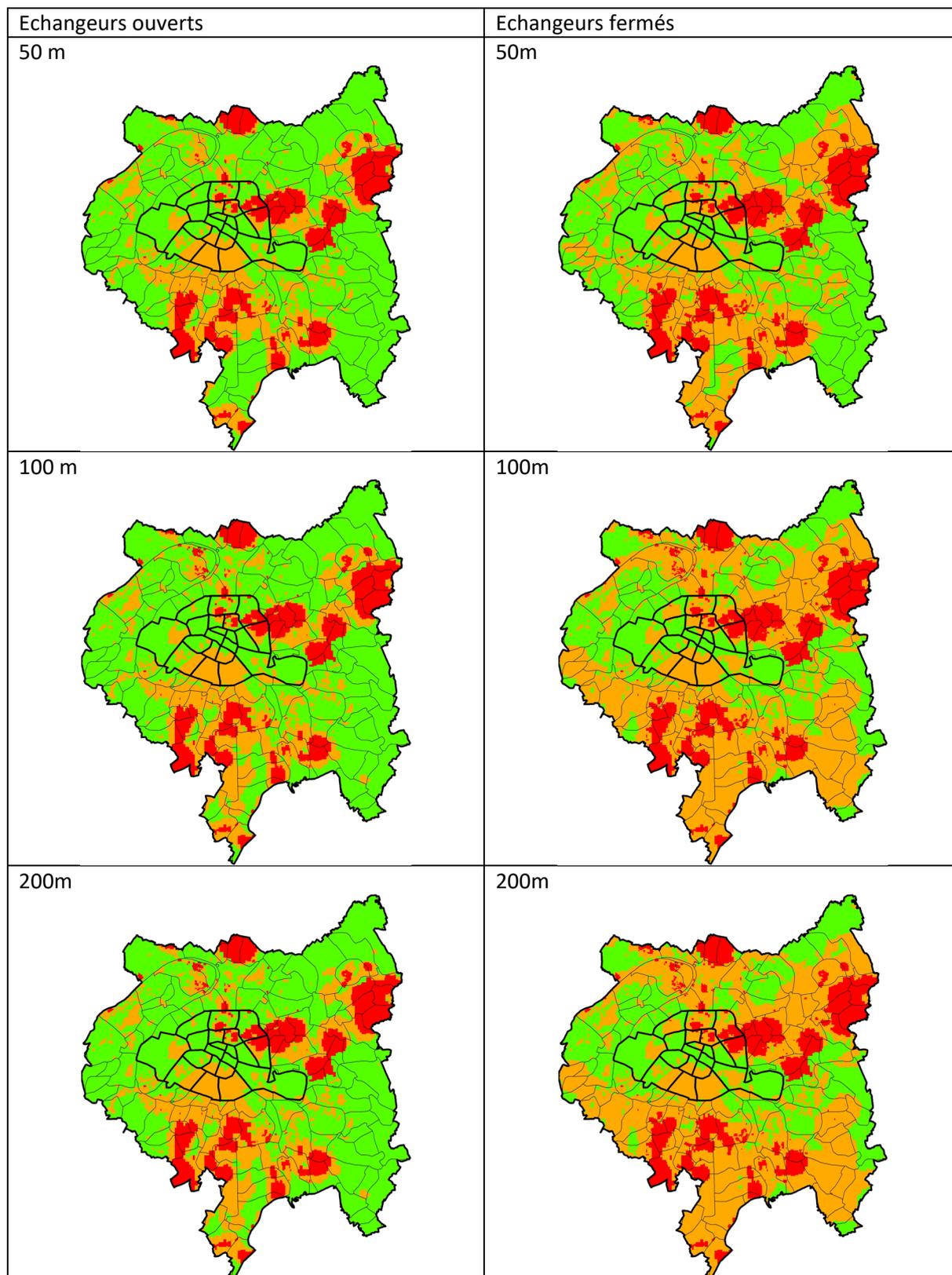


Figure 7 : Illustration des cartes réglementaires de la géothermie de minime importance au niveau de la Métropole du Grand Paris pour la géothermie sur échangeurs ouvert (gauche) et fermé (droite) et pour les profondeurs 50 m (haut), 100 m (milieu) et 200 m (bas) – Source : cartographie réglementaire (Rapport BRGM/RP67102)

4.2. RÉGLEMENTATIONS LIÉES À LA GESTION DES EAUX ET AUX USAGES DU SOUS-SOL

Il convient de s'informer du contexte local relatif à la gestion des eaux souterraines et aux autres usages du sous-sol avant toute mise en œuvre d'une installation de géothermie de surface. Les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE et SAGE) et les zones réservées à l'alimentation en eau potable donnent un certain nombre de recommandations et dispositions pouvant impacter les possibilités d'implantation de forages géothermiques.

4.2.1. SDAGE et SAGE

a) *Définition des SDAGE et SAGE*

Le **schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE)** est un document de planification de la politique de l'eau, institué par la loi sur l'eau de 1992, visant à atteindre **une gestion équilibrée et durable pour la préservation de la ressource en eau**. Le SDAGE est défini au niveau des bassins et sous-bassins hydrographiques tous les 6 ans via des concertations entre acteurs et utilisateurs de la ressource en eau. Le SDAGE Seine-Normandie réglementairement en vigueur est le SDAGE 2010-2015 suite à l'annulation de l'arrêté du 1er décembre 2015 adoptant le SDAGE du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands 2016-2021 et arrêtant le programme de mesures (PDM) 2016-2021. Le projet de SDAGE 2022-2027 est en cours de finalisation pour une adoption en mars 2022 par le Préfet coordonnateur de bassin.

Le suivi des objectifs du SDAGE se poursuit toutefois, comme par exemple pour l'état chimique des eaux souterraines (Figure 8).

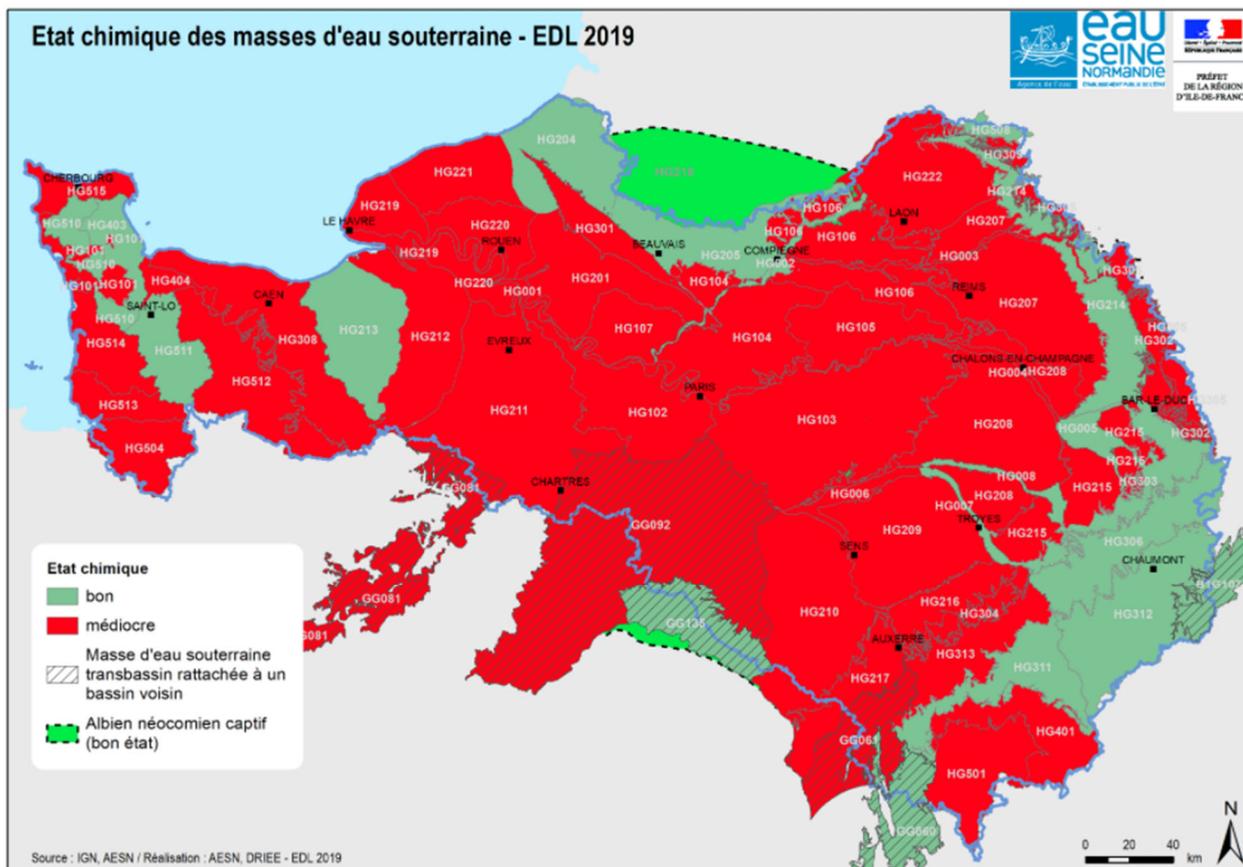


Figure 8 : Etat chimique des eaux souterraines sur le bassin Seine-Normandie (Agence de l'eau Seine-Normandie, 2019)

Le SDAGE 2010-2015 prévoit notamment un équilibre entre prélèvement et captage des masses d'eau souterraines, l'élimination des polluants et de leur introduction dans les masses d'eau, de préserver l'isolation des nappes une à une. **Le SDAGE donne ainsi un certain nombre de recommandations, en ce qui concerne la géothermie :**

« Disposition 130 : Maîtriser les impacts des sondages, des forages et des ouvrages géothermiques sur les milieux

Tout ouvrage dans le sous-sol, y compris les ouvrages de géothermie, quels que soient sa profondeur et son usage, doit être réalisé, exploité et abandonné dans les règles de l'art et répondre aux contraintes réglementaires existantes, afin de préserver la ressource en eau. L'objectif est de garantir l'absence d'introduction de polluants et de préserver l'isolation des nappes traversées entre elles et vis-à-vis des inondations et des ruissellements de surface.

Pour respecter ces objectifs, en particulier pour la géothermie, il est fortement recommandé :

- que le maître d'ouvrage évalue les impacts du ou des forages d'ordre physique, thermique, qualitatif ou quantitatif sur le sous-sol et les milieux aquatiques et terrestres concernés ; que l'autorité administrative recense les ouvrages et tienne compte de leurs impacts, notamment cumulés, dans le cadre de l'instruction administrative des dossiers ;
- que les eaux soient restituées à leur réservoir d'origine ou valorisées par un autre usage, pour les projets d'ouvrages à prélèvement en nappe. »

Ces recommandations sont compatibles avec celles du code minier et, concernant la GMI, non applicables pour la première (pas d'instruction) et obligatoire dans le cadre de la GMI pour la deuxième.

A l'échelle locale, le **schéma d'aménagement et de gestion de l'eau (SAGE)** est un outil de planification élaboré par la commission locale de l'eau (CLE) rassemblant les partenaires utilisant la ressource d'un bassin hydrographique. Le SAGE a une portée juridique, il permet de fixer, coordonner et hiérarchiser des objectifs généraux d'utilisation, de valorisation et de protection de la ressource en eau du bassin, des zones humides et des écosystèmes qui s'y trouvent. Il est opposable à l'administration (Etat, collectivité, établissement public, etc.) et aux tiers (i.e. les projets et installations devront être conformes au règlement du SAGE).

Lorsqu'il est situé à l'intérieur du périmètre d'un SAGE, un prélèvement d'eau à usage géothermique doit être compatible avec les objectifs généraux et le règlement de celui-ci (art. L212-5-2 du Code de l'Environnement). Le règlement d'un SAGE peut limiter localement (voire interdire) l'usage géothermique des eaux souterraines.

Sept SAGE sont en application au niveau de la Métropole du Grand Paris (Figure 9) :

Six à dominante eau de surface

- Bièvre
- Croult-Enghien-Vieille Mer
- Marne Confluence
- Mauldre
- Orge et Yvette
- Yerres

Un à dominante eau souterraine

- Nappe de Beauce et milieux aquatiques associés (dépend du SDAGE Loire-Bretagne)

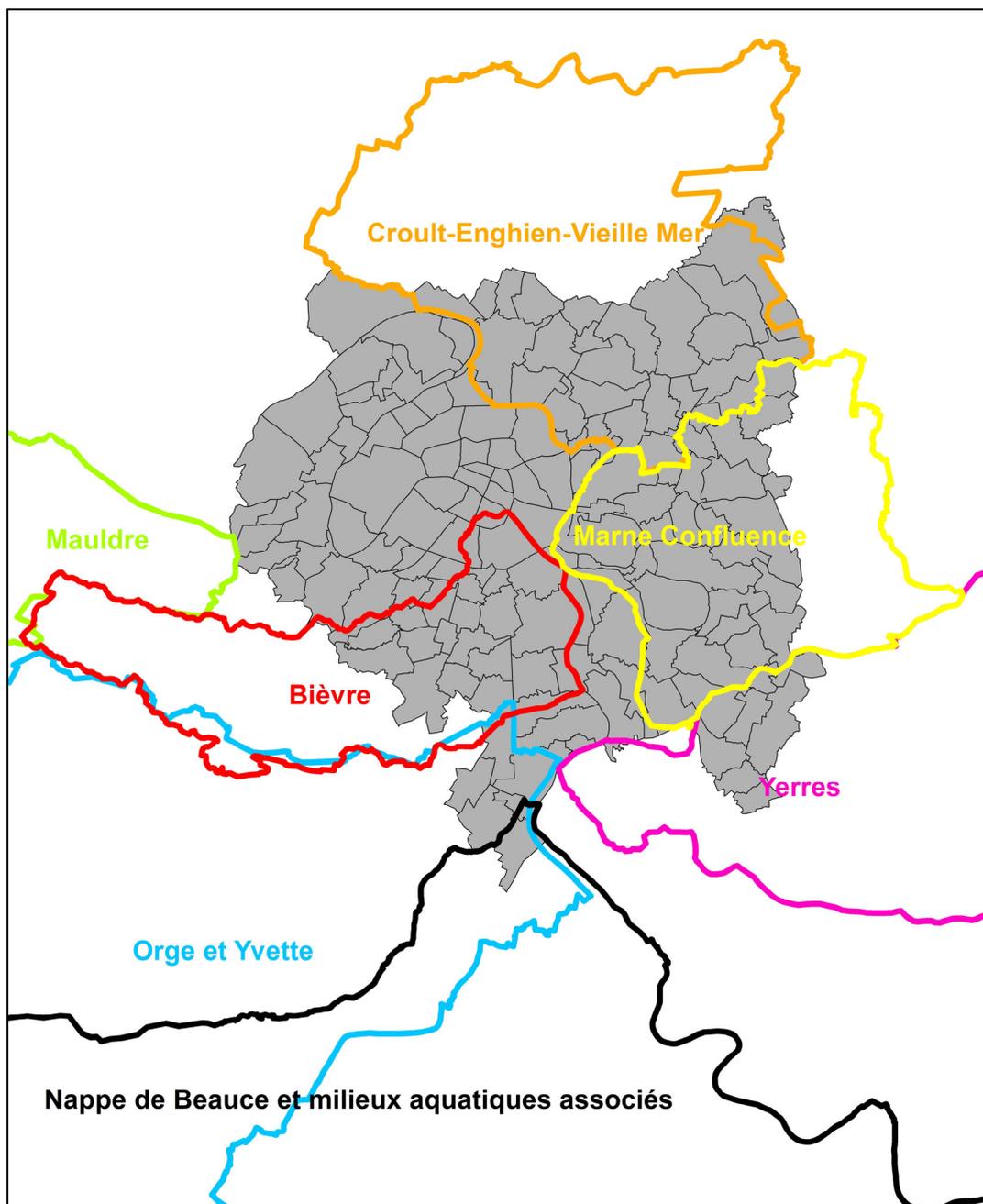
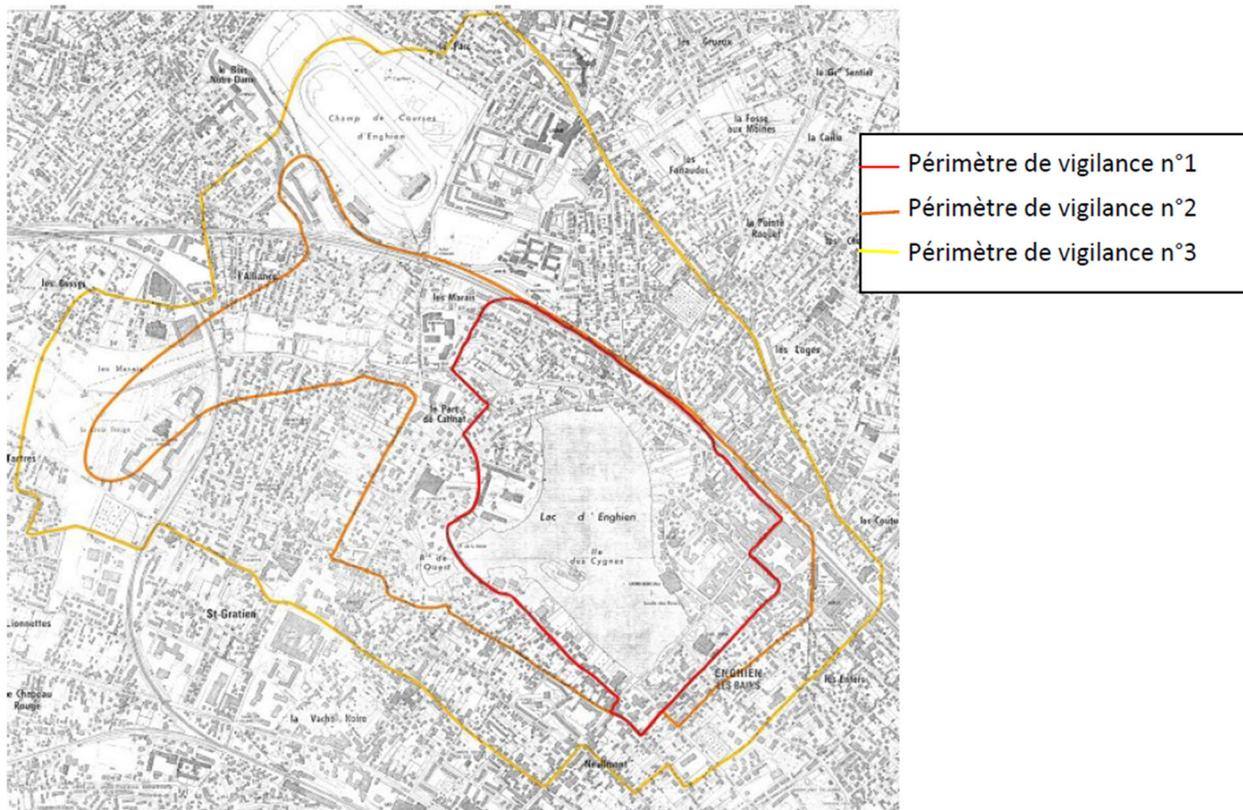


Figure 9 : SAGE en application au niveau de la Métropole du Grand Paris

Sur ces sept SAGE, deux mentionnent la géothermie : le SAGE Croult-Enghien-Vieille Mer et le SAGE concernant la nappe de Beauce et milieux aquatiques associés.

b) Le SAGE Croult-Enghien-Vieille Mer

Le SAGE interdit les *dispositifs de géothermie* dans l'ensemble des trois périmètres de vigilance relatifs au gisement hydrothermal d'Enghien-les-Bains. Le périmètre 3 englobe une petite zone au nord d'Epinaux sur Seine (Figure 10).



Périmètres de vigilance relatifs au gisement hydrothermal d'Engien-les-Bains
(source SOGREAH 2002 - BRGM 1982)

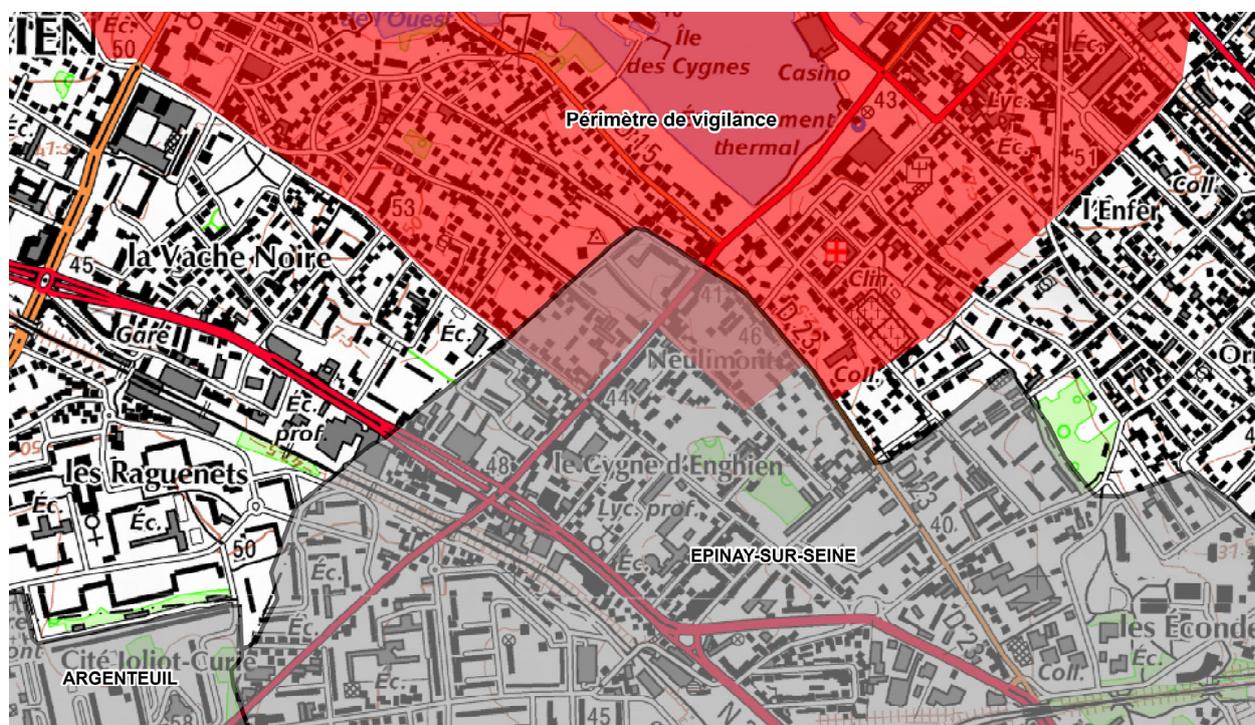


Figure 10 : Périmètre de vigilance relatif au gisement hydrothermal d'Engien-les-Bains

c) le SAGE concernant la nappe de Beauce et milieux aquatiques associés

Le SAGE classe les nappes des calcaires de Beauce sous la forêt d'Orléans, de la Craie sénonturonienne sous la Beauce, des Calcaires d'Etampes dans leur état captif, de l'Eocène de la nappe de Beauce en Ile de France en « Nappes à réserver dans le futur pour l'Alimentation en Eau potable (NAEP) ». Ce classement affecte les communes de Vitry-Chatillon et Juvisy-sur-Orge (Figure 11).

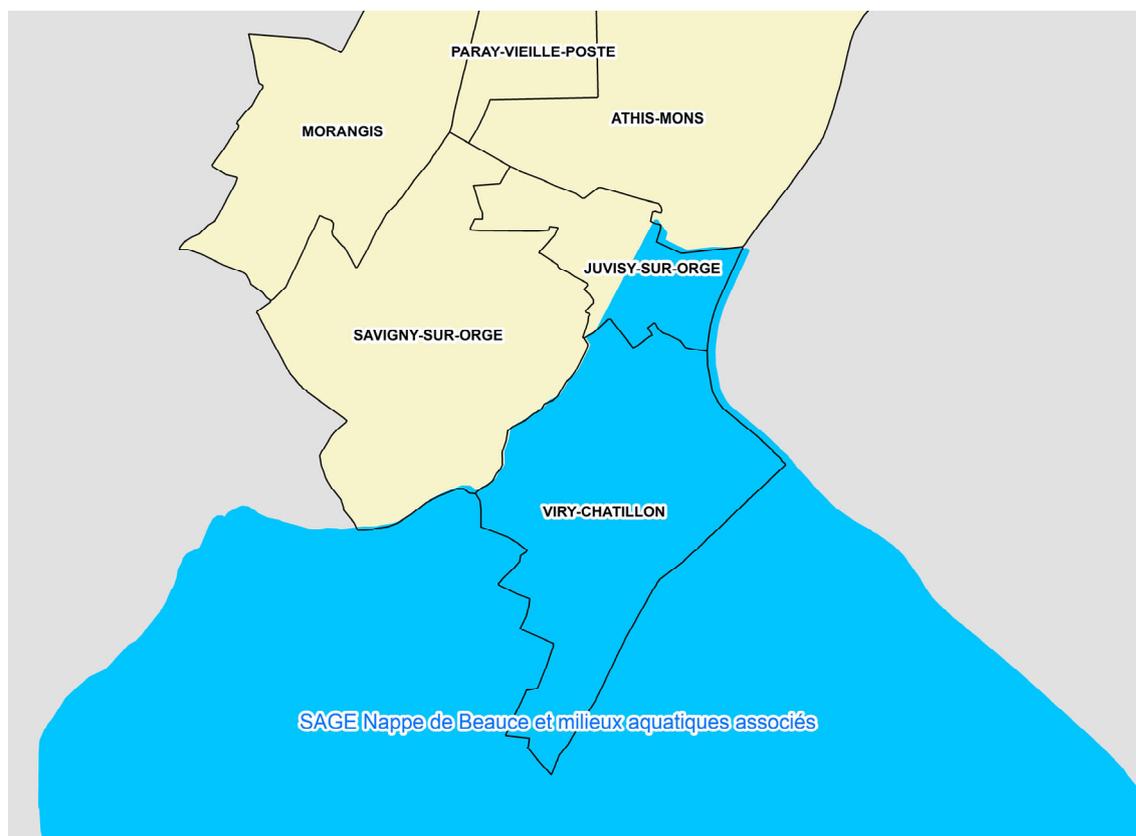


Figure 11 : Sage Nappe de Beauce et milieux aquatiques associés

Ceci implique que **tout forage d'eau, y compris pour la géothermie en système ouvert, doit respecter la norme AFNOR NFX 10-999 d'avril 2007** relative à la réalisation, au suivi et à l'abandon des ouvrages de captages ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forage. Certains éléments de cette norme ont été repris dans l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance, **cependant la norme est plus précise sur plusieurs sujets et doit donc être consultée.**

Le SAGE indique aussi que *"tous les nouveaux projets faisant appel à la géothermie (collectivités, industriels, particuliers...), basés sur des prélèvements en nappe, doivent comprendre un doublet de forages avec réinjection de l'eau dans le même horizon aquifère que celui dans lequel est effectué le prélèvement"*. Cette partie est déjà obligatoire dans le cadre de la GMI.

4.2.2. Ressources stratégiques

Le SDAGE Seine-Normandie de 1996, a affirmé l'importance stratégique de **l'Albien et du Néocomien comme ressource en eau potable de secours ultime**. Ces nappes se trouvant à plus de 200 m de profondeur sous la Métropole du Grand Paris, le cadre réglementaire de la GMI ne s'applique pas. Le développement d'installations géothermiques plus profondes sera soumis

à demande d'autorisation auprès de la DRIEAT. La DRIEAT pourra demander des mesures particulières, comme la réalisation de forages pouvant être convertis en captages d'eau potable le cas échéant.

4.3. SERVITUDE D'UTILITÉ PUBLIQUE OU RESTRICTION D'USAGE

Des servitudes peuvent être instituées au titre du L.515-12 du code de l'environnement concernant l'utilisation du sol et du sous-sol. Ces servitudes peuvent être instituées sur des terrains pollués par l'exploitation d'une installation, sur l'emprise des sites de stockage de déchets ou dans une bande de 200 mètres autour de la zone d'exploitation, ou sur l'emprise des sites d'anciennes carrières ou autour de ces sites sur des surfaces dont l'intégrité conditionne le respect de la sécurité et de la salubrité publique ou dans le voisinage d'un site de stockage géologique de dioxyde de carbone. Ces servitudes portent sur la limitation ou l'interdiction des modifications de l'état du sol ou du sous-sol, la limitation des usages faits du sol et du sous-sol. Des prescriptions particulières pouvant aller jusqu'à l'interdiction de réaliser un forage sur un terrain donné peuvent être posées. La liste des servitudes en cours et des restrictions qui en découle est disponible au niveau communal et il convient d'en prendre connaissance avant tout travaux de forage.

Cas particulier : Les **périmètres de protection des captages d'eau** sont rendus obligatoires par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 et l'article L. 1321-2 du code de la santé publique (Figure 7). En vue d'assurer la protection de la qualité des eaux de pollutions ponctuelles ou diffuses, la déclaration d'utilité publique (DUP) détermine autour du puits de prélèvement :

- un périmètre de protection immédiate acquis en pleine propriété ou de façon dérogatoire par l'établissement d'une convention de gestion entre la ou les collectivités publiques propriétaires et l'établissement public de coopération intercommunale ou la collectivité publique responsable du captage. Le site doit être clôturé (sauf dérogation) et toutes activités y sont interdites hormis l'exploitation et l'entretien de l'ouvrage de prélèvement et au périmètre lui-même. L'objectif est ainsi de limiter la détérioration des ouvrages et le déversement de polluant à proximité immédiate du puits ;
- un périmètre de protection rapprochée à l'intérieur duquel toutes sortes d'installations peuvent être interdites ou réglementées et plus particulièrement les activités susceptibles de provoquer des pollutions (e.g. construction, dépôts, rejets, etc.). Cette zone est plus vaste et son objectif est de prévenir la migration des polluant vers le puits. En particulier, **les échangeurs géothermiques destinés à l'exploitation d'un gîte géothermique de minime importance ne peuvent pas être implantés dans les périmètres de protection immédiate et rapprochée des captages d'eau destinée à la consommation humaine et des sources des eaux minérales naturelles conditionnées**;
- un périmètre de protection éloignée où les installations, travaux, activités, dépôts, ouvrages, aménagement ou occupation des sols peuvent être réglementés. Il est créé s'il existe un risque potentiel de pollution que la nature des terrains traversés ne permet pas de réduire en toute sécurité malgré l'éloignement du puits de captage. Il recouvre en général l'ensemble du bassin d'alimentation du captage (BAC) ou aire d'alimentation du captage (AAC).

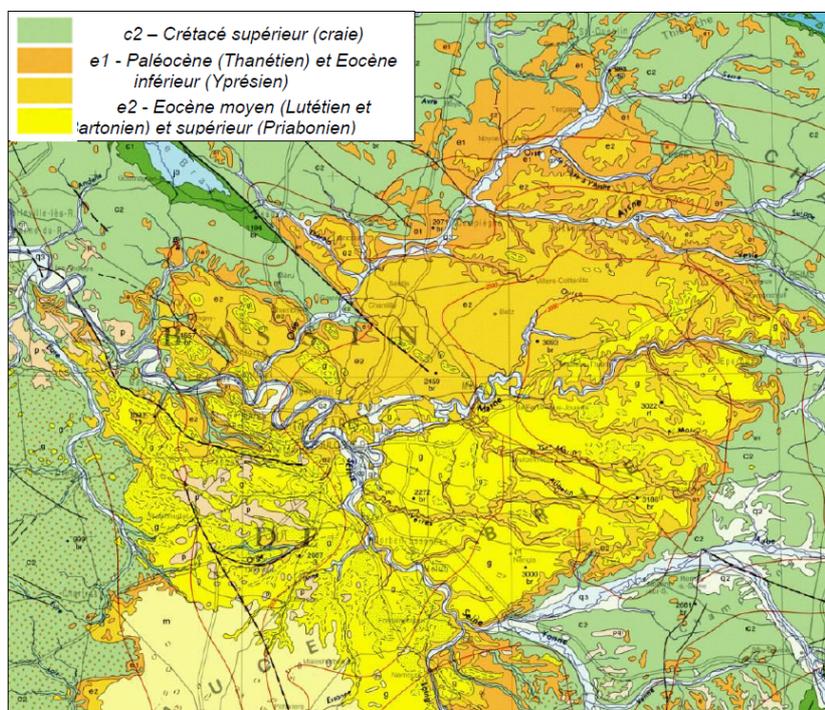
Il faudra ainsi se rapprocher des autorités locales avant le lancement d'un projet pour identifier si un captage est proche ou non de la zone de développement.

5. Contexte géologique et hydrogéologique

5.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE : ÉTUDES PRÉCÉDENTES

La géologie et l'hydrogéologie de la Métropole du Grand Paris et plus globalement de la région Ile-de-France et du Bassin parisien ont fait l'objet de nombreuses études et de synthèses (Bault et al., 2015; Lamé, 2013; Mégnien, 1979, 1970) (et les références comprises dans ces documents).

Le secteur de la Métropole du Grand Paris appartient au vaste ensemble géologique du Bassin parisien qui est traversé par la Seine et qui s'étend du Cotentin au massif des Ardennes (Figure 12). Dans cet ensemble géologique, les formations sédimentaires sont communément représentées comme une pile d'assiette du socle Précambrien et de l'ère Primaire jusqu'aux terrains du Tertiaire (Figure 13).



Source : BRGM, 2003

Figure 12 : Carte géologique de la France au millionième sur le centre du Bassin parisien

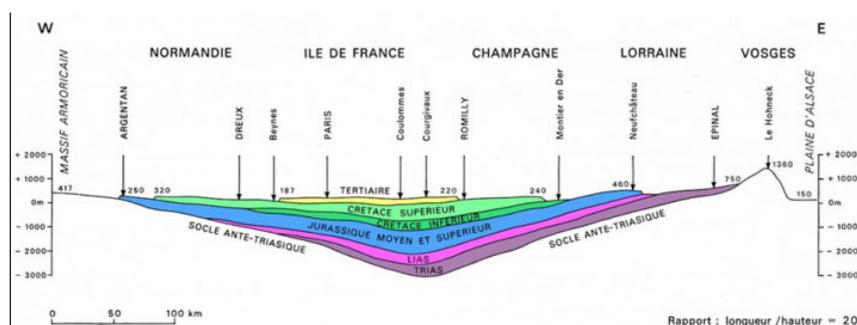


Figure 13 : Coupe schématique du Bassin parisien

Dans le secteur de la Métropole du Grand Paris, l'épaisseur totale des couches sédimentaires jusqu'au socle est de l'ordre de plusieurs kilomètres. Les sédiments de l'ère Tertiaire sont constitués d'une succession de formations géologiques de lithologie variée : sables, calcaires, argiles et marnes du Paléocène, de l'Eocène et de l'Oligocène. La succession stratigraphique des formations est illustrée en Figure 14.

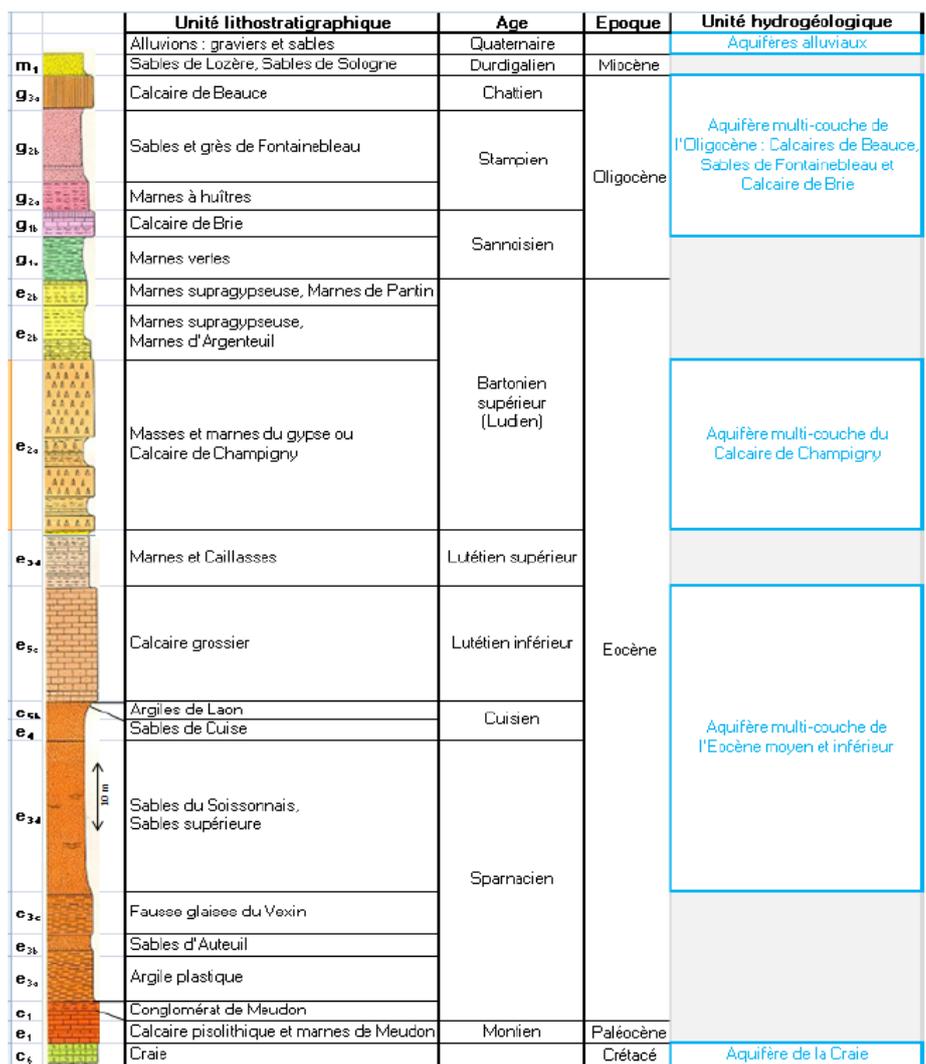
Les formations du Tertiaire se retrouvent au sein des formations perméables constituées de roches réservoirs carbonatées (calcaires en général) ou arénacées (sables et sables argileux) plus ou moins cimentées en grès et souvent chargées en éléments fins. Des formations perméables et semi-perméables séparent les aquifères, permettant des transferts d'eau entre les aquifères par drainance hydraulique (Figure 14).

Les formations des âges Pliocène, Miocène, Oligocène et Eocène supérieur abritent plusieurs aquifères superposés : Calcaires de Beauce, Calcaires de Phitiviers, Calcaires d'Etampes, Sables de Fontainebleau, Calcaires de Brie et Calcaires de Champigny-Château Landon.

Les terrains de l'Eocène regroupent deux grands ensembles aquifères pouvant être individualisés en fonction des étages géologiques :

- l'aquifère multicouche du calcaire de Champigny pour l'Eocène supérieur (Bartonien et Priabonien/Ludien)
- l'aquifère multicouche des marnes et caillasses et du calcaire grossier pour l'Eocène moyen (Lutétien) et celui des sables du Cuisien pour l'Eocène inférieur (Yprésien), exploité principalement au nord de l'Ile-de-France.

De plus, des alluvions quaternaires localisées dans les plaines alluviales des cours d'eau principaux peuvent renfermer des nappes en relation avec les nappes sous-jacentes ou des latérales et avec les eaux de surface.



Source : Rapport BRGM/RP-53306-FR, 2004

Figure 14 : Echelle stratigraphique et principaux aquifères (Schomburgk et al., 2005)

5.2. DONNÉES DU SOUS-SOL DISPONIBLES AU NIVEAU DE LA MÉTROPOLE DU GRAND PARIS

5.2.1. Modèle géologique et connaissances hydrogéologiques globales

Un travail de modélisation a été réalisé et a abouti à la réalisation d'un modèle tridimensionnel du Tertiaire du Bassin parisien. Le modèle géologique de ces formations géologiques tertiaires développé par le BRGM en partenariat avec la DRIEAT (ancienne DRIEE) permet une visualisation en trois dimensions des couches géologiques. L'extension géographique de ce modèle tridimensionnel du Tertiaire du Bassin parisien (version 2010) correspond à l'emprise des formations tertiaires et dépasse légèrement celle de l'Île-de-France. La couche du modèle se présente sous forme d'une grille de maille carrée de 250 mètres de côté. Seize unités géologiques ont été identifiées pour représenter au mieux les grands ensembles hydrogéologiques (aquifères et barrières imperméables). Cependant le modèle ne permet pas de connaître les variations

latérales des faciès et ne rend pas compte de la nature des aquifères (fissuration par exemple). Ce modèle est accessible sur l'espace cartographique du SIGES Seine Normandie (<http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article25>). Ce modèle permet donc d'obtenir des informations sur l'altitude du toit et du mur des formations et par conséquent de connaître les épaisseurs de celles-ci.

La partie suivante consiste en une synthèse des connaissances hydrogéologiques des aquifères disponibles dans la tranche des terrains situés approximativement entre 0 et 100m sous le sol dans le secteur de la Métropole du Grand Paris.

La géologie du Bassin parisien est relativement complexe dans la mesure où les nappes contenues dans chaque formation ne s'étendent pas à l'ensemble du volume disponible, comme présenté sur la coupe schématique nord-est à sud-ouest de la région Ile-de-France, des principales formations aquifères (Figure 15). Dans ce contexte hydrogéologique, il existe des variations latérales de faciès sédimentologiques. Les passages latéraux de faciès perméables à imperméables, du fait de l'amincissement ou de la disparition d'un substratum imperméable peut résulter en la mise en connexion ponctuelle de deux aquifères, ou au contraire à leur cloisonnement. Ceci conduit à utiliser de façon continue chaque niveau piézométrique déterminant une nappe. Cette nappe peut donc être contenue latéralement dans divers niveaux géologiques successifs, on parle alors d'aquifère multicouche (Figure 14 et Figure 15).

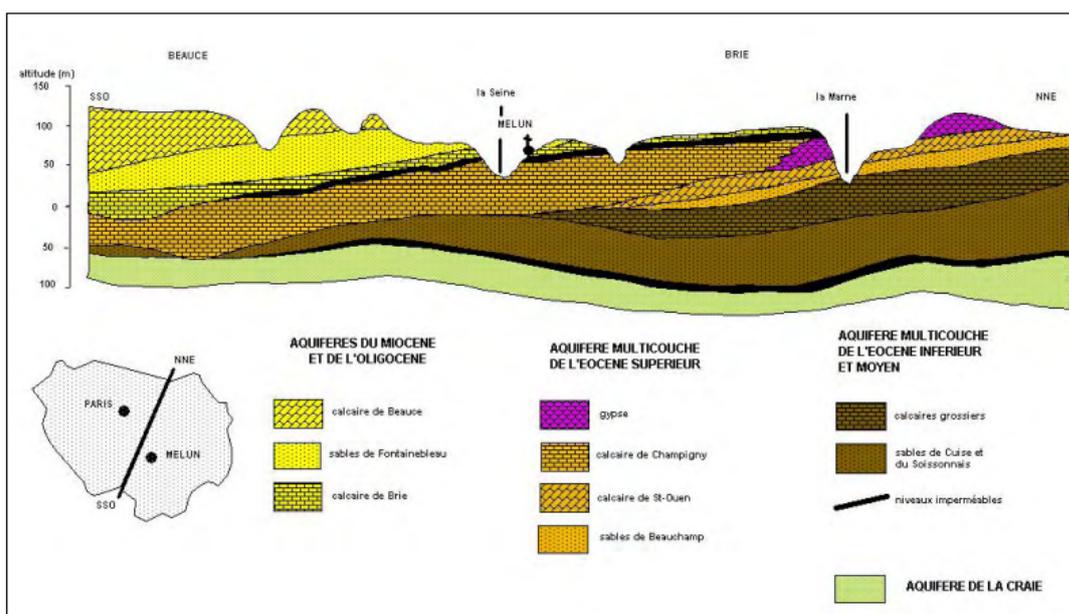


Figure 15 : Coupe schématique géologique NE-SO de la région Ile-de-France

Dans le secteur considéré, quatre aquifères multicouches sont répertoriés. Ils sont présentés ci-dessous, du moins profond, et donc plus récent, au plus profond :

- l'aquifère multicouche de l'Oligocène (-23 à -35 Ma) composé de Calcaires de Beauce, des Sables de Fontainebleau et du Calcaire de Brie. Cette grande formation aquifère est limitée en partie inférieure par les formations imperméables des Marnes Vertes d'âge Sannoisien ainsi que par les Marnes supra gypseuses, (Marnes de Pantin, et Marnes d'Argenteuil) toutes d'âge Bartonien Supérieur ;
- l'aquifère multicouche de l'Eocène supérieur (-35 à -42 Ma) composé du Calcaire de Champigny, des Sables de Montceau, des Calcaires de Saint-Ouen et des Sables de Beauchamp. Cette grande formation aquifère est limitée en partie inférieure par les

formations semi-imperméables des Marnes et Caillasses d'âge Lutétien supérieur, sous-étage de l'Eocène Supérieur ;

- l'aquifère multicouche de l'Eocène moyen et inférieur (-42 à - 60 Ma) composé du Calcaire Grossier du Lutétien inférieur, des Sables de Cuise et des Sables du Soissonnais. Cette grande formation aquifère est limitée en partie inférieure essentiellement par les formations imperméables des argiles plastiques du Sparnacien (Eocène inférieur) ;
- l'aquifère de la Craie d'âge Sénonien du Crétacé supérieur (-74 à -83 Ma), formation très épaisse, exploitable uniquement dans les parties affleurantes.

Compte tenu du caractère extrêmement vulnérable des alluvions d'âge quaternaire (formations réduites, soumises aux aléas climatiques de productivité et de plus sensibles aux effets de pollutions dus aux activités anthropiques) et de leur niveau sub-affleurant peu adapté, il convient de ne pas considérer ces formations comme un objectif. D'autre part, concernant les aquifères multicouches de l'Oligocène et de l'Eocène supérieur, ces aquifères ne sont présents que de manière extrêmement marginale sur le secteur de la Métropole du Grand Paris et **ne seront donc pas considérés dans la suite de l'étude.**

5.2.2. Aquifères identifiés et piézométries existantes

Cette étude se focalisera donc sur l'aquifère multicouche du calcaire grossier de l'Eocène moyen (Lutétien) et des Sables du Cuisien pour l'Eocène Inférieur (Yprésien) ainsi que sur l'aquifère de la Craie d'âge Sénonien du Crétacé supérieur.

d) *Aquifère du Lutétien moyen et inférieur :*

La nappe des Calcaires Grossiers du Lutétien est à prédominance calcaire et présente des faciès plus sableux à la base et plus marneux en partie supérieure. Les transitions lithologiques aussi bien latérales que verticales ne sont pas progressives.

Le Lutétien moyen correspond aux formations communément appelées « Calcaires Grossiers », qui sont des dépôts marins souvent très fossilifères. Ils sont constitués d'une succession de bancs calcaires massifs, plus ou moins sableux et fossilifères, séparés par des bancs marneux. Le Lutétien inférieur quant à lui est représenté par des calcaires coquillés et par des sables grossiers, ces sables grossiers sont recouverts par des sables plus fins, plus calcaires et moins glauconieux.

L'aquifère du Lutétien est le plus superficiel des aquifères considérés dans cette étude. D'après le modèle géologique, une carte de la profondeur du toit de l'aquifère des calcaires grossiers a été calculée (Figure 16). La profondeur est la moins élevée au centre de la Métropole du Grand Paris inférieure à 9 m et est la plus élevée au sud avec plus de 70 m. L'épaisseur moyenne de l'aquifère (estimée à partir des cartes du toit et du mur) est d'environ 35,5 m, avec une valeur médiane de 37 m, le premier quartile est de 31,6 m et le dernier quartile 41 m (Figure 17).

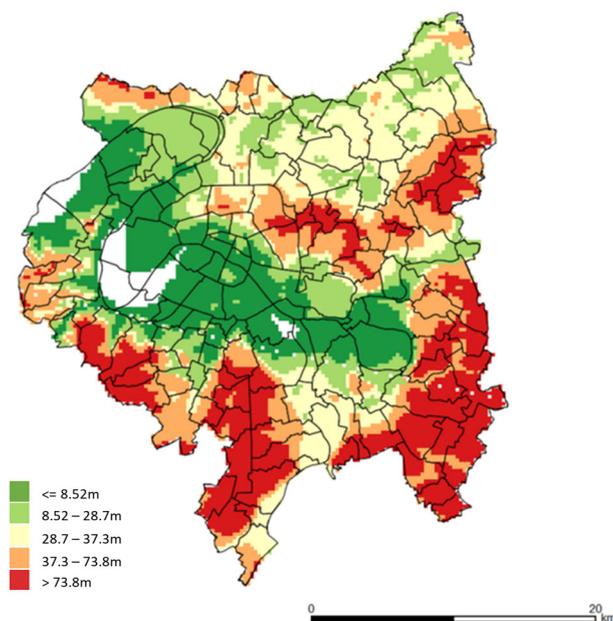


Figure 16 : Profondeur (m) du toit de l'aquifère des calcaires grossiers du Lutétien estimée à partir de la différence entre la surface topographique et l'altitude du toit de l'aquifère du Lutétien. Source : Modèle géologique Ile-de-France

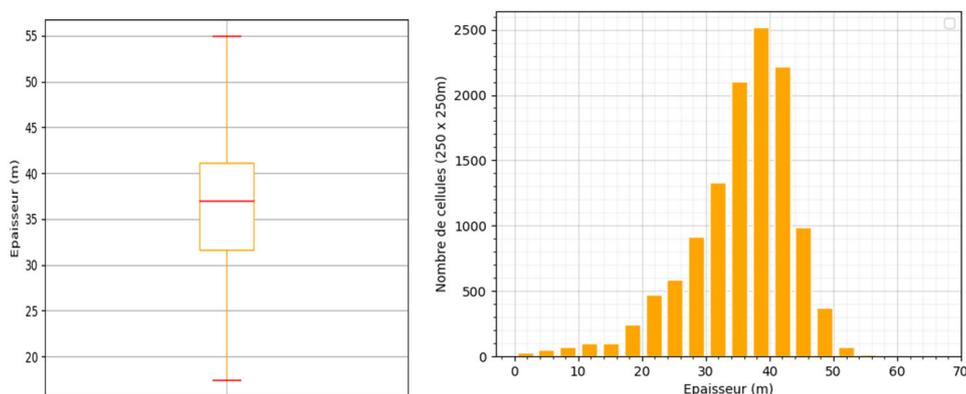


Figure 17 : Distribution statistique des épaisseurs (m) pour l'aquifère des Calcaires Grossiers du Lutétien sur le secteur de la Métropole du Grand Paris (Source : Modèle géologique Ile-de-France).

e) Aquifère de l'Yprésien supérieur :

La nappe de l'Yprésien supérieur regroupe les différents aquifères sableux du Cuisien (Yprésien supérieur) et du Sparnacien supérieur (Yprésien inférieur). Les formations du Cuisien correspondent à des dépôts marins essentiellement sableux et détritiques. Néanmoins, l'exploitabilité de l'Yprésien semble correspondre à l'emprise des Sables de Cuise (d'après la cartographie BD LISA (<https://bdlisa.eaufrance.fr/>), Figure 18). D'après le modèle géologique, une carte de la profondeur du toit de l'aquifère a été calculée (Figure 19). La profondeur est la moins élevée au centre et à l'ouest de la Métropole du Grand Paris inférieure à 31 m et est la plus élevée à l'est avec plus de 116 m. La partie nord se situe à une profondeur d'environ 70 m.

Pour l'aquifère de l'Yprésien, l'épaisseur moyenne est de l'ordre de 34 m et est compris entre 0,6 m et 87 m. La valeur médiane, le premier et dernier quartile sont respectivement de : 34 m, 28 m et 42 m.

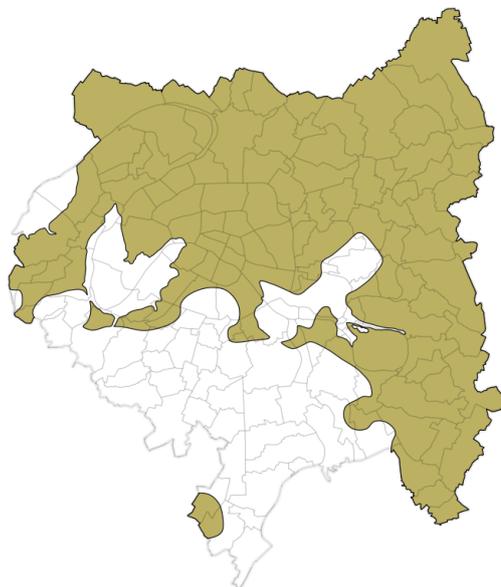


Figure 18 : Extension des Sables de Cuise sur le secteur de la Métropole du Grand Paris (d'après la cartographie de la BD Lisa)

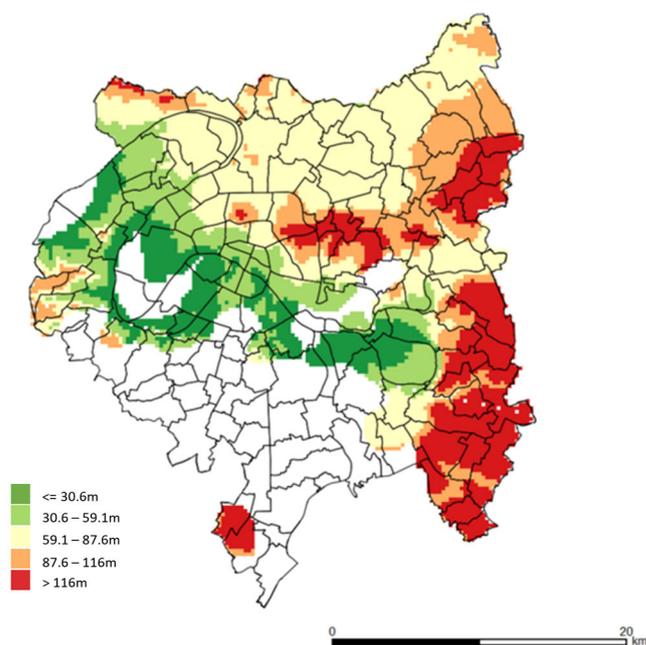


Figure 19 : Profondeur (m) du toit de l'aquifère de l'Yprésien estimée à partir de la différence entre la surface topographique et l'altitude du toit de l'aquifère de l'Yprésien (Source : Modèle géologique Ile-de-France)

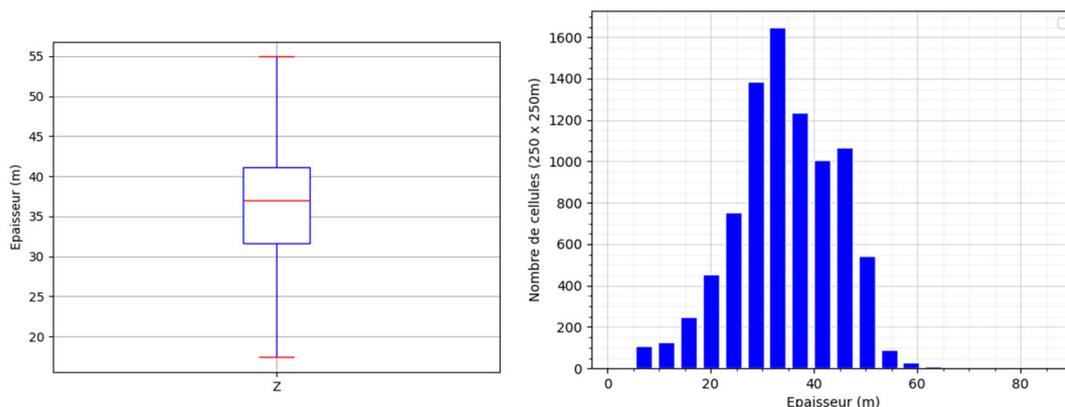


Figure 20 : Distribution statistique des épaisseurs (m) pour l'aquifère de l'Yprésien sur le secteur de la Métropole du Grand Paris. Source : Modèle géologique Ile-de-France

f) Aquifère de la Craie du Sénonien supérieur :

La formation de la Craie d'âge Crétacé supérieur correspond au substratum des formations tertiaires de l'Ile-de-France. La nappe de la Craie du Sénonien est caractérisée par une craie blanche et tendre, qui renferment de nombreux lits réguliers de silex noirs. La Craie n'est captée que là où elle est sub-affleurante et est parfois captée avec la formation aquifère de Montien sus-jacent. D'un point de vue exploitabilité, il semble trop risqué de capter la Craie sous le tertiaire du fait d'une trop grande variabilité des transmissivités. Les forages peuvent donc être improductifs. La zone d'exploitabilité de la Craie se situe donc dans la zone où elle est sub-affleurante c'est-à-dire sous les alluvions ou Montien (cf. zone verte dans la Figure 21). D'après le modèle géologique, une carte de la profondeur du toit de l'aquifère a été calculée (Figure 22 et Figure 19). La profondeur de la Craie est comprise entre 0 m et plus de 100 m, les parties les plus profondes se situant aux extrêmes nord et sud.

Concernant l'épaisseur de l'aquifère dans sa zone d'exploitabilité dans le secteur de la Métropole du Grand Paris, il convient de souligner que peu de données récentes sont disponibles. Les valeurs utilisées dans cette étude sont issues de l'atlas hydrogéologique de 2005 (Schomburgk et al., 2005). L'épaisseur exploitable moyenne pour l'aquifère de la Craie dans cette zone est d'environ 48.5m et les épaisseurs varient d'environ 30 à 60 m, les valeurs de la médiane, du premier et dernier quartile sont respectivement de : 60, 40, 60 m (Figure 23).

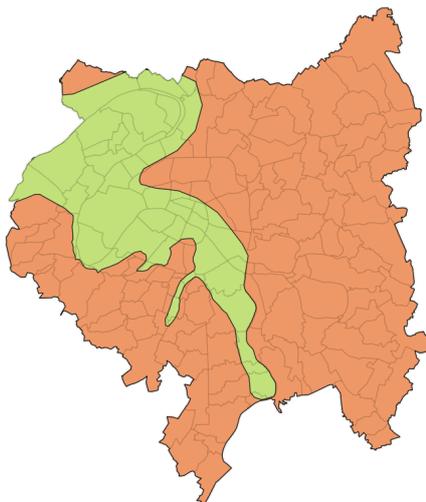


Figure 21 : Zone d'exploitabilité de la craie, correspondant à la zone de la craie sous faible recouvrement (vert). Source : Modèle géologique Ile-de-France

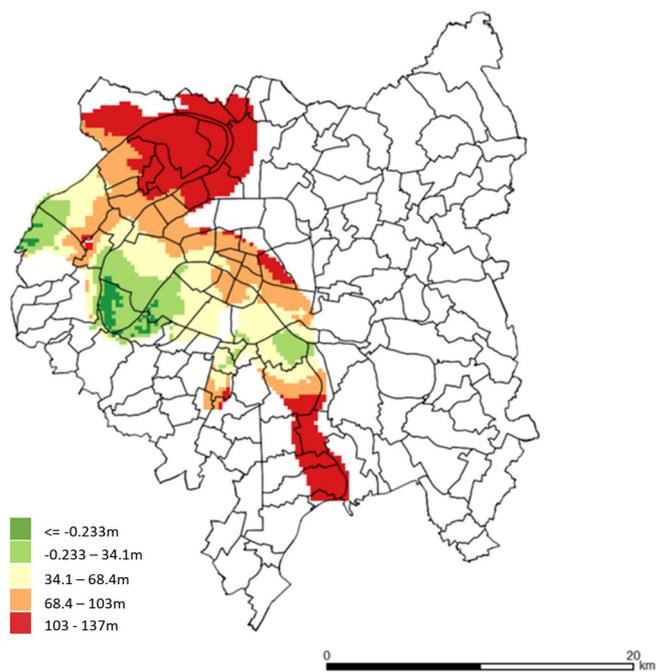


Figure 22 : Profondeur (m) du toit de l'aquifère de la Craie estimée à partir de la différence entre la surface topographique et l'altitude du toit de l'aquifère de la Craie sur le territoire de la Métropole du Grand Paris. Source : Modèle géologique Ile-de-France

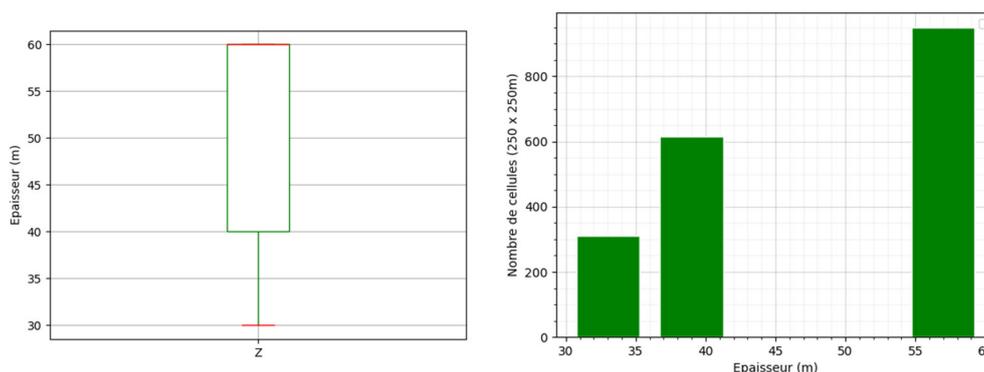


Figure 23 : Distribution statistique des épaisseurs (m) pour l'aquifère de la Craie dans la zone d'exploitabilité sur le secteur de la Métropole du Grand Paris. Source : Modèle géologique Ile-de-France

g) Piézométries des aquifères identifiés :

La première esquisse piézométrique du Lutétien fut produite dans le Parisien en 1858. Les cartes hydrogéologiques de la ville de Paris (Delesse, 1861) et du département de la Seine (Delesse, 1867) représentent les niveaux piézométriques de la première nappe superficielle. Les premières cartes piézométriques du Lutétien et de l'Yprésien ont été réalisées entre 1962 et 1975, à partir de carte géologique au 1/50000. Néanmoins, ces premières piézométries ne sont pas synchrones et ne distinguent pas les nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur. La piézométrie présentée dans ces travaux est donc celle d'un système unique regroupant les formations du Lutétien et de l'Yprésien supérieur. Par la suite des compilations ont été réalisées par Claude Mégny (Mégny, 1979, 1976, 1970) et une carte générale de la surface piézométrique de la nappe de l'Yprésien et du Lutétien a été éditée (Mégny, 1976). Ces cartes piézométriques ont été mises à jour sur Paris et sa proche banlieue pour les nappes du Lutétien et de l'Yprésien par l'inspection Générale des Carrières (IGC) grâce à des mesures mensuelles manuelles du réseau piézométrique, mise en place) partir de 1978. Enfin, suite à la réalisation de deux campagnes piézométriques synchrones, basses-eaux et hautes eaux, sur les nappes des sables de l'Yprésien supérieur et des calcaires du Lutétien, des cartes piézométriques sur le Bassin parisien ont été réalisées sur la période 2013 – 2014 (Bault et al., 2015) (cf. rapport BRGM/RP-64887-FR).

Dans la zone d'étude, une géométrie variable des aquifères du Lutétien et de l'Yprésien supérieur est observable :

- au nord, l'aquifère du Lutétien et de l'Yprésien supérieur sont en théorie séparés par un écran imperméable à semi-perméable constitué par les argiles de Laon de l'Yprésien supérieur ;
- au sud, les argiles de Laon deviennent discontinues puis disparaissent, les deux aquifères du Lutétien et de l'Yprésien supérieur sont alors considérés comme étant continus et ne forment qu'un même et unique aquifère.

Il convient de remarquer que malgré la présence des argiles de Laon entre les aquifères du Lutétien et de l'Yprésien, les fluctuations deux aquifères peuvent être identiques, comme observé sur ces deux piézomètres situés à 15 mètres de distance l'un de l'autre (https://ades.eaufrance.fr/Fiche/ComparaisonMesures?LISTBSS=01288X0132/F_2009,01288X0141/F_2009&MIN=26/11/2009&MAX=09/03/2021&COUPLES=3), ce qui souligne leur relation hydraulique.

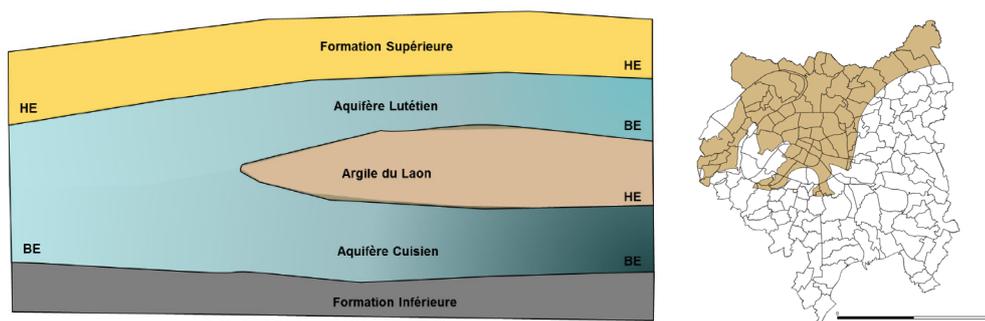


Figure 24 : Coupe schématique sud-nord montrant la géométrie des nappes aquifères du Lutétien et de l'Yprésien supérieur (gauche) et entité cartographiée BD Lisa 113AT03 des argiles de Laon semi-perméables sur le secteur de la Métropole du Grand Paris (marron image de droite).

C'est pourquoi, dans la zone sud où les deux aquifères se confondent, le « toit » de l'aquifère correspond aux hautes eaux du Lutétien et la « base » de l'aquifère correspond aux basses eaux de l'Yprésien supérieur. Les cartes piézométriques (issues de ces travaux : (Bault et al., 2015) rapport BRGM/RP-64887-FR) sont présentées sous forme de courbes iso-piézométriques (Figure 25, Figure 26, Figure 27 et Figure 28) et ont été retraitées pour les besoins de l'étude afin d'obtenir des cartographies interpolées (surface piézométrique) sur l'ensemble de la Métropole du Grand Paris (Figure 25, Figure 26, Figure 27 et Figure 28). A noter que les cartes basses eaux ne se prolongent pas au sud du fait d'ouvrages non mesurés (ou secs) durant cette période. La piézométrie pour les deux aquifères du Lutétien et de l'Yprésien est marquée par une dépression au niveau de Paris.

Enfin pour l'aquifère de la Craie, il n'existe pas de piézométrie synchrone et récente. Les données utilisées sont extraites de l'atlas hydrogéologique de 2005. La Figure 29 présente la piézométrie dans cette zone.

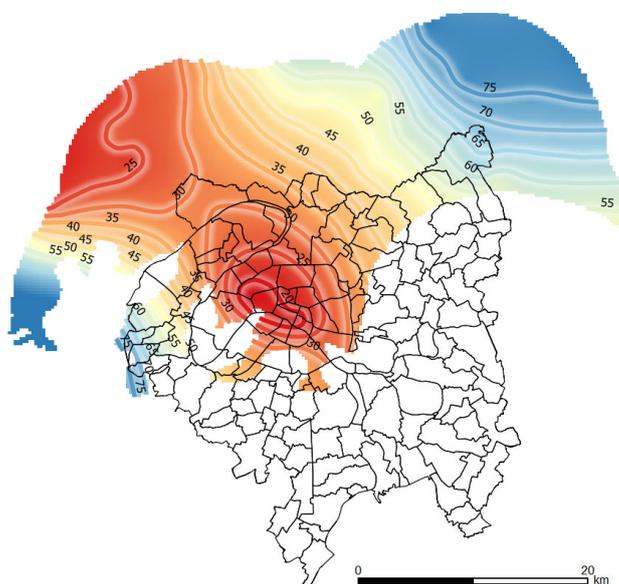


Figure 25 : Yprésien Basses-eaux 2013 (courbes isopiézométriques (m)) et interpolation (surface piézométrique). Source RP-64887-FR et BSS.

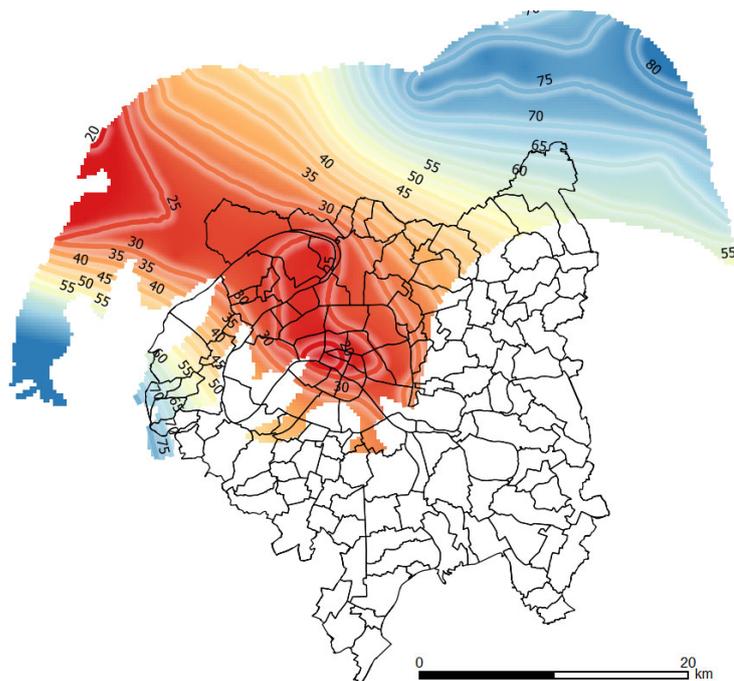


Figure 26 : Lutétien Basseaux 2013 (courbes isopiézométriques (m)) et interpolation (surface piézométrique) Source RP-64887-FR et BSS.

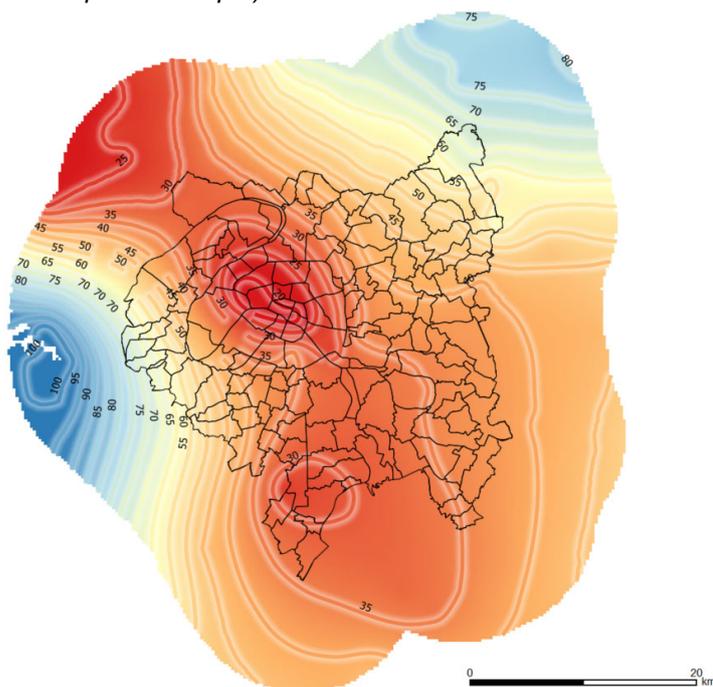


Figure 27 : Yprésien Hautes eaux 2014 (courbes isopiézométriques (m)) et interpolation (surface piézométrique). Source RP-64887-FR et BSS.

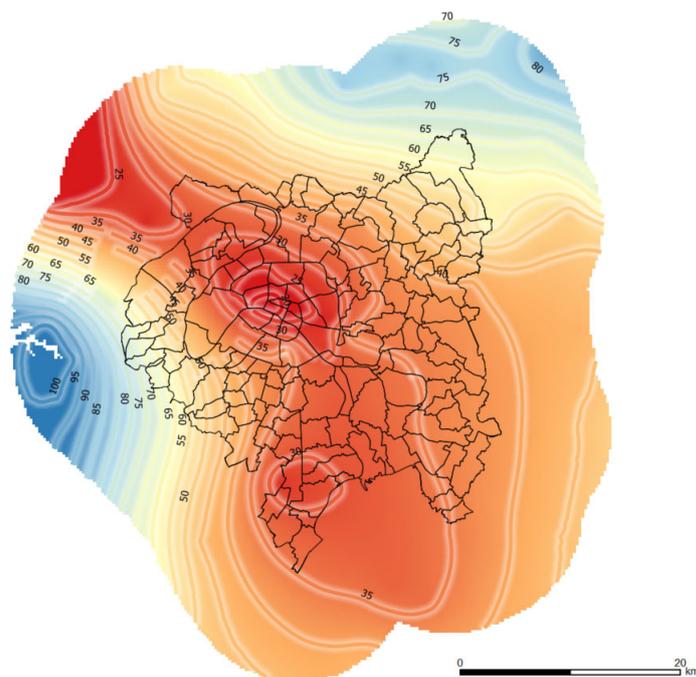


Figure 28 : Lutétien Hautes eaux 2014 (courbes isopièzométriques (m)) et interpolation (surface pièzométrique) Source RP-64887-FR et BSS.

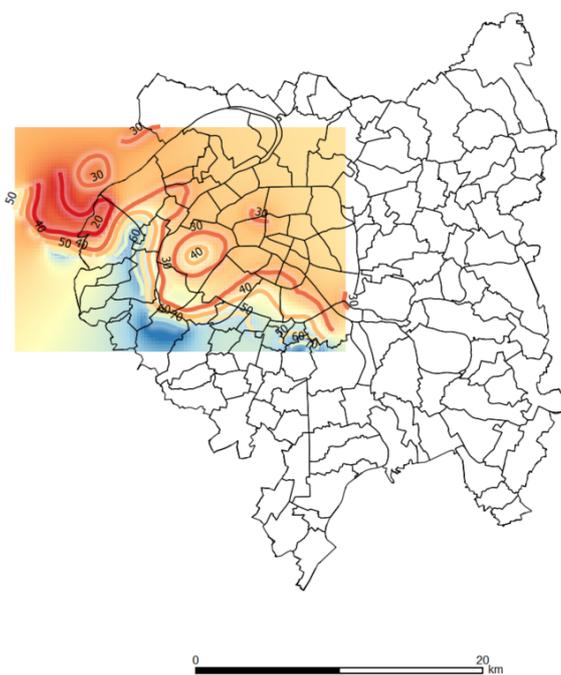


Figure 29 : Pièzométrie de l'aquifère de la Craie (courbes isopièzométriques (m)) et interpolation (surface pièzométrique) Source RP-64887-FR et BSS.

5.2.3. Paramètres du sous-sol

Une analyse hydrogéologique a été menée dans le cadre du projet de « Guide d'aide à la décision pour l'installation de pompes à chaleur sur nappe aquifère en région Ile-de-France » et a donné naissance à un atlas hydrogéologique qui fait état des connaissances de l'hydrogéologie et des propriétés du sous-sol (Schomburgk et al., 2005) rapport BRGM/RP-53306-FR). Ces

connaissances s’ajoutent aux données disponibles dans la base de données du sous-sol (BSS), de la base de données relative aux informations sur les eaux souterraines (BSS EAU), ainsi que les informations et données disponibles dans la base de données ADES continuellement misent à jour. De plus, des données sont répertoriées sur le site du SIGES, geothermies.fr ainsi que dans différents rapports (exemple : (Bault et al., 2015) rapport BRGM/RP-64887-FR).

5.2.4. Caractéristiques hydrodynamiques

La Banque des données du Sous-Sol (BSS, consultable sur <https://infoterre.brgm.fr/>) en Ile-de-France recense 49 246 ouvrages, dont 19 804 sont des ouvrages traitant de l’eau (eau potable, puits et forages privés, forages agricoles, forages d’eau industriels, etc.). Dans le secteur de la Métropole du Grand Paris et concernant la géothermie : 85 forages à la Craie sont existants ou déclarés, 166 forages au Lutétien sont existants ou déclarés et à l’Yprésien 71 forages sont existants ou déclarés. Parmi ces ouvrages recensés au sein de la Métropole, certains ouvrages ont fait l’objet de mesures et d’analyses (essais de puits, analyse d’eau, etc.) dont les résultats ont ensuite été bancarisés au sein de la BSS. Des mesures et données sont donc disponibles pour une certaine partie de ces ouvrages et permettent d’obtenir des informations sur les propriétés intrinsèques (débit maximum exploitable, coefficient d’emmagasinement, transmissivité, hauteur captée, conductivité hydraulique) des différents aquifères (Lutétien, Yprésien et Craie) : 74 ouvrages pour le Lutétien, 24 ouvrages pour l’Yprésien et 43 pour la Craie (Figure 30). Ces informations renseignent notamment sur l’exploitabilité des formations.

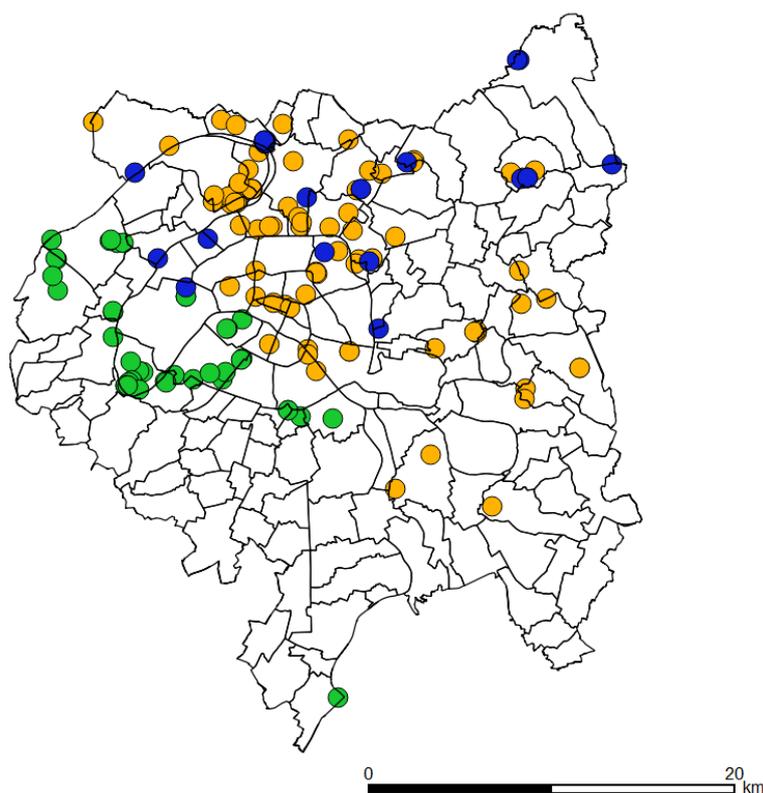


Figure 30 : Localisation des ouvrages possédant des informations sur les propriétés intrinsèques des aquifères. Les couleurs correspondent à l’aquifère (Orange : Lutétien ; Bleu : Yprésien et Vert : Craie).
Source : BSS et ADES

h) Lutétien :

Transmissivité

La transmissivité régit le débit d'eau qui s'écoule, par unité de largeur, d'un aquifère sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. La transmissivité T (m^2/s) est le produit de la conductivité hydraulique K (m/s) par l'épaisseur e (m) de l'aquifère. Cette valeur est mesurée sur le terrain lors des pompages d'essai, elle est donc dépendante aussi de la qualité de réalisation du forage.

Pour l'aquifère du Lutétien, 74 valeurs de transmissivité sont disponibles, ces valeurs varient de $1E-4$ m^2/s à $1E-1$ m^2/s . Selon la distribution de ces transmissivités au sein de la Métropole du Grand Paris, trois classes peuvent être proposées. La zonation suivant les trois classes de transmissivité est présentée dans la Figure 31.

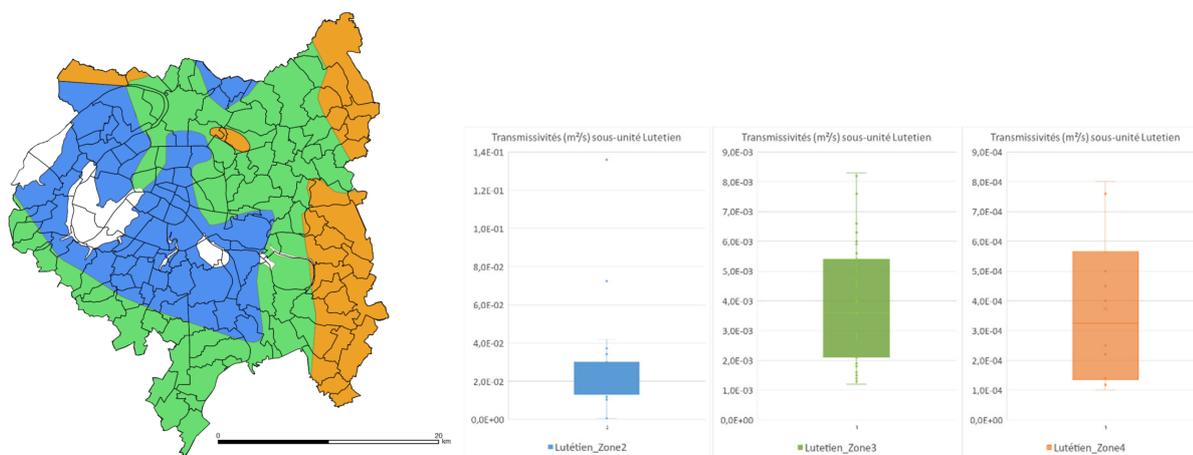


Figure 31 : Gauche : Zonation du lutétien en fonction de trois classes de transmissivité ($1E-2$: Bleu ; $1E-3$: Vert et $1E-4$ m^2/s : Orange). Droite : Distribution statistique des valeurs de transmissivité pour chaque zone identifiée dans le Lutétien. Source : BSS.

Conductivité hydraulique :

A partir des valeurs de transmissivité et des cartes d'épaisseur, la conductivité hydraulique K (m/s) des différentes zones a été recalculées (Figure 32). **La conductivité hydraulique K** traduit la capacité d'un milieu poreux à laisser s'écouler un fluide sous l'effet d'un gradient de pression, elle englobe donc l'influence des propriétés du fluide in-situ (densité et viscosité) ainsi que celle du milieu intrinsèque. En tenant compte des propriétés du fluide, il est donc possible d'estimer la valeur de perméabilité intrinsèque du milieu (paramètre qui sera utilisé dans les modélisations, section 6.1). Pour les trois zones de transmissivité identifiées dans le Lutétien :

- **Transmissivité $1E-2$ m^2/s (bleu)** : Les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane pour la conductivité hydraulique sont respectivement de : $3.2E-4$; $8.4E-4$ et $6E-4$ m/s ;
- **Transmissivité $1E-3$ m^2/s (vert)** : Les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane pour la conductivité hydraulique sont respectivement de : $6E-5$; $1.5E-4$ et $9E-5$ m/s ;
- **Transmissivité $1E-4$ m^2/s (orange)** : Les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane pour la conductivité hydraulique sont respectivement de : $2.5E-6$; $1.6E-5$ et $8E-6$ m/s .

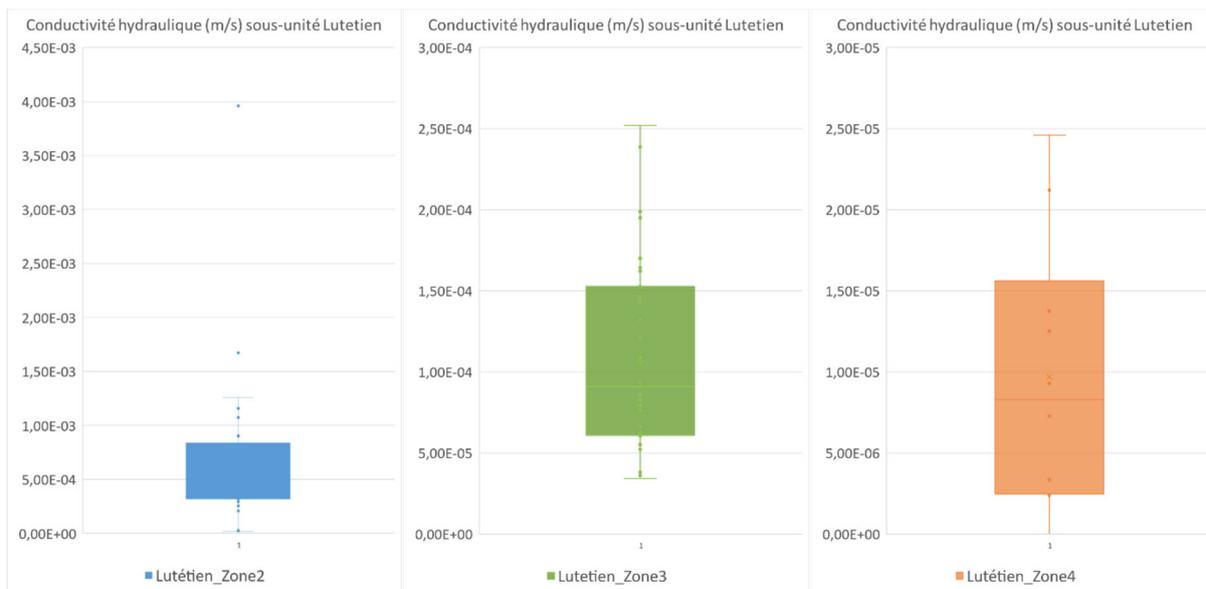


Figure 32 : Distributions statistiques des valeurs de conductivité hydraulique pour les trois zones identifiées dans le Lutétien. Source : BSS.

Vitesses d'écoulement de la nappe du Lutétien :

L'exploitation des cartes piézométriques (Figure 26 et Figure 28) permet également d'estimer la vitesse d'écoulement de l'eau dans l'aquifère en passant par l'estimation du gradient hydraulique. La vitesse d'écoulement est définie selon la formulation des écoulements issue de la loi de Darcy, comme :

$$v = \frac{Q}{S} = K \frac{(H1 - H2)}{L} \quad (1)$$

où v est la vitesse d'écoulement en m/s, S la section à travers laquelle se fait l'écoulement en m^2 , K la conductivité hydraulique en m/s de l'aquifère et H_i la hauteur d'eau en m à l'isopièze i et L la distance entre deux isopièzes en m. Le rapport $i = \frac{\Delta H}{L}$ équivaut au gradient de charge hydraulique qui est calculé à partir de la carte piézométrique en mesurant la distance entre deux courbes isopiézométriques consécutives et la différence d'altitude entre les deux niveaux d'eau.

- Pour l'aquifère du Lutétien, le gradient hydraulique moyen est calculé à partir des cartes piézométriques hautes eaux et basses eaux. La distribution statistique obtenue est présentée en Figure 33. La valeur médiane du gradient hydraulique (moyen) pour l'aquifère du Lutétien est de l'ordre de 0.154 %, le premier quartile de 0.07 % et le dernier quartile de 0.26 %.

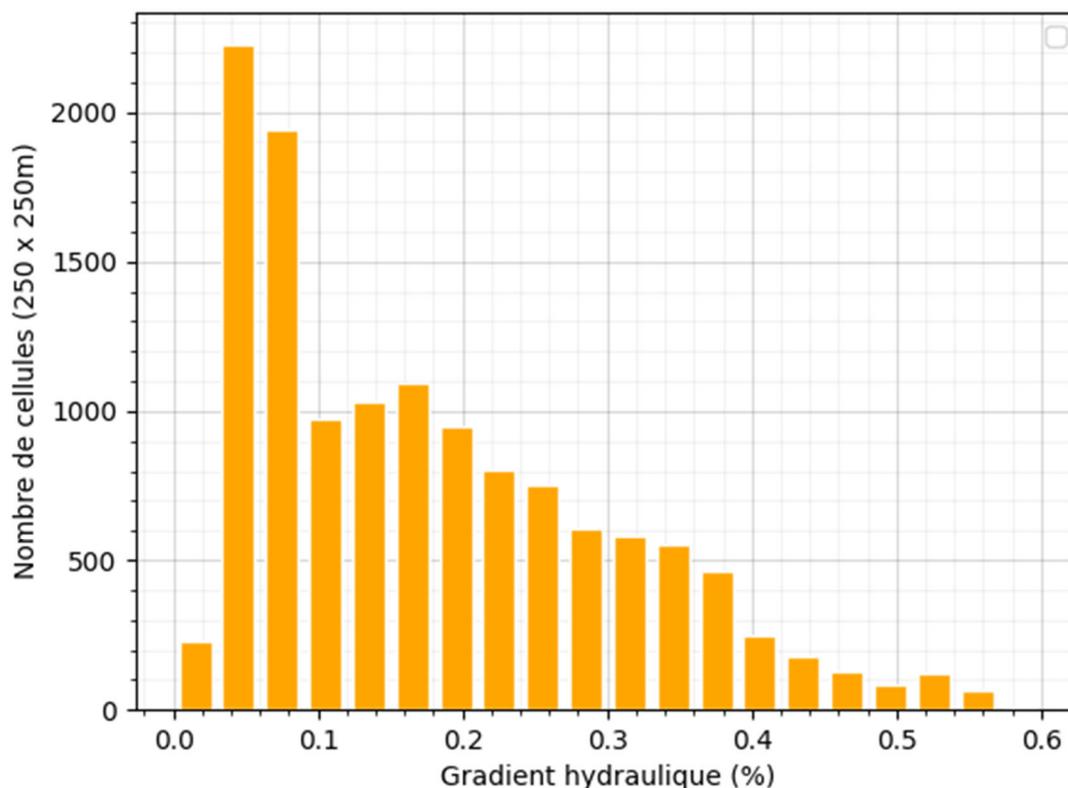


Figure 33 : Distribution du gradient hydraulique moyen dans l'aquifère du Lutétien estimé à partir des périodes de basses eaux et hautes eaux. Source RP-64887-FR et BSS.

D'après les points de mesures disponibles sur l'aquifère du Lutétien (conductivité hydraulique estimée) et de la carte du gradient hydraulique moyen calculé, les vitesses d'écoulement ont pu être estimées. A l'échelle globale de la Métropole du Grand Paris, une grande disparité des vitesses peut être observée avec une valeur maximale de 171 m/an et une valeur minimale de 0.05 m/an, la valeur médiane est de l'ordre de 6 m/an, le premier quartile est de 2 m/an et le dernier quartile de 20,5 m/an. Les vitesses d'écoulement sont présentées en fonction des zones de transmissivités précédemment identifiées (Figure 34).

- **Transmissivité 1E-2 m²/s (bleu)** : Les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane pour la vitesse d'écoulement sont respectivement de : 12 ; 43 et 25 m/s
- **Transmissivité 1E-3 m²/s (vert)** : Les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane pour la vitesse d'écoulement sont respectivement de : 3 ; 4.5 et 7.5 m/s
- **Transmissivité 1E-4 m²/s (orange)** : Les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane pour la vitesse d'écoulement sont respectivement de : 0.1 ; 0.6 et 0.2 m/s

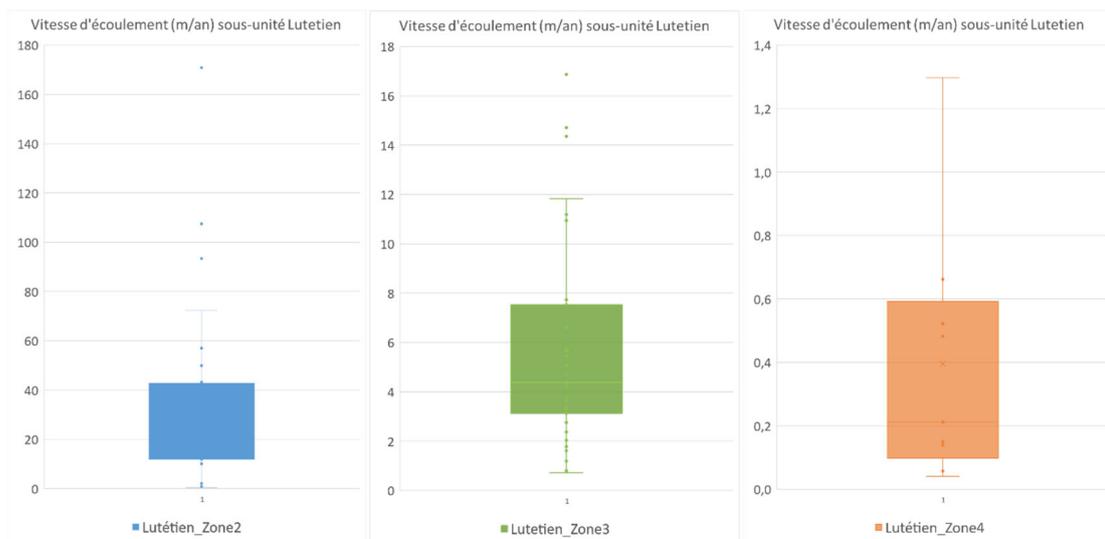


Figure 34 : Vitesses d'écoulement estimées pour chaque zone identifiée dans l'aquifère du Lutétien sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.

Débit maximal exploitable

Les essais réalisés sur les différents ouvrages conduisent à la détermination du débit maximal d'exploitation. Concernant l'aquifère du Lutétien 67 valeurs de débit sont disponibles, la distribution de ces débits est présentée en Figure 35 pour chaque zone identifiée.

- **Transmissivité 1E-2 (bleu)** : Les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane pour le débit maximal exploitable sont respectivement de : 26.5 ; 132 et 58.5 m³/h
- **Transmissivité 1E-3 (vert)** : Les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane pour le débit maximal exploitable sont respectivement de : 37 ; 100 et 60 m³/h
- **Transmissivité 1E-4 (orange)** : Les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane pour le débit maximal exploitable sont respectivement de : 14 ; 30 et 23 m³/h

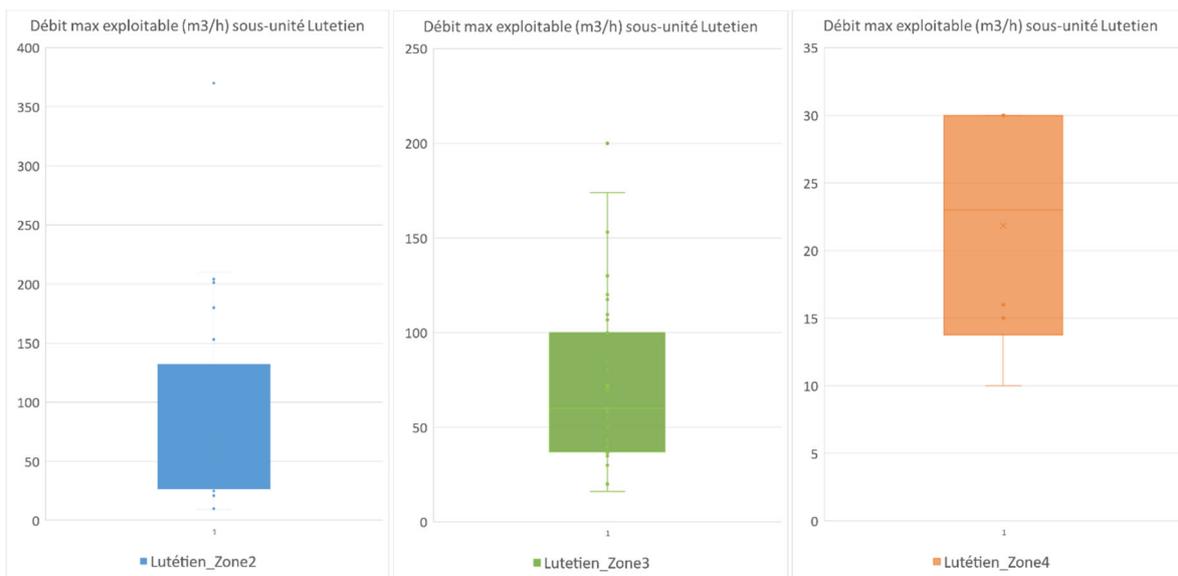


Figure 35 : Distribution statistique des valeurs de débit maximal exploitable pour l'aquifère du Lutétien. Source : BSS.

i) Yprésien :

Transmissivité

Pour l'aquifère de l'Yprésien, 23 valeurs de transmissivité sont disponibles, ces valeurs varient de $1\text{E-}3$ m²/s à $4\text{E-}2$ m²/s. La valeur médiane de transmissivité est de $6\text{E-}3$ m²/s, le premier quartile est de l'ordre de $3.5\text{E-}3$ m²/s et le dernier quartile de l'ordre de $7.6\text{E-}3$ m²/s (Figure 36).

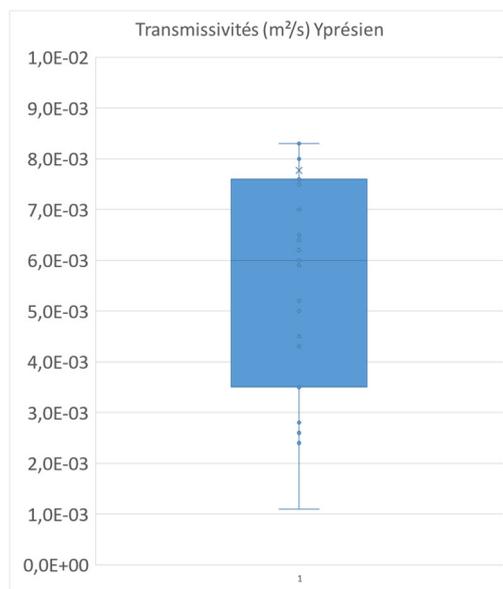


Figure 36 : Distribution statistique des valeurs de transmissivité pour l'aquifère de l'Yprésien sur le territoire de la métropole. Source : BSS.

Conductivité hydraulique :

A partir des valeurs de transmissivité et des cartes d'épaisseur, la conductivité hydraulique K (m/s) des différentes zones a été recalculées (Figure 37). Pour l'aquifère de l'Yprésien, les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane pour la conductivité hydraulique sont respectivement de : $1\text{E-}4$; $2.1\text{E-}4$ et $1.6\text{E-}4$ m/s.



Figure 37 : Distribution statistique des valeurs de conductivité hydraulique pour l'aquifère de l'Yprésien sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.

Vitesses d'écoulement de la nappe de l'Yprésien :

L'exploitation des cartes piézométriques (Figure 25 et Figure 27) permet également d'estimer la vitesse d'écoulement de l'eau dans l'aquifère en passant par l'estimation du gradient hydraulique.

A partir des surfaces piézométriques, des calculs de pente sont effectués et permettent d'obtenir des cartes (en période basses eaux et hautes eaux) de gradient hydraulique. À l'échelle de la Métropole du Grand Paris :

- Pour l'aquifère de l'Yprésien, le gradient hydraulique moyen est calculé à partir des cartes piézométriques hautes eaux et basses eaux. La distribution statistique obtenue est présentée en Figure 33. La valeur médiane du gradient hydraulique (moyen) pour l'aquifère de l'Yprésien est de l'ordre 0.168 %, le premier quartile de 0.075 % et le dernier quartile de 0.238 %.

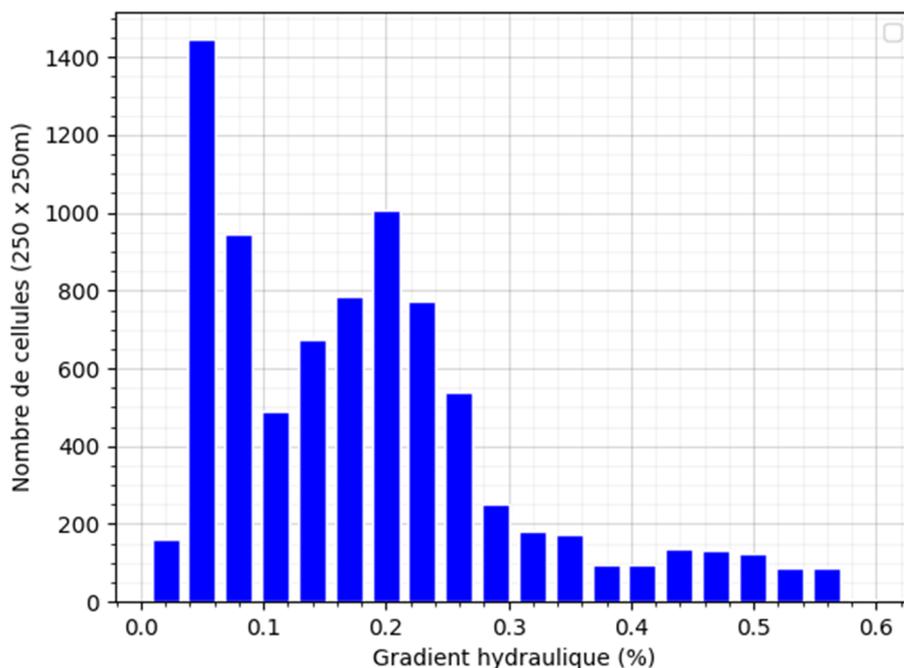


Figure 38 : Distribution du gradient hydraulique moyen dans l'aquifère de l'Yprésien (bleu) estimé à partir des périodes de basses eaux et hautes eaux sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.

D'après les points de mesures disponibles sur l'aquifère de l'Yprésien (conductivité hydraulique estimée) et de la carte du gradient hydraulique moyen calculé, les vitesses d'écoulement ont pu être estimées. Pour l'aquifère de l'Yprésien, la valeur médiane est de l'ordre de 14 m/an, le premier quartile est de 10 m/an et le dernier quartile de 33 m/an.

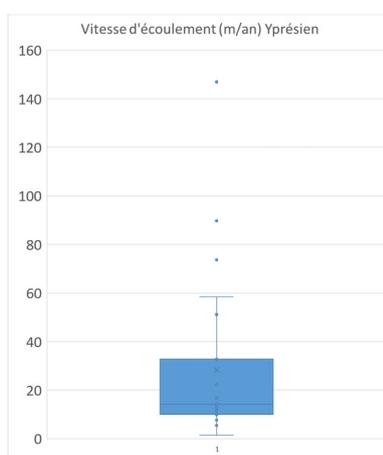


Figure 39 : Distribution statistique des vitesses d'écoulement estimées pour l'aquifère de l'Yprésien.

Débit maximal exploitable

Concernant l'aquifère de l'Yprésien, 23 valeurs de débit sont disponibles, la distribution statistique de ces débits est présentée en Figure 40. Pour les débits au sein de l'aquifère de l'Yprésien, les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane sont respectivement de : 52 m³/h, 202 m³/h et 109 m³/h.

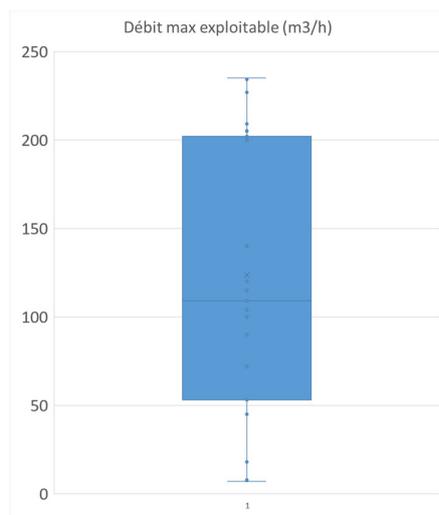


Figure 40 : Distribution statistique des valeurs de débit maximal exploitable pour l'aquifère de l'Yprésien sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.

j) Craie :

Transmissivité

Pour l'aquifère de la Craie, 40 valeurs de transmissivité sont disponibles, ces valeurs varient de $3E-4$ m²/s à $1.75E-1$ m²/s. La valeur médiane de transmissivité est de $7.65E-3$ m²/s, le premier quartile est de l'ordre de $1.3E-3$ m²/s et le dernier quartile de l'ordre de $5.7E-2$ m²/s (Figure 36).

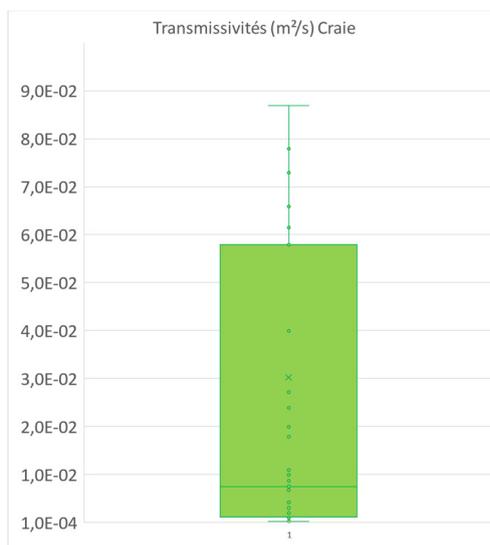


Figure 41 : Distribution statistique des valeurs de transmissivité pour l'aquifère de la Craie sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.

Conductivité hydraulique :

A partir des valeurs de transmissivité et de hauteur captée, la conductivité hydraulique K (m/s) des différentes zones a été recalculées (Figure 42). Pour l'aquifère de la Craie, les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane pour la conductivité hydraulique sont respectivement de : $6.6E-5$; $3.4E-4$ et $1.7E-3$ m/s.

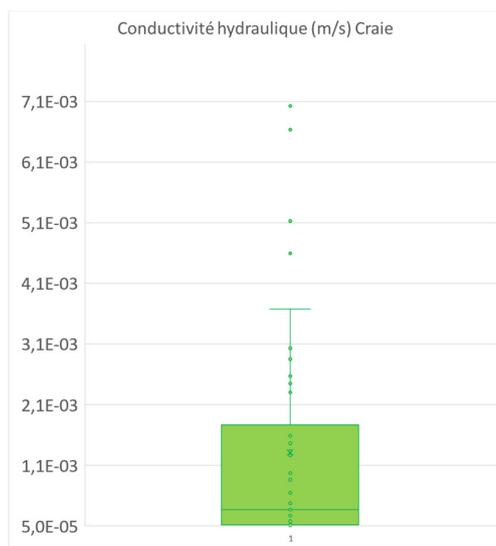


Figure 42 : Distribution statistique des valeurs de conductivité hydraulique pour l'aquifère de la Craie sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.

Vitesses d'écoulement de la Craie :

L'exploitation des cartes piézométriques permet également d'estimer la vitesse d'écoulement de l'eau dans l'aquifère en passant par l'estimation du gradient hydraulique.

A partir des surfaces piézométriques, des calculs de pente sont effectués et permettent d'obtenir une carte de gradient hydraulique. A l'échelle de la Métropole du Grand Paris où la Craie est sous faible recouvrement la distribution statistique obtenue est présentée en Figure 33. La valeur médiane du gradient hydraulique est de l'ordre 0.24 %, le premier quartile de 0.059 % et le dernier quartile de 0.6 %.

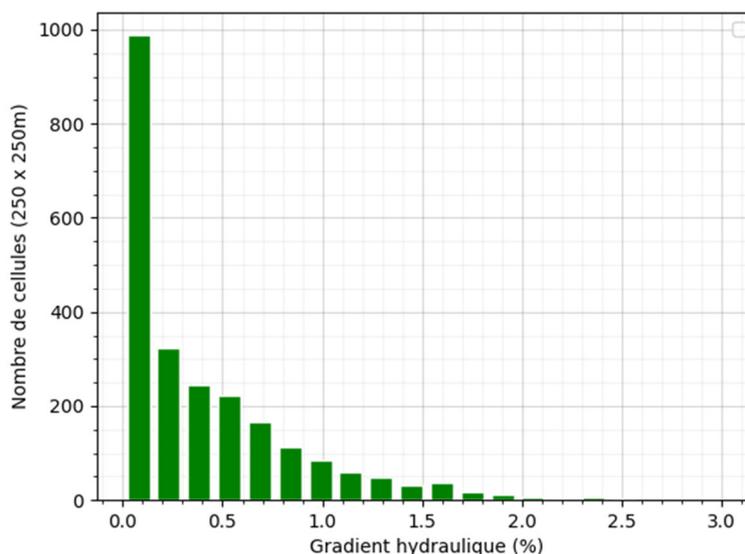


Figure 43 : Distribution du gradient hydraulique moyen dans l'aquifère de la Craie (vert) estimé à partir de la carte piézométrique de l'atlas hydrogéologique sur le territoire de la métropole. Source RP-53306-FR et BSS.

D'après les points de mesures disponibles sur l'aquifère de la Craie (conductivité hydraulique estimée) et de la carte du gradient hydraulique calculé, les vitesses d'écoulement ont pu être

estimées. Pour l'aquifère de la Craie, la valeur médiane est de l'ordre de 24 m/ann, le premier quartile est de 3 m/ann et le dernier quartile de 102 m/ann.

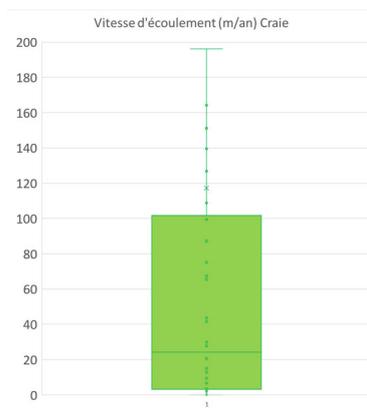


Figure 44 : Distribution statistique des vitesses d'écoulement estimées pour l'aquifère de la Craie sur le territoire de la métropole. Source RP-64887-FR et BSS.

Débit maximal exploitable

Concernant l'aquifère de la Craie, 43 valeurs de débit sont disponibles, la distribution statistique de ces débits est présentée en Figure 45. Pour les débits au sein de l'aquifère de la Craie, les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la médiane sont respectivement de : 35 m³/h, 100 m³/h et 59 m³/h.

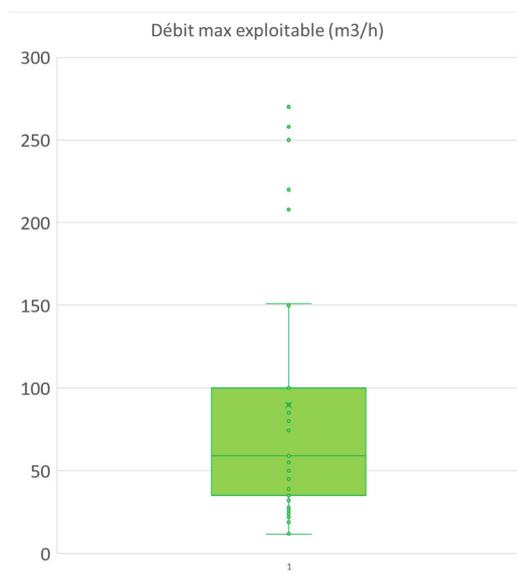


Figure 45 : Distribution statistique des valeurs de débit maximal exploitable pour l'aquifère de la Craie sur le territoire de la métropole. Source : BSS.

5.2.5. Température de l'eau

Au sein de la Métropole du Grand Paris, très peu de données ont été répertoriées concernant la température de l'eau des aquifères considérés, suite à l'interrogation de la base de données ADES (<https://ades.eaufrance.fr/>). Quatorze ouvrages localisés dans un rayon d'environ 50 km autour de la Métropole disposent de données de température (Figure 46). Néanmoins, un seul

de ces ouvrages est localisé au sein de la Métropole (id BSS : BSS000NHAE). Cet ouvrage, localisé à La Courneuve, atteint une profondeur de 83,4 m et correspond à l'entité des argiles plastiques de l'Yprésien inférieur d'après la BD LISA. La chronique de température correspondant à cet ouvrage est présentée en Figure 47.

Il convient de remarquer que ces données doivent être prises avec précaution puisque des dérives du capteur peuvent survenir avec le temps, comme cela pourrait être le cas dans cet exemple. Compte tenu de l'incertitude liée à cette mesure, les ouvrages situés hors de la Métropole du Grand Paris sont utilisés pour obtenir une approximation de la température.

De manière globale et selon les données à notre disposition pour les différents aquifères, la température moyenne est d'environ 11,9°C pour la Craie sous faible recouvrement, d'environ 12°C pour l'aquifère du Lutétien et d'environ 12,2°C pour l'Yprésien (sans tenir compte de l'ouvrage situé à la Courneuve) et de 13,1°C si l'on tenait compte de l'ouvrage de la Courneuve. Un exemple des chroniques utilisées pour chaque aquifère est présenté en Figure 48.

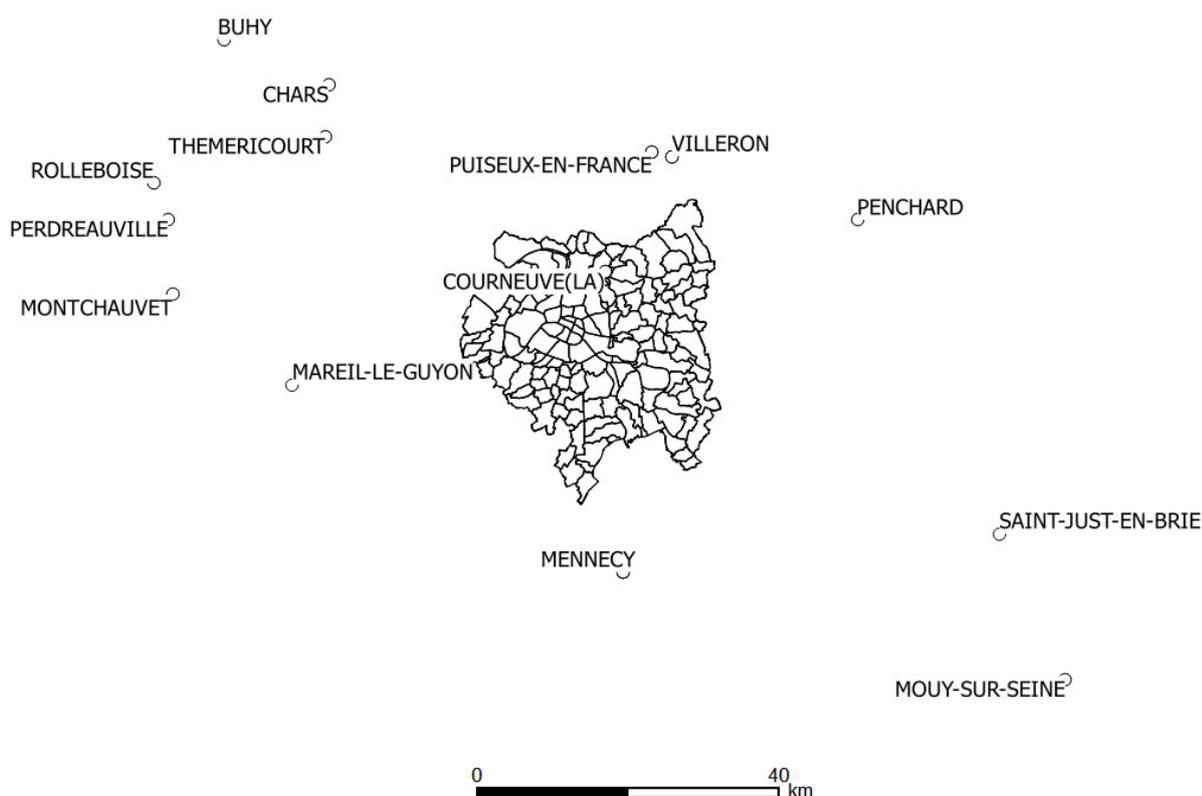


Figure 46 : Ouvrages disposant de mesures de température pour les aquifères cibles (Lutétien, Yprésien et Craie) autour de la Métropole du Grand Paris Source : BSS et ADES

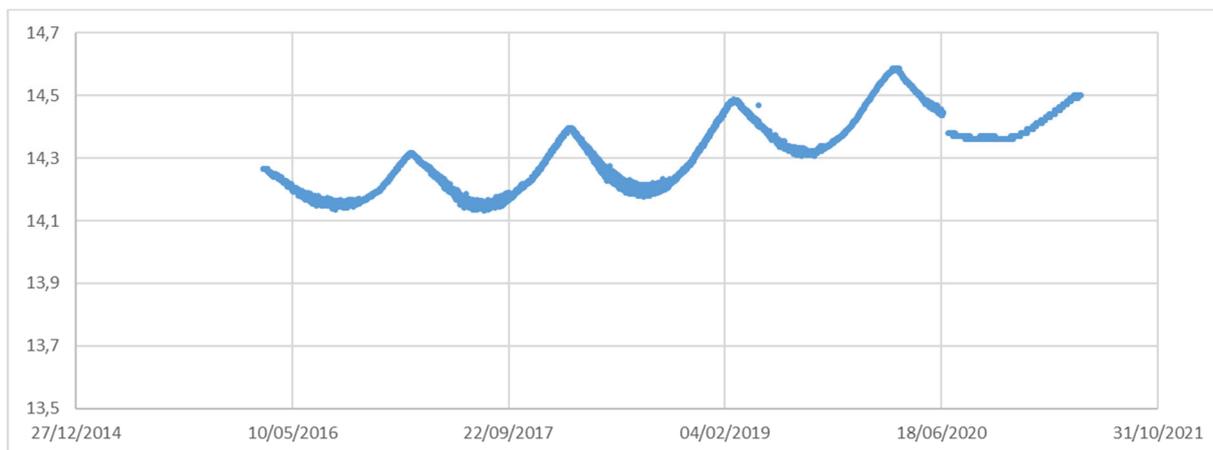
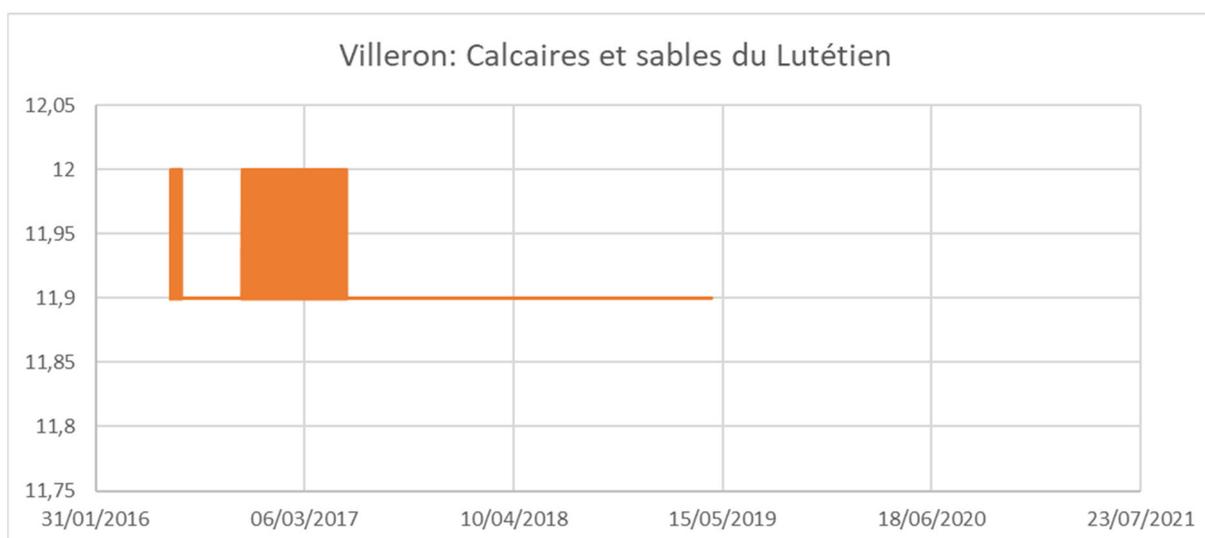
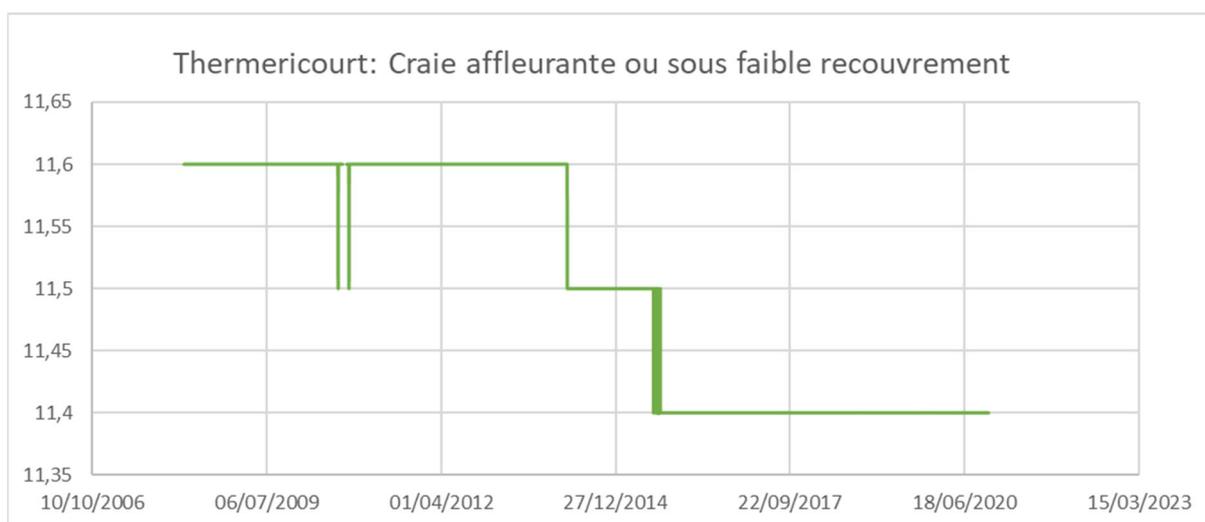


Figure 47 : Chronique de température (°C) mesurée sur l'ouvrage BSS000NHAE à la Courneuve.
Source : ADES



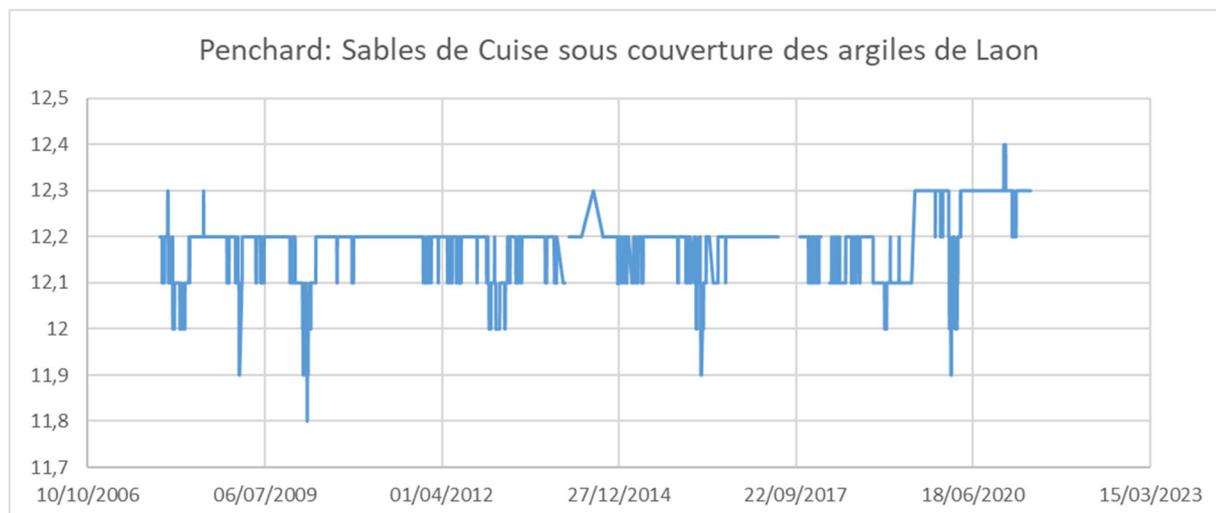


Figure 48 : Exemples de chroniques de température pour chaque aquifère: Craie (Thericourt), Villeron (Lutétien) et Penchard (Yprésien), source ADES.

5.2.6. Données issues des tests de réponse thermiques

Le BRGM et l'ADEME collectent, bancarisent et diffusent les résultats de tests de réponse thermique (TRT) sur l'ensemble du territoire national (Maragna et al., 2020). Pour rappel, le TRT est une procédure permettant d'estimer les propriétés du sous-sol traversé par une sonde géothermique verticale, i.e. la température initiale T_0 [°C], la conductivité thermique moyenne λ_m [$\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$] du sous-sol et la résistance thermique de la sonde-test R_f [K.m.W^{-1}] (Reiss et al., 2012). Ces mesures sur une sonde-test permettent d'optimiser la conception d'un champ de sondes en réalisant le nombre de sondes strictement nécessaires à la couverture du besoin (Reiss et al., 2012).

Au 1er septembre 2021, on recense ainsi 25 TRT sur l'emprise de la Métropole du Grand Paris, principalement au Nord-Ouest d'un axe allant du Sud-Ouest au Nord-Est (cf. Figure 50). L'autre moitié du territoire (Sud-Est) est entièrement dépourvue de données. Trois conductivités thermiques sont anormalement élevées ($\lambda_m > 7 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$). Cela peut s'expliquer par des écoulements souterrains rapides et localisés, résultant de la présence de pompages à proximité, ou de la présence de nappes à écoulements plus rapides.

Sur la base de ces données, on a cherché à déterminer la conductivité thermique des principales formations géologiques décrites par le modèle de la DRIEAT au droit de la Métropole du Grand Paris (cf. section 5.2.1 p 38). Les 3 TRT aux valeurs de conductivité thermiques anormalement élevées sont exclues de l'analyse dans la mesure où l'origine de l'anomalie était inconnue. Les principales formations traversées par les 25 forages sont la Craie (39 % de la longueur forée totale), le Lutétien (15 %), le Sparnacien (13 %), les sables de Fontainebleau (11 %), puis le calcaire de Saint-Ouen (5 %) (cf. Figure 49).

Cartographie du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire de la Métropole du Grand Paris

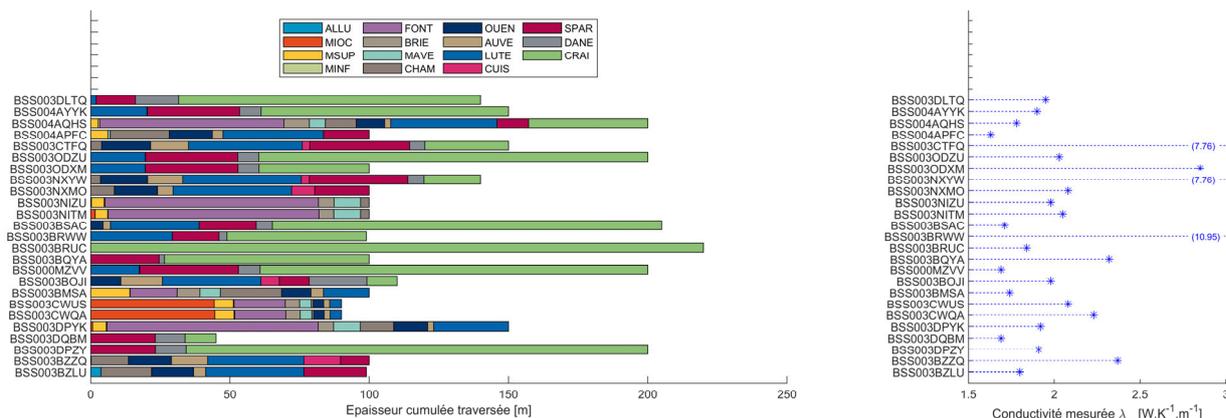


Figure 49 : Coupes géologiques des 25 sondes géothermiques verticales traversées et conductivité thermique correspondante. Source : Modèle géologique Ile-de-France et Banque de données du sous-sol.

À chaque TRT on associe une conductivité thermique « théorique » qui est la moyenne des conductivités de chaque lithologie traversée pondérée par les épaisseurs. On peut alors rechercher numériquement les valeurs de conductivité thermique de chaque lithologie qui permettent de reproduire « au mieux » les valeurs mesurées, suivant une procédure décrite en (Maragna et al., 2020). Une fois minimisé, l'écart quadratique entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites est de $0,22 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ (cf. Figure 51 et la ligne rouge pointillée sur la Figure 52). Si on avait considéré une conductivité thermique sur l'ensemble de la Métropole du Grand Paris, la « meilleure » valeur possible aurait été $1,98 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$, associée à un écart de $0,26 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ (cf. le point bleu en forme d'étoile sur la Figure 52). Le modèle associant lithologie et conductivité thermique fait donc un peu mieux qu'une valeur constante sur l'ensemble de la Métropole, sans que l'écart ne soit cependant élevé (cf. Tableau 1). En lien avec ces résultats et du fait du nombre peu élevé de TRT disponibles, on considèrera donc une conductivité thermique égale à $1,98 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ sur l'ensemble de la métropole pour la suite de l'étude.

Cartographie du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire de la Métropole du Grand Paris

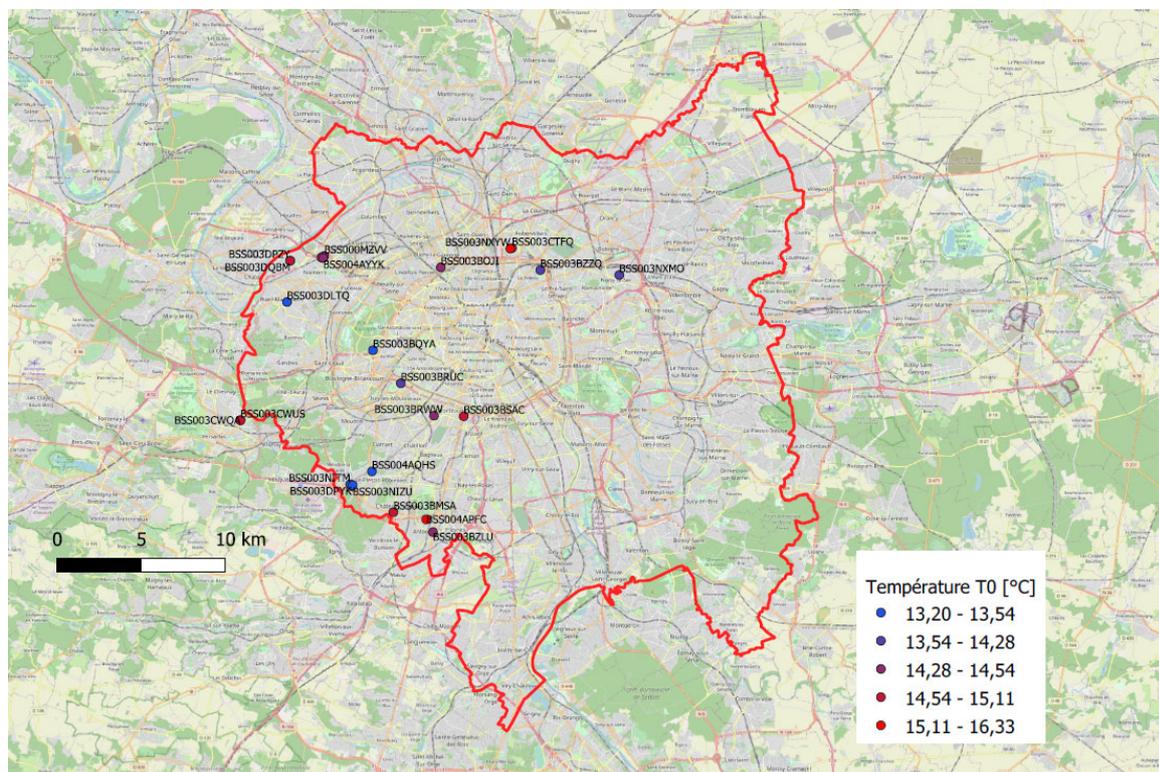
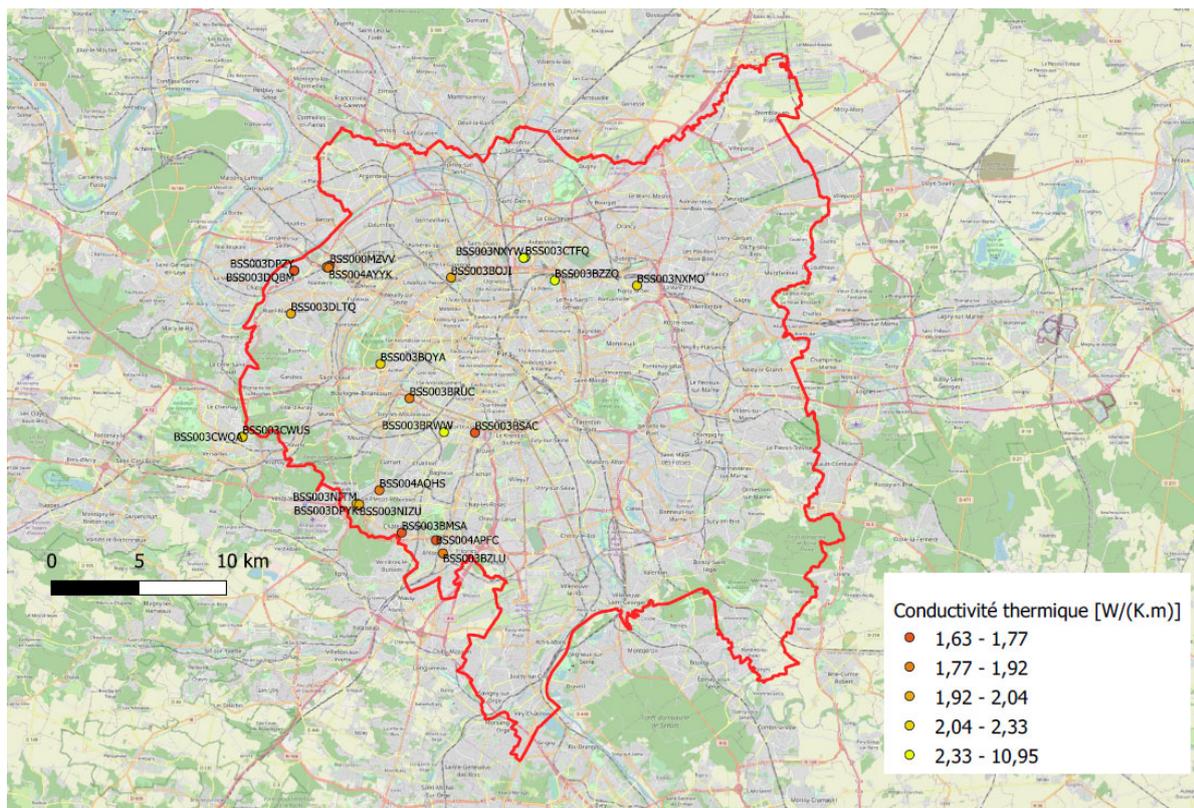


Figure 50 : Conductivité thermique λ_m et température T_0 mesurées sur les 25 sondes géothermiques verticales pour lesquelles on dispose d'un rapport de Test de Réponse Thermique. Source : Banque de données du sous-sol.

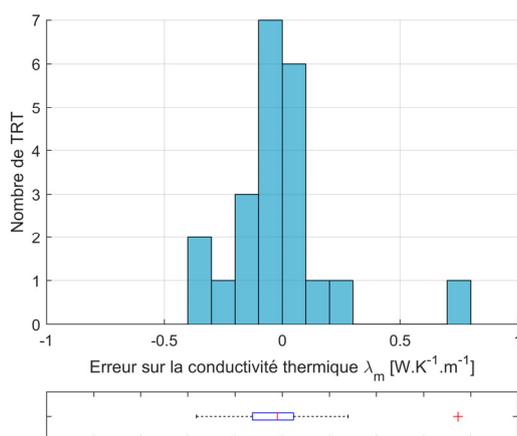


Figure 51 : Erreur sur la conductivité thermique prédite par le modèle. Traitement des données de la Banque de Données du Sous-sol.

Lithologie		Longueur cumulée [m]	Conductivité thermique [W/(K.m)]
Craie	CRAI	1179,45	1,87
Lutétien	LUTE	384,09	2,10
Sables de Fontainebleau	FONT	348,15	1,83
Sparnacien	SPAR	331,46	2,63
Saint-Ouen	OUEN	117,11	1,98
Champigny	CHAM	113,97	1,98
Calcaires et Marnes de Meudon	DANE	96,23	1,98
Miocène	MIOC	91,58	1,98
Auversien	AUVE	57,29	1,98
	MAVE	51,08	1,98
	MSUP	50,51	1,98
Calcaires de Brie	BRIE	44,03	1,98
Cuisien	CUIS	28,44	1,98
Alluvions	ALLU	3,69	1,98
Miocène Inférieur	MINF	1,92	1,98

Tableau 1 : Valeurs de conductivité thermique obtenues par l'interprétation des TRT.

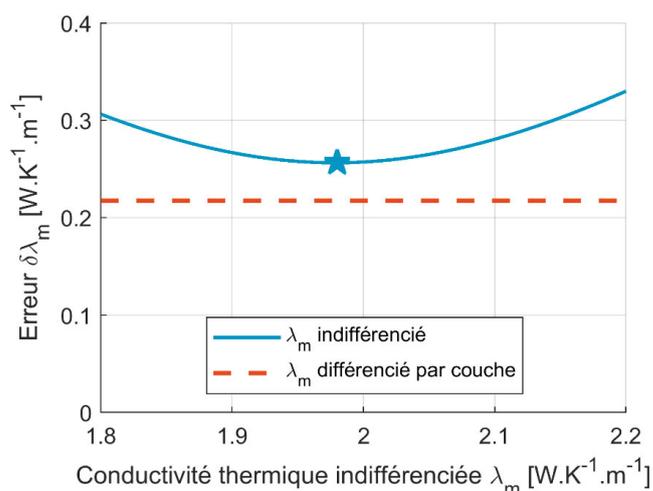


Figure 52 : Erreur quadratique moyenne mesurée sur l'ensemble des TRT en fonction de la valeur de conductivité mesurée. Traitement des données BSS

Par ailleurs, il n'existe pas de corrélation de la température T_0 avec la profondeur (cf. Figure 53). Pour l'estimation du potentiel des sondes géothermiques verticales, on considérera donc une température constante sur l'ensemble de la Métropole du Grand Paris, égale à 15,0 °C indépendamment de la profondeur du forage. Ce paramètre n'est pas impactant pour l'estimation du potentiel dans la mesure où on considère une différence de température (et non la valeur de la température) ensuite.

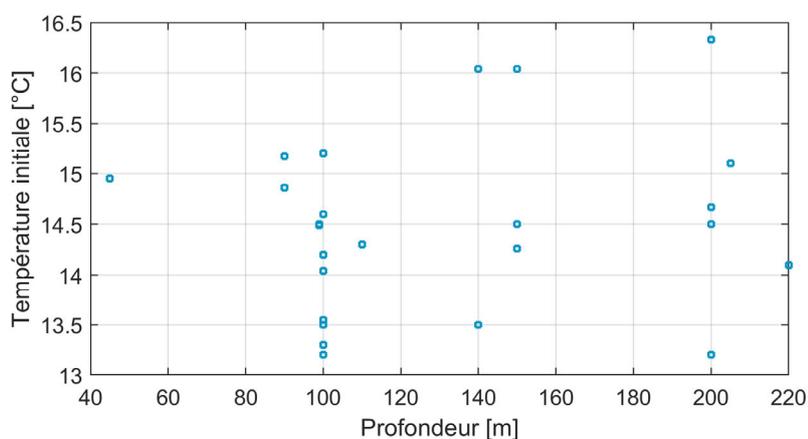


Figure 53 : Température initiale mesurée T_0 en fonction de la profondeur du forage. Source : BSS

6. Méthode d'estimation du potentiel géothermique sur nappe et sondes

Les sections 6.1 et 6.2 présentent les développements méthodologiques mis en œuvre pour estimer la quantité d'énergie extractible à l'échelle d'une parcelle ou d'un groupe de parcelles, sur nappe (6.1) et sur sondes (6.2). La section 6.3 applique ces développements à l'analyse cartographique, et présente en particulier un synoptique du traitement appliqué. Les résultats sont présentés au chapitre suivante (7).

6.1. MÉTHODOLOGIE POUR LA DÉFINITION DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE SUR NAPPE

Pour estimer le potentiel des doublets sur nappe à l'échelle de la Métropole, plusieurs questions se posent, dont :

- (i) A l'échelle de la parcelle : Etant données les contraintes foncières, comment les puits peuvent-ils être positionnés pour maximiser l'extraction d'énergie thermique ?
- (ii) A l'échelle du quartier : Quel est l'impact d'un doublet sur les installations environnantes ? Comment arbitrer entre les installations ?

Les deux questions ont été traitées pour différentes configurations du sous-sol et pour différents scénarios d'exploitation afin d'établir des modèles simplifiés qui pourraient être utilisés dans l'analyse cartographique. L'échelle de la parcelle est traitée au moyen d'une méthode analytique modifiée ; l'échelle du quartier a été traitée à l'aide d'une étude paramétrique sur des modèles hydrodynamiques et thermiques de l'exploitation d'un doublet géothermique sur nappe.

6.1.1. Description

Un modèle numérique hydrodynamique et thermique paramétrable d'un doublet a été construit dans le logiciel COMPASS (cf. ci-dessous) afin d'étudier l'influence des paramètres suivants sur la forme du panache thermique :

- (i) Les **épaisseurs** de l'aquifère et des épontes,
- (ii) Les **conductivités hydrauliques**,
- (iii) Les **espacements** des ouvrages d'injection et de production,
- (iv) Le **positionnement** des ouvrages vis-à-vis de l'écoulement régional de l'aquifère,
- (v) La **vitesse d'écoulement** au sein de l'aquifère,
- (vi) Les **scénarios d'exploitation** (i.e. les puissances extraites, les proportions entre période de chauffe et de climatisation).

L'objectif est de construire un modèle approché (ou *surface de réponse*, *métamodèle*, *proxy*, *surrogate model*, ...) de la forme de panache. Ce modèle approché sera ensuite implémenté dans le traitement cartographique. Son temps d'exécution est quasiment instantané ; on évite ainsi d'exécuter le modèle 3D du doublet sur chaque parcelle.

On appelle « plan d'expérience » la combinaison des paramètres à tester pour construire ce modèle approché. Si on voulait tester 4 valeurs pour chacun des 6 paramètres, il faudrait évaluer 4 à la puissance 6 modèles numériques (i.e. 4 096 modèles), ce qui entrainerait des temps de calcul rédhibitoire. Comme alternative, on construit le plan d'expérience à l'aide d'un hypercube

latin (méthode statistique d'échantillonnage) pour un nombre fixé a priori de 113 modèles (cf. Figure 54).

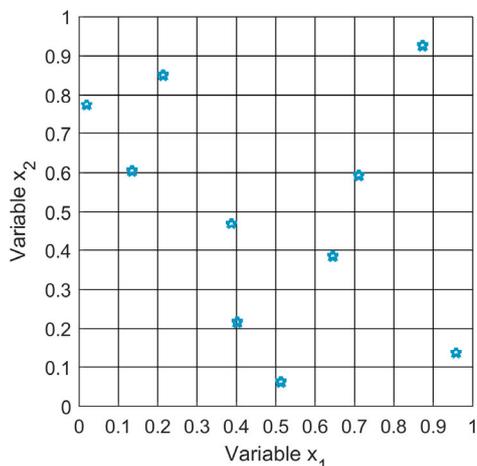


Figure 54 : Exemple de plan d'expérience à deux variables. Chaque point correspond à une combinaison pour laquelle le modèle doit être évalué. Le plan est produit par un hypercube latin, où chacune des 10 lignes et 10 colonnes ne contient qu'un seul point à évaluer.

Le résultat de ces 113 modélisations permet de caractériser l'évolution des panaches de température et de pression autour des ouvrages d'injection et de production en fonction des variations indépendantes des principaux paramètres incertains et sensibles. Des zones d'influence autour des doublets ont ensuite été définies pour les différents modèles produits et pour différents seuils de perturbation par rapport à la température initiale de l'aquifère (seuil de 2°C).

Les besoins énergétiques considérés ont été calculés par l'Ecole Polytechnique de Turin dans le projet espace alpin GRETA (GRETA project, 2017) pour 6 bâtiments dans 6 climats différents. Le type de bâtiment retenu est un « hôtel peu isolé » dans le climat de Turin, dont les caractéristiques sont proches du climat d'Ile-de-France (cf. Figure 55). Sur la Figure 55, la puissance en chauffage est normalisée à 1, elle sera mise à l'échelle en fonction du besoin demandé par le bâtiment, de manière à ce que l'aire sous les courbes rouges (chauffage) et bleus (climatisation) soient égales aux quantités d'énergie demandées par le bâtiment.

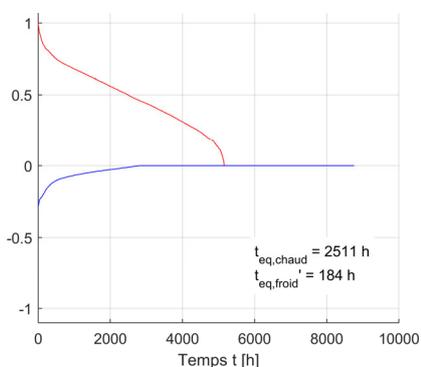


Figure 55 : Courbe monotone du bâtiment considéré pour la détermination de la taille des panaches de doublets. (GRETA project, 2017). L'axe vertical représente la puissance normalisée.

6.1.2. Limites de l'étude

Le modèle numérique du doublet ne permet pas de représenter avec exactitude la géométrie et les propriétés du sous-sol en tout point de la métropole car il considère un unique aquifère horizontal, homogène et isotrope, ou de représenter la complexité des écoulements en fonction du type d'aquifère (milieu poreux, fracturé ou fissuré). Les différences de coût d'accès à la ressource en différents points de la métropole ont été estimées par l'AFPG (Association Française des Professionnels de la Géothermie) de façon globale sur la métropole pour identifier différentes configurations. Les éléments obtenus pour les besoins de l'étude donnent des indications sur le coûts d'accès à la ressource sur le secteur de la métropole. [Les différences de coût résultent des différences d'équipement entre sondes et forages sur nappe, mais aussi de la profondeur des nappes considérées pour les installations sur boucles ouvertes.](#)

Un dimensionnement plus précis reste primordial pour identifier les investissements propres à chaque projet. L'étude présentée ici ne peut se substituer à une étude géologique, hydrogéologique et géochimique détaillée dans les secteurs identifiés pour le développement et le forage de doublet géothermique. Ces études devront être menées par des bureaux d'étude spécialisés dans le domaine de la géothermie et ayant une bonne connaissance du contexte géologique et hydrogéologique local.

Des précisions sur la construction du modèle sont apportées dans l'Annexe 2.

6.1.3. Propriétés du modèle considérés lors des simulations

La température de l'eau présente dans l'aquifère est constante sur l'ensemble du domaine étant donnée les faibles variations de profondeur et le caractère superficiel des aquifères ciblés pour l'exploitation sur nappe. D'après l'analyse des quelques données disponibles (notamment hors de la métropole), la température initiale est établie à 12°C. La température de réinjection dépendra du delta de température défini dans les chroniques. Elle sera de -5 °C par rapport à la température produite en période hivernale (production de chaleur) où de +5 °C par rapport à la température de production en période estivale pour le rafraîchissement des bâtiments.

Les propriétés définies dans le modèle pour le fluide, les formations géologiques et les ouvrages sont données ci-dessous (Tableau 2).

Propriétés	Unités	Valeur
<i>Diamètre des forages</i>	cm	24,4
<i>Porosité</i>	%	18,5
<i>Conductivité thermique totale</i>	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	2
<i>Chaleur spécifique des roches</i>	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	800
<i>Chaleur spécifique de l'eau</i>	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	4188
<i>Densité des roches</i>	kg.m ³	2000

Tableau 2 : Propriétés définies dans les modélisations. Source : BSS et <https://energieplus-lesite.be/>.

Plusieurs paramètres sensibles et présentant une certaine incertitude peuvent être identifiés lors de la réalisation de la modélisation numérique hydrothermale. Ces paramètres peuvent avoir un fort impact sur les écoulements souterrains et donc sur les variations de température attendues dans l'aquifère lors de l'exploitation. L'étude de sensibilité a permis de faire varier ces paramètres de façon indépendante pour caractériser et quantifier leur impact sur le comportement de l'aquifère après plusieurs cycles d'exploitation simulés (10 cycles - chaque cycle étant d'une durée d'un an) et plus particulièrement comprendre leurs impacts individuels sur les écoulements souterrains et la distribution du panache de température. Les paramètres considérés pour l'étude

de sensibilité sur la métropole sont listés en Tableau 3 avec les valeurs minimales et maximales testées pour chacun d'entre eux. Les perméabilités considérées s'étendent du premier quartile de la zone "orange" du Lutétien (la moins favorable de l'aquifère le moins favorable) au dernier quartile de la craie [m/s] (le plus favorable des aquifères).

A noter que les paramètres n°1 et n°2 sont liés par les relations suivantes :

$$E = E_{chauff} + E_{froid} \quad (2)$$

$$r = \frac{E_{chauff}}{E} \quad (3)$$

	Paramètre	Unité	Borne minimale	Borne maximale
1	Besoin total en énergie thermique (= chauffage + froid) E	MWh/an	100	5 000
2	Fraction de chauffage dans ce besoin r	-	0.4	1
3	Angle entre la droite reliant le puits injecteur au puits producteur et l'écoulement θ	deg	0	90
4	Distance entre les puits d	m	50	500
5	Epaisseur de l'aquifère e_{aq}	m	10	60
6	Perméabilité de l'aquifère k_{aq}	m/s	2.5×10^{-6}	1.7×10^{-3}
7	Vitesse de Darcy régionale v_D	m/an	0	150
8	Epaisseur de l'éponte e_{ep}	m	10	50
9	Perméabilité de l'éponte k_{ep}	m/s	2.5×10^{-6}	1.7×10^{-3}

Tableau 3 : Paramètres entrant en jeu dans le plan d'expérience de 133 modèles pour déterminer la taille du panache autour de doublets sur nappe

L'ouvrage d'injection sera positionné en aval du puits producteur afin d'éviter toute problématique liée au recyclage thermique au niveau de l'ouvrage de production. L'angle θ est donc compris entre 0° (puits alignés avec producteur en amont), et 90° (alignement perpendiculaire à l'écoulement).

Les résultats de l'étude sont présentés dans la section 6.1.5.

6.1.4. Conditions aux limites et conditions initiales

a) Conditions aux limites

Pour chaque modélisation, des conditions aux limites de type Dirichlet ont été définies dans le modèle. Sur l'ensemble des nœuds des mailles constituant les bordures Nord, Sud, Est et Ouest du modèle des valeurs constantes de pression et de température sont imposées. Pour ces différentes simulations, la température est imposée à 12°C , soit la température initiale considérée et la pression imposée (hydrostatique) sera définie en fonction de la vitesse d'écoulement (gradient hydraulique).

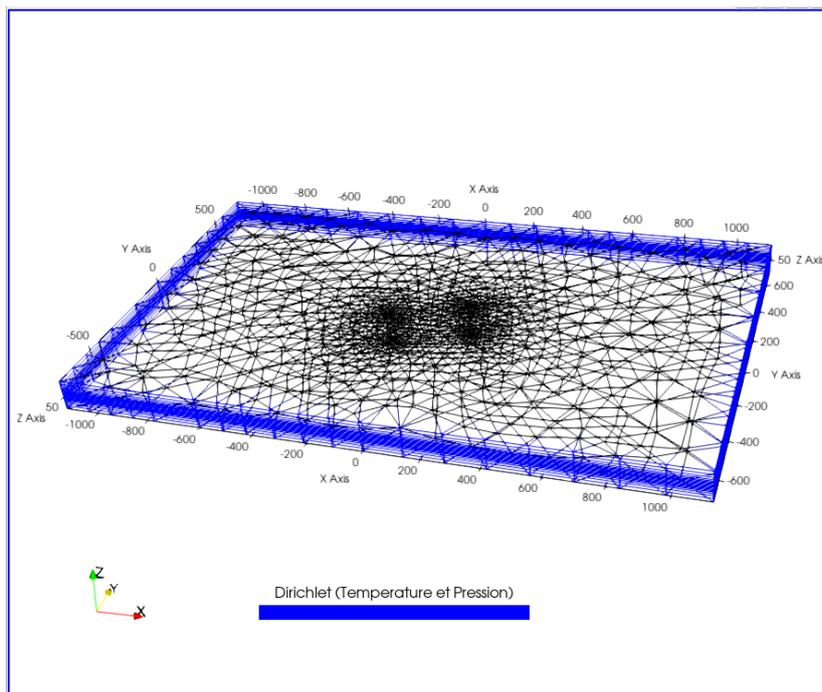


Figure 56 : Conditions de type Dirichlet appliquées sur les bords du modèle. (Source : Modèle développé par le BRGM dans le cadre de ce projet)

b) Conditions initiales

La température initiale de 12°C est considérée constante dans le modèle, on considère donc ici que l'influence du gradient géothermal (généralement autour de 3°C/km) est limitée ce qui se justifie par les faibles épaisseurs des aquifères considérées (avec une valeur médiane de 37, 34 et 60 mètres respectivement dans le Lutétien, l'Yprésien et la Craie).

Concernant la pression, d'après l'analyse des niveaux piézométriques et des gradients hydrauliques (section 5.2.4), il apparaît que les vitesses d'écoulement dans les nappes au droit de la métropole sont relativement élevées (plusieurs dizaines de m/ann). Sur la base de ce constat, la pression initiale du modèle a été définie comme une fonction linéaire suivant l'horizontale pour représenter les écoulements dans la nappe. La Figure 57 présente l'état initial en pression dans le cas d'un gradient hydraulique de 0.25 % suivant l'axe X du modèle de la droite vers la gauche. Le puits producteur est en amont de l'injecteur (cf. Figure 58).

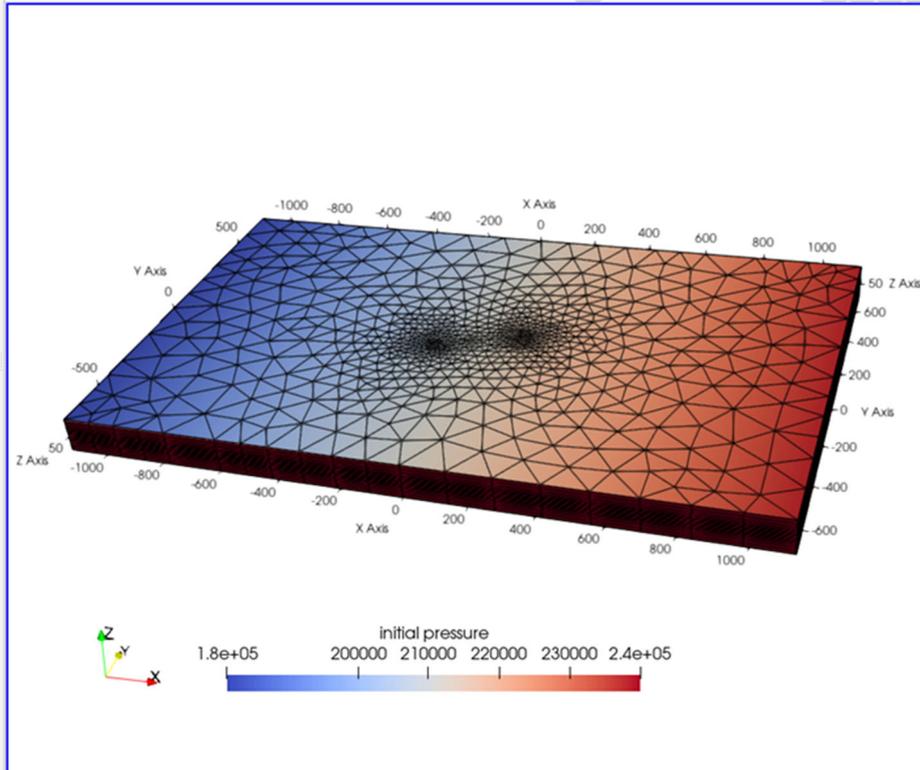


Figure 57 : Exemple des conditions initiales de pression imposées à partir d'un gradient hydraulique de 0.25% suivant l'axe X. Pression en Pa.

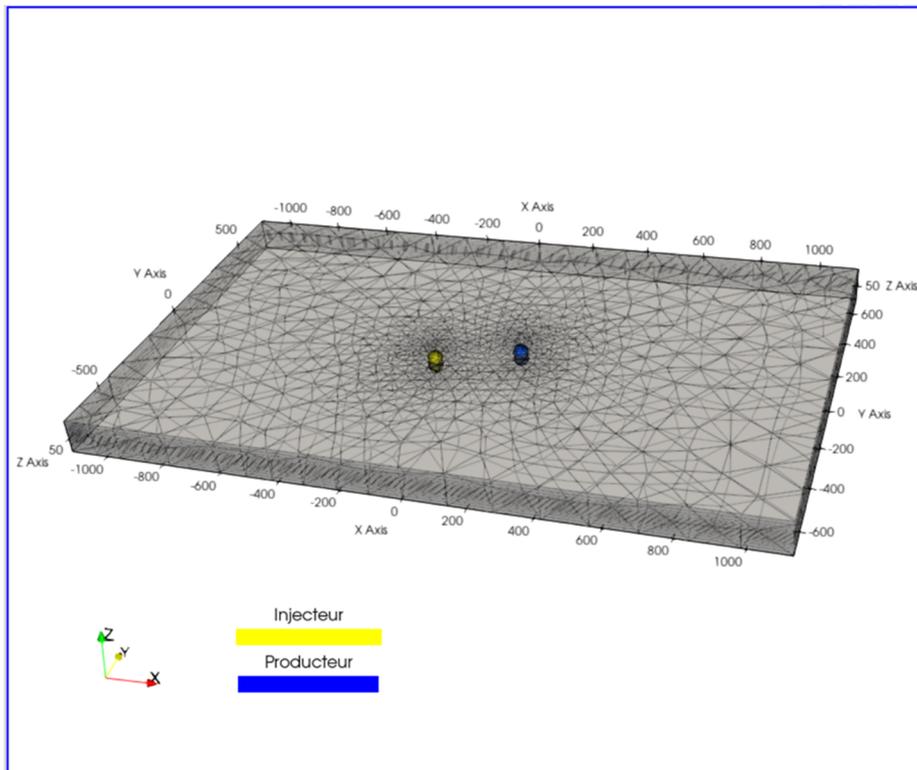


Figure 58 : Localisation des puits producteur (bleu) et injecteur (jaune)

6.1.5. Résultats des simulations

a) Exemple de cas d'exploitation

La Figure 59 présente l'évolution de la température dans la nappe au cours du temps pour le cas n°32 parmi 113 de l'étude réalisée. Le cas n°32 correspond à un doublet d'exploitation, dans lequel les ouvrages sont espacés de 396,4 mètres, décalés d'un angle de 22,5° par rapport à la direction d'écoulement de la nappe (axe X) et dont les besoins énergétiques sont en lien avec les chroniques d'exploitation modulées et présentées en Figure 59. D'autre part, dans ce cas n°32, les propriétés de l'aquifère sont les suivantes :

- Conductivité hydraulique de l'aquifère : $1,04 \cdot 10^{-3}$ m/s
- Conductivité hydraulique des formations sus et sous-jacentes à l'aquifère : $1,47 \cdot 10^{-6}$ m/s
- Epaisseur de l'aquifère : 46 m
- Epaisseur des formations sus et sous-jacentes à l'aquifère : 29 m
- Vitesse d'écoulement naturel de l'aquifère : 11,3 m/ann

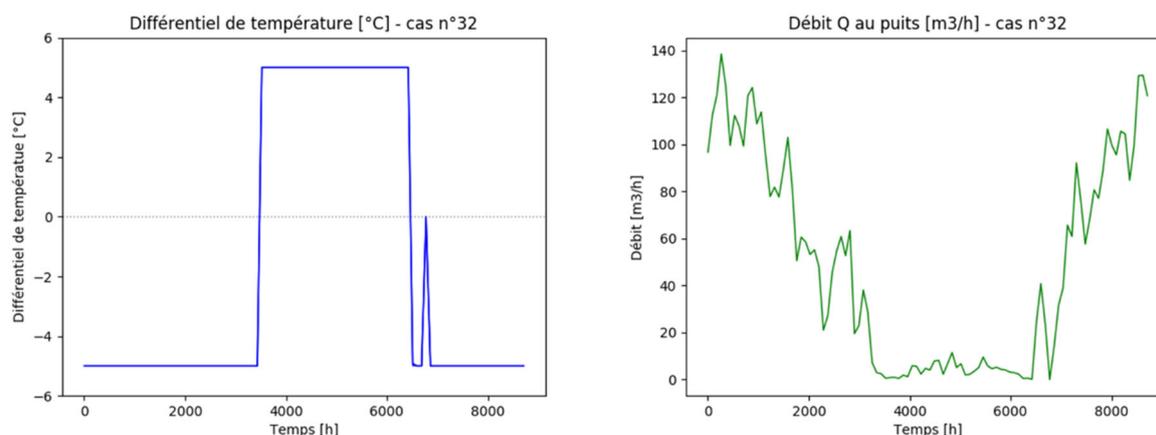


Figure 59 : Différentiel de température entre source chaude et froide (à gauche) et débit imposés (à droite) pour le cas d'exploitation n°32

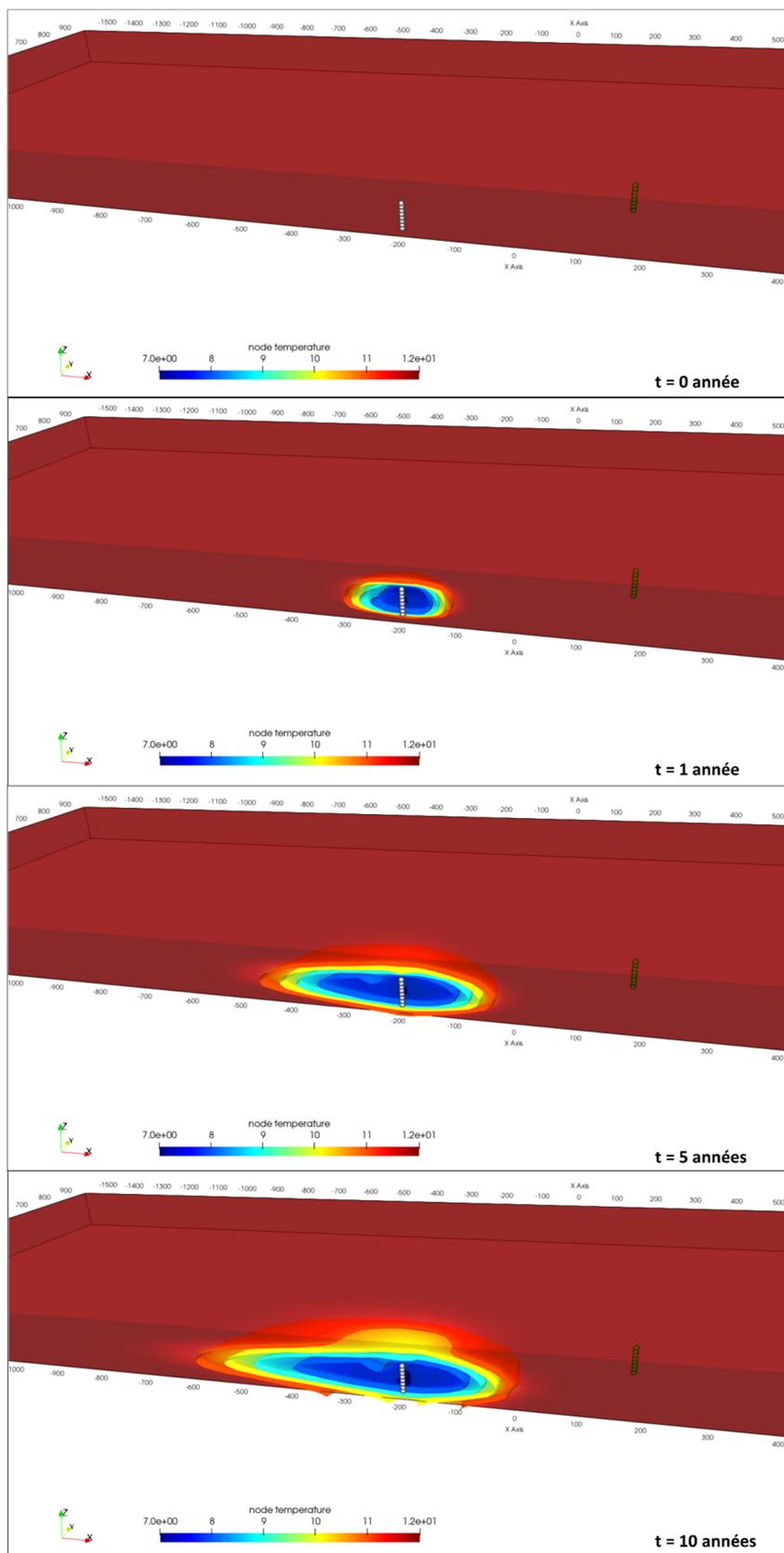


Figure 60 : Champs de température autour du puits injecteur à différents pas de temps (à l'état initial, après 1, 5 et 10 ans de cycle de chauffage/rafraîchissement) montrant l'évolution de la bulle froide au sein de l'aquifère

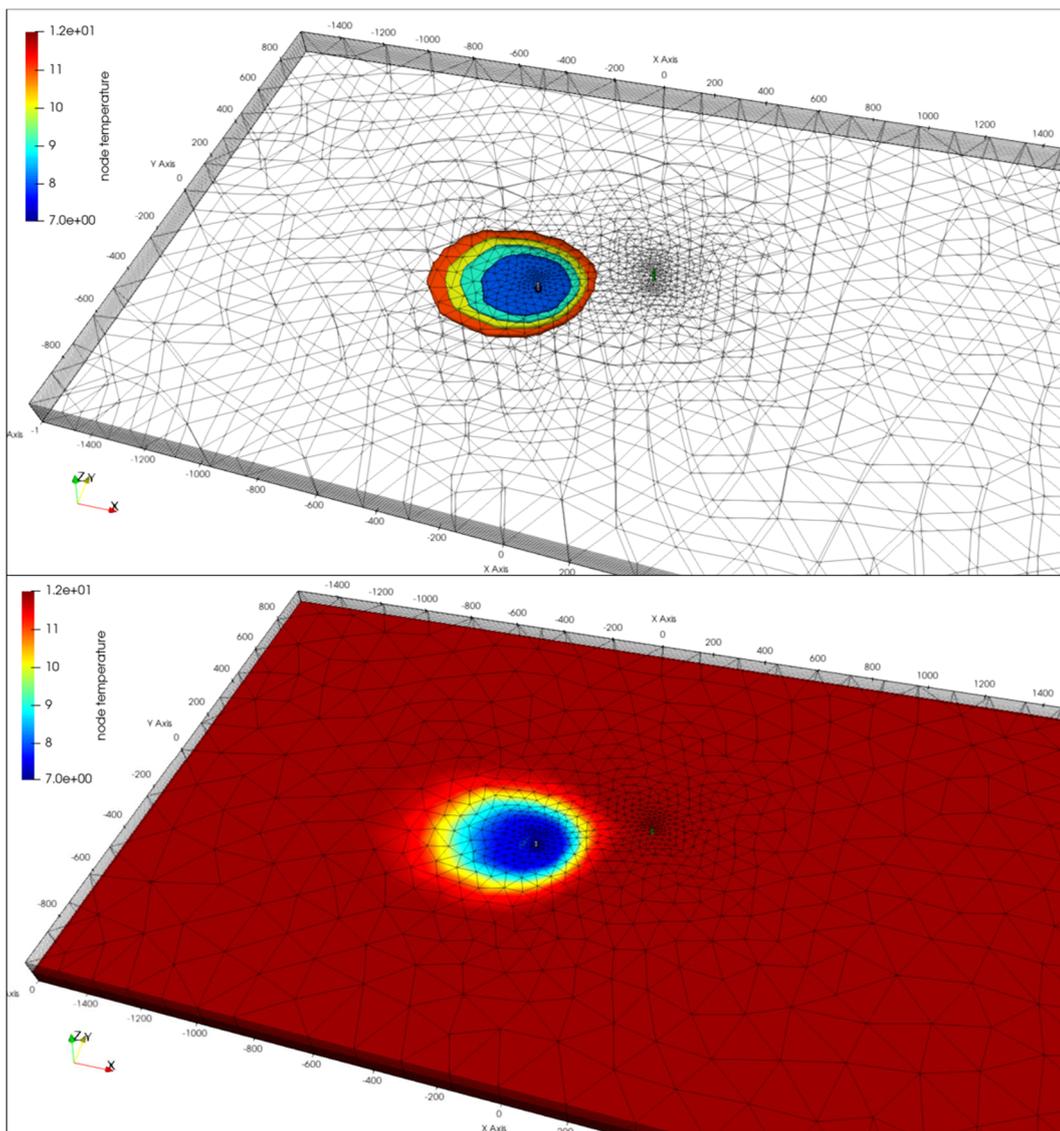


Figure 61 : Vue aérienne du champ de température autour du puits de réinjection après 10 ans de cycle de chauffage/rafraîchissement

Pour chaque simulation réalisée, la zone de perturbation thermique autour de l’ouvrage d’injection a été étudiée (Figure 62). Cette zone située autour du doublet et plus précisément autour du forage d’injection constitue un espace qui ne pourra pas être valorisée au-delà de l’exploitation existante et qui devra être prise en compte pour l’implantation de doublet dans les alentours afin d’éviter tous conflits ou interactions entre opérations. Afin de déterminer cette zone de perturbation thermique, le contour du panache de température pour un différentiel de 2°C par rapport à la température initiale du réservoir est déterminée. Cette évaluation est effectuée sur chaque mois de la 10^{ème} année (la taille du panache variant en fonction du temps et des besoins, cf. Figure 59) et pour différentes hauteurs au sein de l’aquifère, puis à partir de cette évaluation les distances x et y du panache sont calculées, et le couple de valeurs maximales (panache le plus grand) est conservé. La durée de 10 ans a été choisie comme un compromis entre temps de calcul d’une part et stabilisation de l’évolution de la température.

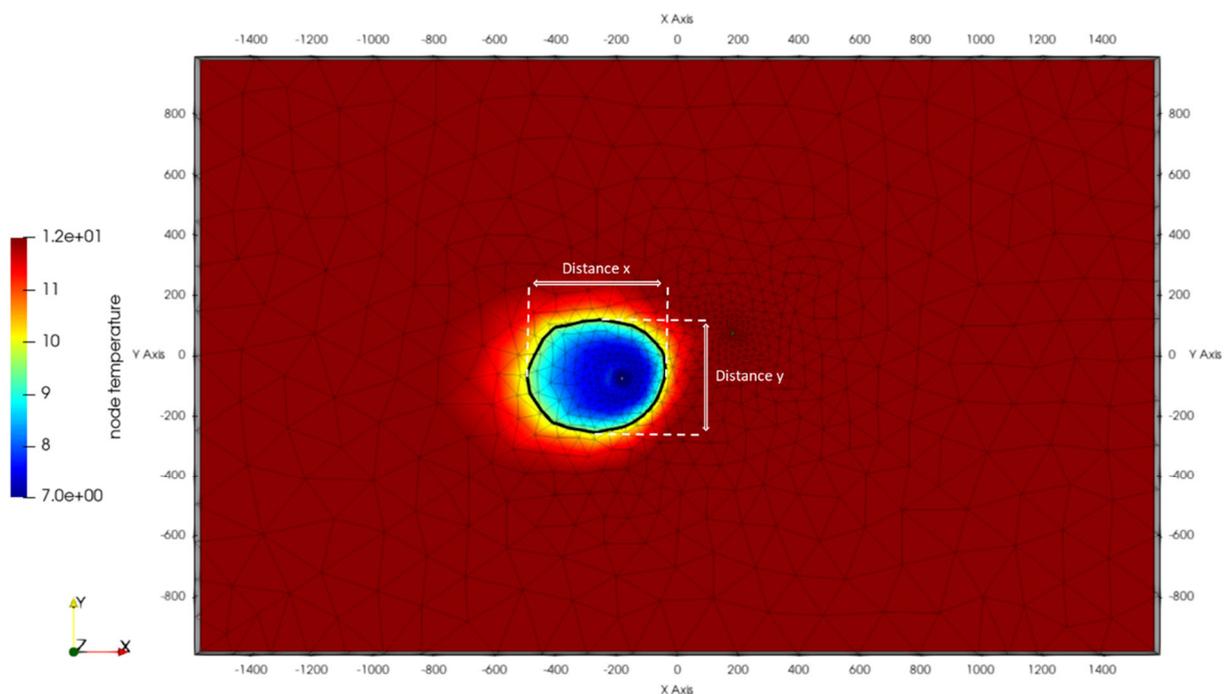


Figure 62 : Exemple de la méthode utilisée pour déterminer la zone perturbée thermiquement (cas n°32 au dernier pas de temps) : 1- Traçage du contour de température de 10°C (correspondant à un différentiel de température de 2°C dans cette étude) ; 2- Calculs des distances x et y permettant d'obtenir la taille du panache thermique dans les deux directions.

b) Calage d'un modèle approché de taille de panache

Pour la plupart des 133 simulations, les dimensions longitudinales et transversales sont respectivement de l'ordre de 100 à 200 m et 50 à 100 m, bien que certains panaches puissent être considérablement plus étendus, en particulier si les besoins sont significatifs (cf. Figure 58).

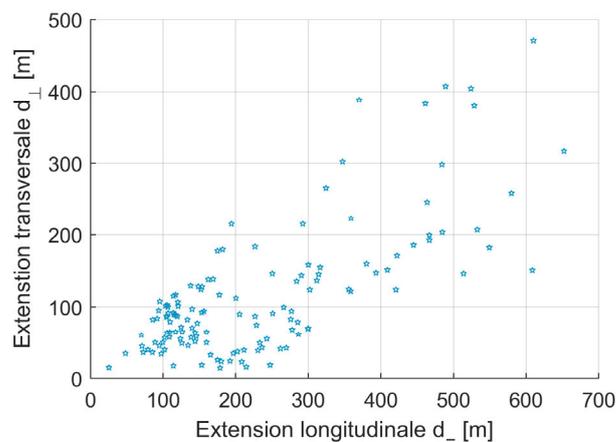


Figure 63 : Résultats des 133 simulations : dimension du panache dans les directions transversale d_{\perp} et longitudinale $d_{=}$ à l'écoulement. Chaque point représente le résultat d'une simulation.

Pour caler le modèle approché, on a utilisé un processus gaussien ; il n'est pas possible de le représenter au moyen d'une équation simple, comme ce serait le cas pour un polynôme par exemple. On peut vérifier qualitativement les tendances fournies par le modèle approché de taille de panache : pour une configuration définie dans le Tableau 4, on fait varier les 9 paramètres un à un, indépendamment les uns des autres (cf. Figure 64) :

- Augmenter le besoin total E tend à augmenter la quantité de chaleur extraite (chaud comme froid) du terrain, et donc la taille des panaches dans les deux directions,
- Pour un même besoin total E , il existe une part de chaud (typiquement autour de 60 % de chaud et donc 40 % de froid) qui permet de minimiser la taille des panaches : en effet, le chaud extrait pour le chauffage est compensé par le chaud injecté pour la production de climatisation. Pour la production de froid une plus grande quantité de chaud est réinjectée dans l'aquifère (du fait de l'évacuation du chaud produit par le compresseur) que pour la production de chaud, ce qui explique que les parts relatives ne soient pas de 50 %.
- Déplacer les puits d'une configuration avec l'injecteur en amont et la production en aval vers un alignement de puits perpendiculaire à l'écoulement tend à diminuer la taille globale du panache.
- Augmenter la distance entre les puits a une influence minime sur les tailles de panache, dans la configuration de référence l'interaction thermique entre les puits étaient de toute façon faible.
- Augmenter l'épaisseur de l'aquifère permet de dissiper l'énergie prélevée sur un plus grand volume, et contribue à diminuer ainsi la taille du panache.
- Augmenter la conductivité hydraulique de l'aquifère a un impact très limité sur la taille du panache. En effet, le gradient hydraulique est automatiquement ajusté pour que la vitesse d'écoulement reste constante : au final, la même quantité d'énergie sera transportée par l'aquifère.
- Augmenter la vitesse d'écoulement tend à diminuer la taille du panache car une plus grande quantité d'énergie est dissipée.
- Diminuer l'épaisseur de l'éponte tend à diminuer la taille du panache dans la direction de l'écoulement, l'interaction avec l'atmosphère et sa condition imposée en température venant « recharger » l'aquifère.
- Enfin, la taille du panache dans la direction de l'écoulement augmente avec la conductivité hydraulique de l'éponte, dans la mesure où l'éponte va contribuer au transport d'énergie thermique.

Paramètre		Unité	Valeur
1	Besoin total en énergie thermique (= chauffage + froid) E	MWh/an	1000
2	Fraction de chauffage dans ce besoin r	-	0.8
3	Angle entre la droite reliant le puits injecteur au puits producteur et l'écoulement θ	deg	0
4	Distance entre les puits d	m	200
5	Epaisseur de l'aquifère e_{aq}	m	30
6	Perméabilité de l'aquifère k_{aq}	m/s	1.0×10^{-4}
7	Vitesse de Darcy régionale v_D	m/an	30
8	Epaisseur de l'éponte e_{ep}	m	50
9	Perméabilité de l'éponte k_{ep}	m/s	2.5×10^{-6}

Tableau 4 : Paramètres du cas représenté en Figure 64

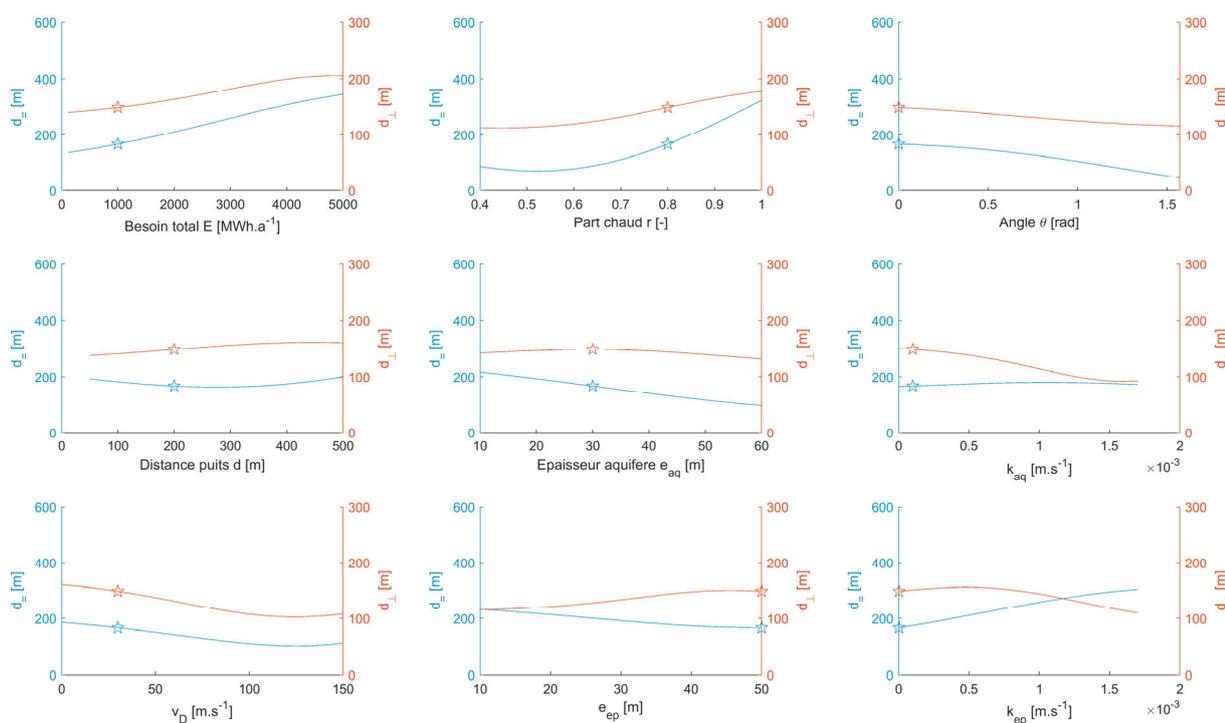


Figure 64 : Influence de chaque paramètre sur la dimension du panache dans les directions longitudinale $d_{||}$ et transversale d_{\perp} . Les étoiles représentent les valeurs de références décrites en Tableau 4.

6.2. ESTIMATION DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE SUR SONDES

La méthode a été utilisée pour l'estimation du potentiel de Loire Layon Aubance (Baudouin and Maragna, 2020) et Orléans Métropole (Maragna et al., 2021b). On en rappelle ici les principaux éléments. La méthode est une adaptation de la méthode proposée par l'ASHRAE (Kavanaugh and Rafferty, 1997) pour estimer la longueur de sondes nécessaire à la couverture d'un besoin. Ici, on « retourne » le problème : on utilise la méthode ASHRAE pour estimer, à surface disponible donnée, la quantité d'énergie thermique qui peut être fournie par un champ de sondes de manière pérenne.

On détermine, parcelle par parcelle, le taux de couverture de chaleur par géothermie τ_E , c'est-à-dire le ratio entre quantité de chaleur pouvant être fournie par la pompe à chaleur géothermique et les besoins du bâtiment ($0 < \tau_E < 1$). Le modèle de τ_E prend en compte les variables :

- Décrivant la sollicitation :
 - Besoin de chaud [MWh/an]
 - Besoin de froid [MWh/an]
- Décrivant la géométrie : La parcelle est assimilée à un parallélépipède, avec un « trou » parallélépipédique, où peut se loger un bâtiment :
 - Surface de cette parcelle simplifiée
 - Elongation du parallélépipède
 - Surface du « trou »
- Les caractéristiques de la sonde géothermique :
 - Profondeur du forage [m]

Un certain nombre de paramètres sont fixés (cf. Tableau 5). Le choix des valeurs de propriétés thermiques du terrain est décrit en section 5.2.6. Les températures extrêmes acceptables sont fixées par la réglementation, i.e. par la géothermie de minime importance (cf. section 4.1.1). Le rayon et la résistance de forage sont des valeurs caractéristiques observées en France (Maragna et al., 2021a).

Catégorie	Paramètre	Valeur
Propriétés thermiques du terrain	Capacité calorifique du terrain ρC_p [MJ.K ⁻¹ .m ⁻³]	2,20
	Conductivité thermique du terrain λ [W.K ⁻¹ .m ⁻³]	1,98
	Température initiale du terrain traversé T_o [°C]	15,0
Conditions de fonctionnement de la PAC	Ecart de température E/S ΔT [°C]	3
	Température de sortie de la PAC minimale acceptable T_{min} [°C]	-3
	Température de sortie de la PAC maximale acceptable T_{max} [°C]	40
	COP chaud [-]	4
	EER froid [-]	7
Sonde géothermique verticale	Rayon du forage [mm]	80
	Résistance de la sonde géothermique [K.m.W ⁻¹]	0,080

Tableau 5 : Paramètres fixés pour l'analyse du potentiel des sondes géothermiques verticales

Chaque parcelle est référencée par un identifiant unique ou IDU communiqué par le bureau d'étude Burgeap. On détermine le foncier disponible pour l'implantation des forages en retirant

un tampon de 5 m autour de la limite de la parcelle ainsi que des bâtiments. Les bâtiments sont assimilés aux champs suivants de la BD-TOPO de l'IGN :

- Bâti remarquable ;
- Bâti industriel ;
- Bâti indifférencié ;
- Surfaces de route ;
- Aires de triage ;
- Surfaces d'eau ;
- Terrains de sport ;
- Réservoirs ;
- Pistes d'aérodrome ;
- Constructions surfaciques ;
- Cimetières.

A noter que **les interactions entre les forages ne sont pas prises en compte** : on se limite à un traitement parcelle par parcelle. Même si le rayon du panache thermique autour d'un champ de sondes est relativement limité, avec typiquement une perturbation de l'ordre de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ à quelques dizaines de mètres du champ, dans un contexte urbain dense ces interférences doivent être prises en compte dans une planification à l'échelle plus fine.

La profondeur des sondes est fixée à 200 m, indépendamment de la zonation réglementaire.

6.3. CROISEMENT ENTRE LES BESOINS ÉNERGÉTIQUES SUR SONDES ET SUR NAPPE POUR ESTIMER LE POTENTIEL GÉOTHERMIQUE

Le synoptique du traitement cartographique est présenté en Figure 65. Le traitement utilise 4 tables : BD-TOPO de l'IGN, la table du bureau d'étude BURGEAP ayant fourni les besoins énergétiques, les caractéristiques spatialisées des trois aquifères, et les tracés des réseaux de chaleur téléchargés sur le site de la DRIEAT d'Ile-de-France¹⁴. Le traitement est réalisé par parcelle, les résultats stockés dans une table indexée par les mêmes identifiants de parcelle (IDU) que la table de BURGEAP, puis agrégés aux échelles IRIS, communale et métropolitaine.

¹⁴ <http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/carte-reseaux-de-chaleur-en-ile-de-france-a1980.html>

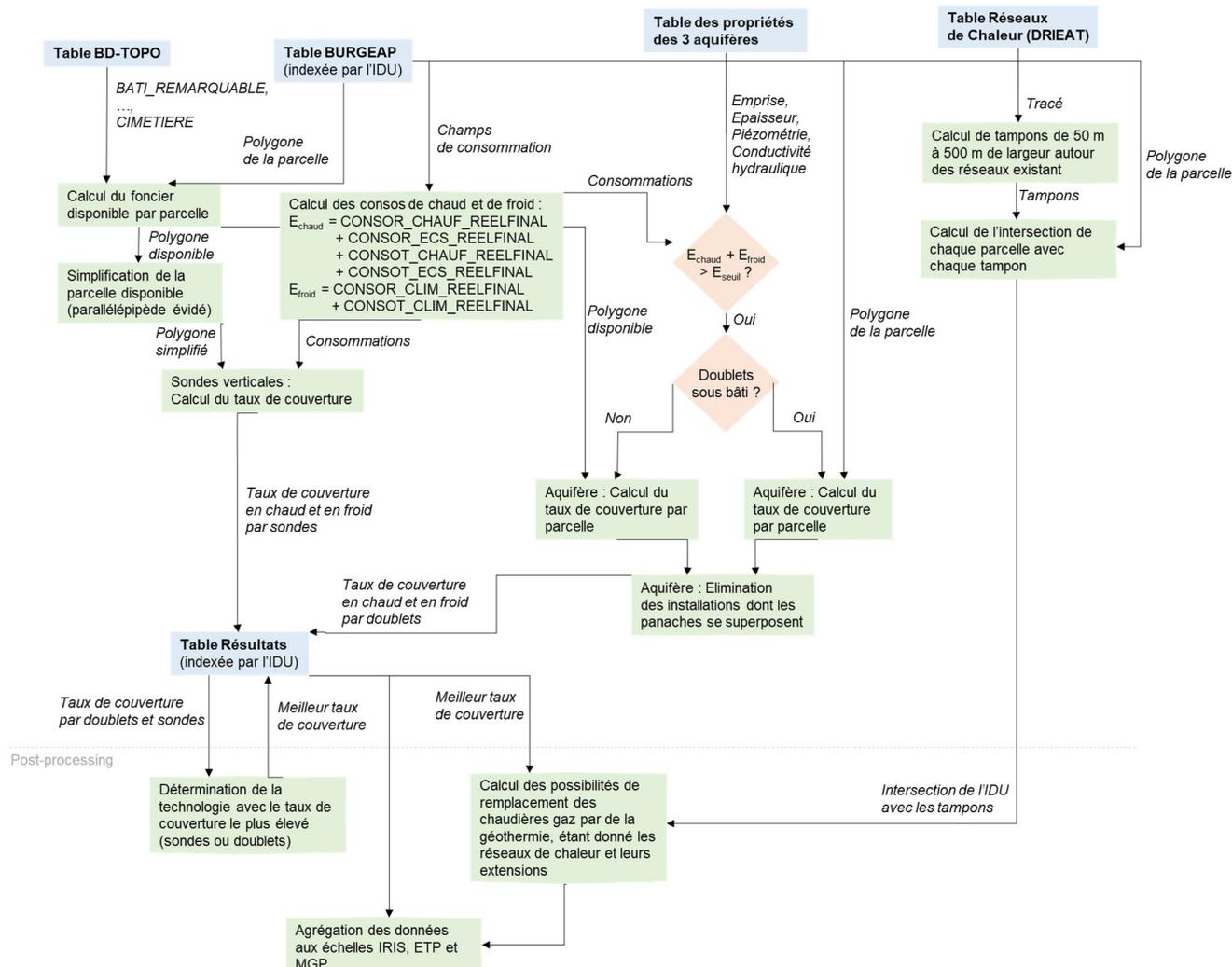


Figure 65 : Synoptique du traitement cartographique

Un seuil minimal est fixé pour considérer le doublet sur nappe. Ce seuil porte sur la somme de la consommation de chaud et de froid et est fixé à 150 MWh/an : en-dessous de ce seuil, seule la solution sur sondes est considérée, car la mise en place d'un doublet se justifie difficilement d'un point de vue économique. Par ailleurs, on considère que les puits des doublets ne peuvent pas être placés sous les bâtiments, mais uniquement dans les espaces libres dans la parcelle. Pour chaque parcelle :

- Différentes orientations sont testées automatiquement, entre 0° (puits orientés dans la direction de l'écoulement, avec producteur en amont) et 90° (puits orientés perpendiculairement à l'écoulement, cf. Figure 66).
- Le taux de recyclage entre ces deux puits est estimé au moyen d'un modèle semi-analytique (Maragna et al., 2019). On a considéré que ce taux de recyclage ne devait pas excéder 30% après 6 mois de fonctionnement.
- La disposition des puits qui minimise les interférences est retenue. Si la condition mentionnée ci-dessus est dépassée, alors le taux de couverture de la consommation est diminué de 10%, jusqu'à ce que la contrainte sur le taux de couverture soit couverte.

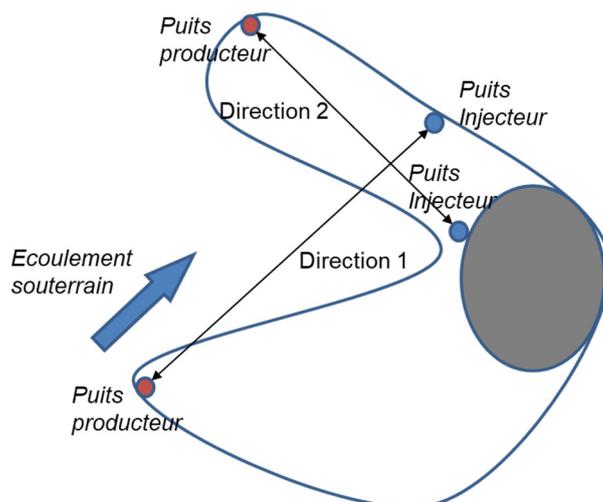


Figure 66 : Exemple de tests des positions des puits d'un doublet en fonction de la direction et de la vitesse de l'écoulement.

7. Résultats et analyse

7.1. STATISTIQUES À L'ÉCHELLE DE LA MÉTROPOLE ET RESTITUTION CARTOGRAPHIQUE

A l'échelle de la métropole, on estime que la géothermie pourrait couvrir **29,75 TWh/an** de la consommation actuel en énergie thermique (i.e. chaud et froid, pour un total de 50,94 TWh/an, cf. Figure 67).

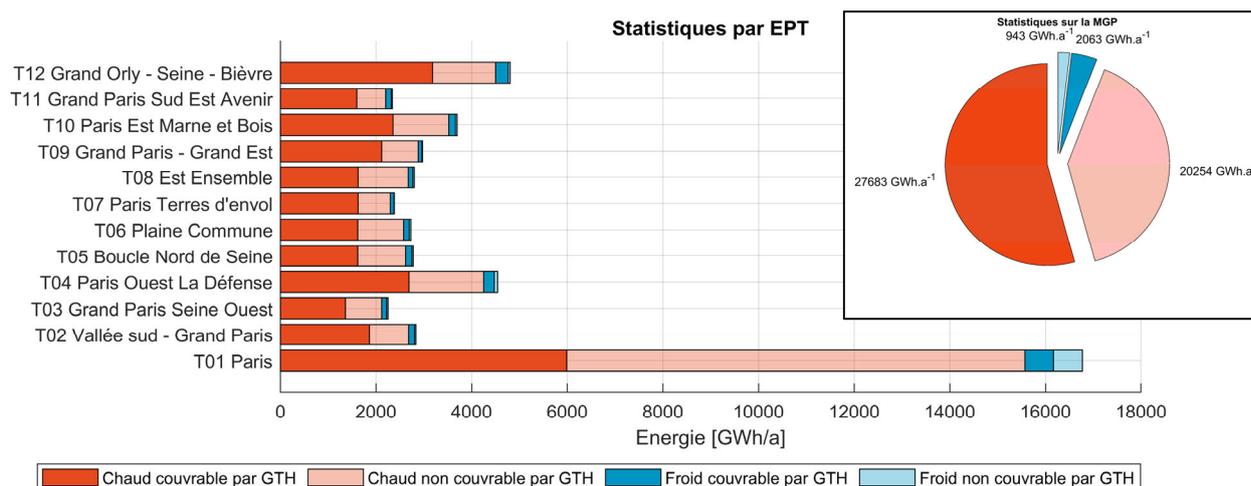


Figure 67 : Consommation de chaud et de froid couvrable ou non couvrable par géothermie (GTH)

Les quantités d'énergie que pourrait fournir la géothermie et les taux de couverture sont cependant extrêmement variables dans l'espace, en fonction de la commune et de l'IRIS considéré (cf. Figure 68, Figure 69, Figure 70, Figure 71 pour une vision par commune et les Annexes 2 à 5 pour une vision par IRIS). Globalement, le taux de couverture par géothermie est d'autant plus faible que la densité de besoin énergétique est élevée (cf. l'analyse en §7.2). Par exemple, dans le centre de Paris, l'estimation du taux de couverture des besoins de chaud par géothermie, agrégé par arrondissement, est toujours inférieur à 40 % (cf. Figure 69) et inférieur à 20 % dans les arrondissements centraux, du fait du peu de foncier disponible. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la ville centre, ce taux de couverture a tendance à augmenter graduellement, passant de 30-50 % dans les communes limitrophes de Paris à plus de 60 % à la périphérie de la Métropole. Une tendance similaire s'observe sur les taux de couverture en froid (cf. Figure 71), avec toutefois des taux plus élevés du fait de la moindre densité de besoin de froid que de chaud.

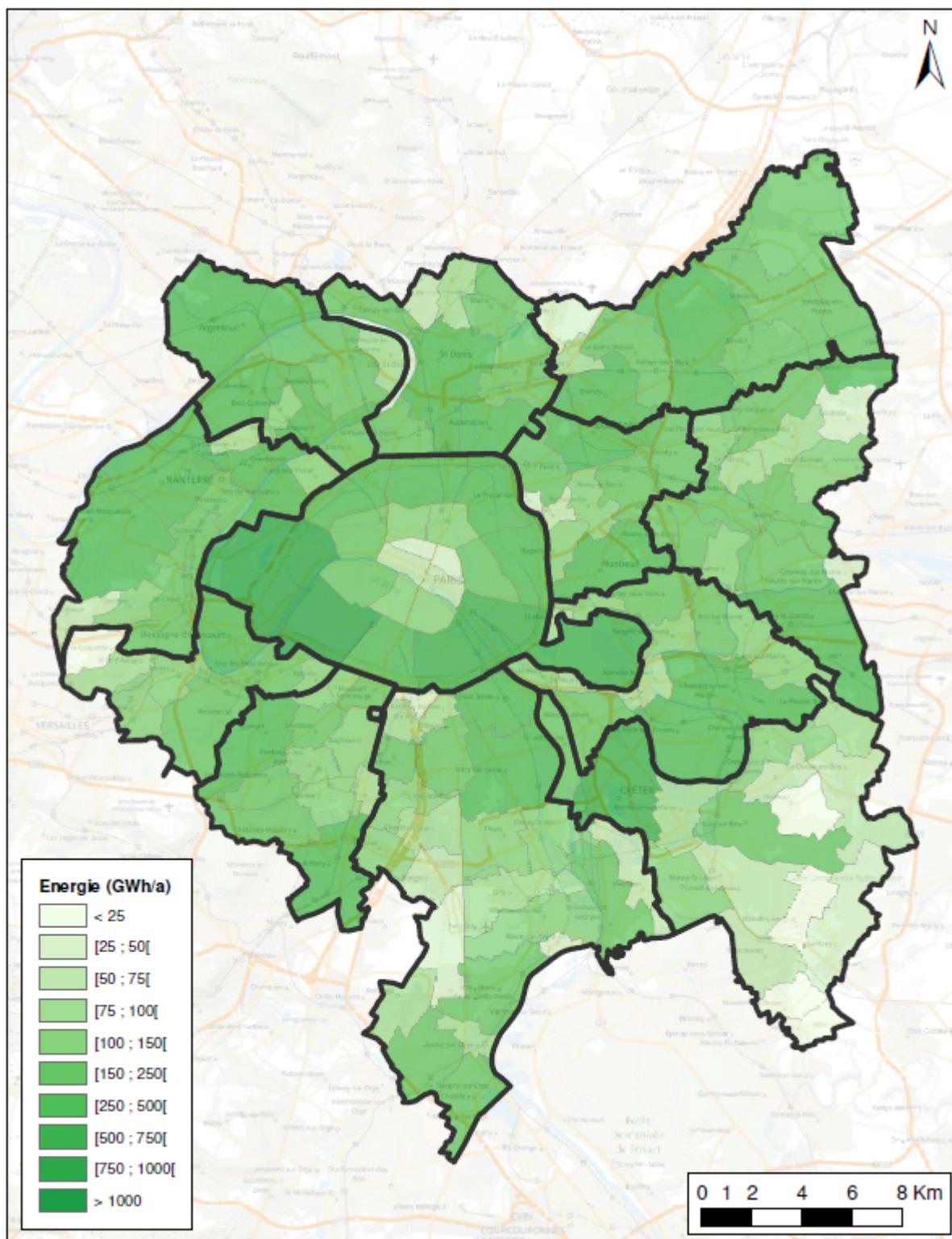


Figure 68 : Énergie que peut fournir la géothermie en chauffage sur chaque commune en GWh/an, sans prise en compte de la priorité à donner aux réseaux de chaleur.

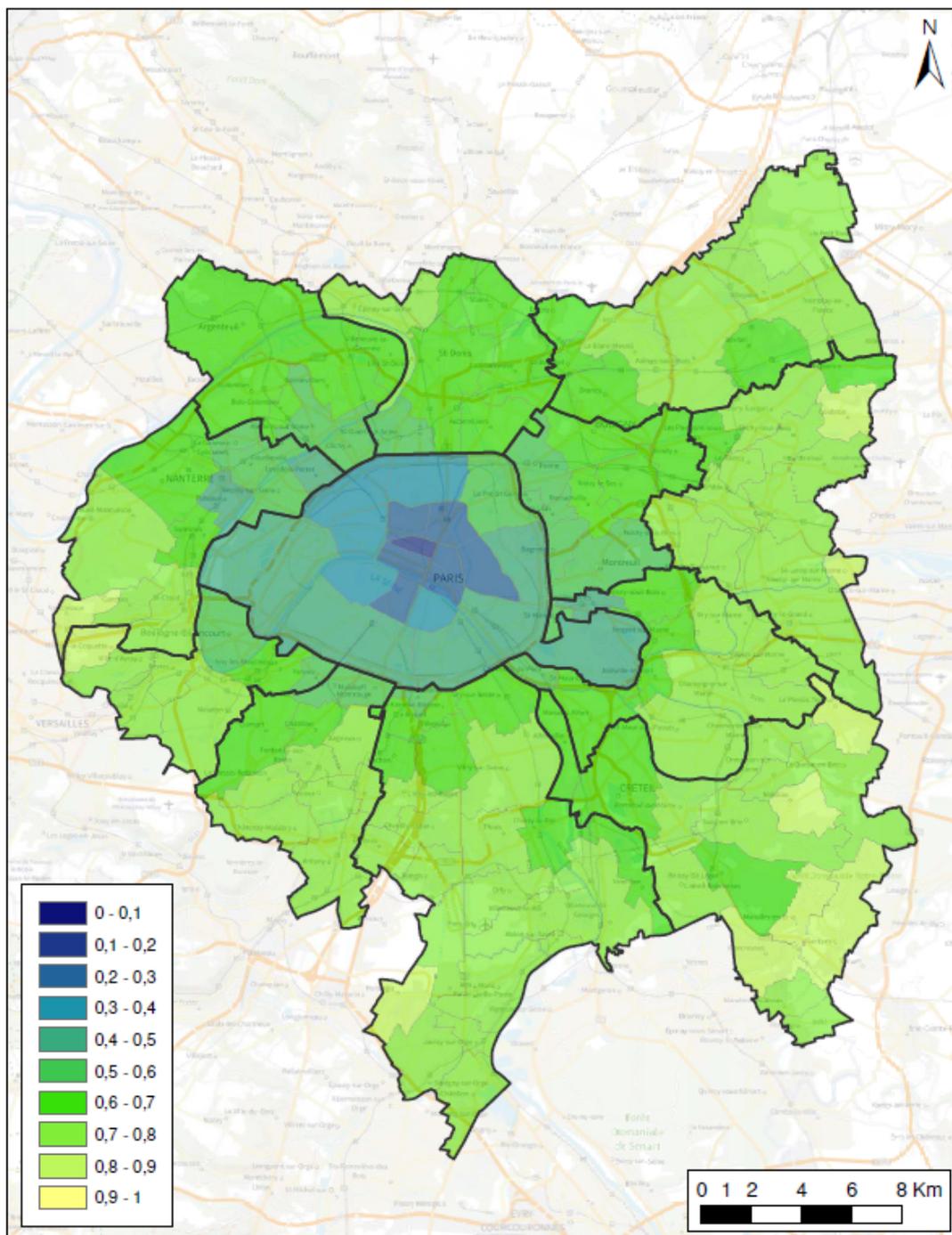


Figure 69 : Taux de couverture des besoins de chauffage par géothermie, sur chaque commune normalisé entre 0 et 1. Pas de prise en compte de la priorité à donner aux réseaux de chaleur.

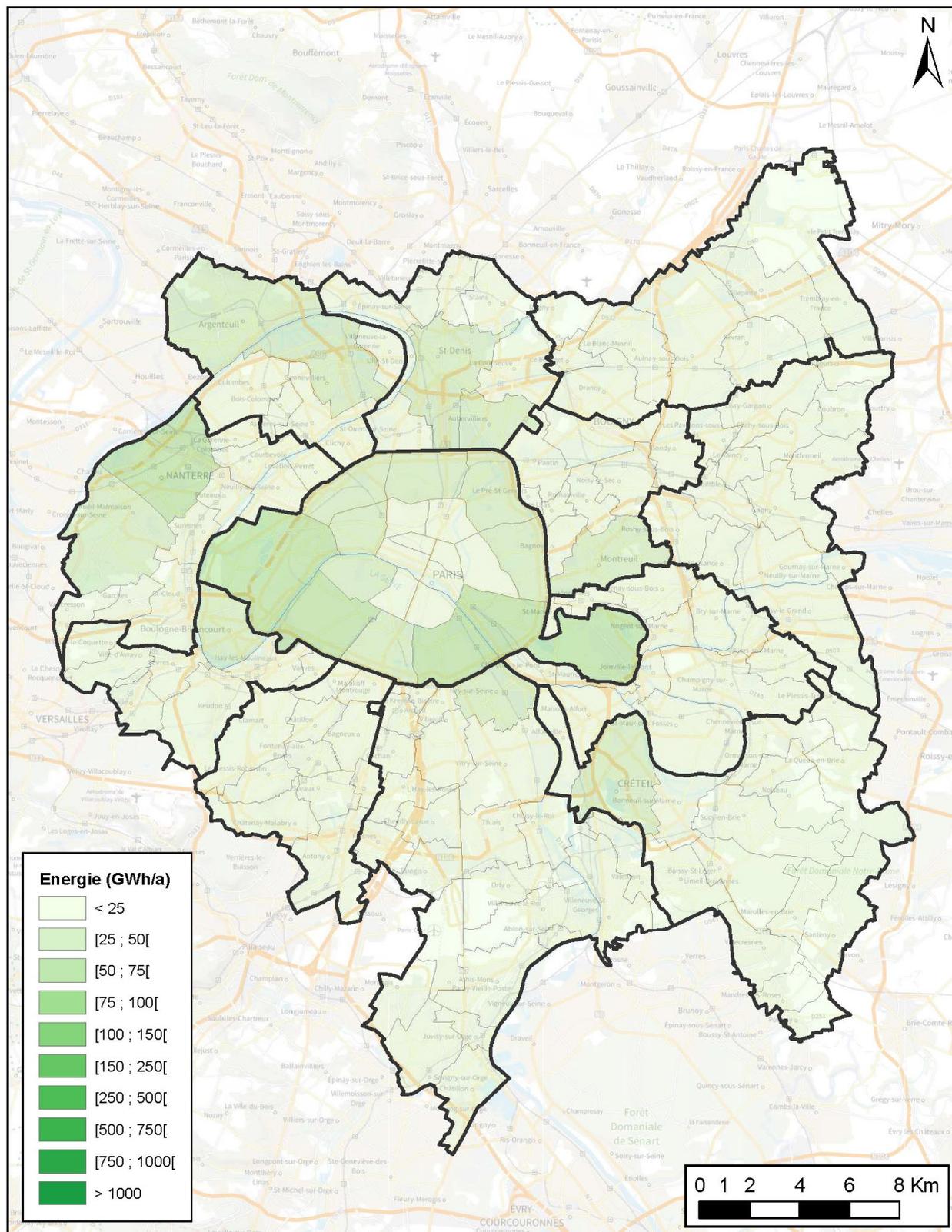


Figure 70 : Énergie que peut fournir la géothermie en froid sur chaque commune en GWh/an

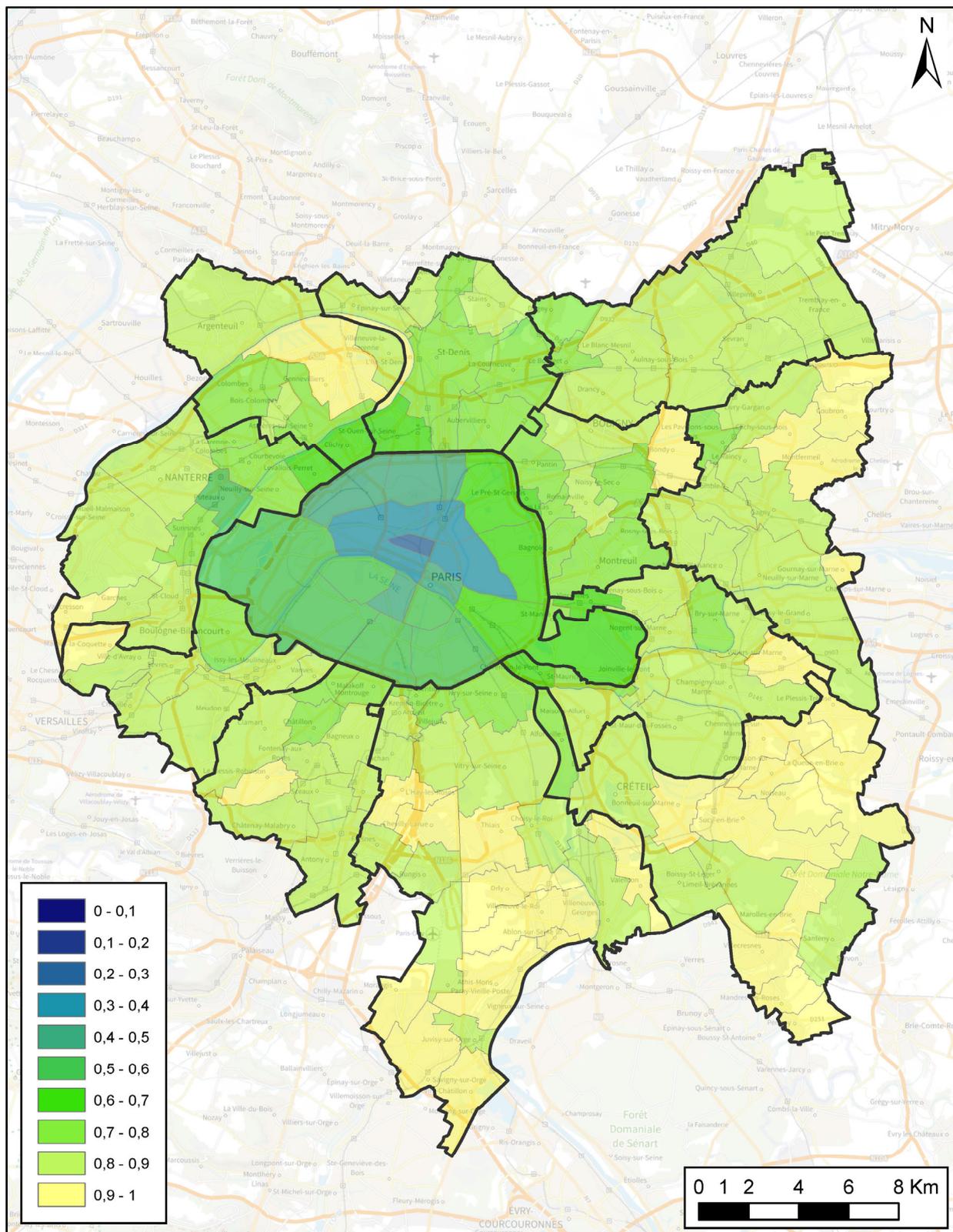
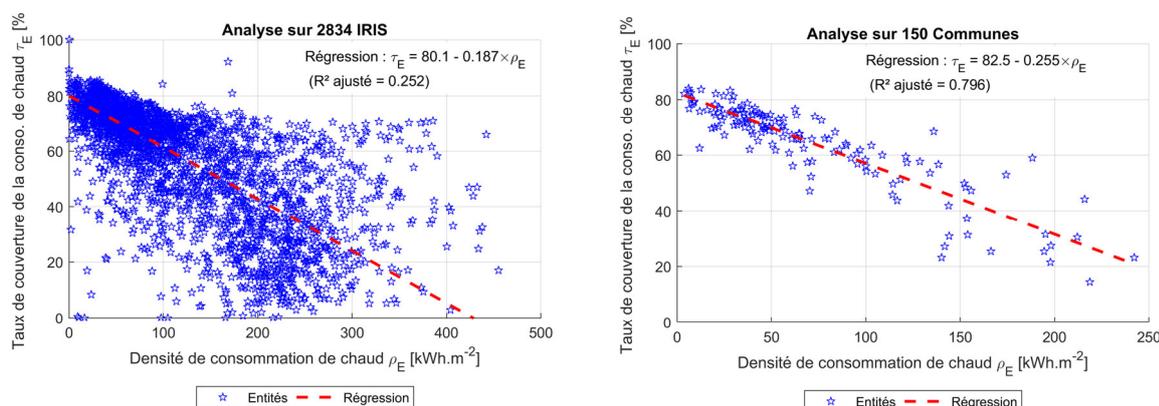


Figure 71 : Taux de couverture des besoins de froid par géothermie, sur chaque commune normalisé entre 0 et 1

7.2. STATISTIQUES À L'ÉCHELLE DES COMMUNES ET DES IRIS

Un résultat intéressant est que, à l'échelle des communes, le taux de couverture de la consommation de chaud est décrit par une variation linéaire en fonction de la densité de consommation, avec un coefficient de régression satisfaisant de $R = 0,796$ (cf. Figure 72 à droite). En d'autres termes, si on se place à une échelle suffisamment macroscopique, en l'occurrence la commune, le taux de couverture sur la commune pourrait être estimé en première approche à partir de la densité de consommation. Cette loi empirique nécessiterait d'être testée dans d'autres contextes, sur d'autres Métropoles, et n'a pas d'utilité directe. En revanche, à l'échelle plus fine de l'IRIS, aucune régression ne peut être tracée (cf. Figure 72 à gauche). Ici, la densité est calculée comme le ratio entre la consommation de chaud et la surface totale de l'entité (IRIS ou commune).



7.3. RECONVERSION DES CHAUDIÈRES AU GAZ PAR GÉOTHERMIE

Si les bâtiments ne sont pas équipés d'un système de distribution de chauffage (radiateurs, planchers chauffants, etc.), la mise en place d'une pompe à chaleur géothermique sera moins aisée et nécessitera d'abord de mettre en place un système de distribution. Le gaz naturel représente la principale source de chauffage (cf. section 3 p 19). On peut identifier les parcelles actuellement chauffées au gaz et donc équipées d'un réseau de distribution de chauffage qui pourraient être reconverties en géothermie, après avoir donné la priorité au raccordement aux réseaux de chaleur existants ou en développement (cf. Figure 73). Les données communiquées ne permettent néanmoins pas de savoir si les bâtiments sur les parcelles concernées sont équipés d'une chaudière centrale ou bien de chaudières individuelles.

À l'échelle de la Métropole, la géothermie pourrait remplacer de l'ordre de 10,71 TWh/an à 13,92 TWh/an de la consommation de gaz pour couvrir la consommation de chaud, suivant que l'on considère une extension de 50 m à 250 m autour des réseaux existants (données encadrées en cyan dans la Figure 73). C'est ainsi de l'ordre de 22 % à 29 % de la consommation de chauffage actuellement assurée par du gaz qui pourrait être couverte par de la géothermie de surface, après avoir donné priorité aux réseaux de chaleur existants et à leurs éventuelles extensions. Ce taux de remplacement est d'autant plus élevé que l'on se situe en périphérie de la métropole où les densités de consommations sont plus faibles, le foncier disponible plus important, et les grands réseaux de chaleur urbains sont plus éloignés (cf. Figure 74). On retrouve la même tendance à l'IRIS et à la commune.

L'exploitation des résultats du calcul de potentiel permettent d'estimer que, sur les 2,72 TWh/a de consommation de chauffage et ECS couvert par du fioul à l'échelle de la Métropole du Grand Paris, 1,60 TWh/a (59 %) pourrait être couvert par géothermie, dont 0,97 TWh/a à plus de 250 m d'un réseau de chaleur.

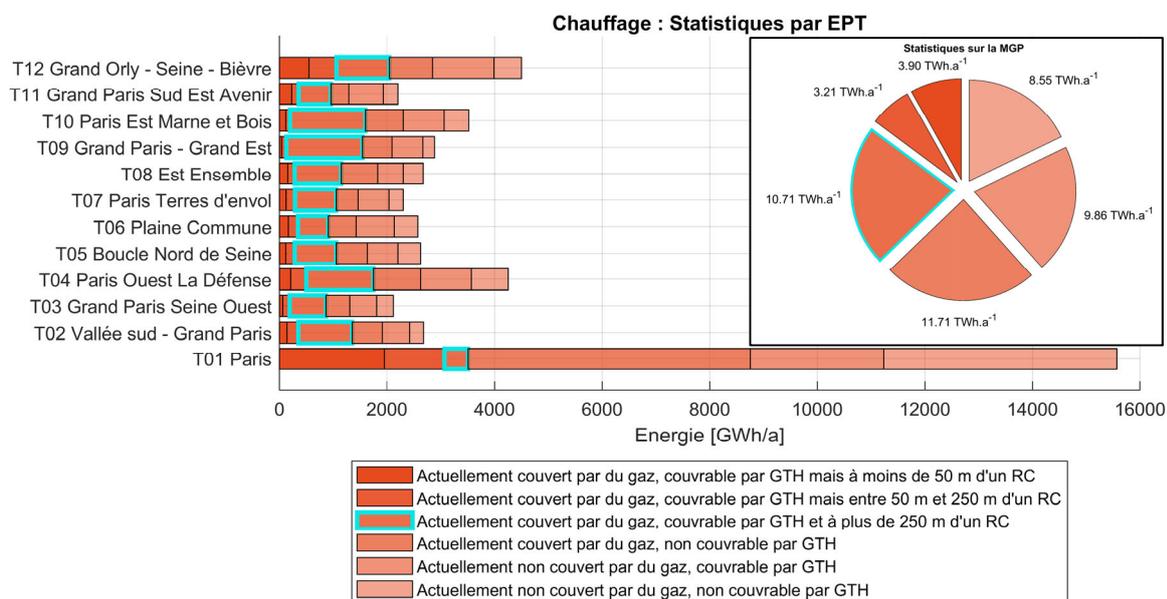


Figure 73 : Consommation de chaud actuel, faisant apparaître les consommations de gaz et ce qui est couvert par géothermie, après avoir donné priorité aux réseaux.

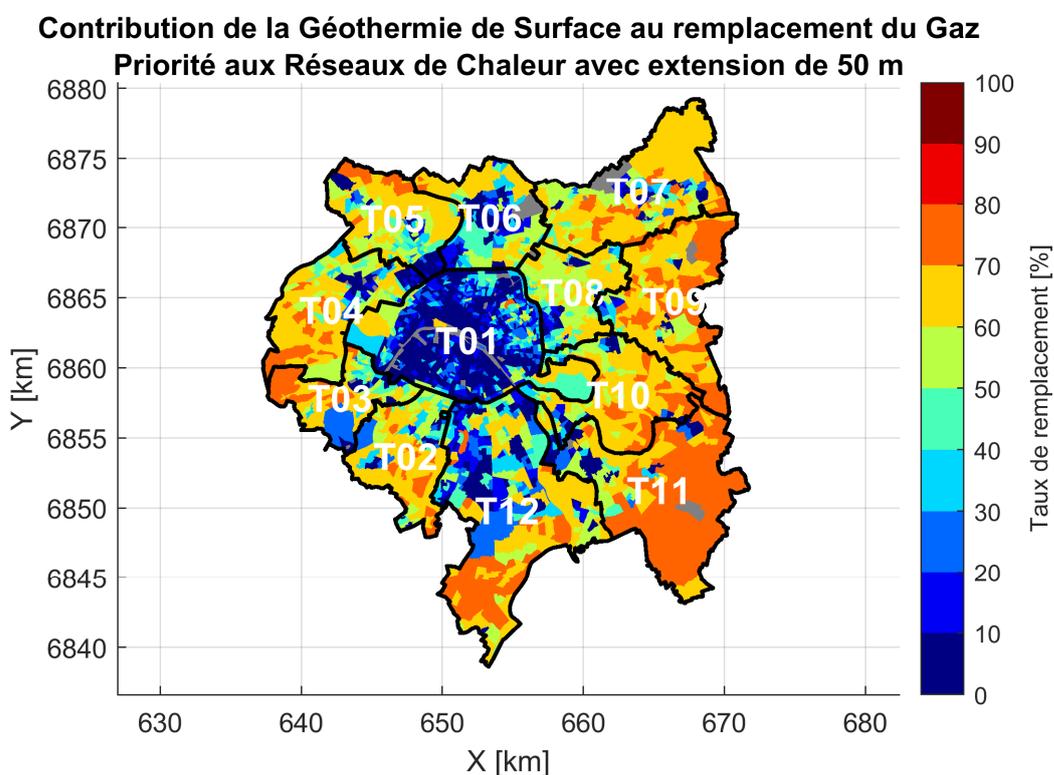
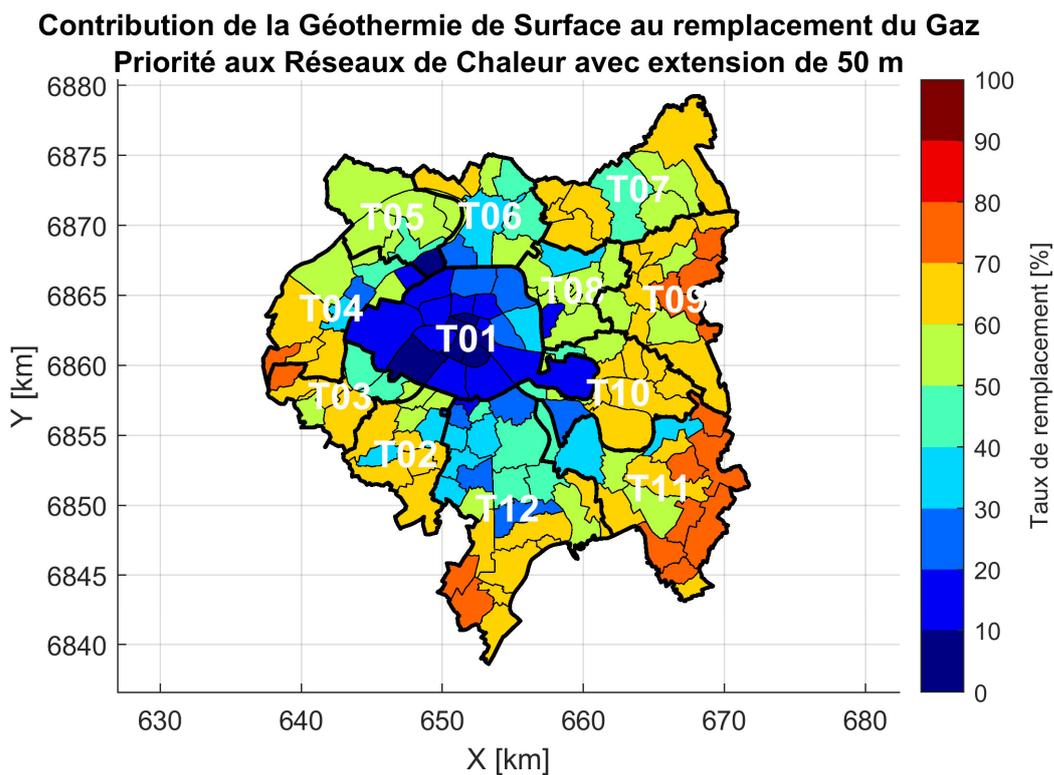


Figure 74 : Contribution de la géothermie de surface au remplacement des chaudières au gaz naturel, après avoir donné priorité aux réseaux de chaleur avec extension de 50 m. Représentation par commune (en haut) et par IRIS (en bas).

A noter, la priorité donnée au raccordement aux réseaux de chaleur dans un tampon de 50 m des bâtiments actuellement chauffés au gaz conduit à quasiment doubler la consommation couverte par les réseaux de chaleur, qui passerait de 57,32 TWh/an à 123,52 TWh/an (cf. Figure 75 pour une analyse détaillée par EPT et pour différente taille de tampon).

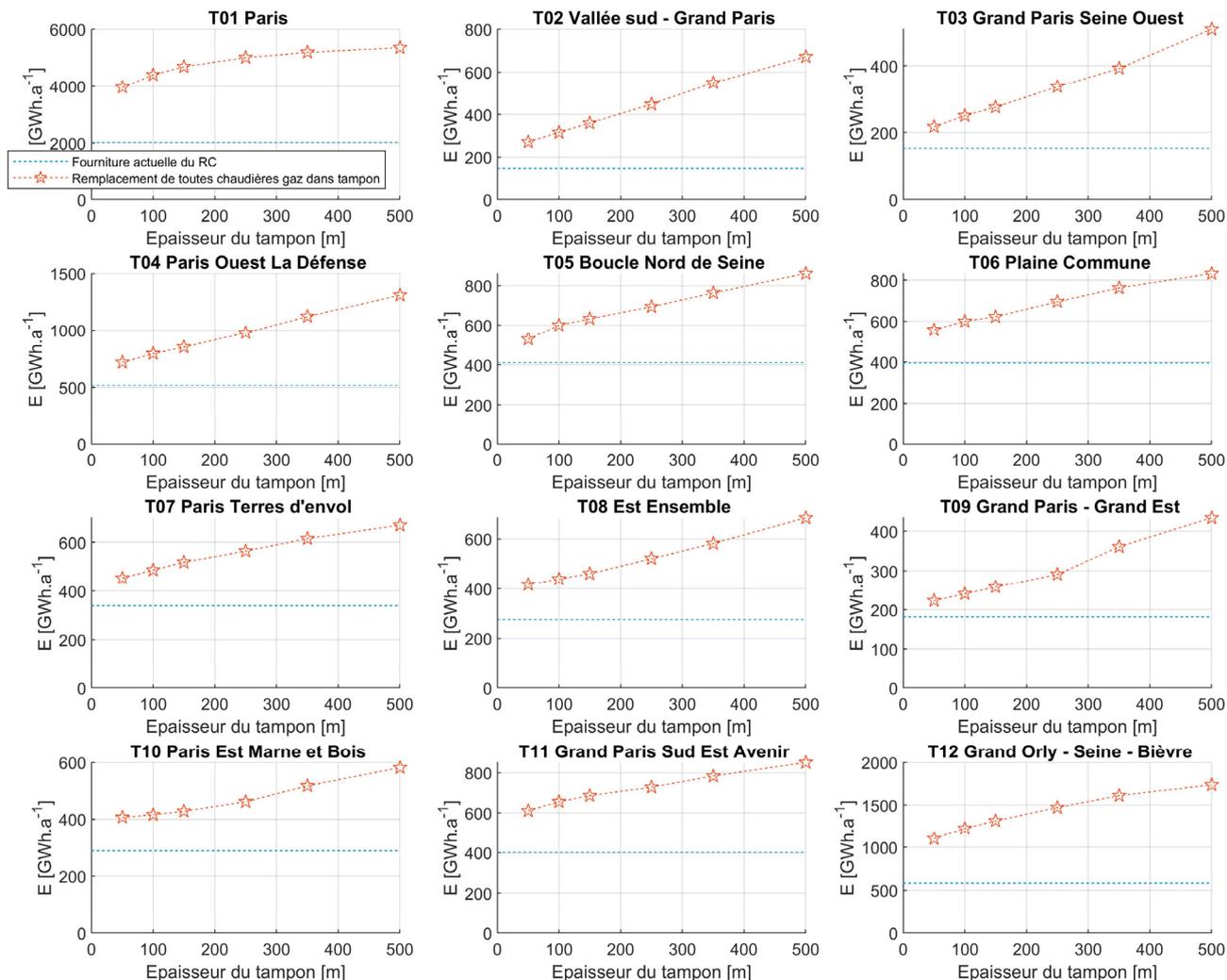


Figure 75 : Énergie actuellement livrée par les réseaux de chaleur (ligne pointillée bleue) dans chaque EPT, et consommation actuelle de tous les bâtiments dont la parcelle recoupe un tampon autour du tracé de ce réseaux, pour une épaisseur de tampon comprise entre 50 m et 500 m (ligne pointillée rouge)

On peut aussi mener l'analyse du point de vue des parcelles. Le but est d'identifier quelles gammes de consommations énergétiques représentent le plus grand gisement de reconversion par géothermie, afin de permettre une priorisation.

Pour ce faire, les parcelles ont été classés par consommation de chaud croissante, et agrégées de manière à ce que chaque agrégat représente 10% de la consommation totale de chaud sur la Métropole du Grand Paris, soit $47,9/10 = 4,79$ TWh/an. Pour chacun des 10 agrégats ainsi constitués, la part couvrable par géothermie a été calculée. À l'échelle de la métropole, les « meilleures » cibles de conversion d'une consommation gaz en géothermie de surface (encadrées en cyan sur la Figure 76) seraient les parcelles consommant quelques dizaines de MWh/an, typiquement jusqu'à la centaine de MWh/an, ou bien a contrario, celles consommant plus d'un millier de MWh/an. Le constat établi à l'échelle des EPT peut être différent de celui établi à l'échelle de la Métropole du Grand Paris précédemment (cf. Figure 78). Par

exemple, pour l'EPT6 Plaine Commune, le principal gisement se placerait dans les agrégats 8 et 9 (quelques milliers de MWh/an), alors que pour l'EPT10 Paris Est Marne et Bois, le principal gisement se placerait dans les agrégats 1 et 2 (quelques dizaines de MWh/an). Au total, ce sont plusieurs dizaines de milliers de parcelles qui pourraient être équipées de géothermie (cf. la Figure 77 qui explicite le nombre de parcelles considérées par tranche d'énergie).

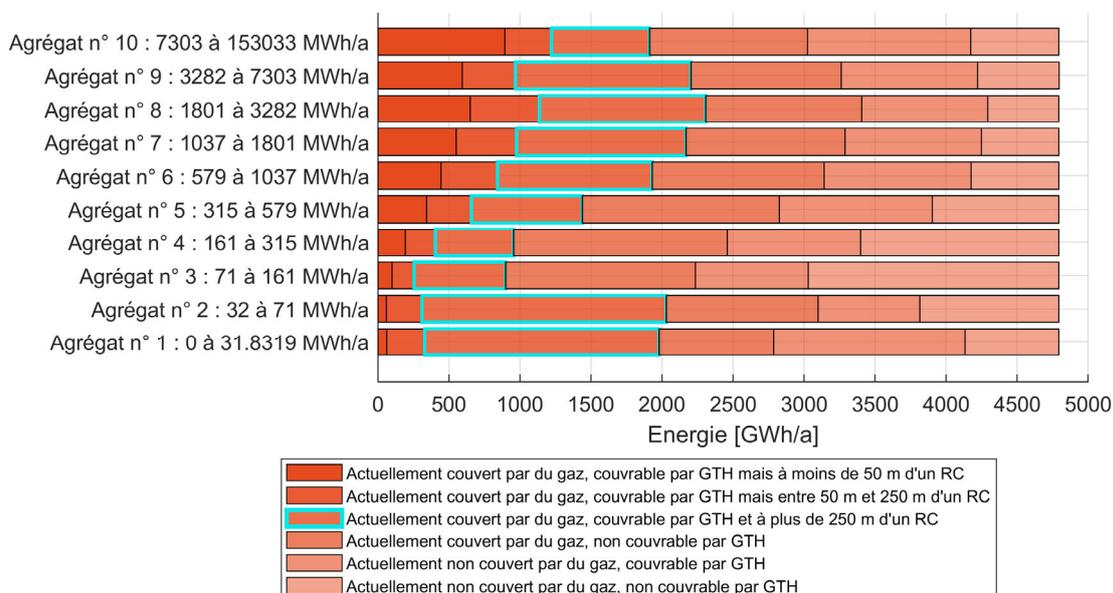


Figure 76 : Consommation de chaud actuelle, faisant apparaître les consommations de gaz et ce qui est couvrable par géothermie, par agrégat de consommation de chaud demandé (échelle de la métropole).

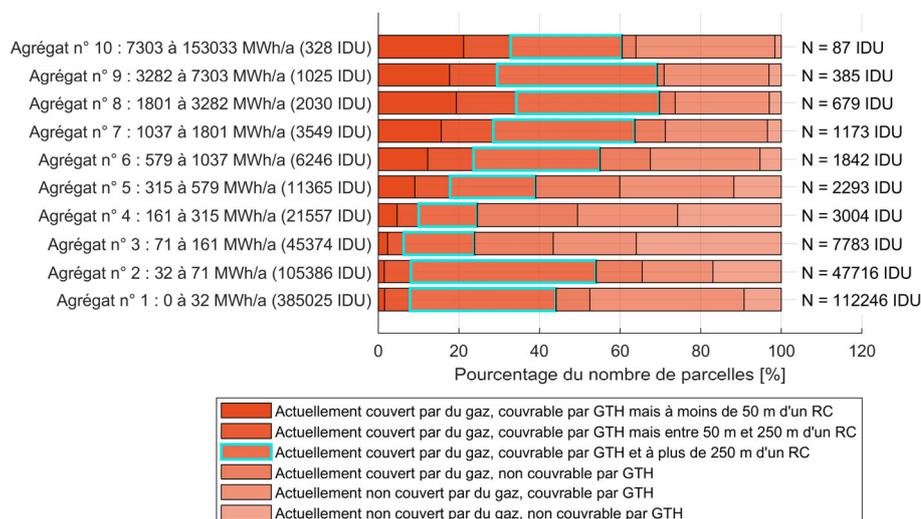


Figure 77 : Sources d'énergie par parcelle. Le chiffre placé à droite représente le nombre de parcelles qui actuellement couvertes par du gaz, à plus de 250 d'un RC, qui pourraient être équipées de géothermie (échelle de la métropole).

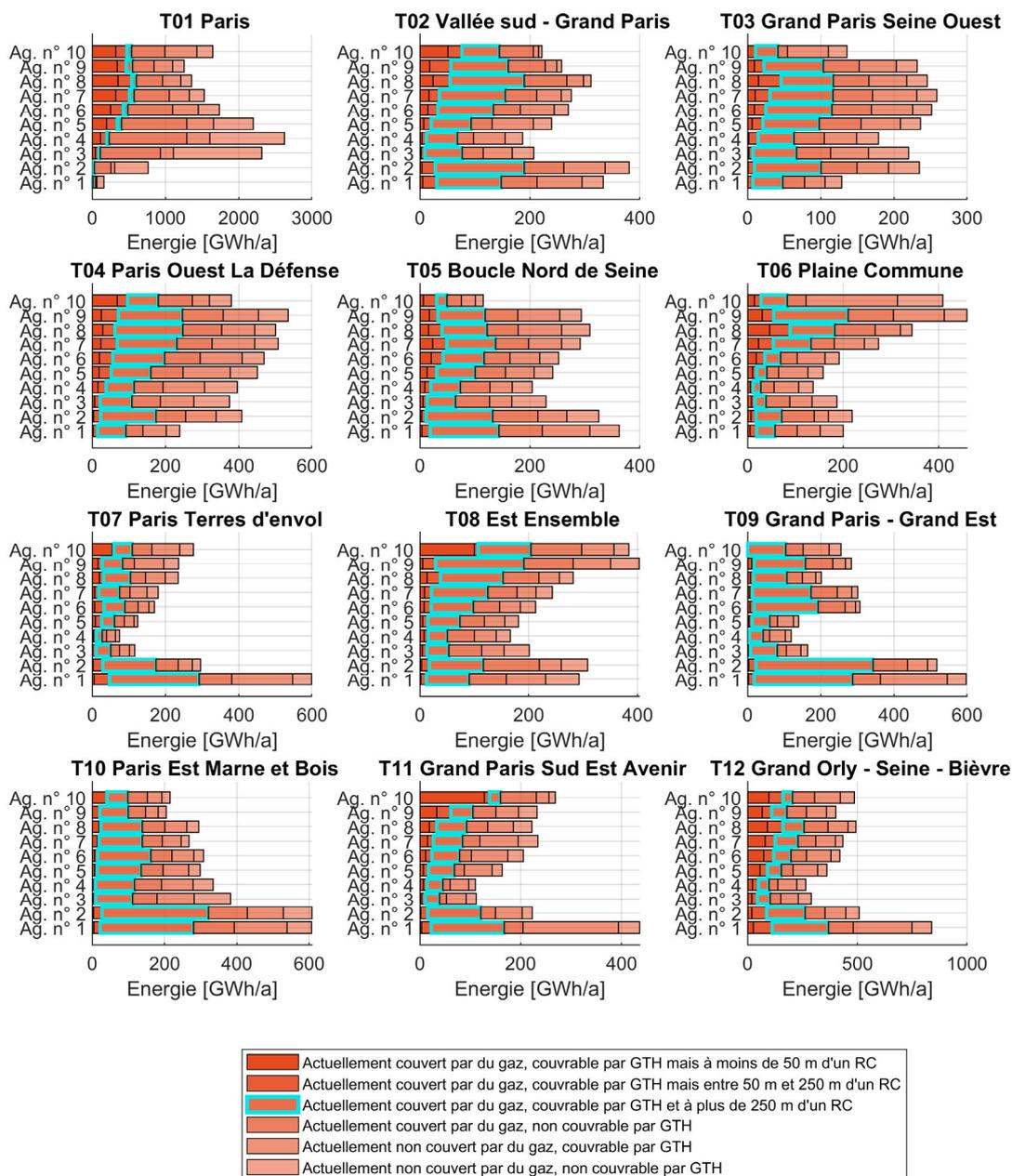


Figure 78 : Agrégat de consommation de chaud demandé, par EPT. Légende identique à la Figure 73. Les étendues des agrégats sont mentionnées dans la Figure 76, et sont identiques pour tous les EPT

8. Conclusion

Trois aquifères de proche surface (Lutétien, Yprésien-Cuisien et Craie) peuvent être exploités pour couvrir les besoins en énergie thermique via la valorisation de l'énergie par doublet sur nappe. Cette étude a été l'occasion de mettre à jour les connaissances relatives à ces 3 aquifères, en termes de température, conductivité hydraulique et piézométrie. En ce qui concerne les sondes géothermiques verticales, le peu de données disponibles (une vingtaine de tests de réponses thermiques), ne permet pas d'établir une relation claire entre la conductivité thermique des terrains traversés et la lithologie de ces terrains.

Une méthodologie a été mise en place pour estimer l'adéquation entre ressources géothermales et besoin énergétique en surface. Cette méthodologie s'appuie sur des modèles simplifiés visant à estimer un taux de couverture par sondes et par doublets sur nappe.

A l'échelle de la Métropole de Grand Paris, la consommation actuelle en énergie thermique, i.e. en chauffage, eau chaude sanitaire et en froid, a été estimée à 50,94 TWh/an (données BURGEAP). On a estimé que la géothermie de surface pourrait couvrir **29,75 TWh/an (soit 58%)** de la consommation actuelle. La géothermie de surface pourrait aussi contribuer à remplacer les chaudières au gaz pour couvrir la consommation de chaud (i.e. chauffage et eau chaude sanitaire), tout en donnant la priorité au remplacement des chaudières gaz par un raccordement aux réseaux de chaleur et à leurs éventuelles extensions.

Dans ces conditions, la géothermie pourrait remplacer de l'ordre de 10,71 à 13,92 TWh/an de la consommation de gaz. C'est ainsi de l'ordre de 22 % à 29 % de la consommation de chauffage actuellement assurée par du gaz qui pourrait être couverte par de la géothermie de surface, après avoir donné priorité aux réseaux de chaleur existant et à leurs éventuelles extensions, qui pourraient s'étendre à 250 m autour des réseaux.

Ce taux de remplacement est d'autant plus marqué que l'on se situe en périphérie de la métropole où les densités de consommations sont plus faibles, le foncier disponible plus important, et les grands réseaux de chaleur urbains sont plus éloignés. A l'échelle globale de la métropole, les « meilleures » cibles de conversion d'une consommation gaz en géothermie de surface (en terme de quantité d'énergie convertible) seraient les parcelles consommant quelques dizaines à une centaine de MWh/an de chaud (chauffage et Eau Chaude Sanitaire), ou bien a contrario, celles consommant plus d'un millier de MWh/an.

Concernant le volet froid, la géothermie de surface pourrait couvrir environ la moitié de la consommation actuelle de froid à l'échelle de la Métropole. Dans toute l'étude, on a considéré les consommations actuelles. On n'a pas étudié comment le confort d'été pourrait être amélioré au prix d'une augmentation des consommations. Cela nécessiterait une connaissance bien plus fine des émetteurs de froid, caractéristiques du bâti, etc., données dont on ne disposait pas dans l'étude.

9. Bibliographie

- Baudouin, V., Maragna, C., 2020. Cartographie du potentiel géothermique sur le territoire de la Communauté de Communes Loire Layon Aubance. BRGM/RP-69744-FR.
- Bault, V., Bourguin, B., Loiselet, C., Anquetil, E., avec la collaboration de Bel A., Chabart M., Braibant G., Gallais Q., Joublin F., Koch F., Leconte S., Lefèvre Y., Legendre S., Merlin E., Neveux A., Nicolas J., Rousseaux E., V.A., 2015. Cartes piézométriques basses eaux 2013 et hautes 2014 des nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur dans le Bassin parisien. Rapport final. BRGM/RP-64887-FR.
- Beaude, L., Beltzung, T., Brenner, K., Lopez, S., Masson, R., Smai, F., Thebault, J.-F., Xing, F.F., 2017a. Parallel geothermal numerical model with faults and multi-branch wells. ESAIM Proc. Surv. Press.
- Beaude, L., Brenner, K., Lopez, S., Masson, R., Smai, F., 2017b. Non-isothermal Compositional Two-Phase Darcy Flow: Formulation and Outflow Boundary Condition. Springer Proc. Math. Stat. 317–325.
- Comité de bassin Loire-Bretagne, 2016. Programme De Mesures du bassin Loire Bretagne 2016-2021 - Chapitre Loire Moyenne. SDAGE bassin Loire-Bretagne 84–101.
- Delesse, A., 1867. Carte hydrologique de la ville de Paris, publiée d'après les ordres de Mr le Baron G.E. Haussmann, Sénateur, Préfet de la Seine, conformément à la délibération de la Commission municipale et exécutée sur la carte topographique. Gravée sous la direction de.
- Delesse, A., 1861. Carte hydrologique de la ville de Paris, publiée d'après les ordres de Mr le Baron G.E. Haussmann, Sénateur, Préfet de la Seine, conformément à la délibération de la Commission municipale du 8 novembre 1857 et exécutée par Mr. Delesse, Ingénieur des Mines.
- GRETA project, 2017. Catalogue of operational criteria and constraints for shallow geothermal systems in the Alpine environment.
- Kavanaugh, S.P., Rafferty, K., 1997. Ground Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings.
- Lamé, A., 2013. Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains. Ecole doctorale n°938 : Géosciences et Ressources Naturelles. Doctorat ParisTech. Thèse. Ecole Nationale Supérieure des Mines de P.
- Maragna, C., Baudouin, V., Guillon, T., Cavril, M., 2020. Projet ADEME-CARTODIM 2019-2020 : Collecte et bancarisation de tests de réponse thermique, développement d'une plateforme de dimensionnement d'échangeurs géothermiques. Rapport BRGM/RP-69797-FR.
- Maragna, C., Baudouin, V., Guillon, T., Casal, J., 2021a. Projet ADEME-CARTODIM 2020-2021 : Collecte et bancarisation de tests de réponse thermique, développement d'une plateforme de dimensionnement d'échangeurs géothermiques.
- Maragna, C., Compère, F., Barrière, J., Maurel, C., Monnot, P., 2019. Estimation of shallow

geothermal energy potential at urban scale : numerical VS semi-analytical models. Eur. Geotherm. Congr. 2019, June 2019, La Haye, Netherlands. 11–14.

Maragna, C., Maurel, C., Salquèbre, D., Klinka, T., 2021b. Cartographie du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire d'Orléans Métropole - Rapport final. BRGM/RP-70449-FR.

Mégnien, C., 1979. Hydrogéologie du centre du bassin de Paris : contribution à l'étude de quelques aquifères principaux., Editions du BRGM. Paris.

Mégnien, C., 1976. Hydrogéologie du centre du bassin de Paris, contribution à l'étude de quelques aquifères principaux. Numéro 98 de la collection : Mémoires du BRGM.

Mégnien, C., 1970. Atlas des nappes aquifères de la région parisienne.

Reiss, C., Maragna, C., Monnot, P., 2012. Protocole de test de réponse thermique. <https://doi.org/BRGM/RP-60816-FR>

Schomburgk, S., Gateau, C., Goyénèche, O., 2005. Guide d'aide à la décision pour l'installation de pompes à chaleur sur nappe aquifère en région Ile-de-France. Partie 1 - Atlas hydrogéologique. Rapport final. BRGM/RP-53306-FR.

Xing, F., Masson, R., Lopez, S., 2017. Parallel numerical modeling of hybrid-dimensional compositional non-isothermal Darcy flows in fractured porous media. J. Comput. Phys. 637–664. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.05.043>

10. Annexes

Annexe 1 Description des modèles thermo-hydrodynamiques numériques de doublets

La modélisation des écoulements souterrains et d'exploitation d'un doublet géothermique a été réalisée avec le logiciel ComPASS. Cet outil est une plateforme de simulation d'écoulement multiphasique, à usage général, adapté à la modélisation des ressources géothermales et leur exploitation. ComPASS est actuellement développé dans le cadre du projet CHARMS, financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-16-CE06-0009). Il permet d'effectuer des simulations d'écoulement thermique multiphasique et multi-composant sur des maillages 3D non structurés génériques, pouvant éventuellement contenir des fractures. Il montre un bon comportement de convergence lors de la résolution de la physique hautement non linéaire des circulations hydrothermales poly-phasiques rencontrées notamment en géothermie profonde. Il est également adapté à la géothermie plus superficielle.

Pour plus d'information sur l'outil, le lecteur pourra se référer aux travaux de (Xing et al., 2017) pour la description des aspects théoriques de la modélisation des écoulements, de (Beaude et al., 2017a) pour l'intégration d'architecture de puits complexes et de (Beaude et al., 2017b) pour la spécification de conditions aux limites complexes. Un compte rendu de la conférence de Stanford Geothermal Workshop par (Lopez et al. 2018) résume la plupart de ces informations. Des informations supplémentaires sont également disponibles sur le site Web du projet ANR CHARMS (<http://www.anr-charms.org>). ComPASS est un outil open source sous licence GPL v.3 et peut être librement accessible sur demande. Pour plus d'information sur l'outil, le lecteur pourra se référer aux travaux de (Xing et al., 2017) pour la description des aspects théoriques de la modélisation des écoulements, de (Beaude et al., 2017a) pour l'intégration d'architecture de puits complexes et de (Beaude et al., 2017b) pour la spécification de conditions aux limites complexes. Un compte rendu de la conférence de Stanford Geothermal Workshop par (Lopez et al. 2018) résume la plupart de ces informations. Des informations supplémentaires sont également disponibles sur le site Web du projet ANR CHARMS (<http://www.anr-charms.org>). ComPASS est un outil open source sous licence GPL v.3 et peut être librement accessible sur demande.

Géométrie du modèle et maillage :

Le maillage utilisé pour les modélisations correspond à un parallélépipède rectangle (pavé droit) dont les dimensions sont adaptées pour chaque simulation, où l'extension latérale est en fonction de la distance entre les ouvrages et la hauteur fonction de l'épaisseur de l'aquifère considéré. Le volume généré est maillé à l'aide de la librairie CGAL¹⁵ (*Computational Geometry Algorithms Library*) par des prismes.

Pour le maillage représentant l'aquifère, le maillage se compose de 7 couches. La partie réservoir, utiles à l'écoulement, est intercalée entre 2 couches moins perméables, à la base et au sommet du modèle, dont chacune est composée de 4 couches.

¹⁵ <https://www.cgal.org/>

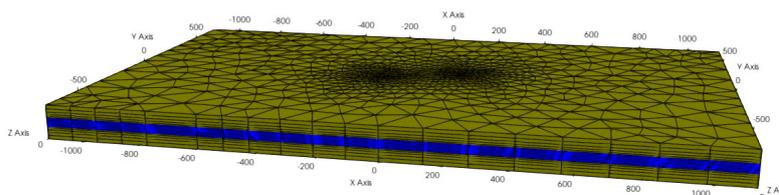


Figure 79 : Maillage utilisé pour simuler l'exploitation géothermique sur nappe dans le cas n°1 avec en bleu la partie réservoir, utile à l'écoulement et en jaune les parties moins perméables

Le maillage est raffiné autour des forages d'injection et de production afin d'avoir une représentation fine des variations de température et de pression autour des puits.

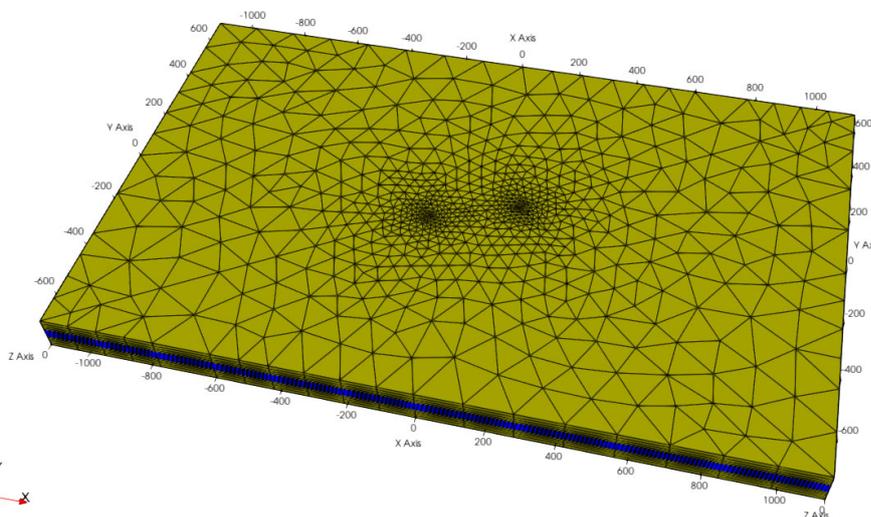
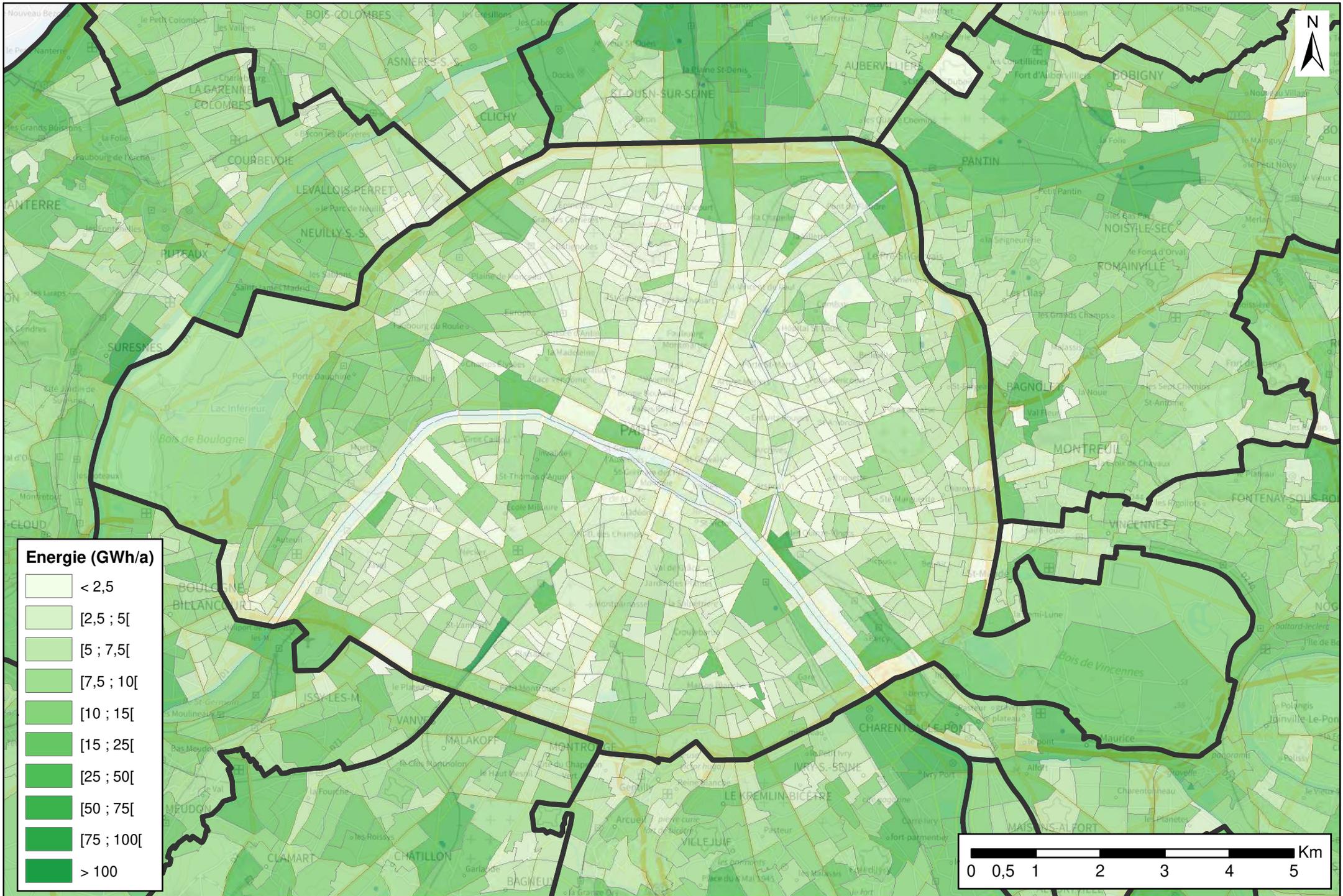


Figure 80 : Illustration du maillage en prisme et du raffinement utilisé autour des forages de production et d'injection.

Annexe 2 Cartographie du potentiel par EPT - Chaud

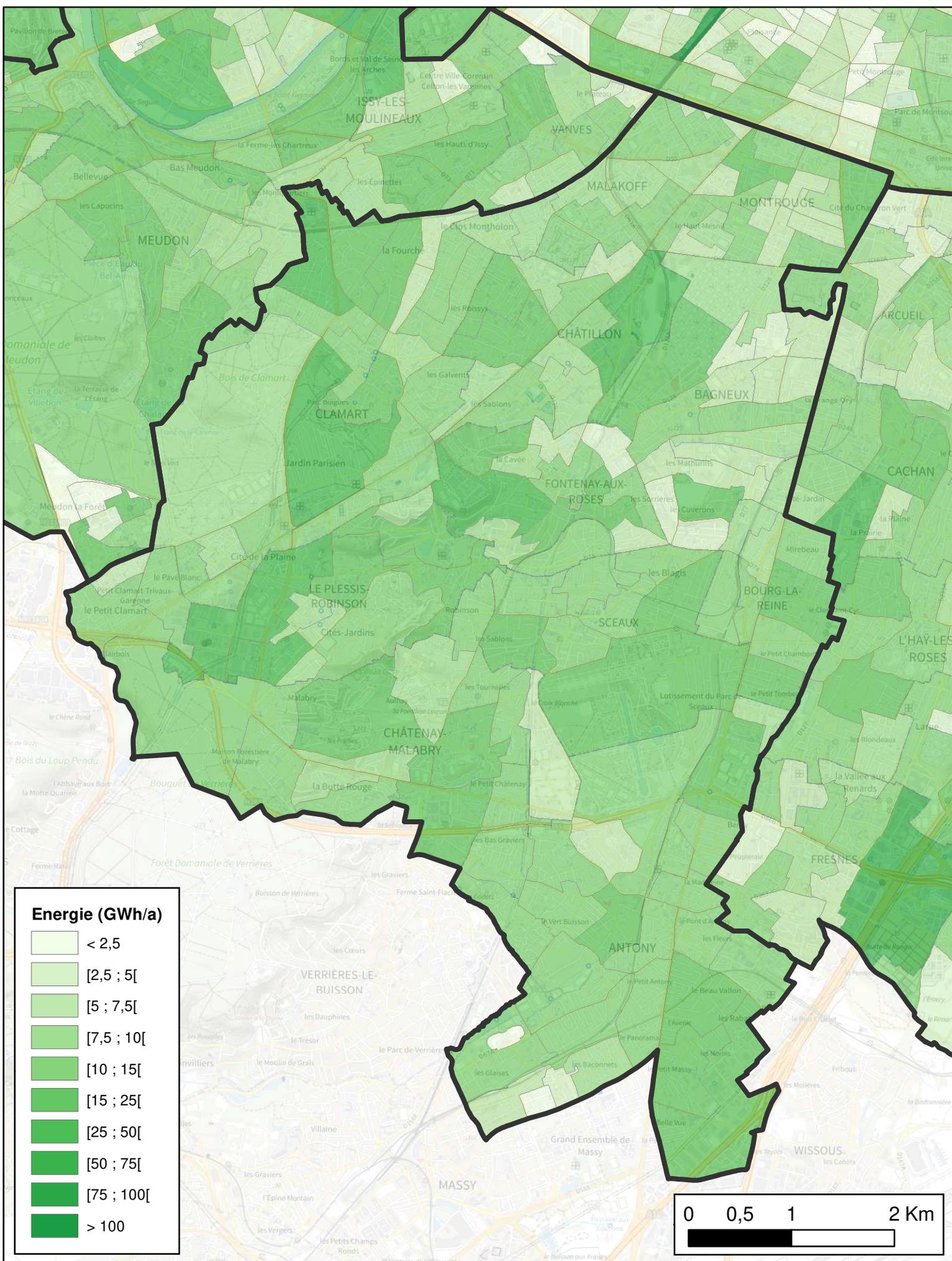
Potentiel géothermique estimé en chaud

T1 Paris



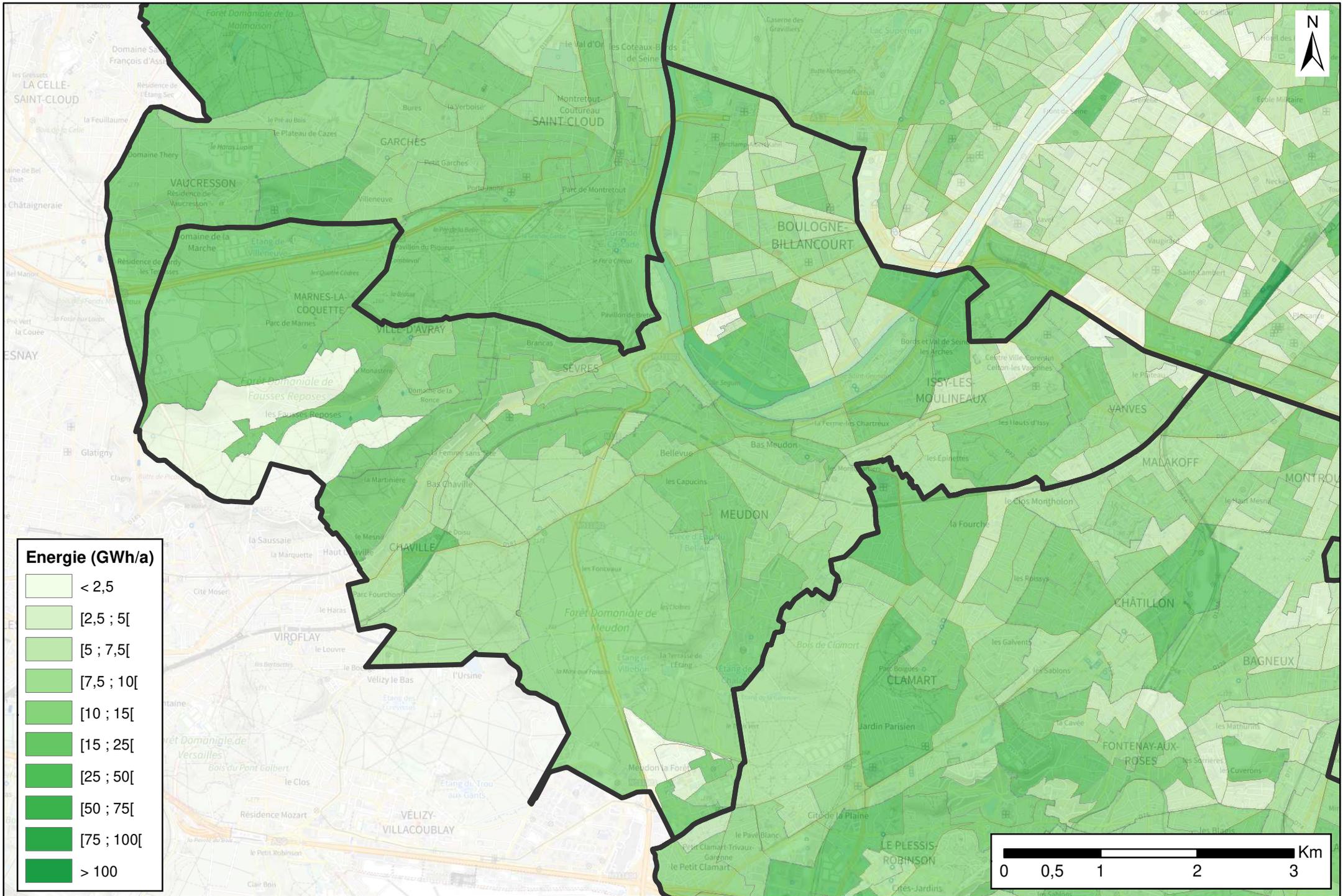
Potentiel géothermique estimé en chaud

T2 Territoire Vallée Sud-Grand Paris



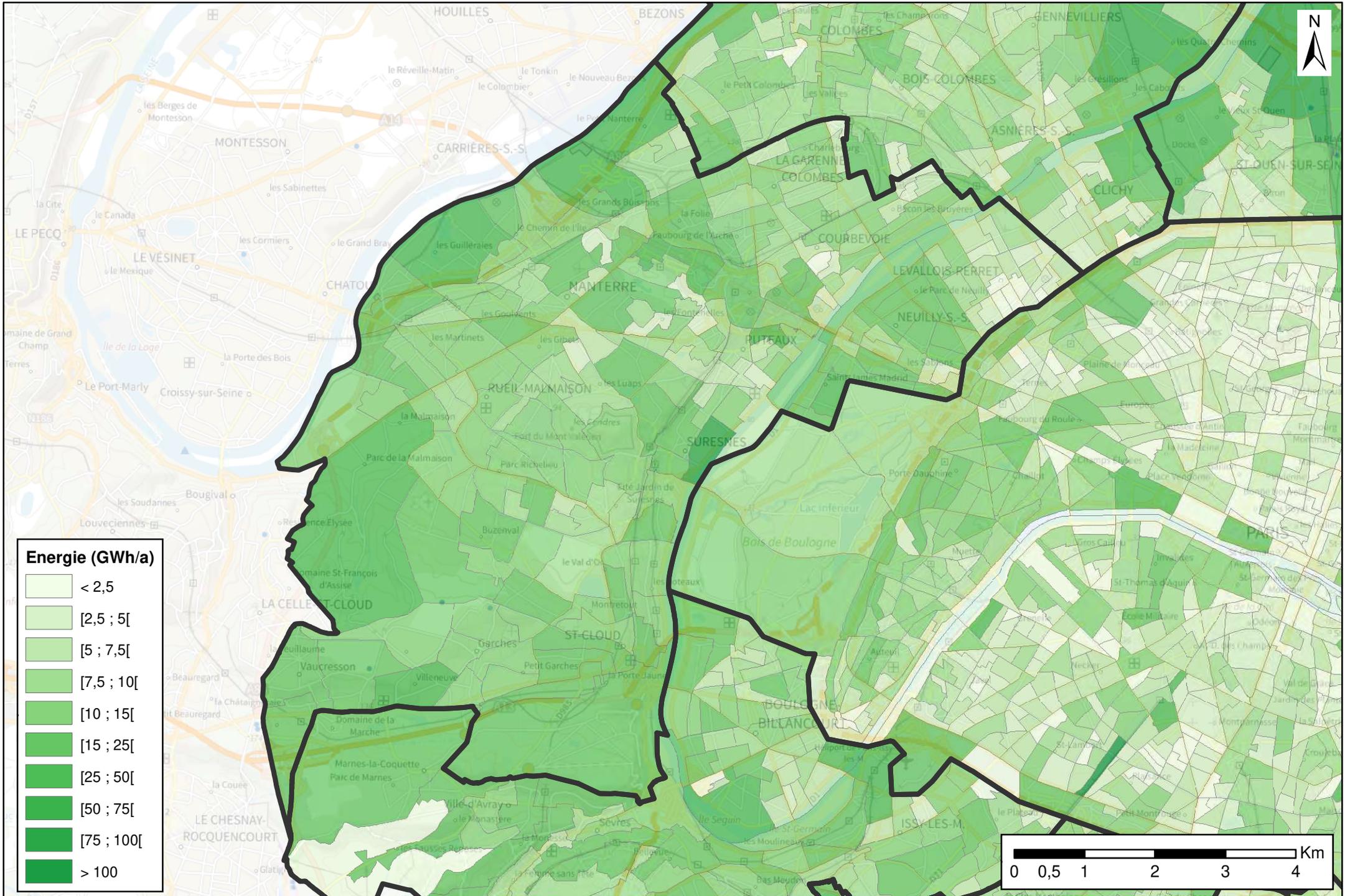
Potentiel géothermique estimé en chaud

T3 Grand Paris Seine Ouest



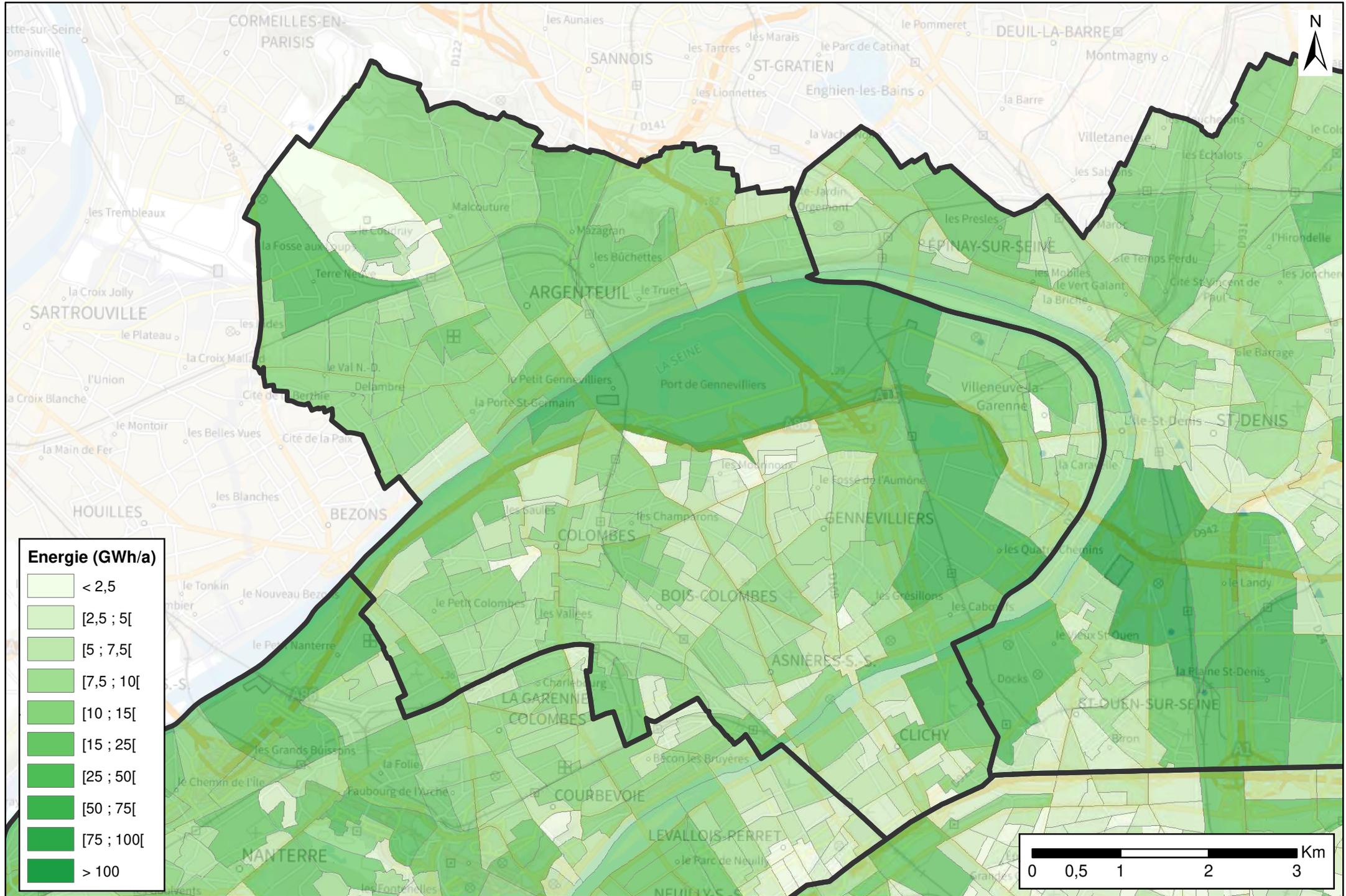
Potentiel géothermique estimé en chaud

T4 Territoire Paris Ouest La Défense



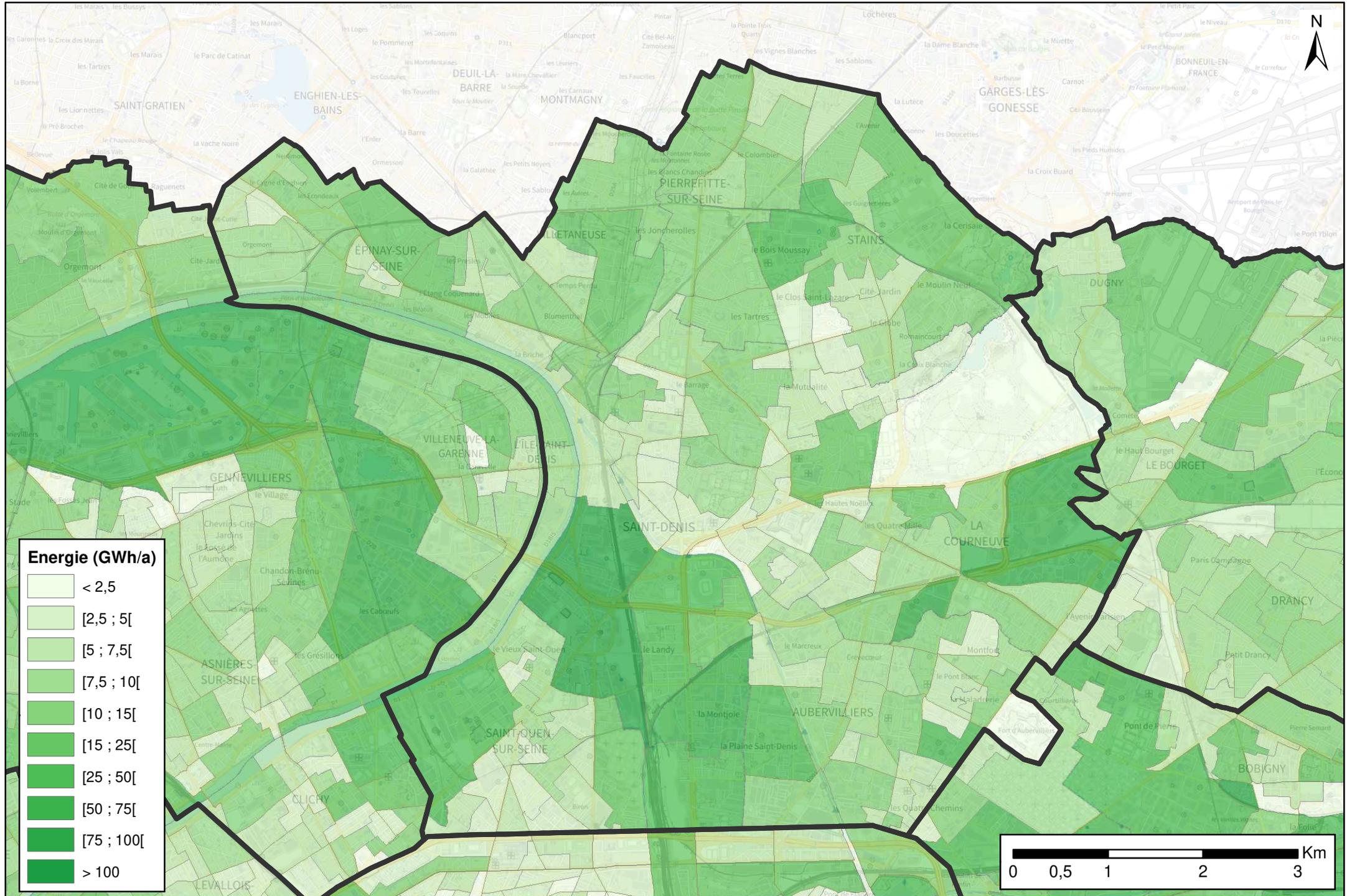
Potentiel géothermique estimé en chaud

T5 Boucle Nord de Seine



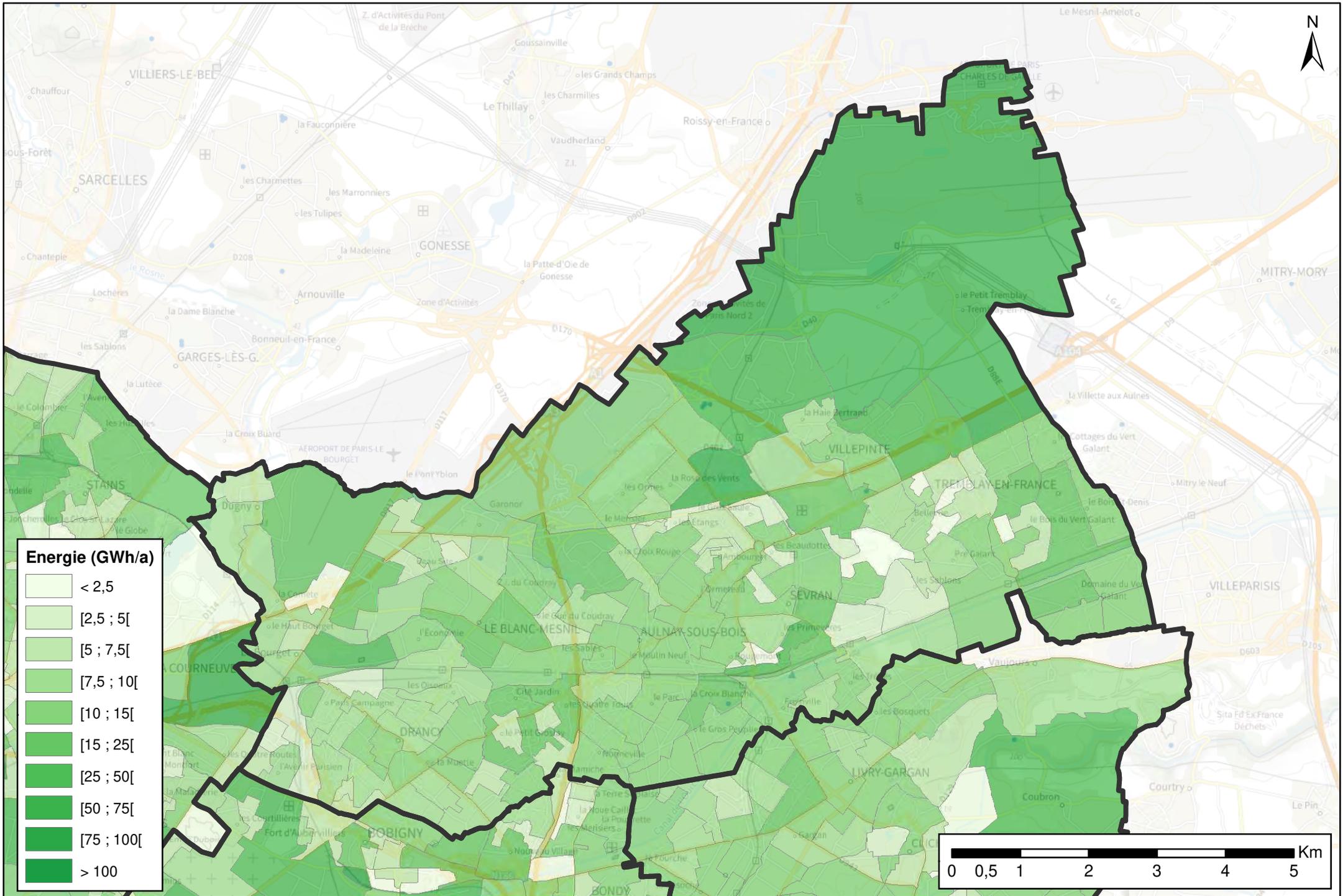
Potentiel géothermique estimé en chaud

T6 Plaine Commune



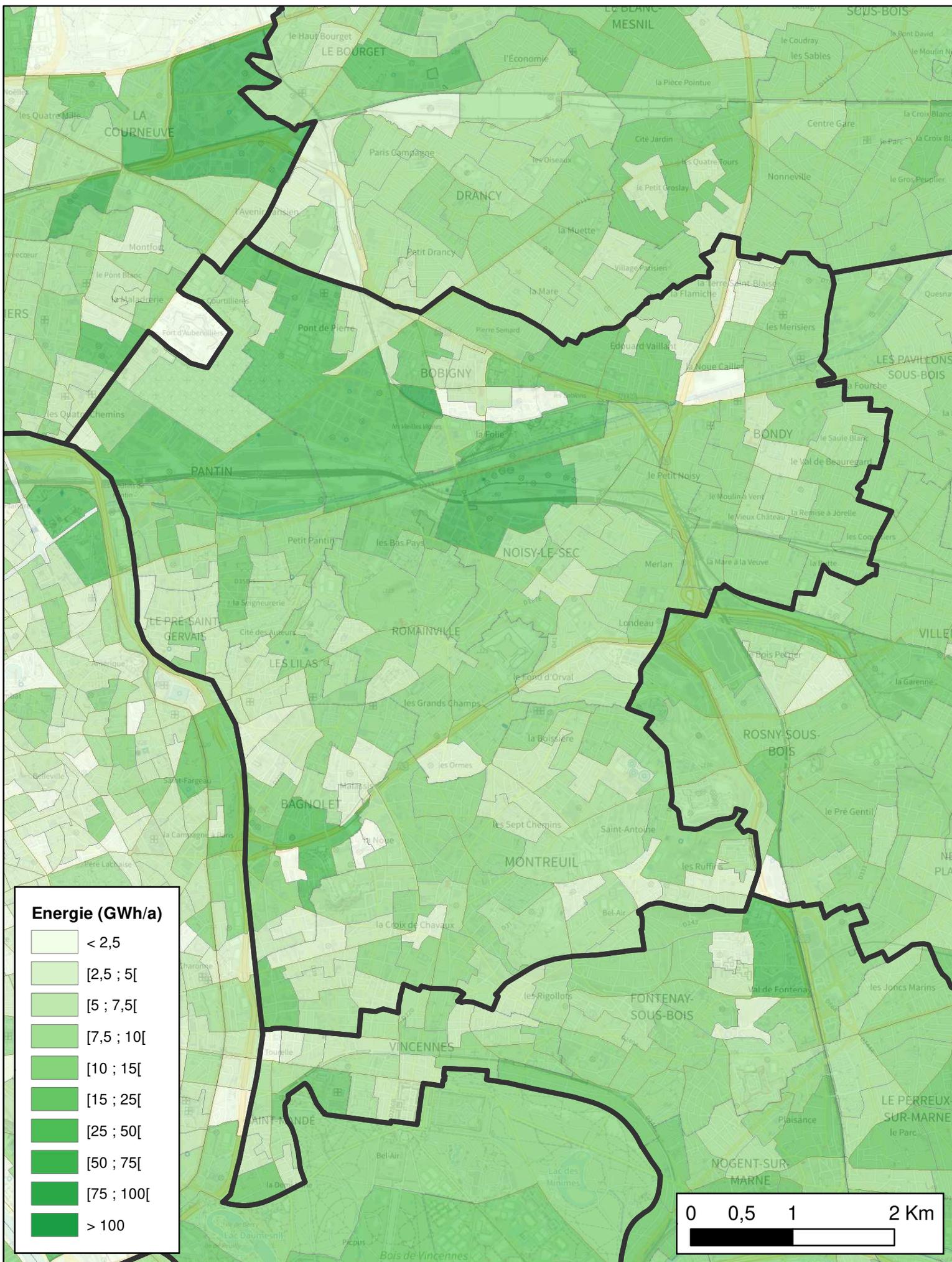
Potentiel géothermique estimé en chaud

T7 Paris Terres d'Envol



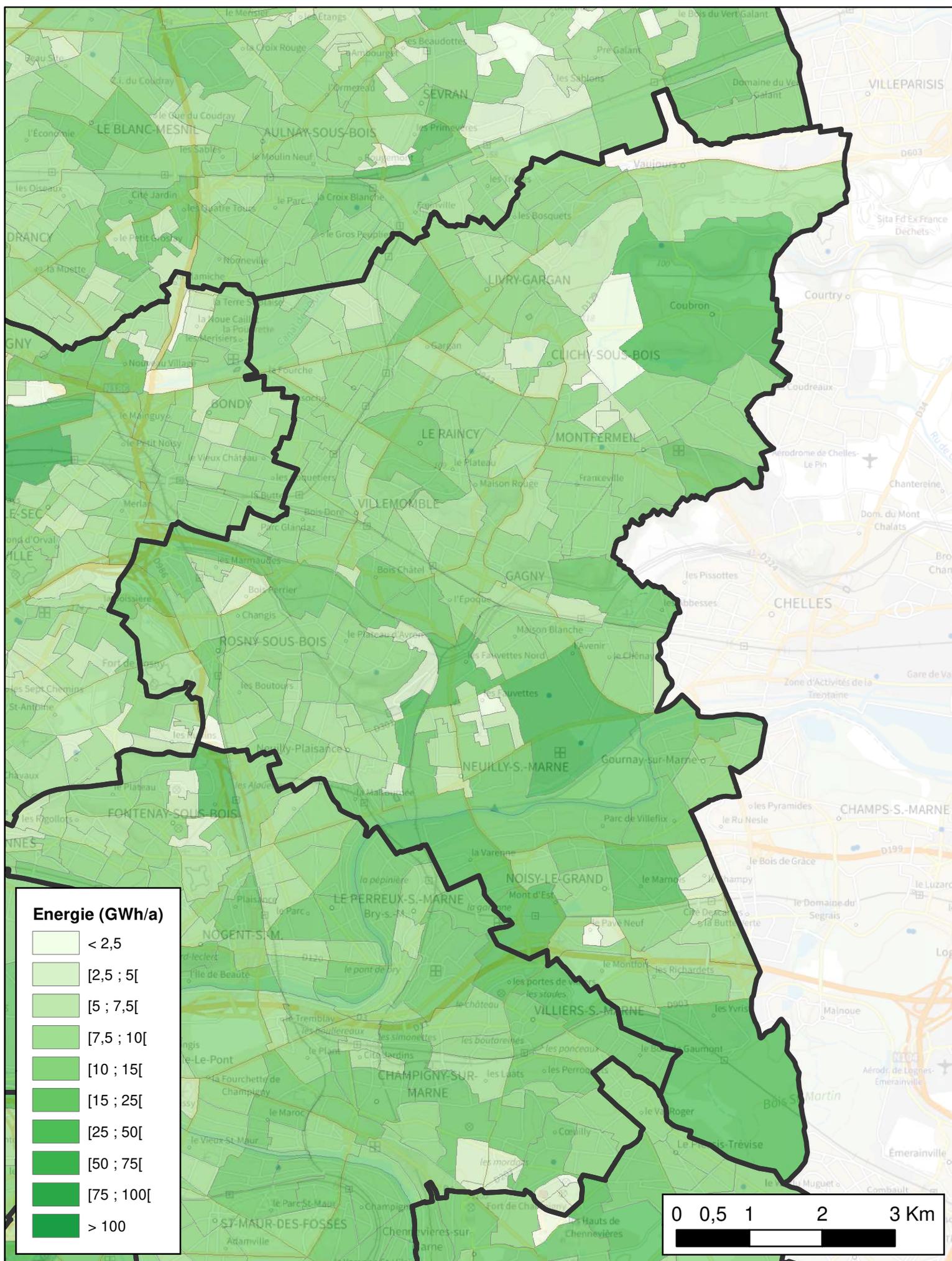
Potentiel géothermique estimé en chaud

T8 Est Ensemble



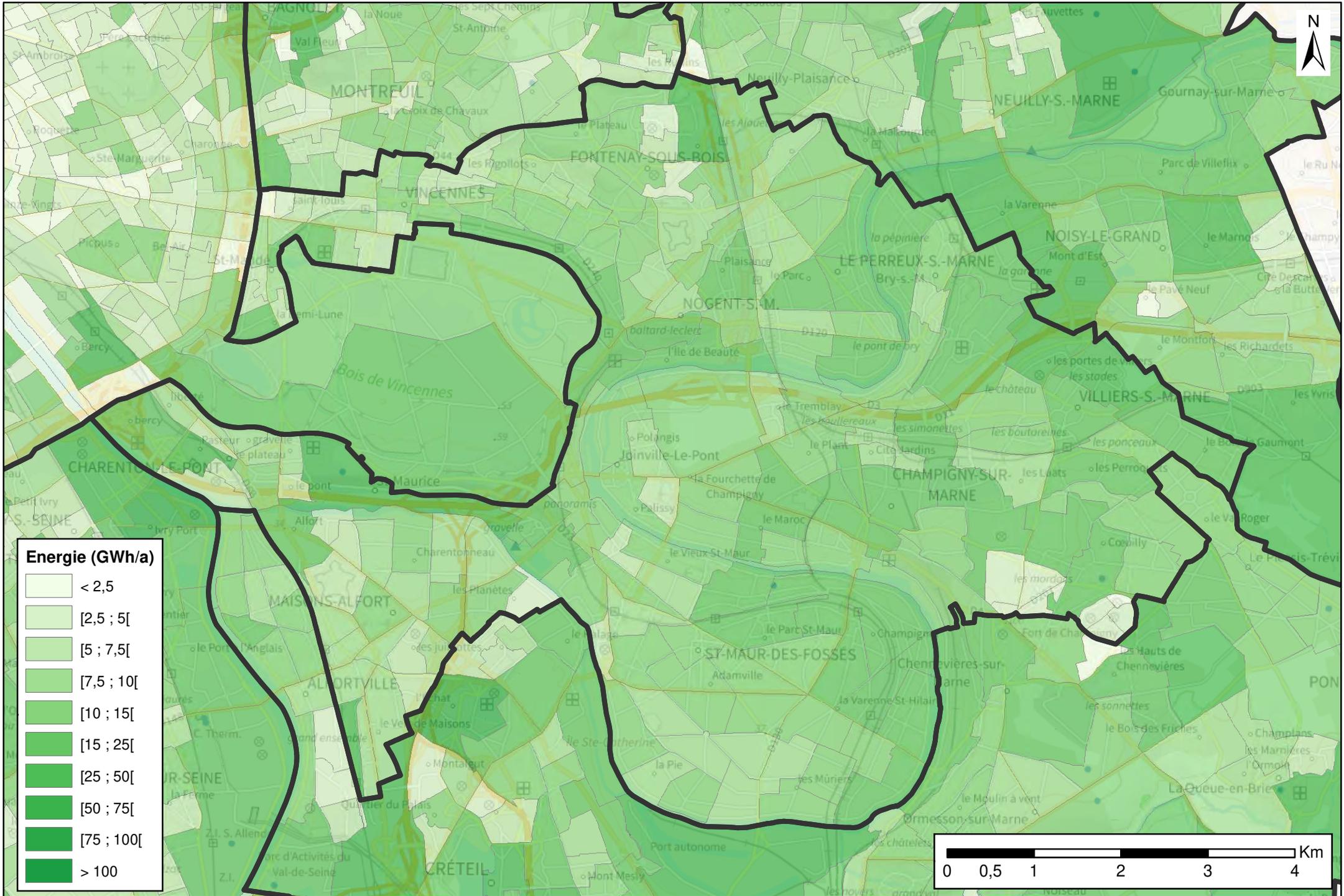
Potentiel géothermique estimé en chaud

T9 Grand Paris Grand Est



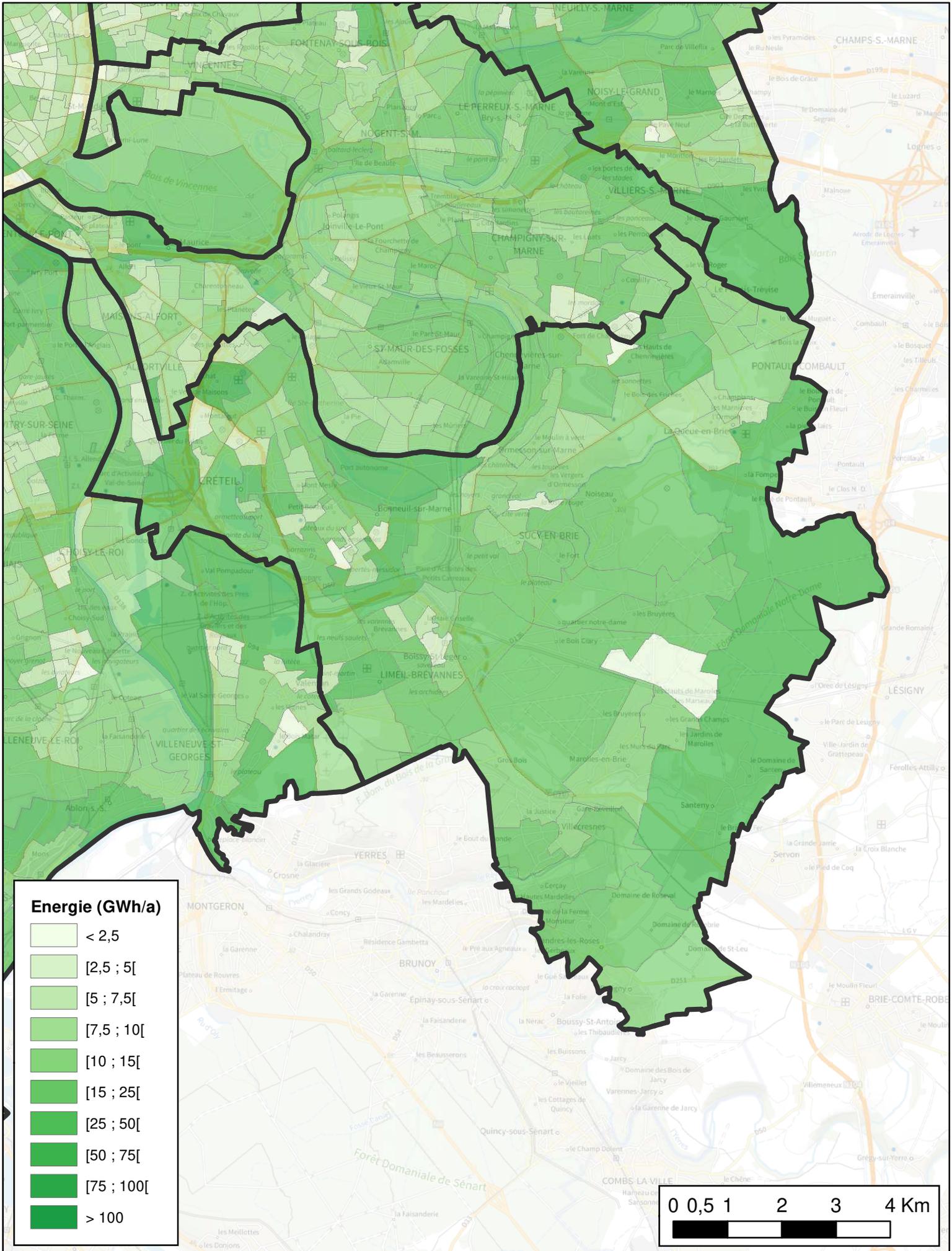
Potentiel géothermique estimé en chaud

T10 Paris Est Marne et Bois



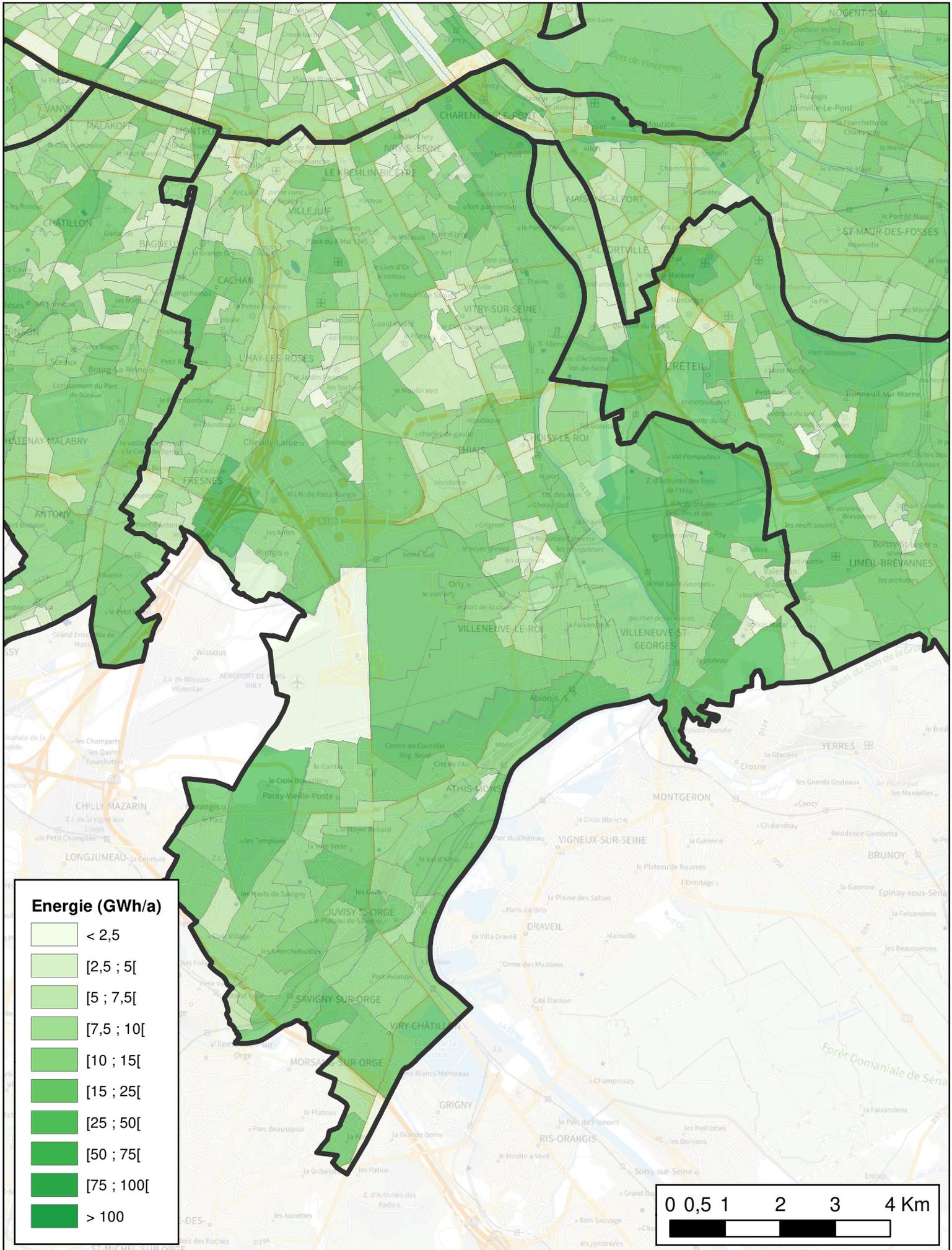
Potentiel géothermique estimé en chaud

T11 Grand Paris Sud-Est Avenir



Potentiel géothermique estimé en chaud

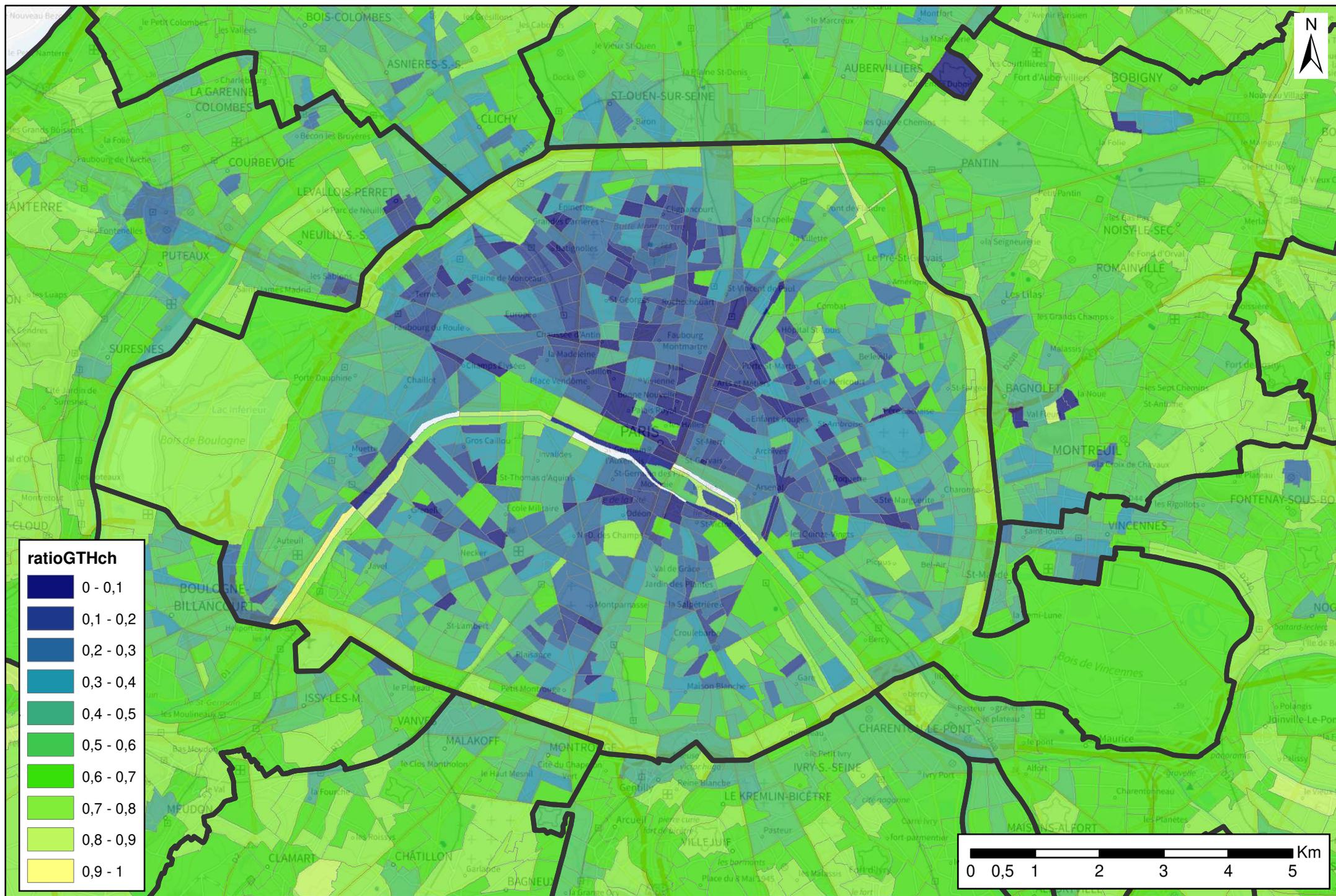
T12 Grand-Orly Val-de-Bièvre Seine-Amont



Annexe 3 Taux de couverture par EPT – Chaud

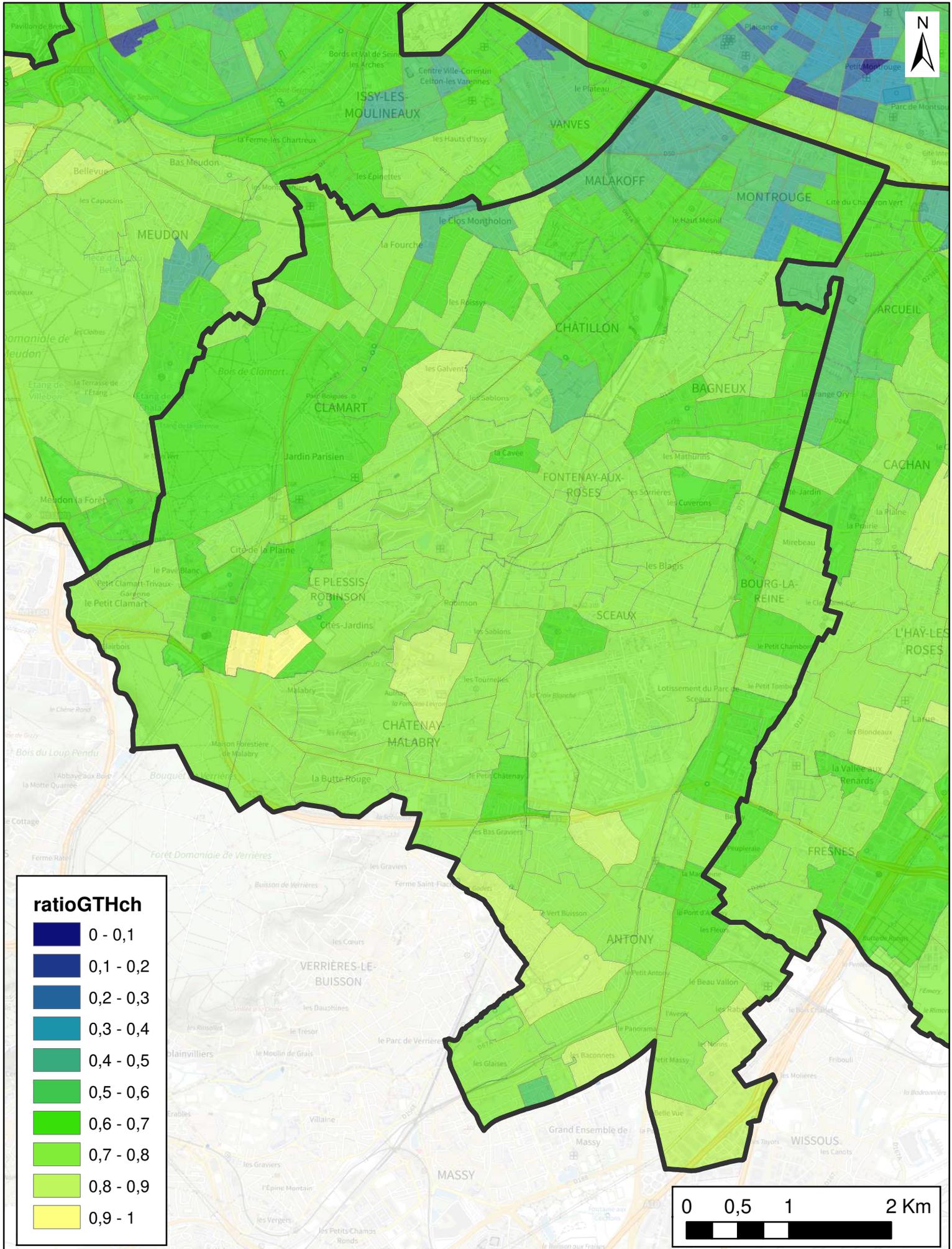
Taux de couverture des besoins en chaud

T1 Paris



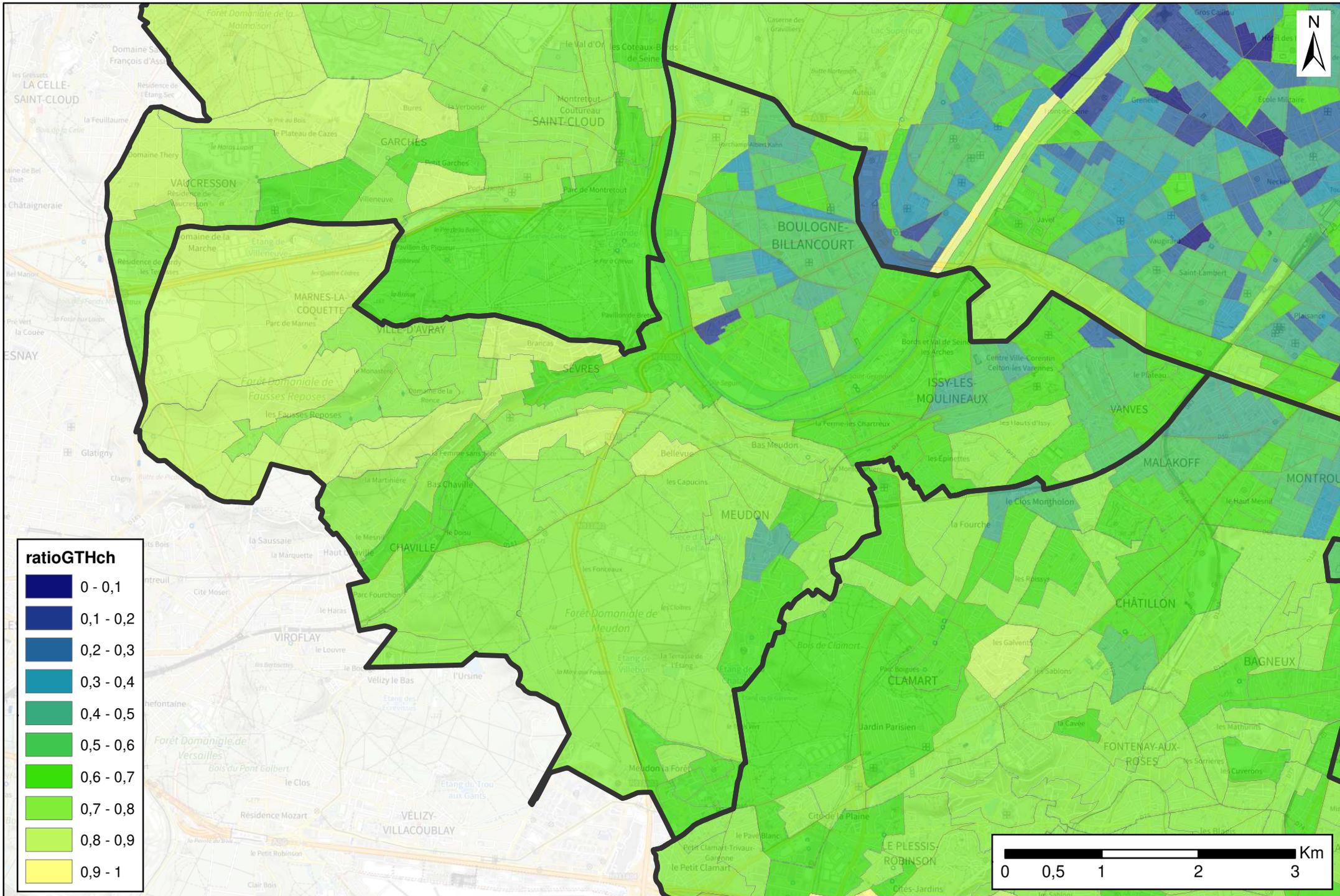
Taux de couverture des besoins en chaud

T2 Territoire Vallée Sud-Grand Paris



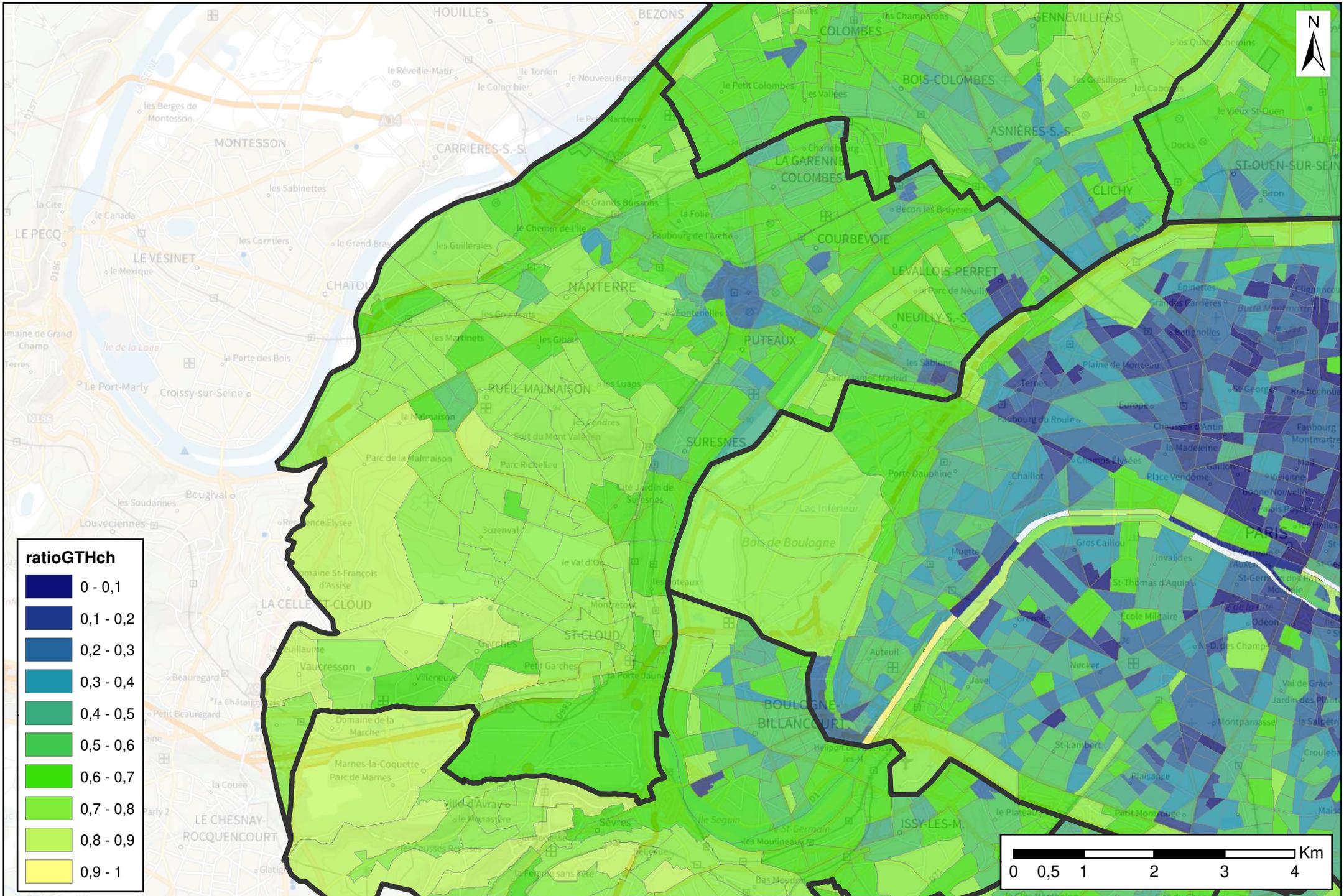
Taux de couverture des besoins en chaud

T3 Grand Paris Seine Ouest



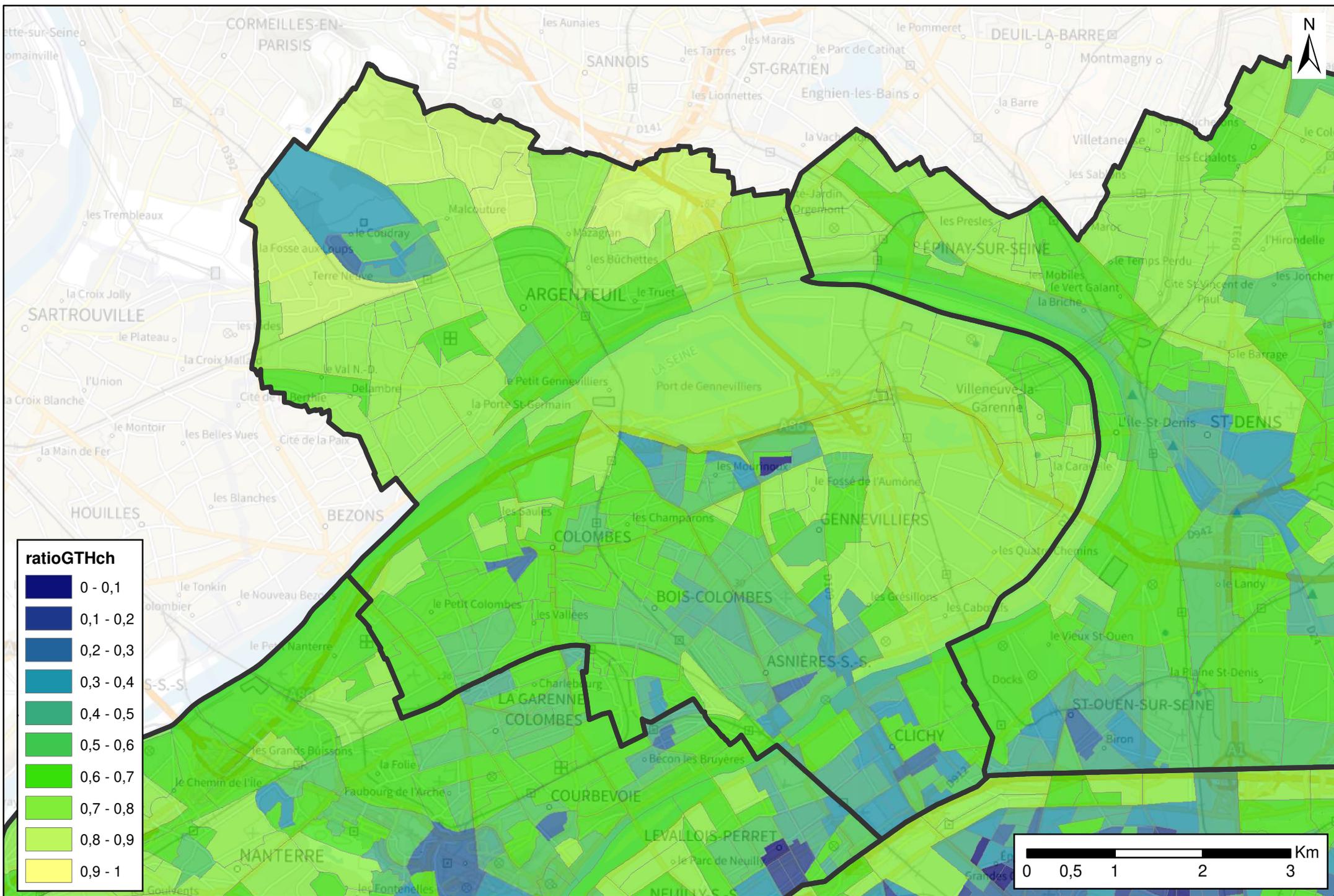
Taux de couverture des besoins en chaud

T4 Territoire Paris Ouest La Défense



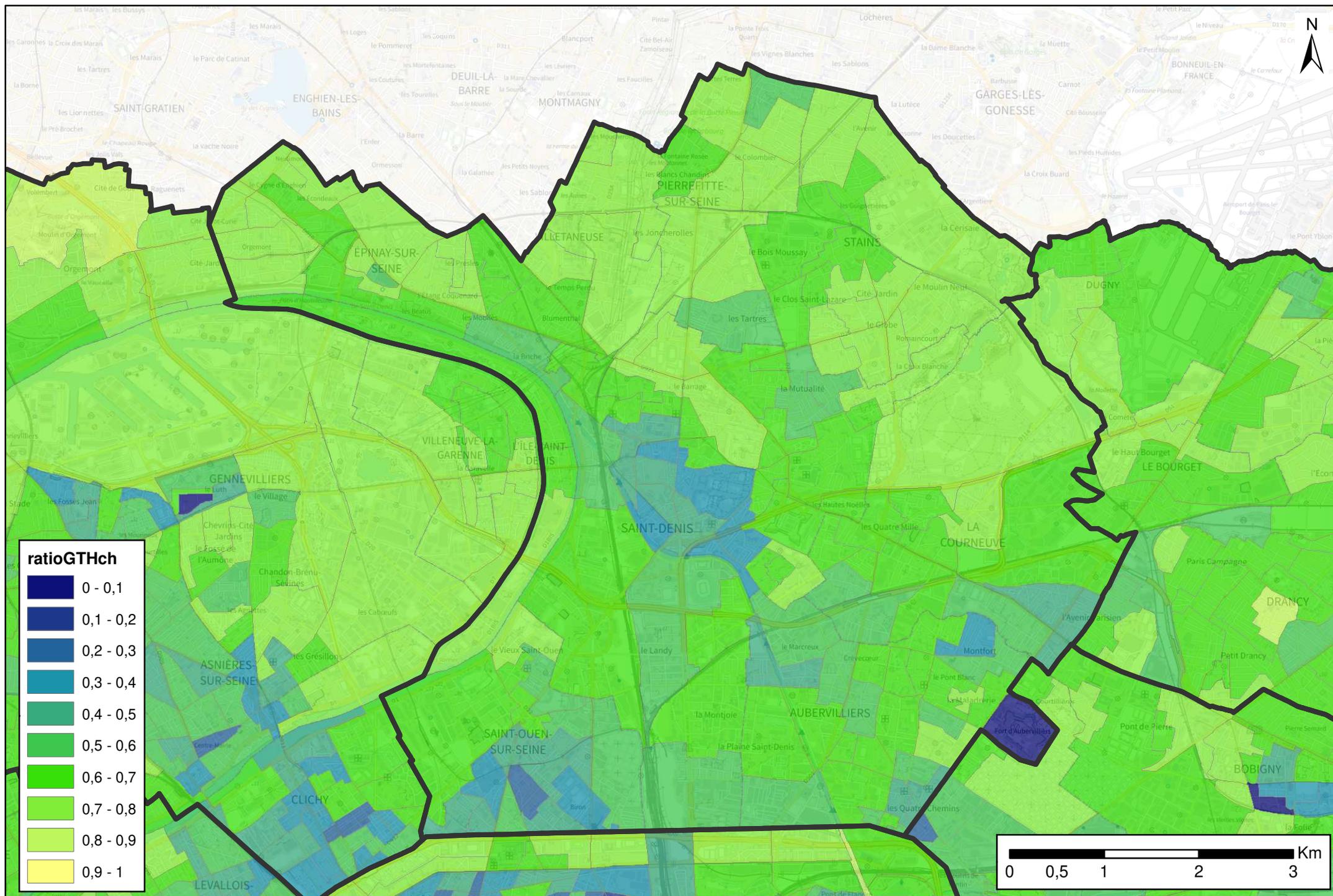
Taux de couverture des besoins en chaud

T5 Boucle Nord de Seine



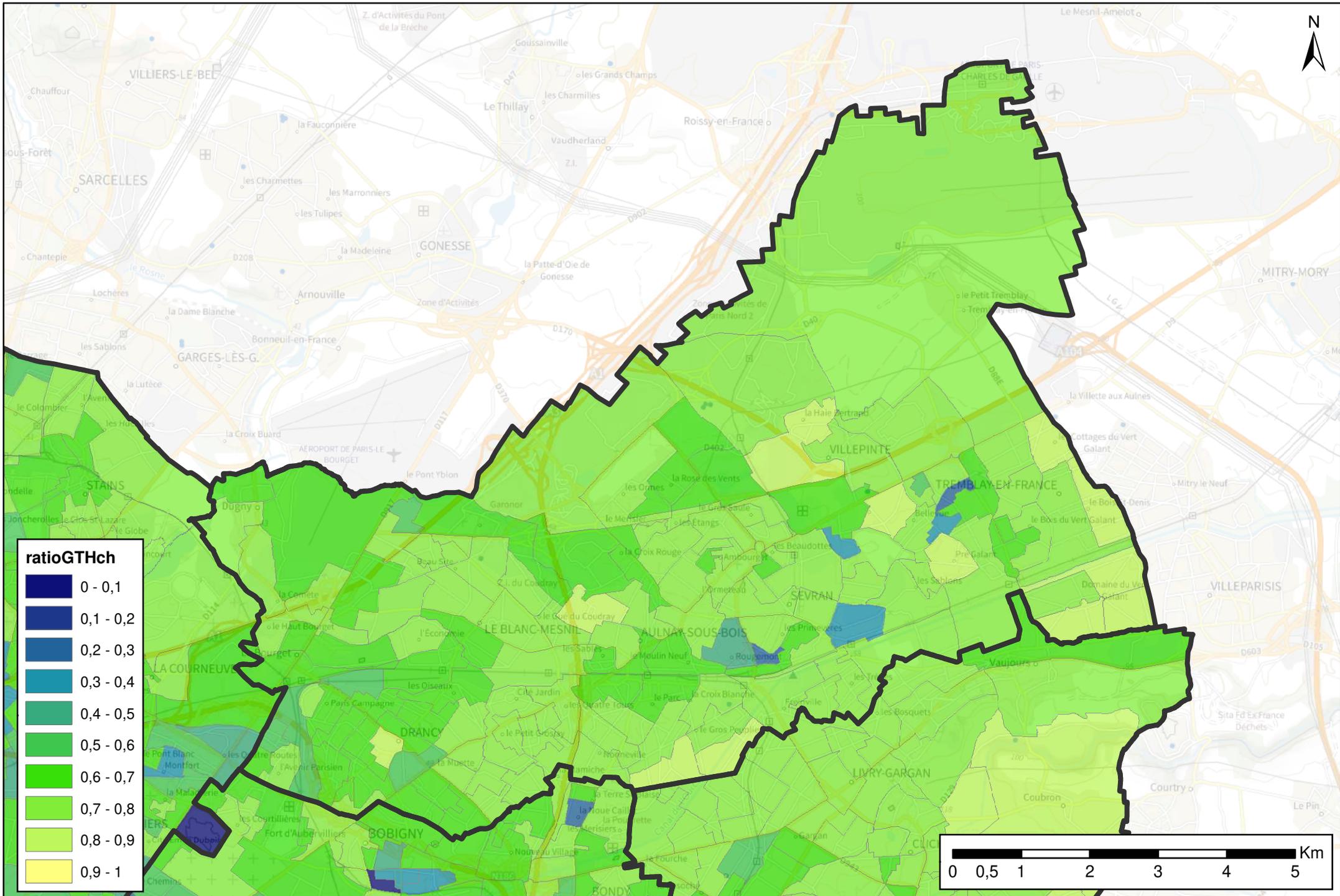
Taux de couverture des besoins en chaud

T6 Plaine Commune



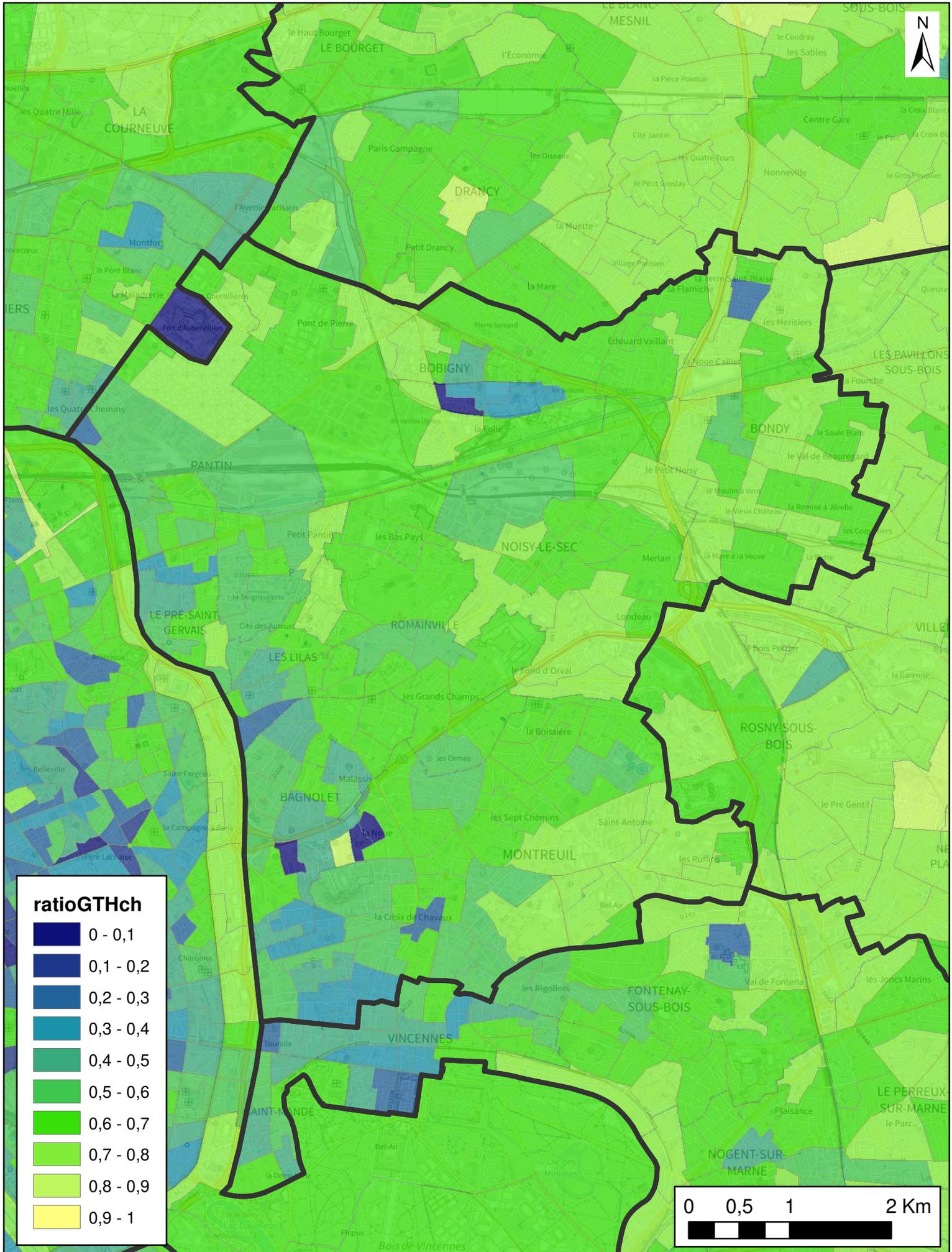
Taux de couverture des besoins en chaud

T7 Paris Terres d'Envol



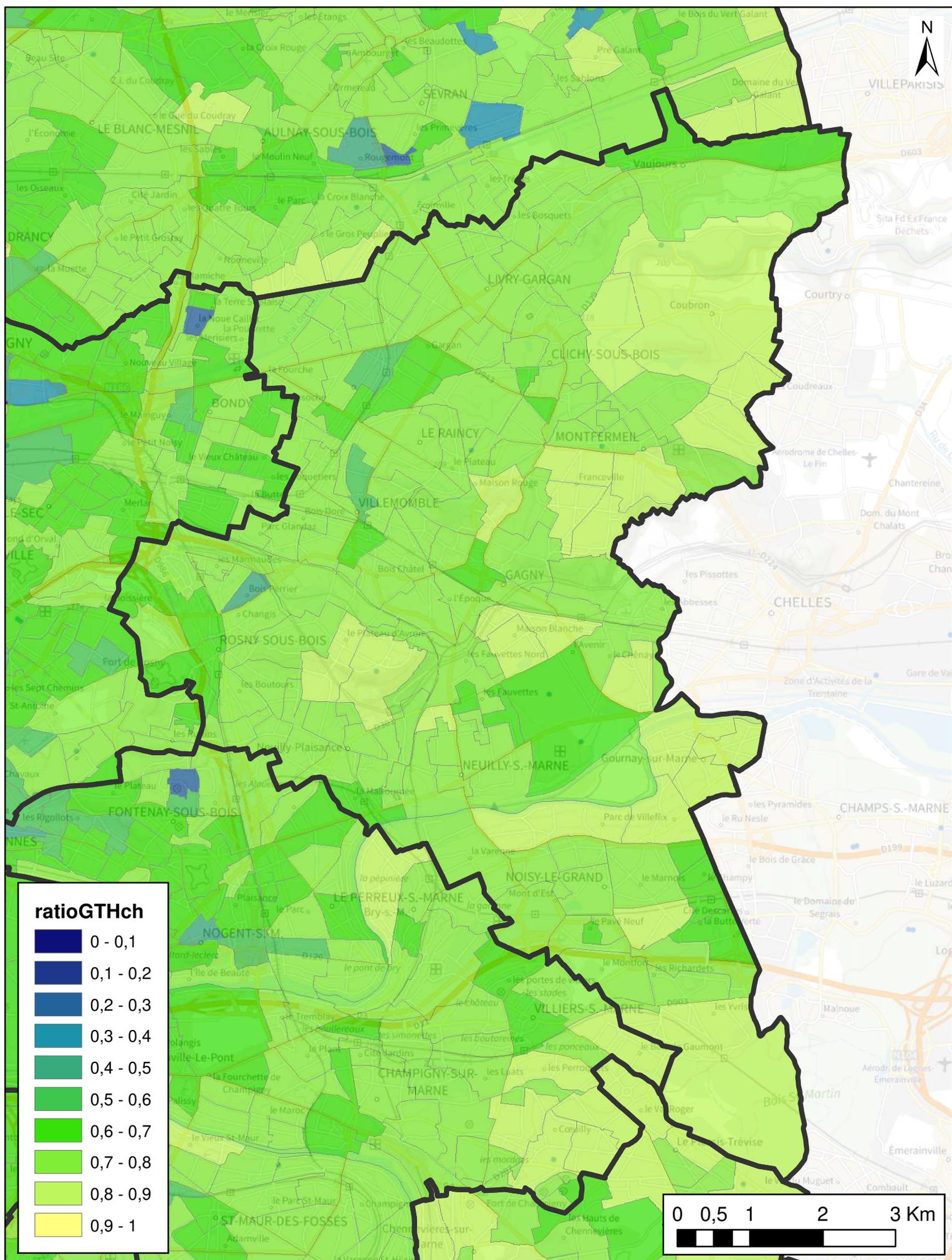
Taux de couverture des besoins en chaud

T8 Est Ensemble



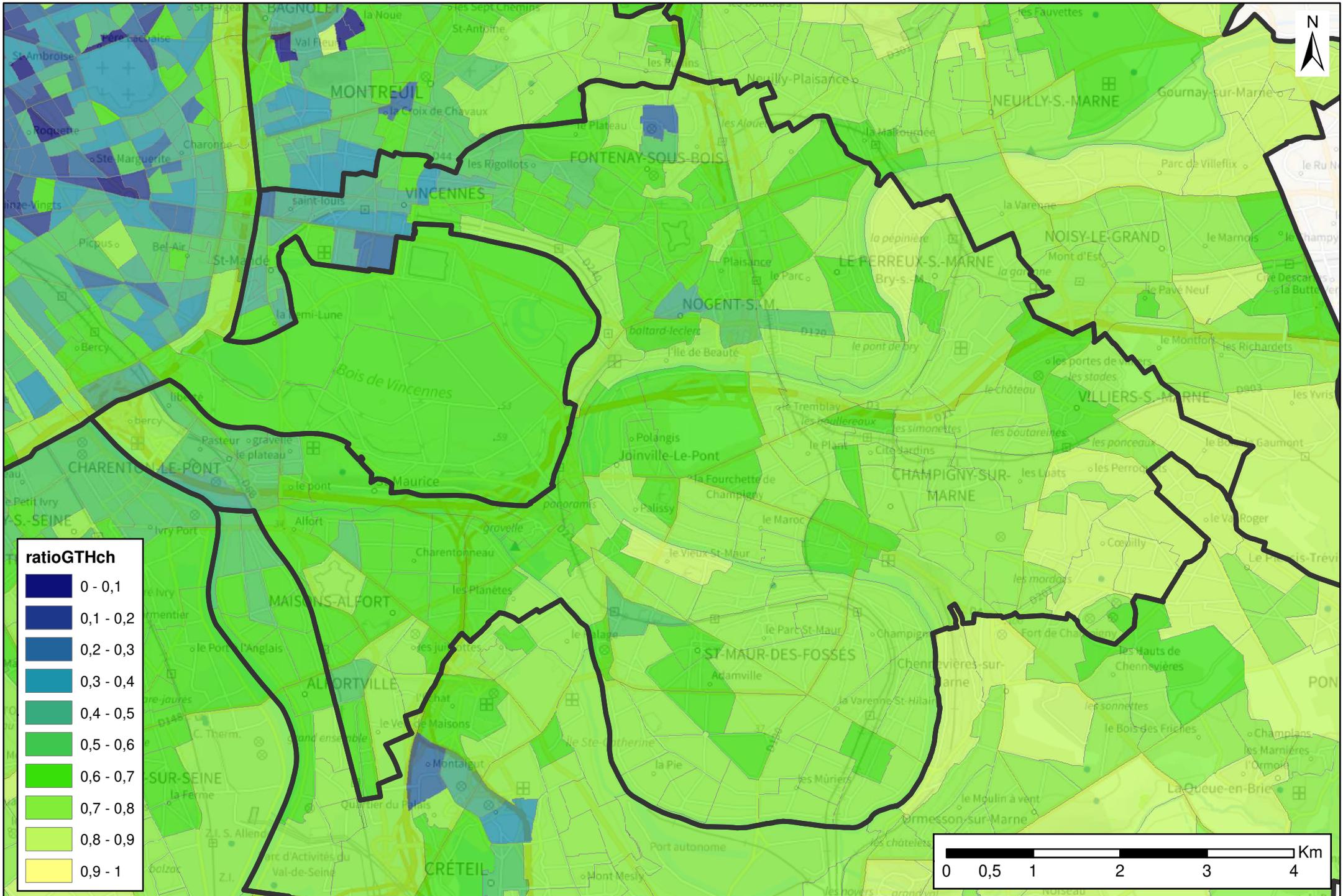
Taux de couverture des besoins en chaud

T9 Grand Paris Grand Est



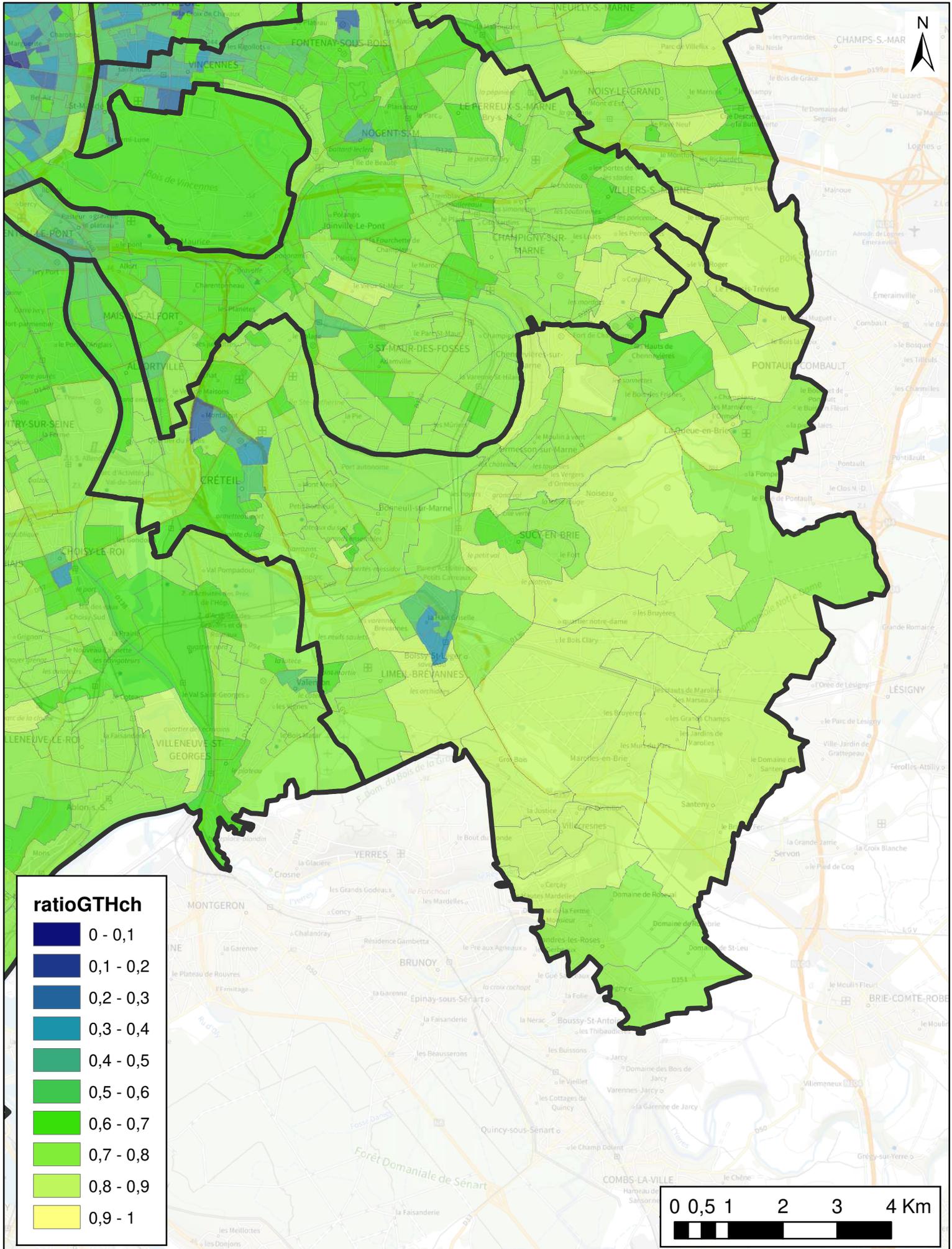
Taux de couverture des besoins en chaud

T10 Paris Est Marne et Bois



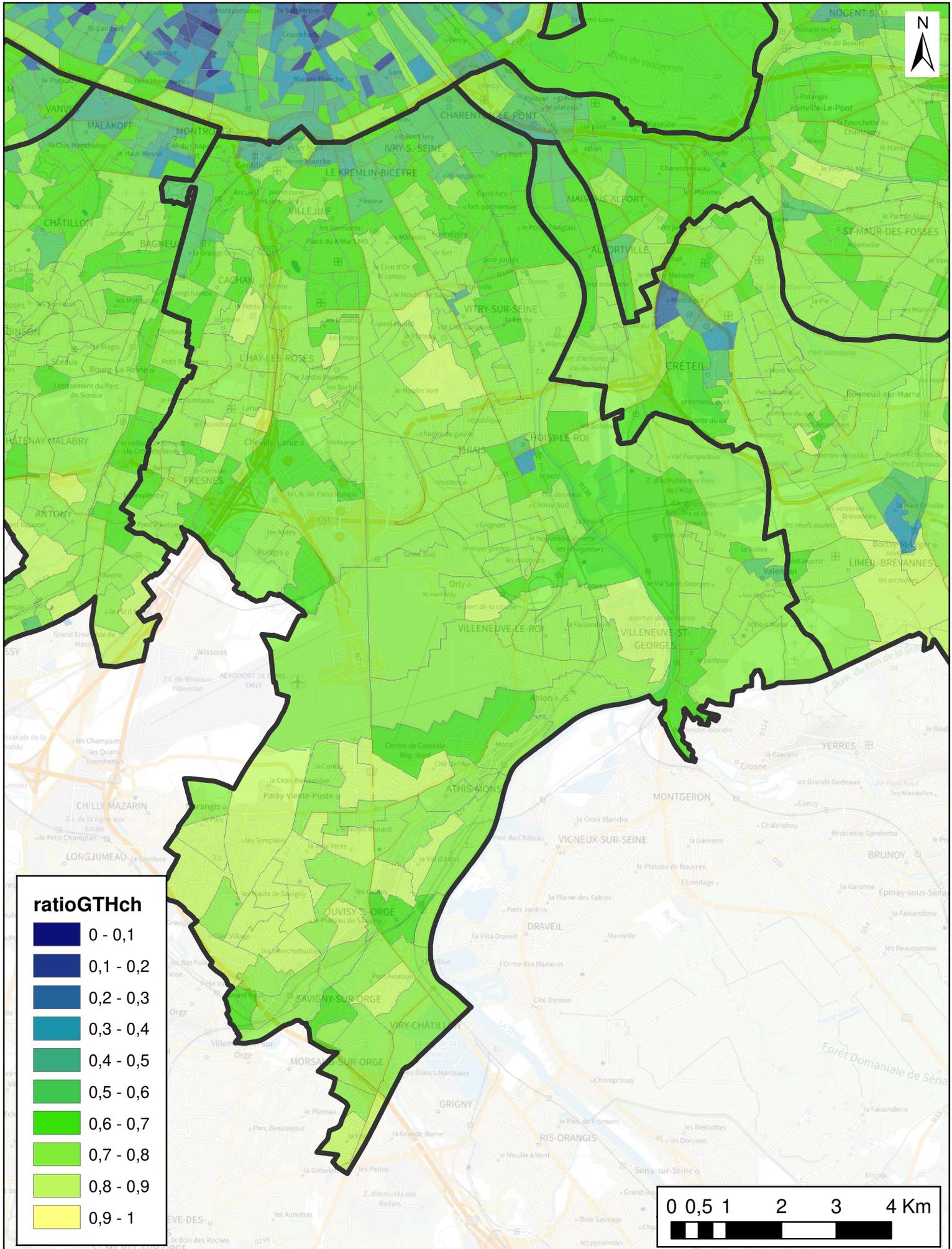
Taux de couverture des besoins en chaud

T11 Grand Paris Sud-Est Avenir



Taux de couverture des besoins en chaud

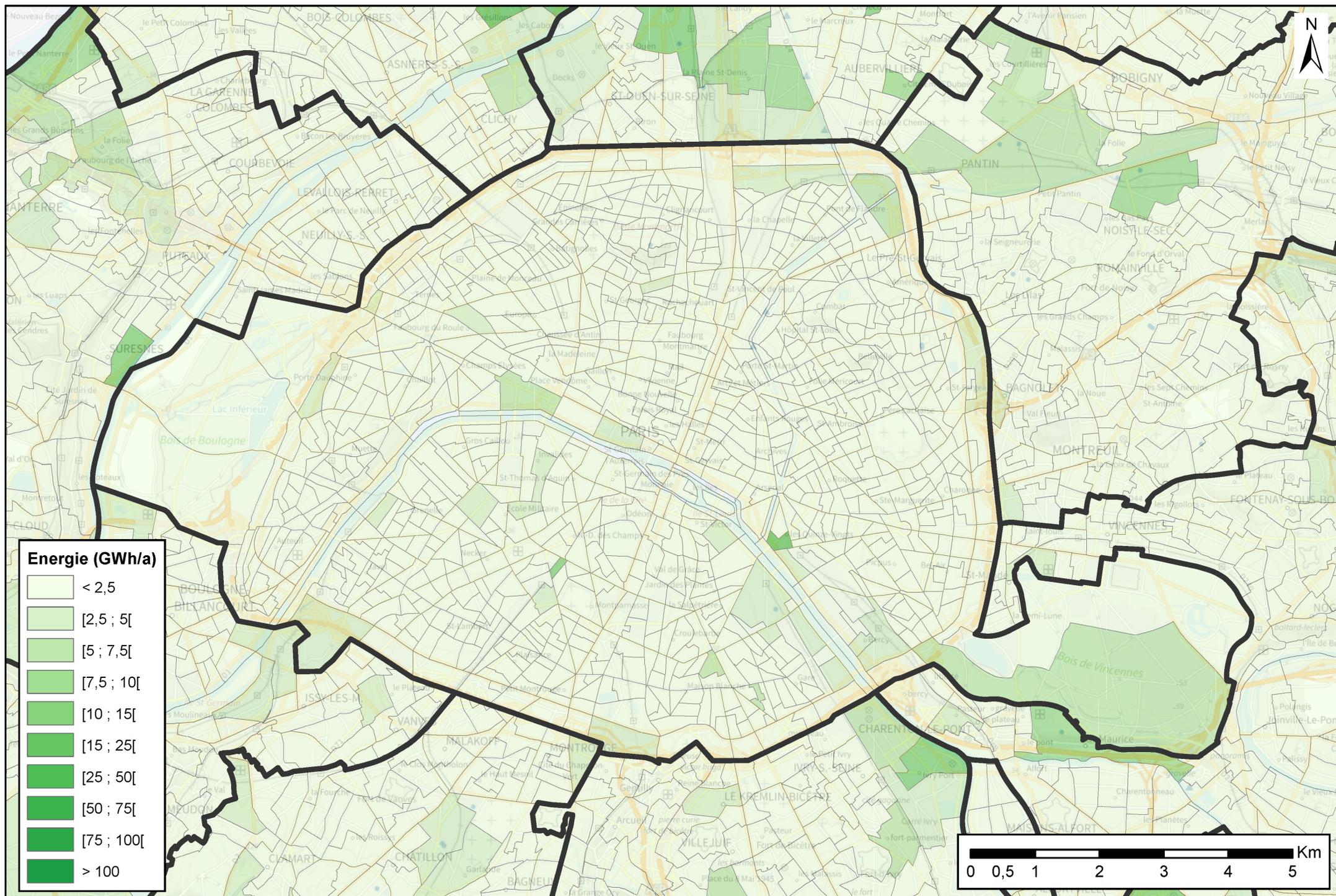
T12 Grand-Orly Val-de-Bièvre Seine-Amont



Annexe 4 Cartographie du potentiel par EPT – Froid

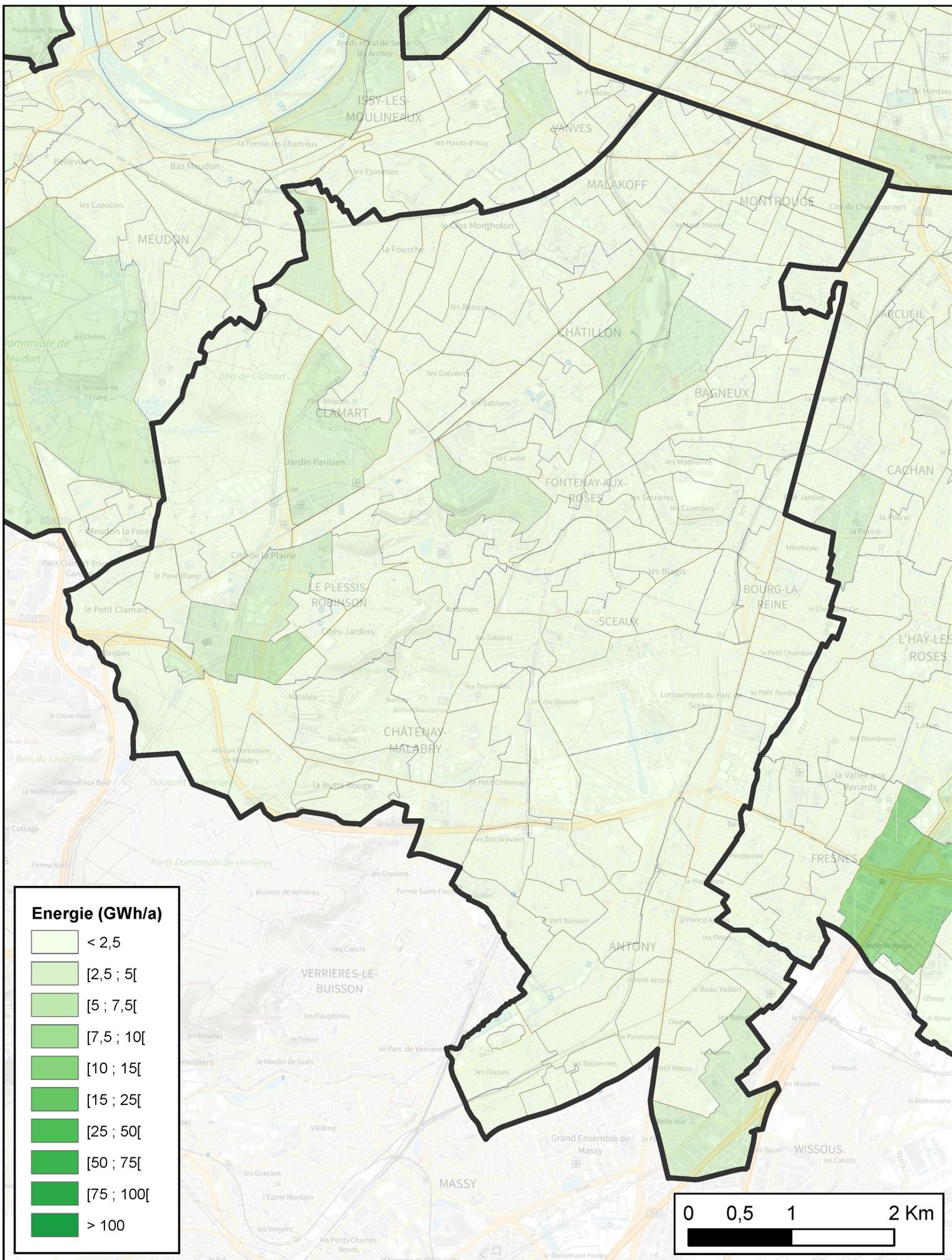
Potentiel géothermique estimé en froid

T1 Paris



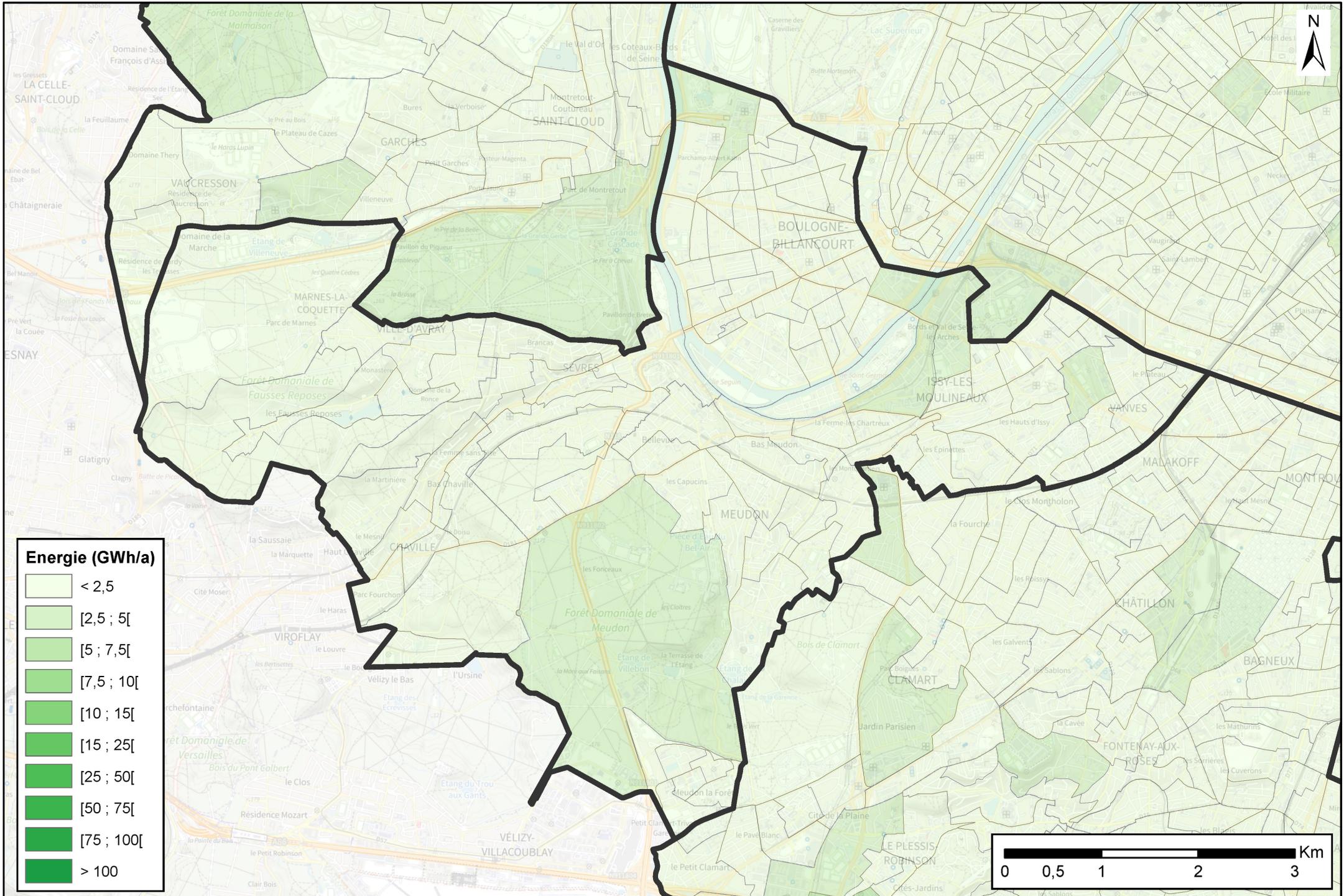
Potentiel géothermique estimé en froid

T2 Territoire Vallée Sud-Grand Paris



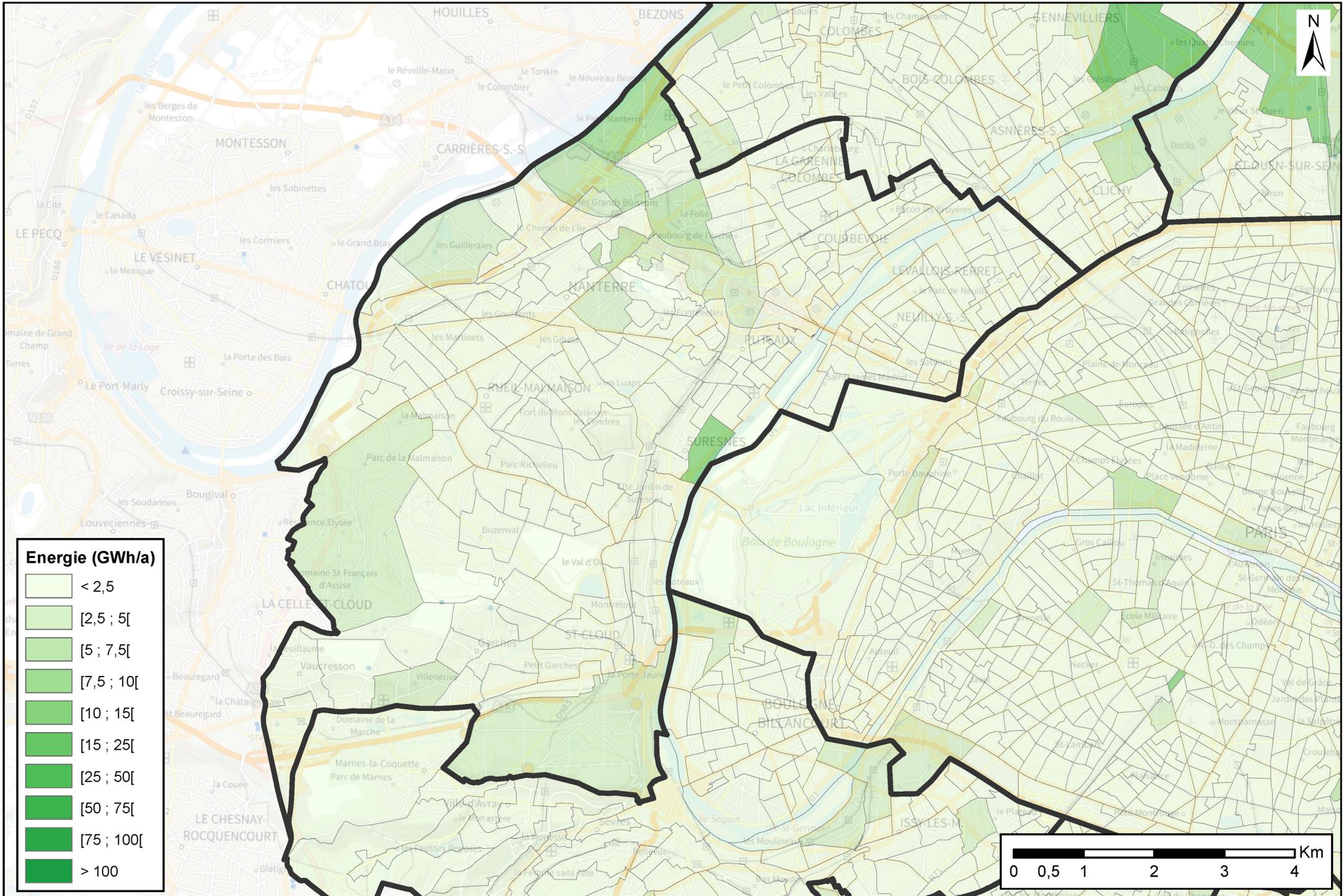
Potentiel géothermique estimé en froid

T3 Grand Paris Seine Ouest



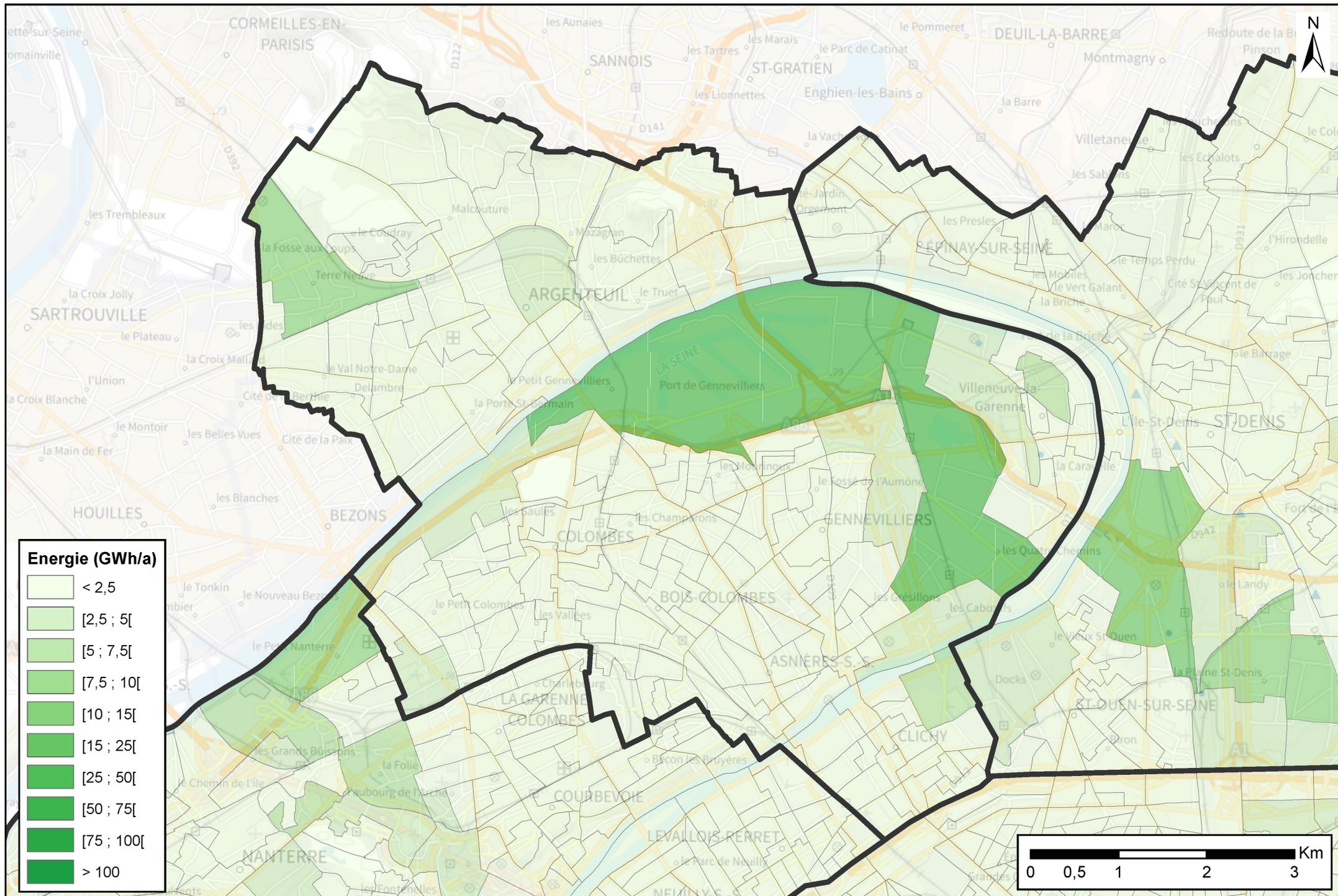
Potentiel géothermique estimé en froid

T4 Territoire Paris Ouest La Défense



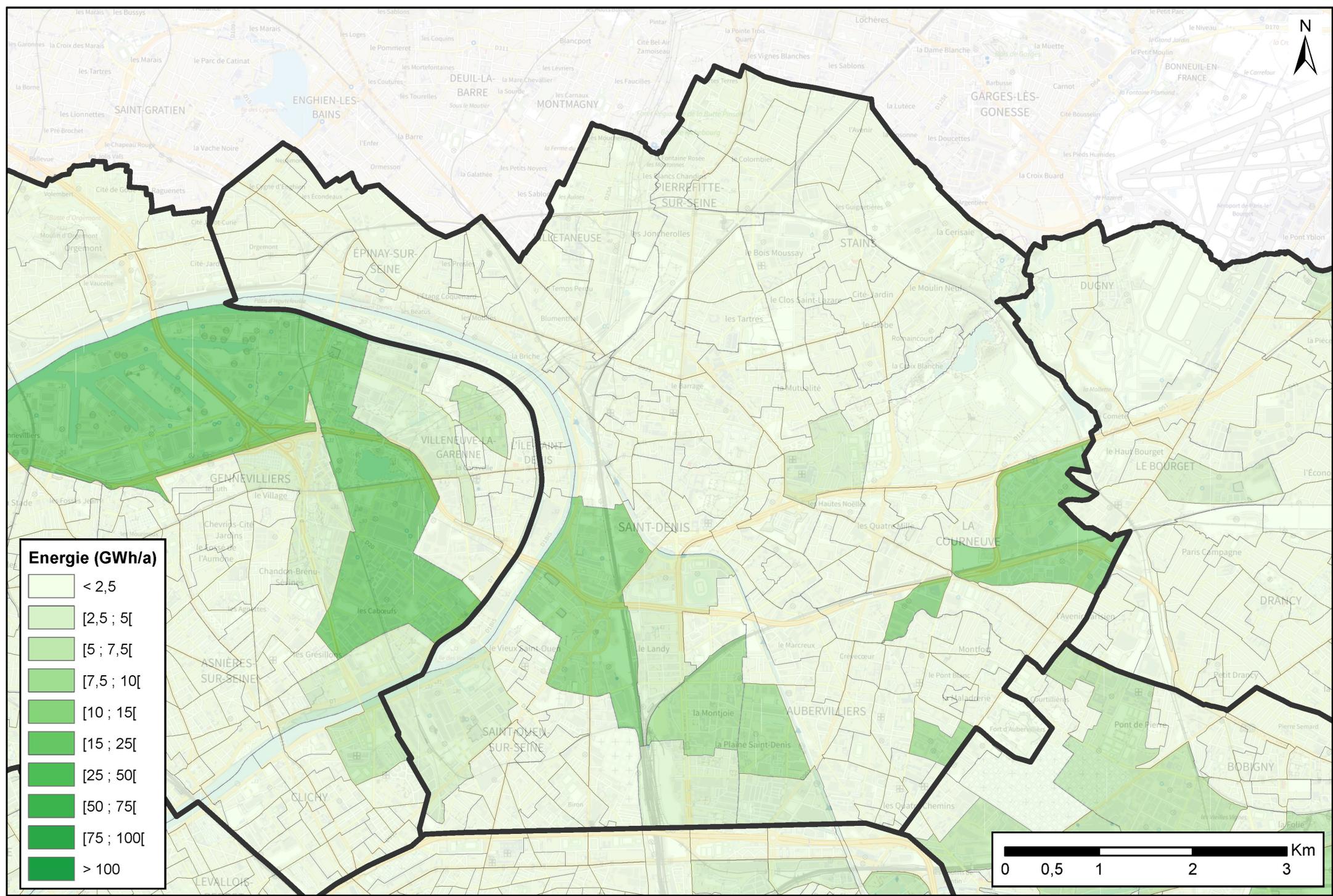
Potentiel géothermique estimé en froid

T5 Boucle Nord de Seine



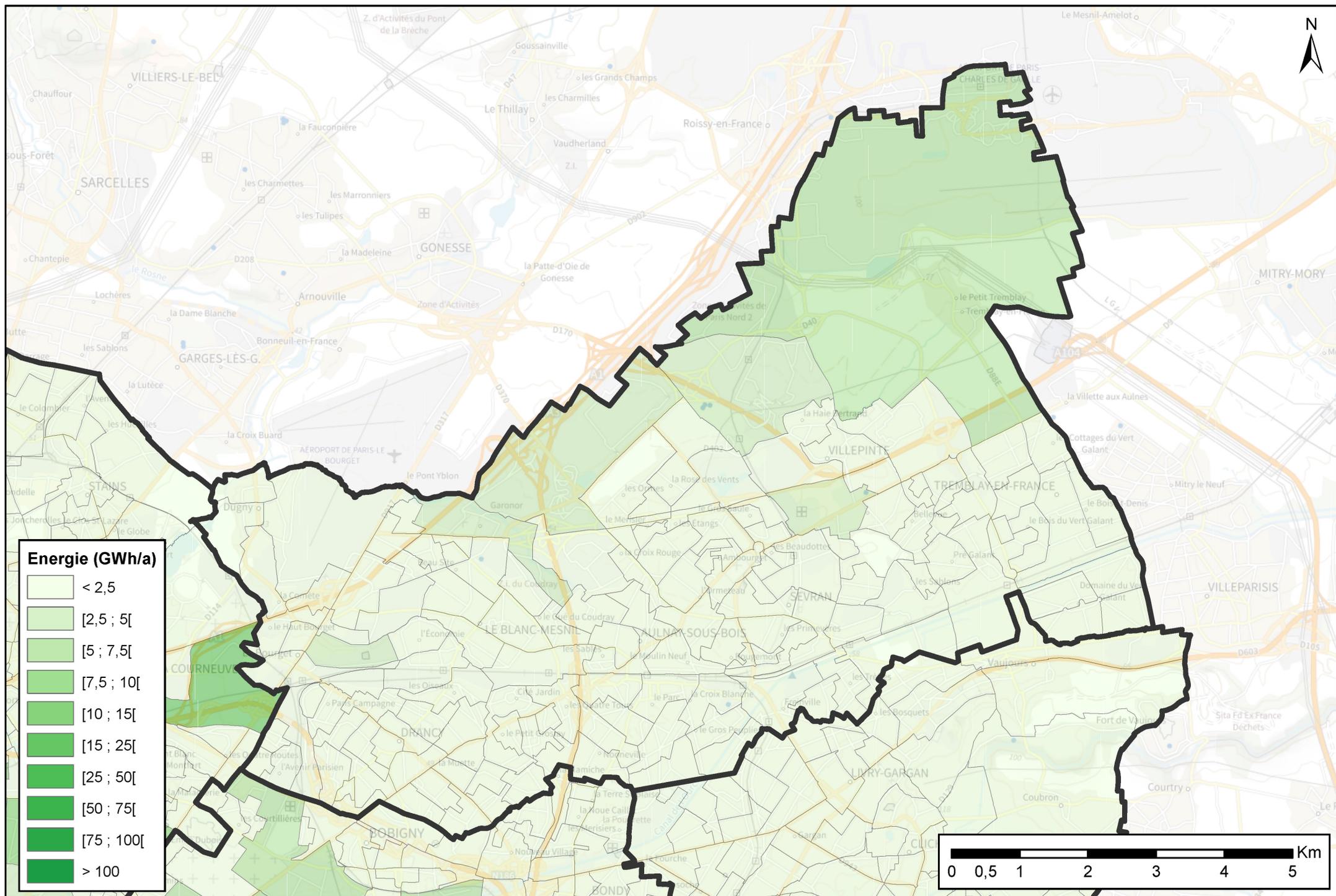
Potentiel géothermique estimé en froid

T6 Plaine Commune



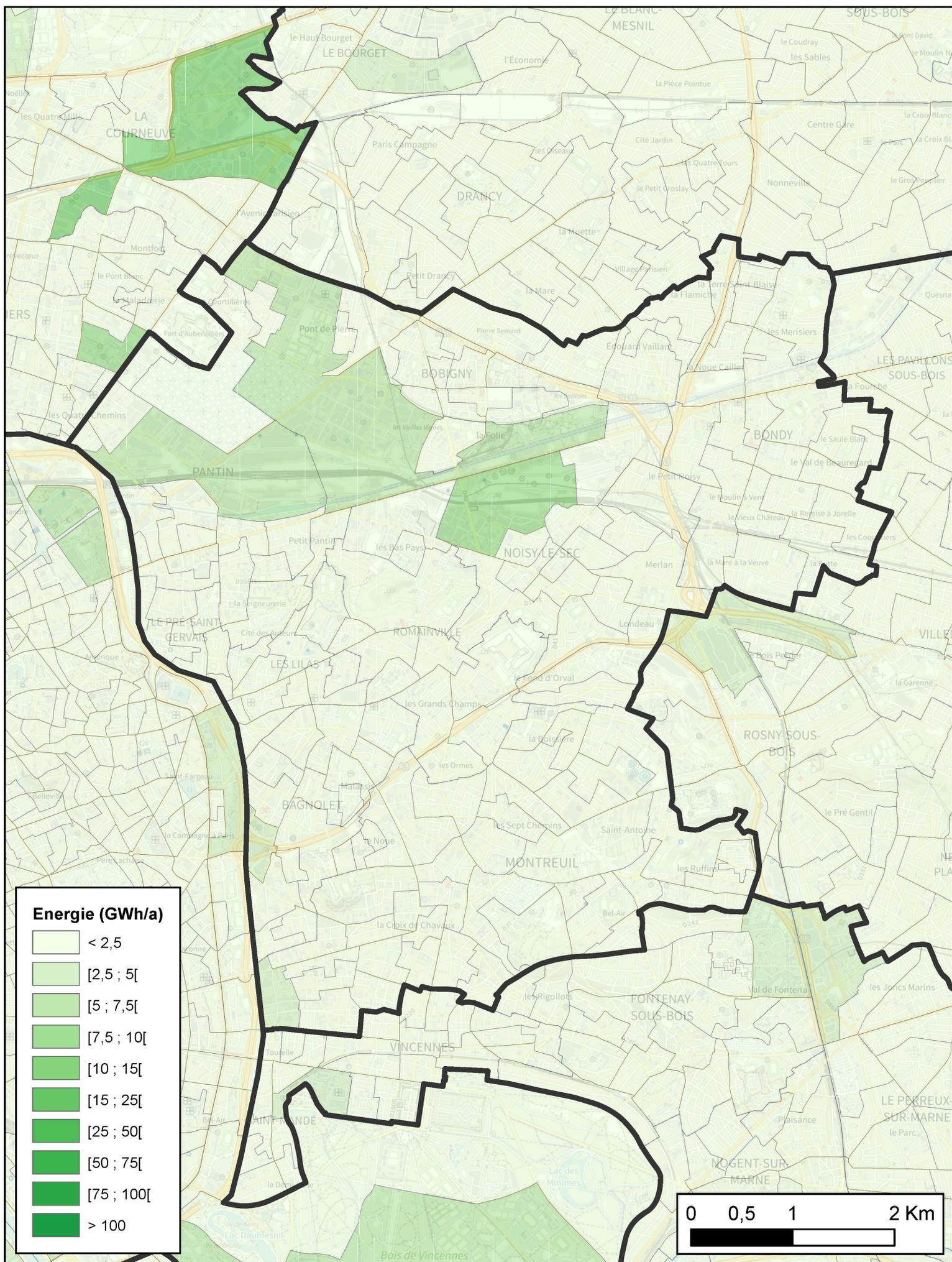
Potentiel géothermique estimé en froid

T7 Paris Terres d'Envol



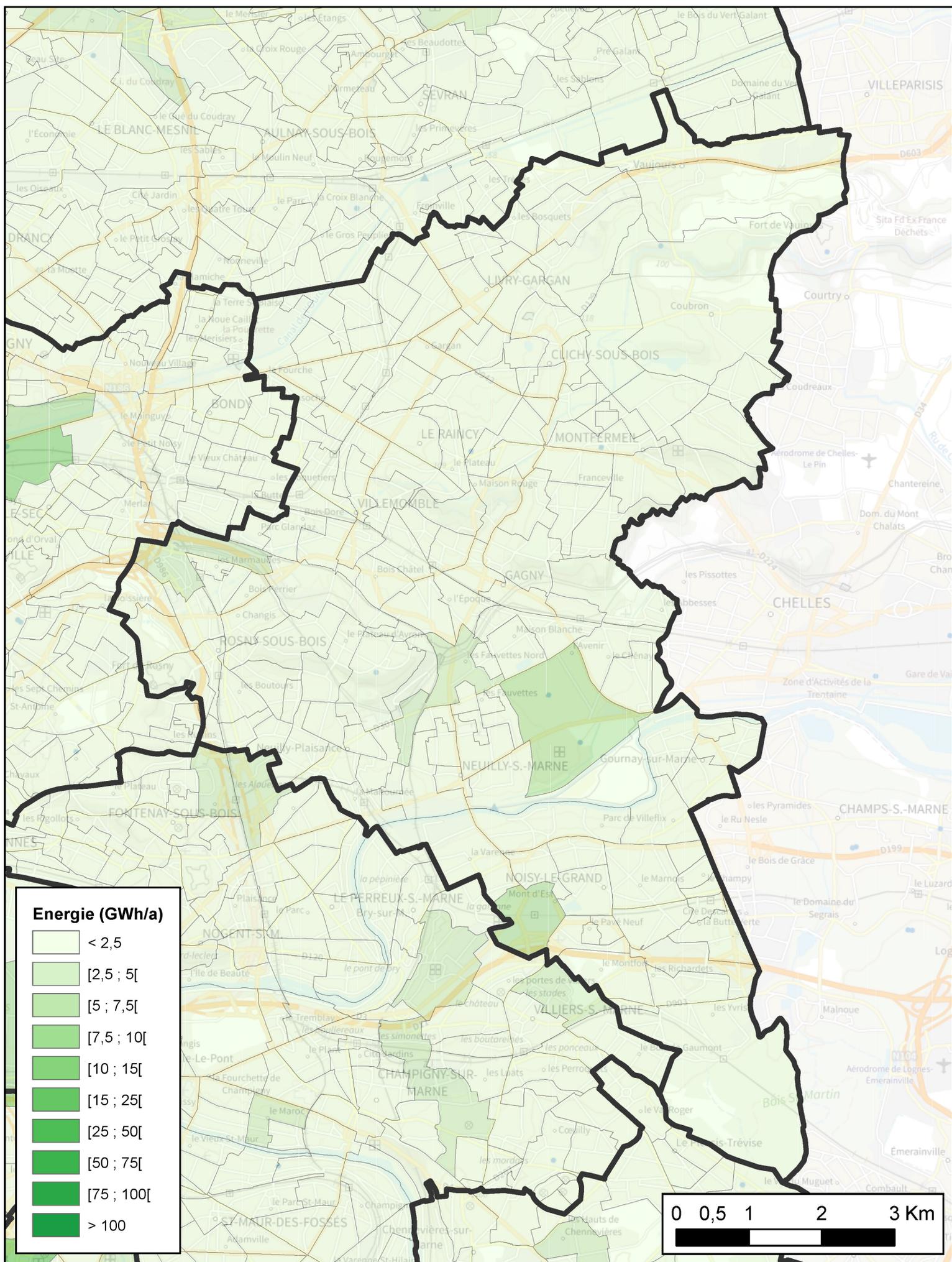
Potentiel géothermique estimé en froid

T8 Est Ensemble



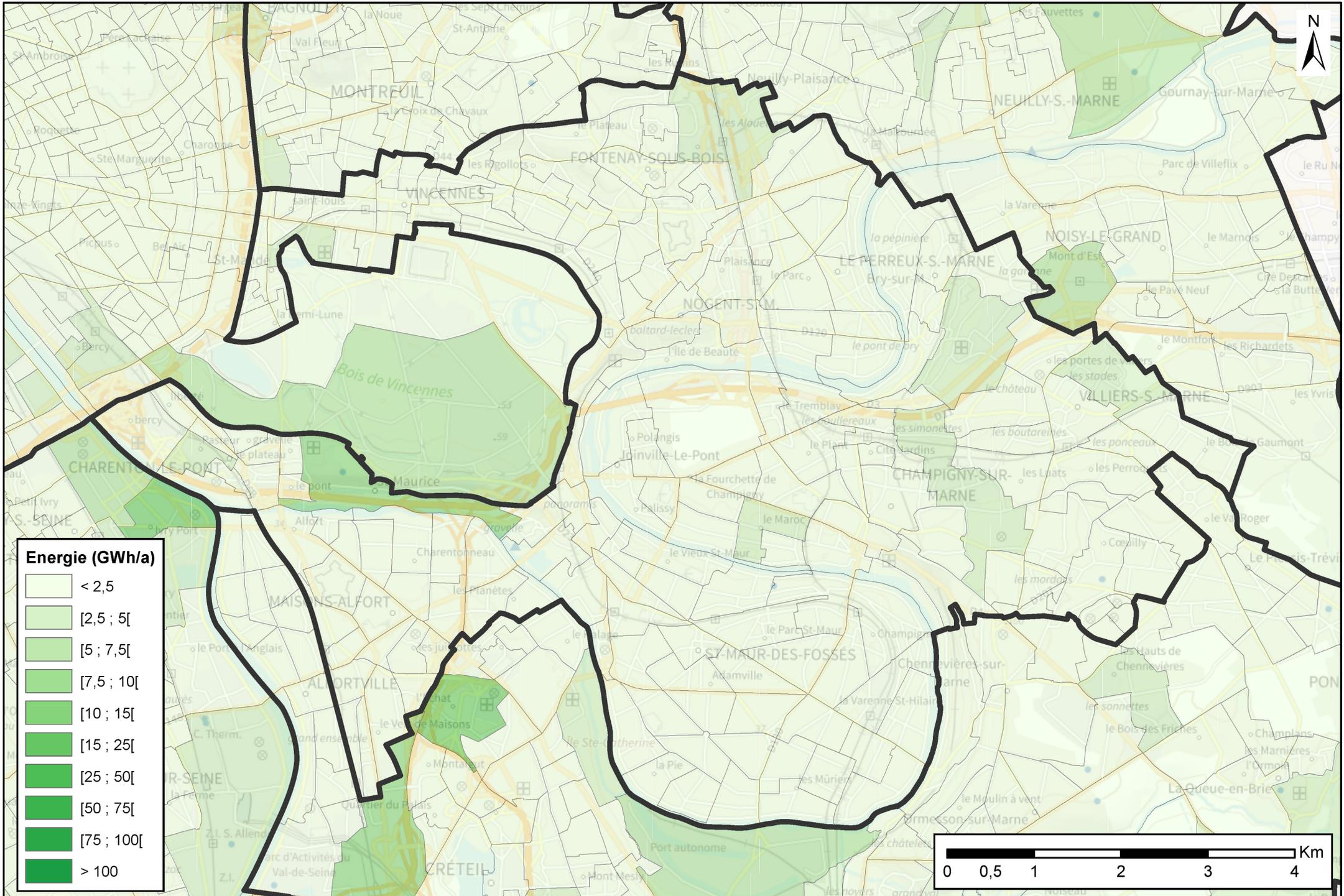
Potentiel géothermique estimé en froid

T9 Grand Paris Grand Est



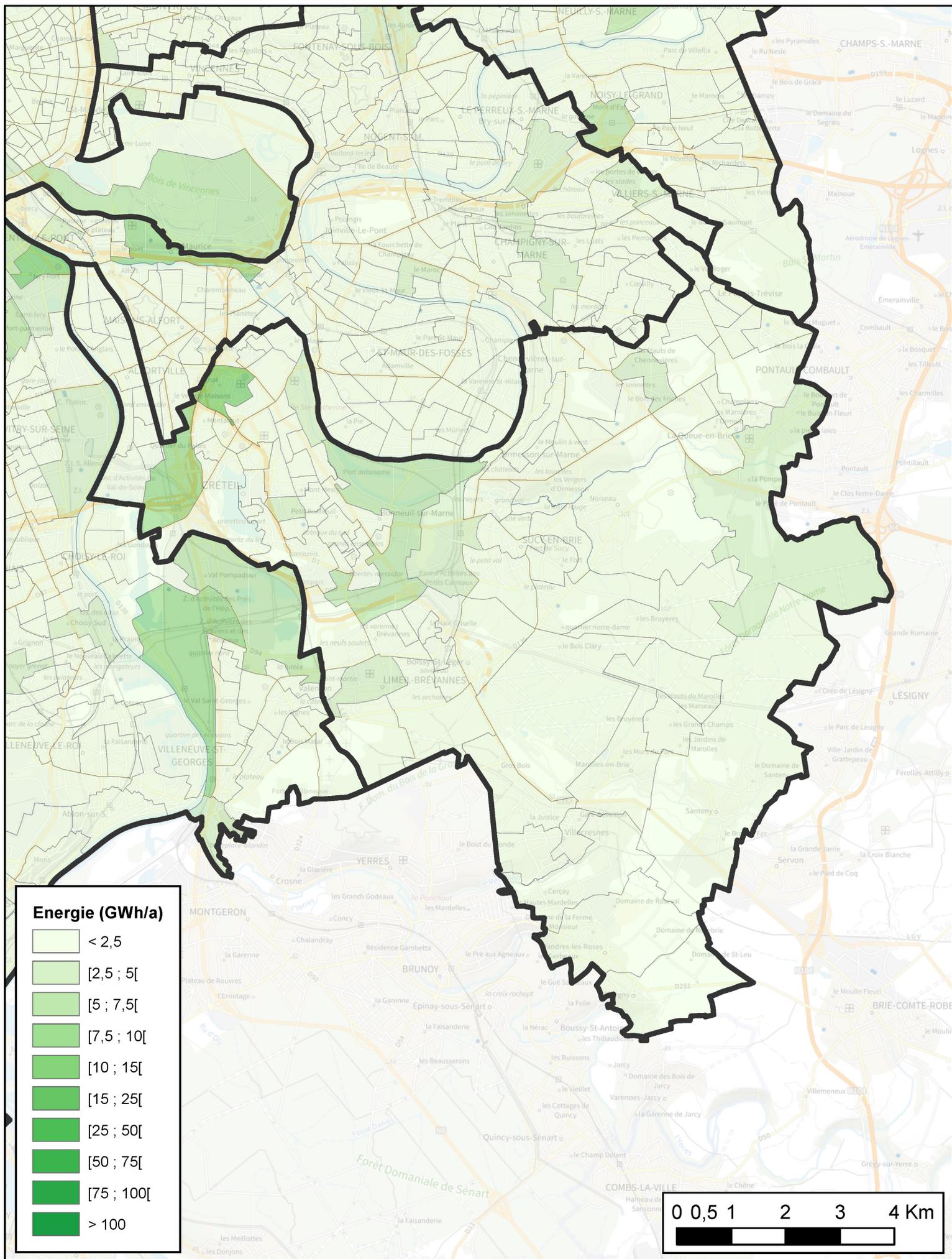
Potentiel géothermique estimé en froid

T10 Paris Est Marne et Bois



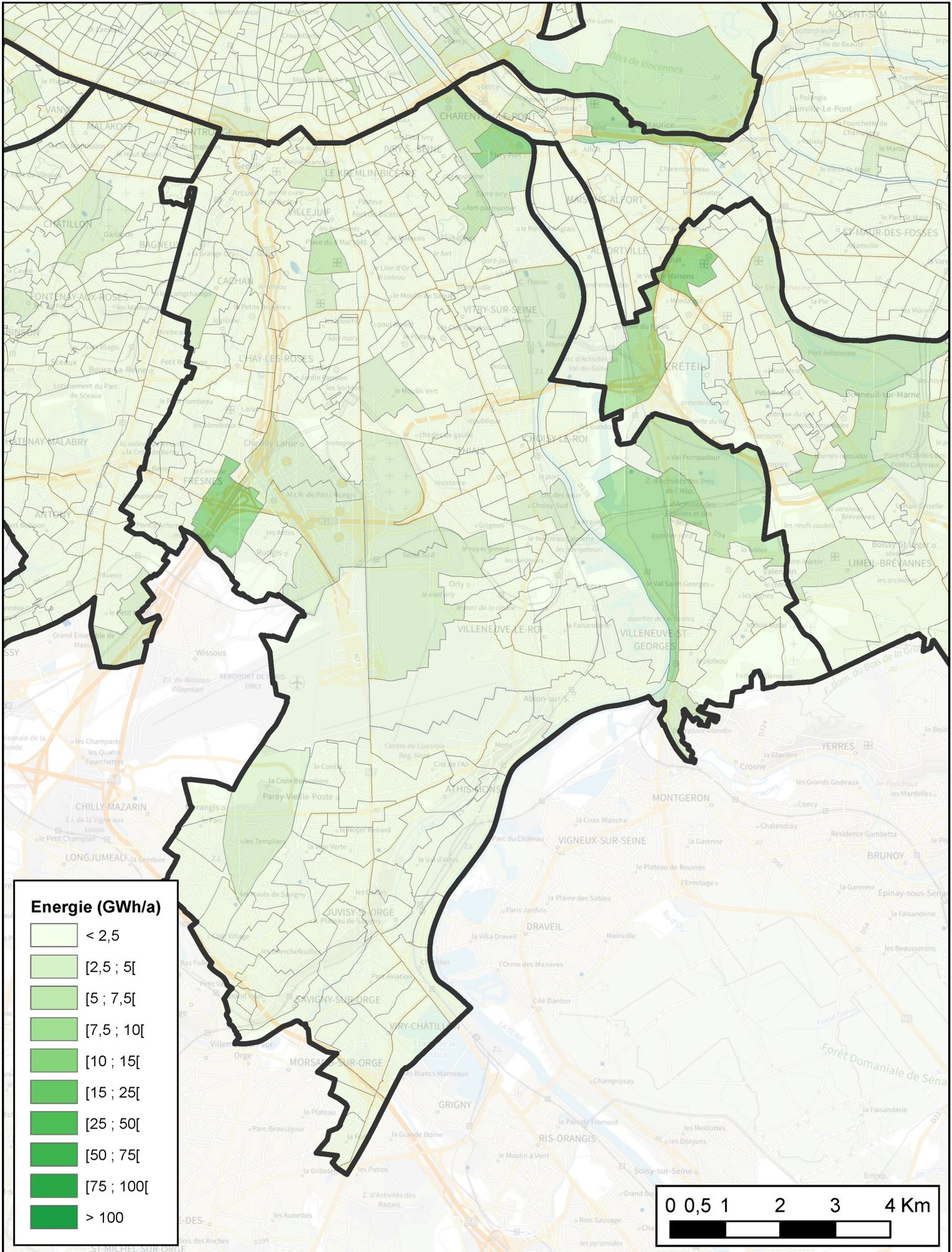
Potentiel géothermique estimé en froid

T11 Grand Paris Sud-Est Avenir



Potentiel géothermique estimé en froid

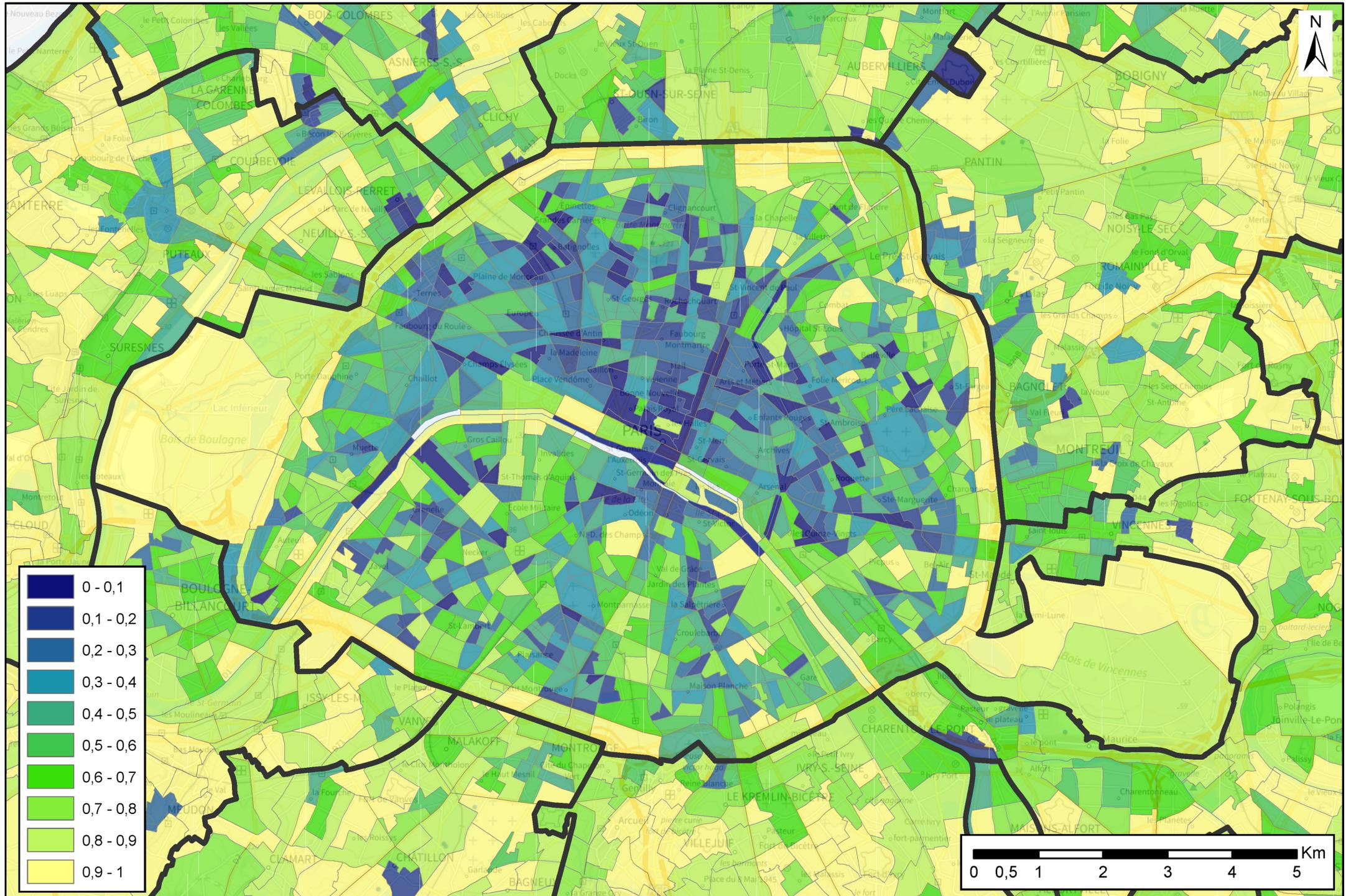
T12 Grand-Orly Val-de-Bièvre Seine-Amont



Annexe 5 Taux de couverture par EPT - Froid

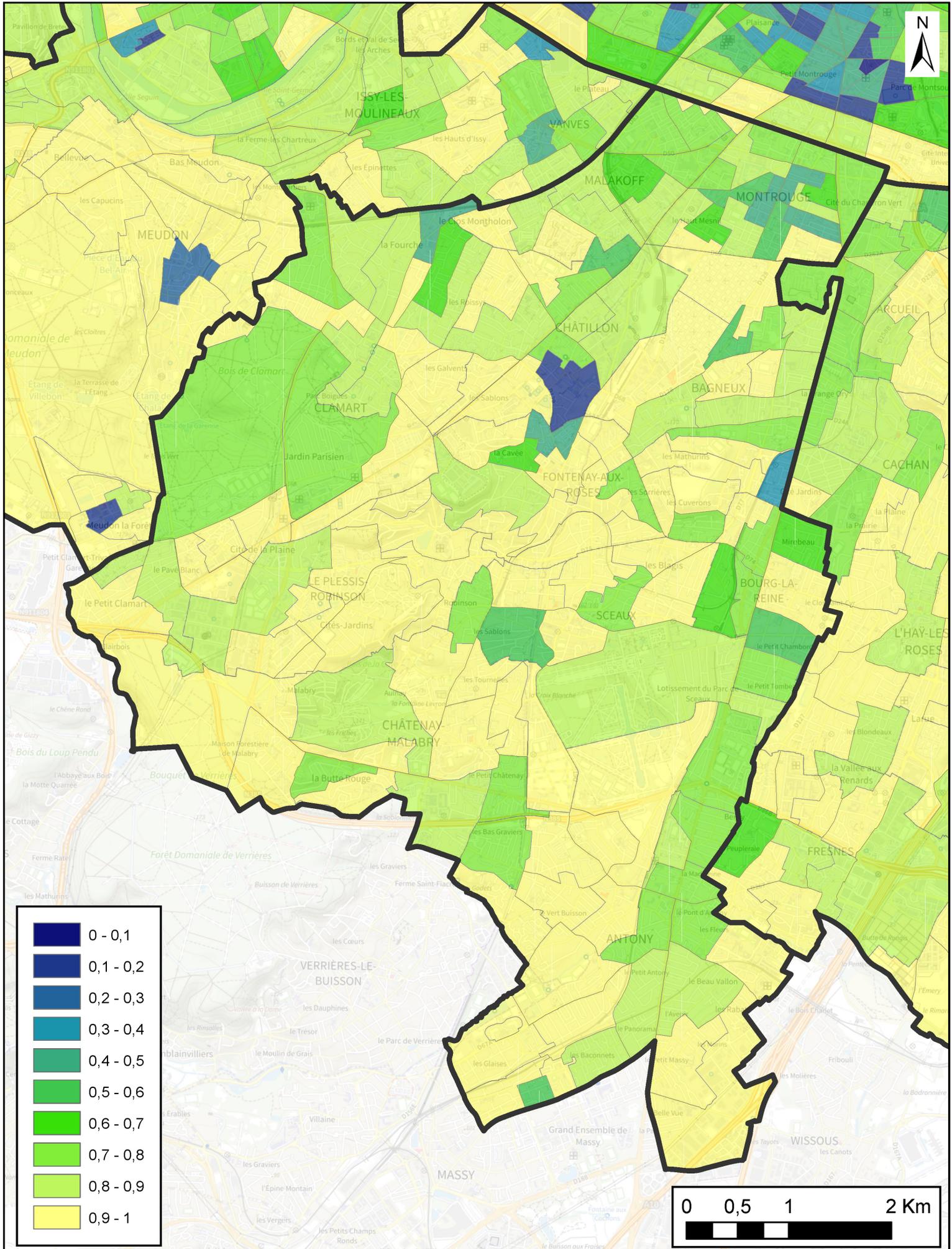
Taux de couverture des besoins en froid

T1 Paris



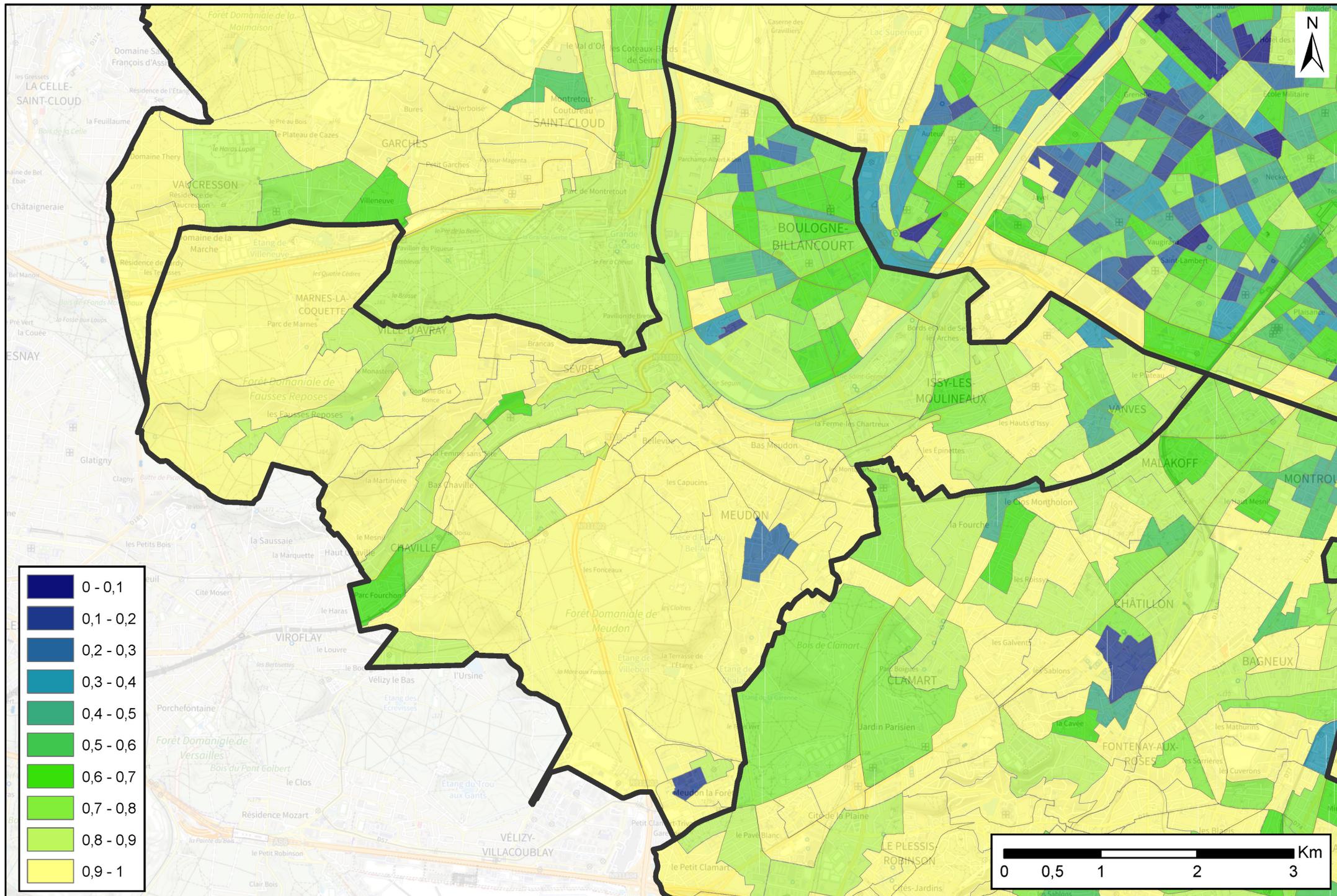
Taux de couverture des besoins en froid

T2 Territoire Vallée Sud-Grand Paris



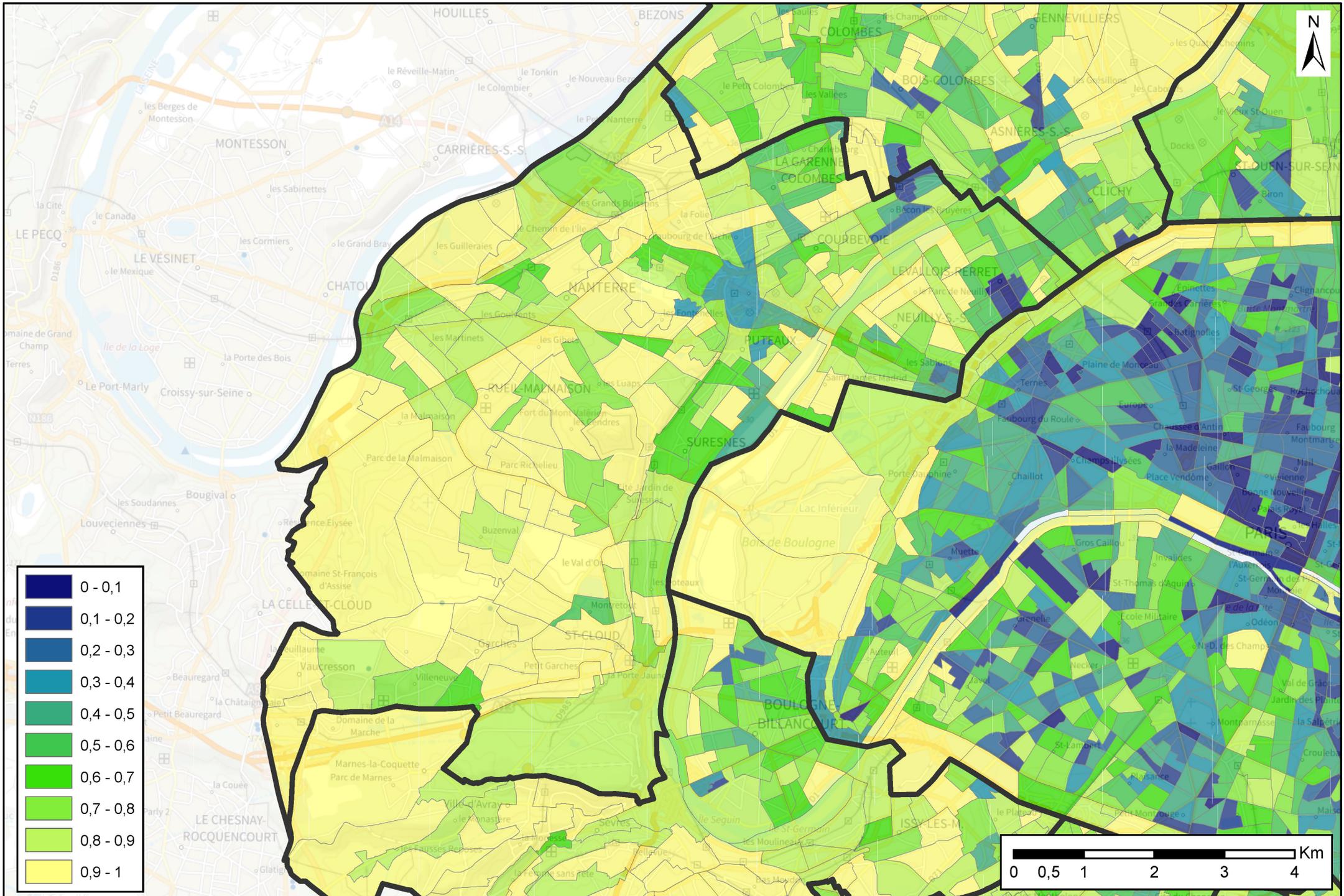
Taux de couverture des besoins en froid

T3 Grand Paris Seine Ouest



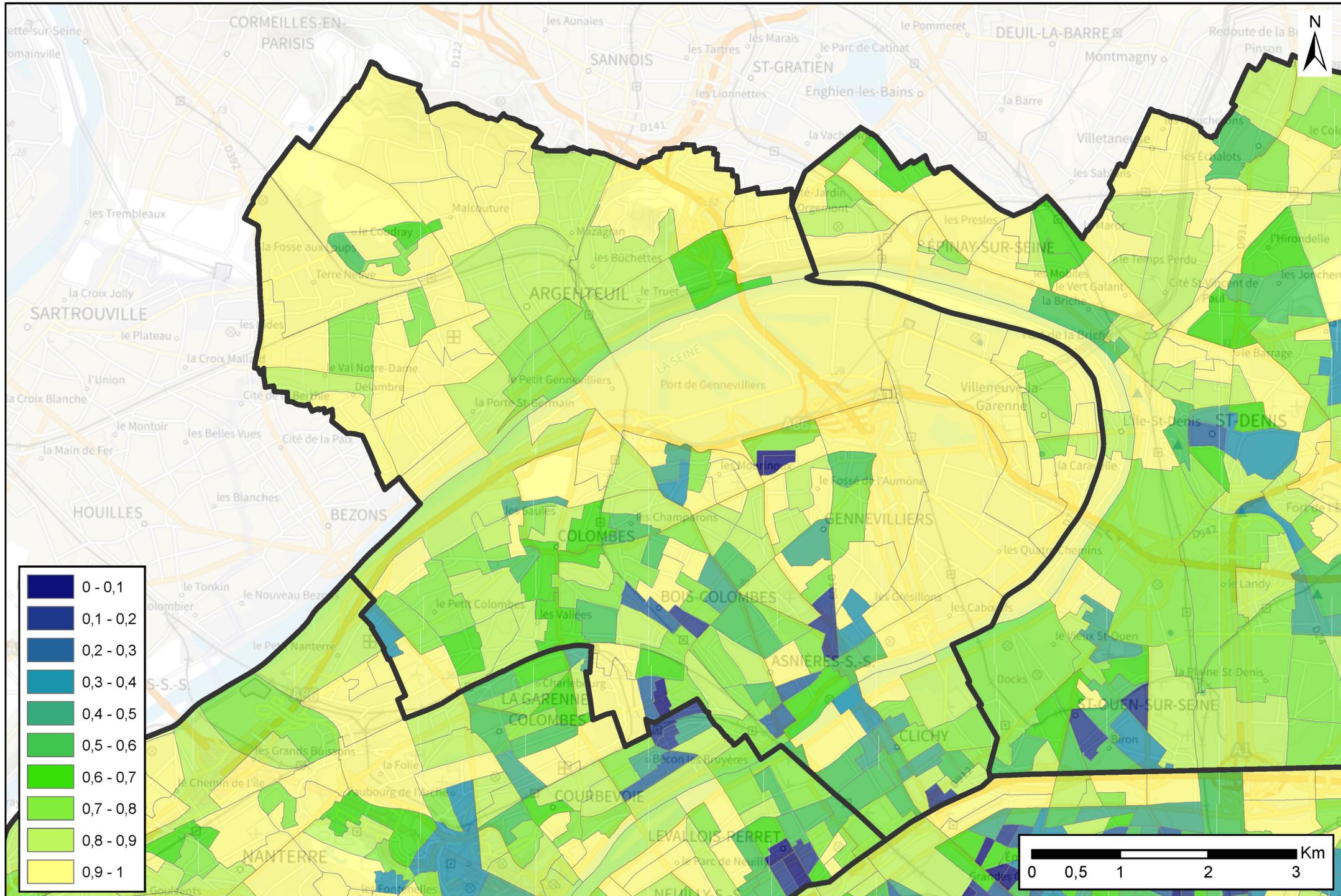
Taux de couverture des besoins en froid

T4 Territoire Paris Ouest La Défense



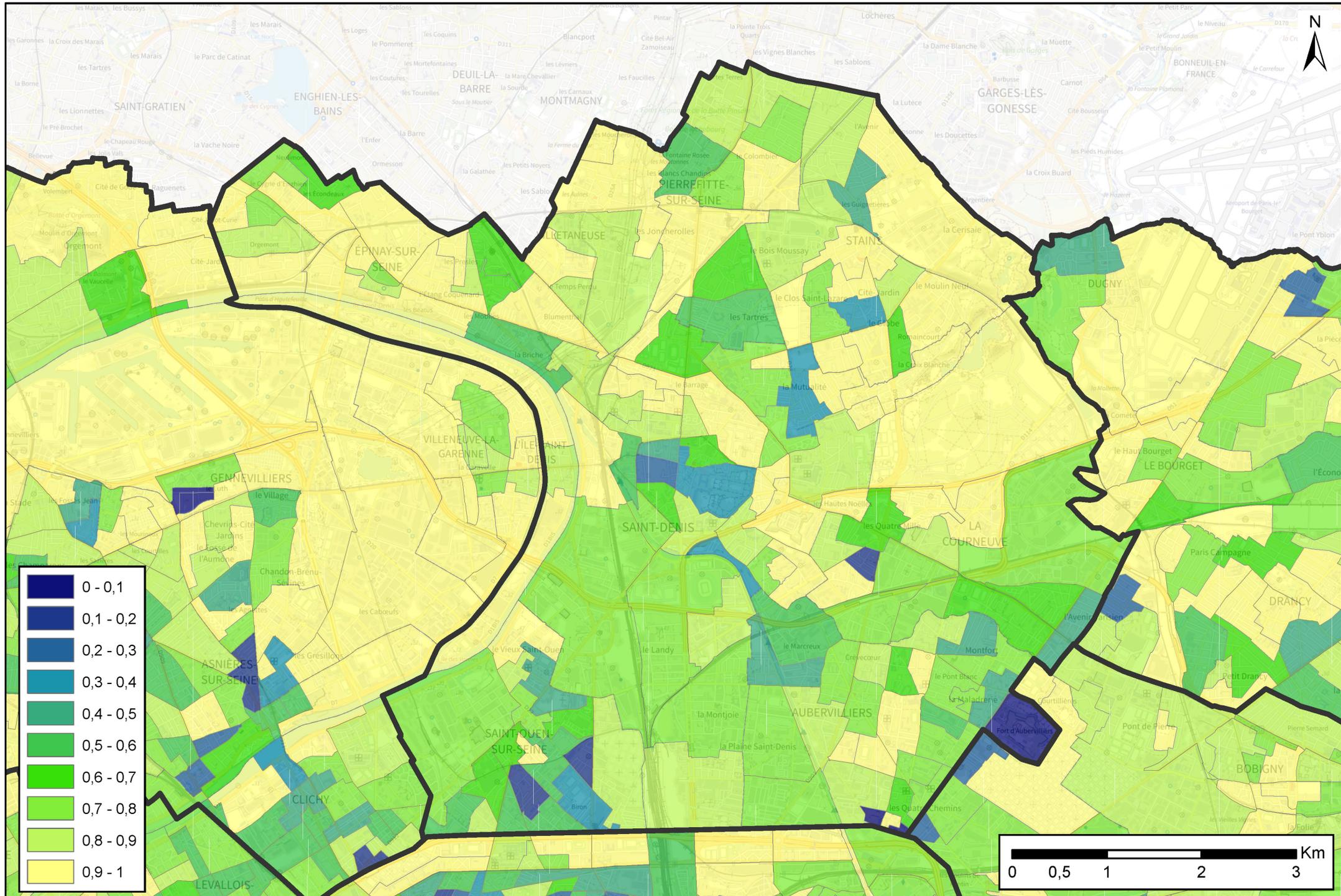
Taux de couverture des besoins en froid

T5 Boucle Nord de Seine



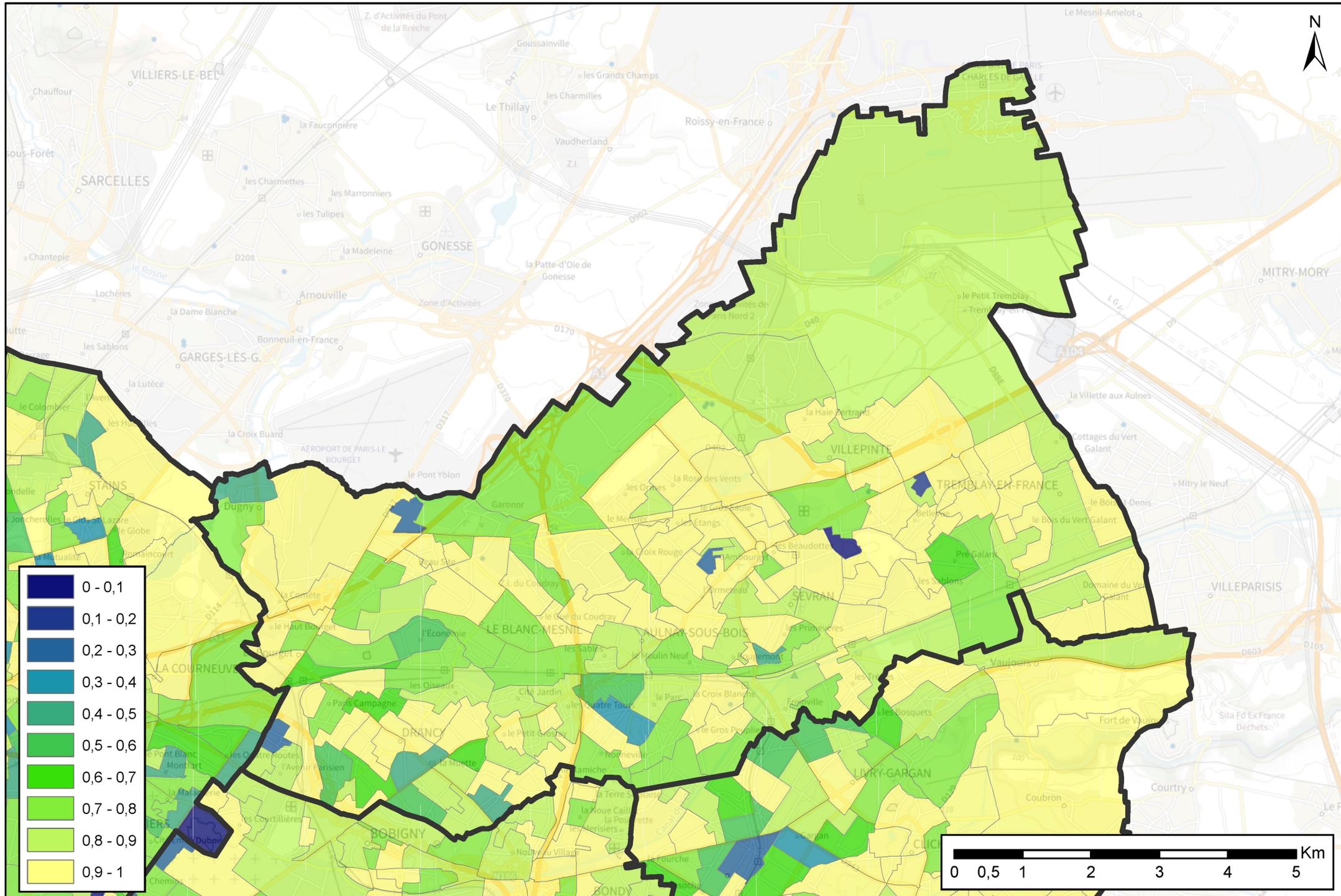
Taux de couverture des besoins en froid

T6 Plaine Commune



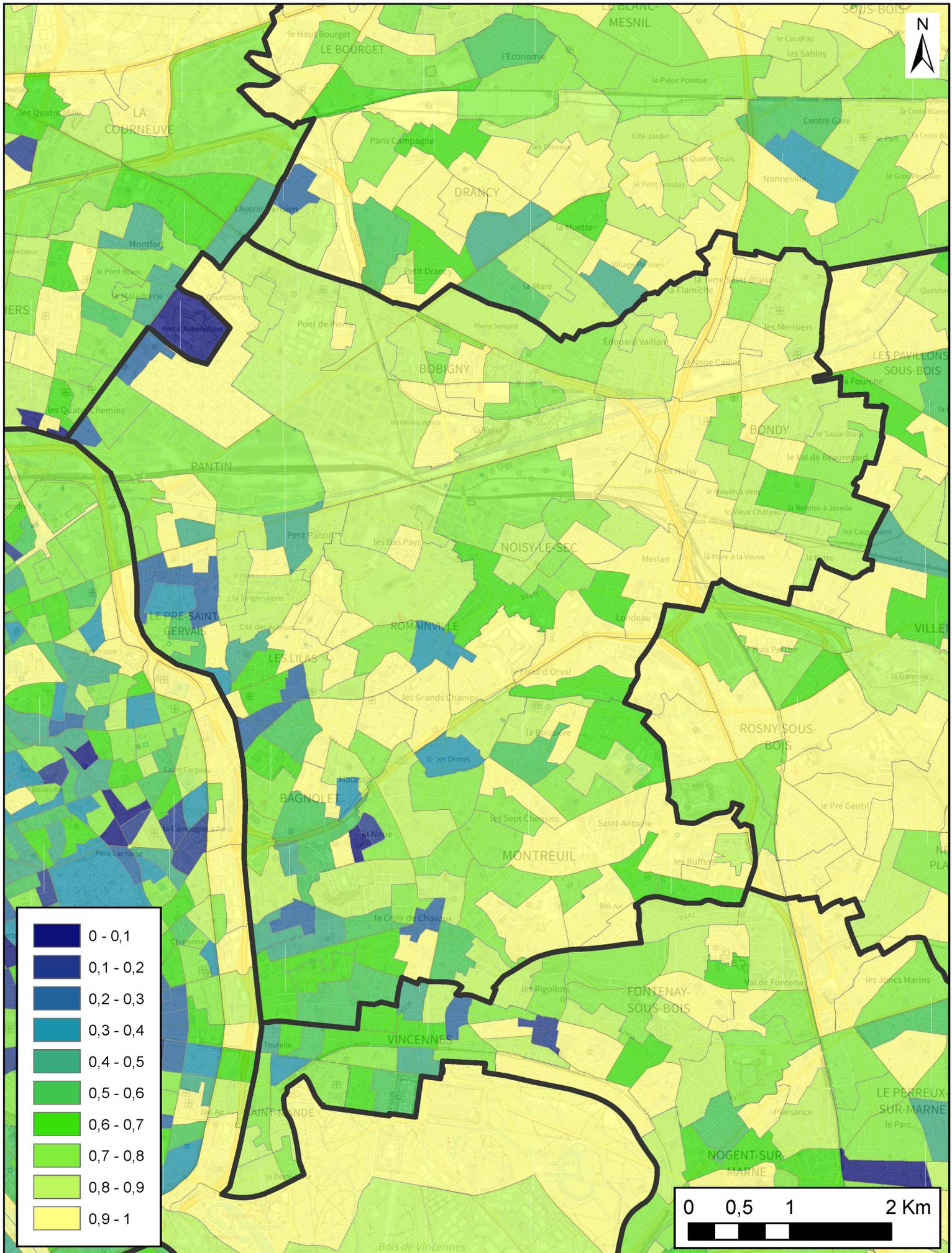
Taux de couverture des besoins en froid

T7 Paris Terres d'Envol



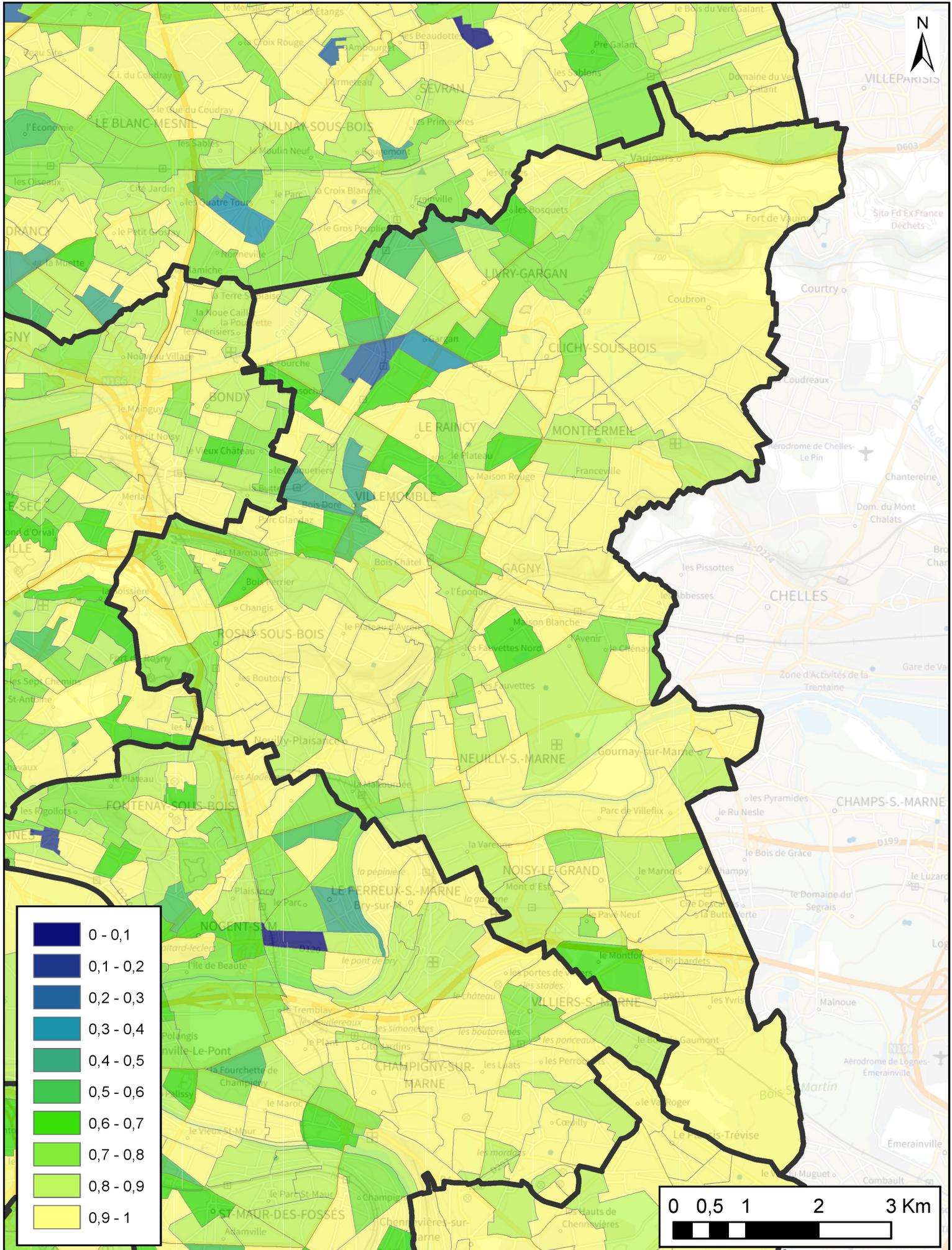
Taux de couverture des besoins en froid

T8 Est Ensemble



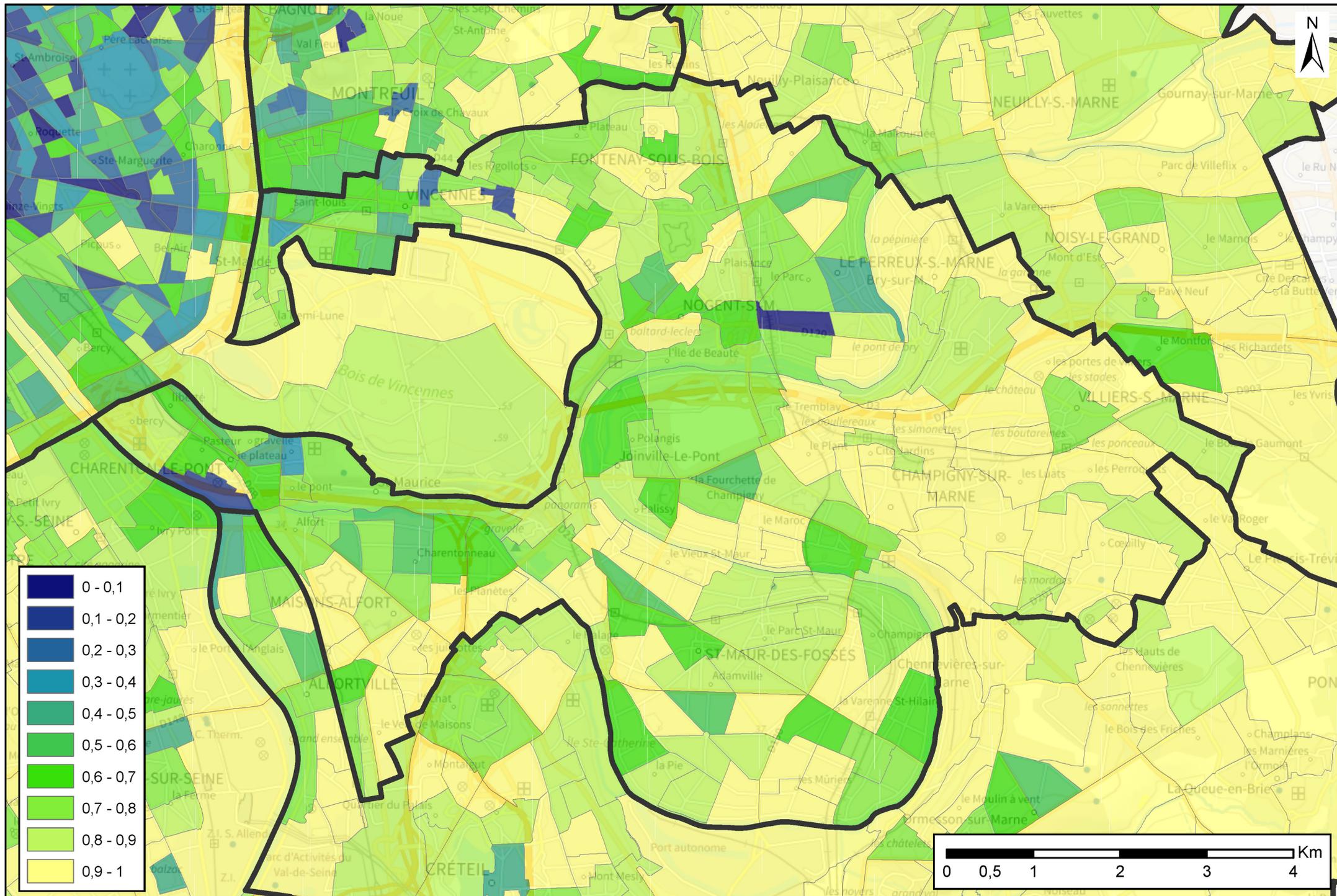
Taux de couverture des besoins en froid

T9 Grand Paris Grand Est



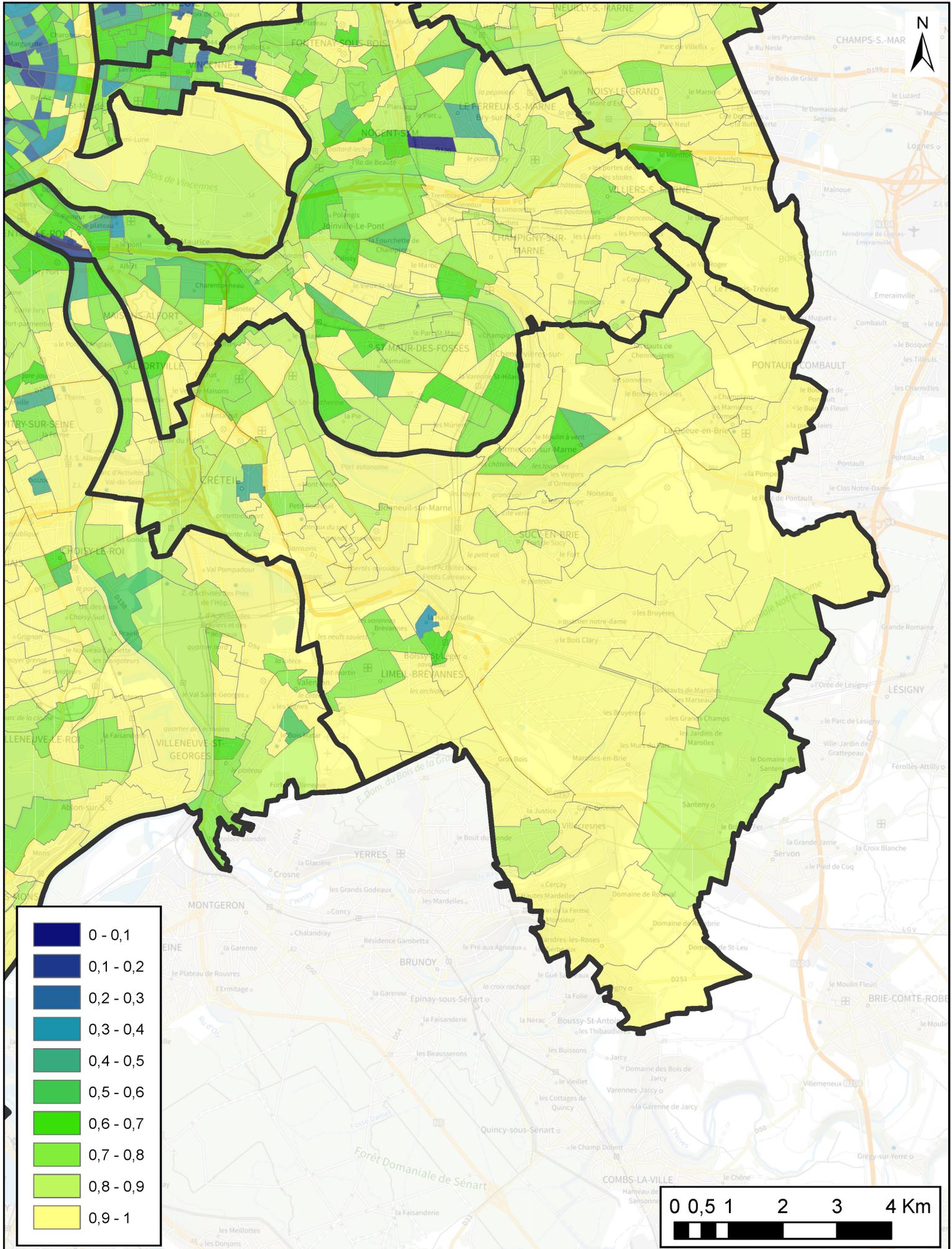
Taux de couverture des besoins en froid

T10 Paris Est Marne et Bois



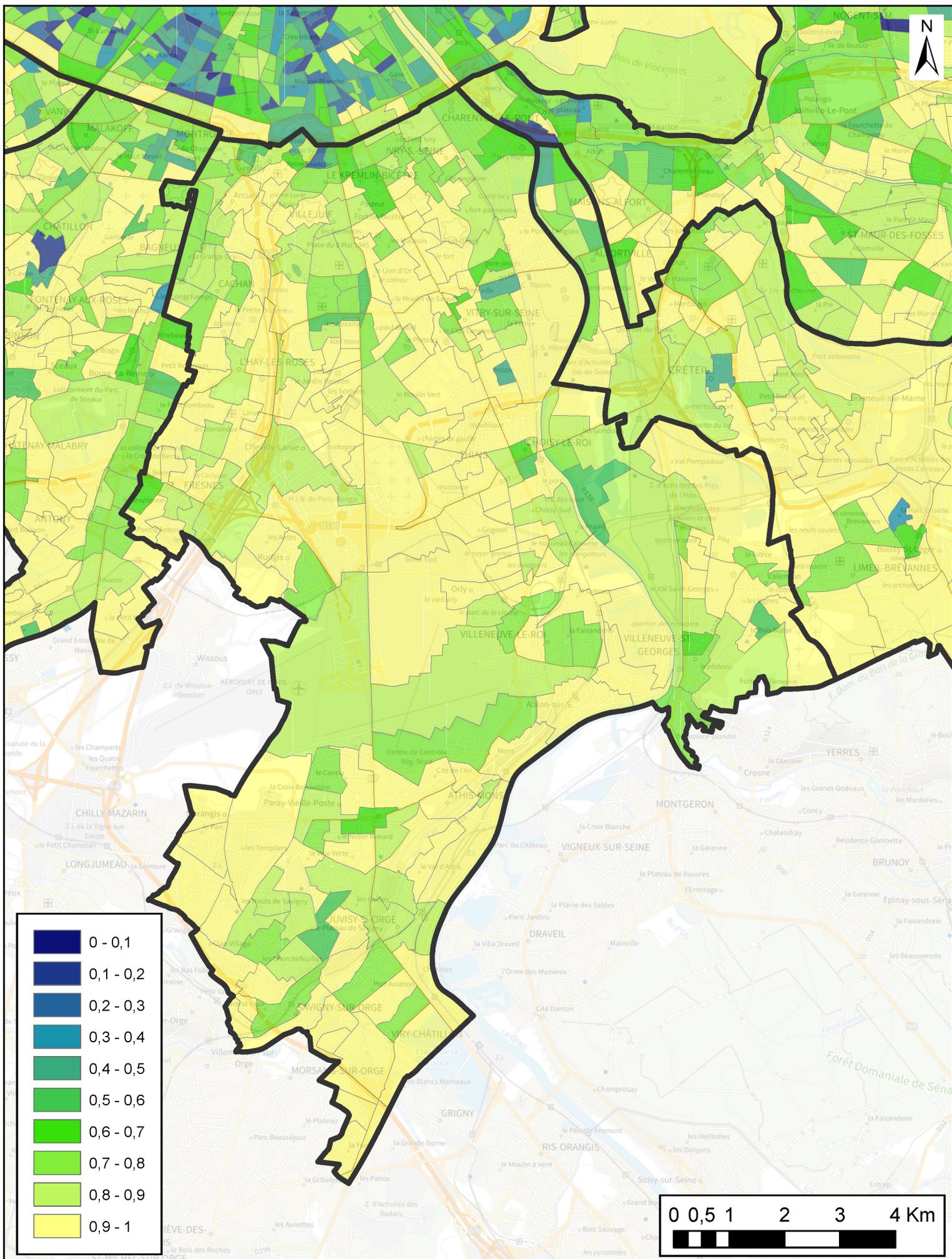
Taux de couverture des besoins en froid

T11 Grand Paris Sud-Est Avenir



Taux de couverture des besoins en froid

T12 Grand-Orly Val-de-Bièvre Seine-Amont





**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale ou UTAM

Adresse

Tél. :

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm