

# Cartographie du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire d'Orléans Métropole

Rapport final

BRGM/RP-70449-FR Janvier 2021

90 3740 46 -625







# Cartographie du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire d'Orléans Métropole

Rapport final

BRGM/RP-70449-FR

Janvier 2021

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

> Maragna C., Maurel C. Avec la collaboration de D. Salquèbre, T. Klinka

#### Vérificateur:

Nom : Mikael PHILIPPE

Fonction : Responsable de l'unité Géothermies et Stockage d'Energie

Date: 18/12/2020

Signature:

Approbateur:

Nom: Alain SAADA

Fonction: Directeur Régional CVL

Date: 19/12/2020

Signature:

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

Contact: qualite@brgm.fr





Mots-clés :
En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :  Maragna C., Maurel C. (2020) – Cartographie du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire
d'Orléans Métropole. Rapport final. BRGM/RP- 70449 -FR, 109 p., 80 fig, 3 Annexes.
© BRGM, <b>2020</b> , ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

### **Synthèse**

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du marché M18348G entre Orléans Métropole et le BRGM. Il s'agit d'un rapport présentant la cartographie du potentiel de la géothermie de surface sur le territoire d'Orléans Métropole (Tâche 1.1 du marché).

L'étude vise à établir une cartographie du potentiel de développement de la géothermie de surface (0 - 200 m de profondeur) en croisant besoins énergétiques de surface, propriétés géologiques et hydrogéologiques des terrains traversés, contraintes réglementaires et d'implantation. Plus spécifiquement, les éléments suivants ont été estimés :

- La contribution des sondes géothermiques verticales pour couvrir les besoins énergétiques existants au sein de chaque maille IRIS (Îlot Regroupé pour l'Information Statistique);
- Un nombre théorique maximal de doublets sur aquifères pour couvrir ces mêmes besoins :
- Au sein de chaque IRIS et sur chaque zone à urbaniser pour de l'habitat, l'épaisseur de zones meubles propices à l'implantation d'échangeurs géothermiques horizontaux ou de corbeilles.

L'étude du potentiel géothermique ne peut se substituer à une étude géologique, hydrogéologique et géochimique détaillée dans les secteurs identifiés pour le développement de la ressource.

Le bureau d'études ARTELYS a estimé pour le compte de la Métropole les besoins énergétiques en chauffage, eau chaude sanitaire et froid à la maille IRIS, pour un total de 2635 GWh/a. La métropole est découpée en 117 IRIS. La géothermie de surface exploitant une ressource locale, une méthodologie a dû être mise au point pour ventiler ces besoins au sein des IRIS en s'appuyant sur la cartographie d'occupation des sols établies par la Métropole, ce qui aboutit en un découpage en 536 zones sur lesquels les consommations sont supposées homogènes (cf. Tableau 1)

Tableau 1 : Résultat du croisement entre urbanisme et énergie

Tissus	Chauffage [MWh/a]	Eau chaude sanitaire [MWh/a]	Climatisation [MWh/a]
1.1 (Tissu urbain mixte)	1140,78	158,50	0,00
1.2 (Lotissement pavillonnaire)	184,98	24,01	0,00
1.3 (Grands Ensembles collectifs)	280,22	48,34	0,00
2.1 (Equipement urbain / Grand établissement)	379,34	52,89	38,42
3.1 (Zone d'activités)	171,83	36,22	31,11
3.2 (Zone commerciale)	44,78	8,98	7,57
TOTAL	2201,93	328,93	77,11

En ce qui concerne la réglementation, les principales conclusions sont :

- Du point de vue de la géothermie de minime importance, l'ensemble du territoire est classé en vert (régime déclaratif) ou orange (soumis à avis d'expert) :
- Pour le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) Val Dhuy-Loiret et sur le SAGE nappe de Beauce, la géothermie est autorisée en boucle ouverte avec réinjection des eaux produites dans le même horizon aquifère et en boucle fermée. Les opérations doivent être conformes à la réglementation et aux normes relatives à la réalisation et à l'exploitation de la ressource ainsi qu'aux objectifs du SAGE;
- Pour les nappes à réserver à l'alimentation en eau potable (NAEP), la géothermie est autorisée en boucle ouverte (doublet sur nappe) et en boucle fermée. L'Agence Régionale de Santé (ARS) recommande de limiter le nombre de forages réalisés dans ces zones et ainsi de privilégier les doublets géothermiques pour limiter les risques de pollutions des nappes NAEP;
- Enfin, le régime de réglementation GMI ne s'applique pas dans les périmètres de protection immédiate (PPI) et rapprochée (PPR) des captages d'eau. La procédure pour les nouveaux projets dans les PPR sera donc de déposer une demande d'exploitation de la ressource. Dans les périmètres de protection éloignés, il est nécessaire de considérer les recommandations ou prescriptions se trouvant dans les DUP.

Du point de vue géologique et hydrogéologique, la cible principale pour les opérations sur aquifères correspond aux calcaires de Beauce et ses deux assises : le Calcaire de Pithiviers et le Calcaire d'Etampes qui sont les formations les plus productives dans le secteur.

Les données collectées ont permis d'estimer la piézométrie et les propriétés hydrodynamiques et thermiques du sous-sol. Ces informations ont été utilisées pour la quantification du potentiel énergétique de la ressource. La quantité d'information disponible et exploitée est tout de même limitée sur le territoire puisque l'on dispose de peu d'essais de pompage et de trois test de réponse thermique. Il n'y a également pas de modèle géologique ou hydrogéologique représentatif à l'échelle de la métropole. Cependant, d'après la connaissance régionale et locale du sous-sol, les calcaires de Beauce ont une très bonne productivité sur l'ensemble de la métropole Orléanaise et les écoulements naturels y affectent significativement le panache de température autour des doublets, et potentiellement aussi autour des sondes géothermiques verticales. De nombreuses opérations en fonctionnement ont été recensées et attestent du potentiel de développement de la ressource aussi bien sur sonde que sur aquifère.

Un doublet a été modélisé afin d'appréhender la morphologie du panache de température autour de l'exploitation pour différentes conditions de fonctionnement, différentes propriétés hydrodynamiques et différentes configurations géométriques de l'aquifère. Cette approche a permis de prendre en considération les incertitudes associées aux propriétés du sous-sol *via* une étude paramétrique et d'identifier l'évolution du champ de température de la zone impactée autour de l'exploitation pour un grand nombre de configurations. La méthode appliquée n'a pas pour objectif de modéliser fidèlement l'impact des exploitations sur le sous-sol en tout point de la métropole mais de quantifier la variabilité des réponses possibles. Pour chaque maille IRIS, un nombre maximal d'implantations de doublet a été estimé. Les quantités de chaleur, de froid et d'eau chaude sanitaire ainsi potentiellement couvertes par géothermie sur nappe ont été évaluées.

Un croisement avec la carte des besoins énergétiques montre que des doublets au calcaire de Pithiviers pourraient couvrir 25 à 30 % des besoins énergétiques de la métropole. Le calcaire d'Etampes pourrait couvrir de l'ordre de 30 à 40 % de ces besoins.

Une méthode a été développée pour estimer un potentiel d'énergie mobilisable pour les sondes géothermiques verticales en croisant caractéristiques thermiques du terrain, foncier disponible, et besoin identifié en surface. Le résultat donne une indication de gisement à la maille IRIS, sur la base du besoin existant, qui ne peut se substituer au dimensionnement d'une installation. On estime que 58 % des 2544,0 GWh/a de besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire de la métropole pourraient être couverts par des sondes profondes de 100 m, et 73 % par des sondes profondes de 200 m (cf. Tableau 2).

Il faut noter que les 4 potentiels (deux sur aquifère, deux sur sondes) ne peuvent s'additionner directement. En effet, les deux aquifères des calcaires d'Etampes et de Pithiviers sont proches et interagiraient thermiquement en cas d'exploitation simultanée, et les sondes géothermiques verticales traversent les deux aquifères. Il s'agit plutôt d'indications qu'un panel d'échangeurs géothermiques permet de couvrir une partie significative des besoins du bâti de la métropole. Par ailleurs, au sein de chaque IRIS, la fraction de la superficie de lotissement pavillonnaire et de tissu urbain mixte favorable à l'implantation d'échangeurs de très proche surface (corbeilles, échangeurs plans) a aussi été estimée.

Tableau 2. Synthèse du potentiel géothermique sur Orléans métropole par typologie d'échangeur pour un besoin de chauffage et d'eau chaude sanitaire de 2544 GWh/a (n.b. hypothèse du COP de la PAC : 4 pour les sondes géothermiques ; 4,3 pour les doublets sur aquifères)

Type d'échangeur	Sonde de 100 m	Sonde de 200 m	Doublet sur nappe au calcaire de Pithiviers	Doublet sur nappe au calcaire d'Etampes
Potentiel énergétique total (couverture des besoins)	1519 GWh/a (58%)	1914 GWh/a (73%)	723 GWh/a (25 à 30%)	992 GWh/a (30 à 40%)
Potentiel énergétique en remplacement de chaudière gaz et fioul	705 GWh/a (28%)	891 GWh/a (35%)	331 GWh/a (13 %)	459 GWh/a (18 %)

## **Sommaire**

1. Introduction	15
1.1. TECHNOLOGIES D'EXPLOITATION DE LA RESSOURCE GEOTHERMALE	E 15
1.2. OBJET DE L'ETUDE	19
2. Evaluation des besoins énergétiques d'Orléans métropole	21
2.1. DONNEES DISPONIBLES  2.1.1. Besoins énergétiques	21
3. Cadre réglementaire pour le développement de la géothermie	25
3.1. LES REGLEMENTATIONS LIEES A LA GEOTHERMIE DE SURFACE  3.1.1. Les textes de loi définissant la géothermie de minime importance  3.1.2. Les procédures réglementaires et règles de positionnement des échan relevant de la GMI	25 ngeurs 28
3.2. REGLEMENTATIONS LIEES A LA GESTION DES EAUX ET AUX USAGES SOL 31  3.2.1. SDAGE et SAGE	31
3.3. SERVITUDE D'UTILITE PUBLIQUE OU RESTRICTION D'USAGE	37
3.4. PERIMETRES DE PROTECTION DES STOCKAGES SOUTERRAINS DE G D'HYDROCARBURES OU PRODUITS CHIMIQUES (CADRE DU LIVRE II I MINIER)	OU CODE
3.5. PLANS DE PREVENTION DES RISQUES  3.5.1. Plan de prévention des risques d'inondation  3.5.2. Plan de prévention des risques technologiques (PPRT)  3.5.3. Plan de prévention des risques de mouvement de terrain (PPRMT)  3.5.4. Autres risques	40 41 42
3.6. DISPOSITIFS DU REGLEMENT SANITAIRE DEPARTEMENTAL	43
3.7. SYNTHESE DES REGLEMENTATIONS ET RECOMMANDATIONS A PREN COMPTE POUR L'IMPLANTATION D'ECHANGEURS GEOTHERMIQUES.	
4. Etude économique	49
5. Contexte géologique et hydrogéologique, caractéristiques du sous-sol	51

Aı	nnexe 2 : Description des modèles thermo-hydrodynamiques numériques d	
Aı	nnexe 1 : Estimation des coûts des doublets géothermiques sur Orléans Mé	
Bi	ibliographie	97
9.	. Conclusion	95
8.	. Potentiel des échangeurs de très proche surface	92
	7.4. APPLICATION ET RESULTATS	87
	7.3. ESTIMATION DU FONCIER DISPONIBLE POUR L'IMPLANTATION DES \$ 87	SONDES
	7.2. LIMITES DE LA METHODE PROPOSEE	87
	7.1. METHODE PROPOSEE	86
7.	. Estimation du potentiel géothermique sur sondes	86
	6.3. CROISEMENT AVEC LES BESOINS ENERGETIQUES POUR ESTIMER L POTENTIEL GEOTHERMIQUE SUR NAPPE DE LA METROPOLE	
	6.2. RESULTATS DES SIMULATIONS  6.2.1. Cas de référence d'exploitation dans les calcaires d'Etampes et dans de Pithiviers  6.2.2. Influence des paramètres incertains sur l'évolution de la bulle froide	les calcaires 74
	6.1.1. Description 6.1.2. Limites de l'étude 6.1.3. Propriétés du modèle considérés lors des simulations : 6.1.4. Conditions aux limites et conditions initiales	66 68 69 73
	6.1. METHODOLOGIE POUR LA DEFINITION DU POTENTIEL GEOTHERMIQ	
6.	. Estimation du potentiel géothermique sur nappe	66
	<b>5.2.6.</b> Tests de réponse thermiques	
	<ul><li>5.2.4. Caractéristiques hydrodynamiques</li><li>5.2.5. Température de l'eau mesurée dans les Calcaires de Beauce</li></ul>	
	5.2.2. Modèles hydrogéologiques et cartographies piézométriques 5.2.3. Paramètres du sous-sol	57
	D'ORLEANS  5.2.1. Modèles géologiques et géométrie des calcaires de Beauce	
	5.2. DONNEES DU SOUS-SOL DISPONIBLES AU NIVEAU DE LA METROPOI	
	5.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE LOCAL : ETUDES	

#### 

### Liste des figures

Figure 1 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur géothermique en mode chauffage.  ©BRGM/ADEME16
Figure 2 : Sonde géothermique verticale (à gauche) et champ de sondes géothermiques verticales (à droite). Source : projet Espace Alpin GRETA
Figure 3 : Doublets sur aquifères. Source : projet Espace Alpin GRETA
Figure 4 : Echangeur horizontal pour la maison individuelle, un échangeur très superficiel. Source projet Espace Alpin GRETA18
Figure 5 : Décomposition de la consommation du secteur résidentiel (à gauche) et tertiaire (à droite
Figure 6 : Croisement des données énergétiques et des de l'occupation des sols. Pour le résidentie on considère que la densité de besoin en grand ensemble collectif est deux fois plu élevée que la densité en tissu urbain mixte, elle-même deux fois deux fois plus élevée que la densité en lotissement pavillonnaire. Pour le tertiaire, le besoin des distribué au prorata de la surface au sol
Figure 7 : Distribution de la densité de besoin énergétique (sans prise en compte des contraintes d'implantation) pour chacun des six types d'occupation des sols considérés par IRIS23
Figure 8 : Illustration des cartes réglementaires de la géothermie de minime importance au niveau de la métropole d'Orléans pour la géothermie sur échangeurs et pour les profondeurs 50 m (haut, échangeur ouvert (gauche) et fermé (droite)), 100 m (milieu) et 200 m (bas)
Figure 9 : Etat global de l'objectif global des eaux souterraines sur le bassin Loire-Bretagne (Comité Du Bassin Loire-Bretagne 2015)31
Figure 10 : Périmètre du SAGE Val Dhuy Loiret (http://www.eptb-loire.fr/Cartographie/html/val-dhuy loiret/index_assec.html#param_st)33
Figure 11 : Périmètre du SAGE de la nappe de la Beauce (Cellule d'animation du SAGE de Beauce 2014b)33
Figure 12 : Limites des nappes à réserver à l'alimentation en eau potable au niveau du SDAGE Loire-Bretagne35
Figure 13 : Extension des nappes à réserver à l'alimentation en eau potable (NAEP) présentant un intérêt pour l'exploitation géothermale de proche surface dans le secteur de la Métropole d'Orléans
Figure 14 : Illustration des différents périmètres de protection des ouvrages pour la consommation humaine et des sources d'eaux minérales naturelles conditionnées (source : BRGM M. Villey)
Figure 15 : Périmètres de protection des forages AEP sur la métropole d'Orléans
Figure 16 : Emprise des PPRI sur le secteur de la Loire (source : Carmen)41
Figure 17 : Plan de prévention des risques technologiques et périmètres de protection de la société ND LOGISTICS à Ormes (45)

Figure 18: Ca	rtographie des cavités souterraines d'origine non minière au niveau de la métropole d'Orléans recensées dans le portail GéoRisques43
Figure 19 : Inf	ographie des procédures réglementaires applicables à la géothermie de surface (d'après le projet GRETA)46
Figure 20 : Pé	erimètres de protection des ouvrages AEP et zones NAEP sur le secteur d'Orléans Métropole où des prescriptions et recommendations sont a prendre en compte pour les nouvelles exploitations géothermale de surface
Figure 21 : Co	omparaison des investissements pour un champ de sondes et un doublet50
Figure 22 : Ca	arte géologique sur le secteur de la métropole d'Orléans51
Figure 23 : Su	occession des formations hydrogéologiques rencontrés dans le Val d'Orléans (d'après Martin 2007)52
Figure 24 : Ca	arte géologique au 1 : 50 000 synthétisée pour la réalisation du modèle53
Figure 25 : Pr	ofondeur du toit des calcaires de Beauce en mètres estimé à partir de la différence entre la topographe et le toit des calcaires de Pithiviers (à gauche) et le toit des calcaires d'Etampes au Nord de la métropole (à droite)
Figure 26 : Ty	pe de piézométrie considérée pour l'étude en fonction des données disponibles par secteur55
Figure 27 : Pi	ézométrie en période de hautes eaux et de basses eaux dans la nappe des calcaires de Beauce interpolé sur la métropole d'Orléans (d'après cartes 1994 et 2004, voir SIGES)
Figure 28 : Pr	ofondeur du niveau statique d'eau (par rapport au niveau topographique) en période de hautes eaux et de basses eaux dans la nappe des calcaires de Beauce interpolé sur la métropole d'Orléans (d'après cartes piézométriques de 1994 et 2004, voir SIGES)
Figure 29 : Pi	ézométrie des alluvions dans le Val d'Orléans en période de basses eaux (BE) et de hautes eaux (HE) d'après étude 2017 (Hoareau, Gillard, and Larthette 2018) . 56
Figure 30 : Lo	calisation des ouvrages BSS au niveau de la métropole d'Orléans (rouge) et des 26 points d'eau utilisés pour la caractérisation des propriétés hydrodynamiques (bleu)
Figure 31 : Pr	ofondeur totale et niveaux statiques observés dans les ouvrages AEP situés sur la métropole d'Orléans58
Figure 32 : Da	ates de réalisation des essais de production dans les ouvrages AEP recensés au niveau de la métropole d'Orléans58
Figure 33 : Dé	bit des essais de nappe en m³/h et débit spécifique m³/h/m pour les 26 ouvrages d'eau considérés59
Figure 34 : Di	stribution des transmissivités (T) et des coefficients d'emmagasinement d'après les essais de nappe sur les ouvrages d'eau de la métropole d'Orléans59
Figure 35 : Di	stribution statistique des valeurs de conductivité hydraulique d'après 19 points de mesure sur la métropole d'Orléans60
Figure 36 : Di	stribution de gradient dans les calcaires de Beauce en basses eaux et hautes eaux sur les zones retraitées (n° 2, 3 et 4)
Figure 37 : Di	stribution de la vitesse de Darcy dans les calcaires de Beauce en basses eaux et hautes eaux sur les zones retraitées (n° 2, 3 et 4), pour deux hypothèses de propriétés hydrauliques : valeur basse (en haut), valeur élevée (en bas)62
Figure 38 : Do	onnée de température de l'eau au puits 03631X0099, situé sur la commune de Gidy, issue du Portail national des eaux souterraines (https://ades.eaufrance.fr)63

Figure 39 : Dor	nnee de temperature de l'eau au puits 04302X0101, situe au sud de la comi La Ferté Saint Aubin, issue du Portail national des eaux souterraines	mune de
	(https://ades.eaufrance.fr)	63
Figure 40 : Tes	ets de réponse thermique dans la métropole (https://www.geothermies.fr/vie	wer/)64
Figure 41 : TR	Γ de Saint-Jean-de-la-Ruelle : Evolution de la température en entrée (in) et (out) de sonde géothermique. Temps en échelle logarithmique à droite. So Ventilone	ource :
Figure 42 : Epa	aisseur de calcaire de Beauce d'après le modèle géologique régional (à gau vitesse moyenne de l'écoulement sur la hauteur d'un forage profond de 10 deux valeurs de conductivité hydraulique (à droite) dans l'emprise du mod géologique	00 m pour èle
Figure 43 : Mét	hodologie pour l'estimation du potentiel sur aquifère	67
Figure 44 : Loc	alisation des installations de géothermie répertorié sur Orléans Métropolde l'intérogation de la banque de donnée du sous-sol (BSS)	
Figure 45 : Chr	oniques d'exploitation testées pour l'étude de sensibilité - le cas n°1 corres une maison peu isolée avec des besoins en chauffage uniquement, le cas bureau isolé avec quelques besoins en climatisation et le cas n°3 à un bur avec des besoins équilibrés en chaleur et rafraichissement pour une puiss maximale appelée de 200 kW.	n°2 à un eau isolé ance
Figure 46 : Illus	stration des conditions initiales en pression imposées à partir d'un gradient hydraulique de 0,14 % dans les calcaires d'Etampes suivant l'axe X	73
Figure 47 : Loc	alisation des ouvrages dans le maillage défini pour les modélisations therm hydrodynamiques	
Figure 48 : Evo	olution du panache de température au niveau du forage de réinjection à t = 0 un an, 5 ans et 10 ans de cycle de chauffage/rafraichissement (chronique Figure 45) dans les calcaires d'Etampes	n°2 cf.
Figure 49 : Cou	upe horizontale du modèle montrant l'évolution du panache de température cas présenté en Figure 48	
Figure 50 : Evo	olution du panache de température au niveau du forage de réinjection à t = 0 un an, 5 ans et 10 ans de cycle de chauffage/rafraichissement (chronique Figure 45) dans les calcaires de Pithiviers	n°2 cf.
Figure 51 : Cou	upe horizontale du modèle montrant l'évolution du panache de température cas présenté en Figure 50	
Figure 52 : Evo	elution du panache de température après 10 ans d'exploitation pour un delta température de 0,5°C par rapport à la température initiale de l'aquifère et p différentes valeurs de conductivité hydraulique. Cas de l'exploitation sur le d'Etampes pour des ouvrages espacés de 150 mètres, avec un gradient h de 0,14% et la chronique d'exploitation n°1 d'une maison peu isolée	pour calcaire ydraulique
Figure 53 : Evo	olution du panache de température autour du puits d'injection, pour un delta température de 0,5°C par rapport à la température initiale de l'aquifère apre d'exploitation en fonction du gradient hydraulique. Cas de l'exploitation sur calcaire d'Etampes pour des ouvrages espacés de 150 mètres, avec une conductivité hydraulique de 1,78.10 <sup>-3</sup> m/s et la chronique d'exploitation n° 1 maison peu isolée.	rès 10 ans r le 1 d'une
Figure 54 : Evo	plution du panache de température autour du puits d'injection, pour un delta température de 0,5°C par rapport à la température initiale de l'aquifère apre d'exploitation en fonction de la chronique d'exploitation (proportion chauffage/refroidissement). Cas de l'exploitation sur le calcaire d'Etampes ouvrages espacés de 150 mètres, avec un gradient hydraulique de 0,14% une conductivité hydraulique de 1,78.10-3 m/s	rès 10 ans pour des et une

	ution du panache de température autour du puits d'injection, pour un delta de température de 0,5°C par rapport à la température initiale de l'aquifère après 10 ans d'exploitation en fonction de la l'espacement entre injecteur et producteur. Cas de l'exploitation sur le calcaire avec un gradient hydraulique de 0,14% et une une conductivité hydraulique de 1,78.10 <sup>-3</sup> m/s pour une maison peu isolé (chronique n°1)
Figure 56 : Ajus	tement d'un modèle sur la taille de l'ellipse80
Figure 57 : Méth	nodologie81
J	ution de la fraction d'énergie couverte par des doublets sur les calcaires de Pithiviers en fonction des itérations de l'algorithme (courbe bleue) et courbe de tendance (courbe rouge)
	ographie du potentiel du calcaire de Pithiviers représentant les empreintes thermiques des doublets positionnées par l'algorithme83
	ographie du potentiel du calcaire d'Etampes représentant les empreintes thermiques des doublets positionnées par l'algorithme
	che : Besoin total (chaud, froid, ECS) et couverture associée pour les 6 types de tissus urbains84
	che : Besoin total (chaud, froid, ECS) et couverture associée pour trois types de tissus urbains. Droite : Distribution du taux de couverture en énergie par IRIS 85
Figure 63 : Méth	node d'estimation du potentiel sur sondes géothermiques verticales86
Figure 64 : Taux	de couverture par IRIS pour des sondes profondes de 100 m ou 200 m 88
Figure 65 : Cart	e du taux de couverture par IRIS pour des sondes profondes de 100 m89
Figure 66 : Cart	e du taux de couverture par IRIS pour des sondes profondes de 200 m89
Figure 67 : Com	paraison du taux de couverture pour des sondes profondes de 100 m ou 200 m, pour les 536 zones90
Figure 68 : Estir	mation du taux de couverture par géothermie sur sondes sur la métropole 90
Figure 69 : Estir	mation de l'impact du déploiement de la géothermie sur sondes sur la consommation électrique de la métropole, par IRIS
Figure 70 : Méth	nodologie utilisée pour le potentiel des échangeurs de très proche surface92
Figure 71 : Epai	sseur des formations meubles sur la métropole d'Orléans93
	ibution par maille IRIS de la fraction de la zone de lotissement pavillonnaire ou de tissu urbain mixte dont l'épaisseur est supérieure à l'épaisseur minimale de 1 m ou 3 m94
	ographie par zone à urbaniser de la fraction de la zone dont l'épaisseur est supérieure à l'épaisseur minimale de 1 m (gauche) ou 3 m (à droite)94
	lage utilisé pour simuler l'exploitation géothermique sur nappe dans les calcaires de Pithiviers (1000 m x 400 m x 45 m) avec en rouge la partie réservoir, utile à l'écoulement et en bleu les épontes101
	lage utilisé pour simuler l'exploitation géothermique sur nappe dans les calcaires d'Etampes (1000 m x 400 m x 60 m) avec en rouge la partie réservoir, utile à l'écoulement et en bleu les épontes101
Figure 76 : Illust	tration du maillage en prisme et du raffinement utilisé au centre du demie-modèle
	mple de polygone original disponible pour l'implantation et polygone simplifié calé (rectangle)104

nple de répartition au sein d'une zone du foncier disponib forages (en rose) et polygones équivalent pour l'implanta	tion des forages (violet).
e du haut : Exemple d'évolution de l'implantation pour un (en bas à droite). Evolution du taux de couverture en éne fonction de la longueur forée L	ergie et en puissance en
pin de chaud couvert par géothermie $\tau c$ (à gauche) et bes géothermie $\tau f$ (à droite) : résultats du modèle (données)	

#### 1. Introduction

#### 1.1. TECHNOLOGIES D'EXPLOITATION DE LA RESSOURCE GEOTHERMALE

La géothermie de surface (c'est-à-dire profonde de 0 à 200 m) utilise le sol comme source de chaleur (c'est-à-dire de chaud et de froid) pour fournir à des bâtiments le chauffage, l'eau chaude sanitaire et le refroidissement. La source géothermique est généralement trop froide pour chauffer directement le bâtiment. Par conséquent, les systèmes géothermiques de faible profondeur font appel à une pompe à chaleur pour générer le niveau de température exigé. Les systèmes de pompe à chaleur géothermiques présentent trois composants principaux (cf. Figure 1):

- Le côté sol, pour extraire/injecter de la chaleur dans ou hors du sol (eau souterraine / sous-sol solide / sol artificiel comme les fondations de bâtiments);
- La pompe à chaleur elle-même, pour transférer la chaleur d'une source froide à un puits chaud :
- Le **côté bâtiment**, c'est-à-dire l'équipement situé à l'intérieur du bâtiment, qui transfère la chaleur ou le froid dans les pièces (chauffage radiant / chauffage par le sol / etc.).

Dans quelques cas, la température de la source/puits permet un échange de chaleur direct avec le sol, ce qu'on appelle « geocooling ». En mode chauffage, la pompe à chaleur consomme de l'électricité pour transférer la chaleur du 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.

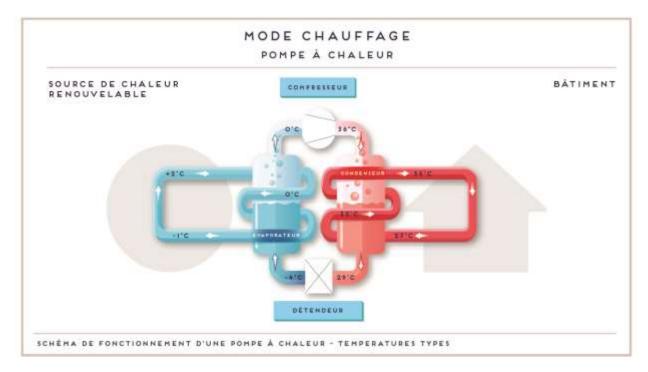


Figure 1 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur géothermique en mode chauffage. ©BRGM/ADEME

Plusieurs types d'échangeurs géothermiques permettent d'échanger de la chaleur entre le soussol et l'installation de surface.

Les sondes géothermiques verticales (SGV) sont composées d'un ou deux tubes en U dans lesquels un fluide caloporteur (un mélange d'eau et de mono-propylène glycol) circule pour échanger du chaud ou du froid (cf. Figure 2). Les sondes servent autant à de petites installations, comme des maisons individuelles (SGV unique ou multiples), que des installations plus importantes comme les hôtels (champs de SGV). Les systèmes SGV sont pleinement efficients 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 efficients dans les bâtiments dont la demande de refroidissement est relativement élevée, comme les bureaux ou les hôpitaux.

Les systèmes en boucle ouverte (doublets sur aquifères) échangent la chaleur directement avec l'eau souterraine, extraite par un (ou plusieurs) puits et généralement réinjectée dans le même aquifère par un (ou plusieurs) autre(s) puits (cf. Figure 3). 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 une performance supérieure par comparaison avec des systèmes en boucle fermée et est plus avantageux du point de vue économique. En outre, un système en boucle ouverte peut fonctionner en mode de refroidissement naturel : par échange de chaleur directement entre l'eau souterraine et le circuit de distribution du bâtiment. Il s'agit d'un mode de refroidissement très efficient, et les seules consommations électriques sont dues aux pompes de puits et aux circulateurs du circuit de distribution, sans l'utilisation de la pompe à chaleur. Le refroidissement naturel est diffusé lorsque des demandes importantes de

refroidissement sont présentes. C'est souvent le cas, par exemple pour des sites de production industrielle avec des machines, ou le refroidissement de processus, ou des centres de données.

Enfin, les **échangeurs très superficiels** (échangeurs horizontaux et corbeilles) sont généralement installés à une profondeur d'environ un à quatre mètres et ils sont fréquemment utilisés pour des maisons individuelles puisque leur installation nécessite une zone non construite d'une surface supérieure à la surface chauffée du bâtiment (cf. Figure 4).

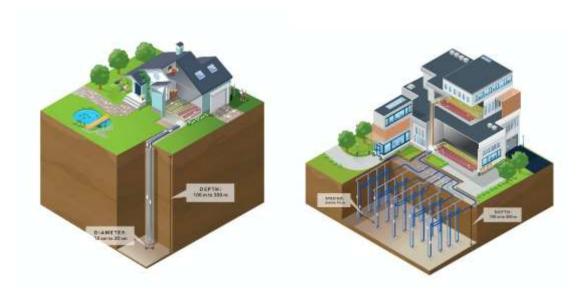


Figure 2 : Sonde géothermique verticale (à gauche) et champ de sondes géothermiques verticales (à droite). Source : <u>projet Espace Alpin GRETA</u>



Figure 3 : Doublets sur aquifères. Source : projet Espace Alpin GRETA



Figure 4 : Echangeur horizontal pour la maison individuelle, un échangeur très superficiel.

Source : projet Espace Alpin GRETA

#### 1.2. OBJET DE L'ETUDE

L'étude a pour objet d'étudier le potentiel de la géothermie de surface à l'échelle de la Métropole. Le rapport est organisé comme suit :

- Les sections 2 à 5 présentent les données disponibles pour l'analyse du potentiel : besoins énergétiques (section 2), contraintes réglementaires (section 3), éléments de coûts (section 4) et contexte géologique (section 5).
- Les sections 6, 7 et 8 présentent un potentiel de déploiement des échangeurs géothermiques à l'échelle de la Métropole, pour les doublets sur aquifère (cf. section 6), les sondes géothermiques verticales (section 7) et les échangeurs très superficiels (section 8).

# 2. Evaluation des besoins énergétiques d'Orléans métropole

#### 2.1. DONNEES DISPONIBLES

#### 2.1.1. Besoins énergétiques

ARTELYS a communiqué au BRGM un tableur Excel d'estimation des besoins en énergie par consommateur dans chaque maille IRIS. Le BRGM a agrégé, par maille IRIS, les consommations corrigées des variations climatiques en énergie thermique (chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation) des secteurs résidentiels et tertiaires (cf. Figure 5). Par la suite, on désignera cette quantité comme « besoin énergétique ». Au passage, on remarque qu'aucune entité « agricole » ou « industrielle » n'est dotée de besoin en énergie thermique.

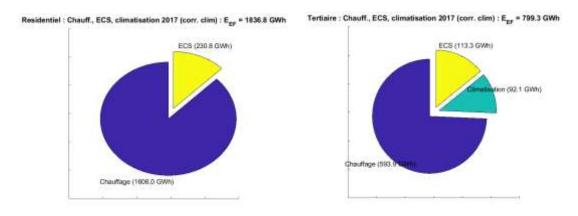


Figure 5 : Décomposition de la consommation du secteur résidentiel (à gauche) et tertiaire (à droite)

#### 2.1.2. Urbanisme

La Métropole a aussi communiqué un fichier cartographique d'occupation des sols. On a tenté d'utiliser ce fichier pour préciser la localisation des besoins énergétiques au sein des IRIS.

Les valeurs annoncées ci-dessus sont des valeurs moyennées à l'IRIS, dans la mesure où le foncier disponible est estimé à l'échelle de toute la maille : les besoins des bâtiments aux consommations élevées peuvent alors se répartir sur l'ensemble du terrain disponible dans la maille. Il faut donc localiser plus finement le besoin au sein des mailles IRIS, afin d'estimer les superficies disponibles à proximité immédiate (quelques dizaines de mètres) du besoin. Pour ce faire, le BRGM a croisé les besoins au sein des mailles IRIS avec l'occupation des sols :

- Tertiaire: Les consommations des sous-catégories ARTELYS « Transport »; « Culture et Loisirs »; « Administration publique »; « Bureaux »; « Enseignement »; « Café, Hôtel et Restaurants » sont sommées et redistribuées sur les Equipements urbains & Grands établissements (2.1); Zones d'activités (3.1); Zones commerciales (3.2), au prorata de la surface occupée par ces trois catégories dans la maille IRIS.
- Résidentiel: les consommations des sous-catégories ARTELYS « Maison » (+ « résidences secondaires ») E<sub>mais</sub> et « Immeubles » E<sub>im</sub> sont associées aux occupations Tissu urbain mixte (1.1); lotissements pavillonnaires (1.2); grands ensembles collectifs (1.3). Le système étant sous-contraint (on cherche à déterminer 3 inconnues pour 2

données), on introduit deux paramètres arbitraires  $\beta_1$  et  $\beta_2$  qui représentent les contrastes de densité de besoin entre zones pavillonnaires et mixtes d'une part, entre zones mixtes et grands ensembles collectifs d'autre part :

$$\beta_1 = \frac{\rho_{pav}}{\rho_{mixte}} \; ; \; \beta_2 = \frac{\rho_{mixte}}{\rho_{GEC}} \tag{1}$$

On a retenu  $\beta_1 = 0.5$  et  $\beta_2 = 0.5$ . Autrement dit, on considère que la densité de besoin énergétique des lotissements pavillonnaires est le double de celle du tissu urbain mixte, et que la densité du tissu urbain mixte est le double de celle des grands ensembles collectifs.

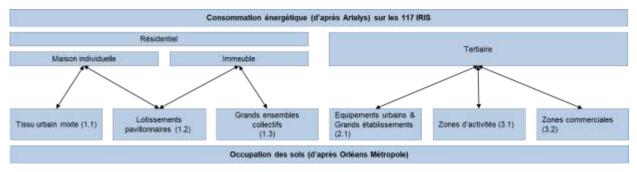


Figure 6 : Croisement des données énergétiques et des de l'occupation des sols. Pour le résidentiel, on considère que la densité de besoin en grand ensemble collectif est deux fois plus élevée que la densité en tissu urbain mixte, elle-même deux fois deux fois plus élevée que la densité en lotissement pavillonnaire. Pour le tertiaire, le besoin est distribué au prorata de la surface au sol.

En redécoupant les entités IRIS par les zones d'occupation du sol, on obtient alors 536 polygones, soit moins de  $117 \times 6 = 702$  polygones, tous les types d'occupation des sols n'étant pas représentés dans chaque IRIS. Qualitativement, comme on s'y attend, la densité de besoin des grands ensembles collectifs (1.3) est supérieure à celle des tissus urbains mixtes (1.1), ellemême supérieure à la densité des lotissements pavillonnaires (1.2) (cf. Figure 7). La principale limite de cette méthode de ventilation des besoins est qu'elle affecte la même consommation à l'ensemble d'un tissu urbain au sein d'une maille IRIS, indépendamment des caractéristiques de performance énergétique et d'usage des bâtiments.

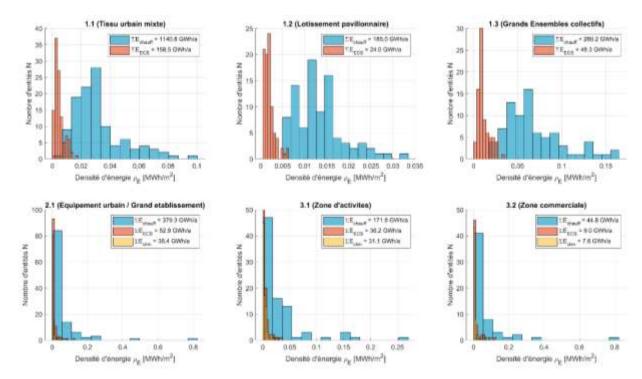


Figure 7 : Distribution de la densité de besoin énergétique (sans prise en compte des contraintes d'implantation) pour chacun des six types d'occupation des sols considérés par IRIS.

Nous avons reçu de la part de GRTgaz un fichier permettant de localiser tout ou une partie des consommations de gaz grâce à un référencement à la maille adresse. L'exploitation de ce fichier n'a pas permis de localiser plus finement les besoins au sein des IRIS.

# 3. Cadre réglementaire pour le développement de la géothermie

Les différentes considérations réglementaires et prescriptions à prendre en compte et leur application sur le territoire de la métropole d'Orléans sont présentées dans les paragraphes suivants.

#### 3.1. LES REGLEMENTATIONS LIEES A LA GEOTHERMIE DE SURFACE

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

#### 3.1.1. 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 2015¹ qui précise notamment les conditions d'appartenance des exploitation à la géothermie de minime importance et les contraintes et zones réglementaires associées.

Ce texte a été adopté en application des articles L. 112-1<sup>2</sup> et L. 112-3<sup>3</sup> du Code Minier et il modifie le décret n° 78-498 du 28 mars 1978<sup>4</sup> modifié relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie, le décret n° 2006-649 du 2 juin 2006<sup>5</sup> modifié relatif aux travaux miniers, aux 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.

https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do;jsessionid=3648590E7B12FDD3CB583E49202528E3.tplgfr35s\_2 ?idArticle=LEGIARTI000025560263&cidTexte=LEGITEXT000023501962&categorieLien=id&dateTexte=

 $\frac{https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000025557143\&cidTexte=LEGITEXT000023501962\&dateTexte=20181011}{501962\&dateTexte=20181011}$ 

 $\underline{\text{https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000864366\&categorieLien=cid\#LEGIARTI0000032773812}$ 

\_

BRGM/RP-70449 -FR - Rapport final

https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=EC3A8E5ACDE68FAF8741D36411C70C0F.tpdjo03v\_1?cid Texte=JORFTEXT000030073515&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id&idJO=JORFCONT0000300732 99

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000609345

L'article 3 du décret n°78-498 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 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 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.

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. »

#### 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 :

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

- 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 à 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 géothermiques 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 rédigée 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 danger ou inconvénient soumises 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 certifiée. Il est recommandé d'appliquer les normes suivantes lors de la conception et de la réalisation d'une 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 (août 2014) relative à la réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages.

## 3.1.2. 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 3.1.1 paragraphe a) doivent être déclarées via le téléservice (aussi appelé télé-déclaration) de la GMI<sup>7</sup>, 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 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 ;
- à moins de 35 mètres ;
  - o d'un **ouvrage souterrain de prélèvement d'eau** destinée à la consommation humaine ;
  - des stockages d'hydrocarbures, de produits chimiques, de produits phytosanitaires ou autres produits susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines;
  - 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 »].

Toujours d'après l'arrêté, la réalisation d'échangeurs géothermiques fermés requiert un positionnement des ouvrages 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 à une plus grande proximité ;

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> https://www.geothermie.developpement-durable.gouv.fr/

- de conduites, collectives ou non collectives, d'eaux usées ou transportant des matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines<sup>8</sup>.

#### 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.

#### 3.1.3. Les zones réglementaires dans la région Centre Val de Loire

Dans l'objectif de disposer d'une cartographie plus précise à l'échelle régionale, les services de l'État, les opérateurs (ADEME Centre-Val de Loire, BRGM) et le Conseil Régional Centre Val de Loire ont souhaité engager une révision, conformément à l'arrêté du 25 juin 2015 relatif à la carte des zones 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 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 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 8).

Les travaux de révision de cette cartographie réglementaire de la GMI sur le territoire de la région Centre-Val de Loire 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). Les phénomènes redoutés les plus prégnants pour la région Centre-Val de Loire sont la mise en communication des aquifères, la présence de cavité (naturelle ou anthropique) et la remontée de nappe. Les cartographies sont identiques pour les échangeurs ouverts et fermés jusqu'à 100 m et jusqu'à 200 m bien que les poids donnés aux aléas géologiques soient différents. Ces cartes peuvent être consultées sur l'espace cartographie du site www.geothermies.fr.

\_

<sup>8</sup> Consultation possible du site reseaux-et-canalisations.gouv.fr



Pour échangeurs jusqu'à 50 m : Echangeurs ouverts



Pour tout type d'échangeurs jusqu'à 100 m →

Bylos i 24

Pour tout type d'échangeurs jusqu'à 200 m→

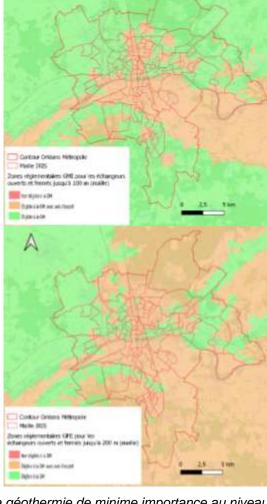


Figure 8 : Illustration des cartes réglementaires de la géothermie de minime importance au niveau de la métropole d'Orléans pour la géothermie sur échangeurs et pour les profondeurs 50 m (haut, échangeur ouvert (gauche) et fermé (droite)), 100 m (milieu) et 200 m (bas)

# 3.2. REGLEMENTATIONS LIEES A 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.

#### 3.2.1. SDAGE et SAGE

#### a. Définition 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 actuel s'étend de 2016 à 2021. Ce document a une portée juridique qui s'impose aux décisions administratives en matière de police des eaux (instruction des déclarations et autorisation administrative en matière de rejets, d'urbanisme, etc.).

Le SDAGE 2016-2021 du bassin Loire-Bretagne est présenté dans les documents (Comité Du Bassin Loire-Bretagne 2015; Comité Du Bassin Seine-Normandie 2016). Les objectifs de « bon état » des eaux souterraines ont été en majorité atteints sur le secteur de la métropole d'Orléans en 2015 (Figure 9).

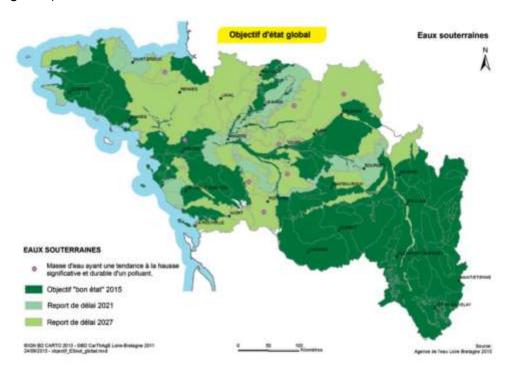


Figure 9 : Etat global de l'objectif global des eaux souterraines sur le bassin Loire-Bretagne (Comité Du Bassin Loire-Bretagne 2015)

Le document (Comité de bassin Loire-Bretagne 2016) présente les mesures à mettre en place sur les cours d'eau et aquifères sous-terrain dans le secteur de la Loire moyenne.

Le SDAGE Loire-Bretagne 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 qui seront ensuite traduites dans les schémas d'aménagement et de gestion des eaux à l'échelle locale et donneront ou non la possibilité d'implanter des forages géothermiques.

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.

Deux SAGE sont en application au niveau de la métropole d'Orléans : Le SAGE Val Dhuy-Loiret et le SAGE de la nappe de Beauce.

#### b. Le SAGE Val Dhuy-Loiret

Le **SAGE** du **Val Dhuy Loiret** a été approuvé le 15 décembre 2011. Le principal aquifère du périmètre du SAGE est un aquifère multicouche constitué par les **calcaires** de **Beauce** – **Etampes et Pithiviers**. La délimitation du SAGE est donnée en Figure 10. Les calcaires de Pithiviers sont en partie karstifiés dans le secteur du SAGE (i.e. cavités résultant de la dissolution de la roche). Ces karsts peuvent se manifester en surface par des effondrements localisés. Les chemins préférentiels créés par la circulation de l'eau dans la roche ont pour origine les pertes en Loire pour une grande part et la nappe de Beauce en rive droite de la Loire d'autre part.

Des mesures sont préconisées au niveau du SAGE Val Dhuy-Loiret telles que l'interdiction des nouveaux prélèvements d'eau et le suivi des volumes prélevés sur les ouvrages existants. Cependant, les forages géothermiques, sur sonde comme sur nappe, restituent l'ensemble des eaux prélevées et ne sont ainsi pas considérés comme des « prélèvements d'eau ». L'usage de la géothermie est donc possible dans le SAGE.

Les fiches d'actions, le règlement, les objectifs généraux et rapports sur la qualité des eaux sont consultables sur le site <a href="https://sage-val-dhuy-loiret.fr/">https://sage-val-dhuy-loiret.fr/</a> (Cellule d'animation du SAGE Val Dhuy-Loiret 2007), (Cellule d'animation du SAGE Val Dhuy-Loiret 2011) , (Cellule d'animation du SAGE Val Dhuy-Loiret 2017).

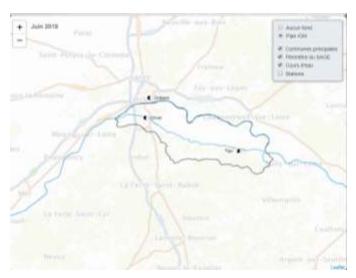


Figure 10 : Périmètre du SAGE Val Dhuy Loiret (<a href="http://www.eptb-loire.fr/Cartographie/html/val-dhuy-loiret/index\_assec.html#param\_st">http://www.eptb-loire.fr/Cartographie/html/val-dhuy-loiret/index\_assec.html#param\_st</a>)

#### c. Le SAGE de la nappe de Beauce

Le SAGE de la nappe de Beauce et de ses milieux aquatiques associés a été approuvé par arrêté inter-préfectoral le 11 juin 2013.

Le complexe aquifère des calcaires de Beauce, également appelé nappe de Beauce constitue une unité hydrographique qui s'étend sur environ 9 500 km² entre la Seine et la Loire. Il se répartit sur deux grands bassins, Seine Normandie et Loire Bretagne et sur deux régions, Centre-Val de Loire et Ile de France (Cellule d'animation du SAGE de Beauce 2014b). L'extension du SAGE est donnée ci-dessous (Figure 11).

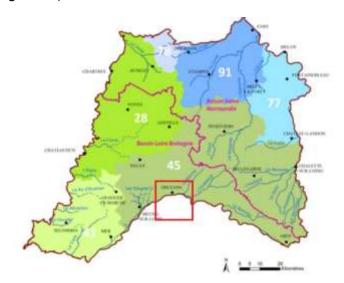


Figure 11 : Périmètre du SAGE de la nappe de la Beauce (Cellule d'animation du SAGE de Beauce 2014b)

D'après l'article n°5 du règlement du SAGE de la nappe de Beauce (Cellule d'animation du SAGE de Beauce 2014c) sur la gestion quantitative de la ressource en eau souterraine : « les prélèvements en nappe à usage géothermique sont susceptibles d'avoir des impacts cumulés

significatifs sur la quantité d'eau. En conséquence, 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 règle s'applique sur tout le territoire du SAGE, sauf précisions apportées par un autre SAGE. ».

Ainsi, pour tout prélèvement en nappe à usage géothermique il est nécessaire de :

- rappeler les objectifs du SAGE en matière de gestion quantitative de la ressource et les articles et/ou dispositions concernés par le projet;
- démontrer que le projet comprend un doublet de forage avec réinjection de toute l'eau prélevée dans le même horizon aquifère que celui dans lequel est effectué le prélèvement.

Également, d'après l'article n°8 portant sur l'objectif spécifique d'assurer la durabilité de la qualité de la ressource et visant à limiter l'impact des nouveaux forages sur la qualité de l'eau « la réalisation des forages est toujours à risques pour la qualité de l'eau : mise en relation de nappes de qualité différente, impact direct sur la qualité (augmentation de la température de l'eau ou perte de fluides caloporteurs, ...). En conséquence, les forages peuvent avoir des impacts cumulés significatifs sur la qualité de l'eau. Tous les nouveaux forages, y compris s'ils sont destinés à un usage domestique ou géothermique, doivent 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. » Cette règle s'applique sur tout le territoire du SAGE, sauf précisions apportées par un autre SAGE.

Des actions sont également menées pour « sensibiliser les particuliers et les collectivités sur la nécessité de sécuriser les forages de géothermie » (Cellule d'animation du SAGE de Beauce 2014a) et « respect des objectifs de bon état de la DCE ». Les opportunités pour les acteurs sont ainsi les suivantes :

- pour les particuliers utilisant la géothermie : s'inscrire dans une démarche de qualité et de développement durable ;
- pour les consommateurs : sécuriser leur approvisionnement en eau potable ;
- pour la collectivité : sécuriser la ressource en eau ;
- pour le maître d'ouvrage : répondre immédiatement aux objectifs réglementaires de la DCE sur la ressource en eau.

L'ensemble des éléments documents relatifs au SAGE de Beauce sont consultables sur le site <a href="http://www.sage-beauce.fr/">http://www.sage-beauce.fr/</a>.

Pour résumer sur le SAGE Val Dhuy-Loiret et sur le SAGE nappe de Beauce, la géothermie est autorisée en boucle ouverte avec réinjection des eaux produites dans le même horizon aquifère et en boucle fermée. Les opérations doivent être conformes à la réglementation et aux normes relatives à la réalisation et à l'exploitation de la ressource ainsi qu'aux objectifs du SAGE.

#### 3.2.2. Nappes réservées pour l'alimentation en eau potable (NAEP)

La configuration géologique de la région Centre-Val de Loire confère à plusieurs grands aquifères une protection naturelle efficace qui se traduit par la quasi-absence de pollution anthropique. Comme cela est mentionné dans les SDAGE Loire-Bretagne, (Comité Du Bassin Loire-Bretagne 2015), orientation 6E et Seine-Normandie, (Comité Du Bassin Seine-Normandie 2016), orientation 25, il convient de conserver ce patrimoine en maîtrisant la réalisation de nouveaux ouvrages de prélèvement et en dédiant préférentiellement son exploitation à l'AEP par adduction publique. Les nappes d'eau souterraine visées dans ces dispositions font parties des « zones de

sauvegarde pour l'alimentation en eau potable dans le futur » conformément à la directive cadre sur l'eau et sont inscrites au registre des zones protégées.

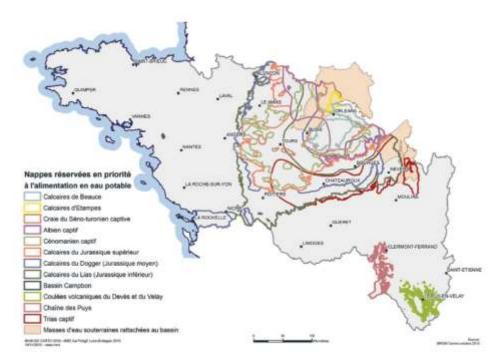


Figure 12 : Limites des nappes à réserver à l'alimentation en eau potable au niveau du SDAGE Loire-Bretagne

Trois nappes à réserver à l'alimentation en eaux potables (NAEP) sont présentes dans le secteur d'Orléans et de sa métropole (Figure 13) :

- la nappe des Calcaires de Beauce sous forêt captifs (MESO FRGG135);
- la nappe des Calcaires de Beauce sous Sologne (MESO FRGG136) ;
- la nappe des Calcaires d'Etampes captifs (MESO n°FRGG092 pour partie).

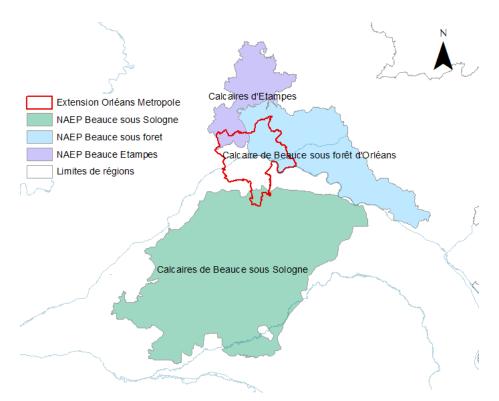


Figure 13 : Extension des nappes à réserver à l'alimentation en eau potable (NAEP) présentant un intérêt pour l'exploitation géothermale de proche surface dans le secteur de la Métropole d'Orléans

Dans le cadre du SDAGE Loire-Bretagne 2016-2021, les contours des nappes NAEP ont pour la plupart été précisés, suite à un travail mené par le BRGM en 2013 à la demande de l'agence de l'eau Loire Bretagne et de la DREAL Centre-Val de Loire et avec leur appui financier (Salquèbre 2013). Ce travail se poursuit actuellement afin de préciser le contour des nappes libres et captives des calcaires de Beauce et d'Etampes. Il s'inscrit notamment dans le cadre du projet de cartographie de la ressource sur le secteur de la métropole d'Orléans. Le contour actuel (Figure 13) est donc amené à évoluer au cours des années 2019-2020, principalement au niveau des calcaires de Pithiviers (partie sommitale du calcaire de Beauce). L'application réglementaire de ce nouveau contour se fera ensuite à travers le SDAGE 2021-2026.

La définition du contour comporte cependant un certain nombre d'incertitudes (e.g. savoir si la nappe est libre ou captive sans données de puits). Dans le cas où le pétitionnaire fournit des éléments pertinents sur la nature de la nappe (libre ou captive) dans le contour des NAEP, la limite pourrait être réévaluée et précisée.

Dans le SAGE de la nappe de Beauce, est mentionné à l'article 4 le schéma de gestion pour les nappes NAEP (Cellule d'animation du SAGE de Beauce 2014c). Dans ces zones, sont autorisés : (i) « les prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable dans la limite du volume annuel maximal prélevable fixé pour cet usage à l'article 3 du présent règlement » et (ii) « les prélèvements à usage économique justifiant de la nécessité d'utiliser une eau d'une telle qualité, non disponible par ailleurs, à des coûts raisonnables, en l'état des autres ressources et des technologies existantes de traitement de ces eaux ».

La disposition 6E du SDAGE Loire Bretagne 2016-2021 précise les éléments suivants :

« Des schémas de gestion peuvent être élaborés pour les masses d'eau des nappes à réserver pour l'alimentation en eau potable afin de préciser les prélèvements, autres que ceux pour l'alimentation en eau potable par adduction publique, qui peuvent être permis à l'avenir. Les prélèvements pour les usages autres doivent nécessiter un haut degré d'exigence en termes de qualité d'eau (eau de procédé agroalimentaire ou d'industries spécialisées) ou répondre aux besoins d'abreuvement des animaux en l'absence de solutions alternatives, ou encore doivent être motivés par des raisons de sécurité civile. Les schémas analyseront également l'évolution prévisible des prélèvements et leur impact à moyen terme sur l'équilibre quantitatif de la nappe.

En l'absence de schéma de gestion de ces nappes :

- les prélèvements supplémentaires sur des ouvrages existants ou nouveaux ne pourront être acceptés que pour l'alimentation en eau potable par adduction publique ;
- des prélèvements nouveaux pour un autre usage seront possibles uniquement en remplacement de prélèvements existants dans le même réservoir et le même secteur, et en l'absence de déficit quantitatif de la nappe concernée.

Les schémas de gestion sont élaborés suivant les cas :

- par la commission locale de l'eau si les masses d'eau concernées sont situées sur le périmètre d'un Sage ;
- par une commission inter-Sage si les masses d'eau concernées sont situées sur plusieurs Sage ;
- par les services des préfets si les masses d'eau concernées sont hors d'un périmètre de Sage ou en partie seulement sur un périmètre de Sage et dans ce dernier cas avec la commission locale de l'eau. »

Les zones NAEP sont compatibles avec les exploitations géothermales par sonde et sur nappe puisque l'exploitation par doublet sur nappe permet de restituer l'ensemble des volumes d'eau prélevés à la nappe d'origine et que les sondes géothermiques sont isolées des aquifères grâces à la cimentation des ouvrages. Les deux types d'ouvrage sont ainsi en accord avec les objectifs et dispositions définis sur ces zones NAEP. Dans ces zones et comme sur l'ensemble de la métropole, les bonnes pratiques sont d'usages lors de la conception et mise en place des ouvrages géothermiques, qu'ils soient sur sonde ou sur nappe.

Les services de l'ARS recommandent également de privilégier les doublets géothermiques sur les zones NAEP afin de limiter le nombre d'ouvrages ciblant les nappes et donc les risques de pollution des nappes lors de la réalisation des forages. En effet, pour une puissance donnée un doublet peut être équivalent à plusieurs sondes verticales.

<u>Pour résumer sur les zones NAEP</u>, la géothermie est autorisée en boucle ouverte (doublet sur nappe) et en boucle fermée. L'ARS recommande de limiter le nombre de forage réalisé dans ces zones et ainsi de privilégier les doublets géothermiques pour limiter les risques de pollutions des nappes NAEP.

#### 3.3. SERVITUDE D'UTILITE 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.

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 14). 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 :

- 1. 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;
- 2. 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 polluants vers le puits ;
- 3. un périmètre de protection éloignée où les installations, travaux, activités, dépôts, ouvrages, aménagements 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).

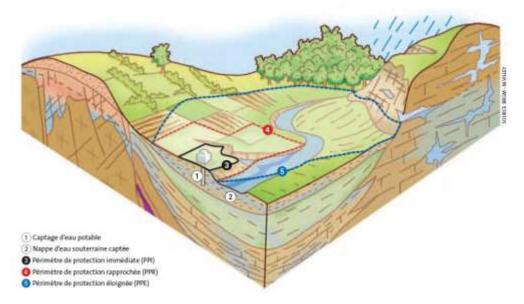


Figure 14 : Illustration des différents périmètres de protection des ouvrages pour la consommation humaine et des sources d'eaux minérales naturelles conditionnées (source : BRGM, M. Villey)

Le périmètre de protection d'un captage est défini après délibération de la collectivité, suite à une étude géologique et avis d'un hydrogéologue agréé. Il est également requis de procéder à une enquête publique et administrative, et de recueillir l'avis du Conseil départemental de l'environnement et des risques sanitaires et technologiques (Coderst). Il appartient à la collectivité, maître d'ouvrage, d'engager cette procédure qui doit conduire à un arrêté de

déclaration d'utilité publique (DUP). Les services de l'Agence Régionale de la Santé (ARS) accompagnent l'instruction de ces périmètres et de leurs servitudes.

Le guide technique édité par le Ministère de la santé et des sports (2008) donne un cadre pour l'action des hydrogéologues agréés et aux services de l'Etat qui sollicitent leur intervention ainsi que pour la définition des périmètres de protection.

La Figure 15 présente les périmètres de protection rapprochée et éloignée au niveau de la métropole d'Orléans.

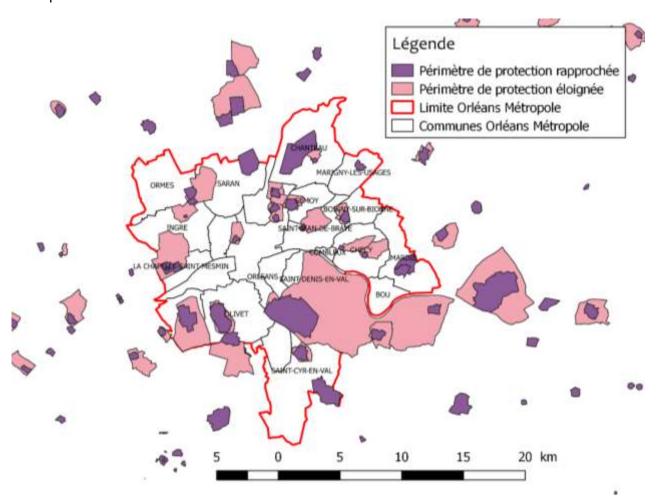


Figure 15 : Périmètres de protection des forages AEP sur la métropole d'Orléans

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 présents dans les dans les périmètres de protection rapprochée des captages d'eau destinée à la consommation humaine et des sources des eaux minérales naturelles conditionnées ne sont pas soumis au régime réglementaire de la GMI (déclaration simplifié). Les contraintes d'usage et de mise en place d'échangeur géothermique dans les périmètres de protection rapprochés et éloignés sont spécifiées par les dossiers de déclaration d'utilité publique de chaque captage d'eau potable.

<u>Pour résumer sur les zones de servitudes</u>, le régime déclaratif de la géothermie de minime importance (GMI) ne s'applique pas dans les périmètres de protection rapprochée (PPR) des captages d'eau. La GMI s'applique dans les périmètres de protection éloignée (PPE), sauf disposition spécifique éditée dans les dossiers de déclaration d'utilité publique des

captages. Dans les périmètres de protection rapprochés, il conviendra donc pour les nouveaux projets de déposer un dossier de recherche et d'exploitation de la ressource géothermale.

# 3.4. PERIMETRES DE PROTECTION DES STOCKAGES SOUTERRAINS DE GAZ, D'HYDROCARBURES OU PRODUITS CHIMIQUES (CADRE DU LIVRE II DU CODE MINIER)

Certains secteurs font l'objet de contraintes réglementaires en raison de structures souterraines particulières comme les stockages souterrains de gaz ou des installations souterraines et doivent donc être considérés pour les nouveaux projets de géothermie. Des servitudes d'utilité publique relatives à l'usage du sol et du sous-sol sont instaurées à proximité de ces stockages souterrains.

Ainsi, un périmètre de stockage sera délimité à la surface du sol par l'aire projetée du réservoir. Le périmètre de protection permet alors de délimiter une zone dans laquelle les travaux de forages ou de captage d'eau pourraient avoir une influence sur l'exploitation du stockage et vice versa. A l'intérieur de ces périmètres, tout forage excédant la profondeur de 350 mètres doit faire l'objet d'une autorisation préalable du Préfet.

Les textes applicatifs sont l'article 104-3-1 du Livre ler du Code minier et des articles L515-15 à L.515-25 du Code de l'environnement.

Dans le secteur d'Orléans métropole, aucune zone de protection de ce type n'est répertoriée.

#### 3.5. PLANS DE PREVENTION DES RISQUES

#### 3.5.1. Plan de prévention des risques d'inondation

Les sites de construction lors de l'établissement d'une installation de géothermie sont concernés par le risque d'inondation. Le PPRI (plan de prévention des risques d'inondation) de l'aire élargie de l'agglomération orléanaise a été approuvé le 20 janvier 2015 par arrêté préfectoral. Les constructions de nouveaux forages devront alors être en accord avec les prescriptions constructives applicables sur ces zones.

Un phénomène redouté lors de l'exploitation par doublet de géothermie de proche surface est la remontée de nappe due à une surcote lors de la réinjection d'eau de l'exploitation. Ce phénomène est susceptible de provoquer une inondation des terrains ou bien la déstabilisation géotechnique des terrains. Il est pris en compte lors de la création des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance (cf. section 1.3).

Les exploitations géothermales par doublet géothermique ne sont pas mentionnées directement par le règlement du PPRI du Val d'Orléans et de l'agglomération Orléanaise. Le règlement prévoit en outre que les ouvrages n'aggravent pas les risques d'inondation et doivent être protégés en surface. Les normes et règles de bonnes pratiques sont également d'usage pour l'ensemble des nouveaux forages géothermiques sur ces zones.

Il s'agira donc sur ces zones de respecter les recommandations pour assurer l'étanchéité des ouvrages en surface (qui peut engendrer un coût supplémentaire pour les installations) et lors de la réinjection en nappe superficielles sujettes aux remontées en cas de fortes précipitations.

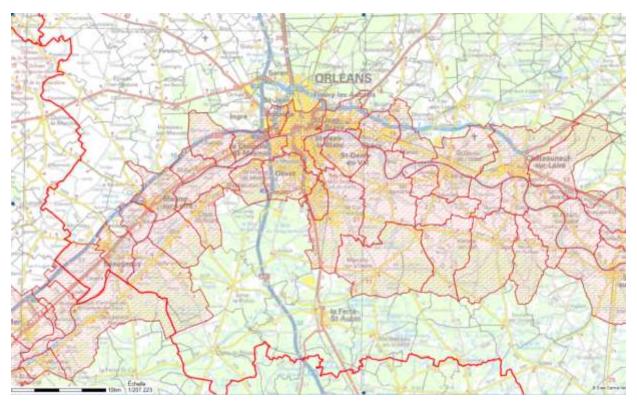


Figure 16 : Emprise des PPRI sur le secteur de la Loire (source : Carmen)

#### 3.5.2. Plan de prévention des risques technologiques (PPRT)

Institué par la loi Risques du 30 juillet 2006, le PPRT est le principal instrument de l'action de l'Etat pour la maitrise de l'urbanisation aux abords des exploitations industrielles. Il vise notamment à définir des règles d'utilisation des sols pour des projets de développements dans certaines zones.

En 2014, 11 sites SEVESO seuil haut ont été recensé par la DREAL dans le département du Loiret dont 9 assujettis à un PPRT.

Les sites présents au niveau de la métropole d'Orléans sont les suivants :

- ND LOGISTICS à Ormes ;
- Dépôt de pétrole d'Orléans Semoy ;
- Dépôt de pétrole d'Orléans Saint Jean de Braye.

Dans chacun des sites, des zones ont été définies avec des dispositions d'urbanisme régissant les projets sur les constructions, les installations et infrastructures existantes. On retrouve ainsi les zones d'interdiction stricte –R- d'aléa fort, les zones d'autorisation sous conditions –B- d'aléa moyen et la zone grisée qui correspond à l'implantation du site à risque. La Figure 9 présente le PPRT et les zones de protection associées de la société ND LOGISTICS à Ormes.

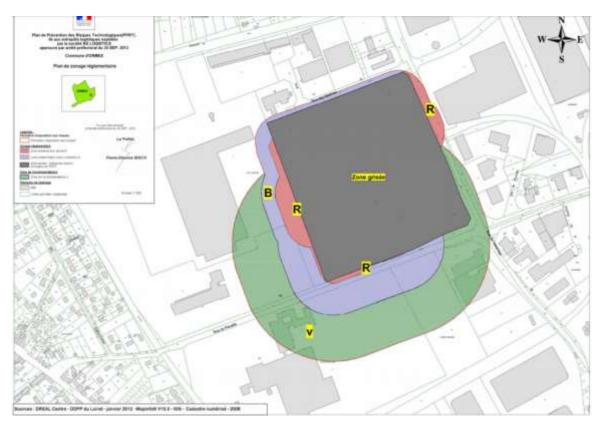


Figure 17 : Plan de prévention des risques technologiques et périmètres de protection de la société ND LOGISTICS à Ormes (45)

Pour plus de détails sur les restrictions d'usage dans les différentes zones du PPRT de chacun des sites, il convient de se référer aux réglementations associées aux PPRT approuvés<sup>9</sup>.

Sur le secteur de la métropole d'Orléans, il sera difficile d'envisager des installations géothermales à ces endroits bien qu'aucune interdiction visant la géothermie ne soit en vigueur. En effet, la circulation de personnes peut y être interdite rendant difficile tous travaux et interventions. De plus, les aquifères au droit des installations peuvent présenter des pollutions et ainsi rendre difficile toute exploitation (e.g. développement bactérien, précipitation de composants des eaux du sous-sol, etc.).

#### 3.5.3. Plan de prévention des risques de mouvement de terrain (PPRMT)

Les zones concernées par le plan de prévention du risque mouvements de terrain (PPRMT) sont :

- aléa retrait-gonflement des argiles ;
- aléa effondrement ;
- aléa glissement de terrain

Aucun élément n'a pu être identifié pour la prévention des risques de mouvement de terrain sur le secteur de la métropole d'Orléans. Les aléas identifiés par le PPRMT sont pris en compte lors de la production des cartes réglementaires pour la GMI (voir section 3.1.3).

\_

http://www.loiret.gouv.fr/Politiques-publiques/Securite-et-risques/Risques/Plan-de-prevention-des-risques-technologiques-P.P.R.T/Les-PPRT-approuves

#### 3.5.4. Autres risques

Il semble important de mentionner la présence de karsts dans le secteur du Val de Loire et aux abords de la Loire mais aussi la présence de cavités (ou vides souterrains) liées à l'exploitation des calcaires au cours du 19ème siècle pour la construction.

La Figure 18 présente la position de ces vides d'origine naturelle ou anthropique au niveau de la métropole d'Orléans d'après la plateforme GeoRisques. Ces éléments devront être pris en compte par les différents acteurs (foreur, maitre d'ouvrage) lors du dimensionnement et de la réalisation de projet d'installation de géothermie de surface.





Figure 18: Cartographie des cavités souterraines d'origine non minière au niveau de la métropole d'Orléans recensées dans le portail GéoRisques

#### 3.6. DISPOSITIFS DU REGLEMENT SANITAIRE DEPARTEMENTAL

Le **périmètre de protection des eaux minérales** est institué en vertu des articles L. 1322-3 à L. 1322-13 du Code de la Santé publique autour d'une source d'eau minérale déclarée d'intérêt public, en vue d'éviter toute altération ou diminution de cette source. Il s'agit d'un périmètre à l'intérieur duquel :

- aucun sondage, aucun travail souterrain ne peuvent être pratiqués dans le périmètre de protection d'une source d'eau minérale naturelle déclarée d'intérêt public, sans autorisation préalable délivrée par le représentant de l'État dans le département;
- à l'égard des fouilles, tranchées pour extraction de matériaux ou tout autre objet, fondations de maisons, caves ou autres travaux à ciel ouvert, le décret mentionné à l'article L.1322-13 qui fixe le périmètre de protection peut exceptionnellement imposer aux

- propriétaires l'obligation de faire, au moins un mois à l'avance, une déclaration au représentant de l'État dans le département qui en délivre récépissé ;
- les autres activités, dépôts ou installations de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux peuvent également être soumis à autorisation ou à déclaration par le décret mentionné à l'article L 1322-13 instituant le périmètre de protection ;
- les travaux, activités, dépôts ou installations précités et entrepris, soit en vertu d'une autorisation régulière, soit après une déclaration préalable, peuvent, sur la demande du propriétaire de la source, être interdits par le représentant de l'État dans le département.

Sur le secteur de la métropole d'Orléans, deux forages sur les communes de Saint Cyr en Val et d'Orléans (03982X0406 et 03982X0784) sont utilisés pour l'embouteillage d'eau. Les eaux prélevées sont des eaux de source et ne sont donc pas soumises aux mêmes restrictions que les eaux minérales citées ci-dessus. Il convient cependant de prévoir un certain espacement entre ces ouvrages et des forages géothermiques pour limiter les interférences entre opérations.

## 3.7. SYNTHESE DES REGLEMENTATIONS ET RECOMMANDATIONS A PRENDRE EN COMPTE POUR L'IMPLANTATION D'ECHANGEURS GEOTHERMIQUES

Sur l'ensemble de la métropole, il est recommandé de mettre en place les bonnes pratiques et respecter les normes et règlementation en vigueur pour la conception, la réalisation et l'exploitation des sondes et doublets géothermiques.

Des précautions particulières sont recommandées pour les projets de doublets sur nappe dans les calcaires de Beauce où les eaux peuvent présenter de fortes concentrations en fer et manganèse. Pour plus d'information, il convient de se référer aux recommandations proposées suite au retour d'expérience des opérations sur nappe au niveau de la métropole d'Orléans, (Monnot et al. 2019) rapport BRGM/RP69208-FR.

Les autres règles d'usage et impact sur l'implantation des sondes géothermales et des doublets sur nappe dans la métropole d'Orléans sont synthétisées dans le tableau ci-dessous (Tableau 1).

Certaines zones demandent également des **précautions particulières** notamment en termes de mode de réalisation, de technique de forage, de profondeur des ouvrages, de régime d'exploitation, de mesure de surveillance, de cimentation des ouvrages, de qualité du ciment et coulis adaptées ou des géotextiles à utiliser dans les zones de vides. Ces zones sont listées cidessous :

- zones karstiques ou de vides souterrains ;
- zones traversées par des nappes artésiennes, des nappes ayant un différentiel piézométrique significatif ou proche de la surface ;
- zones en amont hydraulique d'ouvrages de prélèvement d'eau de type AEP ;
- zones de nappes stratégiques identifiés par le SDAGE ou SAGE ;
- zones dont le sous-sol présentent des évaporites (sels, gypse, etc.)
- zones à risques sismiques ou présentant des risques de mouvement de terrain et zones volcaniques ;
- zones au niveau d'anciennes carrières ou mines ouvertes ou zones de servitude d'utilité publique en rapport avec d'anciennes installations de carrières ou mines;
- zones en bordure de littoral.

Possibilité d'installation de

			nouvelles opérations, application de la GMI			
Niveau	Caractère	Règle d'usage	SGV	Doublets sur nappe		
Zone réglementaire verte	Obligatoire	Pas d'autorisation requise. Régime de déclaration simplifié s'applique	Oui, GMI applicable	Oui, GMI applicable		
Zone réglementaire orange	Obligatoire	Avis d'un expert pour connaitre la compatibilité d'un projet de géothermie avec le contexte local	GMI applicable si avis positif expert	GMI applicable si avis positif expert		
Zone réglementaire rouge	Obligatoire	Exclus de la procédure GMI (déclaration simplifié), demande d'autorisation à formuler auprès des DREAL	NA	NA		
SDAGE (Loire- Bretagne) & SAGE (Val Dhuy Loiret, Beauce)	Obligatoire	Appliquer les bonnes pratiques et réglementation. Être en accord avec objectifs généraux des schémas directeurs	Oui, GMI applicable	Oui, GMI applicable		
NAEP (Beauce sous Forêt et sous Sologne, Etampes)	Obligatoire	Appliquer les bonnes pratiques et réglementation. Être en accord avec objectifs généraux. Recommandation de l'ARS de limiter le nombre de forage et donc de privilégier la solution sur nappe	Oui, GMI applicable	Oui, GMI applicable		
PPI & PPR captage AEP	Obligatoire	Exclus pour la géothermie	GMI ne s'applique pas	GMI ne s'applique pas		
PPE captage AEP	Obligatoire	Pas d'autorisation requise. Régime de déclaration simplifié s'applique.	GMI applicable, suivre préconisation DUP	GMI applicable, suivre préconisation DUP		
PP source d'eau minérale naturelle	Obligatoire	Non applicable sur la métropole d'Orléans	NA	NA		
Protection des sites de stockages	Obligatoire	Non applicable sur la métropole d'Orléans	NA	NA		
PPRI	Obligatoire	Attention particulière au sujet de remontée de nappe. Assurer étanchéité des ouvrages	Oui, GMI applicable	Oui, GMI applicable		
PPRT	Obligatoire	Périmètres définis autour de ND LOGISTICS à Ormes, des dépôts de pétrole d'Orléans Semoy et d'Orléans Saint Jean de Braye	NON (surface concerné réduite)	NON (surface concerné réduite)		
PPRMT	Obligatoire	Non applicable sur la métropole mais aléa pris en compte dans la carte réglementaire GMI	NA	NA		
Ensemble de la métropole	Obligatoire	Distance par rapport aux canalisations	D>5 m	D>5 m		
	Obligatoire	Distance avec les limites de propriétés	D>5 m	D>5 m		
	Recomma Appliquer les bonnes pratiques en terme de conception, réalisation des n-dations travaux et exploitation des ouvrages					

Tableau 1 : Synthèse des règles d'usage à considérer pour l'implantation de nouveaux projets de géothermie de proche surface dans le cadre réglementaire GMI sur la métropole d'Orléans (NA : non applicable)

L'infographie (Figure 19) résume les procédures à suivre pour la géothermie de surface pour répondre au cadre réglementaire de la GMI (système déclaratif simplifié *via* télé-déclaration). La Figure 20 présente les zones de protection des ouvrages AEP et des nappes réservés à l'alimentation en eau potable de la métropole à considérer lors de nouveaux projets de géothermie.

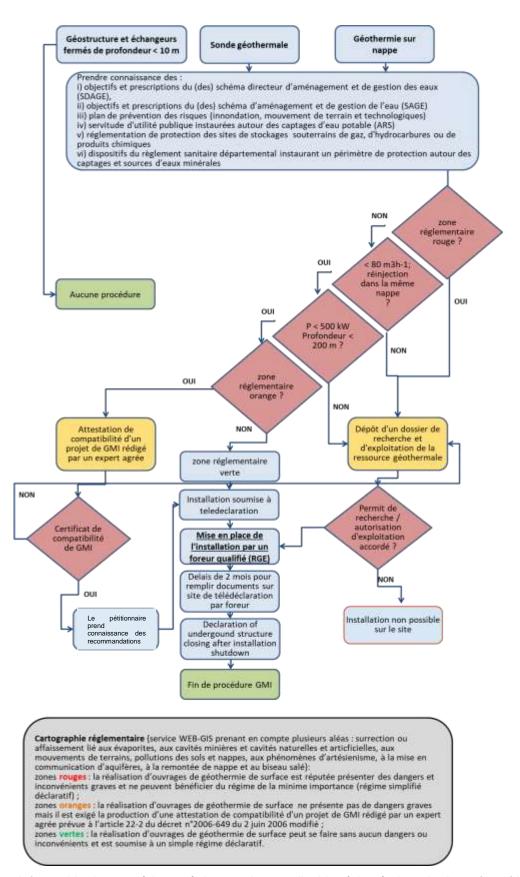


Figure 19 : Infographie des procédures réglementaires applicables à la géothermie de surface (d'après le projet GRETA)

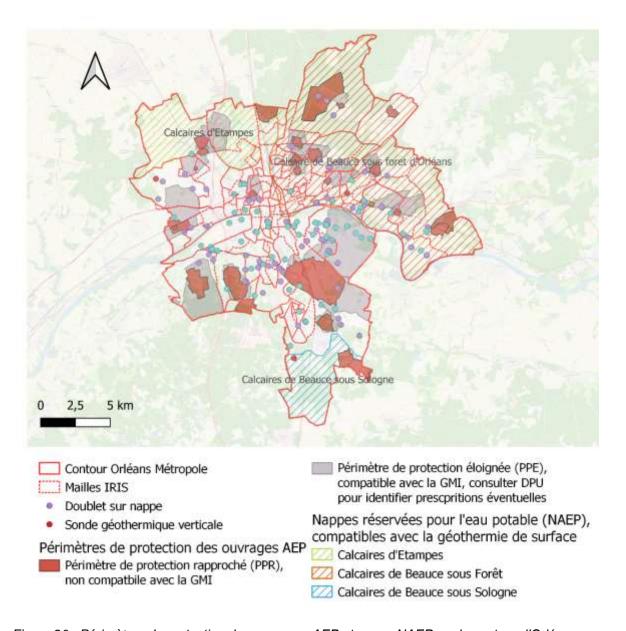


Figure 20 : Périmètres de protection des ouvrages AEP et zones NAEP sur le secteur d'Orléans Métropole où des prescriptions et recommendations sont a prendre en compte pour les nouvelles exploitations géothermale de surface

### 4. Etude économique

L'étude économique a consisté à estimer le coût de mise en place d'un doublet sur nappe et de sondes géothermiques verticales.

Pour les solutions de doublet géothermique, les coûts d'investissement ont été définis pour 8 cas représentatifs de situations de développement pouvant être rencontrés dans le territoire. Ces scénarios prennent ainsi en considération plusieurs secteurs de la métropole (Checy, Saint Denis en val, dans le Val d'Orléans ou à Fleury-les-Aubrais), pour des exploitations ciblant des aquifères et donc des profondeurs variables (aquifères de Pithiviers ou d'Etampes) et pour des puissances échangées avec le terrain de 100 kW à 500 kW (maximum autorisé par la réglementation GMI). Les scénarios sont présentés dans le Tableau 2.

Le chiffrage de ces scénarios a été confié au bureau d'études Utilities Performance. Il porte sur les postes de dépenses suivants :

- Les démarches administratives :
- La réalisation des doublets (y compris forage, tubages, pompages, opérations de contrôle, analyses);
- Le raccordement hydraulique et électrique des ouvrages ;
- La fourniture et la mise en place de l'échangeur thermique ;
- Les coûts de fonctionnement et de suivi du doublet :
- Les coûts de réhabilitation si nécessaire dans les années suivant la réalisation.

Cas	1	2	3	4	5	6	7	8
Epaisseur Alluvions/molle (m)	10	10	10	15	15	15	10	26
Nature formation molle	sables et marnes (7 m de l'Orléanais et 3 m de marnes de Blamont)	sables et marnes (7 m de l'Orléanais et 3 m de marnes de Blamont)	sables et marnes (7 m de l'Orléanais et 3 m de marnes de Blamont)	Alluvions	Alluvions	Alluvions	Alluvions	sables et marnes (6m alluvions, 17m marnes et calcaire de l'Orléanais,3m marnes du Blamont)
Epaisseur calcaires Pithiviers (m)	15	15	15	5	5	5	Estimation : 15 m (données indiff calcaire Beauce = 70 m total)	15
Epaisseur molasse Gâtinais (m)	7	7	7	7	7	7	Indiff calcaire Beauce	3
Epaisseur calcaire Etampes (m)	30	30	30	46	46	46	70 (ep totale calc Beauce)	42
Piézométrie calcaire de Beauce (basse eau, altitude m/sol)	13	13	13	6	6	6	5	34
Débit d'exploitation (m3/h)	86	43	15	86	43	15	86	86
H pompe estimé (m/sol) : piézo - rabattement - 5m (NPSH)-2 m (sécurité)	21,59	20,78	20,27	13,583	13,291	13,1	13,69	43,09
H top réservoir (m/sol)	10	10	10	27	27	27	10	44
H basse réservoir (m/sol)	25	25	25	73	73	73	80	86
Hauteur mouillé (m/sol)	12	12	12	46	46	46	70	42
Rabattement max (m)	0,35 à 1,59	0,31 à 0,78	0,11 à 0,27	0,216 à 0,585	0,106 à 0,291	0,037 à 0,1	0,46 à 1,69	0,64 à 2,09
Hypothèses Conductivité (m/s)	0,004 à 0,0014	0,004 à 0,0014	0,004 à 0,0014	0,004 à 0,0014	0,004 à 0,0014	0,004 à 0,0014	0,004 à 0,0014	0,004 à 0,0014
Epaisseur aqui (m)	15	15	15	46	46	46	15	42
Transmissivité (m2/s)	0,06 à 0,0224	0,06 à 0,0224	0,06 à 0,0224	1,84e-1 à 6,44e-2	1,84e-1 à 6,44e-2	1,84e-1 à 6,44e-2	6e-2 à 2,1 e-2	1,68e-2 à 5,88e-2
S	0,1 à 0,0005	0,1 à 0,0005	0,1 à 0,0005	0,1 à 0,0005	0,1 à 0,0005	0,1 à 0,0005	0,1 à 0,0005	0,1 à 0,0005
Rayon puits (m)	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Aquifère capté	Pithiviers	Pithiviers	Pithiviers	Etampes	Etampes	Etampes	Pithiviers	Etampes
Nature en basse eau	Libre	Libre	Libre	Captif	Captif	Captif	Captif	Captif
Localisation approximative	Checy	Checy	Checy	Saint Denis en Val	Saint Denis en Val	Saint Denis en Val	Val de Loire - Orléans	Fleury les Aubrais

Tableau 2 : Cas considérés pour le chiffrage d'un doublet

Les résultats de l'étude réalisé par Utilities Performance sont donnés en Tableau 3. Un résultat remarquable est que l'investissement d'un doublet dépend peu du débit en jeu.

Pour la solution sur sonde géothermique verticale, on suppose l'usage d'une pompe à chaleur fonctionnant avec un écart de température de 5 °C, et l'extraction d'une puissance linéaire de 30 W / m de forage et un coût du mètre de forage de 60 €/m.

Selon ces hypothèses, l'investissement pour un doublet sur aquifère est justifié pour une puissance supérieure à 200 kW environ (cf. Figure 21). En deçà de cette puissance, la solution sur sonde semble être plus compétitive.

	Scinarios							
Poste	1	2	1	4	5	6	7	1
0 - Etudes et autorisations préalables	7 300,00 €	7.300,00€	7 300,00 €	7 300,00€	7 300,00 €	7 300,00 €	7 300,00 €	7 300,00 €
1 - Préparation travaux de forage	40 000,00 €	40 000,00 €	40 000,00 €	40 000,00 €	40 000,00 €	40 000,00 €	40 000,00 €	40 000,00 €
2 - Travaux de forage	49 864,90 €	44 610,00 €	44 610,00 €	135 229,46 €	127 248,53 €	127 248,53 €	46 320,00 €	157 047,59 4
3 - Nettoyage/Développement	19 880,00 €	19 880,00 €	19 880,00 €	29-880,00 €	19-880,00 €	19 880,00 €	19 880,00 €	19 880,00 €
4 - Equipement/Raccordement/Echangeur	164 360,00 €	148 500,00 €	139 500,00 €	161 120,00 €	137 100,00 €	136 980,00 €	160 920,00 €	173 390,00 €
Total HT	281 404,90 €	260 290,00 €	251 290,00 €	363 529,46 €	331 528,53 €	331 408,53 €	274 420,00 €	397 617,59 €
Maitrise d'œuvre (10%)	27 410,49 €	25 299,00 €	24 399,00 €	35 622,95 €	32.422,85 €	32 410,85 €	26 712,00 €	39 031,76 €
Aleas (30 %)	27 430,49 €	25 299,00 €	34 399,00 €	35 622,95 €	32 422,85 €	32 410,85 €	26.712,00 €	39 031,76 4
Total avec MOE et aléas	336 225,88 €	310 888,00 €	300 088,00 €	434 775,36 €	396 374,24 €	396 230,24 €	327 844,00 €	475 681,11 €

Tableau 3 : Investissement pour chaque scénario (d'après étude Utilities Performance)

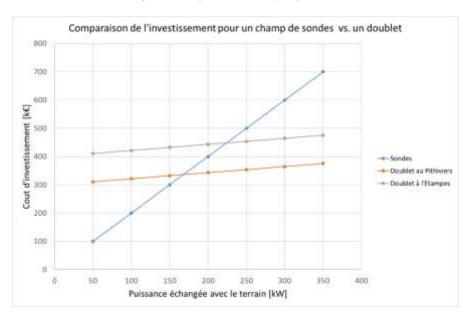


Figure 21 : Comparaison des investissements pour un champ de sondes et un doublet

Le temps de retour sur investissement des installations sur aquifères et sur sonde est situé autour de 10 ans (cf. étude AFPG¹º). Il est peut-être plus court dans les cas de production de chaud et de rafraichissement ou un peu plus important pour les opérations les plus profondes et les plus complexes.

.

<sup>10</sup> http://www.afpg.asso.fr/wp-content/uploads/2020/09/ETUDE\_APFG\_2020\_web.pdf

# 5. Contexte géologique et hydrogéologique, caractéristiques du sous-sol

## 5.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE LOCAL : ETUDES PRECEDENTES

La géologie et l'hydrogéologie dans le Centre Val de Loire et plus spécifiquement au niveau d'Orléans et sa métropole ont fait l'objet de nombreuses études depuis les années 1960 (Desprez 1966; Desprez et al. 1975; J.-C. Martin, Giot, and Le Nindre 1999; J. C. Martin et al. 2003; Bonnet and Floriat 2004; Binet, Auterives, and Charlier 2010).

Dans le secteur d'Orléans, on retrouve des formations marines puis lacustres déposées durant les régressions successives cénozoïques. Ces facies sont recouverts par des alluvions fluviatiles quaternaires.

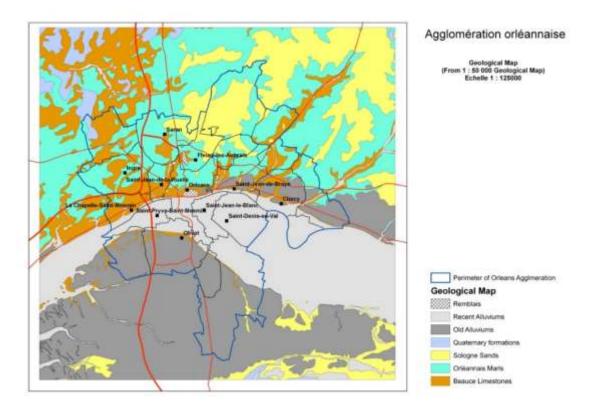


Figure 22 : Carte géologique sur le secteur de la métropole d'Orléans

La succession stratigraphique des formations dans le secteur est illustrée en Figure 23. On distingue, dans l'ordre stratigraphique des plus anciennes aux plus récentes : la Craie blanche à silex du Crétacé, les formations détritiques du Paléocène-Eocène, le Calcaire lacustre de l'Eocène, le Calcaire d'Etampes, la Molasse du Gâtinais, le Calcaire de Pithiviers, la marne du Blamont, les Marnes de l'Orléanais, les sables et argiles de Sologne et enfin les alluvions anciennes et récentes de la Loire.

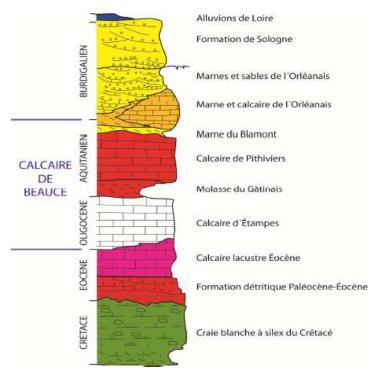


Figure 23 : Succession des formations hydrogéologiques rencontrés dans le Val d'Orléans (d'après Martin 2007)

L'ensemble sédimentaire considéré pour l'exploitation géothermale est compris entre la surface topographique et le toit des calcaires lacustres de l'Eocène. La cible principale pour les opérations sur aquifères correspond aux calcaires de Beauce qui sont les plus productifs dans le secteur.

Ces calcaires lacustres de Beauce comprennent deux assises calcaires perméables qui sont le Calcaire de Pithiviers et le Calcaire d'Etampes, séparés par la Molasse du Gâtinais qui joue un rôle primordial pour la protection du Calcaire d'Etampes sous-jacent puisque moins perméables. Les calcaires de Beauce sont intensément fracturés par endroit, et la fissuration est accentuée par une karstification (cavité souterraine produite par dissolution des calcaires) d'autant plus développée que l'on s'approche de la Loire au Nord d'Orléans mais aussi dans le Val d'Orléans. Un véritable réseau souterrain naturel est en effet présent au sein des calcaires de Beauce. Le système est alimenté par des pertes de la Loire et des résurgences tel que la source du Loiret située dans le Parc Floral.

La nappe des calcaires de Beauce s'étend de part et d'autre de la métropole, sous la forêt d'Orléans, sous la Sologne et sous le Val d'Orléans. Compte-tenu de l'empilement stratigraphique et de la présence inconstante des niveaux imperméables des molasses, il est difficile de parler de nappe libre ou captive, mais il est probable que le système principal est captif sous les dépôts détritiques du Miocène de la forêt d'Orléans et libre partout ailleurs. Dans ces zones où la nappe est libre, la réalimentation se fait directement par l'infiltration des eaux de pluie qui constitue son unique ressource en eau. Cette infiltration qui se produit l'hiver, représente en moyenne pour la partie libre de la nappe un apport d'environ 900 millions de m³/an.

La communication entre la nappe alluviale sus-jacente et la nappe de Beauce est effective dans la partie ouest du Val d'Orléans. Dans la partie Est, la formation des argiles de Sologne s'intercale entre ces deux aquifères, rendant la nappe des calcaires localement captive (Martin et Noyer, 2003). La nappe s'écoule vers la Loire et les vitesses d'écoulement y sont assez importantes.

## 5.2. DONNEES DU SOUS-SOL DISPONIBLES AU NIVEAU DE LA METROPOLE D'ORLEANS

#### 5.2.1. Modèles géologiques et géométrie des calcaires de Beauce

Un travail de modélisation a été réalisé entre 2010 et 2011 afin de proposer une représentation en trois dimensions des principales formations aquifères à l'échelle régionale. Le modèle a été construit grâce aux connaissances géologiques et à l'interprétation de nombreux ouvrages du sous-sol. Il a été révisé en 2018-2019 pour intégrer de nouveaux aquifères plus profonds (Salquèbre et al. 2019). Actuellement ce modèle permet de représenter les structures géologiques des alluvions récentes jusqu'aux formations du Jurassique inférieur. L'échelle de travail, relativement grossière, à la maille 500 m x 500 m permet d'identifier les toits et murs des principales formations géologiques. Le modèle ne permet pas en revanche d'avoir une connaissance des variations latérales des facies et il ne prend pas en considération la nature des aquifères (présence de fissuration ou de porosité matricielle par exemple). Il peut être consulté directement sur l'espace cartographique du SIGES Centre http://sigescen.brgm.fr.

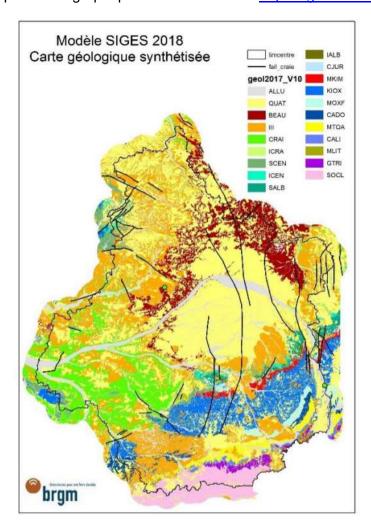


Figure 24 : Carte géologique au 1 : 50 000 synthétisée pour la réalisation du modèle

Les calcaires de Pithiviers, sus-jacents aux formations des calcaires d'Etampes, sont caractérisés dans la métropole Orléanaise par des épaisseurs variant principalement entre 13 et 24 mètres (1er et 3ème quartile) d'après le modèle géologique disponible au nord de la métropole (Salquèbre

et al. 2019). La profondeur de ces calcaires de Pithiviers est comprise entre 10 et 20 mètres au nord et au sud de la métropole (jusqu'à 30 mètres au nord et au-delà dans l'extrémité sud de la métropole) et autour de 10 mètres de profondeur dans le Val et les alentours de la Loire et du Loiret (Figure 25).

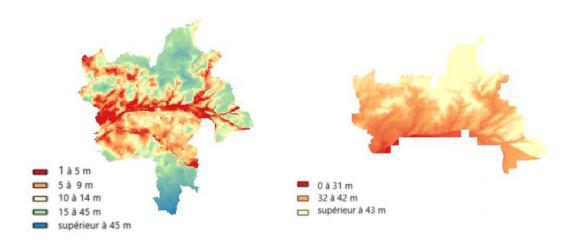


Figure 25 : Profondeur du toit des calcaires de Beauce en mètres estimé à partir de la différence entre la topographe et le toit des calcaires de Pithiviers (à gauche) et le toit des calcaires d'Etampes au Nord de la métropole (à droite).

Les calcaires d'Etampes sous-jacents sont plus profonds, autour de 30 à 40 mètres de profondeur au nord de la métropole d'après le modèle géologique révisé de 2019 (cf. Figure 25) dans le nord de la métropole. On ne dispose pas d'information sur la profondeur du toit des calcaires d'Etampes au sud de la Loire mais les forages indiquent des valeurs similaires à celles trouvées dans le nord de la métropole.

#### 5.2.2. Modèles hydrogéologiques et cartographies piézométriques

Plusieurs modélisations hydrogéologiques et cartes piézométriques ont été produites dans le secteur de la métropole d'Orléans au niveau de la nappe de Beauce au Nord d'Orléans (J.-C. Martin, Giot, and Le Nindre 1999) et du Val d'Orléans avec les études de (Hoareau, Gillard, and Larthette 2018; J. C. Martin et al. 2003; Binet, Auterives, and Charlier 2010) ou encore le suivi des piézomètres présents dans le même secteur (Salquèbre 2017).

On distingue ainsi 4 secteurs sur la métropole tel qu'identifié en Figure 26, sur lesquels différentes cartographies piézométriques ont été considérées.

Dans le secteur sud d'Orléans (n°1 en Figure 26), seul un piézomètre est présent au niveau de la commune d'Ardon. Le suivi est limité et n'a pas permis de réaliser une cartographie des niveaux d'eaux dans le secteur.

Au nord de la métropole (secteur n°2), des cartes régionales ont été produites en 1994 pour la piézométrie des calcaires de Beauce en période de basses eaux et en 2004 pour la piézométrie en période de hautes eaux qui sont issues de campagnes régionales de mesures et de gestion de la nappe de Beauce.

Plusieurs études hydrogéologiques récentes ont été réalisées dans le secteur du Val d'Orléans (secteur n°4) et la partie plus au sud du Val (n°3) et permettent ainsi d'avoir une bonne connaissance du niveau d'eau dans la nappe de Beauce dans les deux secteurs au Sud de la Loire et dans les alluvions pour le secteur du Val. Ces cartes piézométriques sont disponibles dans l'espace cartographique du SIGES Centre Val de Loire.

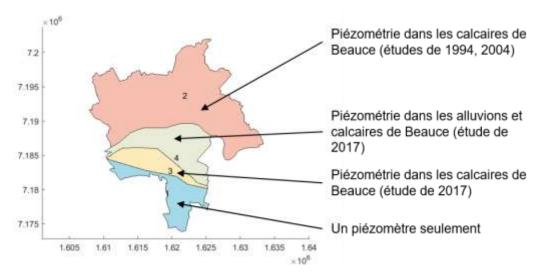


Figure 26 : Type de piézométrie considérée pour l'étude en fonction des données disponibles par secteur

Les données ont été retraitées pour cette étude afin de fournir des cartographies interpolées sur l'ensemble de la métropole des niveaux piézométriques dans les calcaires et dans les alluvions (Figure 27, Figure 28, Figure 29).

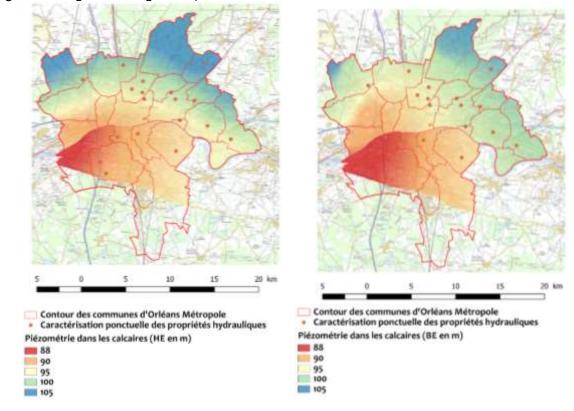


Figure 27 : Piézométrie en période de hautes eaux et de basses eaux dans la nappe des calcaires de Beauce interpolé sur la métropole d'Orléans (d'après cartes 1994 et 2004, voir SIGES)

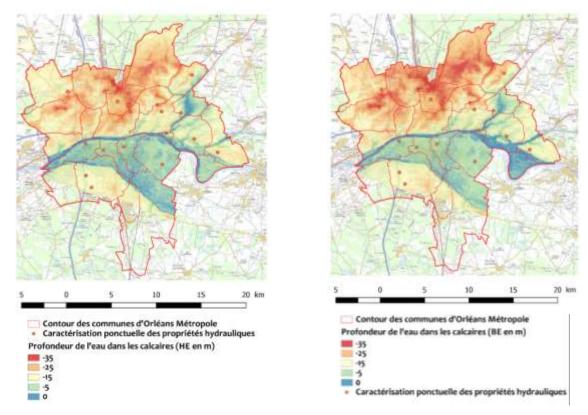


Figure 28 : Profondeur du niveau statique d'eau (par rapport au niveau topographique) en période de hautes eaux et de basses eaux dans la nappe des calcaires de Beauce interpolé sur la métropole d'Orléans (d'après cartes piézométriques de 1994 et 2004, voir SIGES)

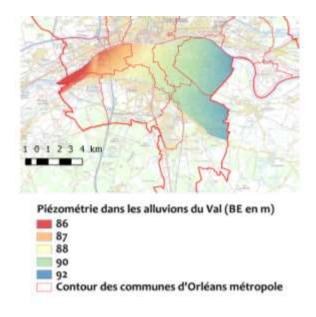


Figure 29 : Piézométrie des alluvions dans le Val d'Orléans en période de basses eaux (BE) et de hautes eaux (HE) d'après étude 2017 (Hoareau, Gillard, and Larthette 2018)

#### 5.2.3. Paramètres du sous-sol

Une synthèse des données hydrodynamiques a été menée dans le cadre de l'étude du potentiel géothermique au niveau de la métropole à partir des 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), des informations disponibles dans la base ADES et à partir des données répertoriées sur le site du SIGES et geothermies.fr.

#### 5.2.4. Caractéristiques hydrodynamiques

La BSS Centre Val de Loire contient 58 901 ouvrages, 47 600 sont des points d'eau et 44 243 ont au moins un document numérisé. Sur le secteur d'Orléans-Métropole on dénombre 4 034 ouvrages dans la BSS dont 714 possèdent des documents de type « pompage ». Parmi ces derniers, on dénombre 26 ouvrages AEP (Figure 30) qui présentent des documents de type pompage (essai de nappe et essai de pompage). A titre indicatif, à l'échelle régionale on dénombre 1096 ouvrages AEP.

Parmi les 26 ouvrages d'eau recensés, 13 captent les masses d'eau multicouches de la craie du Séno-Turonien et des calcaires de Beauce sous forêt d'Orléans captifs et 13 captent les masses d'eau multicouches de la craie et des calcaires de Beauce libres. Les profondeurs des forages d'eau varient entre 17 et 110 m/sol et les profondeurs des niveaux statiques varient entre 1,6 et 34,36 m/sol (Figure 31). Les dates de réalisation des essais varient entre 1936 et 1996 (Figure 32).

Des analyses sont disponibles pour un certain nombre de ces ouvrages et permettent d'obtenir des informations sur les propriétés intrinsèques des aquifères de Beauce (débit d'exploitation, rabattement et débit spécifique, transmissivité, coefficient d'emmagasinement, conductivité hydraulique).

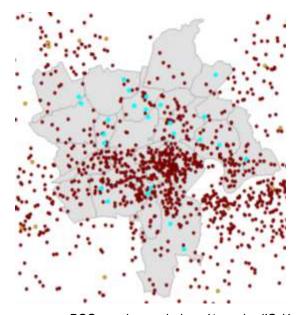


Figure 30 : Localisation des ouvrages BSS au niveau de la métropole d'Orléans (rouge) et des 26 points d'eau utilisés pour la caractérisation des propriétés hydrodynamiques (bleu)

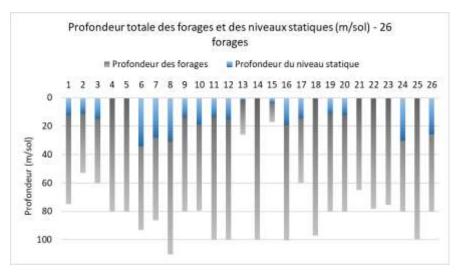


Figure 31 : Profondeur totale et niveaux statiques observés dans les ouvrages AEP situés sur la métropole d'Orléans

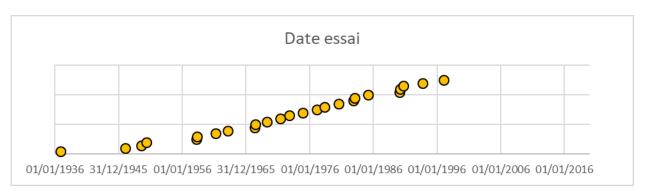


Figure 32 : Dates de réalisation des essais de production dans les ouvrages AEP recensés au niveau de la métropole d'Orléans

Parmi les 26 ouvrages AEP, on retrouve :

- 7 ouvrages inconnus, sans données ou rapports disponibles sur le site de l'ARS
- 26 ouvrages avec documents en BSS
- 18 ayant des données relatives à un essai de puits dont :
  - 18 débits spécifiques évalués (débit rapporté au niveau de rabattement de la nappe)
  - 3 débits critiques évalués (débit à ne pas dépasser en exploitation)
- 25 avec données relatives à un essai de nappe (EDN) dont :
  - 25 débits spécifiques évalués (rapportés à la durée de pompage de l'essai de « longue durée »)
  - 11 ouvrages avec EDN non interprétés
  - o 8 ouvrages dont la méthode d'interprétation est inconnue (non mentionnée)
  - o 3 ouvrages dont la méthode d'interprétation est Cooper-Jacob
  - Cela conduit à l'estimation de 13 transmissivités et 5 coefficients d'emmagasinement

L'analyse des essais de nappe montre des débits variables lors des essais entre 45 et 1050 m³/h, les débits spécifiques estimés sont compris entre 35 et 750 m³/h/m pour des durées d'essai variables entre 2 et 78 heures (Figure 33).

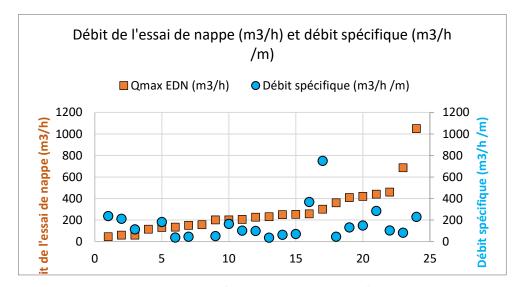


Figure 33 : Débit des essais de nappe en m³/h et débit spécifique m³/h/m pour les 26 ouvrages d'eau considérés

#### Transmisivités:

Les essais montrent des valeurs de transmissivité (perméabilité multiplié par l'épaisseur productrice) entre 3.10<sup>-3</sup> m²/s et 3.10<sup>-1</sup> m²/s et la transmissivité moyenne est de 9.10<sup>-2</sup> m²/s. La capacité des aquifères à mobiliser l'eau qu'elles contiennent est ainsi bonne sur l'ensemble de la métropole. Les coefficients d'emmagasinement sont compris entre 5.10<sup>-4</sup> et 0,1. La Figure 34 illustre les distributions spatiale et statistique des valeurs estimées.

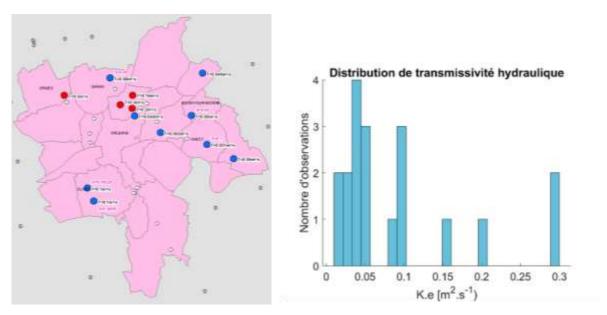


Figure 34 : Distribution des transmissivités (T) et des coefficients d'emmagasinement d'après les essais de nappe sur les ouvrages d'eau de la métropole d'Orléans

On notera que certaines valeurs élevées de transmissivité peuvent être influencées par la présence de karst dans les formations des calcaires de Beauce (notamment les valeurs supérieures à 0.1 m²/s).

La localisation des ouvrages et la distribution des valeurs de transmissivité et de coefficient d'emmagasinement (Figure 34) ne permet pas de proposer une interpolation spatiale des valeurs

sur l'ensemble de la métropole. Il a été choisi pour le reste de l'étude de ne pas tenir compte de la variabilité de la transmissivité pour les calcaires de Beauce (indifféremment des calcaires d'Etampes ou de Pithiviers).

#### Conductivité hydraulique :

A partir des valeurs de perméabilité et des propriétés du fluide, la conductivité hydraulique K (en m/s) des formations calcaires sur la métropole a été recalculée. La conductivité hydraulique K [m/s] permet d'exprimer la capacité d'un milieu poreux à laisser s'écouler un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Elle s'exprime tel que :

$$K = \frac{k \rho g}{\mu} \tag{5-1}$$

où k représente la perméabilité intrinsèque du milieux poreux (en m²),  $\rho$  correspond à la masse volumique du fluide (en kg/m³), g représente l'accélération de la pesanteur (en m/s²) et  $\mu$  représente la viscosité du fluide (en Pa.s). La Figure 35 présente la distribution statistique de la conductivité hydraulique basé sur 19 ouvrages présents sur la métropole d'Orléans. Pour la suite de l'étude on retiendra les valeurs du premier et dernier quartile ainsi que la valeur médiane de la conductivité, respectivement 1,17.10³ m/s, 3,98.10³ m/s et 1,41.10³ m/s.

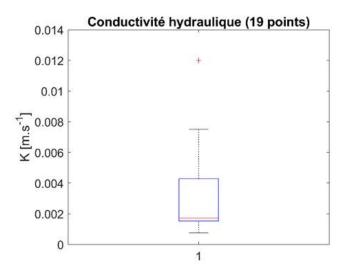


Figure 35 : Distribution statistique des valeurs de conductivité hydraulique d'après 19 points de mesure sur la métropole d'Orléans

#### Vitesses d'écoulement dans les nappes

L'analyse des cartes piézométriques a également permis de définir la vitesse d'écoulement de l'eau dans les calcaires de Beauce. La vitesse d'écoulement est définie, d'après les formulations des écoulements issues de la loi de Darcy, comme :

$$v = \frac{Q}{S} = K \frac{(H1 - H2)}{L}$$
 (5-2)

v représente la vitesse d'écoulement en m/s, S la section totale offerte à l'écoulement, K la conductivité hydraulique de l'aquifère en m/s et  $H_i$  la hauteur d'eau à l'isopièze i et L la distance entre deux isopièzes. Le rapport  $i=(H_1-H_2)/L$  correspond au gradient de charge hydraulique qui est calculé grâce aux cartes piézométriques en mesurant la distance entre 2 courbes isopiézométriques consécutives (hydro-isohypses) et la différence d'altitude entre les deux isopièzes.

L'analyse des cartes piézométriques donne une indication sur les vitesses d'écoulement dans les nappes (i.e. gradient hydraulique). A l'échelle de la métropole, les gradients hydrauliques sont relativement importants, avec une valeur médiane de l'ordre de 0,075 % en basse eaux et 0,135 % en haute eaux (cf. Figure 36). Pour les modélisations thermo-hydrauliques qui suivent, on considère des valeurs de charge hydraulique moyenne annuelle (entre hautes eaux et basses eaux) suivante : 0,091 % (premier quartile), 0,140 % (médiane) et 0,200 % (dernier quartile).

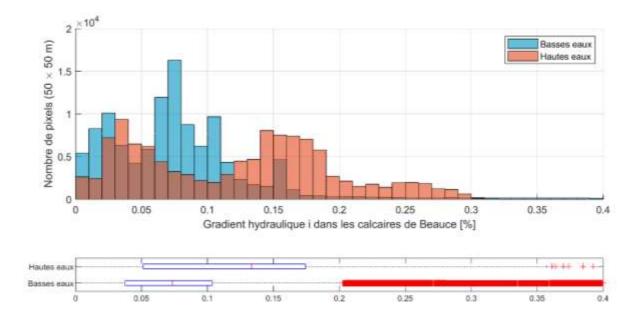


Figure 36 : Distribution de gradient dans les calcaires de Beauce en basses eaux et hautes eaux sur les zones retraitées (n° 2, 3 et 4)

Dans certains secteurs de la métropole d'Orléans, les vitesses d'écoulement sont comprises entre des valeurs de l'ordre de 35 à 100 m/a en basses eaux, et 65 à 180 m/a en hautes eaux (cf. Figure 37). Il s'agit de vitesses considérables.

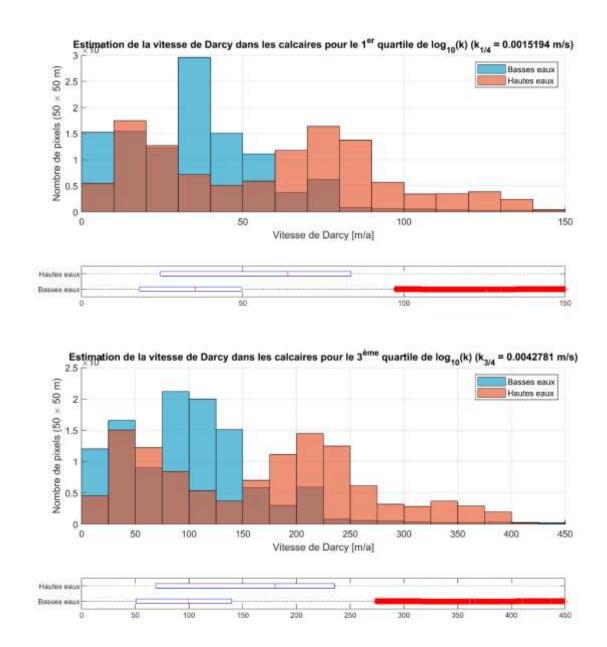


Figure 37 : Distribution de la vitesse de Darcy dans les calcaires de Beauce en basses eaux et hautes eaux sur les zones retraitées (n° 2, 3 et 4), pour deux hypothèses de propriétés hydrauliques : valeur basse (en haut), valeur élevée (en bas)

#### 5.2.5. Température de l'eau mesurée dans les Calcaires de Beauce

Peu de données de température des aquifères ont été répertoriées suite à l'interrogation des bases de données ADES. Deux ouvrages disposent de données de qualité et température des eaux. Le premier ouvrage (id BSS 03631X0099) se situe sur la commune de Gidy, au nord de la métropole et le second (id BSS 04302X0101) se situe sur la commune de Chaumont-sur-Tharonne, proche de la Ferté Saint Aubin au sud de la métropole. Le forage de Gidy atteint les calcaires de Beauce entre 10 et 50 mètres de profondeur, le forage de la Chaumont-sur-Tharonne atteint les calcaires de Beauce entre 50 et 80 mètres de profondeur. L'aquifère des calcaires de Beauce est captif au niveau des deux ouvrages et présente des températures de 12,7°C

(enregistré en juillet 2006) pour le forage de Gidy et 13,3°C (en septembre 2019) pour le forage de Chaumont-sur-Tharonne (cf. Figure 38 et Figure 39)

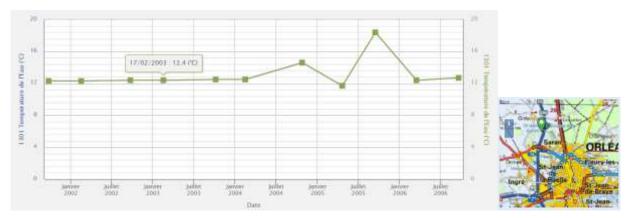


Figure 38 : Donnée de température de l'eau au puits 03631X0099, situé sur la commune de Gidy, issue du Portail national des eaux souterraines (https://ades.eaufrance.fr)

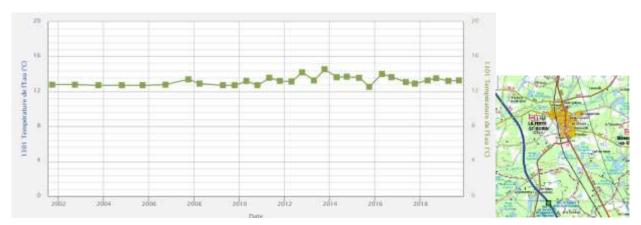


Figure 39 : Donnée de température de l'eau au puits 04302X0101, situé au sud de la commune de La Ferté Saint Aubin, issue du Portail national des eaux souterraines (https://ades.eaufrance.fr)

#### 5.2.6. Tests de réponse thermiques

Le Test de Réponse Thermique (TRT) est une procédure permettant d'estimer les propriétés thermiques des terrains traversés par les sondes géothermiques verticales afin d'en optimiser le dimensionnement. Le TRT consiste à faire circuler un liquide caloporteur (généralement de l'eau) en lui apportant une puissance thermique constante et à enregistrer la température, pendant typiquement 70 à 100 h (Reiss, Maragna, and Monnot 2012). L'interprétation de la température enregistrée permet de déduire la température initiale du terrain  $T_0$  [°C], la conductivité thermique du terrain  $\lambda$  [W/K/m] et la résistance thermique du forage  $R_f$  [K.m/W]. On en recensé 3 sondes (profondes de 100 m pour A et B, 93 m pour C) faisant l'objet d'un TRT sur le territoire de la métropole (cf. Figure 40).



Figure 40 : Tests de réponse thermique dans la métropole (https://www.geothermies.fr/viewer/)

L'interprétation du TRT de Saint-Jean-de-la-Ruelle (noté A sur la Figure 40) a donné une conductivité thermique du terrain  $\lambda$  = 36,64 W/K/m. Pour des roches sédimentaires, la norme SIA-384/6 indique des valeurs typiques de 1,5 à 4,0 W/K/m. Une valeur aussi élevée s'explique probablement par un écoulement souterrain à une vitesse très significative, à même de dissiper une quantité de chaleur significative pendant l'injection de chaleur. Cet écoulement n'est pas pris en compte dans l'interprétation habituelle, ce qui tend à surévaluer la conductivité thermique apparente (Molina-Giraldo, Bayer, and Blum 2011). La température (communiquée par le bureau d'études Ventilone qui a réalisé ce TRT) ne suit pas le comportement habituel d'une droite en fonction du logarithme du temps, mais une fonction concave qui tend vers un plateau (cf. Figure 41b).

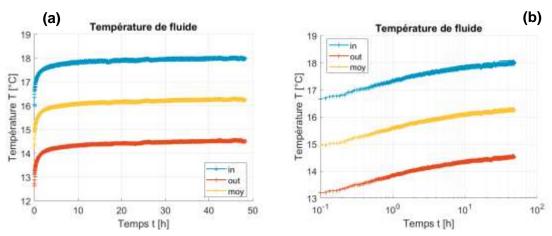


Figure 41 : TRT de Saint-Jean-de-la-Ruelle : Evolution de la température en entrée (in) et sortie (out) de sonde géothermique. Temps en échelle logarithmique à droite. Source : Ventilone.

Le TRT de Saint-Jean-de-la-Ruelle montre qu'en certaines zones de la métropole, des écoulements souterrains peuvent significativement affecter la température des sondes géothermiques verticales. Ceci semble cohérent avec le modèle géologique régional qui indique une épaisseur de calcaire de 50 m, la moitié de la longueur du forage étant donc traversée par le calcaire de Beauce (cf. Figure 42). A noter que la coupe de ce forage n'est pas présente en BSS.

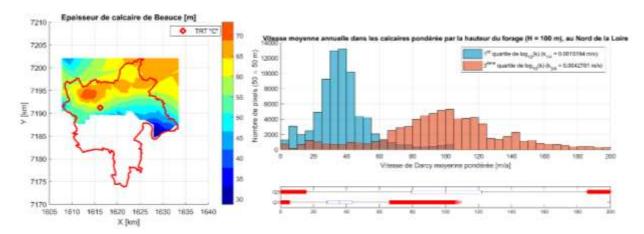


Figure 42 : Epaisseur de calcaire de Beauce d'après le modèle géologique régional (à gauche) ; vitesse moyenne de l'écoulement sur la hauteur d'un forage profond de 100 m pour deux valeurs de conductivité hydraulique (à droite) dans l'emprise du modèle géologique.

Les données hydrogéologiques disponibles ne permettent pas de localiser ces zones au sein de la métropole. Dans ce qui suit, on retient comme conductivité thermique du terrain la moyenne des TRT « B » et « C », soit  $\lambda$  = 1,85 W/K/m, et on négligera l'écoulement souterrain dans l'estimation du potentiel des sondes verticales.

### 6. Estimation du potentiel géothermique sur nappe

Une étude de sensibilité à partir de modélisations hydrodynamiques et thermiques de l'exploitation d'un doublet géothermique sur nappe a été réalisée pour évaluer le potentiel géothermique sur la métropole pour différentes configurations du sous-sol et pour différents scénarios d'exploitation.

Les paragraphes ci-après présentent la méthodologie proposée pour définir le potentiel, les limites de cette méthode, les outils pour son application ainsi que les résultats des simulations et des croisements avec les besoins énergétiques exprimés sur la métropole d'Orléans.

## 6.1. METHODOLOGIE POUR LA DEFINITION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE SUR NAPPE

#### 6.1.1. Description

L'étude de sensibilité a permis de réaliser et d'analyser une multitude de modèles hydrodynamiques et thermiques de l'exploitation des nappes par doublet. Le résultat de ces 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 vont ensuite être définies pour les différents modèles produits et pour différents seuils de perturbation par rapport à la température initiale de l'aquifère (seuil de 0,5°C, de 1 °C et de 2°C). Ces zones vont permettre par la suite de proposer un positionnement optimisé des opérations dans un secteur donné, sans perturber et interférer entre les systèmes. Suite au croisement de ces informations avec les besoins énergétiques exprimés sur la métropole, une gamme d'énergie extraite (en chaleur et en froid géothermal) va être définie par secteur.

Le choix de cette approche par analyse de sensibilité a été proposé afin de pallier au manque de modèle géologique et hydrogéologique des formations superficielles couvrant l'ensemble de la métropole ainsi qu'au nombre relativement limité d'essais de pompage (cf. section 5.2). Ce type d'étude permet également de considérer les incertitudes liées aux paramètres du sous-sol estimés à partir des essais de pompages disponibles (cf. exemple pour les valeurs de transmissivité sur la métropole en Figure 34). Cette étude, à l'échelle du doublet, permet également d'identifier les paramètres influents sur le comportement des aquifères lors de leur sollicitation pour la production de chaleur et de froid géothermal.

La fiabilité de cette méthode par modélisation numérique repose en grande partie sur la bonne productivité des aquifères ciblés sur l'ensemble de la métropole Orléanaise observée durant les essais de pompage et grâce aux nombreux doublets en exploitation dans la métropole. En effet, on dénombre plus de 77 doublets sur nappe d'après l'interrogation de la banque de données du sous-sol sur 155 opérations de géothermie identifiées (Figure 44).

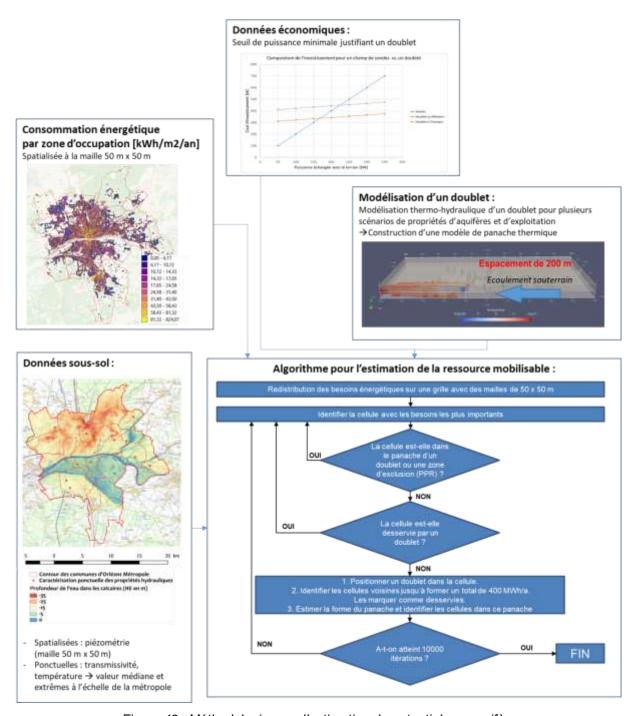


Figure 43 : Méthodologie pour l'estimation du potentiel sur aquifère

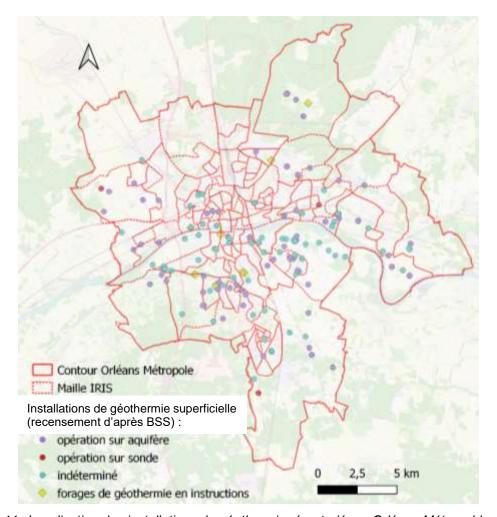


Figure 44 : Localisation des installations de géothermie répertorié sur Orléans Métropolde d'après l'intérogation de la banque de donnée du sous-sol (BSS)

Les paramètres considérés pour l'étude de sensibilité sont :

- 1) le type d'aquifère considéré et donc les épaisseurs des aquifères,
- 2) les paramètres hydrodynamiques qui en découlent,
- 3) les <u>espacements entre ouvrages de production et d'injection</u> et enfin
- 4) les <u>scénarios d'exploitation</u> (i.e. les puissances extraites variables, les proportions entre période de chauffe et de climatisation variables).

#### 6.1.2. Limites de l'étude

Cette approche ne permet pas en revanche de représenter avec exactitude la géométrie et les propriétés du sous-sol en tout point de la métropole ou de représenter la complexité des écoulements dans les karsts que l'on trouve en bordure de Loire et dans le Val d'Orléans. La méthode appliquée n'a pas pour objectif de modéliser fidèlement l'impact des exploitations sur le sous-sol en tout point de la métropole mais de quantifier la variabilité des réponses possibles. La caractérisation de la géologie et des propriétés hydrogéologiques devra être réalisé par un bureau d'étude compétent avant tout projet de développement pour vérifier la compatibilité du projet suivant la localité et dimensionner l'exploitation suivant les besoins exprimés. Les différences de coût d'accès à la ressource en différents points de la métropole ont été abordés lors de l'étude économique réalisée par Utilities Performance (cf. section 4) de façon globale sur la métropole pour identifier différentes configurations. Les éléments obtenus donnent des indications sur le

coûts d'accès à la ressource sur le secteur de la métropole. 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. Les études pourront également s'appuyer sur le retour d'expérience réalisé dans le cadre de la convention avec Orléans métropole (rapport BRGM/RP-69208-FR) afin d'identifier les problématiques locales à considérer lors de nouveaux projets. L'étude présentée apporte en revanche des indications sur la quantité de chaleur et puissances extractibles à l'échelle d'une maille de 50 m x 50 m à partir des données disponibles du sous-sol (cf. section 5.2) et de l'évaluation des besoins énergétiques (cf section 2).

Les paragraphes suivants présentent les modèles thermo-hydrodynamiques utilisés pour l'étude du potentiel géothermique sur nappe, les résultats des simulations et enfin le croisement entre les données liées à la ressource et les besoins énergétiques identifiés sur la métropole. 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 rares données disponibles, la température initiale est établie à 12°C. La température de réinjection va dépendre du delta de température défini dans les chroniques présentés en Figure 45. Elle sera de -4 °C par rapport à la température produite en période hivernale (production de chaleur) où de +4 °C par rapport à la température de production en période estivale pour le rafraichissement des bâtiments.

Les propriétés définies dans le modèle pour le fluide, les formations géologiques et les ouvrages

sont données ci-dessous (Tableau 4).

Propriétés	Unités	Valeur		
Diamètre des forages	cm	24,4		
Porosité des épontes imperméables	%	45		
Porosité des calcaires	%	15		
Perméabilité des épontes	m²	1.10 <sup>-18</sup>		
Conductivité thermique totale	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	2		
Chaleur spécifique des roches	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	833		
Chaleur spécifique de l'eau	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	4180		
Densité des roches	kg.m³	2680		

Tableau 4 : Propriétés définies dans les modélisations

#### Paramètres sensibles testés

Plusieurs paramètres sensibles et incertains peuvent être identifiés lors de la réalisation de la modélisation numérique hydrothermale. Ce sont des paramètres qui vont avoir un fort impact sur

les écoulements souterrains et les variations de température attendues dans l'aquifère suite à l'exploitation. L'étude de sensibilité a permis de faire varier ces paramètres de façon indépendante pour caractériser et quantifier de façon précise l'impact qu'ils ont sur le comportement de l'aquifère après plusieurs cycles d'exploitation simulés.

Les paramètres considérés pour l'étude de sensibilité sur la métropole d'Orléans sont listés cidessous avec les valeurs testées pour chacun d'entre eux.

- Aquifère considéré et géométrie associée :
  - maillage de l'aquifère des calcaires de Pithiviers avec une épaisseur utile de 25 mètres et une pression de référence de 2 bars ;
  - maillage de l'aquifère des calcaires d'Etampes avec une épaisseur utile de 40 mètres et une pression de référence de 3 bars.
- Chronique d'exploitation (besoins en chaud et en froid en kW, débit d'exploitation en m³/h et écart de température en la source chaude et la source froide en °C):
  - o cas n°1 : ensemble de maisons peu isolées, sans climatisation ;
  - o cas n°2 : ensemble de bureaux peu isolés, peu de climatisation ;
  - o cas n°3 : ensemble de bureaux isolés (récents) avec climatisation et chauffage du même ordre de grandeur.
- Puissance maximale de chauffage et de rafraichissement produite en kW :
  - o 500 kW;
  - o 350 kW;
  - o 200 kW.
- Conductivité hydraulique en m/s :
  - o premier quartile 3,98.10<sup>-3</sup> m/s;
  - o médiane 1,41.10<sup>-3</sup> m/s;
  - o dernier quartile 1,17.10<sup>-3</sup> m/s
- Gradient hydraulique en %:
  - o premier quartile 0,20 %;
  - o médiane 0,14 %;
  - o dernier quartile 0,0915 %.
- Espacement entre ouvrages d'injection et de production en m :
  - o 100 m;
  - o 150 m;
  - o 200 m.

Les chroniques d'exploitation présentées en Figure 45 ont été calculées pour une pompe à chaleur avec un coefficient de performance (COP) de 4,3, une température en sortie de condenseur de 45°C, une température en sortie d'évaporateur de 37°C et un chaleur volumique de l'eau de 1,16 kWh/m³/k.

Les paramètres identifiés ci-dessus ont été testés indépendamment pour comprendre l'impact que chacun d'entre eux à sur les écoulements souterrains et la distribution du panache de température autour du puits de réinjection après 10 cycles d'exploitation correspondant à 10 années. Les résultats de l'étude de sensibilité sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

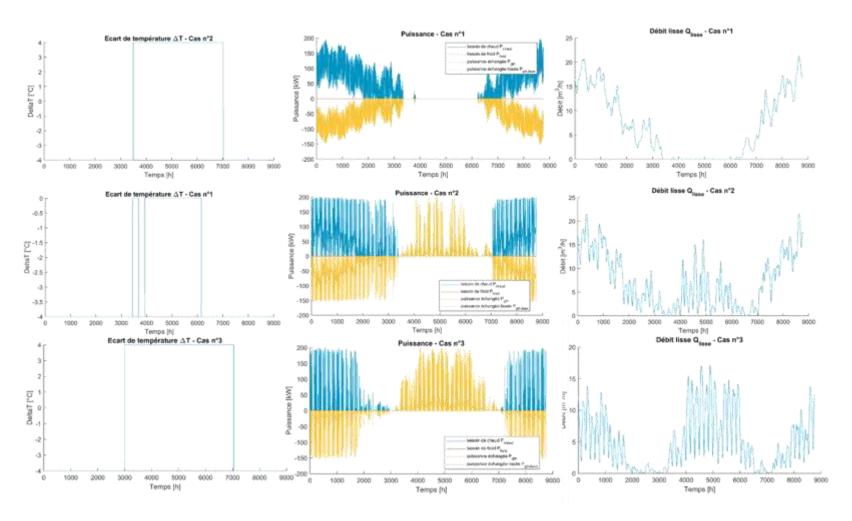


Figure 45 : Chroniques d'exploitation testées pour l'étude de sensibilité - le cas n°1 correspond à une maison peu isolée avec des besoins en chauffage uniquement, le cas n°2 à un bureau isolé avec quelques besoins en climatisation et le cas n°3 à un bureau isolé avec des besoins équilibrés en chaleur et rafraichissement pour une puissance maximale appelée de 200 kW.

NB : les graphiques de gauche représentent le différentiel de température entre source chaude et source froide, ceux du centre les besoins en chaud et en froid exprimés en puissance et ceux de droites les débits prélevés à la source.

#### 6.1.4. Conditions aux limites et conditions initiales

#### Conditions aux limites

Pour que les modélisations puissent converger, des conditions aux limites de Dirichlet ont été définies dans le modèle. Sur l'ensemble des sommets des mailles constituant les bordures Est, Nord et Ouest du modèle (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) on va de cette façon imposer u ne valeur de pression et de température constante. La température est imposée à 12°C et la pression imposée sera définie en fonction de la géologie considérée (calcaires de Pithiviers ou d'Etampes, cf. section 6.1.3).

#### Conditions initiales

La température initiale est constante dans le modèle, on considère ici que l'influence du gradient géothermal (généralement autour de 0,03°C/m) est limitée étant donné les faibles épaisseurs considérées (20 et 45 mètres respectivement dans les calcaires de Pithiviers et d'Etampes).

Comme identifié en section 5.2 et d'après l'analyse des niveaux piézométriques et des gradients hydrauliques, il apparait que les vitesses d'écoulement dans les nappes calcaires au droit de la métropole sont relativement élevées (plusieurs dizaines de m/an).

D'après ce constat, la pression initiale du modèle a été définie comme une fonction linéaire suivant l'horizontale pour représenter les écoulements dans la nappe. Etant donné les faibles épaisseurs de formation, on considère que l'impact du gradient hydrostatique de pression est négligeable par rapport à l'effet des écoulements horizontaux dans les formations. La Figure 46 présente l'état initial en pression dans le cas d'un gradient hydraulique de 0.14 % dans les calcaires d'Etampes suivant l'axe X du modèle de la droite vers la gauche. L'ouvrage d'injection sera positionné en aval du courant afin d'éviter tout recyclage thermique au niveau de l'ouvrage de production (Figure 47).

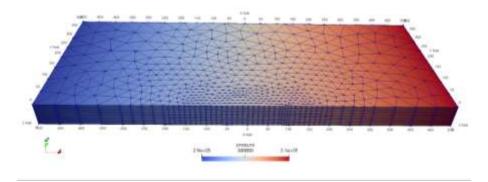


Figure 46 : Illustration des conditions initiales en pression imposées à partir d'un gradient hydraulique de 0,14 % dans les calcaires d'Etampes suivant l'axe X

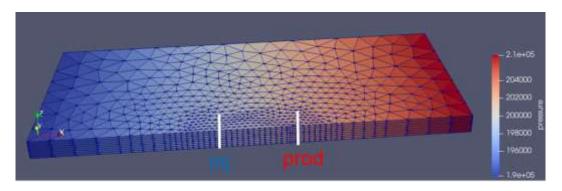


Figure 47 : Localisation des ouvrages dans le maillage défini pour les modélisations thermohydrodynamiques

#### 6.2. RESULTATS DES SIMULATIONS

Plus de 34 modèles ont été produits et analysés dans le cadre de l'étude de sensibilité afin d'étudier l'impact de chacun des paramètres sélectionnés sur l'évolution des panaches de températures dans les aquifères sollicités pour l'exploitation de la ressource géothermale sur nappe. Ces éléments ont ensuite permis d'estimer une gamme de chaleur extractible espérée par géothermie sur nappe au niveau de la métropole d'Orléans.

## 6.2.1. Cas de référence d'exploitation dans les calcaires d'Etampes et dans les calcaires de Pithiviers

La Figure 48 et la Figure 49 présentent l'évolution de la température dans la nappe pour un cas donné. Il s'agit ici d'un doublet d'exploitation, espacé de 150 mètres et fournissant de la chaleur en majeure partie et du froid avec une puissance maximale appelée de 500 kW (chronique n°2 voir Figure 45) dans les calcaires d'Etampes. La conductivité hydraulique est  $K = 1,78.10^{-3}$  m/s et le gradient hydraulique est i = 0,14 %.

On remarque ici la succession de bulles chaudes autour de 16°C (représenté par la couleur rouge) et de bulles froides autour de 8°C (bleu) due aux cycles estivaux de production de froid et hivernaux de production de chaleur respectivement. Ces perturbations thermiques évoluent et se dissipent dans le sens des écoulements, de la droite vers la gauche. Après plusieurs années d'exploitation, le modèle montre que seules les perturbations des cycles de production de chaleur et de rafraichissement de l'année présente sont visibles et cela dans un périmètre relativement proche du puits d'injection. En effet, la perturbation thermique ne s'étend pas en profondeur dans l'aquifère et se dissipe rapidement sous l'effet du fort écoulement souterrain existant dans les calcaires. Il n'y a pas de recyclage thermique ni de perturbation de pression au niveau du puits de production.

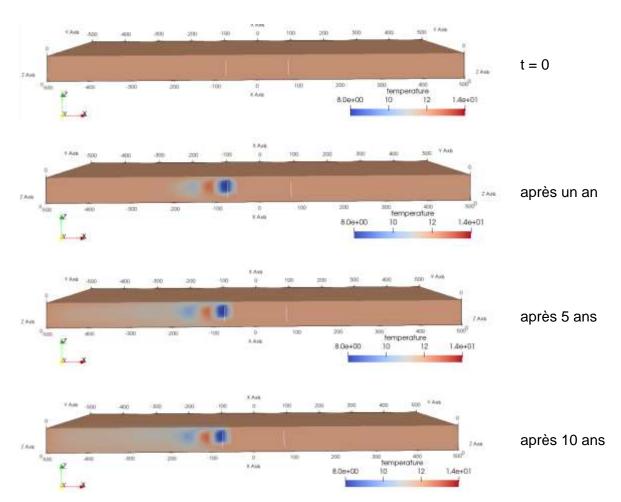


Figure 48 : Evolution du panache de température au niveau du forage de réinjection à t=0, après un an, 5 ans et 10 ans de cycle de chauffage/rafraichissement (chronique n°2 cf. Figure 45) dans les calcaires d'Etampes

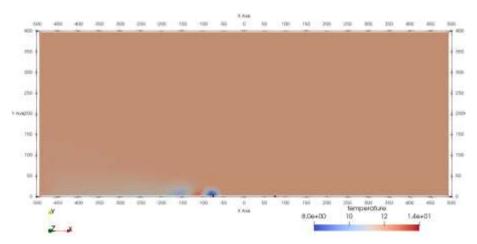


Figure 49 : Coupe horizontale du modèle montrant l'évolution du panache de température pour le cas présenté en Figure 48

Pour chaque simulation réalisée, la zone de perturbation thermique autour de l'ouvrage d'injection a été étudié. Cette zone située autour du doublet et plus précisément autour du forage d'injection

constitue un espace qui ne pourra pas être valorisé 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.

Les figures suivantes (Figure 50 et Figure 51) présentent les évolutions des températures dans le cas de référence d'exploitation géothermale dans les calcaires de Pithiviers. On observe, comme dans le cas précédent une succession des phases de chauffe et de rafraichissement. La pénétration de la bulle thermique est un peu plus marqué que dans le cas de l'exploitation des calcaires d'Etampes puisque l'épaisseur de formation est dans le cas présenté ici nettement plus faible (25 m contre 45 m dans le cas précédent).

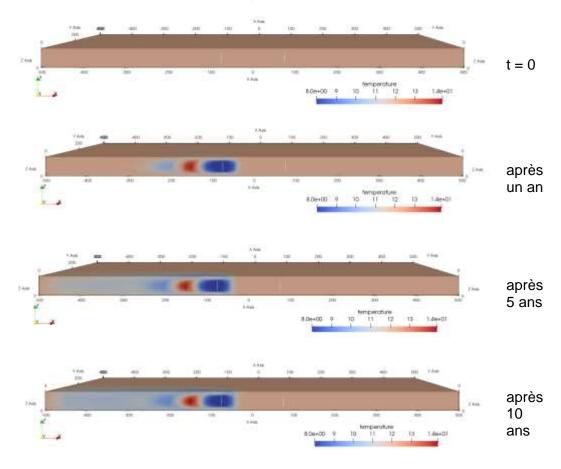


Figure 50 : Evolution du panache de température au niveau du forage de réinjection à t=0, après un an, 5 ans et 10 ans de cycle de chauffage/rafraichissement (chronique n°2 cf. Figure 45) dans les calcaires de Pithiviers

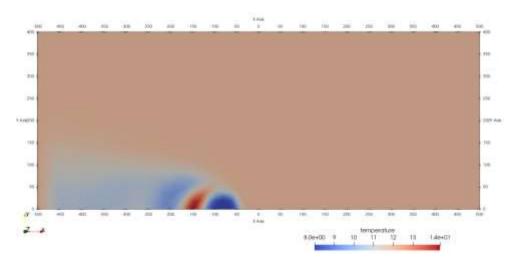


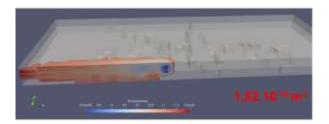
Figure 51 : Coupe horizontale du modèle montrant l'évolution du panache de température pour le cas présenté en Figure 50

#### 6.2.2. Influence des paramètres incertains sur l'évolution de la bulle froide

#### Influence de la conductivité hydraulique

Trois valeurs de conductivité hydraulique sont considérées lors de l'étude de sensibilité (cf. section 6.1.3) : 3,98.10<sup>-3</sup> m/s (premier quartile), 1,78.10<sup>-3</sup> m/s (médiane) et 1,41 10<sup>-3</sup> m/s (dernier quartile).

Pour un cas donné, plus la conductivité des formations aquifères est forte, plus l'extension de la bulle froide dans le sens de l'écoulement de la nappe sera faible (Figure 52). La nappe se recharge alors plus rapidement et la dissipation de la perturbation thermique est plus efficace.





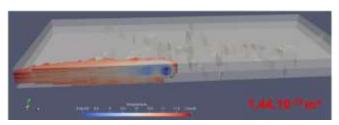
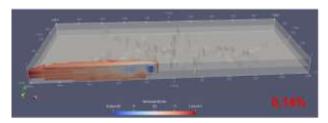


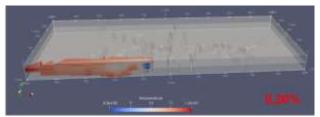
Figure 52 : Evolution du panache de température après 10 ans d'exploitation pour un delta de température de 0,5°C par rapport à la température initiale de l'aquifère et pour différentes valeurs de conductivité hydraulique. Cas de l'exploitation sur le calcaire d'Etampes pour des ouvrages espacés de 150 mètres, avec un gradient hydraulique de 0,14% et la chronique d'exploitation n°1 d'une maison peu isolée.

#### Influence du gradient hydraulique

Trois valeurs de gradient hydraulique sont considérées pour l'étude de sensibilité : 0,009% (dernier quartile), 0,14 % (médiane) et 0,20 % (premier quartile).

La Figure 53 présente les panaches de températures présentant une variation de 0,5°C par rapport à la température initiale de l'aquifère autour du puits d'injection pour différentes valeur de gradient hydraulique testés lors de l'étude de sensibilité dans un cas de référence donnée. L'extension de la bulle froide est d'autant plus importante pour les petites valeurs de gradient hydraulique. Pour la plus forte valeur de gradient hydraulique, la bulle froide semble se dissiper davantage aussi bien suivant l'axe de l'écoulement (axe X Figure 53) que dans le sens perpendiculaire à l'écoulement. La taille du panache reste en revanche relativement limitée après 10 ans d'exploitation





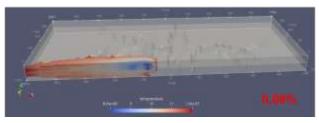


Figure 53 : Evolution du panache de température autour du puits d'injection, pour un delta de température de 0,5°C par rapport à la température initiale de l'aquifère après 10 ans d'exploitation en fonction du gradient hydraulique. Cas de l'exploitation sur le calcaire d'Etampes pour des ouvrages espacés de 150 mètres, avec une conductivité hydraulique de 1,78.10<sup>-3</sup> m/s et la chronique d'exploitation n°1 d'une maison peu isolée.

# Influence de la chronique d'exploitation considéré et de la puissance de chaud et/ou de froid produite

Trois chroniques d'exploitation ont été produites pour l'étude de sensibilité afin de représenter différents besoins de chaud et de froid. Elles sont présentées en Figure 45. La chronique n°1 correspond aux besoins exprimés pour une maison peu isolée, sans climatisation, la chronique n°2 correspond à des besoins majoritairement en chaud pour un bureau peu isolé et avec peu de climatisation et la chronique n°3 correspond à des besoins équilibrés en climatisation et chauffage pour un bureau isolé.

On remarque sur la Figure 54 que lorsque les besoins sont équilibrés en chaleur et en rafraichissement tel que modélisé dans la chronique n°3, l'impact du panache de température est très limité dans l'espace autour du forage d'injection. L'amplitude des variations de température est assez forte puisqu'à la réinjection on distingue des bulles froides de -4°C par rapport à la température initiale et des bulles chaudes de +4°C mais cette succession entre bulle chaude et bulle froide permet un retour aux températures initiales et donc à l'équilibre plus rapidement à l'aval de l'ouvrage d'injection.

Lorsque la proportion de besoin de chauffage devient plus importante que celle de besoin de froid (cf. chronique n°1 et n°2), il n'y a plus d'estompement du panache de température et l'impact de la bulle froide devient plus marqué selon le sens des écoulements.

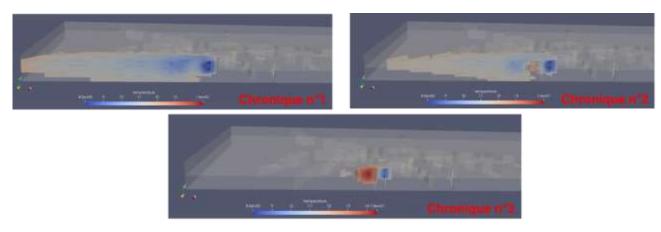
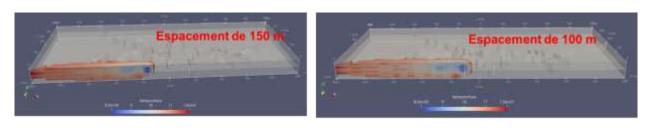


Figure 54: Evolution du panache de température autour du puits d'injection, pour un delta de température de 0,5°C par rapport à la température initiale de l'aquifère après 10 ans d'exploitation en fonction de la chronique d'exploitation (proportion chauffage/refroidissement). Cas de l'exploitation sur le calcaire d'Etampes pour des ouvrages espacés de 150 mètres, avec un gradient hydraulique de 0,14% et une une conductivité hydraulique de 1,78.10<sup>-3</sup> m/s.

#### Influence de l'espacement entre ouvrage

Les espacements de 200 mètres, 150 mètres et 100 mètres entre l'ouvrage d'injection et de production ont été étudiés afin d'estimer l'impact que peut avoir ce paramètre sur l'évolution du panache de température dans l'aquifère. Pour un cas de base donné, il s'avère que les variations d'espacement ont peu d'impact sur la taille du panache. Il n'y a aucun recyclage de l'eau injecté dans le puits de production dès 100 mètres d'espacement grâce au fort gradient hydraulique observé sur l'ensemble de la métropole. L'impact en température est visible jusqu'à 20 mètres en amont du forage d'injection pour l'ensemble des cas présentés ici (Figure 55).



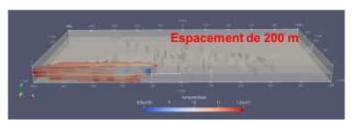


Figure 55: Evolution du panache de température autour du puits d'injection, pour un delta de température de 0,5°C par rapport à la température initiale de l'aquifère après 10 ans d'exploitation en fonction de la l'espacement entre injecteur et producteur. Cas de l'exploitation sur le calcaire avec un gradient hydraulique de 0,14% et une une conductivité hydraulique de 1,78.10<sup>-3</sup> m/s pour une maison peu isolé (chronique n°1).

D'après les observations faites il est donc préférable, pour limiter l'emprise des doublets, de favoriser des espacements moins importants (de 100 ou 150 mètres) entre les ouvrages injecteurs et producteurs.

#### Influence de la géométrie des formations ciblés

Deux géométries ont été étudiés : celle permettant de représenter les formations des calcaires de Pithiviers et celle des calcaires d'Etampes. Les deux aquifères ciblés pour l'exploitation géothermale diffèrent en géométrie (profondeurs différentes) mais aussi en charge hydraulique. La hauteur de la colonne d'eau sera en effet plus importante dans le cas des calcaires d'Etampes et nécessite donc la définition d'état de pression initiale spécifique (cf. section 5.2.2). On aura ainsi un couple de données pour l'exploitation des aquifères de Pithiviers et d'Etampes i.e. un maillage et un état de pression initiale par formation. Le calcaire de Pithiviers présente une épaisseur de formation réservoir, utile à l'écoulement de 20 m de hauteur et une pression de référence de 2 bars tandis que le maillage correspondant aux calcaires d'Etampes prévoit une hauteur utile à l'écoulement de 40 mètres pour une pression initiale de 3 bars.

La modélisation d'exploitation dans les calcaires de Pithiviers montre une extension de la bulle de température plus étendue que lors de l'exploitation des calcaires d'Etampes puisque l'épaisseur de réservoir disponible y est bien moins importante (cf. Figure 49 et Figure 51). L'impact d'une exploitation sera alors plus important dans les formations de faibles épaisseurs.

# 6.3. CROISEMENT AVEC LES BESOINS ENERGETIQUES POUR ESTIMER LE POTENTIEL GEOTHERMIQUE SUR NAPPE DE LA METROPOLE

Pour l'ensemble des 35 modélisations thermo-hydrodynamiques testées et analysées, les panaches de températures présentant des variations de 2°C par rapport à la température initiale de la nappe après 10 années d'exploitation ont été extraits. Comme identifiés dans les figures précédentes, ces panaches peuvent être assimilés à un ellipsoïde de longueur et de hauteur variable suivant les paramètres considérés. Un méta-modèle a été ajusté sur les différentes simulations afin d'estimer la taille de l'ellipse (cf. Figure 56).

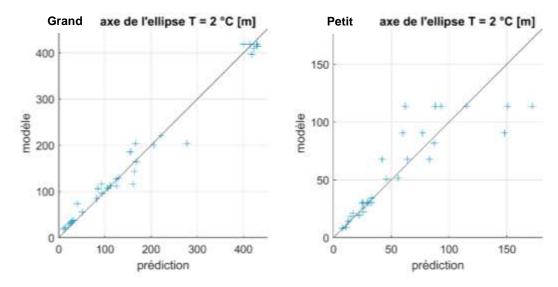


Figure 56 : Ajustement d'un modèle sur la taille de l'ellipse

Un algorithme a été développé afin d'estimer un taux de couverture théorique maximal par doublet sur chacun des deux aquifères (Pithiviers et Etampes). Dans les grandes lignes, l'algorithme réalise les tâches suivantes (cf. Figure 57) :

- 1) Le besoin énergétique est d'abord redistribué sur la même grille que les propriétés hydrodynamiques, avec une maille de 50 m de côté. A chaque cellule de la grille est associé un besoin en chaud (chauffage et ECS) et en froid (cf. Figure 59).
- 2) Dans chaque cellule, on calcule le nombre de cellules adjacentes nécessaire pour atteindre 400 MWh/a (= 200 kW \* 2000 h/a), soit le seuil de viabilité déterminé préalablement (cf. section 4).
- 3) L'algorithme tente ensuite de positionner des doublets un par un en commençant par les zones au besoins énergétiques les plus élevés. Une fois le doublet positionné, l'algorithme détermine les cellules alimentées par le doublet et celles impactées thermiquement, i.e. qui se trouvent dans le panache de l'installation et se voient ainsi privées d'accès à la ressource géothermale.

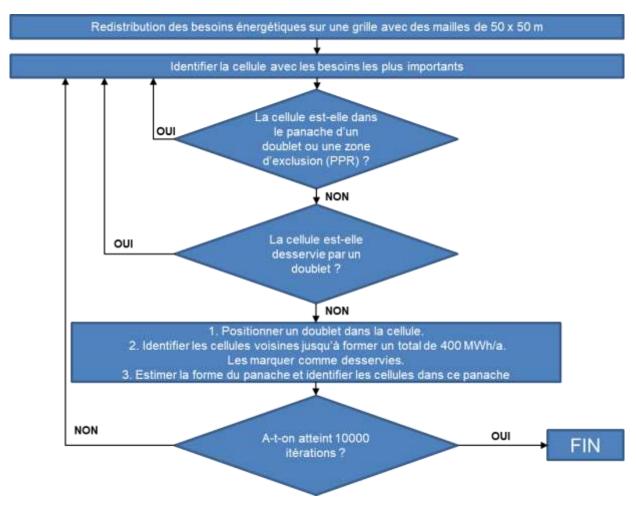


Figure 57 : Méthodologie

Le nombre d'itérations a été fixé à 10 000. La fraction d'énergie couverte augmente itération après itération, au fur et à mesure du placement des doublets. Pour le calcaire de Pithiviers, elle stagne vers 27 % (cf. Figure 58 et Figure 59), soit 723 GWh/a sur 2607 GWh/a de besoin. Le potentiel du calcaire d'Etampes est légèrement plus élevé (992 GWh/a, cf. Figure 60), ce qui qualitativement peut s'expliquer par le fait que dans les modélisations on lui a attribué une

épaisseur de 40 m contre 25 m pour le calcaire de Pithiviers. Il faut noter que les potentiels énergétiques des deux aquifères ne peuvent pas être additionnés : en effet, les calcaires de Pithiviers et d'Etampes ne sont séparés que par une couche de molasse relativement peu épaisse (de l'ordre de quelques mètres tout au plus). Deux doublets situés l'un au-dessus de l'autre interagiraient thermiquement. Il faut plutôt voir ces calculs de potentiel comme des indications suggérant qu'à l'échelle de la métropole, les aquifères sont en adéquation avec environ un tiers des besoins. En particulier, d'après ces estimations, se concentrer sur le calcaire d'Etampes permettrait de couvrir environ 1/3 du besoin du tissu urbain mixte et ½ du besoin des grands ensembles collectifs (GEC), tandis que le calcaire de Pithiviers pourrait couvrir ¼ des besoins du tissu urbain mixte et 1/3 du besoin des GEC (cf. Figure 61).

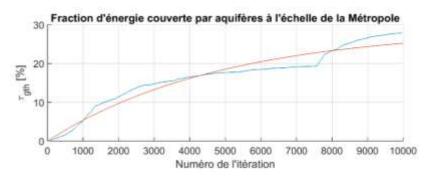


Figure 58 : Evolution de la fraction d'énergie couverte par des doublets sur les calcaires de Pithiviers en fonction des itérations de l'algorithme (courbe bleue) et courbe de tendance (courbe rouge).

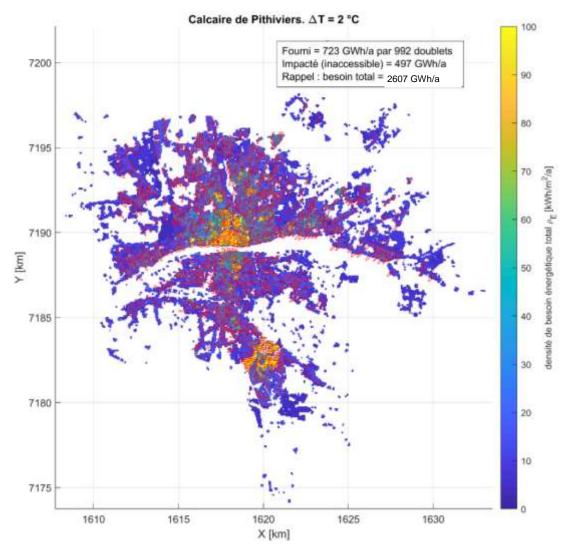


Figure 59 : Cartographie du potentiel du calcaire de Pithiviers représentant les empreintes thermiques des doublets positionnées par l'algorithme.

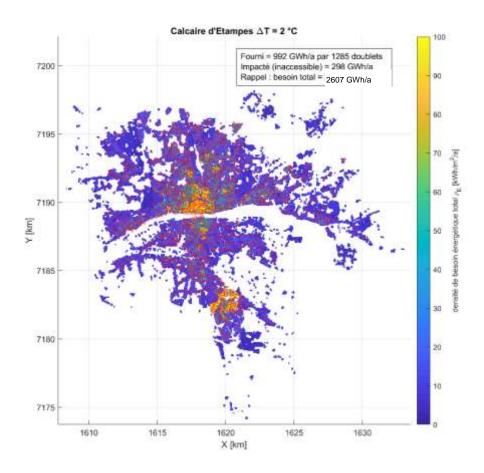


Figure 60 : Cartographie du potentiel du calcaire d'Etampes représentant les empreintes thermiques des doublets positionnées par l'algorithme.

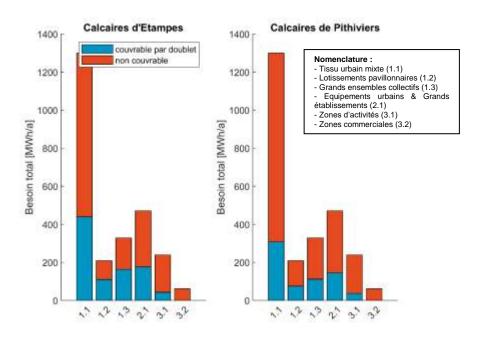


Figure 61 : Gauche : Besoin total (chaud, froid, ECS) et couverture associée pour les 6 types de tissus urbains.

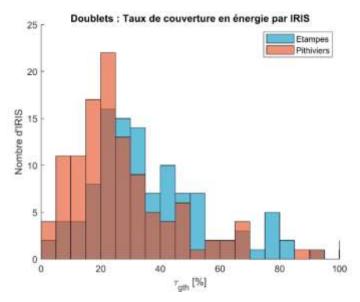


Figure 62 : Gauche : Besoin total (chaud, froid, ECS) et couverture associée pour trois types de tissus urbains. Droite : Distribution du taux de couverture en énergie par IRIS

## 7. Estimation du potentiel géothermique sur sondes

#### 7.1. METHODE PROPOSEE

La méthode proposée croise données du sous-sol, consommations énergétiques et foncier disponible pour estimer, à la maille IRIS, un taux de couverture par sonde géothermique verticale (cf. Figure 63). Les développements méthodologiques sont donnés en Annexe 3.

#### Estimation du foncier disponible pour Consommation énergétique : Chauffage, ECS, rafraîchissement. l'implantation des sondes : Homogènes sur 536 zones d'occupation Exclusion des Périmètres de Protection Rapprochée (PPR) [kWh/m2/an] des captages pour l'Alimentation en Eau Potable Tampon de 5 m autour des bâtiments d'après BD-TOPO Exclusion des Occupations des sols inadaptées (parc, espaces agricoles, etc.) d'après base de données de l'urbanisme Données sous-sol: (A) 24.58 - 31,40 A = 36,64 W/K/m 43.50 - 58.43 T<sub>0</sub> = 12,63 °C 81,32 - 824,07 $\lambda = 2.18 \text{ W/K/m}$ To = 13,3 °C Développement d'une méthode d'estimation du taux de couverture maximal par sondes géothermiques verticales en fonction de : Du besoin énergétique - De la géométrie du foncier disponible Des propriétés thermiques du terrain $\lambda = 1.57 \text{ W/K/m}$ To = 15.1 °C Détermination de valeurs moyennes Estimation par maille IRIS d'un taux de couverture des propriétés thermiques : pour deux scénarios de profondeur (sondes de 100 $\lambda = 1,87 \text{ WK/m et T0} = 14,2 ^{\circ}\text{C (pour }$ m et 200 m) une sonde profonde de 100 m)

Figure 63 : Méthode d'estimation du potentiel sur sondes géothermiques verticales

#### 7.2. LIMITES DE LA METHODE PROPOSEE

Les limites sont :

- Les besoins de chaud et de froid sont supposés se répartir de manière homogène sur toute la zone. A partir des données à la maille IRIS, il n'était pas possible de localiser les consommateurs au sein de chaque zone (cf. section 2);
- Les performances des pompes à chaleur (COP et EER) sont supposées être constantes, alors qu'elles dépendent entre autre des caractéristiques des émetteurs de chaleur et froid dans les bâtiments, une donnée inconnue.
- La géométrie disponible pour l'implantation est considérablement simplifiée, et assimilée à un ensemble de rectangle ;
- Les propriétés thermiques du terrain sont supposées homogènes sur toute la hauteur du forage. Les écoulements souterrains sont négligés. Les vitesses d'écoulement en jeu (plusieurs dizaines de m/a sur certains secteurs) sont susceptibles de limiter l'amplitude des variations de température du sous-sol pendant l'exploitation. De ce point de vue, ne pas prendre en compte l'écoulement souterrain est une approche conservative.
- Enfin, le modèle permettant d'estimer le taux de couverture par géothermie (dont les développements sont donnés en Annexe 3) ne donne qu'une indication du taux de couverture à laquelle est associée une incertitude.

# 7.3. ESTIMATION DU FONCIER DISPONIBLE POUR L'IMPLANTATION DES SONDES

La disponibilité d'espace pour l'implantation des forages peut limiter l'implantation des sondes. Il est donc nécessaire d'estimer aussi finement que possible les emplacements disponibles, en prenant en compte la présence de bâtiments, les contraintes réglementaires, les compétitions avec d'autres usages, etc. Plus précisément, les zones suivantes ont été exclues :

- Les Périmètres de Protection Rapprochée (PPR) des captages pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) (cf. le chapitre relatif aux contraintes réglementaires)
- Les bâtiments, avec un tampon de 5 m autour des limites (source : BDTOPO 2016, tables BATI\_REMARQUABLE, BATI\_INDIFFERENCIE et BATI\_INDUSTRIEL)
- Les infrastructures routières et ferroviaires (source : occupation des sols de la Métropole, catégorie d'occupation 2.4 ; BDTOPO 2016 : buffer de part et d'autre des routes)
- Les cimetières et réservoirs (source : BD TOPO)
- L'occupation des sols, déterminée par la Métropole : Ont été exclus : les espaces récréatifs et sportifs (catégorie d'occupation 2.2), les parcs et espaces vert (2.3), les zones d'extraction de matériaux (3.3), les activités agricoles en extérieur (4.1), les vergers et cultures permanentes (4.2), le bâti à vocation agricole (4.3), les autres espaces agricoles (4.4), le boisement (5.1), l'espace en eau (5.2), les zones en cours d'urbanisation (6.1) et les friches urbaines (6.2).

#### 7.4. APPLICATION ET RESULTATS

On considère deux scénarios de profondeur de forages : H = 100 m et H = 200 m (cf. Tableau 5). Les propriétés thermiques des terrains sont issues de la section 5.2.3. Pour des forages profonds de 200 m, la température moyenne est augmentée de +1,5 °C pour tenir compte du gradient géothermique. Les températures extrêmes sont imposées par les contraintes réglementaires de la géothermie de minime importance.

La méthode décrite ci-dessus est appliquée pour chacune des 536 zones, puis les résultats par zone sont regroupés sur les 177 cellules IRIS.

Variables	Scénario <i>H</i> = 100 m	Scénario H = 200 m
Conductivité thermique du terrain λ [W/K/m]	1,88	1,88
Capacité calorifique du terrain $\rho C_{\rho}$ [MJ/K/m3]	2,2	2,2
Température initiale du terrain traversé To [°C]	14,2	15,7
Ecart de température E/S ΔT [°C]	3	3
Température de sortie de la PAC minimale acceptable $T_{min}$ [°C]	-3	-3
Température de sortie de la PAC maximale acceptable $T_{max}$ [°C]	40	40
Rayon du forage r <sub>f</sub> [m]	0,08	0,08
Résistance de la sonde géothermique $R_f$ [K.m/W]	0,08	0,08
COP chaud [-]	4	4
EER froid [-]	7	7

Tableau 5 : Valeurs des variables fixées pour les deux scénarios

A l'échelle de la métropole, le taux de couverture  $\tau_{gth}$  des 2544,0 GWh/a est estimé à 58 % pour des sondes profondes de 100 m et 73 % pour des sondes profondes de 200 m (cf. Figure 64). Augmenter la profondeur forée de 100 à 200 m peut permettre de doubler la profondeur forée (cf. Figure 67).

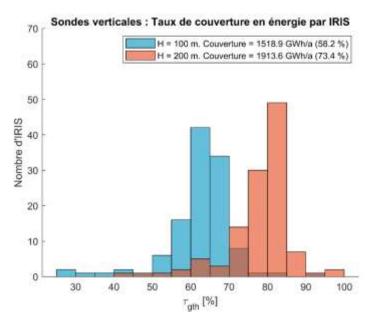


Figure 64: Taux de couverture par IRIS pour des sondes profondes de 100 m ou 200 m

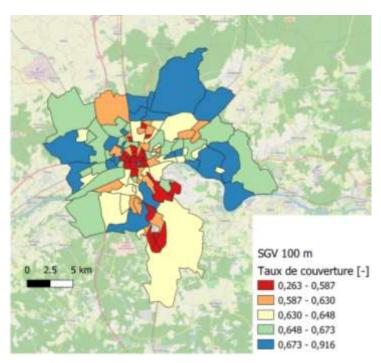


Figure 65 : Carte du taux de couverture par IRIS pour des sondes profondes de 100 m

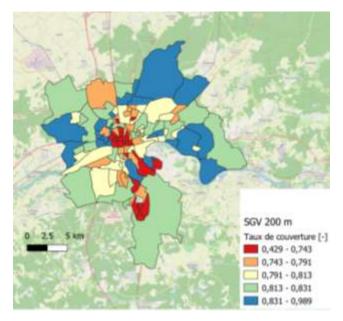


Figure 66 : Carte du taux de couverture par IRIS pour des sondes profondes de 200 m

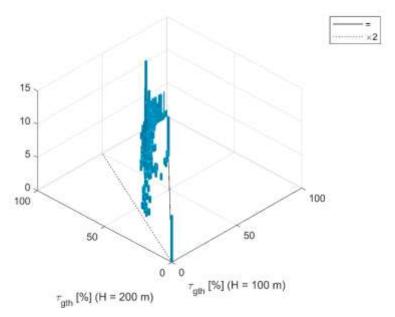


Figure 67 : Comparaison du taux de couverture pour des sondes profondes de 100 m ou 200 m, pour les 536 zones.

A l'échelle de la métropole, un retraitement des données communiquées par ARTELYS indique que 3,9 % des besoins de chauffage et d'ECS sont couverts par fioul et 42,2 % par gaz naturel. Les bâtiments correspondants peuvent être une cible privilégiée pour la reconversion en géothermie car ils disposent d'un réseau de distribution potentiellement raccordable à une pompe à chaleur géothermique. Ce potentiel de reconversion est estimé à 741 GWh/a pour des sondes profondes de 100 m et 934 GWh/a pour des sondes profondes de 200 m (cf. Figure 68).

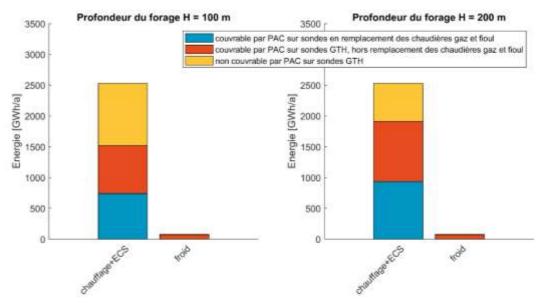


Figure 68 : Estimation du taux de couverture par géothermie sur sondes sur la métropole

Tous usages confondus, la consommation actuelle d'électricité sur le territoire de la métropole est estimée à 1748,3 GWh/a (données ARTELYS). En supposant un coefficient de performance de la pompe à chaleur géothermique COP = 4, la quantité d'électricité nécessaire au fonctionnement des PAC géothermiques est estimé à 379,7 GWh/a pour des sondes profondes

de 100 m et 478,4 GWh/a pour des sondes profondes de 200 m, soit une augmentation de 22 % et 27 % respectivement (cf. Figure 69).

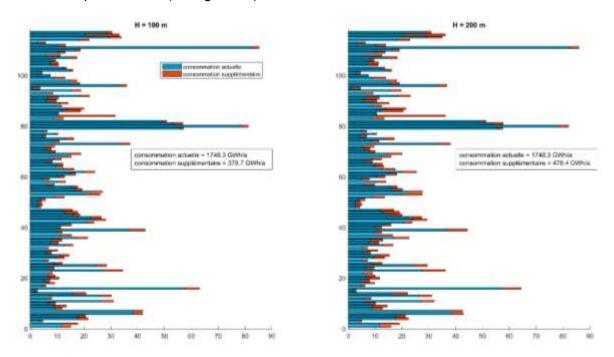


Figure 69 : Estimation de l'impact du déploiement de la géothermie sur sondes sur la consommation électrique de la métropole, par IRIS.

### 8. Potentiel des échangeurs de très proche surface

Le potentiel de déploiement des échangeurs géothermiques de très proche surface (échangeurs horizontaux et corbeilles) a été déterminé de manière qualitative (cf. Figure 70). Il s'agit de déterminer dans des zones occupées par du résidentiel individuel aujourd'hui ou à l'avenir la fraction de la zone couverte par épaisseur de sol meuble suffisante pour installer des échangeurs compacts ou horizontaux.

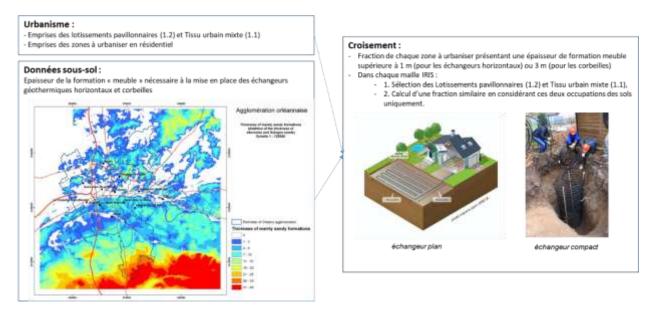


Figure 70 : Méthodologie utilisée pour le potentiel des échangeurs de très proche surface

On a utilisé la cartographie des formations meubles dans l'agglomération orléanaise établie dans le cadre du projet européen Thermomap en 2012 (cf. Figure 71Erreur! Source du renvoi introuvable.). Dans chaque maille IRIS on a estimé les fractions de superficie de lotissement pavillonnaire (occupation des sols n° 1.2) et de tissu urbain mixte (occupation n° 1.1) couverte par une épaisseur de zone meuble d'au moins 1 m (nécessaire à l'installation d'échangeurs horizontaux ou 3 m (nécessaire à l'installation d'échangeurs compacts type corbeille). Le tissu urbain mixte est considéré dans cette analyse car des zones taguées comme telles peuvent en fait être composées de lotissements pavillonnaires, même si l'installation de ces échangeurs peut nécessiter une superficie relativement importante. Les autres tissus urbains sont exclus. Une grande hétérogénéité de ce potentiel est observée à l'échelle de la métropole (cf. Figure 72).

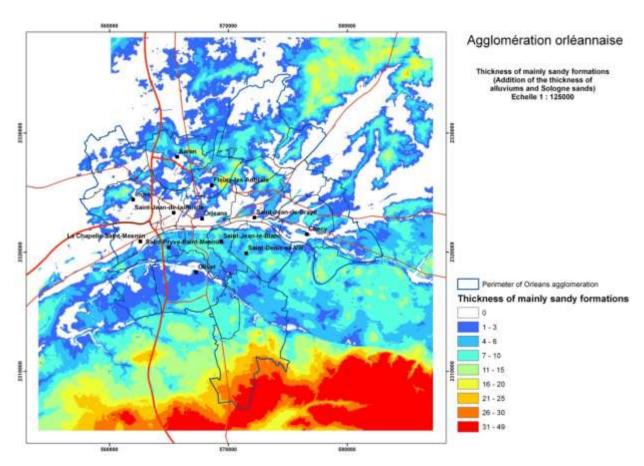


Figure 71 : Epaisseur des formations meubles sur la métropole d'Orléans

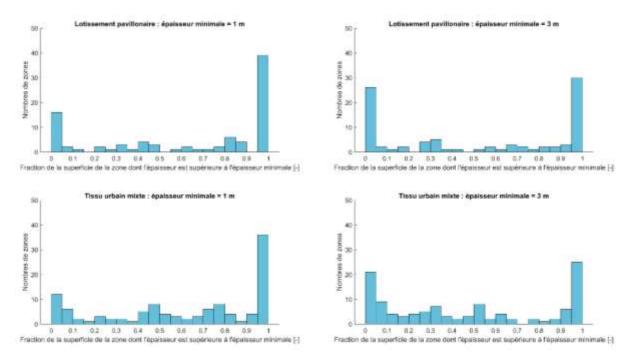


Figure 72 : Distribution par maille IRIS de la fraction de la zone de lotissement pavillonnaire ou de tissu urbain mixte dont l'épaisseur est supérieure à l'épaisseur minimale de 1 m ou 3 m

Une analyse similaire a été menée pour les 102 zones à urbaniser taguées comme « habitat » (cf. Figure 73).

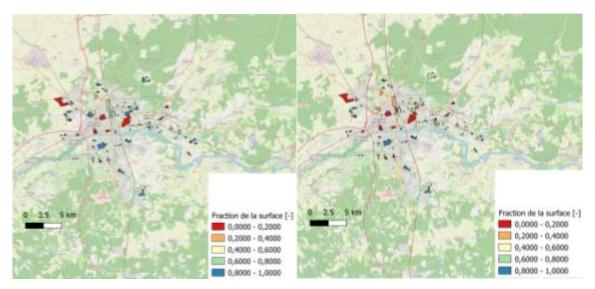


Figure 73 : Cartographie par zone à urbaniser de la fraction de la zone dont l'épaisseur est supérieure à l'épaisseur minimale de 1 m (gauche) ou 3 m (à droite).

94

#### 9. Conclusion

Un ensemble de couches cartographiques ont été remises à ARTELYS pour intégration dans l'atlas multi-ENR de la Métropole.

Les besoins énergétiques en chauffage, eau chaude sanitaire et froid à la maille IRIS estimés à 2635 GWh/an ont été distribués à travers la métropole en utilisant une méthodologie se basant sur la cartographie d'occupation des sols établis par la Métropole.

Les implications des différentes réglementations sur le déploiement de la géothermie ont été analysées. De ce point de vue, la contrainte la plus forte semble être l'interdiction de la géothermie dans les périmètres de protection immédiate (PPI) et rapprochée (PPR) des captages d'eau.

Les données collectées ont permis d'estimer la piézométrie et les propriétés hydrodynamiques du calcaire de Beauce (Calcaire de Pithiviers et Calcaire d'Etampes). Ces calcaires sont très productifs et les écoulements naturels y affectent significativement le panache de température autour des doublets, et potentiellement aussi autour des sondes géothermiques verticales. Un doublet a été modélisé afin d'appréhender la morphologie de ce panache pour différentes conditions de fonctionnement et propriétés hydrodynamiques de l'aquifère. Ceci a permis d'établir un modèle simplifié pour estimer la taille du doublet.

Un croisement avec la carte des besoins énergétiques montre que des doublets au calcaire de Pithiviers pourraient couvrir 25 à 30 % des besoins énergétiques de la métropole. Le calcaire d'Etampes pourrait couvrir de l'ordre de 30 à 40 % de ces besoins. En ce qui concerne les sondes géothermiques verticales, on estime que 58 % des 2544,0 GWh/a de besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire de la métropole pourraient être couverts par des sondes profondes de 100 m, et 73 % par des sondes profondes de 200 m. Il faut noter que ces 4 potentiels (deux sur aquifère, deux sur sondes) ne peuvent s'additionner directement. En effet, les deux aquifères des calcaires d'Etampes et de Pithiviers sont proches et interagiraient thermiquement en cas d'exploitation simultanée, et les sondes géothermiques verticales traversent les deux aquifères. Il s'agit plutôt d'indications qu'un panel d'échangeurs géothermiques permet de couvrir une partie significative des besoins du bâti de la métropole. Au sein de chaque IRIS, la fraction de la superficie de lotissement pavillonnaire et de tissu urbain mixte favorable à l'implantation d'échangeurs très superficiels a aussi été estimée.

## 10. Bibliographie

Beaude, L., T. Beltzung, K. Brenner, S. Lopez, R. Masson, F. Smai, J.-F. Thebault, and F. F. Xing. 2017. "Parallel Geothermal Numerical Model with Faults and Multi-Branch Wells." *ESAIM: Proceedings and Surveys in Press.* 

Beaude, L., K. Brenner, Simon Lopez, R. Masson, and F. Smai. 2017. "Non-Isothermal Compositional Two-Phase Darcy Flow: Formulation and Outflow Boundary Condition." *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics.*, 317–325.

Binet, S., C. Auterives, and J-B. Charlier. 2010. "Impact Des Changement Environnementaux Sur La Ressource En Eau - Construction d'un Modèle Hydrogéologique d'étiage Sur Le Val d'Orléans."

Bonnet, M., and S. Floriat. 2004. "Reprise Du Modèle de Gestion de La Nappe de Beauce PHASE 1 - Calage En Régime Permanent et Transitoire." *Rapport Hydroexpert RPP04M026b*.

Cellule d'animation du SAGE de Beauce. 2014a. "Plan d'aménagement et de Gestion Durable - Fiche Action - Schéma d'Aménagement et de Gestion Des Eaux de La Nappe de Beauce Ses Milieux Aquatiques." SAGE de Beauce.

——. 2014b. "Rapport de Présentation - Schéma d'aménagement et Gestion Des Eaux de La Nappe de Beauce et Ses Milieux Aquatiques." *SAGE de Beauce*.

——. 2014c. "Réglement - Schéma d'Aménagement et de Gestion Des Eaux de La Nappe de Beauce Ses Milieux Aquatiques." *SAGE de Beauce*.

Cellule d'animation du SAGE Val Dhuy-Loiret. 2007. "Fiches d'actions Approuvées Par Les Membres de La CLE Le 4 Novembre 2007 - Annexe Au Schéma d'aménagement et de Gestion Des Eaux Du Val Dhuy Loiret." SAGE Val Dhuy Loiret.

——. 2017. "Suivi de La Qualité Des Eaux Sur Le SAGE Val Dhuy Loiret - Année 2017." SAGE Val Dhuy Loiret.

Cellule d'animation du SAGE Val Dhuy-Loiret, and Hydratec. 2011. "Schéma d'aménagement et de Gestion Des Eaux Du Val Dhuy Loiret." *SAGE Val Dhuy-Loiret*.

Comité de bassin Loire-Bretagne. 2016. "Programme De Mesures Du Bassin Loire Bretagne 2016-2021 - Chapitre Loire Moyenne." *SDAGE Bassin Loire-Bretagne*, 84–101.

Comité Du Bassin Loire-Bretagne. 2015. "Schéma Directeur d'aménagement et de Gestion Des Eaux 2016-2021 Du Bassin Loire Bretagne - Approuvé Le 04 Novembre 2015." *SDAGE Bassin Loire-Bretagne*.

Comité Du Bassin Seine-Normandie. 2016. "Les SDAGE 2016-2021 Du Bassin de La Seine et Des Cours d'eau Côtiers Normands - Approuvé Par Arrêté Du Préfet Coordonnateur de Bassin En 20 Décembre 2015." *SDAGE Bassin de La Seine*, 458.

Desprez, N. 1966. "Inventaire et Étude Hydrogéologique Du Val d'Orléans." *Rapport BRGM/DSGR.67.A21.* 

Desprez, N., C. Megnien, M. Caudron, C. Martins, G. Rampon, and M. Van den Beusch. 1975. "Beauce - Atlas Hydrogéologique – Notice, Synthèse, Index." *Editions BRGM*.

Hoareau, J., R. Gillard, and L. Larthette. 2018. "Réalisation d'une Carte Piézométrique Du Val d'Orléans En Période de Hautes Eaux et de Basses Eaux. Marché N° 2016BP10." Rapport Final Bureau d'étude GEauPole.

Martin, J.C., M.L. Noyer, N. Amraoui, and N. Pathirana. 2003. "Caractérisation Du Risque d'inondation Par Remontée de Nappe Sur Le Val d'Orléans." *Rapport BRGM/RP-52121-FR*.

Martin, Jean-Claude, D Giot, and Y.M. Le Nindre. 1999. "Etudes Préalables à La Réalisaton d'un Modèle de Gestion de La Nappe de Beauce - Geométrie Du Réservoir et Limites de La Nappe de Beauce." *Rapport BRGM R 40571*.

Ministère de la santé et des sports. 2008. "Guide Technique : Protection Des Captages d'eau." DDAS et Ministère Chargé de La Santé.

Molina-Giraldo, Nelson, Peter Bayer, and Philipp Blum. 2011. "Evaluating the Influence of Thermal Dispersion on Temperature Plumes from Geothermal Systems Using Analytical Solutions." *International Journal of Thermal Sciences* 50 (7): 1223–31. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.004.

Monnot, Pascal, Etienne Buscarlet, Camille Maurel, and Laurent André. 2019. "Synthèse Du Retour d'expérience Sur 5 Opérations de Doublets Géothermiques Sur Le Territoire d'Orléans Métropole." *Rapport BRGM/RP69208-FR*, 62.

Reiss, C., C. Maragna, and P. Monnot. 2012. "Protocole de Test de Réponse Thermique." https://doi.org/BRGM/RP-60816-FR.

Salquèbre, D., F. Husson, N. Jozja, T. Klinka, and B. Tourlière. 2019. "Système d'Information Pour La Gestion Des Eaux Souterraines (SIGES) En Région Centre-Val de Loire – Phase 3 (2017-2019)." Rapport Final BRGM/RP- 69591-FR, 74.

Salquèbre, D. 2013. "Proposition de Délimitation Des Nappes à Réserver à l'Alimentation En Eau Potable (NAEP) – Bassin Loire-Bretagne." *Rapport Final BRGM/RP-62961-FR*, 57.

——. 2017. "Suivi de La Nappe Du Val d'Orléans Au Droit de 5 Piézomètres - Bilan de l'année 2017." *Rapport BRGM/RP-67376-FR.* 

Xing, F., R. Masson, and Simon Lopez. 2017. "Parallel Numerical Modeling of Hybrid-Dimensional Compositional Non-Isothermal Darcy Flows in Fractured Porous Media." *Journal of Computational Physics*, no. 345: 637–64. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.05.043.

# Annexe 1 : Estimation des coûts des doublets géothermiques sur Orléans Métropole

## Annexe 2 : Description des modèles thermohydrodynamiques 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, contenant éventuellement 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, Masson, and Lopez 2017) pour la description des aspects théoriques de la modélisation des écoulements, de (Beaude, Beltzung, et al. 2017) pour l'intégration d'architecture de puits complexes et de (Beaude, Brenner, et al. 2017) 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 demi-modèle afin d'optimiser les temps de calcul. Il couvre une surface rectangulaire de 1 000 mètres de longueur et de 400 mètres de largeur et il est constitué de prisme. Le maillage a été généré avec la librairie CGAL<sup>11</sup> (Computational Geometry Algorithms Library).

Deux géométries sont utilisées lors de l'étude de sensibilité de façon à simuler une exploitation au niveau des calcaires de Pithiviers et d'Etampes. L'extension latérale est identique entre les deux modèles (1 000 m x 400 m), en revanche la hauteur est variable (entre 45 et 60 mètres respectivement) pour permettre de modéliser chacun des deux aquifères présents au niveau de la métropole.

Pour le maillage représentant l'aquifère des calcaires de Pithiviers, le maillage se compose de 9 couches de 5 mètres de hauteur. La partie réservoir, utiles à l'écoulement, est intercalée entre 2 couches peu perméables, les épontes, à la base et au sommet du modèle soit au total 25 mètres de réservoir utile à l'écoulement sur les 45 mètres modélisés (**Erreur! Source du renvoi introuvable.**). Le maillage ainsi constitué se compose de 8 370 prismes et de 5 060 points.

Dans le cas de l'aquifère des calcaires d'Etampes, le maillage est constitué de 12 couches de 5 mètres de hauteur. La partie réservoir est également intercalée entre 2 couches d'éponte et se compose ainsi de 8 couches de 5 mètres de hauteur, soit une hauteur utile à l'écoulement de 40 mètres (Figure 75). Le maillage ainsi constitué se compose de 11 160 prismes et de 6 578 points.

-

<sup>11</sup> https://www.cgal.org/

Ces épaisseurs de formation correspondent aux valeurs médianes des épaisseurs de formation utiles à l'écoulement observées sur la métropole.

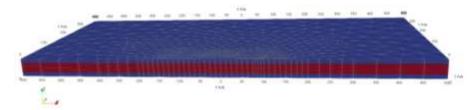


Figure 74 : Maillage utilisé pour simuler l'exploitation géothermique sur nappe dans les calcaires de Pithiviers (1000 m x 400 m x 45 m) avec en rouge la partie réservoir, utile à l'écoulement et en bleu les épontes

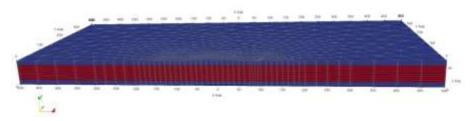


Figure 75 : Maillage utilisé pour simuler l'exploitation géothermique sur nappe dans les calcaires d'Etampes (1000 m x 400 m x 60 m) avec en rouge la partie réservoir, utile à l'écoulement et en bleu les épontes

Le maillage est raffiné au centre du demi-modèle pour permettre le positionnement des forages d'injection et de production et avoir une représentation fine des variations de température et de pression autour des puits (Figure 76**Erreur! Source du renvoi introuvable.**).

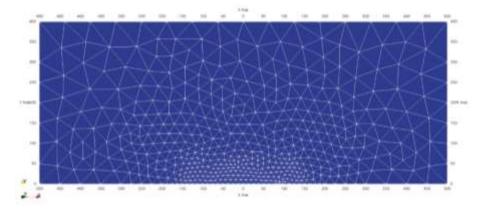


Figure 76 : Illustration du maillage en prisme et du raffinement utilisé au centre du demie-modèle

# Annexe 3 : Développement d'une méthode pour l'estimation du potentiel énergétique des sondes

On pourrait schématiquement distinguer deux types d'approches pour estimer un potentiel énergétique des sondes verticales à l'échelle d'un quartier, d'un ensemble de communes, voire d'une région :

- Traitement par sonde unique : une puissance [W] ou une chaleur [kWh] extractible d'une sonde géothermique est estimée à partir d'une cartographie de la lithologie, en appliquant des règles de calculs préalablement établis. Ces règles peuvent être des abaques de prédimensionnement (Gemelli et al., 2011) ou des modèles physiques simplifiés avec écoulement (García-Gil et al., 2015) ou sans écoulements souterrains (Casasso and Sethi, 2016). Ces méthodes sont simples à mettre en œuvre (il s'agit d'écrire un petit script dans un logiciel de SIG), mais elles s'affranchissent des contraintes foncières puisqu'elles ne prennent en compte qu'une unique sonde.
- Représentation de chaque sonde dans chaque parcelle: le nombre de sondes est déterminé pour couvrir pour tout ou partie des besoins en énergie thermique, les interactions entre les sondes au sein d'une parcelle mais aussi entre parcelles peuvent être prises en compte. Dans la pratique, ces approches sont limitées à un quartier car elles nécessitent de modéliser chaque sonde de chaque parcelle, un processus finalement coûteux en temps de calcul, cf. par exemple ce qui a été fait à Zurich (Miglani et al., 2018) ou à Londres (Zhang et al., 2015).

On a donc été amené à développer une méthode simple permettant d'estimer une densité maximale d'énergie extractible d'une « zone ». Une « zone » fait ici référence à une des 536 zones urbaines créées par le croisement du besoin énergétique et de l'occupation des sols (cf. section 0). La méthode reprend et enrichit une méthode développée par le BRGM pour une étude de potentiel pour la Communauté de Communes de Loire Layon Aubance (rapport BRGM/RP-69744-FR).

La méthode proposée permet d'estimer sur chacune des 536 zones les taux de couverture des besoins de chaud  $\tau_c$  (chauffage et eau chaude sanitaire) et de froid  $\tau_f$  (climatisation et rafraichissement) définis par :

$$\tau_{c} = \frac{E_{chauff,GTH} + E_{ECS,GTH}}{E_{chauff} + E_{ECS}}$$
 
$$\tau_{f} = \frac{E_{fr,GTH}}{E_{fr}}$$
 (0-1)

Avec  $E_{chauff}$ ,  $E_{ECS}$  et  $E_{fr}$  les besoins de chauffage, eau chaude sanitaire et froid respectivement  $E_{chauff,GTH}$ ,  $E_{ECS,GTH}$  et  $E_{fr,GTH}$  la quantité d'énergie qui peut être apportée par la géothermie sur sondes respectivement. On introduit aussi un taux de couverture par géothermie  $\tau_{gth}$ , combinant les besoins de froid et de chaud :

$$\tau_{gth} = \frac{E_{chauff,GTH} + E_{ECS,GTH} + E_{fr,GTH}}{E_{chauff} + E_{ECS} + E_{fr}} = \beta \tau_c + (1 - \beta)\tau_f$$
 (0-2)

Avec  $\beta$  la part de chaud dans le besoin global :

$$\beta = \frac{E_{chauff} + E_{ECS}}{E_{chauff} + E_{ECS} + E_{fr}} = 0,96 \tag{0-3}$$

La méthode proposée se base sur la méthode de pré-dimensionnement de champs de sondes AHSRAE, couramment utilisée en Amérique du Nord. Cette méthode permet d'estimer rapidement la longueur de forage L nécessaire pour couvrir un besoin énergétique demandé par un bâtiment. La longueur L [m] (produit du nombre de sondes N par la profondeur H) se calcule comme suit (Bernier, 2006) :

$$L = N \times H = \frac{P_h(R_f + R_{6h}) + P_m R_{1m} + P_a R_{10y}}{T_{fl} - (T_0 - \delta T)}$$
(0-4)

#### Avec:

- *P<sub>h</sub>*: puissance maximale soutirée pendant 6 heures consécutives [W]
- *P<sub>m</sub>*: puissance maximale soutirée pendant 1 mois consécutif (par exemple) [W]
- *P<sub>a</sub>*: puissance moyenne annuellement échangée avec le champ (soutirage réinjection pendant la production de froid) [W]
- R<sub>f</sub>: résistance du forage [K.m.W<sup>-1</sup>]
- R<sub>6h</sub>, R<sub>1m</sub>, R<sub>10y</sub>: 3 coefficients tabulés [K.m.W<sup>-1</sup>] (cf. (Kavanaugh and Rafferty, 1997))
- $T_{ff}$ : la température moyenne entrée/sortie du fluide. On retient pour une pompe à chaleur fonctionnant classiquement avec un écart de température de 3 °C, et en fixant une température de réinjection de -3 °C (pour bénéficier du régime de minime importance),  $T_{ff}$  = (0-3)/2 = -1.5 °C
- T<sub>0</sub>: la température initiale du terrain traversé [°C]
- δT: la « pénalité de température », qui décrit l'interaction entre tous les forages d'un champ donné. Elle sera d'autant plus importante que les forages sont proches (le champ est compact, le froid injecté est difficilement évacué dans le terrain), ou le déséquilibre important (on ne recharge pas le terrain en été). Cette pénalité dépend de la disposition de la profondeur des forages, mais aussi de la profondeur H que l'on cherche. Cette pénalité est calculée au moyen de solutions analytiques où chaque forage est décrit par une « Ligne Source Finie » (Eskilson, 1987) émettant de la chaleur dans un milieu semi-infini représentant le sous-sol, les lignes sont superposées afin de décrire la réponse globale du champ.

A noter que dans l'éq. (0-1) les puissances soutirées (pendant le chauffage du bâtiment) sont comptées négativement. Par ailleurs, il faut calculer deux longueurs : une valeur pour la couverture des besoins de chauffage, une autre pour la couverture des besoins de froid et retenir la plus pénalisante des deux valeurs.

L'équation (0-4 est plus représentative du potentiel énergétique des sondes qu'un simple ratio de puissance par mètre de forage (par ex. 50 W/m), car cette équation prend en compte les propriétés thermiques du terrain et la disposition des sondes.

La méthode ASHRAE a été utilisée pour établir une relation permettant d'estimer  $\tau_c$  et  $\tau_f$ . La relation prend 16 variables d'entrée :

- Liés à la sollicitation :
  - Besoin de chaud [MWh/a]
  - Besoin de froid [MWh/a]
  - Densité de besoin énergétique (chaud et froid) = besoin / surface disponible [MWh/m²/a]
- 2 paramètres géométriques décrits ci-après

- Les propriétés thermiques du terrain :
  - Conductivité thermique [W/K/m]
  - Capacité calorifique [J/K/m3]
  - Température initiale [°C]
- Les conditions de fonctionnement de la PAC :
  - Ecart de température E/S [°C]
  - Température de sortie de la PAC minimale acceptable [°C]
  - Température de sortie de la PAC maximale acceptable [°C]
  - COP chaud [-]
  - EER froid [-]
- Les caractéristiques de la sonde géothermique :
  - Rayon du forage [m]
  - Résistance de la sonde géothermique [K.m/W]
  - Profondeur du forage [m]

Chacune des 536 zones est composée d'un ensemble de polygones représentant les emplacements disponibles pour l'implantation. La surface disponible pour l'implantation est notée  $S_{dispo}$ . Sur chaque polygone on vient caler un rectangle de même superficie, possiblement évidé par un rectangle de dimension inférieure, de largeur A et longueur B (A < B) (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). On introduit deux paramètres géométriques :

- $\alpha_1$ : l'élongation de la parcelle = ratio largeur A / longueur B (0 <  $\alpha_1$  < 1)
- $\alpha_2$ : le ratio entre surface du trou et surface totale [-]

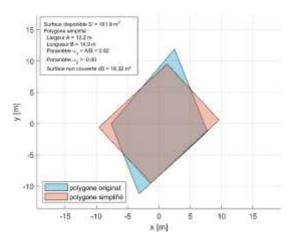


Figure 77 : Exemple de polygone original disponible pour l'implantation et polygone simplifié calé (rectangle)

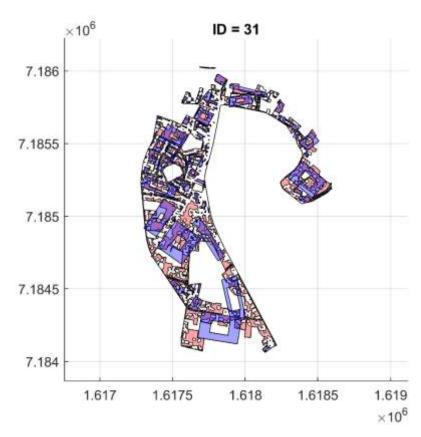


Figure 78 : Exemple de répartition au sein d'une zone du foncier disponible pour l'implantation des forages (en rose) et polygones équivalent pour l'implantation des forages (violet).

Le modèle a été évalué pour 5000 combinaisons de paramètres (« plan d'expérience ») générés par un hypercube latin, une méthode répartissant « au mieux » les tirages pour explorer les différentes configurations possibles (cf. Tableau 6Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

Variable	Valeur minimale X1	Valeur maximale X2	Fonction f
Densité de besoin (chaud+froid) $\rho_E = E/S_{dispo}$ [MWh/m²/a]	0,05	1	$\frac{\rho_E^2 - \rho_E(X_1)^2}{\rho_E(X_2)^2 - \rho_E(X_1)^2}$
Besoin total (chaud+froid) $E = E_{chauff} + E_{ECS} + E_{fr}$ [MWh]	10	2000	$\frac{E^{0,5} - E(X_1)^{0,5}}{E(X_2)^{0,5} - E(X_1)^{0,5}}$
Paramètre géométrique α <sub>1</sub> [-]	0,05	1	$\frac{\alpha_1 - \alpha_1(X_1)}{\alpha_1(X_2) - \alpha_1(X_1)}$
Paramètre géométrique α <sub>2</sub> [-]	0	0,4	$\frac{\alpha_2 - \alpha_2(X_1)}{\alpha_2(X_2) - \alpha_2(X_1)}$
Conductivité thermique du terrain λ [W/K/m]	1	4	$\frac{\lambda - \lambda(X_1)}{\lambda(X_2) - \lambda(X_1)}$
Capacité calorifique du terrain $\rho C_p$ [MJ/K/m3]	1,5	2,5	$\frac{\rho C_p - \rho C_p(X_1)}{\rho C_p(X_2) - \rho C_p(X_1)}$
Température initiale du terrain traversé <i>T₀</i> [°C]	10	20	$\frac{T_0 - T_0(X_1)}{T_0(X_2) - T_0(X_1)}$
Ecart de température E/S ΔT [°C]	3	5	$\frac{\Delta T - \Delta T(X_1)}{\Delta T(X_2) - \Delta T(X_1)}$
Température de sortie de la PAC minimale acceptable $T_{min}$ [°C]	-3	8	$\frac{T_{min} - T_{min}(X_1)}{T_{min}(X_2) - T_{min}(X_1)}$
Température de sortie de la PAC maximale acceptable $T_{max}$ [°C]	25	40	$\frac{T_{max} - T_{max}(X_1)}{T_{max}(X_2) - T_{max}(X_1)}$
Rayon du forage r <sub>f</sub> [m]	0,06	0,1	$\frac{r_f - r_f(X_1)}{r_f(X_2) - r_f(X_1)}$
Résistance de la sonde géothermique $R_f$ [K.m/W]	0,06	0,12	$\frac{R_f - R_f(X_1)}{R_f(X_2) - R_f(X_1)}$
COP chaud [-]	3,5	5	$\frac{1/COP - 1/COP(X_1)}{1/COP(X_2) - 1/COP(X_1)}$
EER froid [-]	3,5	30	$\frac{1/EER - 1/EER(X_1)}{1/EER(X_2) - 1/EER(X_1)}$
Rapport entre besoin de chaud et besoin total (chaud+froid) $\beta = (E_{chauff} + E_{ECS}) / (E_{chauff} + E_{ECS} + E_{fr})$ [-]	0	1	$\frac{\beta - \beta(X_1)}{\beta(X_2) - \beta(X_1)}$
Profondeur du forage H [m]	100	200	$\frac{H - H(X_1)}{H(X_2) - H(X_1)}$

Tableau 6 : Plan d'expérience : Variables avec leurs bornes minimales et maximales et fonctions de représentation

Pour chaque parcelle générée, on détermine 20 possibilités d'implantation des forages en les répartissant en priorité sur les limites de la parcelle, puis en rapprochant les forages du centre de la parcelle suivant un schéma « en escargot ». L'idée sous-jacente est de répartir « au mieux » les forages au sein de la parcelle afin de couvrir la plus grande partie du besoin, voire si possible la totalité. Le besoin de froid n'étant pas pris en compte, on a intérêt à espacer autant que possible les forages dans la limite de 12 m. Pour chaque possibilité d'implantation, on calcule le taux de couverture maximal pour ne pas descendre en-dessous de la température minimale, ce qui revient à ajuster les paramètres  $P_h$ ,  $P_m$  et  $P_a$ . Un exemple de résultat obtenu est donné en Figure 79**Erreur! Source du renvoi introuvable.**. Pour cet exemple caractérisé par un besoin (relativement conséquent) de 1500 MWh/an, le taux de couverture plafonne aux alentours de 80 % en énergie et 40 % en puissance dès 30 km de forage : installer plus de forages conduit à une telle interaction (refroidissement entre forages) que cela n'a guère d'intérêt (cf. les plans n°12 et n°20). On peut remarquer qu'une longueur environ 4 fois moins importante (i.e.  $\approx$  8 km) permet de couvrir  $\approx$  50 % du besoin, et donc que le ratio investissement / longueur est bien plus favorable.

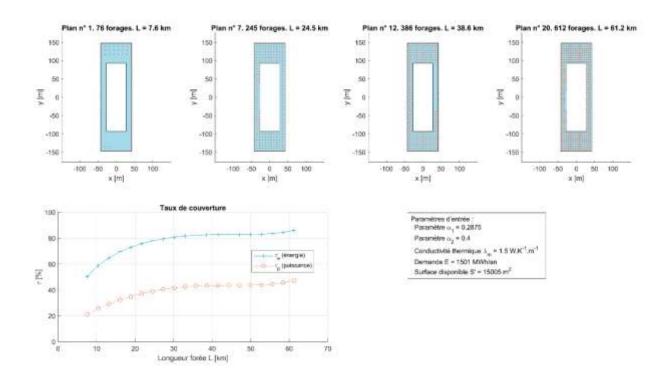


Figure 79 : Ligne du haut : Exemple d'évolution de l'implantation pour un cas défini dans l'encadré (en bas à droite). Evolution du taux de couverture en énergie et en puissance en fonction de la longueur forée L.

Un méta-modèle (processus gaussien) est calé sur l'ensemble des modèles évalués afin d'estimer besoins de chaud et de froid couverts par géothermie  $\tau_c$  et  $\tau_f$  (cf. Figure 80). Cette relation peut facilement être appliquée dans un outil de traitement cartographique pour estimer le taux de couverture sur chaque zone.

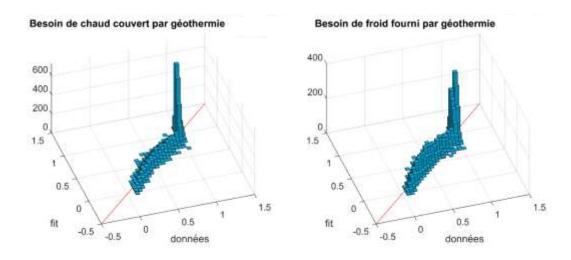


Figure 80 : Besoin de chaud couvert par géothermie  $\tau_c$  (à gauche) et besoin de froid couvert par géothermie  $\tau_f$  (à droite) : résultats du modèle (données) vs. fit.



Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr **Direction régionale Centre Val-de-Loire** 3, avenue Claude-Guillemin

3, avenue Claude-Guillemin BP 36009

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