

Document public



Autonomie énergétique et exploitation du potentiel géothermique très basse énergie et des eaux usées de Clermont Communauté



Rapport final

BRGM/RP-62634-FR
Décembre 2014



Document public

Autonomie énergétique et exploitation du potentiel géothermique très basse énergie et des eaux usées de Clermont Communauté

Rapport final

BRGM/RP-62634-FR

Décembre 2014

Étude réalisée dans le cadre du projet
d'appui aux politiques publiques du BRGM PSP12AUV07

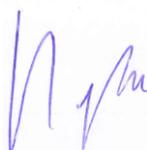
H. Lesueur, C. Bertin, S. Leconte, E. Albert, O. Goyénèche

Vérificateur :

Nom : A. DESPLAN

Date : 04/11/2014

Signature :



Approbateur :

Nom : P. ROCHER

Date : 09/01/2015

Signature :



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



Avertissement

D'une manière générale, les divers résultats qui concourent à l'expression d'un potentiel géothermique ne peuvent et ne doivent pas être employés pour établir un dimensionnement de tout ou partie d'un système géothermique.

Le motif est que les grandeurs manipulées peuvent avoir été cumulées, moyennées ou lissées de telle sorte que certaines spécificités locales peuvent avoir été gommées ou atténuées. Aussi, à l'échelle très locale d'une opération, il pourrait donc en résulter des erreurs d'appréciation préjudiciables à la bonne adéquation entre demande thermique et ressource géothermique, et donc au bon fonctionnement ou à la pérennité du système.

Pour cette raison, comme de bon sens, il est absolument impératif de s'en remettre à des professionnels expérimentés dès lors qu'un projet géothermique passe le stade de l'esquisse. Les données et résultats disponibles au travers de ce document ne sont d'ailleurs pas assez précis pour franchir ce stade.

Toutefois, les méthodes, moyens et résultats proposés dans le présent document doivent être pris en considération en ce sens où ils permettent de prendre connaissance de ce que pourrait être la situation si, localement, tous les usagers en venaient à souhaiter un raccordement à de la géothermie, individuelle ou en micro-réseau d'énergie. En effet, dans un tel cas de figure, le présent document exprime correctement et finement les taux de couvertures potentiels des solutions géothermiques conventionnelles, c'est-à-dire ce que peut réellement fournir la ressource géothermique comparé à la totalité de la demande thermique des usagers du secteur considéré.

De la sorte, chaque maître d'ouvrage peut évaluer en quelle mesure son projet d'opération géothermique impacte ou non les possibilités d'accès à la géothermie qui seraient laissées aux autres maîtres d'ouvrages du voisinage, ce qui va au-delà de la seule évaluation de son projet géothermique au regard des potentialités de la ressource locale que permet également le présent document.

Mots-clés :

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

Lesueur H., Bertin C., Leconte S., Albert E., Goyénèche O. (2014) – Autonomie énergétique et exploitation du potentiel géothermique très basse énergie et des eaux usées de Clermont Communauté. Rapport final. BRGM/RP-62634-FR, 247 p., 169 ill., 4 ann.

Synthèse

La présente étude a été réalisée dans le cadre d'une convention de recherche et développement partagés relative à l'Action n° 2 du dossier Investissements d'Avenir "Ville de demain" auquel a été attribué, par décision du Premier Ministre datée du 12 septembre 2012, une aide pour soutenir l'émergence et la réalisation de 6 actions innovantes dont **l'étude du potentiel géothermique très basse énergie du territoire de Clermont Communauté**.

La convention entre le BRGM et Clermont Communauté a été signée le 22 juin 2012. Son objectif est de concourir à l'autonomie énergétique de l'agglomération grâce à l'exploitation du potentiel géothermique des aquifères superficiels et des réseaux d'eaux usées. A cet objectif, a été ajoutée l'exploitation de l'énergie des terrains. Pour cela, les utilisations thermiques potentielles ont été identifiées, les ressources géothermiques superficielles caractérisées afin de pouvoir communiquer aux décideurs les moyens de définir une politique de développement de la géothermie permettant d'engager des réalisations en très basse énergie, à partir de la connaissance des ressources, de leur pérennité et des besoins thermiques situés au droit de ces ressources, en utilisant des solutions techniques adaptées. Cette méthode de travail permet de définir le potentiel géothermique réel de Clermont Communauté.

Avant tout, ce document expose le contexte et les résultats méthodologiques et cartographiques essentiels de l'étude. Il s'attache ensuite à décrire les méthodologies qui ont été mises au point, celles qui sont à employer de préférence et celles qui peuvent être utilisées lorsque la méthode préférée ne peut être appliquée, par exemple lorsque des données font défaut. Ce document comporte également des annexes qui précisent l'état de l'art pour les différentes techniques examinées. L'étude a produit des résultats très détaillés qui ont été constitués sous la forme de cartes numériques commune par commune. Ces cartes numériques ont été regroupées en un ATLAS disponible sur CD-ROM.

Sur le territoire de Clermont Communauté, la description des ressources géothermiques provenant des aquifères a été confrontée à un contexte hydrogéologique relativement complexe, peu décrit et, sauf exceptions, très localisé (chenaux d'écoulement préférentiels), assez peu favorable à un déploiement de solutions géothermiques sur aquifères superficiels. De ce fait, il a été envisagé une ouverture sur les solutions géothermiques exploitant la technique des sondes géothermiques verticales (SGV), permettant de prélever l'énergie géothermique directement dans les terrains, par simple échange.

L'hypothèse de collecter de l'énergie dans les réseaux d'eaux usées, prévue au cahier des charges de la convention, ne s'applique, en l'état des technologies, qu'aux seuls secteurs où les conduites sont parcourues par un débit significatif, même en période nocturne.

Reste que la description des demandes thermiques des bâtiments à l'échelle d'un ensemble de communes est un exercice délicat. La première des interrogations a porté sur les échelles de description et de restitution. Il en ressort qu'essentiellement deux approches peuvent être déclinées et, le cas échéant, combinées car, in fine, elles peuvent se révéler complémentaires. Ces deux méthodes, respectivement basées sur des polygones ou sur des mailles, sont décrites. In fine, l'approche proposée paraît relativement innovante, en particulier dans la perspective d'un croisement avec les potentialités géothermiques. Elle permet de détailler finement les demandes thermiques du tissu bâti et de les confronter précisément aux aptitudes géothermiques locales, tant en termes de puissance installée (puissance géothermique et puissance électrique des pompes à chaleur) qu'en termes d'énergie géothermique échangée

chaque mois de l'année, cela pour les solutions sur doublet géothermique et/ou sur sondes géothermiques selon le contexte local.

Le développement des méthodes a été dicté tant par une perspective d'automatisation des processus dans un SIG (système d'information géographique) que par la volonté d'assurer une maintenabilité et une évolutivité, à savoir la possibilité, par exemple, de prise en compte ultérieure de nouveaux projets ou d'opérations de requalification urbaine. Cela signifie que l'approche proposée a été développée en vue d'une appropriation par d'autres acteurs que le BRGM, cela en accord avec les attentes de Clermont Communauté.

Remerciements

L'étude dont rend compte le présent rapport, conduite par le BRGM, a bénéficié des données et des échanges issus des différents partenaires suivants, qui sont vivement remerciés : Clermont Communauté et les 21 communes qui composent la communauté d'agglomération, l'Adhume, Auvergne Habitat, Clermont Métropole, la DREAL Auvergne, Logidôme et l'Ophis.

Sommaire

1. Introduction	15
1.1. ELEMENTS DE CONTEXTE	15
1.1.1. Contexte et objectifs	15
1.1.2. Géologie et hydrogéologie du territoire	18
1.2. CONSTAT INITIAL ET PROGRAMME DE TRAVAIL	18
1.3. PRESENTATION DES RESULTATS DE L'ETUDE	19
2. Résultats de l'étude.....	21
2.1. OBJECTIF ET DEMARCHE METHODOLOGIQUE.....	21
2.1.1. Problématique de la géolocalisation des ouvrages et des demandes	21
2.1.2. Grandeurs représentatives des demandes et des ressources.....	22
2.1.3. Rappel des priorités pour exprimer les potentialités géothermiques.....	23
2.1.4. Synthèse des demandes thermiques des bâtiments	24
2.1.5. Récapitulatif de la méthode proposée pour croiser ressources et besoins	30
2.1.6. Indicateurs du potentiel géothermique : taux de couverture	31
2.1.7. Restitutions cartographiques pour les potentiels géothermiques.....	32
2.2. APPLICATION AUX PROJETS FUTURS	34
2.2.1. Projets futurs superposés aux potentialités géothermiques sur aquifères.....	35
2.2.2. Projets futurs superposés aux potentialités sur sondes géothermiques	36
2.3. FOCUS SUR UN PROJET DE REQUALIFICATION	37
2.3.1. Localisation du secteur examiné : projet de construction d'un lycée	37
2.3.2. Demande en énergie thermique par le bâti existant	38
2.3.3. Potentiel géothermique du secteur examiné	40
3. Recommandations et conclusions.....	43
3.1. DISCUSSION.....	43
3.2. CONCLUSION GENERALE	48
4. Contexte hydrogéologique et ressources	49
4.1. PRESENTATION	49
4.2. DIFFICULTES IDENTIFIEES	55
4.2.1. Observations.....	55
4.2.2. Suggestions	55

4.3. FORMATIONS ALLUVIALES	55
4.3.1. Alluvions récentes de l'Allier	55
4.3.2. Alluvions des cours d'eau de la rive gauche de l'Allier	56
4.3.3. Alluvions anciennes	58
4.4. FORMATIONS LIEES AU VOLCANISME	58
4.4.1. Formations volcaniques	58
4.4.2. Maar de Clermont-Chamalières	59
4.5. FORMATIONS DU SOCLE	60
4.6. FORMATIONS SEDIMENTAIRES	61
4.6.1. "Complexes" de Limagne	61
4.6.2. Formations sédimentaires tertiaires	61
4.7. POTENTIALITES POUR LA GEOTHERMIE SUR AQUIFERES SUPERFICIELS	62
4.7.1. Bilan de l'examen du contexte hydrogéologique	62
4.7.2. Conclusion pour la géothermie sur aquifères superficiels	68
4.8. POTENTIALITES POUR LES SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES ...	69
4.8.1. Examen du contexte au regard des sondes géothermiques verticales ...	69
4.8.2. Aléa retrait / gonflement des sols argileux	71
4.8.3. Présence de cavités naturelles et/ou anthropiques	72
4.8.4. Caractérisation des propriétés thermiques des terrains	73
4.8.5. Potentialités pour les sondes géothermiques verticales	74
4.8.6. Conclusions pour la géothermie sur sondes géothermiques verticales ...	74
4.9. METHODE POUR EXPRIMER LES POTENTIALITES GEOTHERMIQUES ...	76
4.9.1. Synthèse des méthodes pour exprimer les potentialités géothermiques ramenées à l'unité de surface au sol	76
4.9.2. Méthode pour exprimer les ressources géothermiques sur aquifères superficiels	77
4.9.3. Méthode pour exprimer les ressources géothermiques non-aquifères	81
4.10. POTENTIALITES POUR LES RESEAUX D'EAUX USEES	83
4.10.1. Présentation	83
4.10.2. Collecte des données et informations	83
4.10.3. Représentation pratique des potentialités thermiques des réseaux	84
4.10.4. Expression des potentialités thermiques pour les eaux usées	87
4.10.5. Potentialité des eaux claires parasites dans les égouts	88
5. Expression des besoins thermiques des bâtiments	91
5.1. PRESENTATION DE LA DEMARCHE ET OBJECTIF	91
5.2. DISCUSSION	92

5.2.1. Observations.....	92
5.2.2. Difficultés identifiées	92
5.2.3. Suggestions / recommandations	92
5.3. EXPRESSION DES BESOINS THERMIQUES D'UN BATIMENT	93
5.3.1. Présentation du processus méthodologique	93
5.3.2. Bases de données localisant les surfaces à chauffer / rafraîchir	93
5.3.3. Calcul des besoins thermiques en fonction de l'année d'achèvement.....	96
5.3.4. Estimation des demandes thermiques en fonction du volume du bâti ...	101
5.4. METHODE POUR EXPRIMER LES BESOINS THERMIQUES DU TISSU BATI 103	
5.4.1. Présentation des méthodes pour ramener les besoins à l'unité de surface.....	103
5.4.2. Approche par la méthode des polygones.....	104
5.4.3. Approche par la méthode des mailles	107
5.4.4. Synthèse comparative des deux méthodes disponibles	110
6. Analyse des solutions techniques	115
6.1. PRINCIPES GENERAUX, CONVENTIONS ET DEFINITIONS	115
6.1.1. Difficultés identifiées, observations et suggestions	115
6.1.2. Conventions.....	115
6.1.3. Ressource géothermale.....	116
6.1.4. Différents types de géothermie	117
6.2. MACHINERIES THERMODYNAMIQUES ET RESEAUX DE DISTRIBUTION	119
6.2.1. Présentation.....	119
6.3. NOTION DE STOCKAGE PERIODIQUE DE L'ENERGIE THERMIQUE.....	121
6.3.1. Usage directe de la ressource géothermique	122
6.3.2. Pompes à chaleur géothermique (PACg).....	123
6.3.3. Réseaux de distribution de l'énergie thermique.....	125
6.4. TECHNIQUE DU DOUBLET SUR NAPPE AQUIFERE (BOUCLE OUVERTE)	128
6.5. TECHNIQUE DE LA SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE (BOUCLE FERMEE).....	131
6.5.1. Présentation.....	131
6.6. TECHNIQUES POUR EXPLOITER L'ENERGIE DES EAUX USEES	136
6.6.1. Observations.....	136
6.6.2. Définitions : eaux usées, eaux grises, eaux noires.....	136
6.6.3. Présentation de la technologie de récupération d'énergie dans les égouts.....	137
6.6.4. Quantités indicatives d'énergies en jeu	140

6.6.5. Analogie entre l'énergie de l'eau des égouts et l'énergie géothermique 143

7. Bibliographie..... 145

Liste des illustrations

Illustration 1 : Carte du territoire de Clermont Communauté	17
Illustration 2 : Carte des demandes thermiques pour l'ECS des logements selon BD-MAJIC	25
Illustration 3 : Carte des demandes thermiques pour le chauffage des bâtiments hors logement selon BD-MAJIC.....	26
Illustration 4 : Carte des demandes thermiques pour le chauffage des logements selon BD-MAJIC	27
Illustration 5 : Carte des demandes thermiques pour le chauffage des bâtiments hors logement selon BD-Parcellaire	28
Illustration 6 : Carte des demandes thermiques pour l'ensemble des bâtiments identifiés sur Clermont-Commuanauté.....	29
Illustration 7 : Logigramme récapitulatif de la méthode de croisement des ressources et des besoins	30
Illustration 8 : Carte du taux de couverture potentiel de la demande en chauffage et ECS par la géothermie sur aquifère	32
Illustration 9 : Carte du taux de couverture potentiel de la demande en chauffage et ECS par les sondes géothermiques.....	33
Illustration 10 : Carte des disponibilités foncières (habitat et activités) sur le territoire de Clermont Communauté	34
Illustration 11 : Carte des disponibilités foncières (habitat et activités) sur le territoire de Clermont Communauté	35
Illustration 12 : Carte des disponibilités foncières (habitat et activités) sur le territoire de Clermont Communauté	36
Illustration 13 : Vue aérienne du secteur projeté pour la construction d'un lycée	37
Illustration 14 : Localisation du secteur d'étude sur la carte des potentialités aquifères	38
Illustration 15 : Demandes en énergie géothermique des locaux hors habitations.....	38
Illustration 16 : Demandes en énergie géothermique cumulée pour l'ensemble du tissu bâti existant	39
Illustration 17 : Potentiel géothermique du secteur d'étude vis-à-vis des ressources sur aquifère superficiel.....	40
Illustration 18 : Potentiel géothermique du secteur d'étude vis-à-vis des ressources sur SGV.....	41
Illustration 19 : Potentialités thermiques du secteur d'étude vis-à-vis des ressources en eaux usées.....	42
Illustration 20 : Contexte géologique au droit de Clermont Communauté.....	50
<i>Illustration 21 : Légendes relatives au contexte géologique de Clermont Communauté</i>	<i>51</i>
Illustration 22 : Carte des ressources hydrogéologiques au droit de Clermont Communauté.....	53
Illustration 23 : Isobathes du toit du substratum sédimentaire au droit de Clermont Communauté.....	54
Illustration 24 : Carte des épaisseurs des ressources hydrogéologiques superposées aux isobathes disponibles.....	63
Illustration 25 : Carte des puissances des aquifères au droit de Clermont Communauté	64
Illustration 26 : Carte des débits constatés dans les aquifères au droit de Clermont Communauté.....	65

Illustration 27 : Carte des niveaux d'eau NGF constatés dans les ouvrages au droit de Clermont Communauté.....	66
Illustration 28 : Carte des risques majeurs sur le territoire de Clermont Communauté (source : PLH).....	67
Illustration 29 : Récapitulatif des potentialités aquifères	68
Illustration 30 : Topologie et géologie simplifiée du territoire de Clermont Communauté.....	69
Illustration 31 : Carte des implantations des SGV sur le territoire de Clermont Communauté (source : BSS, 2012).....	70
Illustration 32 : Carte de l'aléa retrait/gonflement des sols argileux sur le territoire de Clermont Communauté.....	71
Illustration 33 : Localisation des cavités sur le secteur de Clermont Communauté (source : www.bdcavite.net)	72
Illustration 34 : Liste des secteurs où sont localisées les cavités sur le territoire de Clermont Communauté.....	73
Illustration 35 : Visualisation des puissances géothermiques appelées (méthode des mailles - Le Cendre).....	75
Illustration 36 : Logigramme de la méthode employée pour exprimer les potentialités géothermiques	76
Illustration 37 : Schéma de principe du doublet géothermique	78
Illustration 38 : Symbolisation du périmètre d'incidence d'un doublet géothermique	79
Illustration 39 : Exemples de puissances géothermiques installables dans les formations aquifères	79
Illustration 40 : Sectorisation proposée pour distinguer les potentialités sur aquifère superficiel.....	80
Illustration 41 : Symbolisation du périmètre d'incidence d'une sonde géothermique verticale.....	81
Illustration 42 : Puissances géothermiques installables pour les SGV	81
Illustration 43 : Sectorisation proposée pour distinguer les potentialités sur SGV	82
Illustration 44 : Courbe de débit d'un point de mesure sur le réseau d'eaux usées à Cébazat (source : SAFEGE, 2009).....	84
Illustration 45 : Cartographie des ressources en eaux usées à Clermont-Ferrand.....	84
Illustration 46 : Cartographie des ressources utiles en eaux usées de Clermont Communauté	85
Illustration 47 : Synoptique du réseau d'eaux usées et localisation des débits remarquables	86
Illustration 48 : Localisation du point 09 du réseau communal d'eaux usées en sortie de Cébazat (source : SAFEGE).....	89
Illustration 49 : Géo-référencement dans la base MAJIC	94
Illustration 50 : Consommations spécifiques pour les locaux autres que les logements selon les données de la DREAL Auvergne	96
Illustration 51 : Demandes thermiques (chauffage + ECS) en fonction de l'année d'achèvement.....	96
Illustration 52 : Demandes énergétiques des logements en fonction de la date d'achèvement (COP = 4)	97
Illustration 53 : Paramètres climatiques du secteur de Clermont-Ferrand (données de la station d'Aulnat)	98
Illustration 54 : Puissances thermiques et électriques spécifiques en fonction de la date d'achèvement sur le territoire de Clermont Communauté selon les données de la station météo d'Aulnat (COP = 4)	99
Illustration 55 : Représentation des grandeurs thermiques en fonction de la date d'achèvement (COP = 4)	99
Illustration 56 : Représentation de la puissance géothermique spécifique par un polynôme du 3 ^{ème} degré.....	100

Illustration 57 : Représentation de la puissance installée spécifique en fonction de la date d'achèvement.....	102
Illustration 58 : Visulation des méthodes des polygones et des mailles	103
Illustration 59 : Exemple de délimitation des polygones.....	105
Illustration 60 : Application de la méthode des polygones à l'échelle de Clermont Communauté.....	105
Illustration 61 : Application de la méthode des polygones à l'échelle de la commune du Cendre	106
Illustration 62 : Exemple de répartition de l'énergie des bâtiments selon la méthode des mailles	108
Illustration 63 : Application de la méthode des mailles à l'échelle de la commune du Cendre	109
Illustration 64 : Comparaison de la méthode des polygones et de celle des mailles sur la ville du Cendre	110
Illustration 65 : Application directe de la méthode des polygones à l'échelle de Clermont Communauté.....	111
Illustration 66 : Application directe de la méthode des mailles à l'échelle de Clermont Communauté.....	112
Illustration 67 : Logigramme proposé pour traiter les données thermiques des bâtiments.....	113
<i>Illustration 68 : Modes de distribution d'une énergie géothermique à du collectif/tertiaire : associé à un bâtiment (gauche) ou en réseau de chaleur (droite)</i>	<i>121</i>
<i>Illustration 69 : Principe de l'échange de chaleur en usage direct pour du rafraichissement et pour du chauffage</i>	<i>122</i>
<i>Illustration 70 : Evolution du COP d'une pompe à chaleur eau/eau en fonction de la température d'évaporation (Te) et de la température de condensation à la source chaude (Tc)</i>	<i>124</i>
<i>Illustration 71 : Principe du réseau de chaleur en PACg distribuées</i>	<i>126</i>
<i>Illustration 72 : Principe du réseau de chaleur en PACg centralisée</i>	<i>126</i>
<i>Illustration 73 : Principe du réseau de chaleur et de ses sous-stations</i>	<i>127</i>
<i>Illustration 74 : Principe de distribution de l'énergie aux sous-stations d'un réseau de chaleur</i>	<i>127</i>
<i>Illustration 75 : Principe du doublet géothermique sur aquifère superficiel (source : BRGM)</i>	<i>128</i>
<i>Illustration 76 : Visualisation des paramètres hydrauliques d'un doublet géothermique</i>	<i>130</i>
<i>Illustration 77 : Gradients géothermiques indicatifs sur le territoire de Clermont Communauté.....</i>	<i>131</i>
<i>Illustration 78 : Principe de la sonde géothermique verticale (source : BRGM).....</i>	<i>132</i>
<i>Illustration 79 : Principe des fondations géothermiques (source : BRGM).....</i>	<i>135</i>
<i>Illustration 80 : Principe du système Rabtherm installé dans les égouts</i>	<i>137</i>
<i>Illustration 81 : Principe d'utilisation des eaux usées pour le chauffage et pour le rafraichissement.....</i>	<i>137</i>
<i>Illustration 82 : Quantités d'eaux en jeu par habitant en Europe</i>	<i>138</i>
<i>Illustration 83 : Constitution du flux d'eaux usées durant une journée</i>	<i>139</i>
<i>Illustration 84 : Débit moyen d'eaux usées selon la période de l'année</i>	<i>139</i>
<i>Illustration 85 : Débit d'eau selon le jour de la semaine</i>	<i>140</i>
<i>Illustration 86 : Quantités indicatives pour les énergies en jeu</i>	<i>142</i>
<i>Illustration 87 : Grandeurs indicatives pour l'Equivalent-Habitant et les débits d'eaux usées.....</i>	<i>142</i>
<i>Illustration 88 : Singularités vis-à-vis d'une géothermie sur aquifère superficiel.....</i>	<i>143</i>
<i>Illustration 89 : Singularités vis-à-vis d'une géothermie sur champ de sondes ou fondations.....</i>	<i>144</i>

<i>Illustration 90 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur à compression (source : BRGM).</i>	177
<i>Illustration 91 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur à adsorption (source : Viessmann).</i>	179
<i>Illustration 92 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur à absorption (source : Viessmann).</i>	180
<i>Illustration 93 : Comparaison des puissances installées entre PAC électrique et PAC à sorption</i>	181
<i>Illustration 94 : Comparaison des d'installations géothermiques entre une PAC à sorption (à gauche) et une PAC à compression électrique (à droite) (source : ADEME)</i>	182
<i>Illustration 95 : Découplage par un échangeur de chaleur (source : ALTO / BRGM)</i>	183
<i>Illustration 96 : Allure de la température en entrée de la pompe à chaleur après plusieurs années pour une SGV utilisée uniquement pour du chauffage</i>	185
<i>Illustration 97 : Allure de la température en entrée de la pompe à chaleur après plusieurs années pour une SGV utilisée pour du chauffage en hiver et pour du rafraichissement en été</i>	186
<i>Illustration 98 : Bâtiment raccordé à un champ de sondes géothermiques (source : BRGM)</i>	186
<i>Illustration 99 : Echangeurs géothermiques compacts et horizontaux (source : BRGM)</i>	187
<i>Illustration 100 : Schéma de principe du fonctionnement de la PAC réversible - En haut, cas avec un seul sens de circulation - En bas, cas avec les deux puits équipés de pompes d'exhaure</i>	188
<i>Illustration 101 : Exemple d'un schéma de principe d'une thermofrigopompe</i>	189
<i>Illustration 102 : Equipements géothermiques à l'échelle d'un bâtiment collectif</i>	191
<i>Illustration 103 : Secteur urbain où chaque bâtiment dispose de son propre équipement géothermique</i>	192
<i>Illustration 104 : Secteur urbain où la boucle géothermale est mise en commun mais où chaque bâtiment dispose de son installation géothermique</i>	193
<i>Illustration 105 : Secteur urbain où toutes les installations géothermiques sont mises en commun</i>	193
<i>Illustration 106 : Visualisation du cône de rabattement lors du pompage dans un puits de production</i>	194
<i>Illustration 107 : Différentes variantes de réalisation des sondes géothermiques verticales</i>	195
<i>Illustration 108 : Prototype de sonde double U profonde (source : REHAU)</i>	196
<i>Illustration 109 : Schéma conceptuel d'implantation d'un système sur sondes géothermiques verticales</i>	197
<i>Illustration 110 : Paramètres indicatifs pour les propriétés des sondes géothermiques verticales</i>	198
<i>Illustration 111 : Schéma conceptuel d'un champ de sondes géothermiques verticales</i>	199
<i>Illustration 112 : Schéma d'un stockage géothermique d'énergie d'origine solaire (source : Groupe Accord)</i>	200
<i>Illustration 113 : Vue des principales techniques de fondations géothermiques</i>	201
<i>Illustration 114 : Exemples de valeurs de dimensionnement pour différentes réalisations dans les égouts (source : Rabtherm)</i>	204
<i>Illustration 115 : Principe de l'échangeur de chaleur ajouté à une canalisation existante, en neuf comme en rénovation, écoulement gravitaire (source : KASAG)</i>	205
<i>Illustration 116 : Principe de l'échangeur de chaleur intégré dans une canalisation en béton neuve ou rénovée, écoulement gravitaire (source : KASAG)</i>	205
<i>Illustration 117 : Principe de l'échangeur de chaleur intégré dans une canalisation en béton neuve ou rénovée, écoulement sous pression (source : KASAG)</i>	205
<i>Illustration 118 : Principe de l'échangeur sur dérivation des eaux usées en neuf comme en rénovation, écoulement sous pression (source : KASAG)</i>	206

Illustration 119 : Exemple de système à noyer dans des canaux (source : GERES-gmbh)	206
Illustration 120 : Performances indicatives des échangeurs thermiques sur eaux usées.....	207
Illustration 121 : Superposition des performances indicatives des échangeurs sur eaux usées.....	207
Illustration 122 : Extrait du dimensionnement pour le centre sportif de Bachgraben, Bâle, 1982	208
Illustration 123 : Vue d'échangeurs en inox livrés sur palette (source : Rabtherm).....	209
Illustration 124 : Vue d'échangeurs en béton livrés sur palette (source : Rabtherm)	209
Illustration 125 : Exemple d'exécution de canalisation gravitaire en béton (source : Rabtherm)	210
Illustration 126 : Echangeur béton rapporté vis-à-vis d'une exécution standard (source : Rabtherm)	210
Illustration 127 : Exemple de dessin optimisant l'écoulement à faible débit (source : UHRIG)	211
Illustration 128 : Différentes exécutions de la géométrie classique en caniveau central	212
Illustration 129 : Implantation dans un égout en tranchée couverte à Chessière (source : UHRIG)	212
Illustration 130 : Trois options favorables de positionnement des conduites de fluide caloporteur	213
Illustration 131 : Exemple de conduites reportées aux extrémités latérales de l'échangeur à Nanterre (source : UHRIG)	213
Illustration 132 : Vue des conduites reportées en partie haute et du système de liaison à intervalles réguliers, dispositif implanté à Valenciennes (source : UHRIG)	214
Illustration 133 : Principe des conduites reportées en partie haute et du système de liaison en PEHD, dispositif de l'école de Wattignie et de l'Elysée à Paris (source : UHRIG)	214
Illustration 134 : Schéma d'implantation des échangeurs dans l'égout de la rue de Wattignie et du Palais de l'Elysée et vue des échangeurs latéraux (source : Degrés-Bleus et UHRIG)	215
Illustration 135 : Principe adopté pour le petit égout de Dijon (source : UHRIG).....	215
Illustration 136 : Exemple d'accès contraignant pour le design et la mise en place des éléments.....	216
Illustration 137 : Vue détaillée des points d'ancrage entre sections d'un échangeur	217
Illustration 138 : Vue d'un assemblage terminé dans un égout ancien : conduites thermiques placées de part et d'autre sous l'échangeur (source : UHRIG)	217
Illustration 139 : Principe du système BB-Heatliner de Brandenburger	218
Illustration 140 : Vue de la gaine une fois durcie (polymérisée) et des tuyaux de l'échangeur.....	219
Illustration 141 : Performance typique de l'échangeur du système BB-Heatliner de Brandenburger	219
Illustration 142 : Exemple d'étape de mise en place du système Heatliner avec gaine durcissable	220
Illustration 143 : Exemple de canalisation en double peau "tout inox" (source : Rabtherm).....	221
Illustration 144 : Détail des exécutions du système ThermPipe de la société Frank	222
Illustration 145 : Extrait des brochures ThermPipe de la société Frank	222
Illustration 146 : Exemples de raccordement du système ThermPipe	223
Illustration 147 : Energie minimale échangée avec le sol par le système ThermPipe et estimation des surcoûts d'installation ramenés au kW installé.....	223
Illustration 148 : Principe de la récupération dans les fosses et regards (système Feka)	224
Illustration 149 : Principe d'un dispositif en dérivation pour alimenter un immeuble.....	225
Illustration 150 : Composants d'un système sur dérivation des eaux des égouts (source : Kasag).....	226

Illustration 151 : Principe d'implantation d'un dispositif individuel de récupération instantanée (montage "Equal-Flow")	228
Illustration 152 : Montage "eau-froide seulement" lorsque l'ECS est d'origine collective (à gauche) et "groupé" lorsqu'il n'est pas possible de récupérer l'énergie individuellement	228
Illustration 153 : Systèmes Retherm, Watercycles, GFX et Power-Pipe (de gauche à droite ; source : C. Zaloum, Natural Resources Canada, 2007)	229
Illustration 154 : Récupérateur Douche-WTW-DDS (ITHO-DAALDEROP)	229
Illustration 155 : Récupérateur RECOH-VERT (HEI-TECH, TECHNEA, ...).....	230
Illustration 156 : Système DOUCHEBAK avec équipement intégré de récupération (BRIES).....	230
Illustration 157 : Vue du système RECOH-DRAIN adapté à l'individuel (HEI TECH).....	230
Illustration 158 : Plan de l'échangeur dans le dispositif EHTech-DUO	231
Illustration 159 : Principe d'installation des dispositifs EHTech	231
Illustration 160 : Incidence du débit d'eaux grises, Power-Pipe R3-60 (source : Solenove)	232
Illustration 161 : Petit accumulateur / échangeur (source : OSO ; www.osohotwater.no)	233
Illustration 162 : Combinaison des accumulateurs de récupération et d'eau chaude	234
Illustration 163 : Exemple de dispositif de récupération pour installation de lavage de véhicules (source : Power-Pipe - RenewABILITY-Energy-Inc)	235
Illustration 164 : SystèmeThermodrain (Eco-GFX) implanté dans une laverie (source : EcoInnovation-Inc, www.ecoinnovation.ca)	236
Illustration 165 : Schéma de principe de l'offre "Degrés-Bleus Eau Chaude" de GDF-SUEZ	236
Illustration 166 : Détail d'une installation CalH ₂ O (Domelys) exploitant un échangeur à plaques	237
Illustration 167 : Dispositif HeatCycle de PONTOS-HANSGROHE	238
Illustration 168 : Dispositif HEATCYCLE couplé à un accumulateur FORSTNER à Freiburg.....	238
Illustration 169 : Vue du système complet installé dans une résidence étudiante (65 personnes) à Fribourg-en-Brisgau en Allemagne	239

Liste des annexes

Annexe 1. Synthèses cartographiques pour les eaux usées	147
Annexe 2. Compléments relatifs aux techniques de géothermie très basse énergie (TBE)....	173
Annexe 3. Techniques pour l'exploitation de l'énergie dans les réseaux urbains d'eaux usées et dans les eaux grises des bâtiments	203
Annexe 4. Acronymes et définitions	241

1. Introduction

1.1. ELEMENTS DE CONTEXTE

1.1.1. Contexte et objectifs

A l'échelle d'un territoire, assurer un déploiement efficient de l'exploitation des ressources géothermales disponibles, en particulier dans la perspective d'une autonomie énergétique, justifie la mise en place d'outils de gestion adaptés.

Ainsi, par exemple, gérer une ressource en eau souterraine peut nécessiter la mise en place d'une série de mesures visant à en préserver durablement l'équilibre et la qualité tout en satisfaisant au mieux les différents usagers. La définition des objectifs de gestion repose donc sur la connaissance de la ressource et des usages qui en sont et en seront faits. Cette connaissance passe tout d'abord par une description du contexte hydrogéologique et par l'acquisition de données pertinentes (niveaux, volumes prélevés,...).

Suite aux engagements de l'Etat pris lors du Grenelle de l'Environnement, les collectivités locales sont incitées à augmenter la part des énergies renouvelables dans leur "bouquet énergétique". C'est ainsi que Clermont Communauté souhaite aujourd'hui mieux connaître le potentiel géothermique très basse énergie (TBE) de son territoire afin de développer éventuellement cette solution de production d'énergie. Ce souhait a été exprimé dans un dossier Investissements d'Avenir "Ville de demain" auquel a été attribuée, par décision du Premier Ministre datée du 12 septembre 2012, une aide pour soutenir l'émergence et la réalisation de 6 actions innovantes :

1. l'optimisation de l'éclairage public de la ville de Clermont-Ferrand,
2. l'étude du potentiel géothermique TBE du territoire de Clermont Communauté,
3. les études de conception d'un lycée à "énergie positive" dans le quartier Saint-Jean,
4. l'étude d'une organisation pour l'éco-mobilité des marchandises en ville,
5. l'expérimentation du véhicule public autonome (VIPA) sur le site de l'hôpital Estaing,
6. les études de conception d'un "ilot à énergie positive" sur le site de Cataroux.

Ces 6 actions concourent à la stratégie globale de l'EcoCité clermontoise qui vise, en déclinaison des orientations du Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) du Grand Clermont, à expérimenter un nouveau type de développement urbain, soucieux de préserver l'environnement et la ressource énergétique, optimisant l'usage du foncier et mettant à contribution les puissants moyens numériques aujourd'hui disponibles.

La loi « Grenelle II », ou loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant Engagement National pour l'Environnement, a instauré l'obligation pour les communautés d'agglomérations comme Clermont Communauté de réaliser des Plans Climat Energie Territoriaux (PCET) avant la fin de l'année 2012. L'élaboration du PCET de la communauté clermontoise, qui devra se décliner à partir du Schéma Régional Climat, Air, Energie (SRCAE Auvergne), sera l'occasion de déterminer les actions concrètes à mettre en œuvre pour réduire la facture énergétique locale, ainsi que ses émissions de gaz à effet de serre. Ces actions concrètes intégreront notamment un volet énergétique important et un engagement à renforcer dans le mix la part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique global. Dès aujourd'hui, des efforts sont consentis sur le patrimoine communautaire ou bien sur les transports publics mais, au-delà, la perspective de tirer parti des ressources naturellement présentes dans le sous-sol et de créer, par exemple, des réseaux de chaleur, y compris pour les zones d'activités économiques de l'agglomération,

constitue en soi un objectif fort à atteindre. En particulier, Clermont Communauté considère qu'une part des énergies renouvelables à intégrer dans son bilan énergétique doit être d'origine géothermique.

Par ailleurs, l'agglomération de Clermont-Ferrand, avec une population de 280 000 habitants, génère de grandes quantités d'eaux usées. La question est posée quant à la possibilité de pouvoir récupérer l'énergie thermique qu'elles contiennent, celle-ci représentant une ressource d'énergie fatale qui se perd dans les traitements de dépollution puis le rejet dans le milieu naturel.

Dans le cadre des analyses énergétiques territoriales à réaliser à l'occasion, notamment, de la création d'éco-quartiers, le potentiel de ces deux ressources, naturelles et anthropiques, se doit d'être étudié et, le cas échéant, valorisé au sein d'une solution mixte de chauffage / refroidissement par géothermie très basse énergie, incluant le recours à des pompes à chaleur géothermiques.

La communauté d'agglomération a souhaité porter différentes actions appliquées aux territoires porteurs du label "Ecocité", en particulier une action portant sur "l'autonomie énergétique – l'exploitation du potentiel géothermique des aquifères et des réseaux d'eaux usées".

Cette action prévoyait d'étudier la valorisation potentielle de deux ressources énergétiques, les **aquifères superficiels du sous-sol** et les **réseaux d'eaux usées** afin, notamment, de proposer des alternatives en termes de chauffage/refroidissement par géothermie. On verra dans le présent document que le BRGM a également envisagé les ressources géothermiques accessibles par les **sondes géothermiques verticales**.

Cette Action se situe dans un cadre plus large au regard de l'engagement de Clermont Communauté dans les enjeux « énergie-climat » et le développement des énergies renouvelables. En effet, en 2010, Clermont Communauté a pris un virage métropolitain avec l'adoption d'un nouveau projet d'agglomération intitulé "Vers une éco-métropole".

Les priorités réaffirmées sont l'habitat, l'urbanisme, les transports publics et la mobilité durable, l'innovation intellectuelle et économique, la promotion d'un territoire créatif et attractif, la gestion environnementale et les politiques de solidarité et de proximité. Autant d'axes de développement qui portent ce territoire vers un nouveau destin, exprimé notamment dans le Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) approuvé fin 2011, afin d'accueillir de nouvelles activités et de nouvelles populations pour renforcer son rôle de métropole régionale, au sein du Grand Clermont et de la plaque urbaine d'Auvergne, espace de vie de plus de 600.000 personnes.

Consciente de son poids économique, l'agglomération clermontoise se donne comme objectif de "rayonner" sur la région Auvergne, le centre de la France et de l'Europe. Elle a la volonté de bâtir un avenir résolument tourné vers le développement durable et solidaire, respectueux des générations futures.

L'objectif général de la présente action est d'identifier les utilisations thermiques potentielles des ressources géothermiques superficielles de l'agglomération clermontoise afin d'engager des réalisations opérationnelles en géothermie très basse énergie, prenant en compte les ressources et leur pérennité, les besoins et les solutions techniques.

Le périmètre couvert par la présente action est l'agglomération de Clermont-Ferrand, c'est-à-dire le territoire de Clermont Communauté qui regroupe 21 communes (Illustration 1).

1.1.2. Géologie et hydrogéologie du territoire

L'agglomération clermontoise, dont le contexte géologique et hydrogéologique, est complexe, n'a jamais fait l'objet d'une synthèse générale des données géologiques et hydrogéologiques.

Cette complexité du territoire de Clermont Communauté provient de :

- sa structure marquée par une importante compartimentation tectonique, la présence de nombreuses failles liées à sa situation en bordure du fossé d'effondrement de la Limagne ;
- la diversité des formations géologiques présentes : roches du socle (granites, ...), roches volcaniques d'âges variés (coulées de laves et dépôts pyroclastiques), roches sédimentaires d'âge cénozoïque (calcaires, marnes, argiles, silts, sables, graviers, ...), dépôts alluvionnaires (alluvions actuelles et anciennes) ;
- la présence de plusieurs aquifères, profonds à superficiels, qui peuvent localement faire l'objet d'interactions et de mélanges.

Schématiquement, on verra que ces aquifères se répartissent en trois groupes :

- des aquifères profonds dont les eaux minérales atteignent la surface par l'intermédiaire de systèmes de failles,
- des aquifères "intermédiaires" qui sont contenus dans les formations sédimentaires de la Limagne (les faciès détritiques de type "sables" - réservoirs hydriques potentiels - sont particulièrement bien représentés sur les bordures de la Limagne),
- des aquifères superficiels, notamment ceux qui sont liés à la rivière Allier et à ses affluents.

1.2. CONSTAT INITIAL ET PROGRAMME DE TRAVAIL

Le constat initial qui a présidé à l'initiation de ce projet peut être ainsi résumé :

- le contexte hydrogéologique de cette région est complexe et mal connu sous bien des aspects ;
- les ressources géothermales et en eaux souterraines sont diverses, assez peu connues et à forts enjeux, du fait des multiples usages possibles (alimentation en eau potable, thermalisme, thermoludisme, industrie, géothermie ...) ;
- l'état actuel des connaissances sur les caractéristiques et les usages potentiels des ressources hydriques disponibles (eaux souterraines et eaux usées) d'une part, et les potentialités de recourir à ces ressources à court et moyen termes à des fins énergétiques d'autre part, est insuffisant pour orienter la politique publique dans ce domaine ;
- la nécessité de gérer durablement les ressources en eau et de développer le recours aux énergies renouvelables, comme la géothermie, est une priorité au regard des divers engagements de Clermont Communauté en faveur du développement durable.

Le programme de travail s'intéresse à la production de chaleur (chauffage et eau chaude sanitaire) et, possiblement, de frais et de froid, pour une utilisation au niveau de bâtiments du secteur tertiaire, du résidentiel collectif et individuel groupé (lotissement par exemple). Dans tous les cas, il s'agit de **géothermie très basse énergie** (eaux de température inférieure à 30 °C) et l'emploi de pompes à chaleur peut donc être requis.

Pour parvenir aux résultats, le programme de travail a successivement nécessité la réalisation de quatre tâches portant respectivement sur :

1. **Le ressources** : cartographie et caractérisation des ressources hydriques disponibles (aquifères superficiels et réseaux d'eaux usées) ;
2. **Les besoins** : cartographie et caractérisation des besoins énergétiques actuels et à venir ;
3. **Les techniques** : solutions techniques et technologiques potentielles mobilisables, en adéquation avec les ressources disponibles et les besoins identifiés ;

4. **Les retombées opérationnelles** : orientations et recommandations pour la promotion de réalisations concrètes, et formation initiale des acteurs.

Les approches méthodologiques développées pour ce programme pourraient être déclinées dans les autres territoires français, en particulier en ce qui concerne :

- l'approche territoriale de la notion de couplage de l'accès à plusieurs ressources thermiques complémentaires (naturelles et anthropiques) en milieu urbain afin de couvrir des besoins plus importants en termes de chauffage / refroidissement et d'optimiser l'autonomie énergétique ;
- la contribution au développement d'une vision intégrée de l'ensemble du potentiel énergétique du sous-sol urbain au regard des demandes et de leurs évolutions ;
- le cadre favorable à l'expression d'innovations techniques en ce qui concerne la valorisation thermique des ressources constituées par les réseaux d'eaux usées.

A ce titre, cette action "vitrine" menée au niveau de la capitale régionale sera reproductible dans les autres agglomérations de la région Auvergne et, probablement, au-delà.

La mise en œuvre du programme de travail exposé ci-avant a permis le développement d'une approche méthodologique automatisable originale au moyen d'outils numériques de type SIG, qui sont aujourd'hui employés couramment par les agglomérations. Cette approche méthodologique est présentée précisément dans le présent document. Elle permet en particulier :

- de détailler finement les demandes thermiques du tissu bâti, à savoir l'énergie nécessaire au confort thermique, soit majoritairement le chauffage et l'ECS (eau chaude sanitaire) ;
- d'estimer ces demandes énergétiques en fonction de la période de l'année, en particulier pour la période la plus froide ;
- de déduire pour cette période la plus froide les puissances thermiques à installer, sachant que cette puissance thermique est la somme de la puissance électrique de la pompe à chaleur géothermique (PACg) et de la puissance géothermique correspondant à l'échange d'énergie avec le sous-sol ;
- de confronter ces puissances géothermiques aux potentialités géothermiques locales, dites de très basse énergie (TBE), sur aquifère et/ou sur sondes géothermiques verticales ;
- de caractériser les secteurs géographiques en fonction de leur aptitude à satisfaire tout ou partie des demandes thermiques du tissu bâti au moyen de pompes à chaleur exploitant les ressources locales en géothermie de très basse énergie (TBE).

1.3. PRESENTATION DES RESULTATS DE L'ETUDE

Avant tout, le présent document expose le contexte et les résultats méthodologiques et cartographiques essentiels de l'étude (chapitre 2) et propose des recommandations et conclusions (chapitre 3).

Il s'attache ensuite (chapitres 4 à 6) à décrire les méthodologies qui ont été mises au point, celles qui sont à employer de préférence et celles qui peuvent être utilisées lorsque la méthode préférée ne peut être appliquée, par exemple lorsque des données font défaut.

Pour finir, le présent document comporte également des annexes qui précisent l'état de l'art pour les différentes techniques examinées.

Surtout, l'étude a produit des résultats très détaillés pour lesquels une édition sur papier resterait trop peu précise. Ces résultats ont donc été constitués, commune par commune, sous la forme de cartes numériques au format PDF. Ces cartes ont été regroupées en un atlas qui est disponible sur CD-ROM.

2. Résultats de l'étude

2.1. OBJECTIF ET DEMARCHE METHODOLOGIQUE

Le présent chapitre a pour objectif d'exprimer la méthode proposée pour comparer d'une part les différentes ressources thermiques (géothermiques dans le cas de la présente étude) et, d'autre part, les besoins énergétiques des bâtiments, à savoir pour le chauffage et pour l'ECS qui constituent l'essentiel de la demande en **énergie thermique utile**.

Cette comparaison est dénommée "**croisement des ressources et des besoins**". Elle exprime le **potentiel géothermique**, c'est-à-dire en l'occurrence ce que peuvent délivrer les ressources géothermiques en réponse aux demandes pour le confort thermique du tissu bâti.

On rappelle que, dans le cas de la géothermie très basse énergie, la solution technique employée est celle des pompes à chaleur géothermiques qui sont, en quasi-totalité, actionnées par de l'énergie électrique. De ce fait, l'**énergie thermique utile** est constituée d'une part d'énergie thermique d'origine géothermique (**énergie géothermique**) et d'une part d'énergie thermique d'origine électrique qui représente typiquement un quart de l'énergie thermique utile, le reste provenant de la ressource géothermique.

2.1.1. Problématique de la géolocalisation des ouvrages et des demandes

Résolution spatiale pertinente

La problématique du croisement des ressources et des besoins est délicate, au sens où la géolocalisation des ressources et des demandes n'est pas immédiate, par exemple :

- pour les ressources géothermiques, il a été montré au chapitre 4 que, quelle que soit la technique géothermique mise en œuvre, chaque opération mobilise des espaces souterrains plus larges que la localisation des ouvrages tels que repéré en surface ;
- pour un bâtiment, la ressource thermique à laquelle il accède n'a aucune raison d'être localisée exactement au droit de son emplacement. Par exemple, on sait que les ouvrages géothermiques ne sont pratiquement jamais situés sous les bâtiments et que, notamment en milieu urbanisé, les réseaux de chaleur peuvent disjoindre significativement les ressources et les utilisations. En Suisse, on parle d'ailleurs de "chaleur à distance".

Au travers des deux exemples ci-avant, on voit bien qu'il serait aberrant de faire coïncider exactement les ressources et les besoins. De ce fait, il faut éviter le biais consistant à effectuer un traitement parcelle par parcelle. Néanmoins, pour que la méthode soit de portée générale, il est impératif de prévoir son automatisation, tant pour le traitement des demandes du bâti que pour le traitement des données hydrogéologiques et géothermiques du sous-sol.

Préférence pour la représentation en mailles carrées de 25 m x 25 m

Pour les raisons rappelées ci-avant, les méthodes reposant sur des mailles carrées semblent préférables aux méthodes reposant sur des polygones cherchant à coïncider avec des spécificités locales. Avec les méthodes reposant sur des mailles, l'amélioration de la résolution spatiale s'obtient en diminuant la taille des mailles.

Les études réalisées à l'échelle d'un territoire étendu (département, région ...) travaillent par mailles carrées avec une résolution toute relative ne descendant pratiquement jamais sous la maille de 250 m x 250 m. Une telle dimension de mailles permet des restitutions pertinentes, même jusqu'à l'échelle 1 / 25 000. A l'échelle d'un aménagement communal, cette résolution est insuffisante car, par exemple, elle n'autorise pas d'appréciation à l'échelle d'une parcelle.

Or, dans le cas de la présente étude, la question posée est de concilier d'un côté une résolution suffisante vis-à-vis de la localisation des bâtiments et, de l'autre côté, une représentation assez fidèle des degrés de libertés offerts par les ressources géothermiques disponibles au voisinage des bâtiments.

Pour cela, la représentation par maille carrée reste incontournable mais, trop petite, elle n'aurait pas de sens physique, notamment au regard de l'état des connaissances tant sur le sous-sol que sur le tissu bâti. Trop grande, elle perd en précision. C'est donc une représentation par mailles carrées de 25 m x 25 m qui est retenue pour la présente étude :

- au chapitre 4, on montre que la représentation par mailles de 25 m x 25 m est pertinente tant pour les techniques géothermiques sur aquifères que pour les techniques sur sondes géothermiques ;
- au chapitre 5, on montre que cette représentation par mailles de 25 m x 25 m est également pertinente pour exprimer les demandes thermiques des bâtiments en les répartissant sur des espaces qui tiennent compte efficacement des disponibilités locales en ressources géothermiques.

2.1.2. Grandeurs représentatives des demandes et des ressources

Une fois effectué le choix d'une représentation par maille carrées, il devient impératif de ramener toutes les grandeurs manipulées à l'unité :

- par maille de 25 m x 25 m, soit une surface de 625 m² ;
- par mètre carré (m²) sachant que la surface d'une maille est de 625 m².

Puissance installée, puissance installable et puissance spécifique

Si la quantité d'énergie utilisée sur une année est en rapport direct avec les factures, la dimension caractéristique d'une installation est la **puissance installée**. Dans le présent document, cette puissance thermique installée est en rapport direct avec la dimension de l'installation géothermique en fonction du COP de la pompe à chaleur. Du point de vue de la ressource géothermique, la **puissance installable** désigne la dimension maximale de l'opération géothermique pouvant être localement implantée.

Nota : Dans le présent document, toutes les grandeurs sont rapportées à la maille ou au m². Les puissances thermiques installées / installables sont alors des **puissances spécifiques** qui peuvent indifféremment être exprimées en W / m² ou en kW par maille.

Période de référence pour le territoire de Clermont Communauté

Sur le territoire de Clermont Communauté, ces puissances spécifiques (installées / installables) représentent le dimensionnement des installations géothermiques pour le chauffage et l'ECS. Elles sont calculées pour la période de l'année la plus exigeante, c'est-à-dire la période la plus froide constatée entre janvier et février.

Pour d'autres territoires, la période qui mobiliserait le plus une géothermie peut être très différente. Par exemple, certains territoires méridionaux peuvent solliciter la géothermie plus en été pour le rafraîchissement des locaux qu'en hiver pour le chauffage.

2.1.3. Rappel des priorités pour exprimer les potentialités géothermiques

A) Examen des potentialités sur formations aquifères

A ce jour, dans une démarche de spécification des ressources géothermiques, la première étape réside toujours dans la caractérisation des formations aquifères car elles permettent, potentiellement, des puissances thermiques par opération plus élevées. La traduction concrète est que ces opérations sur aquifère, lorsqu'elles sont possibles, permettent de minimiser le nombre des ouvrages à mettre en place. Toutefois, dans le cas présent, ce sont surtout les aquifères superficiels qui sont disponibles, mais pas sur l'ensemble du territoire. De plus, leur profondeur semble globalement rester inférieure à 100 m.

B) Examen des potentialités sur SGV

L'objectif de Clermont Communauté étant de faciliter l'accès à la géothermie en tous points de son territoire et pour tous les maîtres d'ouvrages, il est apparu incontournable d'examiner les potentialités sur sondes géothermiques afin de palier à une disponibilité insuffisante des ressources sur aquifères. Aussi, en particulier là où les aquifères sont absents ou défavorables à une application géothermique, il devient judicieux d'estimer les aptitudes thermiques du proche sous-sol au sens du principe physique de la diffusion thermique (ou conduction thermique).

C) Précaution au regard des possibilités de réalisation de forages

Quelle que soit la technique géothermique, il est indispensable d'envisager les zones d'exclusion ou soumises à restriction, les critères pouvant être géologiques, hydrogéologiques, techniques ou réglementaires.

La prise en compte de ces zones reste assez délicate à traiter car son automatisation ne semble pas envisageable, ni d'ailleurs souhaitable. En effet, les critères évoqués ci-avant ne sont pas nécessairement synonymes d'impossibilité technique ou réglementaire mais peuvent n'aboutir qu'à des prescriptions techniques particulières lors de la réalisation.

Dans le présent rapport, la méthodologie proposée revient à établir d'abord les cartographies des potentialités géothermiques, lesquelles sont déterminées sans prise en considération des contraintes ci-dessus, puis à superposer la cartographie des zones de contraintes.

D) Bases de données sur le sous-sol

Les trois actions ci-avant sont réalisées à partir des informations disponibles dans les bases de données mises à disposition par le BRGM sur le site Internet INFOTERRE. Elles permettent de cartographier les ressources en eaux souterraines et d'estimer les propriétés thermiques des formations. A ce jour, les informations disponibles dans les bases de données peuvent, localement, demeurer insuffisantes pour localiser les restrictions éventuelles vis-à-vis de la réalisation de forages. Dans un tel cas, le recours à un professionnel pourra être nécessaire.

Sur le territoire de Clermont Communauté, les informations relatives aux niveaux géologiques superficiels se sont révélées insuffisantes pour produire avec certitude le niveau de détail requis, c'est-à-dire, si possible, celui de la parcelle, du lotissement ou de la zone d'activité ou d'aménagement. Ces incertitudes résultent autant de la complexité géologique et hydrogéologique du secteur que du manque d'informations sur des opérations géothermiques antérieures dans ce secteur.

De ce fait, l'étude a donné lieu à des enquêtes systématiques auprès des services des différentes communes afin de recueillir des données complémentaires sur les aquifères et les formations traversées à l'occasion de travaux de toute nature ou de surveillance d'ouvrages. La démarche a également été étendue aux archives de bureaux d'études du secteur.

Les données collectées ont, notamment, porté sur la nature des formations géologiques, la profondeur des réservoirs aquifères, les épaisseurs totales et productives, les transmissivités, les débits potentiels et/ou mobilisés, la température, les propriétés géochimiques du fluide.

Après l'interprétation de ces données, les ressources superficielles, aquifères ou non, ont été traitées en vue d'une cartographie et de leur intégration dans le Système d'Information Géographique (SIG) du BRGM : la BSS (<http://infoterre.brgm.fr/dossiers-sur-le-sous-sol-bss>)

La Banque de données du Sous-Sol (BSS) permet de localiser et visualiser les informations sur les forages en France métropolitaine et outre-mer. Elle offre un accès aux descriptifs des forages et aux logs vérifiés, c'est-à-dire à une coupe géologique.

2.1.4. Synthèse des demandes thermiques des bâtiments

1) Demande thermique du bâti connu (puissance installée par maille)

A ce jour, le bâti le mieux connu l'est au travers de la banque de données MAJIC de la DGI qui présente l'inconvénient de ne renseigner que le bâti soumis à l'impôt.

Pour le bâti renseigné dans la base MAJIC, on dispose, avec une précision acceptable, du détail des surfaces constituant le bâtiment et de leurs usages, ce qui permet d'estimer la demande en ECS pour les logements (Illustration 2). Le second intérêt de cette banque de données est de proposer une indication sur l'année d'achèvement de la construction, ce qui procure une idée des performances thermiques nécessaires à l'estimation de demandes en chauffage pour les logements (Illustration 4) et pour les autres bâtiments (Illustration 3).

2) Demande thermique du bâti estimé (puissance installée par maille)

La BD-TOPO et la BD-Parcellaire de l'IGN recensent l'ensemble des bâtiments existants et produisent les dimensions de l'enveloppe extérieure de ces bâtiments et leur usage. Moyennant des hypothèses simplifiées, l'utilisation de ces banques de données de l'IGN permet d'estimer les demandes énergétiques pour les bâtiments absents de la banque MAJIC (Illustration 5). Un recollement est toutefois nécessaire pour éviter les doublons.

3) Demande thermique consolidée (puissance installée par maille)

Le cumul des demandes thermiques ci-avant (Illustration 2 à Illustration 5) procure la demande thermique totale pour l'ensemble des bâtiments de Clermont Communauté (Illustration 6). **Cette demande représente une puissance installée en kW par maille.**

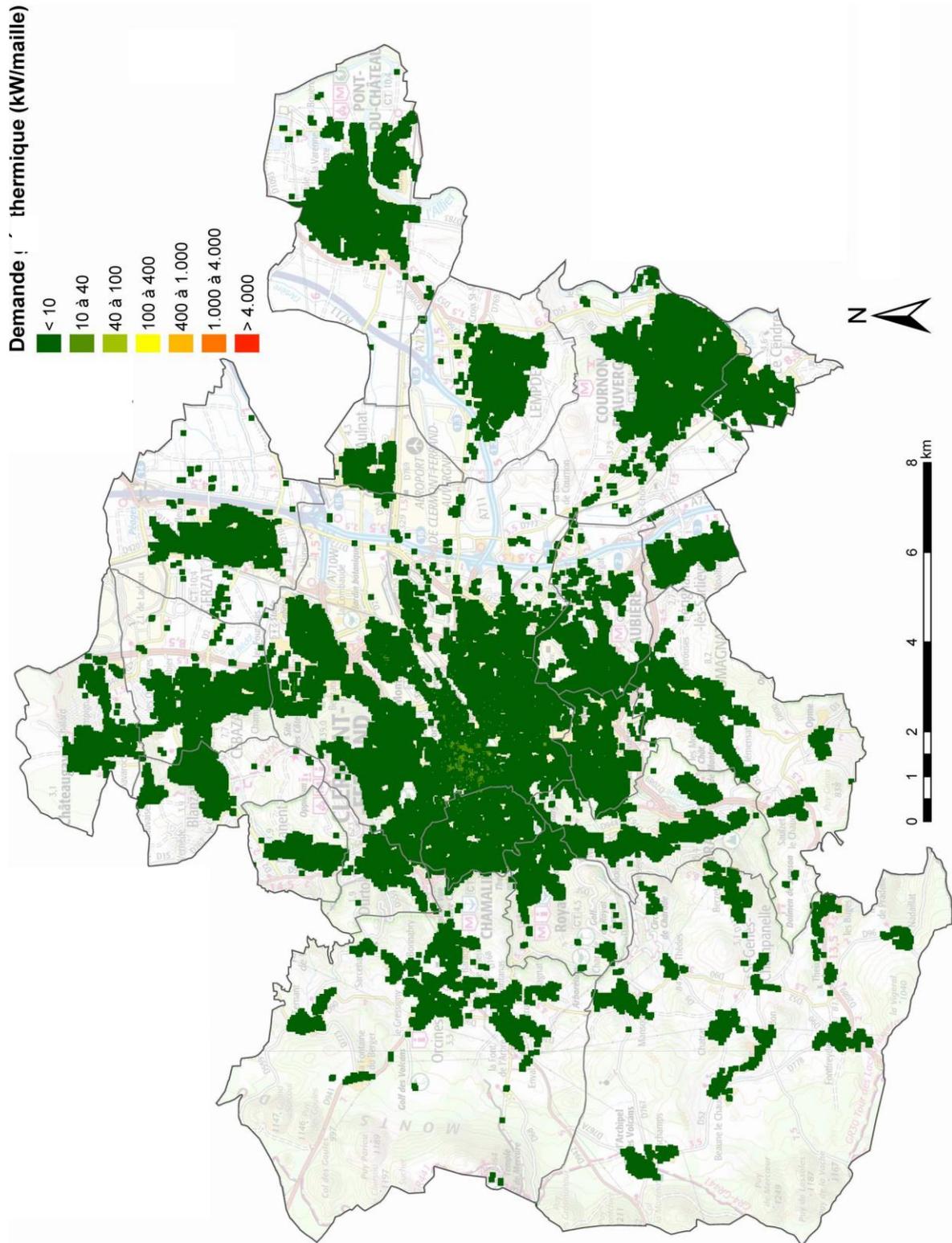


Illustration 2 : Carte des demandes thermiques pour l'ECS des logements selon BD-MAJIC

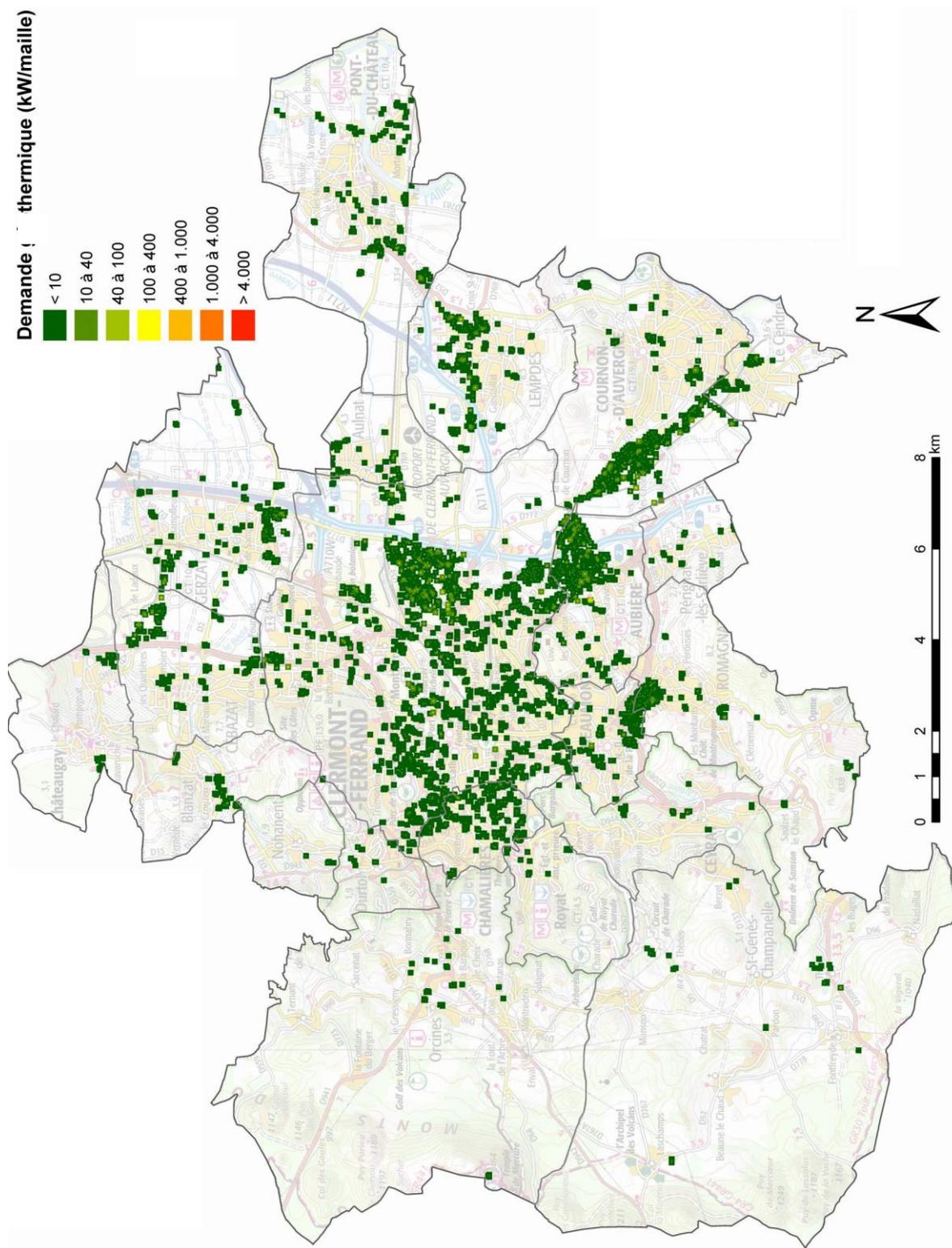


Illustration 3 : Carte des demandes thermiques pour le chauffage des bâtiments hors logement selon BD-MAJIC

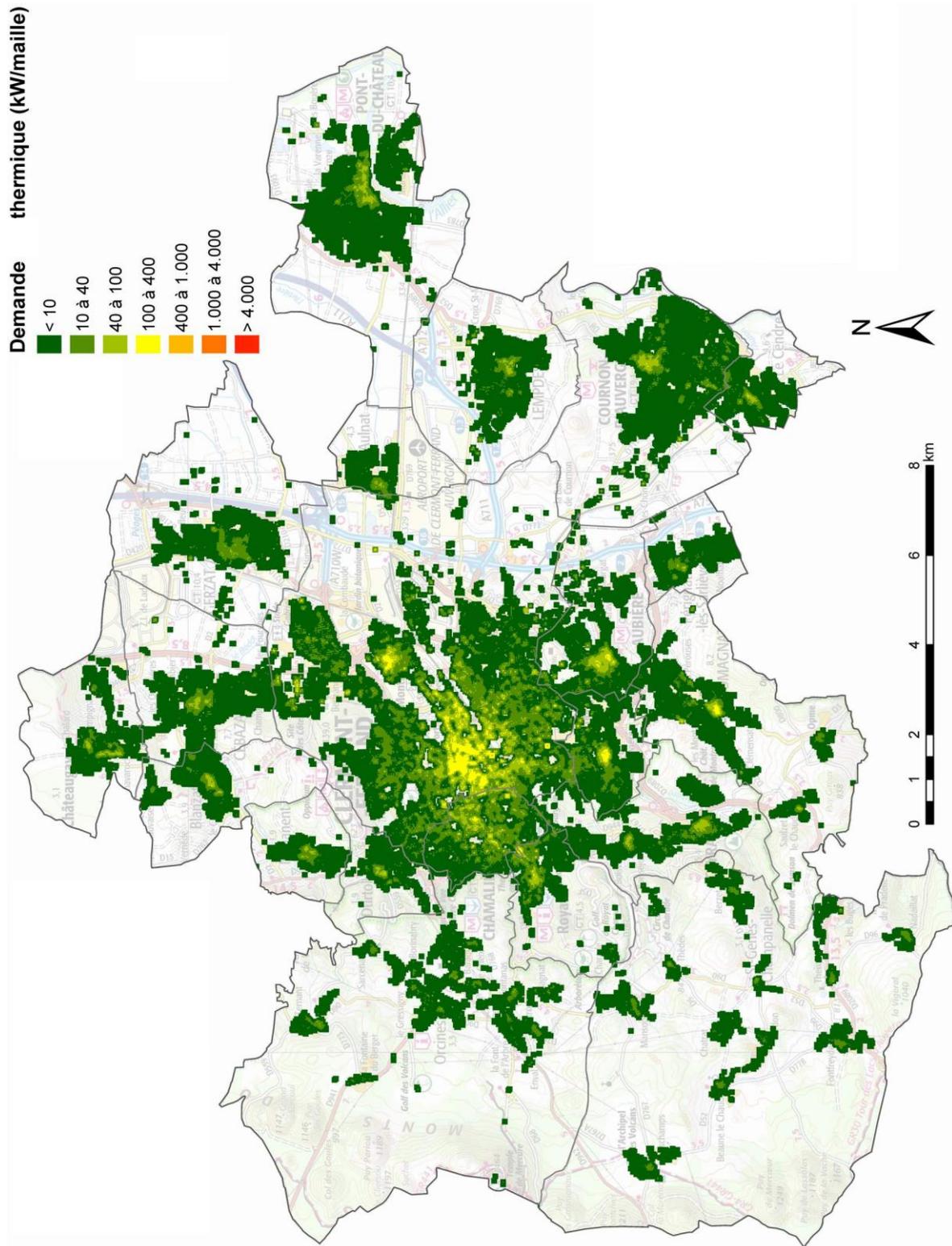


Illustration 4 : Carte des demandes thermiques pour le chauffage des logements selon BD-MAJIC

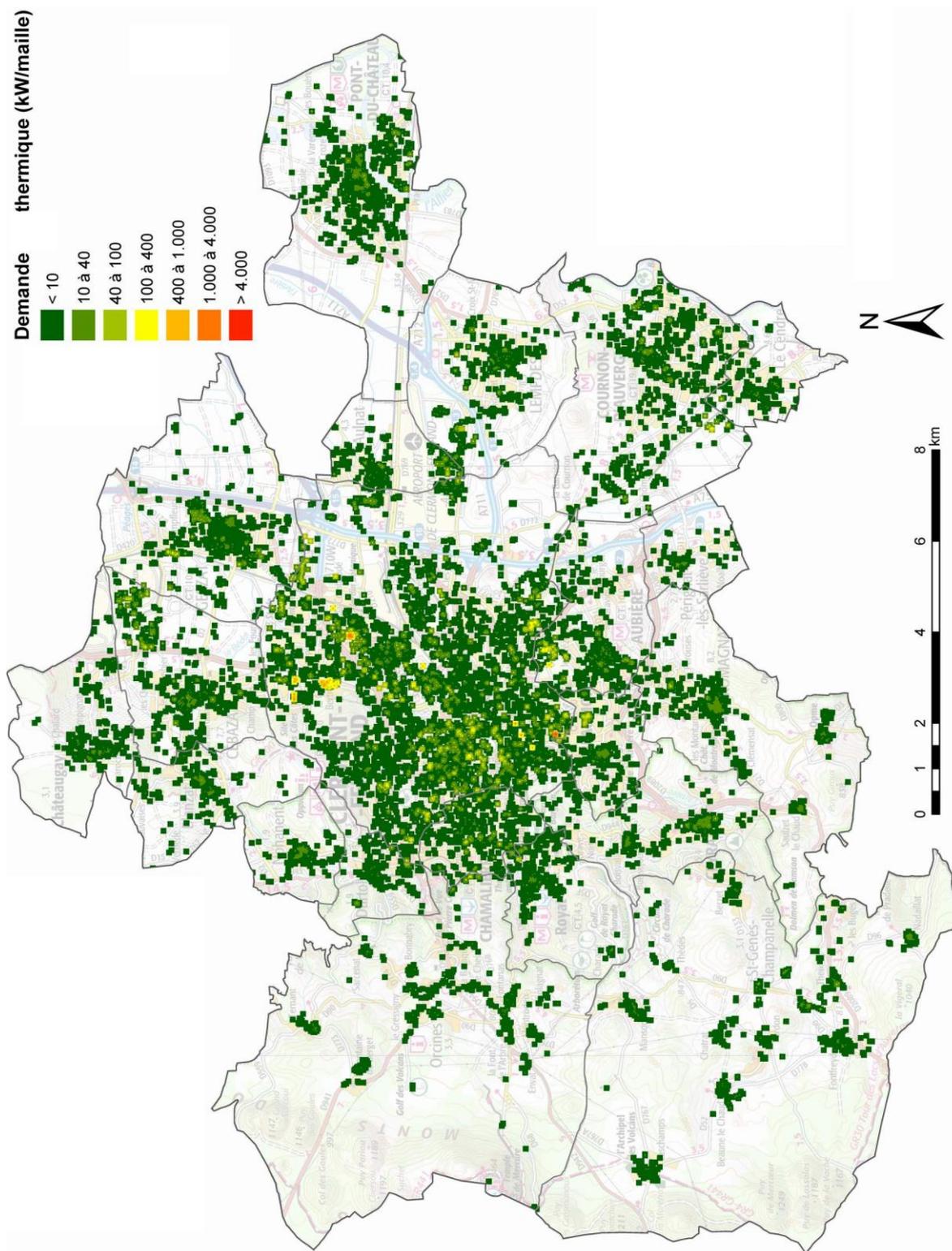
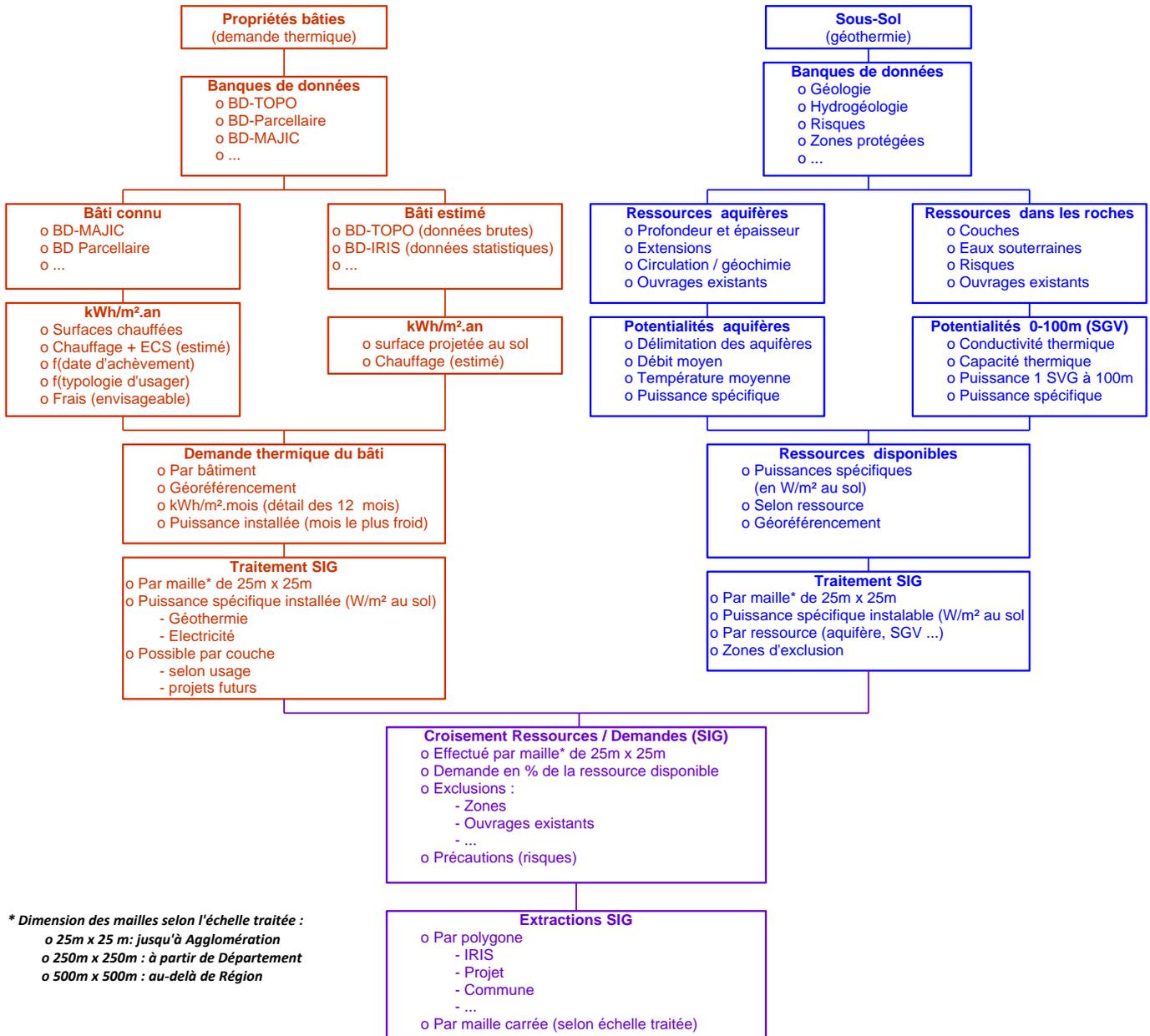


Illustration 5 : Carte des demandes thermiques pour le chauffage des bâtiments hors logement selon BD-Parcellaire

2.1.5. Récapitulatif de la méthode proposée pour croiser ressources et besoins

Le logigramme ci-après (Illustration 7) combine les logigrammes des processus mis au point pour exprimer les ressources (Illustration 36) et pour exprimer les besoins (Illustration 61).



* Dimension des mailles selon l'échelle traitée :
 o 25m x 25m : jusqu'à Agglomération
 o 250m x 250m : à partir de Département
 o 500m x 500m : au-delà de Région

Illustration 7 : Logigramme récapitulatif de la méthode de croisement des ressources et des besoins

Toutes les informations manipulées sont rapportées à la maille de 25 m x 25 m. En particulier, les puissances spécifiques sont alors exprimées indifféremment en kW / maille ou en W/m². Sont plus particulièrement concernées les **puissances géothermiques installées** du tissu bâti (puissance thermique utile de laquelle on déduit la puissance électrique) et les **puissances géothermiques installables** vis-à-vis de la ressource locale.

Le croisement des données pour exprimer les potentiels s'effectue alors en rapportant les puissances géothermiques installables (ressources) aux puissances géothermiques installées (demandes). **Ce calcul correspond en fait à un taux de couverture.**

2.1.6. Indicateurs du potentiel géothermique : taux de couverture

Potentiel géothermique

Par convention, le potentiel géothermique est défini comme étant la quantité d'énergie géothermique pouvant être employée pour répondre à une demande en énergie thermique. Avec cette définition, on voit bien que si la demande thermique est nulle alors le potentiel est nul. Le potentiel géothermique exprime donc une grandeur qui qualifie l'usage d'une ressource géothermique et non pas la seule ressource.

Le potentiel est exprimé pour la période de l'année la plus exigeante, à savoir la période la plus froide de l'année, car cela renseigne sur la capacité des ressources à satisfaire **sans appoint thermique** l'ensemble des besoins en énergies thermiques. Puisque les énergies en question se rapportent à une période donnée, cela revient à exprimer des puissances.

Taux de couverture potentiel

Le taux de couverture potentiel est défini comme étant la part de la demande pouvant être couverte par la géothermie.

Ce taux de couverture se rapporte à une aire donnée (maille, îlot, quartier ...). Dans ce rapport, ce sont les **puissances géothermiques installables** qui sont rapportées aux **puissances géothermiques installées** (demandes thermiques desquelles on déduit les puissances électriques des PACg en fonction du COP).

Plus précisément, le taux de couverture (sans dimension) compare, maille par maille, la puissance géothermique installable à la puissance géothermique appelée (installée) :

$$\text{Taux de couverture} = \frac{\text{Puissance géothermique installable}}{\text{Puissance géothermique demandée (installée)}}$$

On convient alors de l'échelle suivante pour la représentation du taux de couverture :

Echelle	Taux de couverture potentiel
Pas de besoin	/
Ressource indisponible ou très incertaine	/
Très faible	Inférieur à 5 % de la demande
Assez faible	De 5% à 10 % de la demande
Faible	De 10% à 25 % de la demande
Moyen	De 25% à 50 % de la demande
Intéressant	De 50% à 25 % de la demande
Bon	De 75% à 100 % de la demande
Excédentaire	Supérieur à 100 % de la demande

Nota : La présente étude examine séparément les taux de couverture qui correspondent à chacune des techniques géothermiques bien que les deux techniques étudiées se rapportent toutes deux à de la géothermie superficielle. Les représentations graphiques ci-après (Illustration 8 et Illustration 9) résultent de calculs effectués pour chacune des mailles carrées de 25 m de côté (625 m²). Si besoin, la taille retenue pour les mailles autorise une extraction directe pertinente en polygones à l'échelle des îlots IRIS, ZAC, quartiers ou lotissements, voire à l'échelle de la parcelle.

2.1.7. Restitutions cartographiques pour les potentiels géothermiques

Le potentiel de la géothermie sur aquifère superficiel, représenté par le taux de couverture, est globalement assez faible, en grande partie du fait de ressources géothermiques sur aquifères indisponibles ou incertaines en de nombreux secteurs.

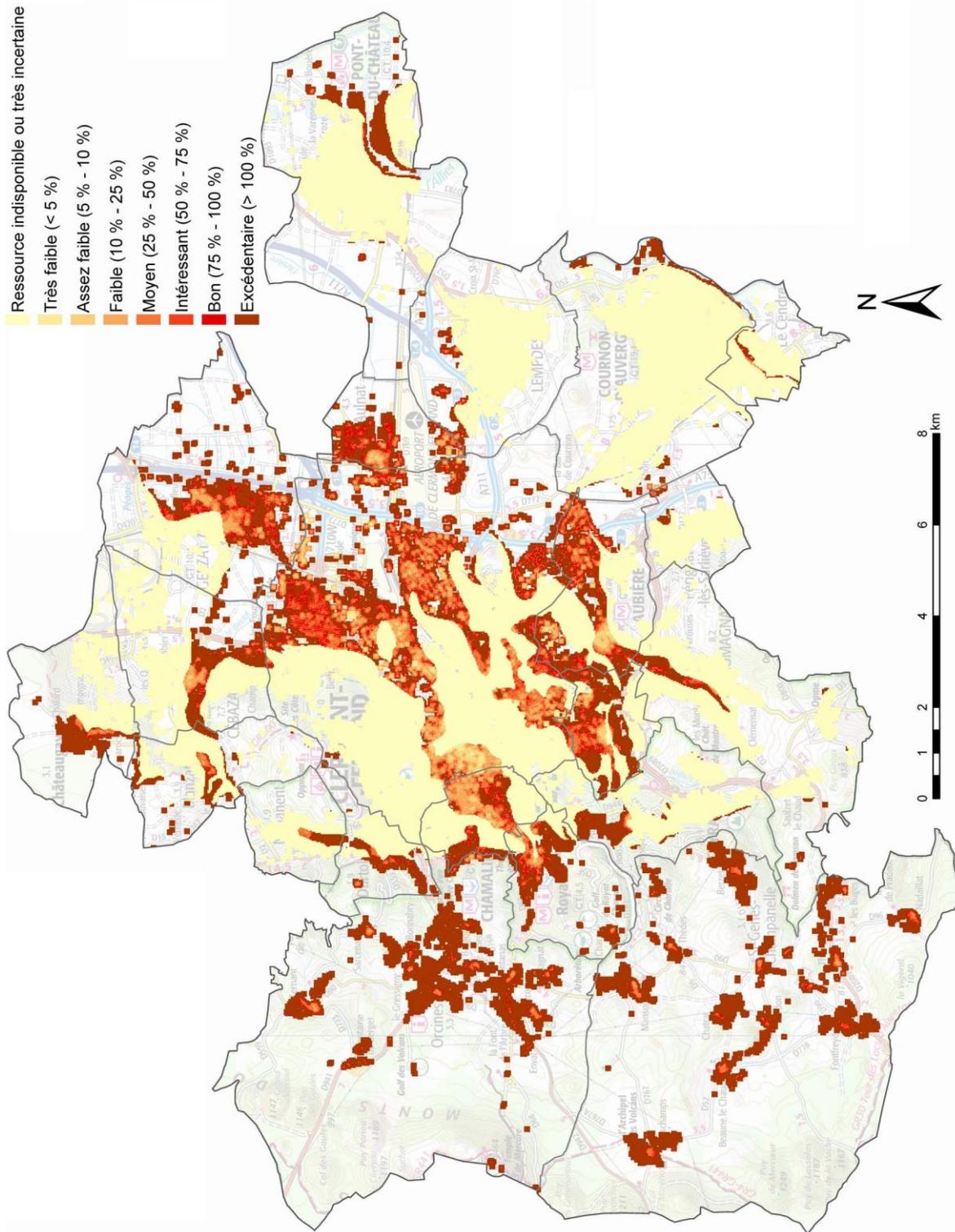


Illustration 8 : Carte du taux de couverture potentiel de la demande en chauffage et ECS par la géothermie sur aquifère

Le potentiel de la géothermie sur SGV, représenté par le taux de couverture, ressort comme étant assez largement favorable, en grande partie du fait d'un tissu urbain assez peu dense dans l'ensemble, ce qui devrait permettre, probablement en de nombreux secteurs, d'envisager cette technique pouvant pourtant être assez exigeante sur le foncier. On notera que la technique du champ de sondes, un peu moins exigeante, n'a pas été considérée.

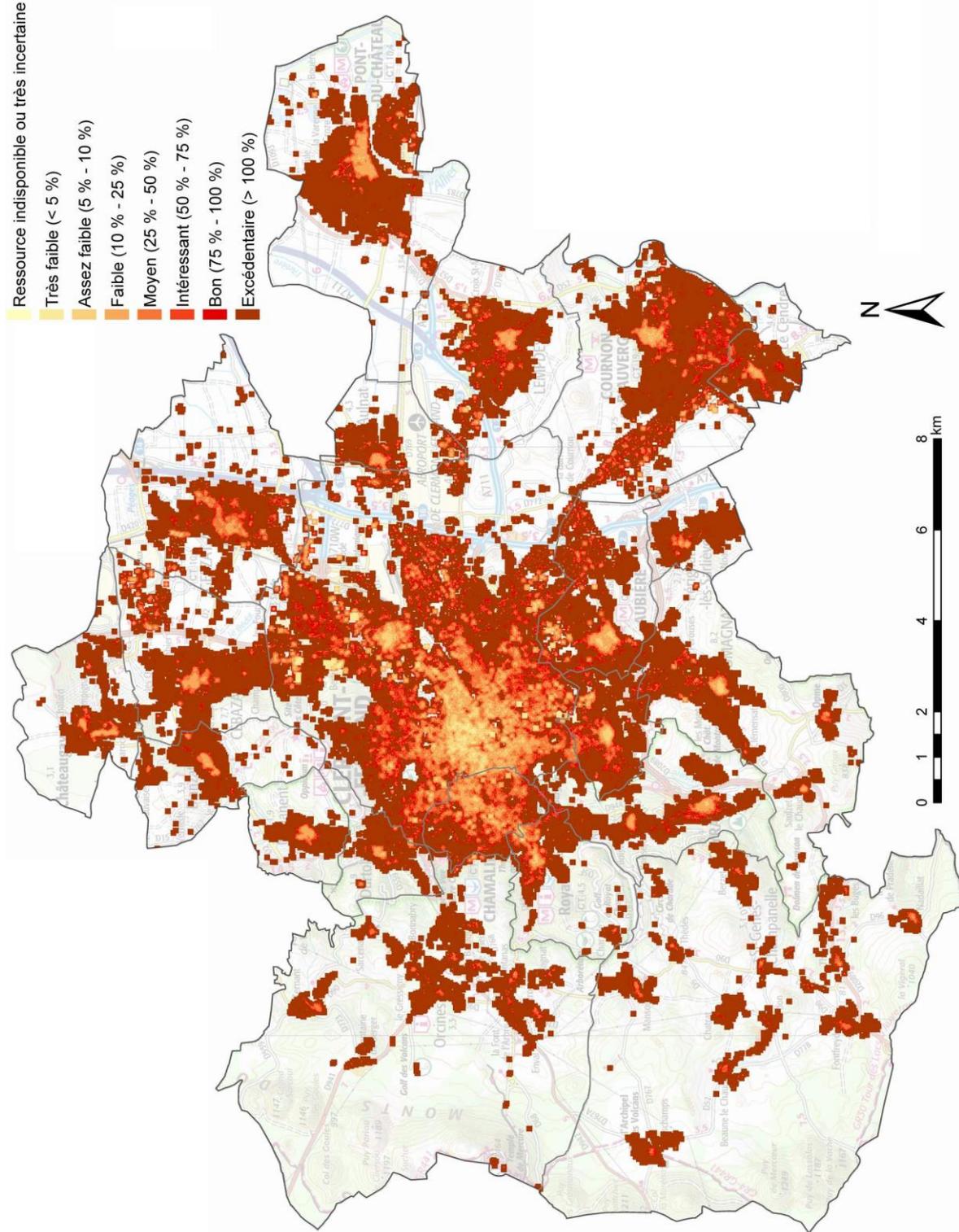


Illustration 9 : Carte du taux de couverture potentiel de la demande en chauffage et ECS par les sondes géothermiques

2.2. APPLICATION AUX PROJETS FUTURS

Les données consultables (Illustration 10) montrent que le territoire de Clermont Communauté recèle, à court, moyen et long termes, des disponibilités foncières pour l'habitat et les activités.

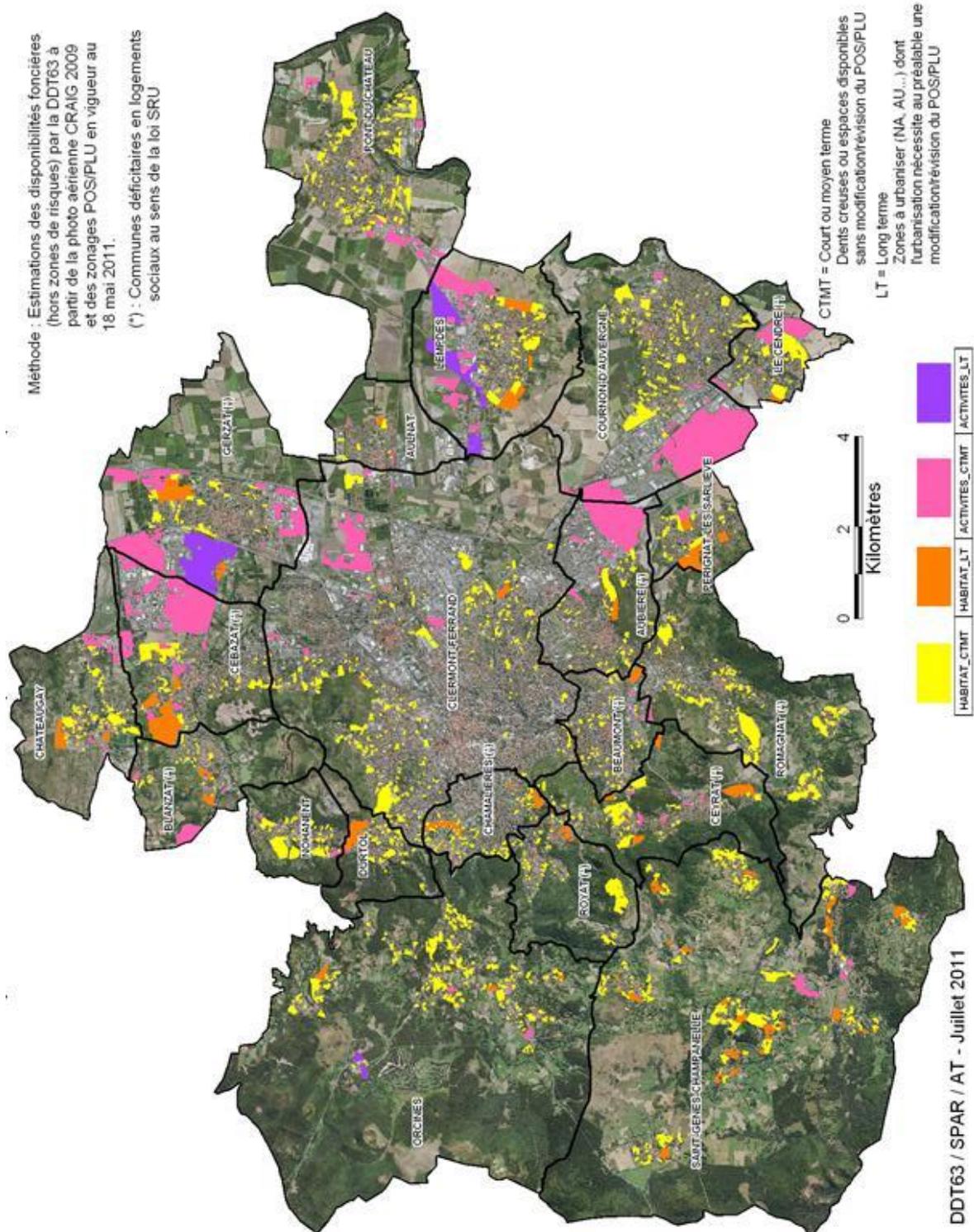


Illustration 10 : Carte des disponibilités foncières (habitat et activités) sur le territoire de Clermont Communauté

Les paragraphes qui suivent contribuent à l'examen des potentialités géothermiques, sur aquifères ou sur sondes géothermiques, pour les projets futurs en cours ou programmés.

2.2.1. Projets futurs superposés aux potentialités géothermiques sur aquifères

La représentation cartographique ci-après (Illustration 11) est proposée à titre indicatif. On remarque que les projets situés en secteur aquifère potentiellement favorable sont proportionnellement peu nombreux, ce qui semble cohérent au regard d'un territoire assez peu favorable de ce point de vue.

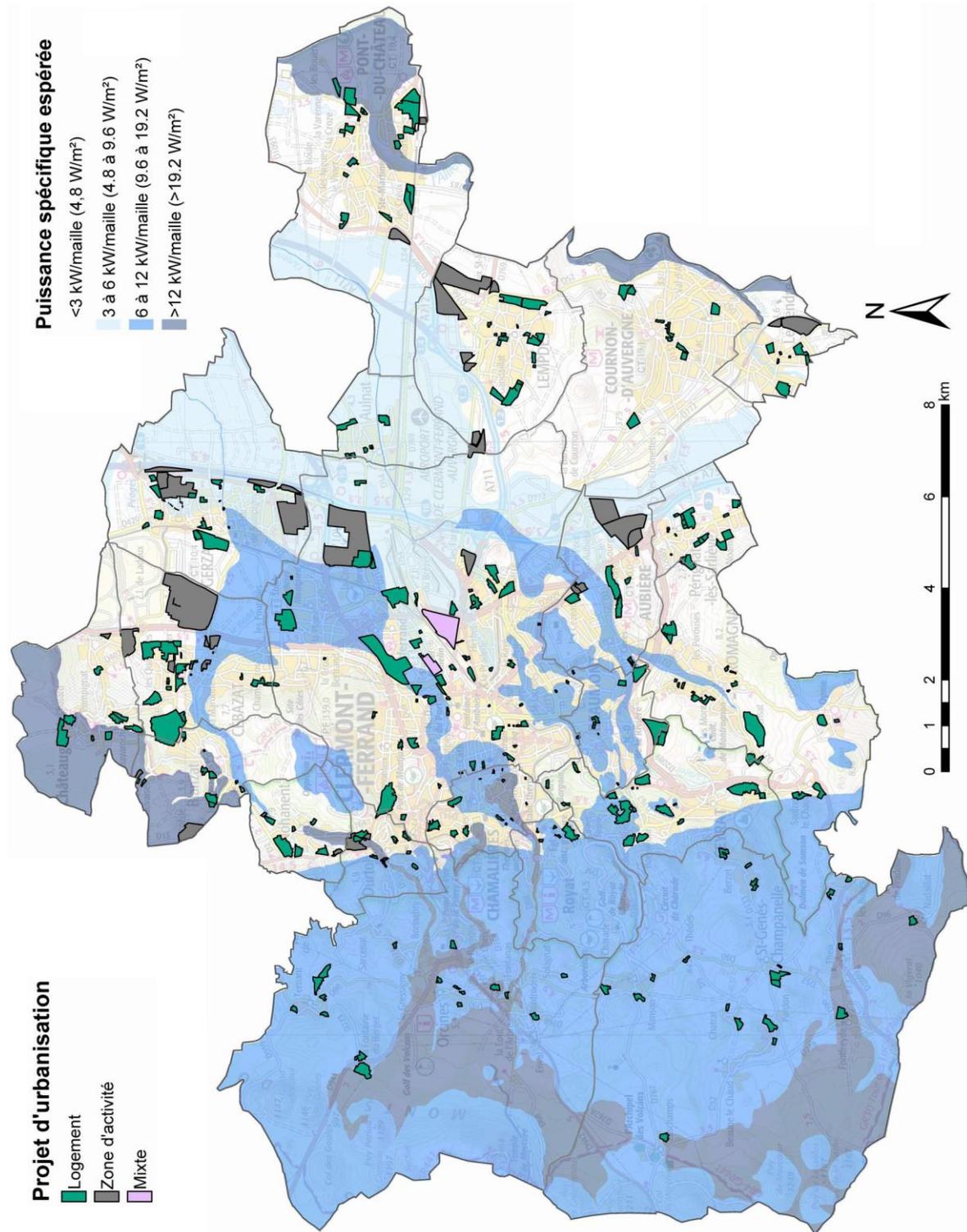


Illustration 11 : Carte des disponibilités foncières (habitat et activités) sur le territoire de Clermont Communauté

2.2.2. Projets futurs superposés aux potentialités sur sondes géothermiques

La représentation cartographique ci-après (Illustration 12) est proposée à titre indicatif. Logiquement, aucune conclusion ne peut être tirée de cette carte car la mise en place de SGV est peu contrainte sur le territoire. On retiendra toutefois que les retours d'expériences restent peu nombreux, l'intervention d'un BET spécialisé est donc conseillée.

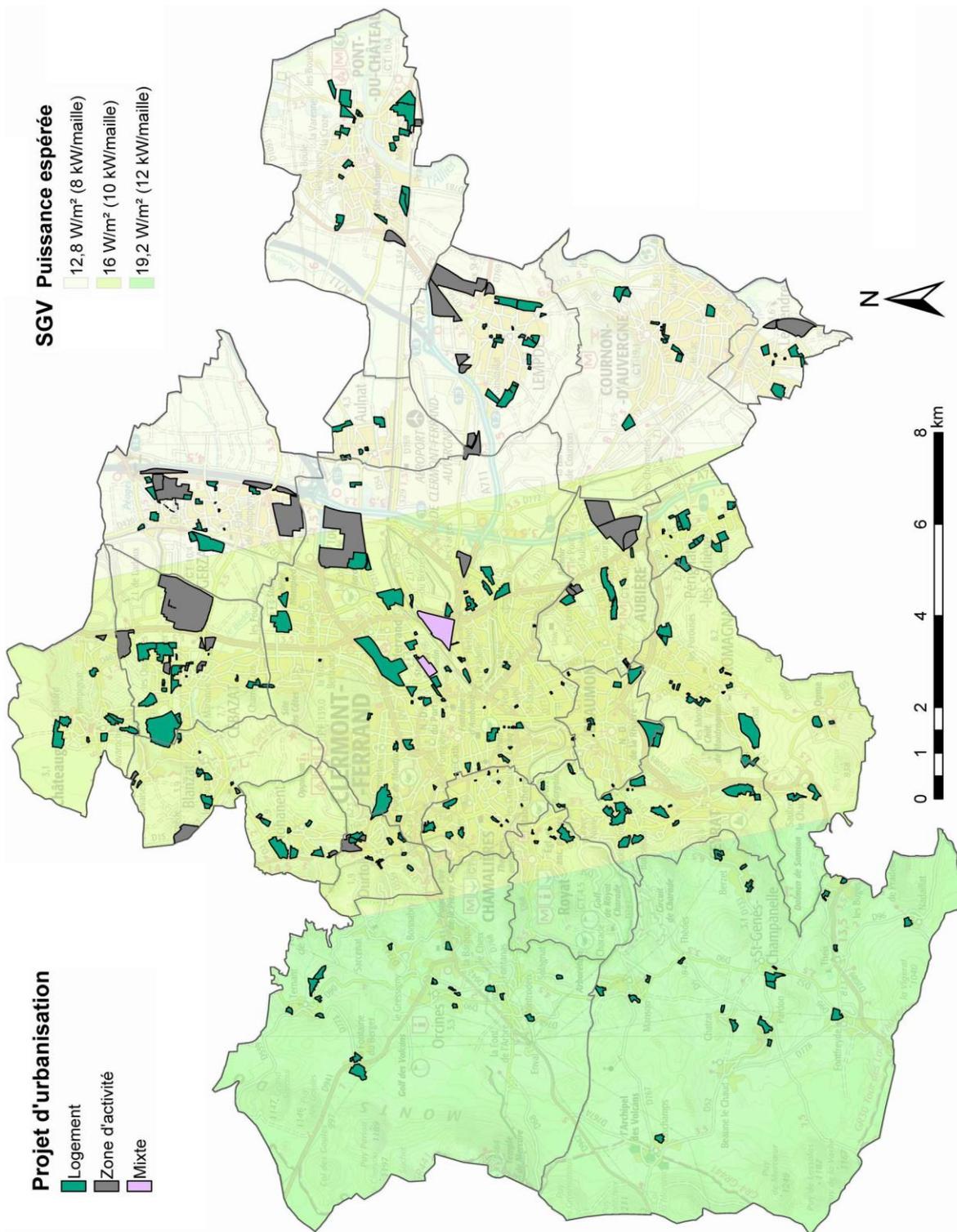


Illustration 12 : Carte des disponibilités foncières (habitat et activités) sur le territoire de Clermont Communauté

2.3. FOCUS SUR UN PROJET DE REQUALIFICATION

2.3.1. Localisation du secteur examiné : projet de construction d'un lycée

Dans ce paragraphe, il est proposé d'examiner les résultats pouvant être produits à l'aide de la méthodologie décrite ci-avant en l'appliquant à un secteur particulier, à savoir le projet de construction d'un lycée sur un ancien emplacement industriel localisé (Illustration 13) entre les rues Pré-la-Reine, Chappe, Saint-Jean et du Charolais sur la commune de Clermont-Ferrand.



Illustration 13 : Vue aérienne du secteur projeté pour la construction d'un lycée

Ce secteur, qui est encadré sur les cartes reproduites en Illustration 14 et suivantes, fait partie des projets d'aménagement de Clermont Communauté mixant logements et activités.

Comme le montre la carte reproduite en Illustration 17, les potentialités des ressources géothermiques sur aquifères superficiels de ce secteur sont faibles ou nulles au regard des connaissances disponibles.

Néanmoins, comme cela sera montré plus loin, une opération géothermique peut y être envisagée, par exemple sur des sondes géothermiques verticales.

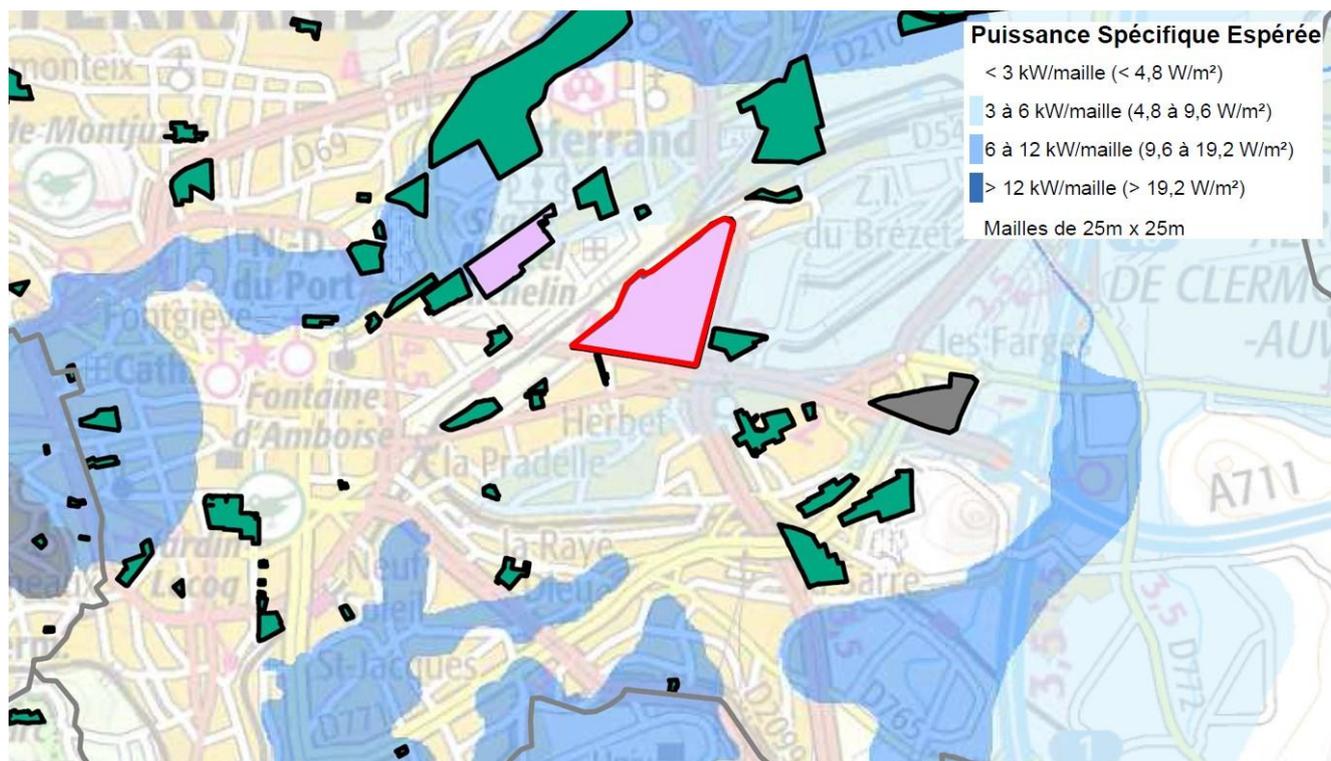


Illustration 14 : Localisation du secteur d'étude sur la carte des potentialités aquifères

2.3.2. Demande en énergie thermique par le bâti existant

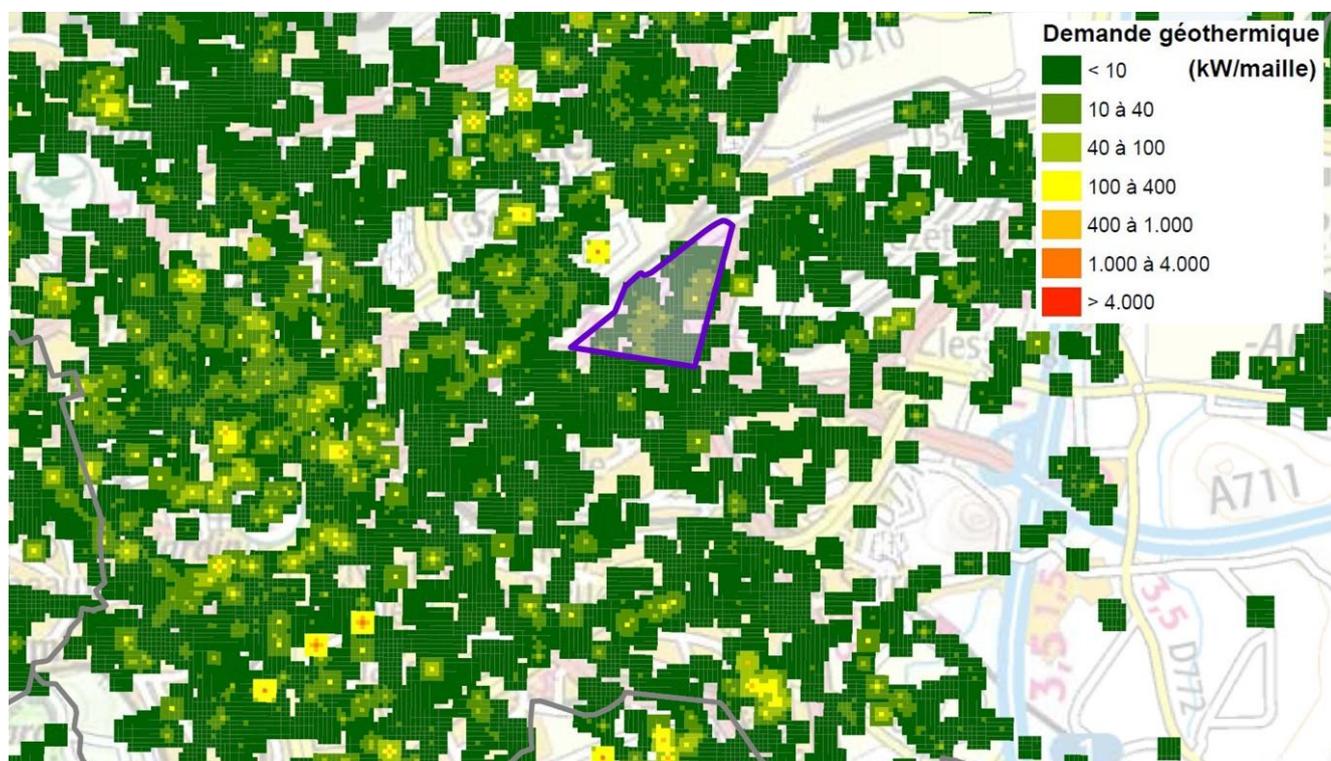


Illustration 15 : Demandes en énergie géothermique des locaux hors habitations

La carte ci-avant (Illustration 15) est focalisée sur les bâtiments à usage autre qu'habitation. Elle considère la demande géothermique en faisant l'hypothèse que 100 % des besoins en chauffage est ou sera couvert par de la géothermie.

La carte ci-après (Illustration 16) consolide les demandes géothermiques pour l'ensemble du tissu bâti en y ajoutant les locaux d'habitation qui ont des besoins en chauffage et en ECS.

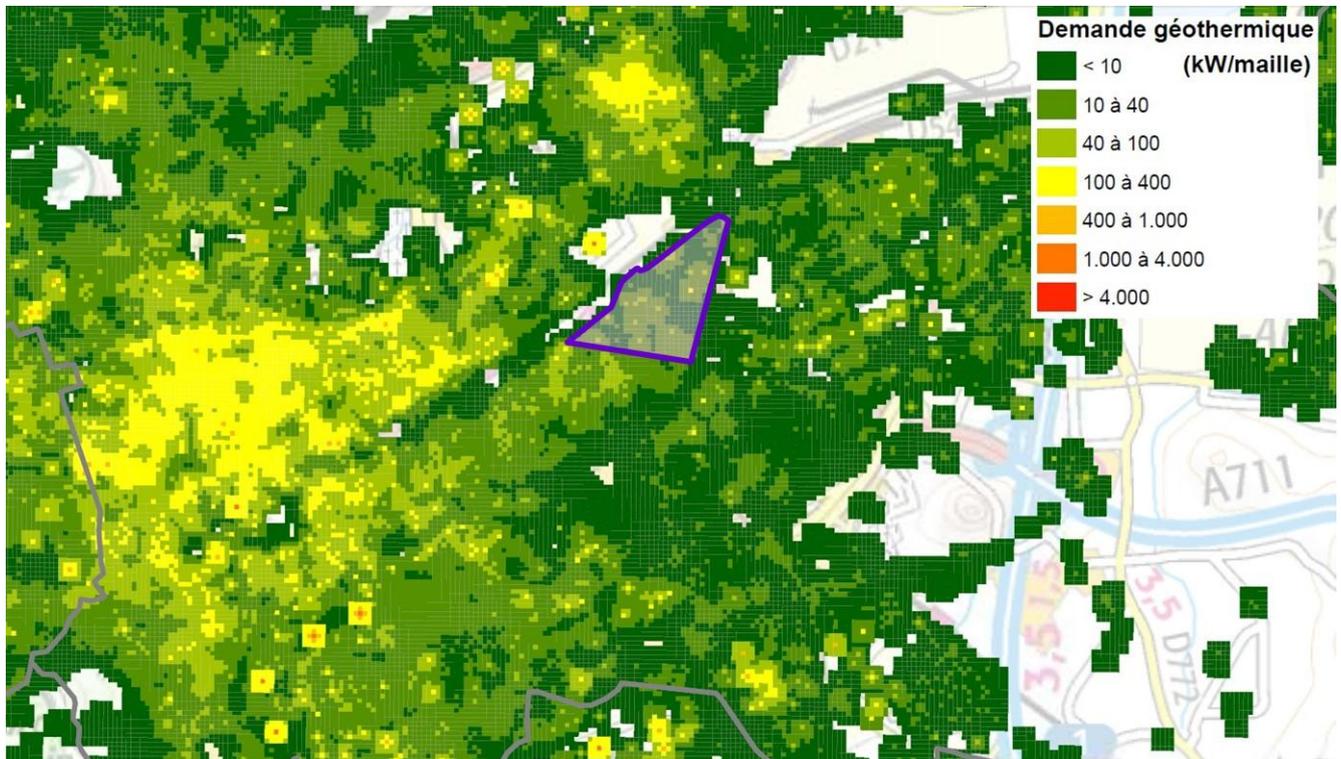


Illustration 16 : Demandes en énergie géothermique cumulée pour l'ensemble du tissu bâti existant

En première approche, si la demande géothermique du bâti existant est inférieure à 10 kW/maille, alors on peut considérer que de la ressource géothermique restera disponible pour le projet d'aménagement. En observant les deux cartes ci-avant, on constate que les demandes potentielles en énergie géothermique sont relativement modérées pour le secteur urbanisé concerné car, dans le voisinage, de nombreuses mailles de 25 m x 25 m répercutent des besoins cumulés qui restent inférieurs à 10 kW par maille.

Par voie de conséquence, un raccordement à de la géothermie superficielle semble devoir être étudié, cela même si une proportion importante des bâtiments du secteur voulait, à termes, être raccordée à de la géothermie. Reste évidemment à vérifier par des sondages que les ressources géothermiques superficielles sont effectivement suffisantes.

Rappel : Dans ce rapport, on estime la part puisée dans le sol (demande géothermique) en admettant que le système thermodynamique à compression mécanique (pompe à chaleur - PAC) a un COP machine égal à 4, ce qui signifie que $\frac{1}{4}$ de la demande thermique utile est satisfait par l'énergie provenant du réseau électrique pour entrainer le compresseur. La demande géothermique est alors exprimée en puissance installée qui est évaluée pour satisfaire 100 % de la puissance thermique utile lors de la période la plus froide de l'année.

2.3.3. Potentiel géothermique du secteur examiné

En premier lieu, on rappelle que, par convention, le potentiel géothermique représente l'énergie géothermique qui peut être utilisée en surface, à savoir utilisée par l'ensemble des bâtiments. Dans le présent rapport, aucune hypothèse n'est faite sur une "part de marché" de la géothermie qui serait inférieure à 100 % vis-à-vis d'autres ressources énergétiques. Cela signifie que les taux de couverture de la demande thermique par la géothermie, qui sont présentés ci-après, se réfèrent à 100 % de la demande thermique utile des bâtiments.

Potentiel sur aquifère superficiel

Comme montré en Illustration 17, le secteur étudié est situé au droit de formations hydrogéologiques peu propices à une géothermie sur aquifère superficiel, les ressources y étant considérées comme indisponibles ou incertaines.

En fait, même les zones localisées à l'est du secteur étudié, qui sont potentiellement plus propices, ne permettent probablement que des débits relativement faibles qui, de ce fait, n'autorisent que des opérations d'assez faible puissance unitaire installée, de quelques dizaines de kilowatts tout au plus.

Par voie de conséquence, un raccordement à de la géothermie sur aquifère superficiel paraît improbable sur le secteur étudié, indépendamment des besoins thermiques des autres bâtiments localisés dans le voisinage.

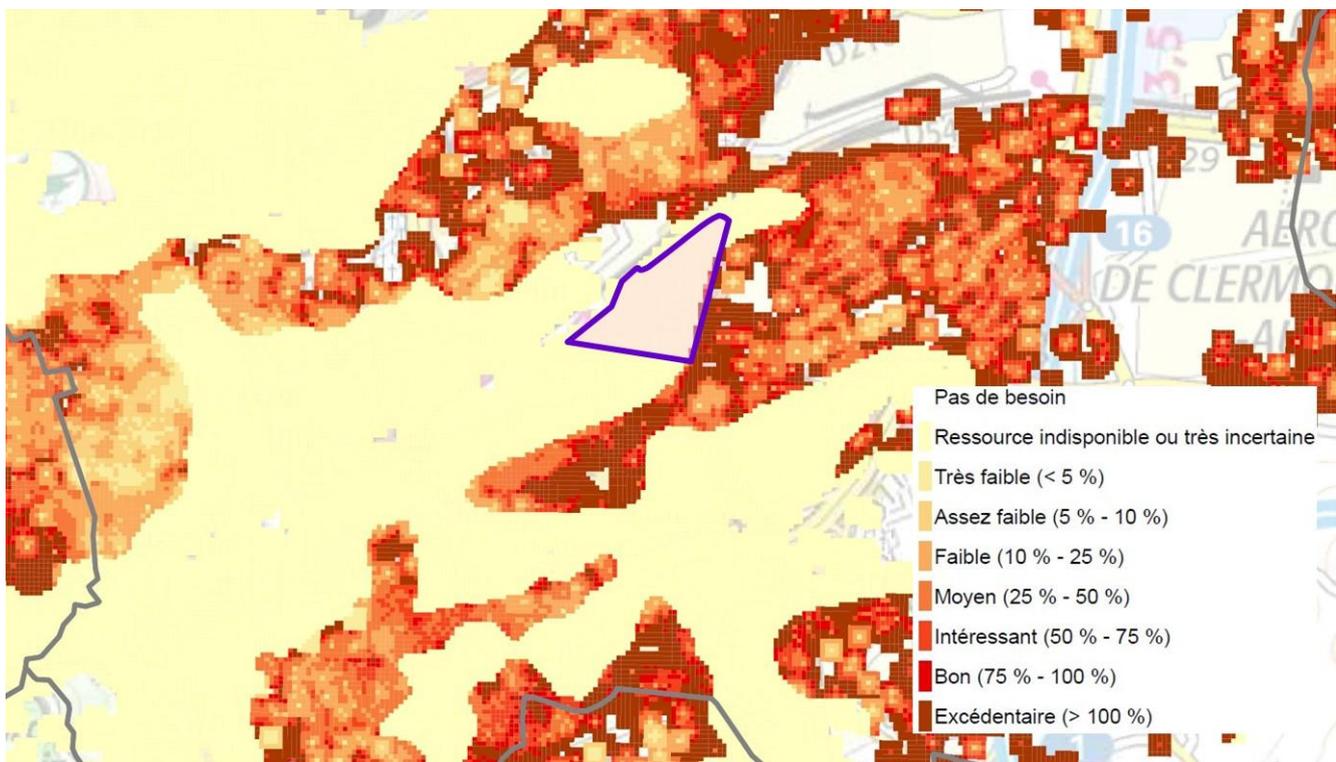


Illustration 17 : Potentiel géothermique du secteur d'étude vis-à-vis des ressources sur aquifère superficiel

Potentiel sur sondes géothermiques verticales

Indépendamment des espaces disponibles pour organiser un chantier de forage, le secteur étudié semble permettre l'implantation de sondes géothermiques verticales sans restriction notable, seuls les premiers mètres de sol pouvant justifier des précautions liées à la nature des terrains, en raison de possibles présences d'argiles. Ces précautions sont de même nature que pour la réalisation des géostructures (fondations) des bâtiments.

Sur la carte ci-après (Illustration 18), on constate que la couverture de la demande totale des bâtiments en énergie thermique par des SGV pourrait être satisfaite à 100 % pour de nombreuses mailles du secteur étudié, en particulier pour la partie nord de ce secteur où se situe le projet de construction d'un lycée.

Par voie de conséquence, un raccordement à de la géothermie sur SGV paraît devoir être étudié sur le secteur examiné, éventuellement avec une implantation en champ.

Nota : Comme toujours lorsque sont examinés les champs de SGV pour une construction neuve, il est recommandé de considérer également l'hypothèse des fondations géothermiques, éventuellement combinées à des SGV.

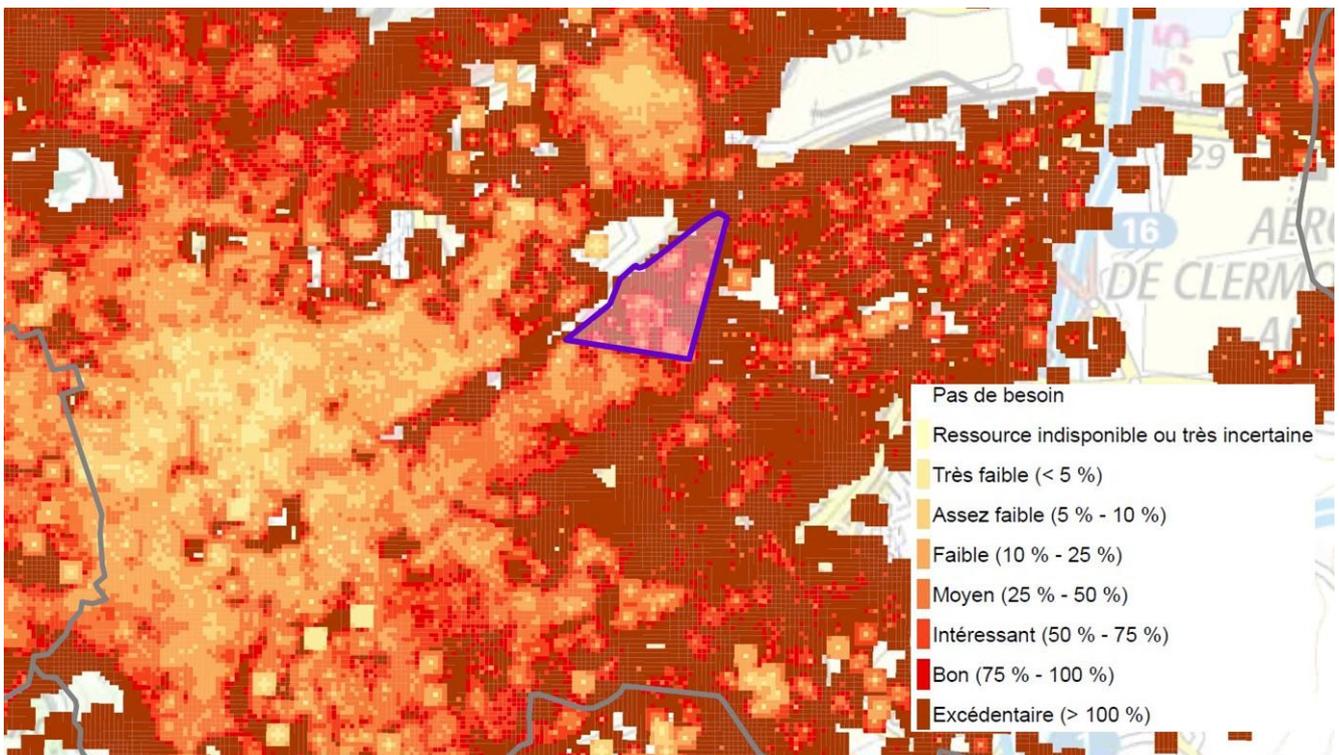


Illustration 18 : Potentiel géothermique du secteur d'étude vis-à-vis des ressources sur SGV

Un établissement comme un lycée, surtout lorsqu'un internat y est associé, justifie l'implantation d'un nombre significatif de sondes géothermiques, a minima quelques dizaines. Dans un tel cas, il est rappelé que deux approches techniques existent :

- 1) implantation en sondes indépendantes : les SGV sont espacées d'une dizaine de mètres les unes des autres et sont alors largement réparties sur l'emprise foncière ;

- 2) implantation en champ compact : les SGV sont relativement rapprochées les unes des autres. Cette situation correspond typiquement au cas où l'évacuation de chaleur en période estivale contribue à la régénération thermique du sous-sol.

Potentialités liées aux réseaux d'eaux usées

L'emplacement prévu pour la construction du lycée n'est pas localisé à proximité immédiate de conduites du réseau intercommunal d'eaux usées.

Néanmoins, il a été identifié, en partie sud du secteur examiné (Illustration 19), une conduite dont le débit pourrait être potentiellement compatible avec une exploitation thermique. Cependant, on notera que les informations qui ont pu être collectées dans le cadre de la présente étude ne permettent pas de confirmer cette hypothèse.

Par voie de conséquence, sous réserve de possibilités de mise en place de conduites adaptées, une exploitation de l'énergie thermique du réseau d'eaux usées n'est pas à exclure sur le secteur examiné.

Cette solution ne semble toutefois pas présenter d'avantage vis-à-vis d'une solution sur sondes géothermiques verticales.

On rappelle que, dans le présent rapport, est considéré comme exploitable un débit d'eaux usées dans la conduite qui reste supérieur à 18 m³/h en période nocturne. Un tel débit est à même d'assurer une puissance thermique échangée de l'ordre de 100 kW.



Illustration 19 : Potentialités thermiques du secteur d'étude vis-à-vis des ressources en eaux usées

3. Recommandations et conclusions

3.1. DISCUSSION

L'essentiel du travail réalisé lors de cette étude a été orienté dans le sens d'une large applicabilité à d'autres territoires des méthodes originales développées, ce qui a justifié la préférence pour l'automatisation des processus mis en œuvre. Il résulte de ce travail que les processus proposés peuvent être implémentés simplement dans des outils informatiques de type SIG (système d'information géographique), ce qui signifie que tant l'actualisation des résultats que le focus sur des zones particulières sont possibles.

Ainsi, les méthodes développées peuvent s'appliquer aussi bien à l'échelle d'un large territoire qu'à celle de l'ilot IRIS, du quartier ou de la ZAC. Par exemple, l'analyse des représentations cartographiques, qui a été conduite dans le chapitre ci-avant (2.3. Focus sur un projet de requalification), montre que les résultats de cette étude peuvent directement être exploités sans nécessairement avoir à disposer d'un système informatique de type SIG.

Il faut toutefois pouvoir disposer d'une version numérique de ces cartes, par exemple au format PDF, qui permette de zoomer sur les secteurs à investiguer, ce qu'il n'est évidemment pas possible de faire à partir des cartes reproduites dans le présent rapport. Les cartes au format PDF de la présente étude sont donc disponibles sur CD-ROM ou par téléchargement, cela à l'échelle de Clermont Communauté et pour chacune des 21 communes.

La démarche méthodologique contractuelle est restée orientée vers l'exploitation de la géothermie superficielle. Toutefois, certaines étapes intermédiaires des raisonnements, notamment celles exprimant la demande thermique du tissu bâti, peuvent s'appliquer indépendamment de la ressource.

Dans les paragraphes qui suivent sont discutées les particularités de chacun des éléments de la démarche méthodologique développée dans le cadre de cette étude, avec comme objet de concourir à la stratégie globale de l'EcoCité clermontois, laquelle envisage d'expérimenter un nouveau type de développement urbain, soucieux de préserver l'environnement et la ressource énergétique, optimisant l'usage du foncier.

Particularités liées à l'expression des potentialités géothermiques

Si la méthode à implémenter dans les SIG est courante dans les disciplines des sciences de la Terre (représentation en mailles carrées), une difficulté majeure réside dans l'étape préalable à cette implémentation, à savoir la collecte des connaissances, plus particulièrement pour décrire les formations hydrogéologiques du proche sous-sol.

En effet, comme on a pu le constater sur le territoire de Clermont Communauté, ces connaissances disponibles n'ont pas permis d'accéder à une résolution suffisante. Cela tient tant à la complexité des milieux qu'à l'hétérogénéité des sources d'information, ces dernières ayant dû être mobilisées pour compenser le faible nombre d'opérations géothermiques réalisées sur le territoire.

En effet, le système français permet une capitalisation des données détaillées pour tous les ouvrages dépassant 10 m de profondeur. Ces données sont mises à disposition par le BRGM : <http://infoterre.brgm.fr/dossiers-sur-le-sous-sol-bss> .

Or, la faible densité d'ouvrages géothermiques sur le territoire de Clermont Communauté a impliqué la réalisation d'une analyse hydrogéologique spécifique qui, malheureusement, a constaté des potentialités géothermiques sur aquifères superficiels moins favorables qu'escompté avant le lancement de l'étude, en particulier en termes de débits exploitables.

Par contre, l'étude des potentialités sur sondes géothermiques verticales (SGV), qui n'était pas programmée au lancement de l'étude, a révélé une disponibilité répartie de façon relativement uniforme sur l'ensemble du territoire.

Néanmoins, tant pour les potentialités sur aquifères superficiels que celles sur SGV, le travail effectué a permis d'exprimer les puissances géothermiques installables qui sont représentatives de la dimension des installations. Ces puissances installables sont ramenées à la maille de 25 m x 25 m et sont indifféremment exprimées, soit en kW / maille, soit en W / m².

Conclusions partielles et recommandations

- Si le nombre des ouvrages géothermiques continue à s'accroître sur le territoire de Clermont Communauté, alors les données seront bientôt en nombre suffisant pour améliorer la connaissance des caractéristiques géothermiques des formations superficielles, plus précisément pour les niveaux aquifères.
- L'étude ne prévoyait pas initialement d'explorer les potentialités des SGV. Néanmoins, un travail a été effectué sur les sondes géothermiques dites indépendantes, c'est-à-dire suffisamment espacées les unes des autres pour que la régénération thermique des sols s'opère naturellement sans difficulté.

Là où la demande thermique est la plus dense, il serait probablement intéressant d'analyser spécifiquement la technique du champ de sondes géothermiques, cas dans lequel les sondes sont suffisamment proches les unes des autres pour que la régénération thermique du volume de terrain exploité bénéficie du fonctionnement alternatif en production de froid et production de chaud. Cette dernière technique peut fournir des puissances thermiques au-delà de 100 kW, jusqu'à 1 MW et plus. Il sera alors utile de conduire une réflexion sur les micro-réseaux d'énergie.

Particularités liées à l'expression de la demande géothermique du tissu bâti

L'estimation des demandes énergétiques du bâti existant est basée sur la date d'achèvement de la construction, lorsque cette information est renseignée dans la base MAJIC de la DGI. Elle ne tient donc pas compte des améliorations éventuelles de la performance énergétique ni des consommations réelles, lesquelles, en France, ne font pas l'objet de suivi. La résolution de l'analyse effectuée est descendue jusqu'à l'expression du détail des surfaces chauffées telles qu'elles peuvent être estimées à partir des banques de données. Les processus ont pu être automatisés, y compris pour les bâtiments qui ne sont pas renseignés dans la base MAJIC, l'estimation alternative à partir des banques de données de l'IGN étant alors d'une précision moindre mais s'appliquant à un nombre restreint de bâtiments.

Le résultat obtenu exprime une demande thermique pour chacun des bâtiments du territoire, tant pour le chauffage que pour l'ECS. Cette demande énergétique est alors parfaitement géolocalisée, la limite étant toutefois la précision des banques de données.

De plus, la méthodologie proposée permet d'accéder à la puissance géothermique qui serait à installer, qui est uniformément exprimée pour des machines thermodynamiques de type pompe à chaleur géothermique (PACg), dont le COP machine est égal à 4, et qui sont dimensionnées pour assurer l'ensemble de la demande thermique durant la période la plus froide de l'année, c'est-à-dire sans appoint thermique.

Conclusions partielles et recommandations

- L'ensemble de ce travail méthodologique exprimant la demande thermique et la possible demande géothermique des bâtiments a fait l'objet d'un effort de simplification qui ressort comme étant novateur, notamment en ce qu'il est automatisable dans un outil de type SIG et qu'il rend homogène et comparable l'ensemble du tissu bâti.
- L'étude n'a toutefois pas distingué les différentes demandes thermiques qui résultent de la différence d'altitude et d'exposition géo-climatique. Ce pourrait être un axe d'évolution dans la perspective d'une généralisation de la méthode.

Particularités liées à l'expression des potentialités des réseaux d'eaux usées

L'utilisation de l'énergie thermique échangeable dans les réseaux d'eaux usées représente un axe de réflexion sur lequel plusieurs territoires ont engagé des études pour estimer les potentialités. D'une manière générale, les résultats semblent plus s'orienter vers des opportunités ponctuelles que vers des potentialités réparties. En cela, on peut citer deux études antérieures aux interrogations de Clermont Communauté.

- Début 2010, l'Agence d'Urbanisme Bordeaux Métropole Aquitaine a publié une "*Etude des potentialités de récupération des calories des eaux usées pour les sites de projets du territoire communautaire*". Cette étude propose, notamment, de considérer un seuil d'éligibilité de 15 l/s pour le débit nocturne dans les conduites, lequel se voit caractérisé par le diamètre de la conduite qui doit être, de préférence, supérieur à 500 mm. L'étude, essentiellement qualitative, n'évalue pas les quantités d'énergie en jeu mais introduit des critères d'exploitabilité, par exemple une distance d'au maximum 300 m entre la conduite et le local de la chaufferie.

Ce critère est validé pour le cas d'étude du projet d'un lycée traité au paragraphe "2.3. Focus sur un projet de requalification" de la présente étude.

- En 2011, l'Observatoire Régional de l'Energie Provence-Alpes-Côte d'Azur a publié une "*Evaluation du potentiel de récupération d'énergie thermique dans les réseaux d'assainissement de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur*". Pour l'ensemble de la région, cette étude évalue à 874 000 MWh/an l'énergie récupérable alors que le parc bâti éligible non industriel est de 225 900 000 m², ce qui représente 3.9 kWh/m².an.

Ce chiffre peut paraître intéressant au premier abord mais l'étude le relativise immédiatement en précisant que 73 % de cette énergie récupérable l'est en sortie des stations d'épuration et non pas dans les réseaux d'eaux usées. Le reste des potentialités se partage pratiquement à parité entre l'énergie récupérable immédiatement en sortie des bâtiments et l'énergie récupérable dans les collecteurs d'assainissement, soit de l'ordre de 0.5 kWh/m².an pour chacun des deux postes. Or on rappellera que, rien que pour l'ECS, la consommation énergétique des logements dépasse souvent 20 kWh/m².an.

Pour caractériser les réseaux d'eaux usées, la présente étude est allée au-delà des deux travaux cités ci-avant, sans toutefois remettre en cause leurs conclusions générales. Ainsi, le travail effectué propose :

- un seuil de 18 m³/h (5 l/s) en moyenne nocturne par temps sec. Ce débit peut être corrélé au nombre d'habitants en amont et tient compte des ECPP (eaux claires permanentes parasites). Ce seuil est considéré comme permettant une puissance thermique installée de 100 kW, la puissance utilisable avec le débit de 18 m³/h restant évidemment inférieure ;
- un indicateur en 4 points pour qualifier les réseaux sans distinction du diamètre ni de la rectitude des conduites (voir tableau ci-après).

Débit connu (mesuré dans l'étude SAFEGE)	Débit estimé (à partir du nombre d'habitants en amont)
Supérieur à 18 m ³ /h	Supérieur à 18 m ³ /h
Inférieur à 18 m ³ /h	Inférieur à 18 m ³ /h

Face à des potentialités sur eaux usées des réseaux pouvant paraître marginales, l'étude a également examiné le principe d'une récupération d'énergie thermique directement dans les locaux d'habitation, c'est-à-dire dans les eaux grises en amont du rejet à l'égout. Il est apparu que des techniques sont disponibles, même si elles restent marginales en France. Ces solutions sembleraient à même de procurer un taux de récupération de l'énergie thermique des eaux grises supérieur à celui constaté dans les eaux usées des réseaux d'assainissement.

Conclusions partielles et recommandations

- Si l'énergie récupérable dans les réseaux d'assainissement est une technique disponible, elle ne peut concerner qu'une fraction restreinte du tissu urbain. Fort logiquement, on constate que la récupération s'envisage plutôt sur les réseaux communautaires et en arrivant vers la STEP que sur les parties amont des réseaux.
- L'analyse des potentialités sur eaux grises sort du cadre de cette étude mais il semble que cela soit une piste intéressante dans le cadre du programme EcoCité.
En premier lieu, elle augure d'un taux de récupération énergétique supérieur à celui sur les eaux des réseaux.
En second lieu, elle diminuerait d'autant les sollicitations d'autres ressources thermiques, en particulier la géothermie, ce qui, mécaniquement, accroît son potentiel.

Particularités liées au croisement des ressources et des besoins

Vis-à-vis des ressources géothermiques, géolocaliser les demandes thermiques au droit des bâtiments n'a pas de réel sens physique, essentiellement pour deux raisons :

- 1) rien ne permet de se prononcer sur la distance entre les ouvrages géothermiques et le bâti qui lui est raccordé, cela quelle que soit la solution géothermique examinée hormis le cas particulier des fondations géothermiques qui n'est pas traité dans la présente étude ;
- 2) pour une opération géothermique donnée, le rayon d'incidence thermique dans les formations géologiques, sur SGV comme sur aquifère superficiel où existe également un rayon d'incidence hydraulique, peut dépasser significativement les limites parcellaires du bâti raccordé.

Ainsi, puisque la localisation d'un bâtiment n'a aucune raison physique ou technique de coïncider exactement avec la localisation des ouvrages géothermiques, **la présente étude propose une méthode novatrice** pour intégrer cette "incidence thermique" directement dans la représentation implémentée dans le SIG.

En corolaire, la généralisation de cette méthode permettrait de traiter, dans une certaine mesure, les incidences des micro-réseaux de chaleur, raccordés ou non à de la géothermie, car la problématique est directement comparable.

On constate donc que la méthode des mailles, qui avait initialement été proposée pour pouvoir comparer simplement les ressources géothermiques aux demandes thermiques des bâtiments, devient une méthode incontournable parce qu'elle permet d'ajuster simplement la forme de la demande thermique pour cadrer avec une réalité pourtant difficile à décrire.

Cette méthode novatrice permet de répartir les demandes en énergie géothermique d'un bâtiment sur les mailles avoisinant celle où est centré le bâtiment. Dans cette étude, on propose que cette répartition se fasse sur les 24 mailles qui entourent la maille où est centré le bâtiment, toutes les lois de répartition statistique étant évidemment envisageables, y compris le fait de tout affecter à la maille centrale.

Dans le cas des mailles carrées de 25 m x 25 m, la répartition de l'énergie de chaque bâtiment se fait donc sur un ensemble de 5 mailles x 5 mailles, soit une surface totale de 15 625 m² correspondant à un carré de 125 m x 125 m.

In fine, la méthode des mailles a pu être généralisée grâce aux développements menés dans le cadre de cette étude. Plus précisément, ce sont des mailles particulièrement fines qui ont été retenues car elles sont bien représentatives des phénomènes physiques en jeu. On notera que recourir à des mailles plus petites ne se justifie pas.

Cette homogénéisation des données, obtenue grâce à la généralisation de la méthode des mailles, permet donc d'automatiser très simplement le croisement des ressources et des besoins dans le SIG et donc d'exprimer les potentiels géothermiques ou d'autres indicateurs.

Dans la pratique, la principale grandeur traitée est la puissance thermique, installée ou installable, qui est ramenée à une puissance spécifique exprimée en W / m² ou en kW / maille. Pour obtenir les potentiels, sont donc croisées :

- 1) la puissance thermique spécifique demandée par une pompe à chaleur, qui représente une puissance installée,
et
- 2) la puissance géothermique spécifique disponible dans la ressource, qui représente une puissance installable.

Conclusions partielles et recommandations

- ***La méthode des mailles se révèle être un outil puissant bien adapté au croisement des demandes en confort thermique et des ressources géothermiques superficielles. Elle est validée tant pour traiter l'ensemble du territoire que pour s'intéresser à des aires aussi petites qu'un îlot IRIS, un quartier ou une ZAC.***
- La méthode est grandement automatisée, ce qui autorise un large déploiement au-delà du territoire en accord avec l'expression de besoin de l'EcoCité clermontois.
- La méthode n'a pas été testée autour de situations particulières comme, par exemple, le cas des grands réseaux de chaleur car les informations relatives à un tel raccordement ne sont pas présentes dans les banques de données disponibles. Il conviendrait alors d'adapter la méthodologie de répartition dans les mailles.

Toutefois, sur le territoire de Clermont Communauté, on peut d'ores et déjà remarquer que seule la technique du champ de sondes géothermiques semble à même de procurer des puissances géothermiques supérieures à 1 MW.

3.2. CONCLUSION GENERALE

Le présent rapport a été réalisé dans le cadre d'une convention de recherche et développement partagés relative à l'Action n° 2 du dossier Investissements d'Avenir "Ville de demain". L'étude à laquelle il se réfère a porté sur le potentiel géothermique du territoire de Clermont Communauté et a fait l'objet d'une convention entre le BRGM et Clermont Communauté.

Ce rapport s'attache à décrire les démarches méthodologiques, celles qui sont à employer de préférence et celles qui peuvent être utilisées lorsque la méthode préférée ne peut être appliquée, par exemple lorsque des données font défaut. En tout état de cause, il est recommandé de viser une restitution des grandeurs caractéristiques dans des mailles carrées de 25 m x 25 m, tant pour exprimer les demandes thermiques et géothermiques des bâtiments que pour décrire les propriétés des formations géologiques et hydrogéologiques superficielles.

Sur le territoire de Clermont Communauté, la description des ressources géothermales aquifères a été confrontée à un contexte hydrogéologique relativement complexe, peu documenté.

Ces ressources sont généralement très localisées (chenaux d'écoulement préférentiels), assez peu favorables à un large déploiement de solutions géothermiques sur aquifères superficiels. De ce fait, a été envisagée la technique alternative des sondes géothermiques verticales (SGV) qui semble pouvoir être développée plus largement sur l'ensemble du territoire.

L'hypothèse de pouvoir collecter de l'énergie dans les réseaux d'eaux usées semble devoir être restreinte aux seuls secteurs où les conduites sont parcourues par un débit significatif, notamment en période nocturne. Ce sont plutôt les secteurs aval, proches des STEP qui, de fait, semblent pouvoir bénéficier de cette ressource, au demeurant modeste.

La description des demandes thermiques des bâtiments à l'échelle du territoire de Clermont Communauté a justifié le développement d'une méthode novatrice, à la fois pour répondre à la question de l'échelle représentative de description et de restitution et, également, pour prendre en considération le fait que cette demande thermique pouvait être satisfaite par des ressources géothermiques locales.

Il en ressort que la démarche méthodologique novatrice qui généralise la méthode des mailles carrées de 25 m x 25 m est largement automatisable dans un outil de type SIG. Elle s'applique parfaitement au croisement des ressources et des besoins, c'est-à-dire à l'expression des potentiels géothermiques qui ont été exprimés en formalisant le taux de couverture potentiel comme indicateur. Ce taux rapporte la puissance géothermique installable à la puissance géothermique qui serait appelée pour satisfaire 100 % des besoins thermiques des bâtiments au moyen de pompes à chaleur.

L'objectif d'automatisation des processus méthodologiques a donc été atteint. Sont ainsi assurés leur maintenabilité et leur évolutivité. Par exemple, on peut envisager la prise en considération ultérieure de nouveaux projets ou d'opérations de requalification urbaine.

A ces fins, le présent rapport décrit en détail les méthodes proposées, qui ont été développées dans la perspective d'une appropriation par d'autres acteurs que le BRGM, en accord avec les attentes de Clermont Communauté.

4. Contexte hydrogéologique et ressources

4.1. PRESENTATION

L'analyse des potentialités géothermiques repose en premier lieu sur un examen hydrogéologique. L'analyse et la synthèse de l'environnement hydrogéologique au droit des communes de la communauté d'agglomération ont été réalisées à partir des informations existantes. Aucune investigation de terrain n'a été réalisée conformément au cahier des charges de l'étude.

La recherche des données s'est effectuée à partir des informations disponibles au BRGM (rapports, notes techniques, thèses, banque de données du sous-sol ...) et des rapports fournis dans le cadre de l'étude par les services techniques des communes. Les sociétés de forages et bureaux d'études travaillant sur le secteur d'étude ont également été sollicités.

Tous les sondages et forages présentant une coupe géologique exploitable et des indications sur un ou plusieurs niveaux aquifères ont été analysés et répertoriés dans une base de données comportant plusieurs champs : indice BSS, coordonnées géographiques, profondeur de l'eau, puissance de l'aquifère, température, conductivité de l'eau, présence de gaz, débit Ces données ont été transposées dans un système d'information géographique (SIG).

Sur les 3 400 sondages répertoriés sur le territoire étudié, seuls 1 100 d'entre eux ont ainsi été intégrés au SIG.

Les informations d'ordre hydrogéologique concernant ces ouvrages sont plus ou moins complètes car, dans leur quasi-totalité, les sondages ont été réalisés dans un objectif de reconnaissance de sols (travaux géotechniques) et non de recherche d'eau. Les données concernant en particulier la température de l'eau et les débits sont souvent absentes des comptes rendus de travaux.

La carte hydrogéologique de Clermont Communauté proposée dans ce chapitre a donc été établie à partir de :

1. la connaissance de la nature lithologique des terrains et leur aptitude à permettre la constitution d'un réservoir aquifère incluant une nappe. Les formations de comportement hydrogéologique sensiblement égal sont regroupées en unités dont on a cherché à réduire le nombre ;
2. l'analyse, pour chacune des entités géologiques, de la densité d'ouvrages souterrains ayant rencontré un horizon aquifère, et de l'analyse de la profondeur de l'aquifère.

Il est important de souligner que ce travail a été réalisé à partir de la carte géologique au 1/80 000 de Clermont (n°166) pour les secteurs sud et à l'échelle des cartes géologiques (Illustration 20 et *Illustration 21*) au 1/50 000 de Clermont-Ferrand (n° 693) et de Thiers (n° 694).

La carte du potentiel hydrogéologique (Illustration 22) n'a donc aucun sens à une échelle inférieure. In fine, le territoire étudié comporte trois types de zonation :

- les zones à aquifères reconnus ou très probables ;
- les zones localement aquifères ;
- les zones comportant peu ou pas d'aquifères.

Les pages qui suivent présentent les principales caractéristiques hydrogéologiques de chacune des unités géologiques dites "simplifiées". On retrouvera également ces unités dans l'analyse des potentialités sur sondes géothermiques verticales.

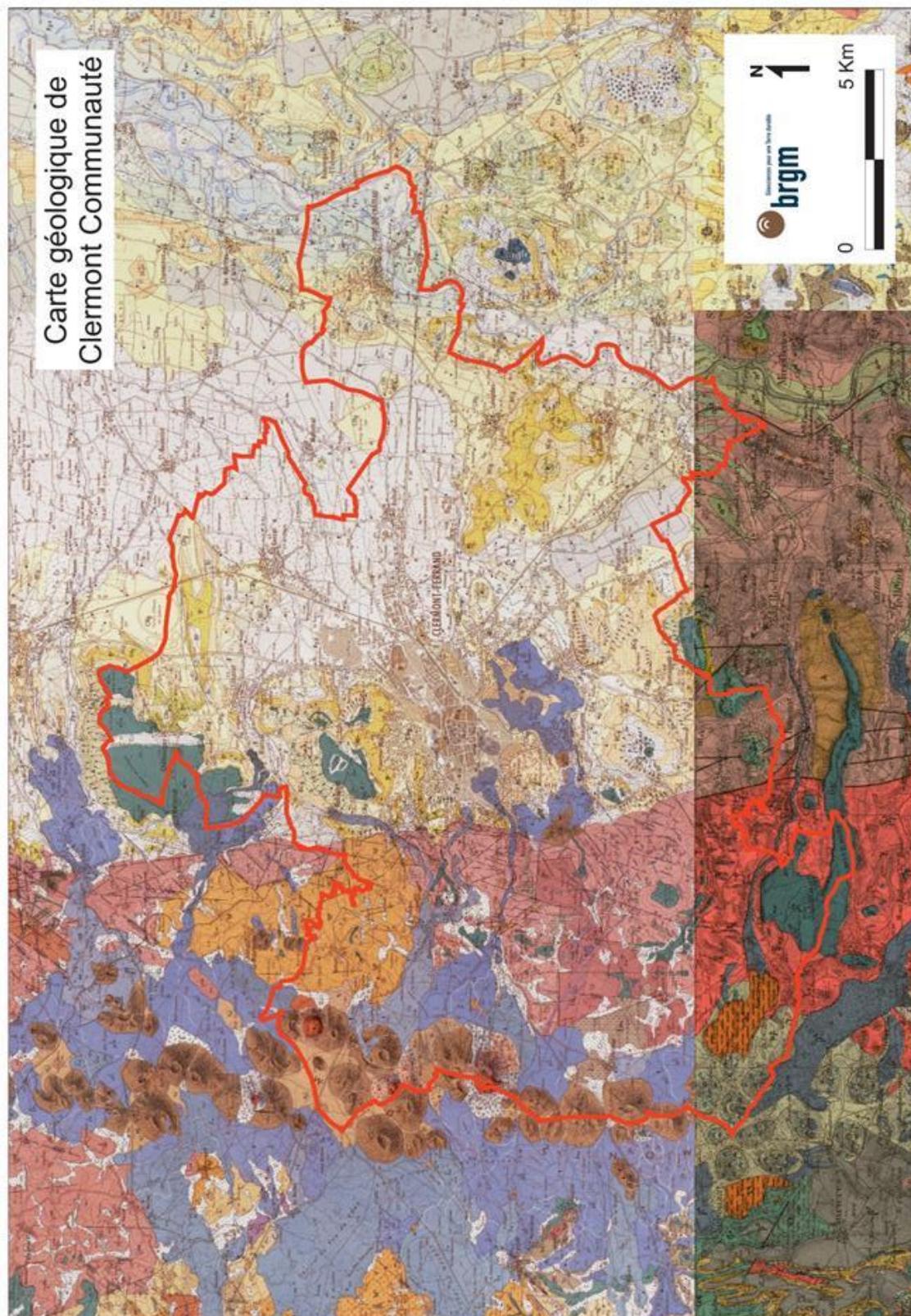
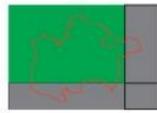
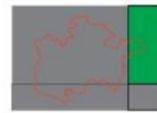
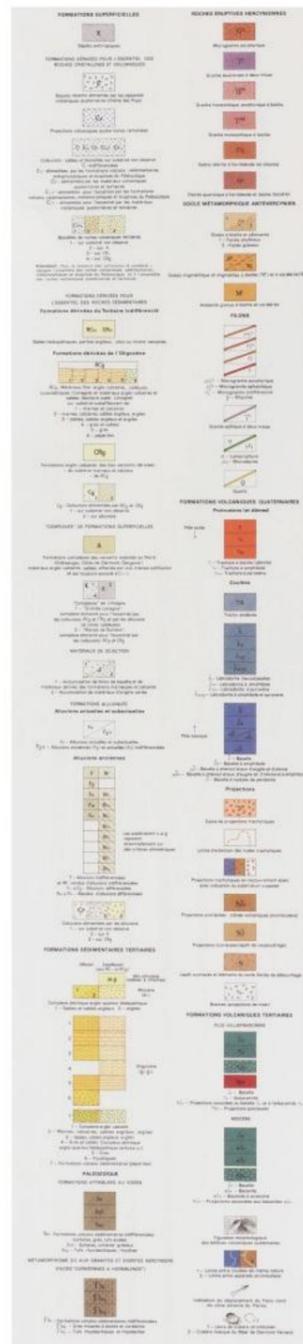


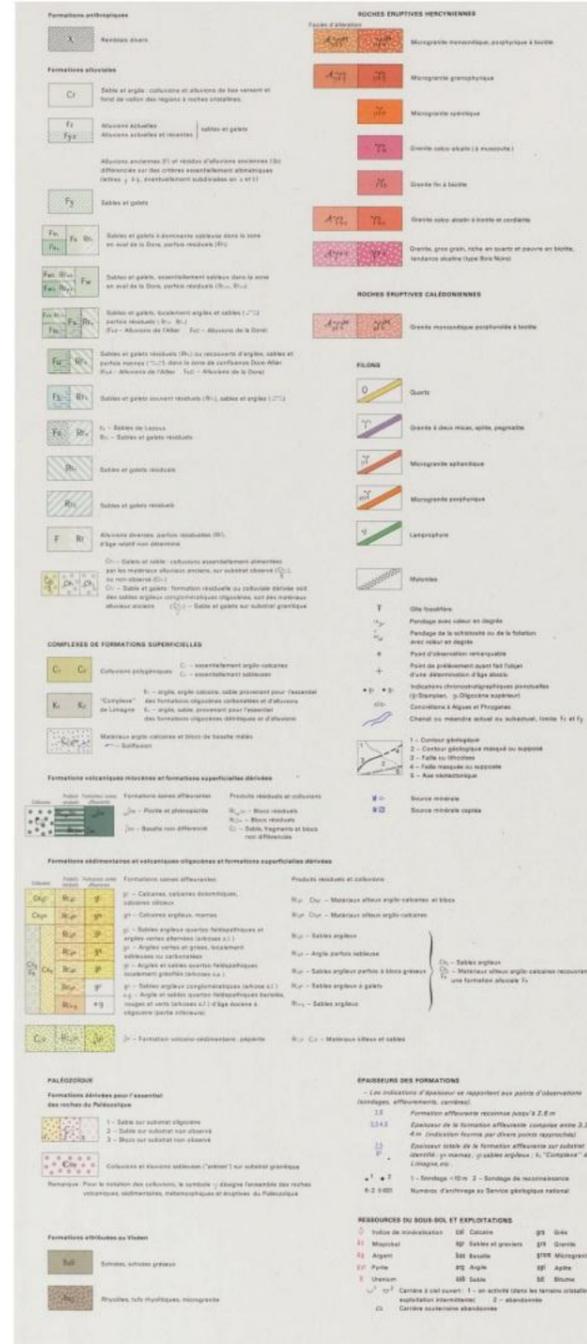
Illustration 20 : Contexte géologique au droit de Clermont Communauté



Carte géologique 50.000 n°693
Clermont-Ferrand



Carte géologique 50.000 n°694
Thiers



Carte géologique 80.000 n°166
Clermont

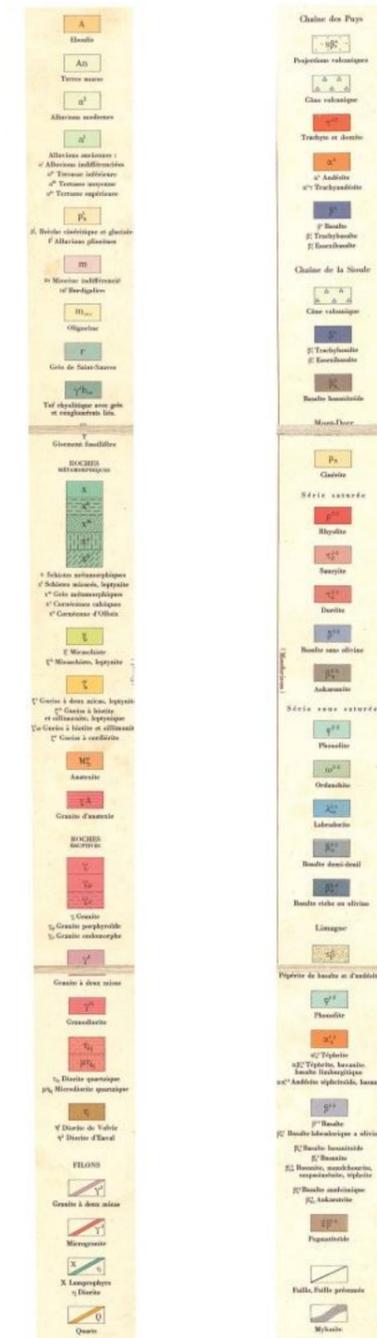


Illustration 21 : Légendes relatives au contexte géologique de Clermont Communauté

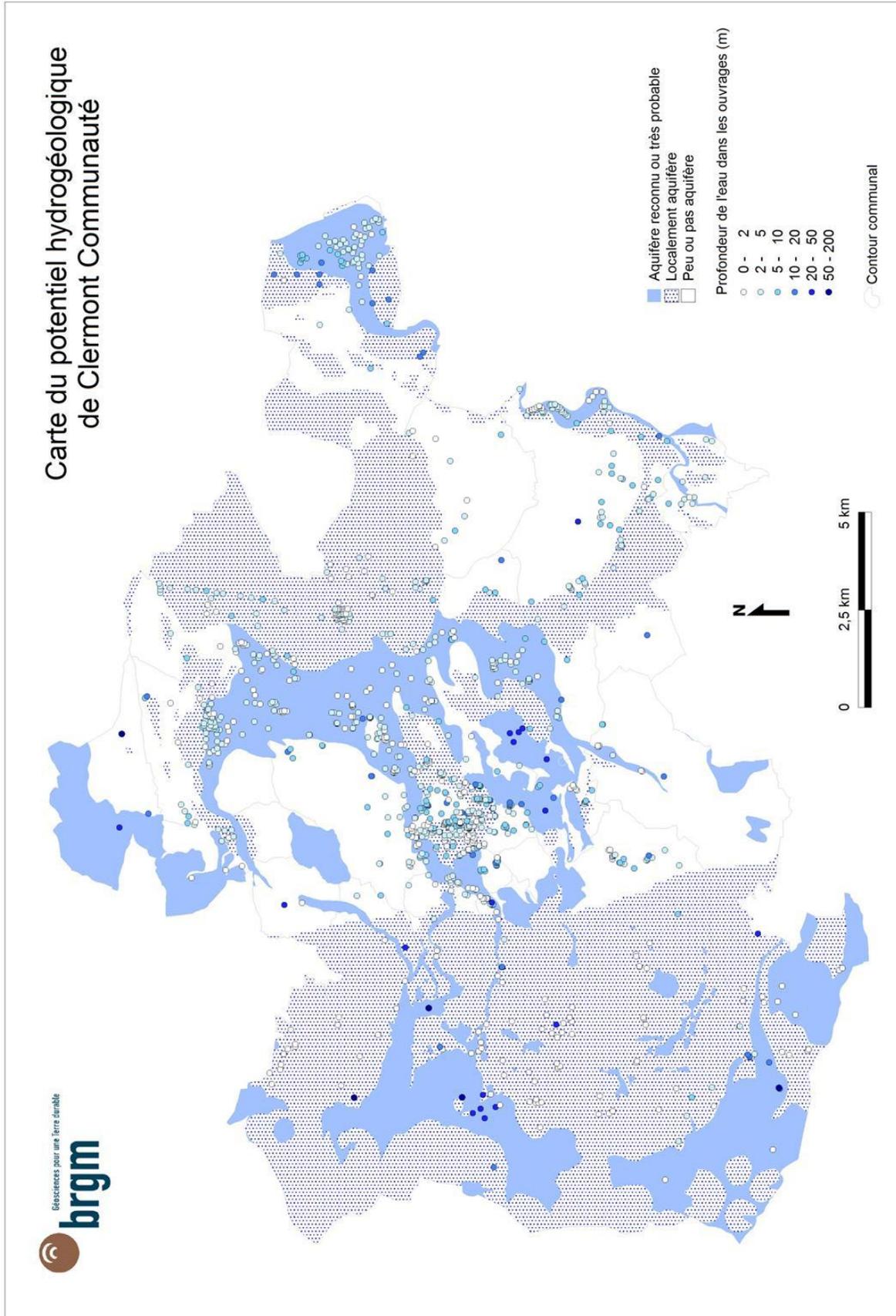


Illustration 22 : Carte des ressources hydrogéologiques au droit de Clermont Communauté



Illustration 23 : Isobathes du toit du substratum sédimentaire au droit de Clermont Communauté

4.2. DIFFICULTES IDENTIFIEES

4.2.1. Observations

Avant le lancement de l'étude, la complexité du contexte géologique et hydrogéologique du territoire de Clermont Communauté était connue, notamment du fait de la localisation (compartimentation tectonique, présence de failles, fossé d'effondrement de la Limagne ...) et de la diversité des formations géologiques (roches du socle, volcaniques, sédimentaires et alluvionnaires).

Sur ce secteur était attendue la présence d'aquifères multiples, profonds à superficiels, se répartissant en trois groupes : 1) des aquifères profonds dont les eaux minérales atteignent la surface par l'intermédiaire de systèmes de failles, 2) des aquifères "intermédiaires" qui sont contenus dans les formations sédimentaires de la Limagne, et 3) des aquifères superficiels, notamment ceux qui sont liés à la rivière Allier et à ses affluents.

C'est sur la catégorie des aquifères superficiels, typiquement jusqu'à une centaine de mètres de profondeur, que l'étude focalise son attention afin de déterminer les potentialités géothermiques au regard des besoins thermiques des bâtiments de l'agglomération.

Toutefois, l'agglomération clermontoise n'ayant jamais fait l'objet d'une synthèse générale des données géologiques et hydrogéologiques, aucune perception des secteurs concernés n'était appréhendée.

Or, en avançant dans l'étude, ***le croisement de la localisation des bâtiments et celle des aquifères superficiels disponibles a assez rapidement montré que la géothermie sur nappes aquifères ne pouvait couvrir qu'une part modeste des demandes de l'agglomération.***

4.2.2. Suggestions

Compte tenu d'une couverture par les aquifères superficiels apparemment insuffisante, il a été décidé en cours d'étude de regarder également les possibilités de géothermie sur sondes géothermiques verticales, c'est-à-dire sur échangeurs de chaleur enterrés, la profondeur usuelle de ces ouvrages ne dépassant pas une centaine de mètres.

Le développement d'une méthodologie adaptée a donc été entrepris.

4.3. FORMATIONS ALLUVIALES

D'origine et de nature diverses, ces formations se présentent sous forme d'un remplissage dont l'épaisseur atteint au maximum une dizaine de mètres.

4.3.1. Alluvions récentes de l'Allier

Les alluvions récentes de l'Allier (notées Fy, Fy-z et Fz sur les cartes géologiques) sont constituées de sables, graviers et galets issus des formations géologiques du bassin versant de la rivière. Elles comportent donc des éléments de socle et des éléments d'origine volcanique et sédimentaire. D'une épaisseur moyenne de 7 m environ, elles constituent le réservoir d'une nappe libre dont les fluctuations moyennes sont plutôt réduites (1 à 2 m en moyenne).

La nappe se trouve à une profondeur de 1.5 à 5 m par rapport au sol. Sa puissance moyenne est de l'ordre de 3 à 5 m et peut atteindre 10 m d'épaisseur dans les zones de surcreusement

de son substratum constitué de formations sédimentaires marneuses (méandre près du camping de Cournon-d'Auvergne par ex.). Elle s'écoule, quelle que soit la saison, en direction de l'Allier.

Cette nappe est particulièrement sollicitée pour l'alimentation en eau potable. Les puits d'AEP se situent sur les communes de Cournon-d'Auvergne et de Pont-du-Château.

Les débits d'exploitation peuvent atteindre 80 m³/h.

Les paramètres hydrauliques de la nappe alluviale de l'Allier de Cournon-d'Auvergne à Pont-du-Château sont les suivants :

- Transmissivité¹ : 2.10^{-2} à 5.10^{-3} m²/s ;
- Coefficient d'emmagasinement² : 8 à 15 % ;
- Gradient hydraulique moyen en général < 2 % (max 4 %) ;
- Perméabilité moyenne³ : 1.10^{-3} à 3.10^{-3} m/s.

Le faciès hydrochimique de la nappe est de type bicarbonaté calcique. Sa conductivité peut varier d'une centaine à quelques centaines de μ S/cm. La température de l'eau est comprise entre 8 et 15 °C.

Les alluvions récentes de l'Allier sont les seules formations géologiques dont les caractéristiques hydrogéologiques sont bien connues. Elles sont dans le zonage identifiées comme "aquifère reconnu ou très probable".

4.3.2. Alluvions des cours d'eau de la rive gauche de l'Allier

Les ruisseaux qui prennent naissance dans la Chaîne des Puys ont déposé des alluvions sur les formations sédimentaires tertiaires comblant le graben⁴ de la Limagne.

Les produits d'érosion apportés par les ruisseaux se sont mis en place dans des vallées creusées dans les sédiments tertiaires, sensiblement orientées vers l'ENE. La pente plus marquée au départ des vallées à l'ouest diminue rapidement sur 2 à 3 km vers l'est (Belkessa , 1976). Deux vallées présentent une morphologie plus accentuée :

- une vallée partant de Cébazat et Montferrand ;
- une vallée passant légèrement au nord du puy de Crouël dans l'alignement de la coulée basaltique du plateau de St-Jacques. Cette vallée est connectée vers Crouël à une vallée ayant pour origine la zone du marais de Sarlieve. Le remplissage alluvial de cette zone serait en relation avec cet ancien réseau hydrographique.

L'épaisseur des dépôts alluviaux diminue en direction de l'est. La composition des alluvions est hétérogène : des lits sableux alternent avec des lits limoneux ou argileux. Certains horizons sont composés de sables ou limons noirs d'origine volcanique.

¹ Ce paramètre caractérise l'aptitude de la couche aquifère à se laisser traverser par l'eau.

² Il est défini comme le volume d'eau pouvant être libéré ou emmagasiné par l'aquifère de section égale à l'unité, à la suite d'une modification unitaire du niveau piézométrique ou charge.

³ Perméabilité : d'après la loi de Darcy, ce coefficient peut être défini comme le volume d'eau qui s'écoule pendant l'unité de temps à travers l'unité de surface d'une section de terrain, sous un gradient hydraulique égal à l'unité.

⁴ Fossé d'effondrement.

Sur la commune de Cébazat, les formations alluviales apportées par le Bedat contiennent un aquifère pouvant atteindre 8 m d'épaisseur. Cet aquifère comporte des horizons de sables noirs d'origine volcanique assez caractéristiques. Il se prolonge sur la commune de Gerzat où sa puissance paraît diminuer progressivement vers l'est (bien que certains forages puissent encore recouper 7 m d'horizon saturé en eau). La fraction limoneuse semble également localement plus développée, certains ouvrages ayant même rencontré des niveaux tourbeux. Ces formations alluviales disparaissent à l'est de la ville de Gerzat où elles laissent la place aux formations du « complexe » de Limagne.

L'aquifère contenu dans les alluvions du Bedat est surtout développé entre les villes de Cébazat et Gerzat et paraît avoir une épaisseur plus importante au nord qu'au sud. La nappe est de type libre et se rencontre généralement à des profondeurs inférieures à 5 m. **La minéralisation est souvent élevée.**

Sur Clermont-Ferrand, plusieurs secteurs présentent un remplissage alluvionnaire aquifère. Au niveau de La Plaine et des Gravanches-Combaude, l'aquifère atteint une épaisseur comprise entre 6 et 7 m. L'eau se rencontre essentiellement à faible profondeur (< 5 m). Plus au sud, dans la zone de Crouël et de la Pradelle, l'épaisseur des alluvions est plus réduite (3 à 4 m d'épaisseur).

Les nappes sont libres et la minéralisation de l'eau est forte.

- **pour le secteur nord, le débit d'exploitation peut atteindre 20 à 60 m³/h ;**
- **pour le secteur sud, le débit d'exploitation reste inférieur à 10 m³/h.**

Ces secteurs comportent des forages créés pour des usages industriels, les études hydrogéologiques et les pompages d'essai qui ont accompagné leur réalisation ayant permis de préciser les caractéristiques suivantes des aquifères.

Secteurs	Perméabilité (m/s)	Transmissivité (m ² /s)	Emmagasinement	Débit (m ³ /h)	Température (°C)
Secteurs nord	1 à 6.10-4	1 à 4.10-3	≈ 10 %	Entre 20 et 60	11 – 12
Secteurs sud (Crouël /la Pradelle)	7.10-5	5.10-4	Probablement 1 %	< 10	15 (la Pradelle)

On peut noter que ces nappes alluviales sont connues et utilisées depuis fort longtemps. En effet, la DRAC a recensé 4 vestiges de puits datant du 2^{ème} âge de Fer au lieu-dit Pontcharaud près de la ZI du Brézet (Drouillat, 2006).

La Tiretaine a également déposé des matériaux alluvionnaires plus en amont sur le territoire des communes de Chamalières et de Clermont-Ferrand. De nombreux puits et sondages témoignent de l'existence d'une petite nappe libre située en général à moins de 2 m de profondeur.

L'Auzon et l'Artière présentent également des petites nappes d'accompagnement, dans leur traversée respective des communes du Cendre et de Beaumont. Leur extension est réduite : l'eau se rencontre vers 2-3 m de profondeur et la puissance de la nappe d'accompagnement de l'Auzon par exemple est d'environ 1 m. La productivité de ces nappes est faible, elles sont toutefois sollicitées pour l'arrosage de jardins via des puits domestiques traditionnels.

Ces alluvions constituent un réservoir aquifère important. Ces formations ont par conséquent été classées dans les zones à aquifère reconnu ou très probable.

4.3.3. Alluvions anciennes

Les formations alluviales anciennes sablo-graveleuses peuvent comporter une composante argileuse assez développée les rendant souvent peu aptes à l'emmagasinement de l'eau souterraine. Elles comportent parfois des petits niveaux **aquifères peu sollicités car peu productifs**.

Pour ce secteur, le débit d'exploitation reste inférieur à 1 m³/h avec de probables difficultés de réinjection.

Elles sont classées dans les zones localement aquifères.

4.4. FORMATIONS LIEES AU VOLCANISME

4.4.1. Formations volcaniques

Perméables en grand lorsqu'elles ne sont pas altérées, les coulées de laves permettent l'infiltration des précipitations météoriques (perméabilité de fissures...).

Ces dernières vont percoler verticalement dans les empilements volcaniques jusqu'à ce qu'elles rencontrent un horizon géologique de plus faible perméabilité qui va constituer le substratum de la nappe. Plusieurs formations géologiques peuvent jouer le rôle de niveau « imperméable » :

- une coulée de basalte compacte ;
- un paléosol qui s'est développé entre deux épanchements laviques ;
- une formation argileuse (surface ou semelle de coulée altérée car plus scoriacée par ex) ;
- le socle granito-gneissique non fracturé.

D'une manière générale, la plupart des nappes de la Chaîne des Puys se constituent selon le relief anté-volcanique (CETE - BRGM, 2009).

Le transfert des eaux souterraines se fait ensuite de manière sub-horizontale dans le sens de l'écoulement lavique jusqu'aux exutoires naturels : fronts de coulées, resserrements de la paléo-vallée ...

Plusieurs horizons aquifères peuvent exister sur une même verticale. Dans un tel système, les nappes inférieures sont captives et parfois même artésiennes.

Sur le plateau des Dômes, près des centres d'émission des coulées de laves, il est difficile de connaître, sans sondages mécaniques ou géophysiques, les zones préférentielles d'écoulement des eaux souterraines, en raison de l'épaisseur importante de produits volcaniques émis qui masquent le relief anté-volcanique.

Les épanchements volcaniques qui se sont dirigés vers la plaine de Limagne ont été canalisés dans d'étroites vallées où se concentrent les écoulements souterrains.

Lorsqu'elles débouchent dans la Limagne, les coulées reposent sur un niveau alluvial (sables, graviers..) qui surmonte les sédiments tertiaires. La puissance de ces alluvions, et par conséquent des nappes qui y sont contenues, est très variable.

Sur Chateauguay par exemple, un forage récent destiné à un usage géothermique a rencontré 40 m de sables aquifères sous la coulée. Sur Aubière, une étude hydrogéologique a été menée en 1983 sur l'aquifère sous-basaltique de la coulée de lave du plateau des Cézeaux en vue d'un usage géothermique (PACg des locaux du BRGM). Cette étude a montré que l'épaisseur des alluvions sableuses est de l'ordre de 5 m et que le débit d'exploitation de cette nappe n'excède pas à 8 m³/h. Son exutoire principal semble situé au niveau de la Fontaine du Bac.

Pour ce secteur, le débit d'exploitation reste inférieur à 8 m³/h.

De nombreux captages sollicitent ces aquifères volcaniques. Les captages d'AEP actuels sont principalement situés dans la partie amont, sur le plateau des Dômes et captent l'eau par forages dont les profondeurs peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres. La température de l'eau est de l'ordre d'une petite dizaine de °C et se caractérise par une relative constance tout au long de l'année. La minéralisation de l'eau est peu importante et la conductivité proche de la centaine de µS/cm.

Des captages d'AEP existent aussi dans les secteurs médians ou aval des coulées : la galerie du Colombier, située dans un rétrécissement de la paléo-vallée provenant du village de Villars, alimente en eau (environ 80 m³/h) la commune de Chamalières. Le captage gravitaire de front de coulée des Grosliers sur Blanzat est utilisé par le SIAEP de Basse-Limagne avec une autorisation de prélèvement de 72 m³/h.

Pour ces secteurs, le débit d'exploitation peut atteindre 70 m³/h.

A titre anecdotique, on peut citer la source de Fontmaure n° 1, située au front de la coulée passant au Colombier, qui est utilisée en partie par la blanchisserie de l'hôpital Ste-Marie (prélèvements inférieurs à 1 m³/h).

Les épanchements laviques sont intégrés aux zones à aquifères reconnus ou très probables.

Les autres formations volcaniques du secteur, et en particulier les pyroclastites, peuvent contenir également des nappes d'eau souterraine. Ces entités sont classées dans les zones localement aquifères car l'extension des nappes est moins importante que celles des empilements laviques.

4.4.2. Maar de Clermont-Chamalières

Cet appareil volcanique de grande dimension a été comblé par des dépôts fluvio-lacustres et volcaniques dans lesquels s'intercalent des dépôts hydrothermaux (travertins). Les très nombreux travaux souterrains qui ont été réalisés dans ce secteur montrent qu'une nappe superficielle imprègne des alluvions récentes au-dessus des travertins associés à des formations argileuses. Il semblerait que le battement de la nappe soit assez réduit (SEAU, 1968).

Dans le secteur St-Alyre/ Salins, les ouvrages de reconnaissance rencontrent de l'eau minérale gazeuse, en charge et parfois jaillissante dès que les travertins sont recoupés. Cette zone de jaillissement préférentiel souligne une zone faillée orientée nord-sud. Ailleurs, les venues minérales se font lorsque les forages recoupent les formations marno-calcaires fissurées. Deux faciès hydrochimiques ont été mis en évidence par Risler et d'Arcy (1974) :

- un faciès bicarbonaté sodique pour les eaux d'origine profonde qui sont souvent carbogazeuses et qui peuvent également présenter une certaine thermalité : une température de 21 °C a été relevée sur la source du Pérou (quartier de St-Alyre) ;

- un faciès bicarbonaté calcique pour les eaux d'origine superficielle.

Il est à noter que les eaux superficielles sont souvent fortement minéralisées d'une part parce que des mélanges se produisent avec les eaux profondes minéralisées, et d'autre part parce que ce secteur très urbanisé est le siège de pollutions d'origine anthropique.

Les écoulements sous-basaltiques issus de la coulée de lave qui débouche de la vallée de Royat, et la Tiretaine qui traverse le maar, participent activement à l'alimentation de la nappe superficielle.

Les potentialités de la nappe superficielle du maar de Clermont-Chamalières ne sont pas connues. Lorsque les dépôts alluvionnaires sont conséquents (jusqu'à une vingtaine de mètres dans certains secteurs) et qu'ils sont couplés à des venues d'eau souterraine (écoulements sous-basaltiques) et /ou des apports superficiels (Tiretaine), il est possible d'obtenir des débits non négligeables comme l'a montré l'ancien puits Bergougnan (quartier Galaxie) qui pouvait produire 60 m³/h. Ce cas de figure particulier est certainement un maximum et ne peut pas être étendu à toute l'emprise du maar.

Pour ces secteurs, le débit d'exploitation peut atteindre 60 m³/h au maximum.

Le maar de Clermont-Chamalières est intégré dans les zones à aquifère reconnu ou très probable ».

4.5. FORMATIONS DU SOCLE

Les formations du socle comportent des formations plutoniques (granites) et des formations métamorphiques (gneiss) qui constituent le sous-bassement du secteur étudié. Elles n'affleurent qu'au niveau du plateau des Dômes. Sur le reste du territoire, elles sont masquées par les formations volcaniques et les formations sédimentaires.

Différents phénomènes (tectonique, altération) ont affecté les formations de socle postérieurement à leur mise en place, permettant ainsi la constitution de niveaux aquifères.

Les horizons altérés meubles (altérites) dont l'importance dépend de plusieurs facteurs (relief, climat...) peuvent en particulier emmagasiner les précipitations d'eau météorique et permettre la mise en place de nappes peu profondes. La perméabilité de ces formations géologiques est relativement faible du fait de leur composition argilo-sableuse. Elles présentent cependant d'importantes capacités d'emmagasinement d'eau souterraine.

La puissance de ces nappes dépend des conditions locales : précipitations, épaisseur de la couche altérée, étendue du bassin versant d'alimentation. Elles sont généralement peu étendues et s'écoulent naturellement par de multiples sources, de débits souvent irréguliers et peu importants, pouvant même se tarir lors d'étiages sévères. Les nappes sont généralement libres et leur surface piézométrique suit la topographie.

Des captages d'AEP de plusieurs communes ainsi que des puits domestiques exploitent ces nappes. L'existence de failles ou fractures drainantes au droit du réservoir altéré permet d'obtenir localement des débits plus conséquents.

La température de l'eau varie en fonction des saisons et la minéralisation est assez faible généralement.

Non altéré, le socle granito-gneissique peut présenter localement des perméabilités élevées au droit des fractures d'origine tectonique. Ces fractures jouent un rôle très important dans la circulation des eaux souterraines car elles permettent aux eaux météoriques soit de s'infiltrer en

profondeur, soit de remonter vers la surface après un temps de transit plus ou moins long selon la profondeur atteinte.

Les eaux minérales que l'on rencontre sur le territoire étudié (Royat, Chamalières, Clermont-Ferrand) empruntent ces fractures du socle. En profondeur, elles se chargent souvent en CO² et acquiert une thermalité et une minéralisation importante. Ces venues d'eaux profondes (> 100 m) ne sont pas étudiées dans le cadre de notre étude. Elles peuvent toutefois avoir une influence, dans leurs zones d'émergence, sur les aquifères superficiels avec lesquels elles se mélangent.

En raison notamment du caractère discontinu des horizons aquifères, les formations du socle sont intégrées dans le secteur des zones localement aquifères.

4.6. FORMATIONS SEDIMENTAIRES

4.6.1. "Complexes" de Limagne

Ces formations superficielles (notées K sur les cartes géologiques à 1/50 000) sont présentes au droit d'anciens marais : grand marais d'Aulnat-Marmilhat et marais de Sarliève. Elles sont essentiellement alimentées par des colluvions marneuses auxquelles s'ajoutent des alluvions venues de l'ouest, voire, aussi, par des apports éoliens.

Ces terrains sont, en l'absence de drainage, saturés en eau durant la saison humide et peuvent être très secs en été. La profondeur de la nappe est en moyenne de 1 à 2 m par rapport au sol. Le battement de la nappe est important et résulte d'un emmagasinement assez faible. Les débits d'exploitation des puits traditionnels peu profonds que l'on peut rencontrer n'excèdent pas 4 m³/h.

Pour ce secteur, le débit d'exploitation reste inférieur à 4 m³/h en notant que la réinjection peut être problématique.

Ces formations sont classées dans les entités localement aquifères.

4.6.2. Formations sédimentaires tertiaires

Ces formations géologiques présentent des variations spatiales de lithologie qui influencent les propriétés hydrogéologiques de cet ensemble sédimentaire.

Aucune nappe de grande extension n'est recensée dans ces formations. De plus, la recharge de ces aquifères n'est pas très importante du fait de l'effet de foehn sur la Chaîne des Puys qui provoque une diminution des précipitations météoriques.

Certains faciès constituent parfois des réservoirs aquifères mais ils sont assez localisés du fait de l'hétérogénéité des formations :

- les faciès arkosiques ou gréseux peuvent contenir des nappes captives, minéralisées et carbogazeuses et parfois accompagnées de bitume. Ces faciès détritiques sont généralement situés à des profondeurs supérieures à 100 m, mais ils peuvent localement être présents à des profondeurs plus faibles, voire être affleurants. Par exemple, un forage de reconnaissance de 50 m réalisé sur la commune de Chamalières a rencontré une venue d'eau chaude et carbogazeuse dans des grès arkosiques. L'eau était de type bicarbonaté, sulfaté et calcique. Le débit de l'ouvrage n'a pas été mesuré (Risler, 1973) ;

- les faciès à prédominance lacustre (argilo-marneux, argilo-sableux ou marno-calcaires) dans lesquels la composante argileuse est non négligeable sont en général peu aptes à l'emmagasinement.

On observe toutefois localement des horizons aquifères dans des lentilles sableuses, dans des marnes et des calcaires fissurés ou au sein des faciès altérés. Ces horizons aquifères sont souvent discontinus et les débits sont généralement inférieurs à 1 m³/h. Dans certains secteurs, on note que le développement de la fissuration des roches permet d'obtenir des débits un peu plus élevés. Les petites nappes ou circulations d'eau que l'on peut recouper par sondages sont fréquemment captives.

Pour ces secteurs, le débit d'exploitation sera de 1 m³/h (hors contexte très local).

Des sondages ont montré qu'il peut également exister des horizons bitumineux et gazeux au sein de ces formations lacustres

Ces formations sont classées dans les secteurs peu ou pas aquifères.

4.7. POTENTIALITES POUR LA GEOTHERMIE SUR AQUIFERES SUPERFICIELS

4.7.1. Bilan de l'examen du contexte hydrogéologique

L'examen des données bibliographiques actuellement disponibles a permis de réaliser une zonation simplifiée du territoire de Clermont Communauté en fonction des potentialités hydrogéologiques des formations géologiques. Il ressort de ce travail que les formations géologiques disposant d'aptitudes hydrogéologiques avérées sont les alluvions récentes des cours d'eau : **l'Allier mais aussi les alluvions des ruisseaux provenant de la Chaîne des Puys, en particulier en bordure de la faille occidentale de la Limagne.**

Les coulées de lave qui ont comblé les anciennes vallées du plateau cristallin des Dômes, et qui se sont épanchées vers l'est jusque dans la plaine de la Limagne, présentent également des écoulements d'eau souterraine intra et sous-basaltiques. C'est dans ces formations que les horizons aquifères sont les plus profonds (hormis les venues d'eau minérales profondes).

Plus localement, on peut observer la présence d'une nappe superficielle au droit du maar de Clermont-Chamalières mais il faut, localement, valider les aptitudes au cas par cas.

Les autres secteurs du territoire étudié ont un potentiel hydrogéologique plus faible (petits aquifères discontinus dans le socle par exemple), voire médiocre, dans lesquels aucune véritable nappe d'envergure ne peut réellement se mettre en place (on y observe parfois des écoulements souterrains très localisés).

Par ailleurs, il est important de souligner que le territoire de Clermont Communauté comporte des secteurs où les sondages peuvent rencontrer, à faible profondeur, des venues de bitume, d'eau très minéralisée et du CO₂.

A noter que la carte hydrogéologique proposée dans le présent document recouvre assez logiquement les zones où l'écoulement des anciennes vallées est perturbé par l'aménagement anthropique, et où est identifié un risque d'inondation (Illustration 28). Ce risque témoigne de formations argileuses dans lesquelles l'infiltration d'eau reste faible, précisément là où certaines des formations aquifères sont des nappes libres pouvant être assez peu profondes et où, par voie de conséquence, de possibles difficultés de réinjection sont envisageables. En ces points, l'obtention de l'avis d'un spécialiste est donc justifiée, avant d'y entreprendre la réalisation d'une opération géothermique sur aquifère.

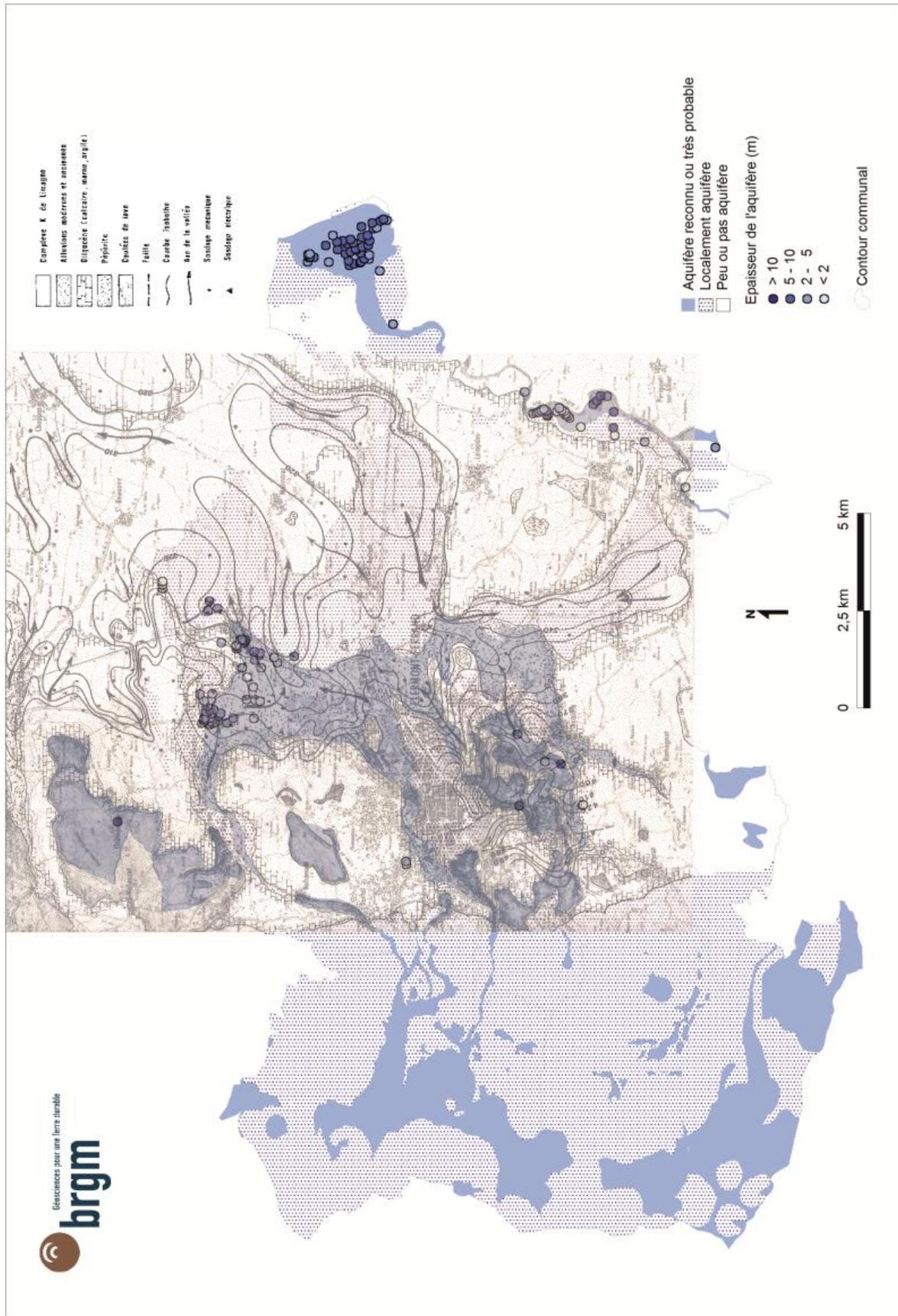


Illustration 24 : Carte des épaisseurs des ressources hydrogéologiques superposées aux isobathes disponibles

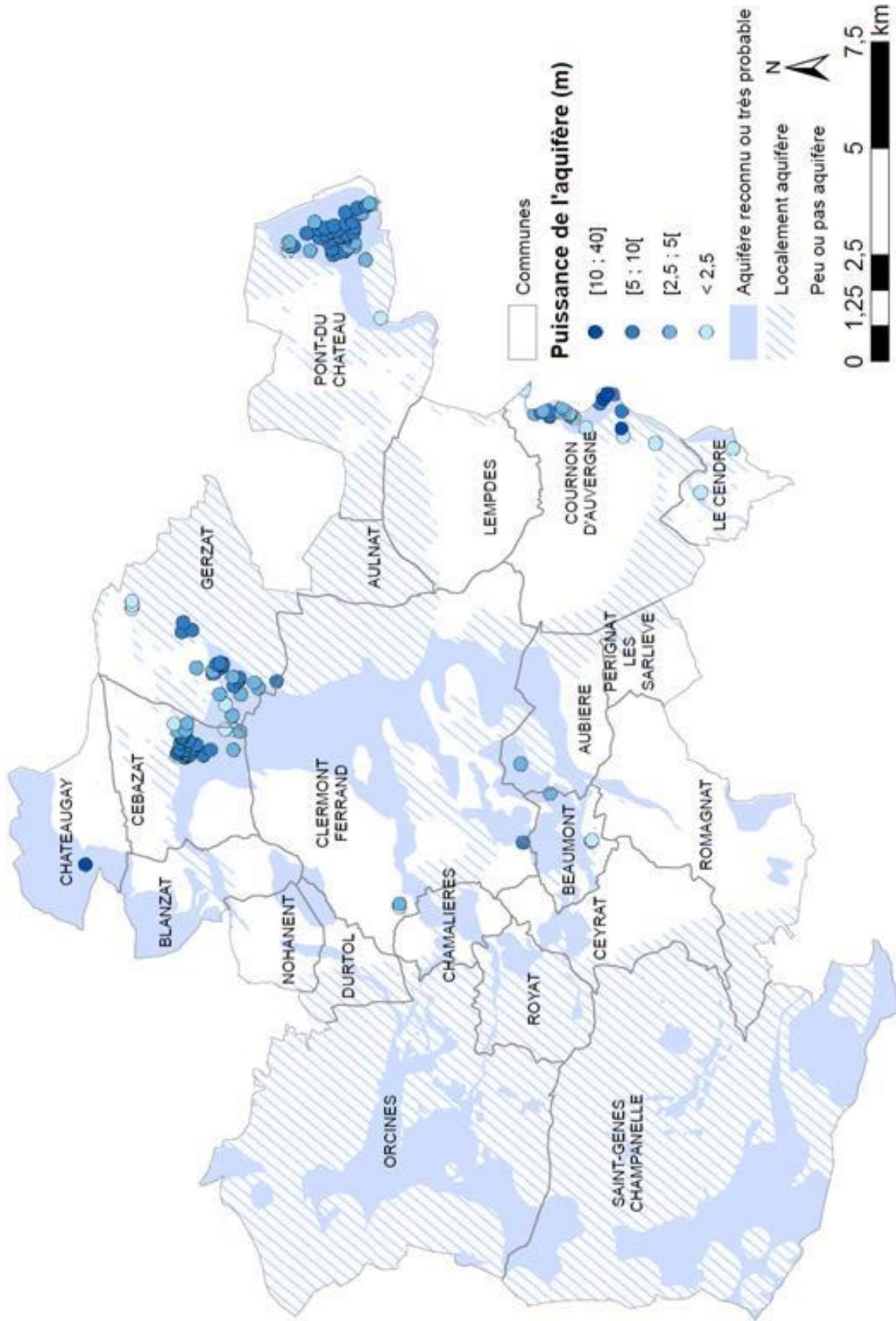


Illustration 25 : Carte des puissances des aquifères au droit de Clermont Communauté

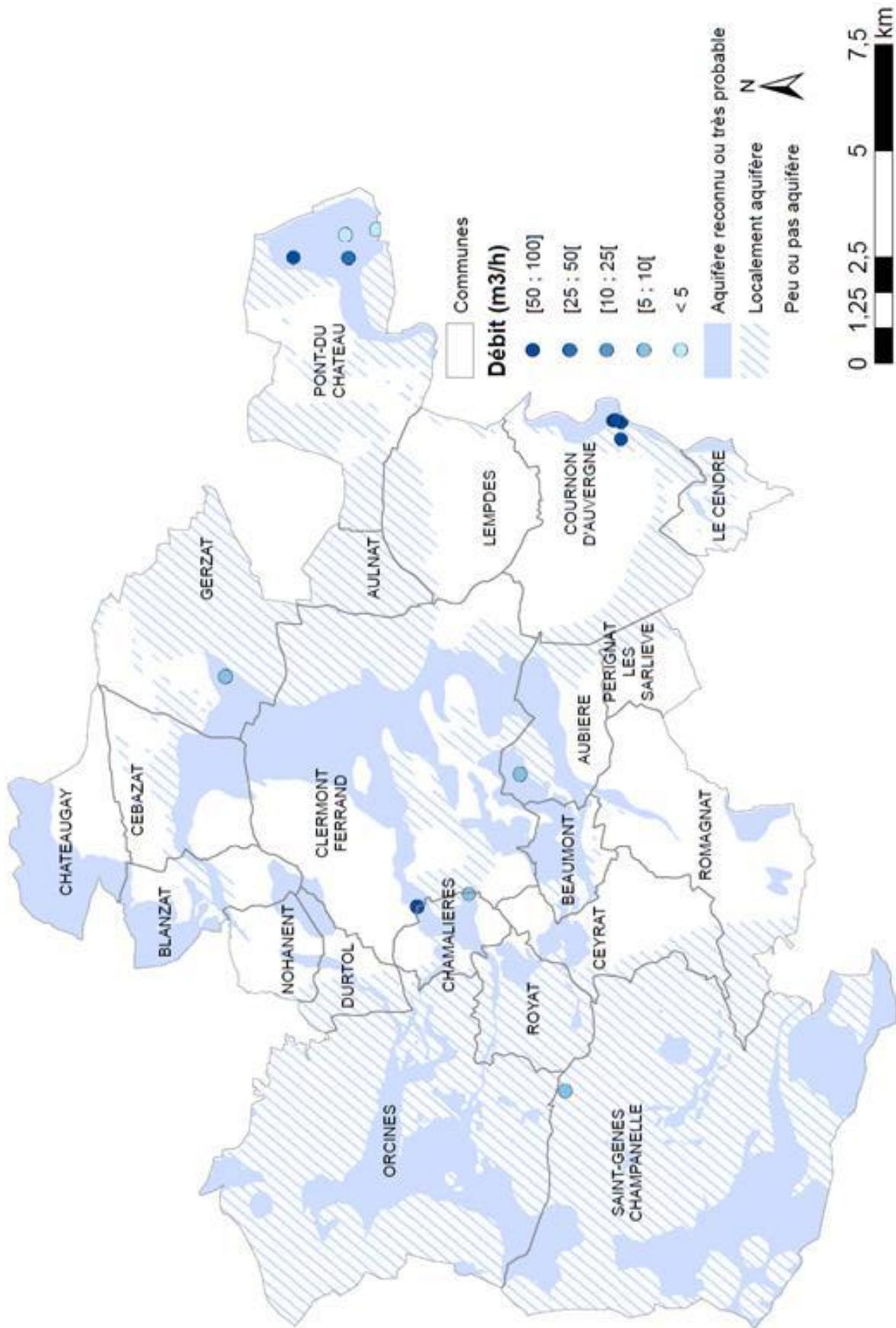


Illustration 26 : Carte des débits constatés dans les aquifères au droit de Clermont Communauté

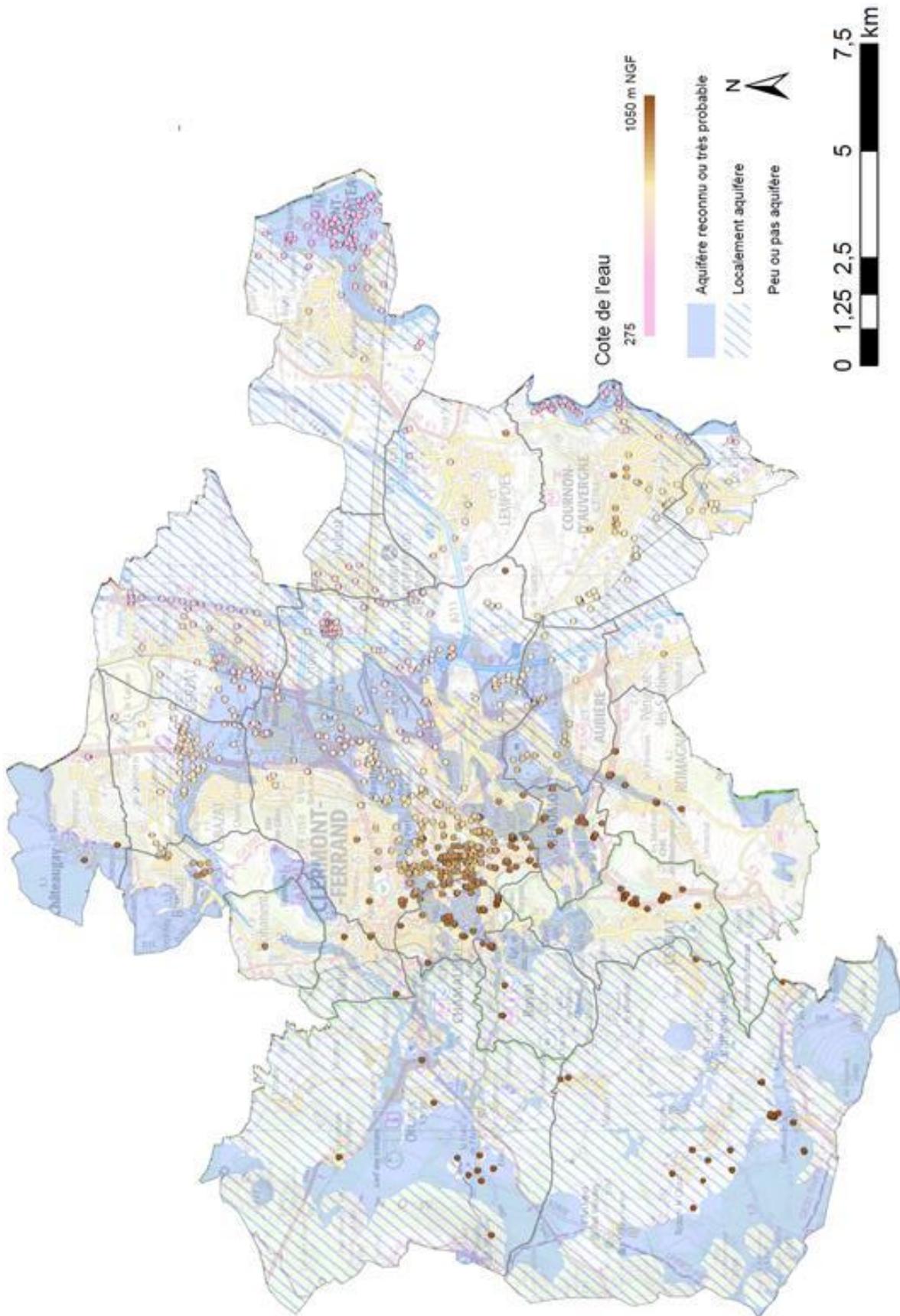


Illustration 27 : Carte des niveaux d'eau NGF constatés dans les ouvrages au droit de Clermont Communauté

4.7.2. Conclusion pour la géothermie sur aquifères superficiels

En règle générale, la disponibilité des niveaux aquifères superficiels pour une utilisation géothermique sur le territoire de Clermont Communauté doit être, a minima, validée par des essais (pompage et/ou réinjection) avant que ne soit dimensionnée une exploitation. Une des raisons provient de la rareté des opérations déjà réalisées et documentées.

Cet avis pourra évidemment être révisé au fur et à mesure de la collecte des informations relatives à de futures opérations.

Hormis la vallée de l'Allier, les secteurs aquifères "à priori favorables" se situent là où sont constatés des dépôts alluvionnaires récents, notamment dans des "chenaux" d'écoulement préférentiel d'orientation majoritairement ouest-est. Toutefois, faute d'opérations documentées suffisantes, y subsiste une possible incertitude en matière de réinjection pour la mise en œuvre de la technique du doublet géothermique.

Le tableau ci-après (Illustration 29) synthétise les potentialités en fonction des secteurs.

	Dimensions	Indications de débits
Formations alluviales		
Alluvions récentes de l'Allier	Toit : 1.5 m à 5 m Epaisseur : entre 3 et 10 m	Jusqu'à 80 m ³ /h
Alluvions des cours d'eau de la rive gauche de l'Allier	Toit : moins de 5 m Epaisseur : entre 3 et 7 m	Au nord : de 20 à 60 m ³ /h Au sud : moins de 10 m ³ /h
Alluvions anciennes	Faible	De l'ordre de 1 m ³ /h
Formations liées au volcanisme		
Formations volcaniques	Toit : selon épaisseur de la coulée Epaisseur : de quelques mètres à quelques dizaines de mètres (étroites vallées)	Sur les plateaux et au nord : moins de 8m ³ /h En aval des coulées : jusqu'à 70 et 80 m ³ /h
Maar de Clermont-Chamalieres	Toit : selon épaisseur des dépôts Epaisseur : jusqu'à 20 m (par secteur)	Jusqu'à 60 m ³ /h
Formations du socle		
	Assez faible	Faible (moins de 4 m ³ /h) sauf présence des failles
Formations sédimentaires		
Complexes de la Limagne	Quelques mètres (localisé)	Moins de 4 m ³ /h (réinjection délicate)
Formations sédimentaires du tertiaire	Sans objet	Inférieur à 1 m ³ /h

Illustration 29 : Récapitulatif des potentialités aquifères

4.8. POTENTIALITES POUR LES SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES

4.8.1. Examen du contexte au regard des sondes géothermiques verticales

Les cartes hydrogéologiques ci-avant (Illustration 25 à Illustration 27) montrent que seul environ 1/3 du territoire se situe à la verticale d'horizons aquifères "reconnus ou probables", ces niveaux n'étant d'ailleurs pas nécessairement propices à une exploitation géothermique par la technique du doublet. Il est donc partout recommandé de confirmer les propriétés hydrauliques avant toute opération sur aquifère. De ce fait, se poser la question d'une exploitation de la ressource géothermique au moyen de sondes géothermiques verticales (SGV) devient légitime.

Néanmoins, la topographie et la géologie du territoire étant complexe (Illustration 30), rappelons tout d'abord que certains contextes géologiques peuvent être peu favorables au développement de SGV, comme les terrains présentant une forte hétérogénéité, les zones structurales intensément fissurées, faillées ou bréchifiées, ou encore les zones présentant des cavités naturelles comme les karsts ou des cavités anthropiques. En effet, dans ces types de terrains la mise en œuvre de la cimentation de l'ouvrage peut être techniquement difficile et l'obtention d'un scellement des sondes conforme à la norme peut être compromise.

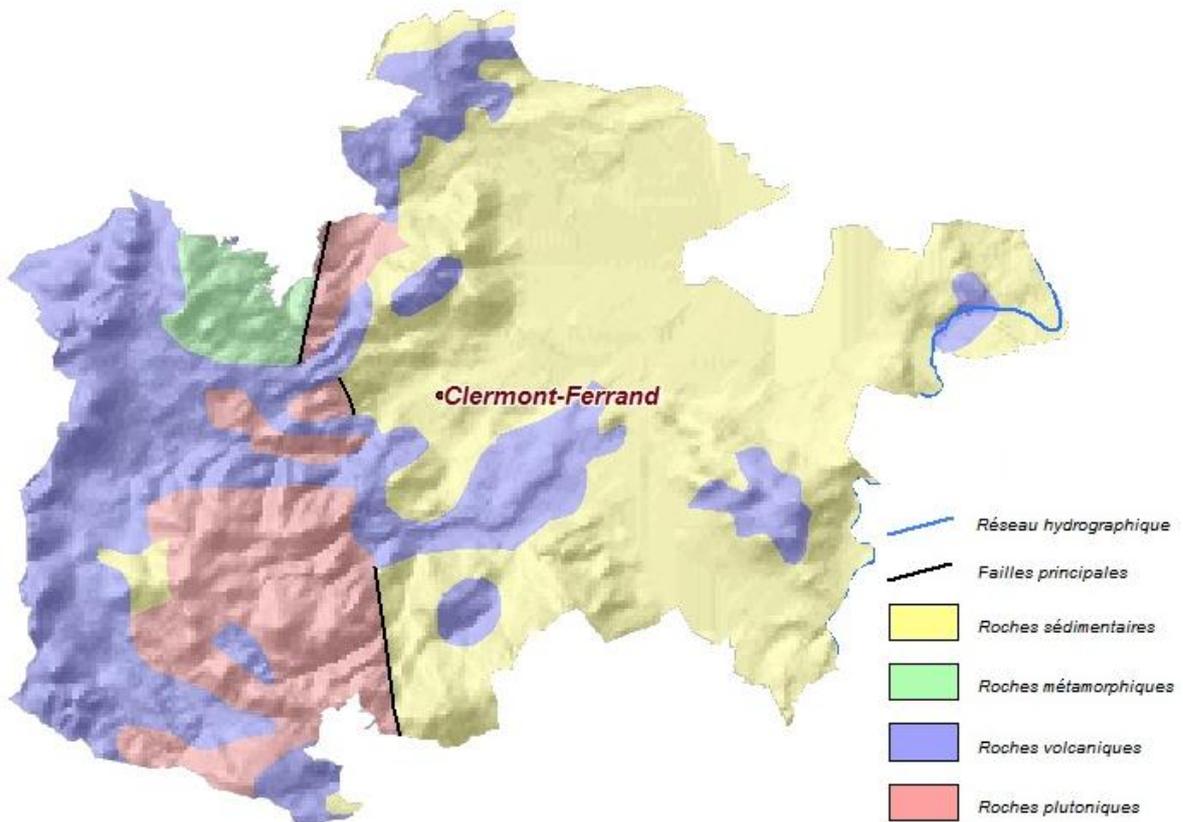


Illustration 30 : Topologie et géologie simplifiée du territoire de Clermont Communauté

De plus, des précautions particulières et le recours à l'avis d'un expert du sous-sol (géologue, hydrogéologue) sont vivement recommandés dans les zones où l'on rencontre des roches meubles instables ainsi que des roches présentant des risques de dissolution (évaaporites) ou de retrait-gonflement (niveau argileux d'épaisseur significative). Enfin, rappelons qu'une vigilance particulière reste conseillée au moment de la réalisation du forage pour, le cas échéant, éviter de mettre en connexion des aquifères superposés ainsi que de drainer de la pollution de la surface vers les aquifères.

A toutes fins utiles, on trouvera sur la carte ci-après (Illustration 31) les opérations de SGV déjà identifiées en 2012 sur le territoire de Clermont Communauté. D'autres opérations ont depuis été réalisées, notamment les onze sondes géothermiques de l'hôtel de ville de Beaumont.

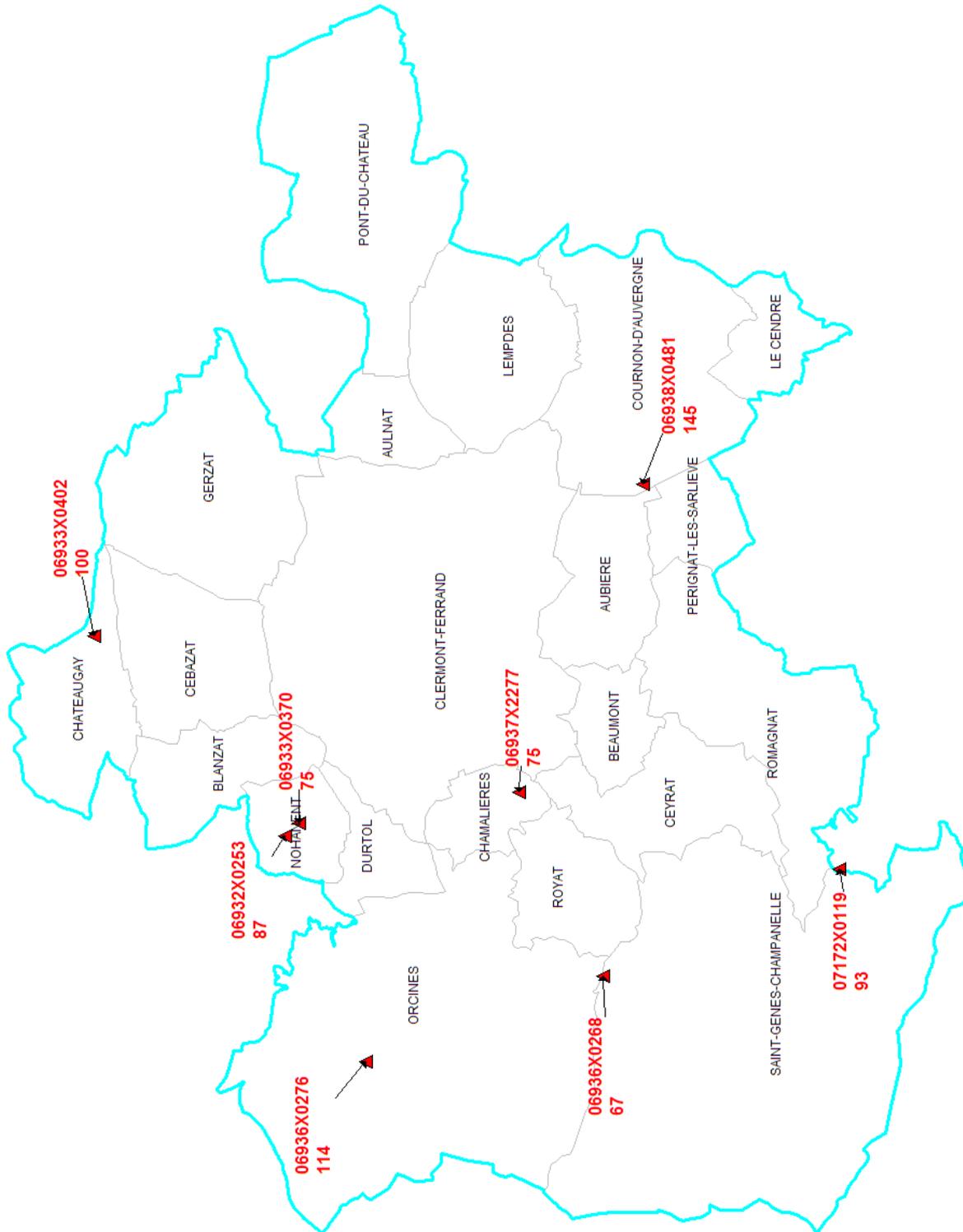


Illustration 31 : Carte des implantations des SGV sur le territoire de Clermont Communauté (source : BSS, 2012)

4.8.2. Aléa retrait / gonflement des sols argileux

Une éventuelle présence d'argile peut avoir pour conséquence quelques instabilités de versants, de faible ampleur, notamment sur les Côtes de Clermont et des phénomènes de retrait-gonflement des terrains sur toute la moitié est du territoire (Illustration 32).

Les formations géologiques composant le substratum du secteur de Clermont-Ferrand sont constituées de matériaux marneux ou calcaro-marneux. L'érosion des buttes formées par les manifestations volcaniques (Puy de Chanturgue, Côtes de Clermont, plateau des Cézeaux) a donné naissance à des sols argileux et argilo-marneux sur les pentes et certaines parties basses. Les aléas forts et moyens peuvent être constatés sur toute la partie est du territoire de Clermont Communauté, c'est-à-dire vers la plaine de la Limagne où, à partir de la surface, les terrains rencontrés sont des "terres noires" composées de limons et d'argiles comportant des cendres volcaniques et des alluvions, reposant sur une couche argilo-marneuse. Les communes peu concernées sont donc Durtol, Orcines, Royat et Saint-Genès-Champanelle. Les informations utiles sont disponibles sur le site www.argiles.fr

Du point de vue géothermique, on peut dire que si ces terrains peuvent être le siège de désordres sur le bâti, la réalisation d'ouvrages géothermiques ne semble pas pour autant devoir être compromise. On notera néanmoins que l'exploitation d'ouvrages géothermiques sur aquifère selon la technique du "doublet géothermique" dans ce type de terrain peut présenter des difficultés au niveau de la réinjection de l'eau géothermale, en particulier si les horizons aquifères sont peu profonds. Dans ces secteurs, il sera donc recommandé d'étudier également une solution géothermique alternative comme les "sondes géothermiques verticales", technologie qui, dans le cas d'espèce, sera assez peu sensible à cet aléa.

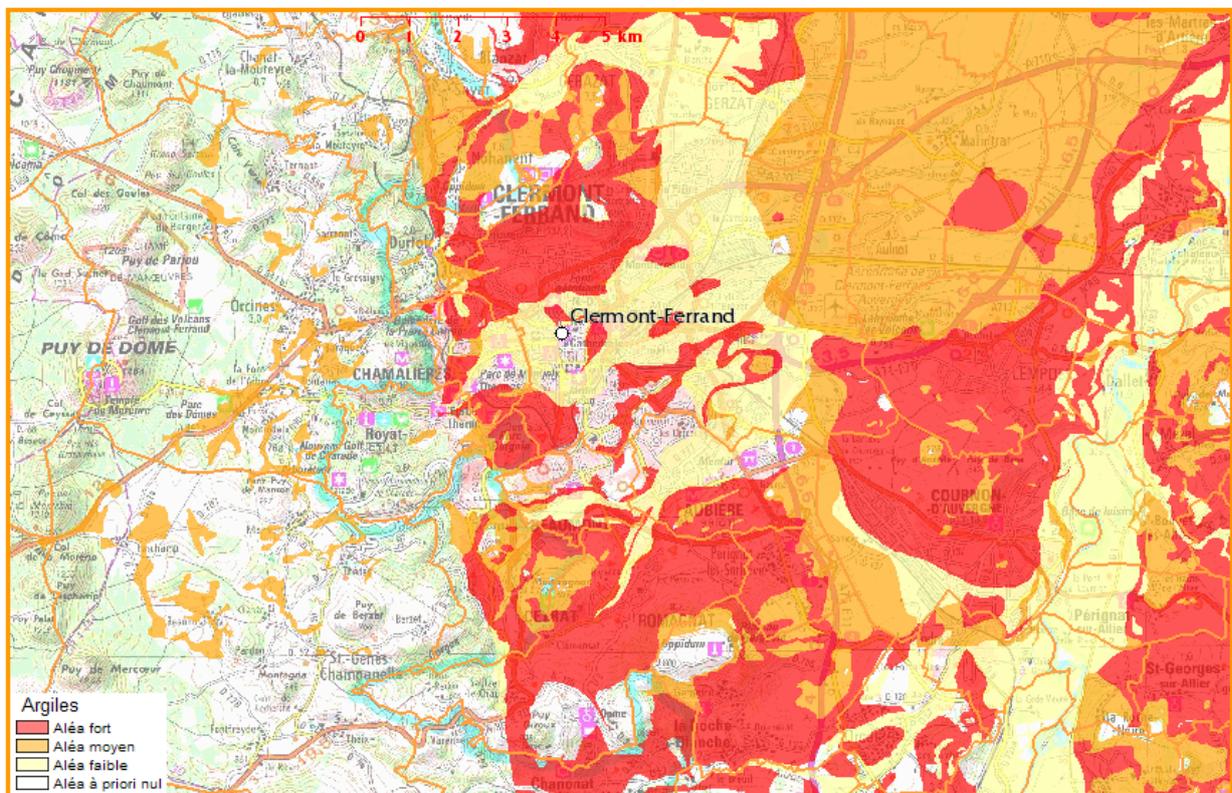


Illustration 32 : Carte de l'aléa retrait/gonflement des sols argileux sur le territoire de Clermont Communauté

4.8.3. Présence de cavités naturelles et/ou anthropiques

Hormis les points visualisés sur la carte ci-dessous (Illustration 33), le territoire de Clermont Communauté n'est pas réputé posséder de secteurs très étendus où existeraient d'importantes quantités de cavités et/ou carrières souterraines.



Illustration 33 : Localisation des cavités sur le secteur de Clermont Communauté (source : www.bdcavite.net)

Les cavités peuvent être naturelles ou d'origine anthropique : marnières, souterrains refuges, carrières, habitations troglodytiques ... Sur le territoire de Clermont Communauté, ces cavités sont très majoritairement d'origine anthropique.

En particulier, le vieux Clermont (plateau central) est le siège d'un important réseau de cavités anthropiques (caves), potentiellement reliées entre elles et en plusieurs niveaux (jusqu'à cinq étages, soit 18 m, sous la place de la Victoire). Cela provient de la facilité à travailler les projections pyroclastiques du maar dont le cratère est situé à l'emplacement des quartiers de Jaude et des Salins.

En présence de cavités, il peut être délicat de réaliser des forages sans vérification préalable.

On retrouve d'autres secteurs du même type sur les communes d'Aubière, de Châteaugay et de Cournon-d'Auvergne. Pour les autres communes, les cavités sont significativement de moindre importance.

Les cavités existantes sont répertoriées pour l'ensemble des communes de Clermont Communauté sur les site internet www.bdcavite.net et www.cavites.fr.

Le tableau ci-dessous propose un aperçu succinct des principales informations.

Aubière	157 caves en deux secteurs : l'un situé au nord du bourg ancien, au pied du plateau des Cézeaux, l'autre au sud du bourg ancien, au pied du Puy d'Aubière.
Aulnat	aucune entrée
Beaumont	1 carrière (Haute Empire), 3 cavités naturelles (Chataigneraie, Croix-neuve, Romagnat), 2 ouvrages civils (Souterrain de Beaumont, cavité du stade).
Blanzat	2 grottes
Chamalières	3 cavités naturelles (Hôpital Fontmaure, Grotte du Chien, Rue des Villars), 2 ouvrages civiles : Captage Fontmaure, Puits rue des Villars)
Châteaugay	65 caves
Clermont-Ferrand	286 caves, 1 réseau de galeries d'une ancienne exploitation de carrières à chaux, 2 carrières de calcaires à chaux
Cournon-d'Auvergne	22 anciennes carrières souterraines de calcaires à chaux du 18 ^{ème} et 19 ^{ème} siècle situées dans le secteur nord des zones construites, 2 puits
Gerzat	1 souterrain
Lempdes	1 souterrain
Orcines	11 carrières et/ou grottes, 1 captage d'eau
Pérignat-lès-Sarliève	1 carrière souterraine
Romagnat	1 carrière souterraine
Royat	1 carrière souterraine
Saint-Genès-Champanelle	1 tunnel (Cassières)

Illustration 34 : Liste des secteurs où sont localisées les cavités sur le territoire de Clermont Communauté

4.8.4. Caractérisation des propriétés thermiques des terrains

Dans ce document, les propriétés thermiques des terrains sont décrites au regard d'une exploitation par des sondes ; c'est-à-dire, par convention, sur une profondeur indicative d'une centaine de mètres, ce qui, notamment, permet d'apprécier les éventuelles différences de :

- **Conductivité thermique.** Pour une roche donnée, elle sera d'autant plus élevée que la proportion d'eau emplissant les porosités est élevée. La conductivité thermique de l'eau n'est pas en soit très importante mais elle vient compléter la conduction entre les grains de la matière solide, ce qui a pour effet d'améliorer la diffusion de la chaleur.

Pour un ouvrage géothermique donné, plus la conductivité thermique des terrains est élevée, plus cet ouvrage peut échanger de l'énergie thermique avec les terrains environnants. Ce paramètre influence donc la puissance thermique effective de l'ouvrage.

Il est toutefois important de garder à l'esprit que le puisage d'énergie dans le sous-sol ne peut s'envisager indéfiniment à forte puissance au risque d'épuiser le stock thermique. Aussi, la **puissance nominale** d'un échangeur géothermique vertical s'entend pour une durée cumulée de 1/4 à 1/3 du temps au maximum dans une année. Le reste du temps, l'ouvrage devra soit être à moindre puissance ou à l'arrêt, soit fonctionner pour un usage opposé (rafraîchissement en été et chauffage en hiver). Ce point est discuté au chapitre traitant des techniques géothermiques.

- **Capacité thermique.** Pour une roche donnée, elle sera d'autant plus élevée que la proportion d'eau emplissant les porosités est élevée. Les deux capacités thermiques des matériaux solides et de l'eau se cumulent.

Ce paramètre donne donc une indication sur la quantité d'énergie à laquelle l'ouvrage peut accéder sur une saison, en gardant à l'esprit que cette quantité d'énergie doit être compensée en dehors des périodes de puisage par les phénomènes naturels et/ou par le mode de gestion du système géothermique.

Dans le présent rapport, on va considérer que seuls les phénomènes naturels entrent en jeu pour la régénération thermique, ce qui revient à limiter les puisages dans un périmètre donné. Ce point est discuté au chapitre traitant des techniques géothermiques.

4.8.5. Potentialités pour les sondes géothermiques verticales

Fort logiquement on va exprimer une sectorisation géographique des potentialités pour les sondes géothermiques verticales (Illustration 43) qui rappelle celle de la carte des ressources hydrogéologiques de Clermont Communauté (Illustration 22). Ainsi, on va retrouver les grands cas de figure suivants :

- pour les secteurs où les terrains sont "**peu ou pas aquifères**", on considèrera que toutes les techniques basées sur le principe des échangeurs géothermiques verticaux ou assimilés peuvent être mises en œuvre. A noter que ce constat vaut également pour les solutions pouvant faire appel à du stockage périodique comme les fondations géothermiques ;
- pour les secteurs où les terrains sont "**localement aquifères**", on considèrera que les solutions sur échangeurs géothermiques verticaux sont possibles mais qu'elles ne pourront pas nécessairement tirer parti d'une composante de stockage périodique, un transport convectif pouvant être perturbant. Des études sont alors à prévoir au cas par cas ;
- pour les secteurs où les terrains sont reconnus "**aquifères ou probablement aquifères**", on considèrera que la réalisation d'échangeurs géothermiques verticaux doit être validée par un spécialiste. Il s'agit notamment d'analyser laquelle des techniques sur aquifère ou sur échangeur enterré répond le mieux aux attentes du maître d'ouvrage.

4.8.6. Conclusions pour la géothermie sur sondes géothermiques verticales

En tout état de cause, l'implantation de sondes géothermiques verticales (SGV : 8 opérations répertoriées avant 2013 sur le territoire de Clermont Communauté : Illustration 31) répond à une logique sensiblement différente de celle des solutions sur aquifère.

Ainsi, il convient de distinguer les secteurs où de larges espaces sont disponibles, où peuvent être installées des SGV indépendantes, des secteurs à forte densité de bâti, où les SGV doivent être implantées en champ. En effet, la puissance thermique unitaire d'une SGV est très inférieure à celle d'un doublet sur aquifère. Il faut donc multiplier le nombre des SGV pour égaler la puissance installée des opérations géothermiques sur aquifère. A titre d'illustration, une puissance thermique de 100 kW est obtenue avec un doublet géothermique (un puits de production et un de réinjection) dont le débit d'eau est de seulement 15 m³/h. Pour la même puissance thermique installée, il faudra implanter entre 20 et 25 SGV. On pourra alors décider de les implanter en champ, c'est-à-dire à faible distance les unes des autres, ou de manière indépendante, c'est-à-dire espacées d'une dizaine de mètres au moins. Dans le présent rapport, les potentialités sont regardées exclusivement pour les sondes indépendantes.

Pour se faire une idée des secteurs favorables à l'implantation de telles SGV, il faut donc observer la densité urbaine au travers du critère de la puissance géothermique appelée qui est

précisé dans le chapitre « Expression des besoins thermiques des bâtiments ». Il y est montré que, si on découpe le territoire en mailles carré de 25 m x 25 m (625 m²), là où la puissance géothermique appelée par le tissu bâti est, selon la typologie des roches, inférieure à 8 kW à 12 kW par maille, soit 12.8 W/m² à 19.2 W/m², alors il est potentiellement envisageable de déployer des SGV pour satisfaire 100 % des besoins, évidemment sous réserve que réaliser des forages ne soit pas proscrit du fait de la présence de cavités ou autres restrictions.

In fine, une grande partie du territoire de Clermont Communauté semble éligible à la satisfaction de 100 % des besoins thermiques par des sondes géothermiques indépendantes, comme on peut le visualiser à titre d'exemple sur le secteur ci-après, focalisé sur le nord de la commune du Cendre (Illustration 35).

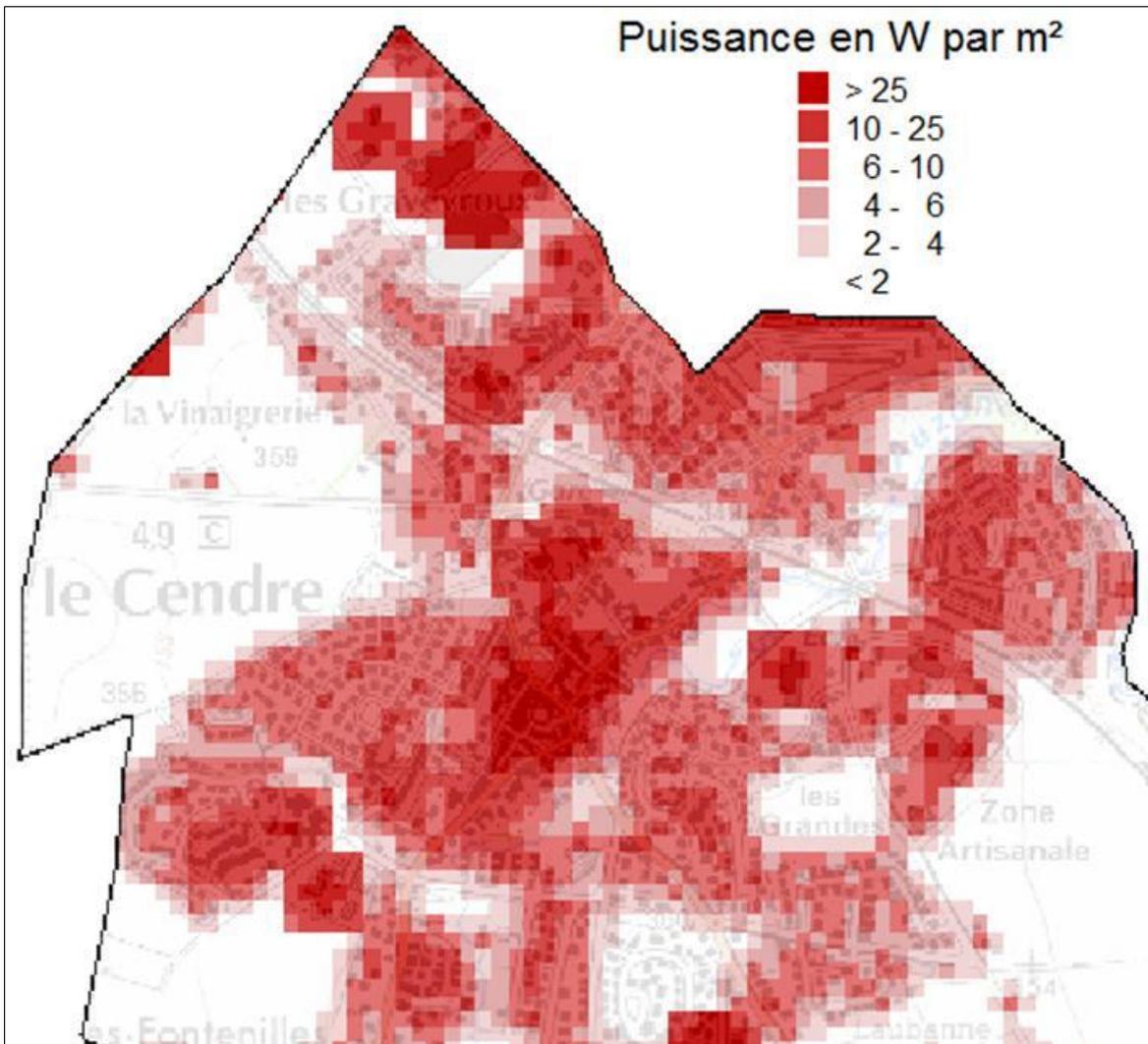


Illustration 35 : Visualisation des puissances géothermiques appelées (méthode des mailles - Le Cendre)

4.9. METHODE POUR EXPRIMER LES POTENTIALITES GEOTHERMIQUES

4.9.1. Synthèse des méthodes pour exprimer les potentialités géothermiques ramenées à l'unité de surface au sol

Une fois déterminés les paramètres thermiques des différents niveaux géologiques (aquifères et/ou roches), l'objectif est de ramener les puissances géothermiques disponibles à l'unité de surface au sol, cela afin d'effectuer un croisement avec les demandes des bâtiments. La méthode employée est synthétisée par le logigramme ci-après (Illustration 36).

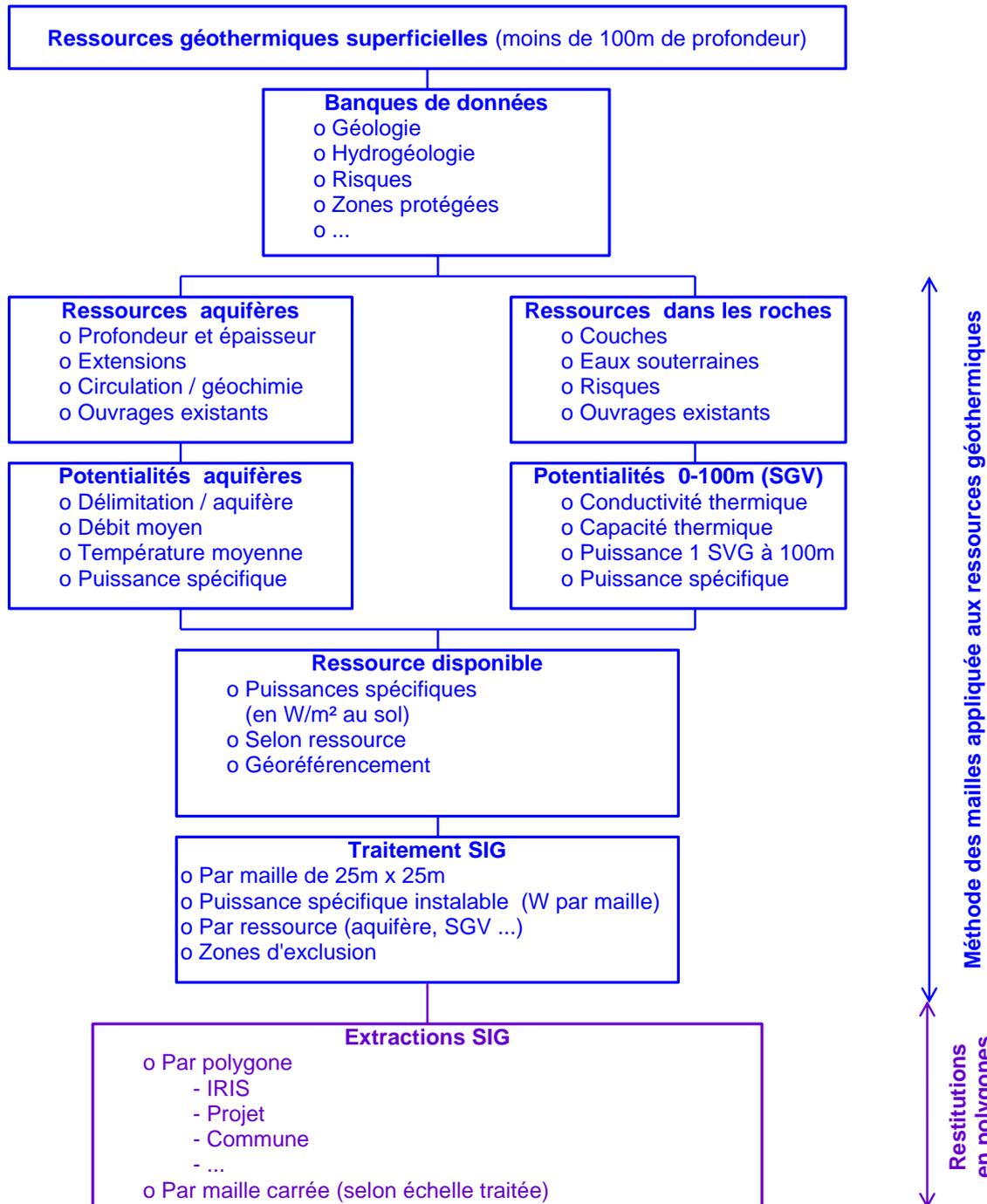


Illustration 36 : Logigramme de la méthode employée pour exprimer les potentialités géothermiques

4.9.2. Méthode pour exprimer les ressources géothermiques sur aquifères superficiels

Présentation de la méthode

La puissance géothermique que peut délivrer une opération sur aquifère superficiel s'exprime au regard de la technique du doublet géothermique, solution comprenant un puits de production et un puits de réinjection. Un peu à la manière d'un forage pour l'alimentation en eau potable (AEP), on peut définir un périmètre représentant l'incidence hydraulique et thermique du doublet lorsqu'il est en fonctionnement. On peut alors considérer que le doublet géothermique, exploité à sa puissance nominale, mobilise la surface projetée au sol localisée à l'intérieur de ce périmètre.

Afin de procéder au croisement des ressources géothermales et des besoins des bâtiments, la méthode employée dans cette étude a pour objet d'exprimer une puissance spécifique P_s calculée en rapportant la puissance P_g du doublet à la surface S située à l'intérieur du périmètre ci-avant. Pour un aquifère donné, on aura alors : $P_s = P_g / S$ où

P_g représente la puissance nominale pour un doublet géothermique ;

S représente la surface située à l'intérieur du périmètre d'incidence du doublet.

Relation entre la puissance thermique utile et la puissance géothermique

L'étude s'intéresse uniquement aux aquifères superficiels. Pour un usage de chauffage ou de production d'ECS, un dispositif géothermique sur aquifère superficiel requiert une pompe à chaleur, ce qui fait que l'énergie délivrée provient en partie de l'aquifère et en partie de l'électricité consommée par la pompe à chaleur.

On distinguera donc la "puissance géothermique" P_g de la puissance P utile délivrée par la pompe à chaleur en appliquant la relation : $P = P_g + P_{elec}$ où P_{elec} désigne la puissance électrique consommée par la pompe à chaleur.

Relation entre le débit d'eau géothermale et la puissance géothermique

La puissance géothermique disponible s'estime à partir du débit d'eau qui peut être pompé dans un aquifère superficiel donné et de l'écart (ΔT) entre la température de l'eau pompée et la température de l'eau réinjectée dans l'aquifère après prélèvement d'énergie.

Connaissant le débit d'eau géothermique (Q_g) pouvant être pompé, la puissance thermique disponible peut être obtenue à l'aide de la formule ci-dessous en connaissant la valeur pour ΔT entre la température de l'eau pompée et la température de l'eau réinjectée dans l'aquifère, typiquement entre $\Delta T = 3 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$P_g = Q_g \times C_p \times \Delta T$$

- Q_g : débit d'eau exprimé en m^3/s ;
- P_g : puissance exprimées en kW ;
- ΔT : écart de température exprimé en $^\circ\text{C}$ (ou K) ;
- C_p : chaleur spécifique de l'eau à la température considérée exprimée en $\text{kJ}/\text{m}^3.\text{K}$.
Aux alentours de $10 \text{ }^\circ\text{C}$, on prendra $C_p = 4\,193.4 \text{ kJ}/\text{m}^3.\text{K}$

Nota : A l'inverse, connaissant une puissance géothermique P_g demandée, une estimation du débit d'eau géothermique Q_g peut être obtenue à l'aide de la formule ci-dessous, en fixant une valeur pour ΔT typiquement entre $\Delta T = 3 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$Q_g = \frac{P_g}{C_p \times \Delta T}$$

Dans le cadre de la présente étude, on va considérer que la température d'une formation aquifère est constante durant la saison de chauffe et que ΔT aux bornes de l'échangeur de la pompe à chaleur est typiquement de $6 \text{ }^\circ\text{C}$. Ainsi, par exemple, pour un doublet géothermique qui exploite une formation aquifère dont la température de pompage est de $12 \text{ }^\circ\text{C}$, la température de l'eau réinjectée sera de $6 \text{ }^\circ\text{C}$. Ainsi, un débit de $10 \text{ m}^3/\text{h}$ permet une puissance géothermique installée (P_g) de 70 kW

Important : La puissance géothermique installée pour un doublet géothermique s'entend pour un usage continu, ce qui n'est pas le cas pour les sondes géothermiques verticales pour lesquelles le temps de fonctionnement typique sera de $1\ 500$ à $2\ 000$ heures, soit 50% du temps durant la saison de chauffe.

Spécificité de la technique du doublet géothermique

La technique géothermique conventionnelle employée pour exploiter une formation aquifère superficielle est le doublet géothermique (Illustration 37). Cette technique respecte les équilibres hydrauliques des formations aquifères car l'eau pompée est intégralement réinjectée dans la même formation après prélèvement de l'énergie.

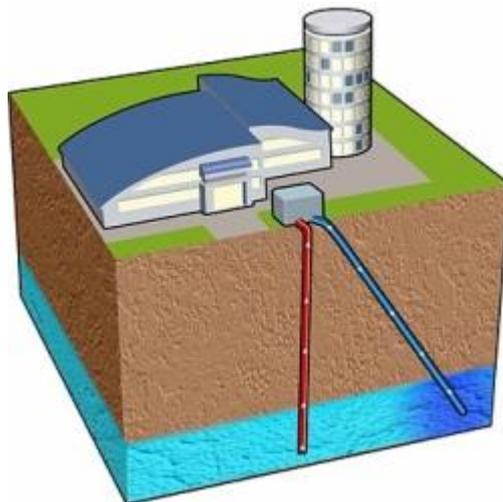


Illustration 37 : Schéma de principe du doublet géothermique

L'incidence hydraulique et thermique d'un doublet s'exprime à partir de la distance D qu'il faut respecter entre le puits de pompage et le puits de réinjection afin d'éviter tout risque de recirculation d'une eau refroidie dans le puits de pompage durant la saison de chauffe. Cette distance prévaut également entre doublets voisins. De la sorte, on va pouvoir tracer un périmètre de forme ovoïde autour du doublet (Illustration 38), avec S défini par l'équation ci-après : $S = D^2 (1 + \pi/4)$.

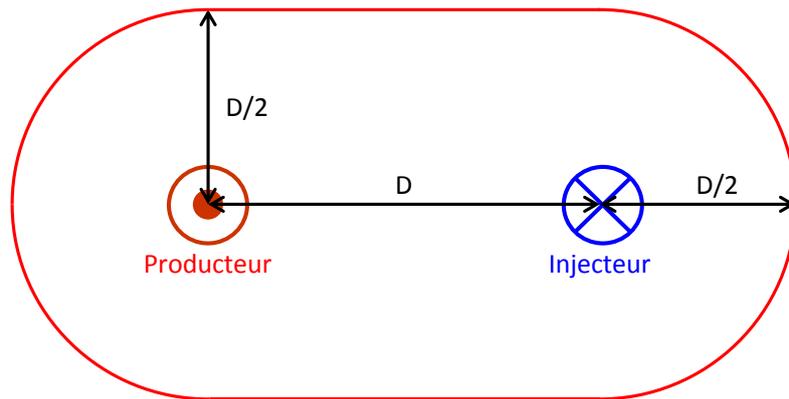


Illustration 38 : Symbolisation du périmètre d'incidence d'un doublet géothermique

Dans tous les cas, pour une nature de formation aquifère donnée, la distance D est souvent caractérisée par le débit géothermique Q_g qu'il est possible de pomper. Dans cette formation, ce débit sera lié à l'épaisseur de la formation aquifère qui peut fluctuer de manière significative selon le contexte géologique local. En hydrogéologie, cette épaisseur est dénommée "puissance de l'aquifère".

Important : Sur le territoire étudié, le contexte est complexe et il sera toujours recommandé de procéder à des essais de pompage, même dans les secteurs déjà reconnus aquifères.

La carte hydrogéologique qui a été constituée (Illustration 40) localise les formations reconnues aquifères. Y sont distingués les secteurs où les quelques connaissances disponibles permettent, en première approche, d'estimer une puissance géothermique installable. Il s'agit d'une puissance spécifique P_s . On exprime P_s en kW / maille de 25 m x 25 m ou en W / m² (ramené à l'unité de surface au sol).

Le tableau ci-dessous (Illustration 39) récapitule les différentes valeurs de P_s proposées dans cette étude pour les formations aquifères rencontrées.

Formations aquifères	Puissance spécifique P_s (W/m ²)	
	(kW / maille)	(W / m ²)
Alluvions récentes de l'Allier	> 12	> 19.2
Alluvions des cours d'eau de la rive gauche de l'Allier	6 à 12	9.6 à 19.2
Alluvions anciennes	Peu aquifères	
Vallées comblées dans les formations volcaniques	> 12	> 19.2
Maar de Clermont-Chamalières	6 à 12	9.6 à 19.2
Formations de socle	3 à 6	4.8 à 9.6
Complexes de la Limagne	3 à 6	4.8 à 9.6
Formations sédimentaires du Tertiaire	Peu aquifères	

Illustration 39 : Exemples de puissances géothermiques installables dans les formations aquifères

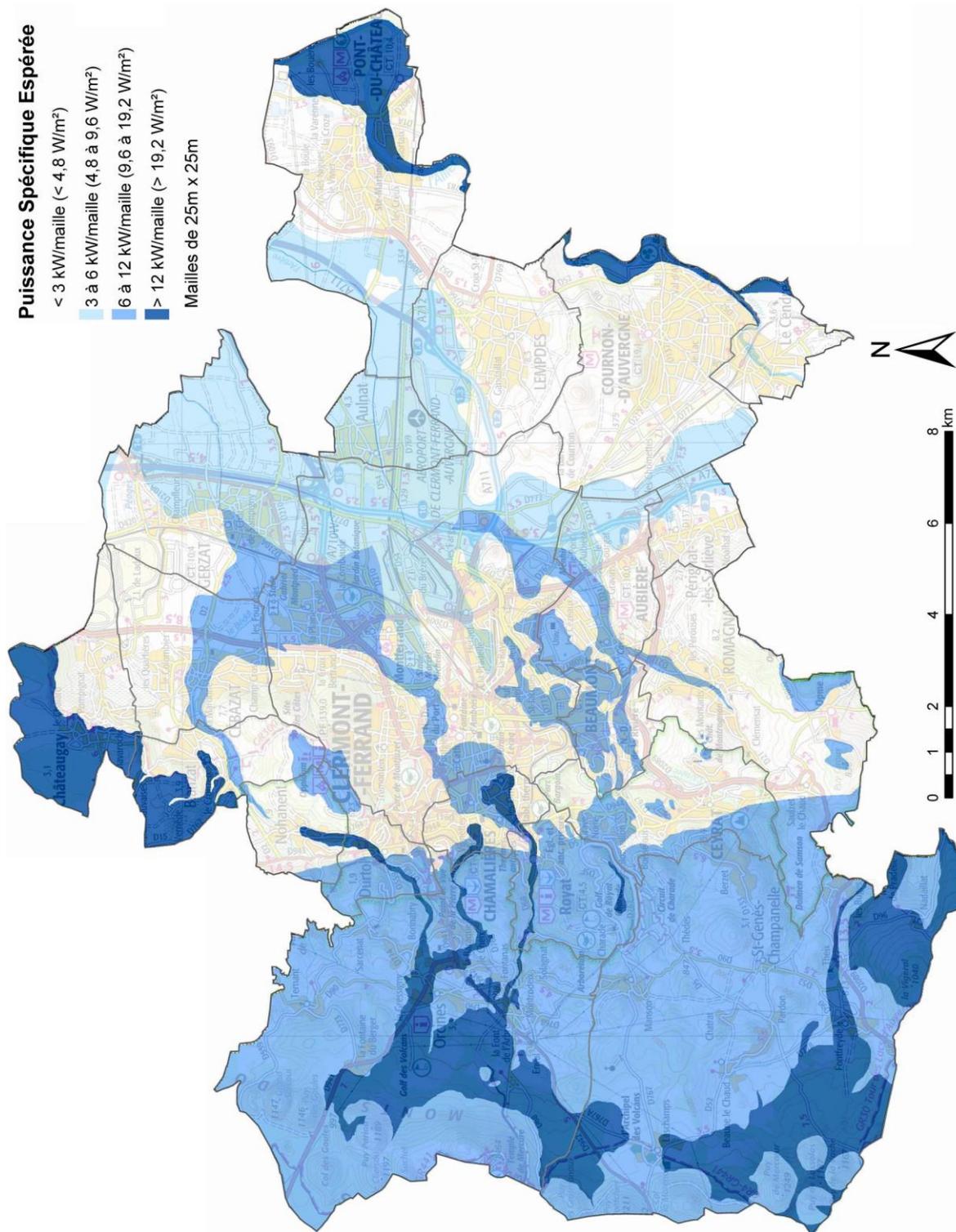


Illustration 40 : Sectorisation proposée pour distinguer les potentialités sur aquifère superficiel

4.9.3. Méthode pour exprimer les ressources géothermiques non-aquifères

Pour les ressources géothermiques non-aquifères, la présente étude retient comme unique technique les sondes géothermiques verticales (SGV).

En première approximation, on va considérer que l'expression des potentialités géothermiques est basée sur des sondes géothermiques indépendantes. C'est-à-dire que les techniques de stockage thermique en champ de sondes géothermiques ne sont pas prises en considération.

Pour des sondes géothermiques indépendantes, on retient la valeur de 100 m pour la profondeur nominale. Il s'agit d'une profondeur indicative. Pour ces SGV de 100 m de profondeur, on peut considérer que la puissance nominale typique se situe entre 4 kW et 6 kW au maximum. **Cette valeur de puissance représente la puissance thermique installée.**

Pour les SGV indépendantes, le volume influencé autour de la sonde est de forme cylindrique avec, en première approche pour le territoire concerné, un rayon R d'influence de l'ordre de 10 m, ce qui, ramené à la surface du sol, représente une surface d'incidence égale à 314.2 m².

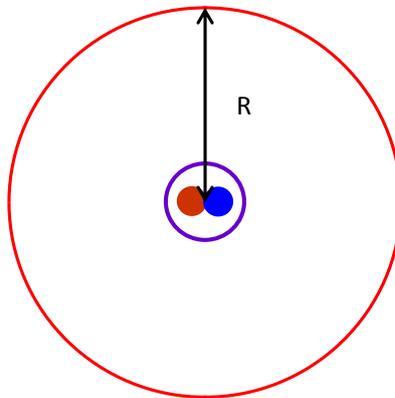


Illustration 41 : Symbolisation du périmètre d'incidence d'une sonde géothermique verticale

On peut remarquer que les mailles utilisées dans la présente étude sont des mailles carrées de 25 m x 25 m. Leur surface est donc de 625 m². Synthétiquement, cela signifie que l'on peut typiquement positionner deux SGV dans une telle maille.

Comme synthétisé par le tableau ci-dessous (Illustration 42), selon la nature des terrains rencontrés sur le territoire de Clermont Communauté, la puissance spécifique Ps pour les SGV de 100 m de profondeur sera comprise entre 12.8 W/m² (8 kW /maille) et 19.2 W/m² (12 kW/maille). La puissance spécifique Ps **représente la puissance géothermique installable.**

Secteurs du territoire de Clermont Communauté	Puissance spécifique Ps	
	(kW / maille)	(W / m ²)
Secteur ouest	12	19.2
Secteur centre	10	16.0
Secteur est	8	12.8

Illustration 42 : Puissances géothermiques installables pour les SGV

Important : La puissance spécifique (installable) pour une sonde géothermique s'entend pour un usage de chauffage et pour un temps de fonctionnement typique de la sonde géothermique ne dépassant pas 2 000 heures pendant la saison de chauffe. Ce n'est pas le cas pour les doublets géothermiques sur aquifères pour lesquels on peut considérer que le puisage peut être continu toute l'année.

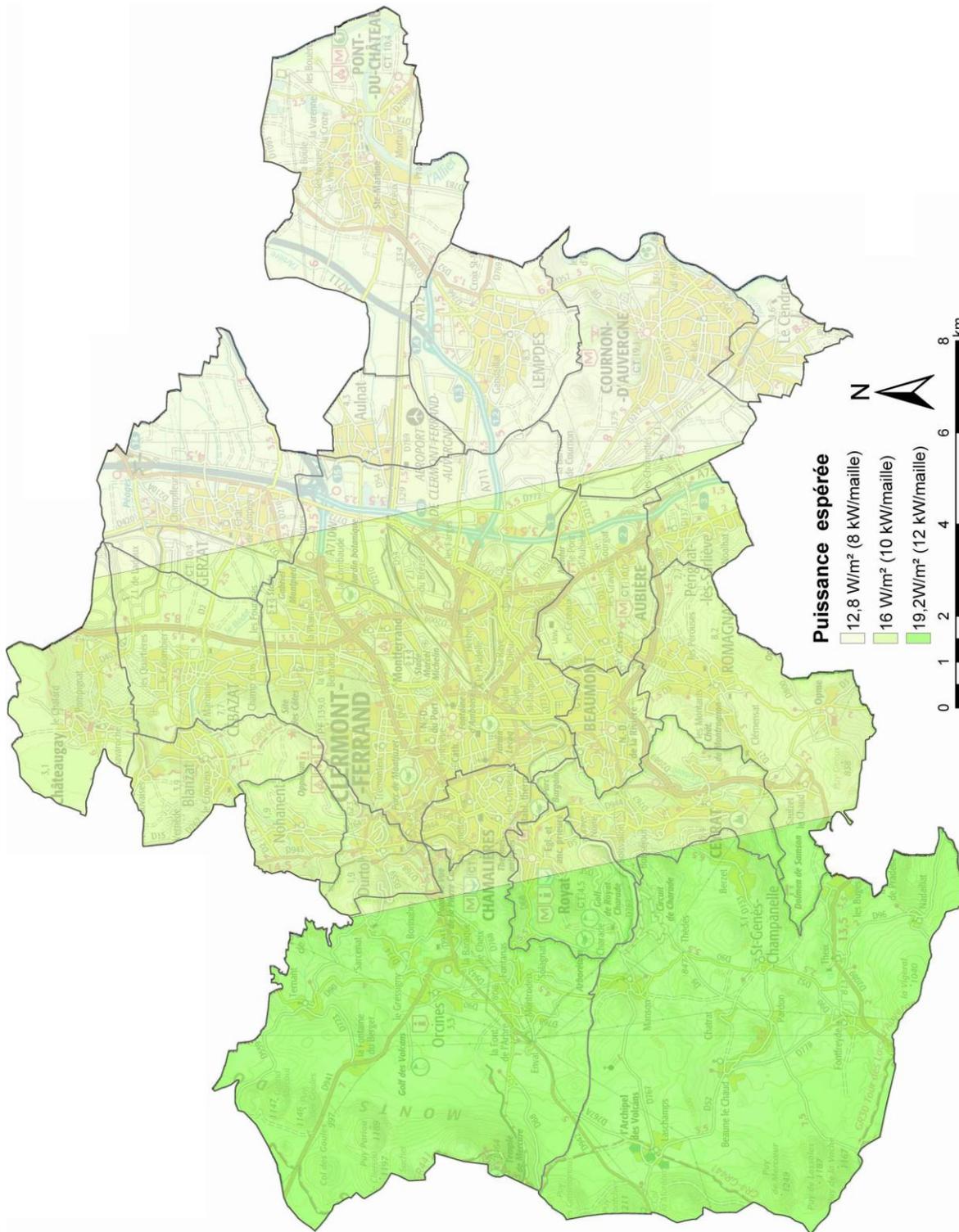


Illustration 43 : Sectorisation proposée pour distinguer les potentialités sur SGV

4.10. POTENTIALITES POUR LES RESEAUX D'EAUX USEES

4.10.1. Présentation

L'observation des cartes hydrologiques, hydrogéologiques et de risques montrent des circulations, globalement d'ouest en est, au travers des secteurs urbanisés, une part significative se retrouvant maintenant dans les réseaux séparatifs ou unitaires. Dans les secteurs urbanisés, une question porte donc sur l'opportunité de récupérer l'énergie véhiculée dans les conduites d'eaux usées des égouts, en particulier celles des eaux claires dites "parasites" au sens du traitement des eaux usées. Dans le cadre de la présente étude, Clermont Communauté a souhaité voir exprimées les potentialités en la matière, en particulier dans la perspective de satisfaire des besoins thermiques de bâtiments.

Afin d'exprimer cette ressource, il faut alors distinguer les eaux claires des eaux usées produites par les ménages et les activités, la question clé étant alors de savoir si l'énergie captable dans les égouts est significative, marginale ou temporaire. Pour cela, un état des lieux a été établi à partir des données et informations disponibles, mais qu'il a fallu collecter puis valider et analyser avant d'envisager une cartographie.

In fine, une **méthodologie novatrice** est proposée, qui exprime les potentialités énergétiques selon des critères réalistes, tant du point de vue technique que du point de vue économique. Le plan d'ossature des réseaux d'eaux usées et unitaires a d'abord été tracé sous SIG, puis les points de mesure ont été étudiés afin de faire ressortir les conduites ayant un **débit supérieur à 18 m³/h, soit 5 l/s**, en moyenne nocturne par temps sec. Ce seuil est considéré comme représentatif de l'exploitabilité de la ressource pour produire de l'énergie thermique.

4.10.2. Collecte des données et informations

Afin de recueillir l'ensemble des données nécessaires pour cartographier et caractériser la ressource thermique disponible dans les réseaux d'eaux usées, les 21 communes de Clermont Communauté, les différents syndicats intercommunaux d'assainissement et la Direction de l'Eau et de l'Assainissement de Clermont-Ferrand ont été sollicités lors d'entretiens téléphoniques ou de rendez-vous. Majoritairement, les données et informations utiles se retrouvent dans les schémas directeurs d'assainissement des communes qui, périodiquement, établissent un diagnostic des réseaux d'assainissement afin de vérifier l'adéquation avec les aptitudes des stations d'épuration dont le fonctionnement est basé sur la charge polluante. Par ailleurs, ont été utilisés les points de mesure et les informations qui résultent d'un travail ponctuel effectué il y a quelques années par un cabinet spécialisé (SAFEGE) pour diagnostiquer l'état des réseaux sur l'ensemble du territoire de Clermont Communauté.

Outre la localisation des différents éléments (canalisations, stations d'épuration, points de mesure ...), ont particulièrement été recherchées les courbes de débit en fonction du temps par temps sec, le pourcentage d'eau claire parasite permanente (ECP) dans les eaux usées et le type de réseaux : unitaire (contenant l'eau usée et pluviale), séparatif (eau usée ou pluviale).

Il s'agit donc de qualifier le débit minimum dans les conduites en notant qu'en pleine nuit, la production d'eaux usées par les ménages et les activités sera à son minima. Ainsi, l'exemple ci-après (Illustration 44), montre qu'à la sortie de la ville de Cébazat le débit moyen nocturne est de 150 m³/h. Or, il est composé pour seulement 30 m³/h d'eaux usées environ, ce qui indique une contribution d'environ 120 m³/h d'eaux claires parasites permanentes qui sont dues à des infiltrations d'eau pouvant provenir du ruissèlement, de cours d'eau canalisés ou des nappes. Peuvent éventuellement être également en cause des imperfections sur les réseaux (cassures, fissures, effondrements, etc.).

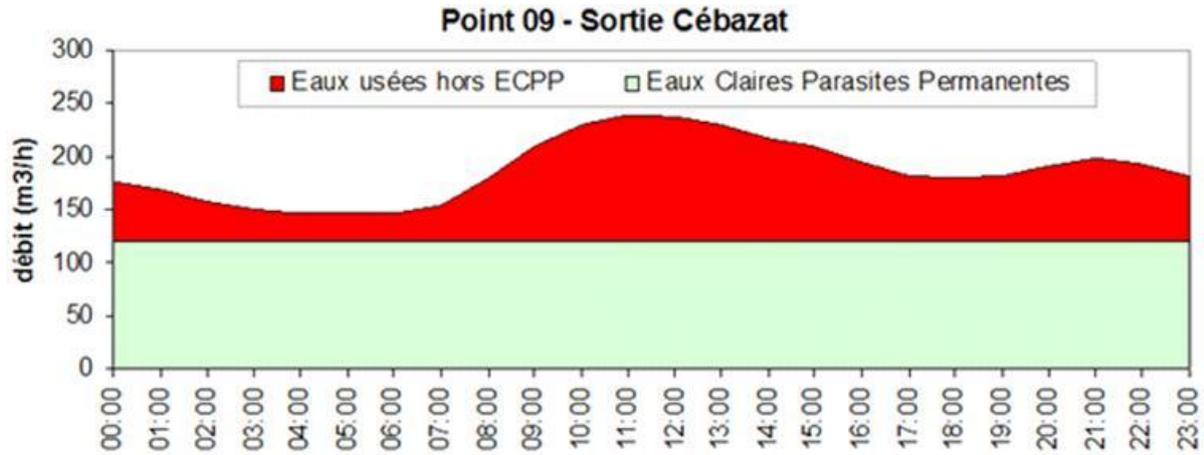


Illustration 44 : Courbe de débit d'un point de mesure sur le réseau d'eaux usées à Cébazat (source : SAFEGE, 2009)

4.10.3. Représentation pratique des potentialités thermiques des réseaux

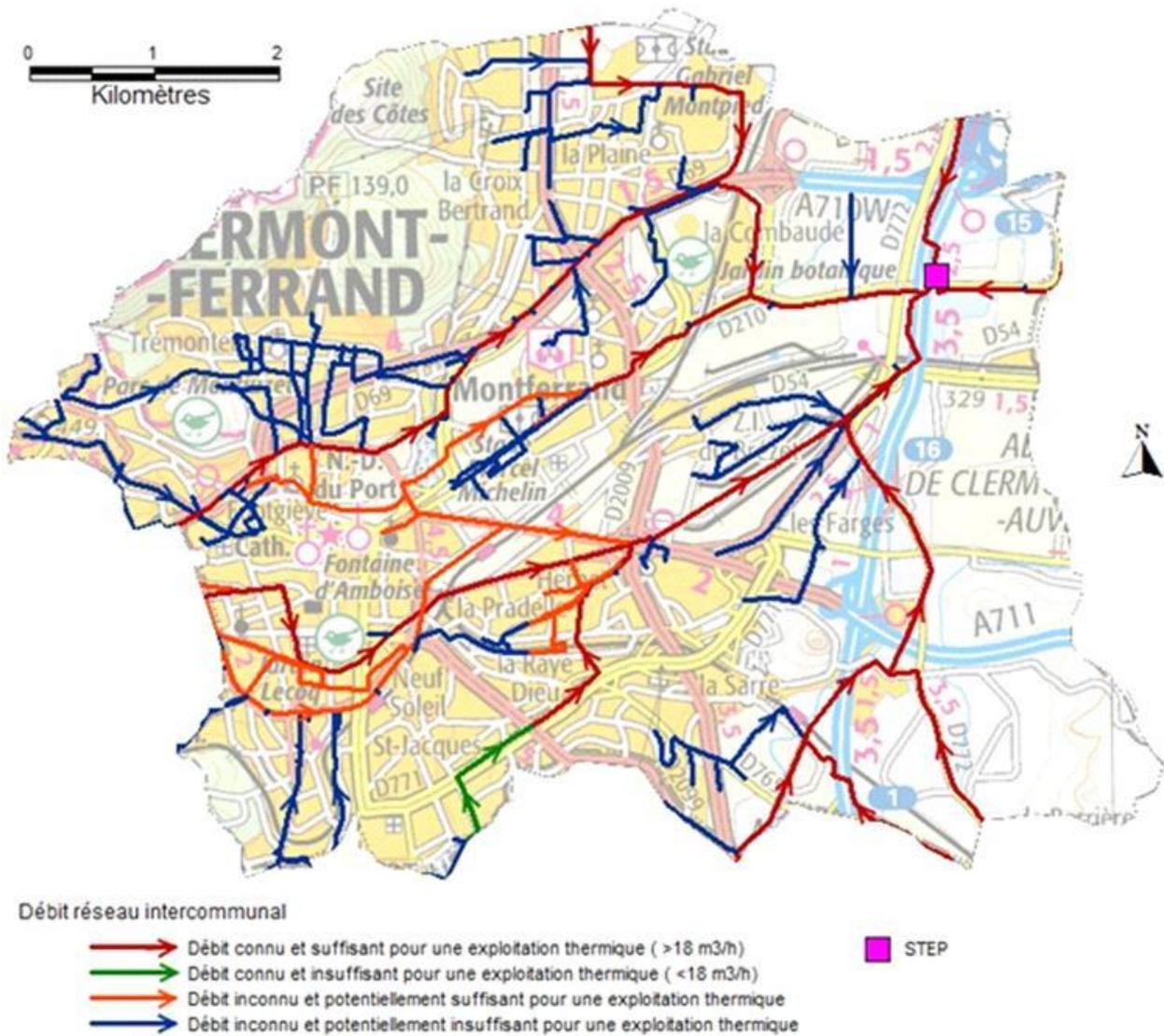


Illustration 45 : Cartographie des ressources en eaux usées à Clermont-Ferrand

Comme le montre l'exemple de la commune de Clermont-Ferrand ci-avant (Illustration 45), même si les données détaillées ne sont pas disponibles, il est toutefois possible de caractériser les secteurs où l'énergie contenue dans les réseaux est probablement insuffisante, notamment en estimant les productions d'eaux usées (débit moyen nocturne de 00h à 06h) en fonction du nombre d'habitants raccordés et des débits constatés aux nœuds de raccordement.

La compilation des données issues des différents points de mesure a permis d'établir un synoptique des réseaux d'eaux usées de Clermont Communauté (Illustration 47) qui met en évidence les grandeurs essentielles et a permis de placer les nœuds en aval desquels les débits sont suffisants selon le critère de 5 l/s évoqué ci-avant (soit 18 m³/h) pour pouvoir exploiter la ressource énergétique. Il a notamment été constaté que les débits favorables à une exploitation thermique sont essentiellement localisés dans les branches communautaires du maillage (Illustration 46). Toutefois, certains secteurs du réseau ayant été rénovés depuis le diagnostic, une actualisation des informations pourrait être à prendre en considération.

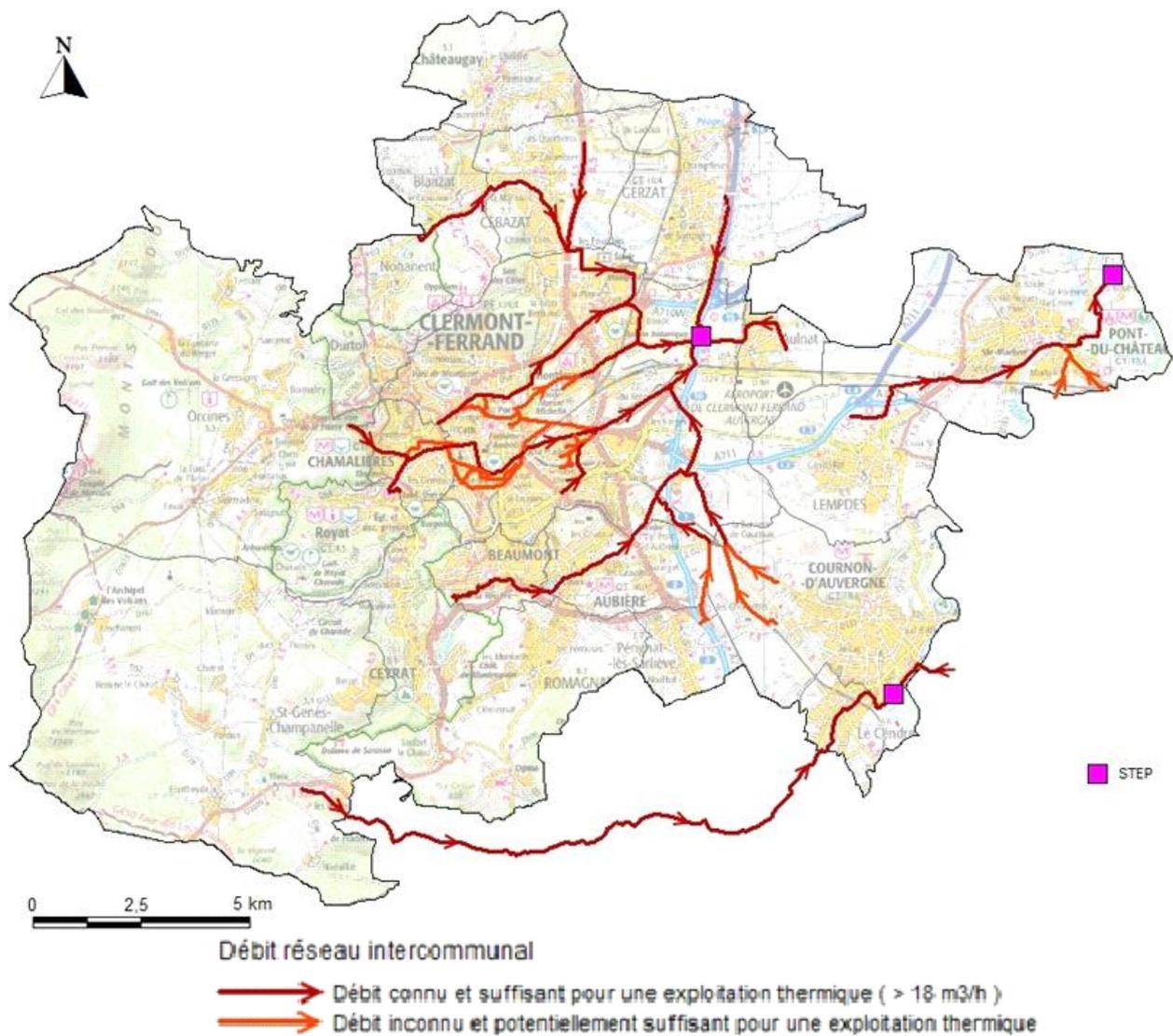


Illustration 46 : Cartographie des ressources utiles en eaux usées de Clermont Communauté

Les données disponibles et/ou exploitables ont donc permis d'atteindre le niveau d'esquisse requis pour la présente étude. Le niveau de détail à l'échelle d'une éventuelle opération peut toutefois ne pas être atteint. Aussi, si l'hypothèse d'exploiter l'énergie des eaux usées était

confirmée, des investigations complémentaires seront nécessaires. Ce point est discuté au chapitre 6.6 relatif aux "techniques pour exploiter l'énergie des eaux usées".

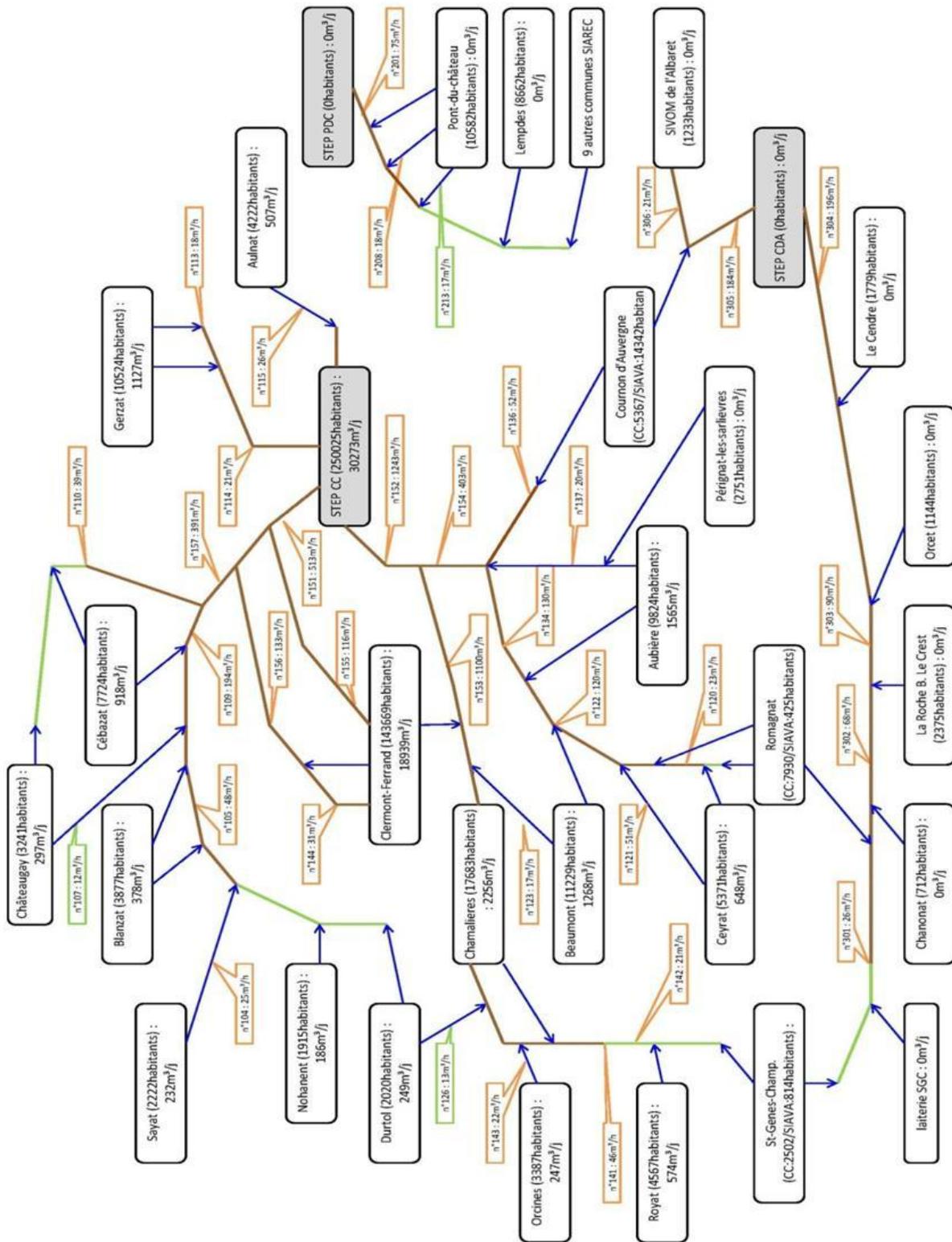


Illustration 47 : Synoptique du réseau d'eaux usées et localisation des débits remarquables

4.10.4. Expression des potentialités thermiques pour les eaux usées

L'expression des "potentialités thermiques" de l'eau circulant dans les égouts s'apprécie au regard des quantités d'énergie récupérables mais aussi au regard des quantités d'énergie en jeu dans le cycle de l'eau chaude sanitaire. Aussi, les grandeurs indicatives qui suivent illustrent les "valeurs moyennes" qui peuvent être calculées pour caractériser l'énergie thermique récupérable dans les eaux grises et/ou noires rejetées à l'égout par les ménages.

Equivalent Habitant (EH)

Un Equivalent-Habitant (EH) correspond à 60 g de DBO5 par jour (demande biochimique d'oxygène mesurée au bout de cinq jours). L'EH représente donc la pollution quotidienne d'une personne. En France, un habitant consomme en moyenne 150 litres d'eau potable chaque jour (150 kg/jour.EH). Ici, il est fait l'hypothèse que l'intégralité de cette consommation d'eau potable est rejetée à l'égout.

Energie utilisée pour produire l'ECS

Pour un appartement de 70 m² habité par 2 EH, la consommation énergétique moyenne, selon les données indicatives de la RT-2012, représente de l'ordre de 26 kWh/m².an pour la production d'ECS (eau chaude sanitaire), soit 1 820 kWh/an ce qui, ramené à 1 EH, permet d'obtenir : **910 kWh/an.EH**.

Energie théorique contenue dans les eaux usées

Sachant que la chaleur spécifique de l'eau est de 4,18 kJ/kg/°C et que 1 kWh = 3600 kJ, l'énergie thermique disponible suite à un usage, représentant un rejet, de 150 l/jour.EH est donc de l'ordre de **63.6 kWh/an.EH pour chaque °C**. Cette énergie peut être prélevée ou injectée dans les eaux des égouts, selon que l'usage est, respectivement pour du (ré)chauffage (via une PAC) ou pour du rafraîchissement.

La température constatée des effluents urbains se situant entre 12 et 20 °C, et afin d'éviter toute incidence sur le fonctionnement de la station d'épuration en aval, on va pouvoir échanger l'énergie qui correspond à un abaissement ou à une élévation de 2 à 3°C de la température des eaux usées qui circulent dans le réseau.

Donc, pour un **ΔT de 2 °C**, on pourrait théoriquement récupérer environ 125 à 130 kWh/an **soit l'équivalent de 14 %** de l'énergie qui a été utilisée par les ménages pour produire l'ECS. Or, en analysant la documentation des promoteurs de la technologie, l'énergie réellement captée ressort avec **un taux de récupération de l'ordre de 10 % ou moins**.

Puissance thermique disponible dans les eaux usées

Si l'on considère que le débit minimum dans le réseau doit être, selon les professionnels, d'au moins 10 l/s pour être exploité thermiquement et économiquement, cela sous-entend que la population en amont d'une exploitation thermique des eaux usées doit, à raison de 150 l/jour/EH, être d'au moins 5.760 EH, cette valeur étant calculée sans tenir compte des minima nocturnes.

Par voie de conséquence, pour $\Delta T = 2$ °C et un débit $Q = 10$ l/s, la puissance thermique échangée correspondante sera de **83,6 kW** (=10 l/s x 2 °C x 4.18).

En pré-dimensionnement, on pourra convenir que :

- la puissance thermique disponible dans les eaux usées rejetées par les ménages dans les égouts est de **100 kW pour 6 000 EH en amont** ;
- **le taux de récupération de l'énergie est de 10 % de l'énergie rejetée**, ce qui signifie que 6 000 EH sont nécessaires en amont pour chauffer l'ECS de 600 EH.

Comparaison avec les solutions géothermiques

Pour comparaison, en géothermie sur aquifère superficiel raccordé à du petit collectif, les paramètres de fonctionnement sont les suivants :

- le débit de production typique d'eau géothermale est de l'ordre de 15 m³/h (4,17 l/s) ;
- la température de l'aquifère est d'environ 10 à 12 °C et celle de l'eau rejetée ne doit pas être inférieure à 4 à 6 °C, ce qui correspond au point de fonctionnement évitant tout risque de gel dans la machinerie thermodynamique ;
- en moyenne, ΔT est de l'ordre de 6 °C entre la production et la réinjection ;
- avec les conditions ci-avant, la puissance thermique exploitée est de l'ordre de **104 kW**.

On notera que cette puissance thermique d'une centaine de kilowatts correspond à la puissance nominale de 20 à 25 sondes géothermiques.

Cette puissance thermique (100 kW) est du même ordre de grandeur que celle disponible dans les eaux usées rejetées à l'égout par 6 000 EH.

4.10.5. Potentialité des eaux claires parasites dans les égouts

On observant les données de Clermont Communauté, il a été constaté que de nombreuses conduites avaient un débit nocturne témoignant d'un écoulement d'ECPP (eaux claires parasites permanentes). Par définition, ce débit peut être exploité à des fins thermiques.

Toutefois, contrairement aux eaux des aquifères, le ΔT exploitable est notoirement inférieur en raison de la nécessité de ne pas perturber le fonctionnement de la station d'épuration. Ainsi, pour des applications de chauffage, les promoteurs de la technologie indique un ΔT d'exploitation compris entre 2 °C et 4 °C.

La puissance thermique disponible dans les ECPP s'exprime alors de la même façon que pour les eaux usées rejetées à l'égout, ce qui donne :

- pour $\Delta T = 2$ °C et un débit $Q = 10$ l/s, la puissance thermique disponible est égale à **83,6 kW** (=10 l/s x 2°C x 4.18) ;
- pour $\Delta T = 4$ °C et un débit $Q = 10$ l/s, la puissance thermique disponible est égale à **167 kW** (= 10 l/s x 4 °C x 4.18).

Si on reprend l'exemple ci-avant (Illustration 44) au point 09 du réseau communautaire en sortie de Cébazat (Illustration 48), on dispose d'un débit d'ECPP de 120 m³/h, soit 33.3 l/s.

On peut donc calculer que, pour un ΔT de 2 °C, la puissance thermique disponible dans les ECPP serait donc de l'ordre de 279 kW.

En ce point, en additionnant le débit nocturne d'eaux usées, on dispose de 150 m³/h au total, soit une puissance thermique disponible d'environ 350 kW.

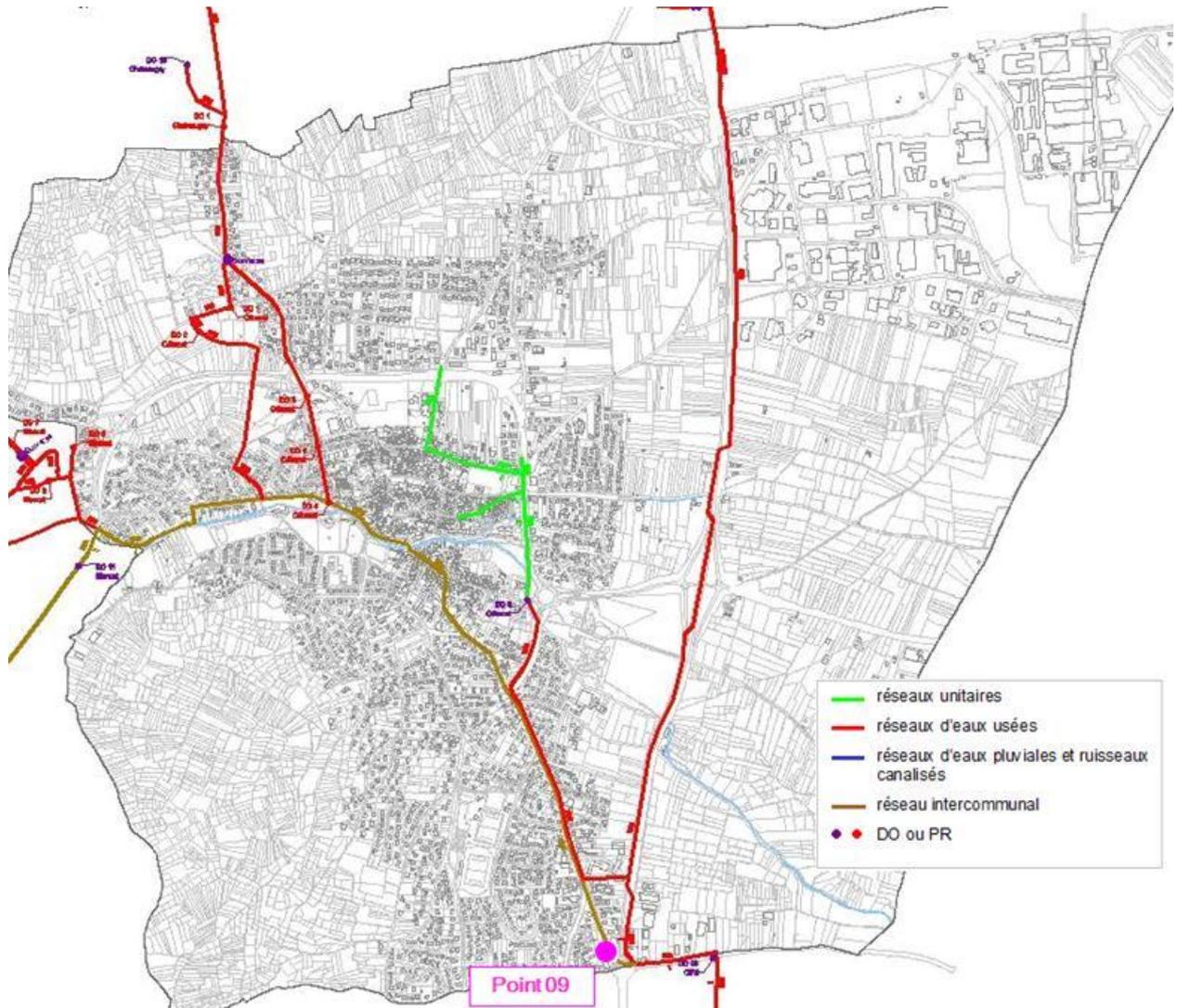


Illustration 48 : Localisation du point 09 du réseau communal d'eaux usées en sortie de Cébazat (source : SAFEGE)

5. Expression des besoins thermiques des bâtiments

5.1. PRESENTATION DE LA DEMARCHE ET OBJECTIF

Important : Toutes les méthodologies présentées dans ce chapitre ont été développées dans l'objectif d'être **automatisables** et **transposables** à d'autres territoires.

Dans une démarche de gestion territoriale, il est nécessaire de connaître le besoin thermique avec un niveau de détail approprié. Pour cela, il faut être capable d'appréhender diverses considérations, en particulier :

- décomposition spatiale aussi fine que possible, si possible à l'échelle de chaque bâtiment et/ou de chaque parcelle ;
- expression des besoins à partir des informations réelles plutôt que statistiques ;
- distinction des différentes classes d'usagers ;
- préservation de la capacité d'intégrer les besoins futurs.

Ce dernier point impose que la méthodologie permette de prévoir des possibilités d'actualisation, soit lorsque des connaissances sont affinées, soit lorsque de nouveaux programmes d'aménagement viennent modifier le paysage bâti.

Aussi, dans la présente étude, des développements ont été menés pour rechercher comment automatiser les processus d'expression et de restitution des besoins thermiques. On notera que, si cette recherche a été focalisée sur l'implantation de solutions géothermiques, une application des processus méthodologiques à d'autres thématiques reste tout à fait envisageable.

Dans la pratique, la finalité a été de répondre à la question de savoir comment croiser les besoins thermiques du tissu bâti avec les ressources géothermiques disponibles. Pour cela, il a été décidé de respecter le formalisme des dernières générations de réglementations thermiques s'appliquant aux bâtiments et qui expriment les besoins thermiques en kWh/m².an.

Ainsi, pour être cohérent avec cette présentation, toutes les grandeurs thermiques sont donc ramenées à l'unité de surface. Ces grandeurs sont essentiellement :

- la quantité d'énergie échangée / consommée sur une période donnée, par exemple en kWh/m².an. Sont plus particulièrement concernées : l'énergie utile (besoin en chauffage, en ECS ...), l'énergie géothermique (part de l'énergie utile qui provient de la ressource géothermique) et l'énergie électrique (part de l'énergie utile qui provient du réseau électrique pour le compresseur de la pompe à chaleur et pour la circulation de l'eau) ;
- la puissance thermique installée, par exemple en W/m² pour les surfaces chauffées. Cette même formulation a été appliquée à la géothermie pour exprimer la puissance disponible, appelée ou installée. Elle peut alors être soit rattachée à l'unité de surface du bâti ou à l'unité de surface au sol dont peut disposer le bâti en question, cette seconde option étant la plus logique à l'échelle territoriale.

Pour cette étude, il a donc notamment été nécessaire de mettre au point des méthodes pour ramener à l'unité de surface au sol des grandeurs thermiques qui sont disponibles ou s'estiment à l'échelle d'un bâtiment. Le processus se décompose en deux grandes étapes :

1. exprimer les besoins thermiques de chaque bâtiment ;
2. ramener les besoins thermiques de ces bâtiments à l'unité de surface au sol.

De la même manière, les grandeurs géothermiques seront également ramenées à l'unité de surface au sol.

5.2. DISCUSSION

5.2.1. Observations

A l'échelle d'un territoire aussi étendu que Clermont Communauté, l'essentiel des données disponibles provient des banques de données.

Pour cette étude, le choix des banques de données utilisées a été dicté par la volonté de **rester au plus près des données brutes** et d'utiliser des données qui peuvent être disponibles pour tous les secteurs, et ce dans la perspective de pouvoir décliner les démarches méthodologiques sur d'autres territoires.

- Pour les données relatives au bâti, ces banques de données, présentées plus avant dans ce document, sont donc essentiellement la BD-TOPO et la BD-Parcellaire de l'IGN et la base MAJIC de la DGI. En complément, par exemple pour procéder à des découpages ou assemblages, la banque de données IRIS de l'INSEE peut être utilisée.
- Pour les données relatives au sous-sol, donc à la géothermie, les banques de données proviennent du catalogue du BRGM (géologie, hydrogéologie, BSS ...).

Toutes ces banques sont disponibles en version numérique et sont géo-référencées, des écarts pouvant toutefois être constatés sur la précision de la localisation.

5.2.2. Difficultés identifiées

A partir des banques ci-avant, il est possible de produire, à différentes échelles, des croisements des besoins thermiques du bâti et des potentialités géothermiques. Toutefois, sont propagés les limites et défauts de ces banques de données, à savoir :

Pour le bâti :

- des besoins thermiques obtenus par estimation, ce qui toutefois rend homogène la méthode mise en œuvre **automatiquement** sur l'ensemble du territoire traité ;
- des bâtiments pas ou peu renseignés, ce qui, pour ces bâtiments en nombre restreint, conduit à employer une méthode alternative à celle ci-dessus.

Pour le sous-sol :

- des zones où la réalisation d'un forage peut devenir proscrite avec l'évolution des connaissances et ou de la réglementation, comme c'est par exemple le cas des cavités qui sont parfois méconnues sous les secteurs urbanisés ;
- des secteurs, surtout en milieu urbanisé, ne disposant pas de modèle hydrogéologique ni d'interprétation pertinente d'ouvrages existants, ce qui peut conduire à des incertitudes sur les potentialités des ressources sur aquifères et/ou sur échangeurs géothermiques verticaux.

5.2.3. Suggestions / recommandations

Pour remédier aux difficultés induites par les limites des banques de données qui permettent d'estimer **automatiquement** la demande thermique du bâti, les informations ont été combinées selon la stratégie suivante :

1. dans la mesure du possible, les données issues de la base MAJIC sont utilisées en priorité.

2. pour les bâtiments identifiés mais pour lesquels la base MAJIC est inopérante (bâtiments non soumis à l'impôt), la BD-TOPO est employée pour estimer les demandes thermiques.

5.3. EXPRESSION DES BESOINS THERMIQUES D'UN BATIMENT

5.3.1. Présentation du processus méthodologique

Les besoins thermiques sont estimés bâtiment par bâtiment.

1. Lorsque la base MAJIC renseigne le bâtiment (assujettissement à l'impôt), les informations de cette base sont employées pour déterminer les surfaces à chauffer puis, en fonction de l'année d'achèvement et de l'usage, estimer la demande thermique.
2. Le positionnement exact de chaque bâtiment de la base MAJIC est recalé avec la BD-Parcellaire et/ou le PCI vectorisé. Sur le principe, cette opération n'est pas indispensable car la précision est généralement suffisante, sauf peut-être pour les très grandes propriétés ou l'habitat collectif sur de grandes parcelles. Par contre, l'identifiant cadastral étant erroné pour environ 10 % des cas, ce traitement de réconciliation a été utile, notamment pour identifier les bâtiments présents dans la BD-TOPO qui ne le sont pas dans la base MAJIC.
3. Pour les bâtiments non renseignés dans la base MAJIC, la BD-TOPO est employée pour produire une estimation qui repose non pas sur la somme des surfaces à chauffer mais sur le seul volume de la construction affecté à un des trois usages référencés : indifférencié, remarquable ou industriel.

5.3.2. Bases de données localisant les surfaces à chauffer / rafraîchir

BASE MAJIC II

La base MAJIC II (ou III) de la DGI est une base de données à vocation fiscale (taxe foncière, taxe d'habitation) constituée de 5 composantes principales :

- Avec une mise à jour annuelle :
 - propriétaires d'immeubles (FP) ;
 - propriétés bâties (FPB) ;
 - C'est essentiellement ce fichier qui est employé. Il renseigne : le type de local (maison, appartement, dépendances, local commercial ou industriel), la nature d'occupation (propriétaire, location, vacant...) et le descriptif de la partie principale (surfaces, équipements, date d'achèvement,...).
 - propriétés non bâties (FBNP) ;
 - propriétés divisées en lots ;
- Avec une mise à jour mensuelle :
 - annuaire topographique initialisé réduit (FANTOIR).

La première limite de la base MAJIC (version II pour les données qui nous ont été transmises sous couvert de Clermont Communauté) provient du géo-référencement des locaux qui sont localisés au barycentre de la parcelle, localisation qui n'est pas nécessairement celle du bâtiment (Illustration 49). A noter également que l'identifiant cadastral (commune, section, N° de parcelle) s'est révélé "sans correspondance" pour près de 10 % des bâtiments. Un traitement de recollement, utilisant les bases de l'IGN, a donc été nécessaire.



Illustration 49 : Géo-référencement dans la base MAJIC

Les autres limites de la base MAJIC II, à laquelle cette étude a pu accéder, se situent au niveau des propriétés publiques et autres bâtiments non soumis aux taxes. Dans ce cas, aucune information n'est disponible. Pour tous les bâtiments renseignés dans la base MAJIC, on peut extraire automatiquement :

- la surface projetée au sol (périmètre de la projection au sol) ;
- la localisation (du barycentre de la parcelle) ;
- les surfaces utilisées, donc chauffées et/ou refroidies ;
- l'année d'achèvement des travaux qui témoigne de la performance thermique ;
- l'usage du local (maison, appartement, dépendances, local commercial ou industriel).

BD-TOPO

La BD-TOPO® est un produit de l'Institut Géographique National (IGN). Elle contient une description vectorielle (précision métrique) en 3D des éléments du territoire et de ses infrastructures. Les bâtiments existants sont connus par leur surface projetée au sol et l'altitude des gouttières. Les données utilisables pour estimer les besoins thermiques des bâtiments sont donc la surface globale (SB) et la hauteur (HB) à l'égout (altitude des gouttières). Tous les bâtiments existants de plus de 50 m² sont représentés et certains de plus de 20 m². Sont donc indisponibles: les bâtiments les plus récents et les petits bâtiments de moins de 20 m².

Pour tous les bâtiments renseignés dans la BD-TOPO, on peut extraire automatiquement :

- la surface au sol et la localisation (périmètre de la projection au sol) ;
- la hauteur des gouttières, c'est-à-dire du périmètre projeté au sol ;
- la typologie du bâti en trois classes :
 - **bâti indifférencié** (habitation, bureau, enseignement, santé ...) ;
 - **bâti remarquable** (administration, religieux, sportif, transport ...) ;
 - **bâti industriel** (industriel, commercial ou agricole).

Les limites de la BD-TOPO concernent l'absence de renseignements relatifs à son année d'achèvement et aux surfaces utilisables. Dans cette étude, la BD-TOPO est essentiellement employée pour estimer les surfaces utilisables pour les bâtiments non renseignés dans la base MAJIC, à savoir essentiellement des bâtiments publics. Pour estimer les surfaces utilisées dans un bâtiment public non soumis aux taxes, on peut appliquer la méthode suivante :

- pour tous les bâtiments dont la hauteur est inférieure à 4 ou 5 m, on considérera qu'il ne sont composés que d'un unique niveau dont la surface sera égale à la surface au sol ;
- pour les autres bâtiments, on comptabilisera un niveau supplémentaire par tranche de hauteur de 2.5 m à 3.0 m au-dessus de 4 à 5 m (rez-de-chaussée). La surface utilisée, donc chauffée et/ou refroidie, est la somme de tous les niveaux.

BD-PARCELLAIRE de l'IGN et PCI vectorisé de la DGI

La BD-PARCELLAIRE® fournit l'information cadastrale numérique, géoréférencée et continue sur l'ensemble du territoire français. Elle est réalisée à partir de l'assemblage du plan cadastral dématérialisé. Elle permet de fiabiliser le lien entre la BD-TOPO et la base MAJIC II de la DGI, les méthodes de projection n'étant nécessairement pas harmonisées.

Le plan cadastral informatisé (PCI) est issu de données traitées en partenariat avec la DGFIP (Direction Générale des Finances Publiques). En Auvergne, ce traitement a été effectué par le CRAIG (Centre Régional Auvergnat de l'Information Géographique).

Base IRIS de l'INSEE

La base IRIS (Ilots Regroupés pour l'Information Statistique) est tournée vers la politique de la ville. Néanmoins, elle propose, pour le territoire, une décomposition communale et infracommunale fait référence à une taille visée de l'ordre de 2 000 habitants par polygone élémentaire (IRIS), chacun d'entre eux étant subdivisé en îlots. En fait, on distingue trois types d'IRIS :

- les IRIS d'habitat : leur population se situe en général entre 1 800 et 5 000 habitants. Ils sont homogènes quant au type d'habitat et leurs limites s'appuient sur les grandes coupures du tissu urbain (voies principales, voies ferrées, cours d'eau...) ;
- les IRIS d'activité : ils regroupent plus de 1 000 salariés et comptent au moins deux fois plus d'emplois salariés que de population résidente ;
- les IRIS divers : il s'agit de grandes zones spécifiques peu habitées et ayant une superficie importante (parcs de loisirs, zones portuaires, forêts...).

Parmi les communes de Clermont Communauté, le tableau ci-dessous liste celles qui font l'objet d'une subdivision en IRIS :

63014-Aubière	6 IRIS
63032-Beaumont	5 IRIS
63075-Chamalières	8 IRIS
63113-Clermont-Ferrand	42 IRIS en 25 grands quartiers
63124-Cournon-d'Auvergne	8 IRIS

Nota : Ces subdivisions IRIS n'ont pas été utilisées pour la présente étude car elles coïncident assez peu avec les propriétés thermiques du bâti.

Étude de la DREAL Auvergne

Croisant différentes sources d'information, la DREAL Auvergne a étudié « le potentiel d'économies d'énergie » des bâtiments résidentiels et tertiaires" sur le territoire de Clermont Communauté.

Cette étude est utilisée dans le présent document essentiellement pour produire les ratios de consommation thermique à affecter aux bâtiments non renseignés dans la base MAJIC et dont les surfaces au sol et volumes d'enveloppe sont obtenus via la BD-TOPO et la BD-PARCELLAIRE.

Les ratios de consommations déduits de l'étude DREAL sont synthétisés dans le tableau ci-après (Illustration 50), ces valeurs ayant été calculées en sommant toutes les consommations pour le chauffage (et l'ECS) et en les rapportant aux surfaces tertiaires totales concernées telles qu'estimées par la DREAL.

Consommations spécifiques (kWh/m ² .an)	Valeurs déduites de l'étude DREAL
Bureaux	176
CAHORE (Cafés-Hôtels-Restaurants)	188
Commerces	182
Enseignement	182
Habitat communautaire	176
Santé Social	185
Sport Loisir Culture	194
Locaux de transport	183
Ensemble des locaux	181

Illustration 50 : Consommations spécifiques pour les locaux autres que les logements selon les données de la DREAL Auvergne

Les ratios indiqués dans le tableau ci-dessus sont assez peu différenciés et une valeur égale à **181 kWh/m².an** représente la valeur moyenne globale qu'il est proposé d'affecter aux bâtiments non renseignés dans la base MAJIC, à savoir, majoritairement, pour les branches suivantes : bureaux, enseignement, santé / social, sport / loisir / culture.

5.3.3. Calcul des besoins thermiques en fonction de l'année d'achèvement

Expression des besoins thermiques

Ce calcul ne peut être effectué que si l'année d'achèvement est connue, ce qui est généralement le cas si le bâtiment est référencé dans la base MAJIC.

Dans la présente étude, seuls les besoins thermiques relatifs au chauffage des locaux et à l'ECS sont pris en considération. En conformité avec les estimations de la DREAL sur le secteur géographique, il est possible de procéder à une estimation moyenne des demandes énergétiques en fonction de l'année d'achèvement, en distinguant les besoins pour le chauffage, et pour l'ECS qui n'est à prendre en considération que pour les habitations.

Année d'achèvement du bâtiment	Besoins thermiques		
	ECS kWh _{EF} /an.m ²	Chauffage kWh _{EF} /an.m ²	Total chaud kWh _{EF} /an.m ²
après 2012	26	6	32
2000-2012	26	28	54
1989-2000	26	58	84
1974-1989	26	94	120
1949-1974	26	152	178
avant 1949	26	210	236

Illustration 51 : Demandes thermiques (chauffage + ECS) en fonction de l'année d'achèvement

Nota : En principe, selon les réglementations thermiques, les besoins en chauffage sur le territoire de Clermont Communauté devraient être modulés par l'altitude, la température en atmosphère standard variant d'approximativement 2 °C par tranche de 300 m. Cependant, pour la présente étude, il semble préférable de ne pas faire intervenir ce paramètre car d'autres

paramètres comme les apports solaires et le vent ont des influences au moins équivalentes mais ne peuvent pas être appréciés.

Applications aux pompes à chaleur géothermiques

Dans la mesure où les techniques géothermiques en très basse énergie requièrent une pompe à chaleur géothermique (PACg), il est judicieux de quantifier la part de cette énergie consommée sur le réseau électrique pour faire fonctionner le compresseur et les utilités de la PACg, et de quantifier la part d'énergie qui proviendra du sous-sol (**énergie géothermique**).

Par convention, les PAC fonctionnant selon d'autres techniques que les PAC à compresseur électrique n'ont pas été considérées car elles sont encore très rares à ce jour. De même, pour simplifier la lecture et les conversions, il est convenu dans le présent document de représenter les PACg par une pompe à chaleur dont le COP machine est égal à 4 (coefficient de performance), les consommations des utilités n'étant pas détaillées.

Demandes énergétiques - Cas du COP machine de la PACg égal à 4					
Année d'achèvement	ECS kWh_{EF}/an.m²	Chauffage kWh_{EF}/an.m²	Total Chaud kWh_{EF}/an.m²	Electricité kWh_{EF}/an.m²	Géothermie kWh_{EF}/an.m²
après 2012	26	6	32	8,0	24,0
2000-2012	26	28	54	13,5	40,5
1989-2000	26	58	84	21,0	63,0
1974-1989	26	94	120	30,0	90,0
1949-1974	26	152	178	44,5	133,5
avant 1949	26	210	236	59,0	177,0

Illustration 52 : Demandes énergétiques des logements en fonction de la date d'achèvement (COP = 4)

Les demandes énergétiques annuelles ci-avant restent relativement indépendantes de la localisation sur le territoire de Clermont Communauté. Il n'en sera pas tout à fait de même pour les puissances géothermiques installées qui sont relativement dépendantes de la météorologie.

Ainsi, pour passer de la demande énergétique annuelle (exprimée en kWh/m².an) à la puissance géothermique installée exprimée en moyenne mensuelle, les hypothèses suivantes ont été appliquées :

- le mois le plus froid de l'année est le mois de janvier : c'est la demande moyenne pour ce mois qui permet de produire un dimensionnement de l'installation géothermique ;
- la répartition des dépenses énergétiques en fonction des mois de l'année a été obtenue au prorata des Degrés Jours Unifiés (DJU) mensuels fournis par MétéoFrance pour l'aéroport de Clermont-Aulnat. Ces données sont reproduites dans le tableau suivant (Illustration 53). On peut par exemple constater que le mois de janvier représentera typiquement 17.91 % de la consommation énergétique pour le chauffage ;
- le temps de fonctionnement de la PACg sera pris égal à 360 heures pour le mois de janvier, soit 50 % du temps ; de ce fait, il est admis que l'installation peut fonctionner sans appoint thermique pendant les périodes les plus froides durant lesquelles la PACg peut fonctionner à 100 % du temps, soit quelques heures par jour tout au plus.

	Température de l'air	Température du sol	DJU chauffage à 18 °C		DJU Climatisation à 10 °C	
	°C	°C	°C-j	%	°C-j	%
Janvier	3.60	0.88	446.4	17.91%	0.0	0.00%
Février	4.40	2.07	380.8	15.28%	0.0	0.00%
Mars	7.60	5.60	322.4	12.93%	0.0	0.00%
Avril	9.90	8.62	243.0	9.75%	0.0	0.00%
Mai	14.10	13.93	120.9	4.85%	127.1	10.11%
Juin	17.80	18.21	6.0	0.24%	234.0	18.62%
Juillet	20.40	20.78	0.0	0.00%	322.4	25.65%
Août	19.90	20.11	0.0	0.00%	306.9	24.42%
Septembre	16.30	15.41	51.0	2.05%	189.0	15.04%
Octobre	12.50	10.80	170.5	6.84%	77.5	6.17%
Novembre	7.00	4.77	330.0	13.24%	0.0	0.00%
décembre	4.40	1.88	421.6	16.91%	0.0	0.00%
	11.54	10.31	2 492.6		1256.9	

Illustration 53 : Paramètres climatiques du secteur de Clermont-Ferrand (données de la station d'Aulnat)

Le processus pour calculer la **puissance utile** (efficace) qu'il faut installer dans un bâtiment ou un logement, est illustré par l'exemple suivant :

- pour un logement ancien dont la demande thermique spécifique pour le chauffage est, par exemple, de 100 kWh/m².an, la demande thermique en janvier sera de 17.91 kWh/m² (100 X 17.91 %) ;
- si on admet que le dispositif thermodynamique (PAC) fonctionne 360 heures, alors sa puissance spécifique (en janvier) sera de 17.91kWh divisée par 360 heures, ce qui donne 0.0497 kW/m² ou 49.74 W/m² ;
- pour la prise en considération de l'ECS, on admettra que cette demande viendra s'additionner à celle du mois de janvier pour le chauffage. Si on reprend le cas précédent, la demande typique pour l'ECS est de 26 kWh/m².an, soit une demande de 2.67 kWh/m² pour le mois de janvier (26 kWh/m².an / 12 mois). En restant sur le principe d'un fonctionnement de 360 heures/mois, alors la puissance installée pour l'ECS sera de 6.02 W/m² ;
- la puissance à installer est donc la somme des puissances pour le chauffage et l'ECS, soit 55.77 W/m².

En ce qui concerne l'ECS, on retiendra pour cette étude que :

- les énergies et puissances spécifiques pour la production de l'ECS sont identiques pour tous les types de logement et invariantes sur toute l'année, soit respectivement 26 kWh/m².an et 6.0 W/m² ;
- en appliquant les hypothèses d'un fonctionnement pendant 50 % du temps en janvier (360 heures) et d'un COP machine égal à 4, on obtient respectivement 4.5 W/m² pour la **puissance géothermique** spécifique et 1.5 W/m² pour la **puissance électrique** spécifique de la PACg, la somme des deux représentant la **puissance utile** spécifique.

En application du processus décrit ci-avant, on obtient le tableau ci-après qui restitue les valeurs des **puissances utiles installées** spécifiques (par m² de bâti) et des **puissances géothermiques** (GTH) et **puissances électriques** correspondantes, étant entendu que les grandeurs spécifiques pour l'ECS (pour les habitations) sont constantes et indépendantes de l'année d'achèvement.

Puissances installées - Cas du COP machine de la PACg égal à 4						
Année d'achèvement	Puissance utile		Puissance géothermique		Puissance électrique	
	Chauffage W/m ²	Chauffage+ECS W/m ²	Chauffage W/m ²	Chauffage+ECS W/m ²	Chauffage W/m ²	Chauffage+ECS W/m ²
après 2012	2.985	9.00	2.24	6.75	0.75	2.25
2000-2012	13.93	19.95	10.45	14.96	3.48	4.99
1989-2000	28.86	34.87	21.64	26.16	7.21	8.72
1974-1989	46.77	52.78	35.07	39.59	11.69	13.20
1949-1974	75.62	81.64	56.72	61.23	18.91	20.41
avant 1949	104.48	110.49	78.36	82.87	26.12	27.62

Illustration 54 : Puissances thermiques et électriques spécifiques en fonction de la date d'achèvement sur le territoire de Clermont Communauté selon les données de la station météo d'Aulnat (COP = 4)

Les données ci-avant illustrent les demandes pour le chauffage et pour l'ECS **sur le territoire de Clermont Communauté** en fonction de l'année d'achèvement des travaux renseignée dans la base MAJIC.

La puissance géothermique spécifique représente la puissance géothermique à installer. Elle a donc été estimée pour le mois le plus froid de l'année (janvier) qui représente une consommation d'énergie de chauffage égale à 17.91 % de la consommation annuelle et en considérant que le temps de fonctionnement moyen de la PACg est égal à 360 heures en janvier. Le graphique ci-dessous représente les grandeurs thermiques en fonction de l'année d'achèvement en distinguant la contribution de l'ECS pour les logements.

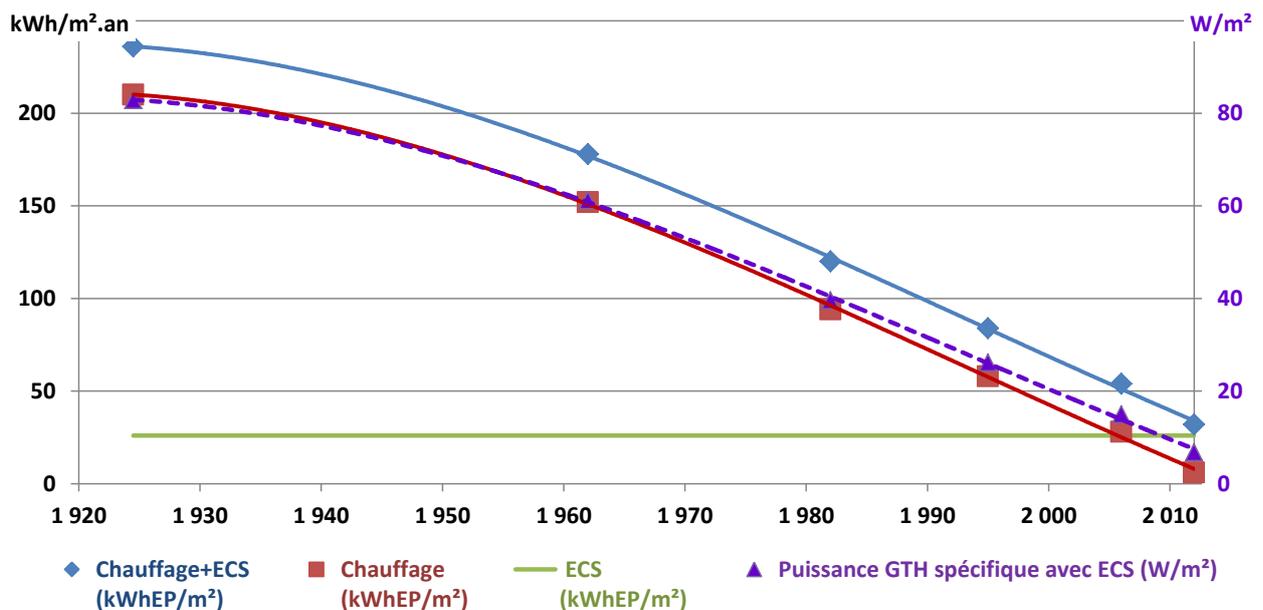


Illustration 55 : Représentation des grandeurs thermiques en fonction de la date d'achèvement (COP = 4)

Approximation des grandeurs thermiques par une régression polynomiale

Important : Les grandeurs thermiques calculées ci-avant sont **globalement représentatives** des bâtiments sur le secteur de Clermont Communauté. Elles sont appliquées dans les calculs d'estimation des propriétés thermiques de tous les bâtiments du territoire dans le but d'un croisement avec les propriétés géothermiques des formations superficielles. En aucun cas elles ne peuvent être employées pour dimensionner une installation réelle.

En observant le graphique qui précède, on peut remarquer qu'il est assez facile de faire passer une courbe d'approximation par les points qui ont été calculés. Physiquement, la difficulté est d'anticiper la réglementation RT 2020 où les demandes thermiques seront très faibles pour le chauffage, voire positives pour certains bâtiments dans des conditions qui restent à définir.

En gardant bien à l'esprit que les représentations simplifiées ci-avant ne sont plus valides au-delà de l'application de la RT 2012, on peut envisager des représentations par un polynôme du 3^{ème} degré pour exprimer les puissances géothermiques spécifiques (puissances installées) en fonction de la date d'achèvement.

L'exemple ci-dessous représente l'approximation par un polynôme du 3^{ème} degré de la puissance géothermique spécifique pour le chauffage en fonction de l'année d'achèvement disponible dans la base MAJIC. La validité est entre les années 1925 et 2012.

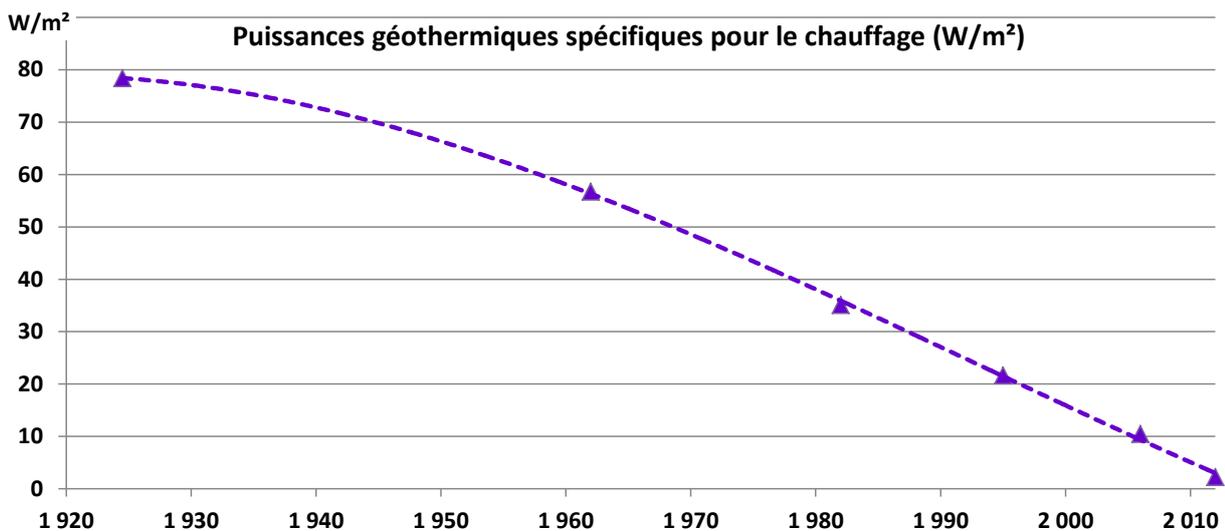


Illustration 56 : Représentation de la puissance géothermique spécifique par un polynôme du 3^{ème} degré

En appliquant ce même principe d'approximation par un polynôme du 3^{ème} degré pour les consommations énergétiques annuelles des bâtiments (Illustration 55), on peut par exemple obtenir l'équation suivante pour l'expression de la demande de chauffage :

$$Y = 1.819E-04X^3 - 1.087E+00X^2 + 2.164E+03X - 1.434E+06 \quad \text{où}$$

Y représente la puissance géothermique spécifique pour le chauffage (W/m²) ;

X représente la date d'achèvement.

En application de cette formule, on peut constater que la valeur de 181 kWh/m².an déduite de l'étude DREAL pour les bâtiments tertiaires (Illustration 50) correspondrait à un bâtiment construit vers 1950. En application de la courbe ci-dessus, la puissance géothermique spécifique à installer serait alors de l'ordre de 65 W/m².

5.3.4. Estimation des demandes thermiques en fonction du volume du bâti

En l'absence de renseignement dans la base MAJIC, il est possible d'estimer la demande thermique du bâtiment à partir de ratios simplifiés qui s'appliquent au volume du bâtiment, lequel peut être connu à partir de la BD-TOPO.

D'une manière générale, ces bâtiments ne sont pas assujettis à l'impôt et il est admis qu'il ne s'agit pas de bâtiments d'habitation. On admettra donc que la demande en ECS de ces bâtiments est nulle.

Deux approches simplifiées **automatisables** sont alors envisageables :

1. **Approche 1** : on estime la somme des surfaces à chauffer et on applique alors le ratio de consommation déduit des données de la DREAL (181 kWh/m².an) ;
Pour cela, il faut faire des hypothèses sur la hauteur des différents plateaux du bâtiment
2. **Approche 2** : on applique directement un calcul estimatif de la consommation d'énergie à partir du volume du bâtiment en appliquant de grands ratios de déperdition. Dans ce cas, on ne peut pas employer le ratio déduit de l'étude de la DREAL Auvergne.

Ces deux approches sont décrites plus en détail dans les paragraphes qui suivent.

Dans le cadre de la présente étude, seraient concernées sur le territoire de Clermont Communauté environ 1 300 parcelles sur un total de 22 392 parcelles où un bâtiment est implanté, le nombre total de parcelles étant de 35 128.

Méthode d'estimation de la somme des plateaux chauffés (approche 1)

Cette méthode applique l'approche 1. Son intérêt est de rester cohérente avec les réglementations thermiques qui expriment les demandes annuelles en kWh/m².an.

La difficulté est qu'il faut estimer le nombre d'étages du bâtiment pour déduire la somme des surfaces chauffées. De plus, contrairement au cas où les données MAJIC sont disponibles, il faudra admettre que l'ensemble du bâtiment répond à un usage unique.

La méthode s'appuie sur les données de la BD-TOPO qui sont géo-référencées. On dispose donc de la surface au sol et de la hauteur des gouttières. On fera donc l'hypothèse que les éventuels volumes sous les combles ne sont pas chauffés.

La méthode se décompose ainsi :

1. on affecte une hauteur de 4 à 5 m au niveau du rez-de-chaussée, cette hypothèse étant valide car la méthode ne sera appliquée qu'à des bâtiments publics ;
2. pour l'écart de hauteur restant entre 4 ou 5 m et l'altitude des gouttières, on estimera le nombre de niveaux en divisant cet écart par une hauteur moyenne entre 2.75 m et 3.0 m ;
3. à chacun de ces niveaux, on affectera alors une surface chauffée égale à la surface du bâtiment projetée au sol ;
4. la consommation énergétique spécifique appliquée pour calculer la demande sera alors prise égale à celle proposée par l'étude de la DREAL Auvergne.

Nota : Cette méthode sera préférée s'il est souhaité de ramener à la surface chauffée les données thermiques relatives au bâti.

Méthode volumique à partir de la température de base (approche 2)

Cette méthode applique l'approche 2. L'intérêt de cette méthode est que l'estimation de la déperdition conduit directement à une estimation de la puissance installée. Ainsi, en première approche, on peut admettre que la puissance installée compense exactement les déperditions thermiques à la température de base. Cette méthode, relativement ancienne, nécessite de faire une hypothèse sur le coefficient global de perte thermique volumique. La valeur estimative de ce coefficient (G en W/m³.K) est déterminée sur la base des indications suivantes :

G en W/m³.K	Indication
0.65	RT 2005
0.75	RT 2000 à compter de 2001 = bien isolé
0.90	assez bien isolé
1.00	moyennement isolé
1.20	mal isolé
1.40	très mal isolé
1.80	très très mal isolé

On déduit ensuite la déperdition de base (à la température extérieure de base) par la formule suivante qui néglige les pertes liées au renouvellement d'air et aux apports gratuits :

$$\text{Déperdition} = G \times \text{surface} \times \text{hauteur} \times (T_{\text{confort}} - T_{\text{ext_base}})$$

- les deux grandeurs 'hauteur' et 'surface' sont disponibles dans la BD-TOPO ;
- la température extérieure de base est disponible dans les fichiers Météo. Pour la station d'Aulnat, la température extérieure de base est égale à 5.60 °C.

Si on prend l'exemple d'un petit pavillon moyennement isolé de 100 m² en un seul niveau de 2.75 m, on obtient pour une température de confort de 18 °C : G = 1.0 W/m³.K. On a alors :

$$\text{déperdition} = 1.0 \times 100 \times 2.75 \times (18 + 5.6) = 6\,490 \text{ W (6.49 kW), soit } 64.9 \text{ W/m}^2.$$

Ce pavillon a une demande thermique spécifique de 64.9 W/m², ce qui correspond typiquement à un pavillon datant de 1972, comme on peut le visualiser sur le graphique ci-dessous.

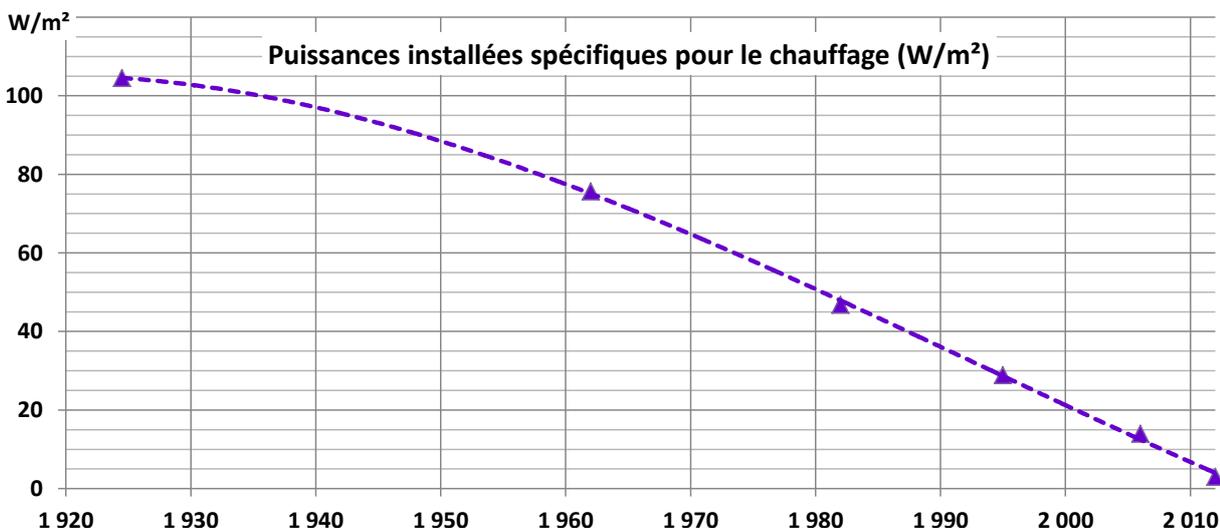


Illustration 57 : Représentation de la puissance installée spécifique en fonction de la date d'achèvement

5.4. METHODE POUR EXPRIMER LES BESOINS THERMIQUES DU TISSU BATI

5.4.1. Présentation des méthodes pour ramener les besoins à l'unité de surface

Dans la pratique, ramener les besoins des bâtiments à l'unité de surface se heurte à la difficulté de sélectionner la surface représentative. S'agit-il de la surface au sol du bâtiment, de la surface de la parcelle, de la surface de l'îlot ou de tout autre surface ?

Usuellement, les aménageurs ont tendance à délimiter "manuellement" des périmètres et à affecter les diverses grandeurs à ce périmètre. Par exemple, on peut considérer une valeur "moyenne" de l'année de construction des bâtiments à l'échelle d'un îlot ou d'un quartier. Cette méthode est ici dénommée "**méthode des polygones**", le polygone étant l'ensemble des segments qui délimitent la surface de l'îlot ou du quartier en question.

Lorsque des calculs sont à effectuer à de grandes échelles de surface, la tendance est de décomposer le territoire en mailles carrées régulières, typiquement de 250 m ou 500 m de côté en géologie. Une telle approche est dénommée "**méthode des mailles**". Comme on le verra plus loin, le présent projet a opté pour des mailles très fines de 25 m de côté.

La mise en œuvre de ces deux méthodes (Illustration 58) est décrite dans les paragraphes qui suivent.

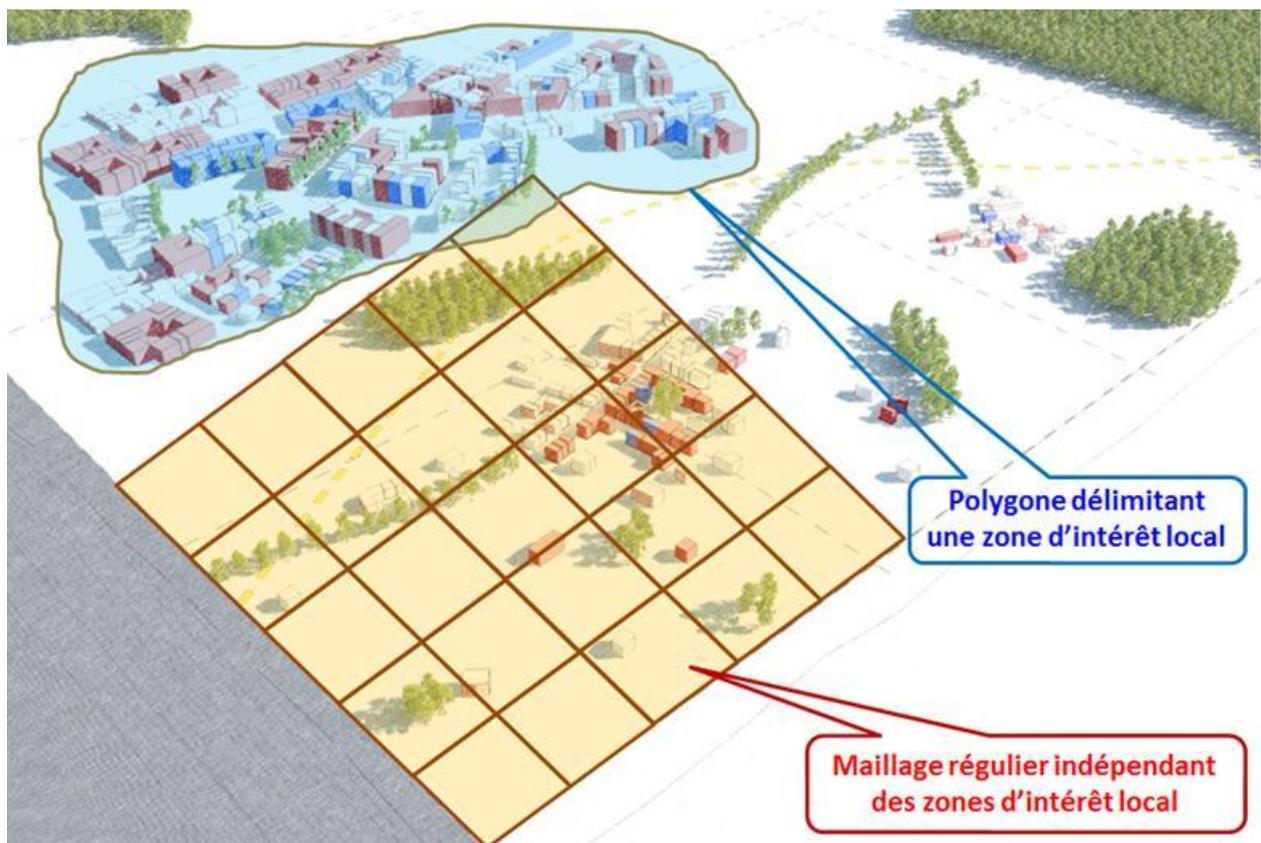


Illustration 58 : Visulation des méthodes des polygones et des mailles

5.4.2. Approche par la méthode des polygones

Présentation

La méthode des polygones est une méthode relativement classique qui nécessite usuellement l'intervention d'un opérateur pour délimiter des périmètres (polygones). Ces périmètres peuvent être des quartiers, des îlots IRIS, des secteurs, ou toute autre représentation géographique, du moment qu'un critère logique préside à cette délimitation.

Dans le cadre de la présente étude, les délimitations sont liées au mode de consommation d'énergie thermique, le critère devant être la recherche de l'homogénéité des formes de demande thermique à l'intérieur d'un même polygone (période de construction par exemple).

La demande thermique cumulée dans le polygone sera ensuite répartie de manière homogène sur l'ensemble de la surface du polygone. Ainsi, on exprimera par exemple : la quantité d'énergie annuelle spécifique en kWh/m².an ou la puissance installée en kW/m².

Sur le principe, la méthode des polygones peut parfaitement s'appliquer à la surface au sol d'un bâtiment ou à la surface de la parcelle où est implanté ce bâtiment. En ce sens, elle est automatisable dans la limite des possibilités offertes par les banques de données (BD-TOPO, BD-Parcellaire, MAJIC II, ...).

Vis-à-vis d'un raccordement des bâtiments à des ressources géothermiques, la méthode des polygones trouve ses limites dans le croisement avec la description des comportements thermiques des volumes souterrains, lesquels n'ont pas nécessairement de raison physique de coïncider avec le polygone.

Par exemple, il est évident qu'un immeuble de grande hauteur (IGH) ou un centre commercial qui serait établi sur la même parcelle ne vont pas solliciter la ressource géothermique de la même façon.

Il est donc apparu nécessaire de développer une méthode apte à considérer que la satisfaction des besoins thermiques d'un bâtiment par de la géothermie peut ne pas être nécessairement confinée au droit de la parcelle concernée. La méthode des mailles ci-après décrite a donc été adaptée spécifiquement pour la présente étude.

Mise en œuvre de la méthode des polygones

En tout premier lieu, il faut interpréter les demandes thermiques de manière à sélectionner un critère logique de délimitation des polygones.

Par exemple, pour des habitations en secteur urbanisé, le critère peut être celui de l'année de construction (ou d'achèvement) qui est un relativement bon indicateur de la performance thermique. On peut également distinguer d'autres critères comme l'usage des locaux : tertiaire, commerce, industrie ...

Dans l'exemple ci-après, on peut visualiser une délimitation de polygones. On remarque que, dans le polygone situé au centre, la majeure partie des bâtiments date d'avant 1990 mais que quelques bâtiments récents y ont cependant été inclus. Il peut en résulter une erreur.



Illustration 59 : Exemple de délimitation des polygones

En développant la méthode à l'échelle de Clermont Communauté, on obtient la représentation cartographique ci-après (demande thermique ramenée en $W/m^2.an$).

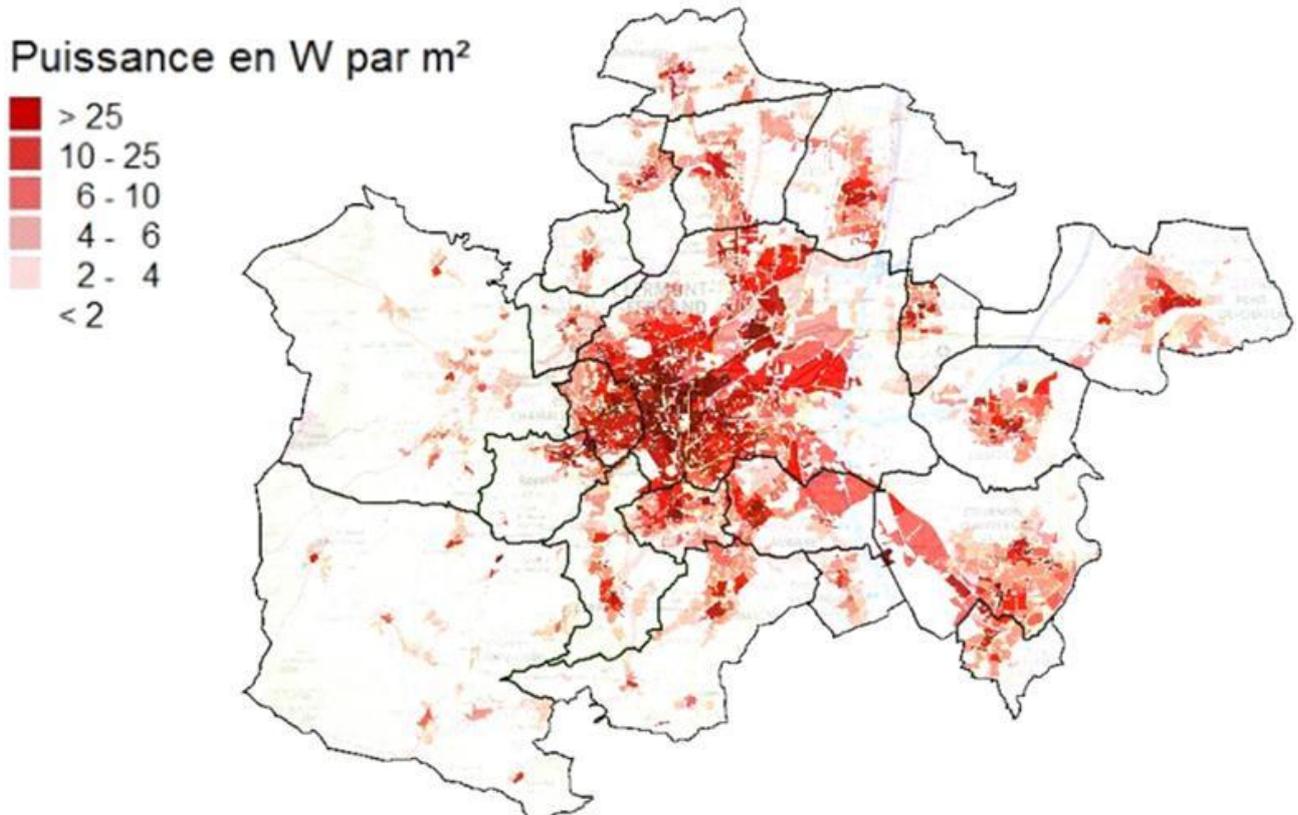


Illustration 60 : Application de la méthode des polygones à l'échelle de Clermont Communauté

A l'échelle d'une commune, on constate que la méthode des polygones est relativement bien adaptée pour visualiser les particularités des secteurs qui ont été manuellement définis (polygones). Par contre, elle gomme les comportements les plus extrêmes. De plus, toute requalification urbaine importante peut imposer de redéfinir les polygones et de recalculer.

Du point de vue de la géothermie, les limites de la méthode sont constatées aux frontières entre les polygones car il n'est pas aisé de décrire comment un polygone peut éventuellement être autorisé à puiser de l'énergie géothermique dans le polygone voisin.

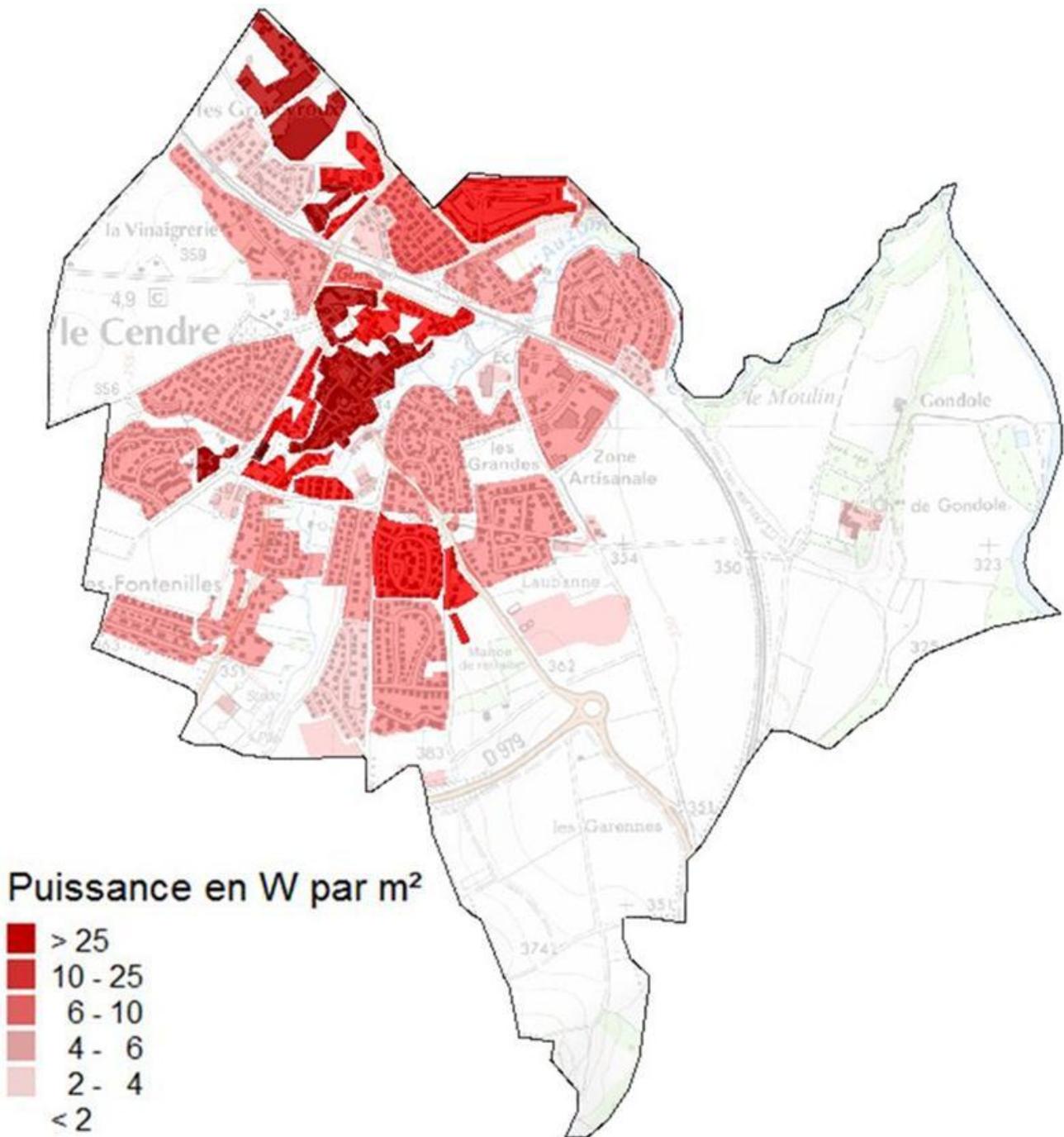


Illustration 61 : Application de la méthode des polygones à l'échelle de la commune du Cendre

5.4.3. Approche par la méthode des mailles

Présentation

D'une manière générale, la méthode des mailles est moins conventionnelle que la méthode des polygones dans le domaine de l'aménagement urbain. Néanmoins, le principe de base est très largement répandu dans le traitement numérique des données, notamment en géologie, hydrogéologie et géothermie.

La méthode proposée ici est novatrice. Elle a été développée afin de répondre à la nécessité de pouvoir intégrer le fait que les ressources géothermiques ne se situent pas exclusivement sous le bâtiment ou la parcelle.

Dans la pratique, on va donc considérer que chaque bâtiment peut voir ses besoins thermiques satisfaits par une ressource géothermique située à une distance pouvant atteindre quelques dizaines de mètres, voire centaines de mètres.

Cette approche permet notamment de mieux prendre en considération, du point de vue thermique, différents espaces urbains, comme par exemple les voies de circulation, les parcs et parkings ou les zones non constructibles, **cela de manière totalement automatique, sans l'introduction de biais d'interprétation par les opérateurs.**

Mise en œuvre de la méthode des mailles

Le principe de la méthode qui a été développée repose sur le processus suivant :

1. décomposition du territoire en mailles carrées régulières. Dans cette étude, la taille choisie pour les mailles est de 25 m x 25 m ;
2. affectation d'un bâtiment à la maille où est situé le barycentre de sa projection au sol ;
3. choix d'une stratégie de répartition de la demande thermique du bâtiment sur les mailles voisines, le choix d'une ventilation sur les 25 mailles ayant au centre la maille du bâtiment retenu :
 - a. la demande énergétique est donc répartie sur un carré de 25 m x 25 m ;
 - b. comme indiqué dans les graphiques ci-dessous, on peut décider la part de l'énergie qui est conservée sur la maille centrale et celle qui est ventilée sous les 24 mailles voisines en fonction de leur distance. Les illustrations en page suivante présentent les cas où respectivement 25 % et 10 % de l'énergie sont affectés à la maille centrale. Une fois effectué le choix, les coefficients de répartition sont calculés une fois pour toute et n'ont donc plus besoin d'être recalculés ;
4. cumul dans chaque maille du territoire pour toutes les demandes énergétiques de chaque bâtiment (25 mailles concernées par bâtiment).

Du point de vue de la géothermie, l'avantage de la méthode est de pouvoir assez facilement gérer les ressources géothermiques disponibles localement sans réellement avoir à se préoccuper de la distance entre le bâtiment et les ressources. Par exemple, un bâtiment situé au milieu d'un parking verra sa demande automatiquement répartie, même si les parcelles sont considérées indépendantes dans la base MAJIC.

Du point de vue de l'évolutivité du modèle, l'atout de la méthode est de pouvoir aisément traiter le cas des espaces nouvellement aménagés ou réaménagés. En effet, il suffit de calculer les demandes nouvelles pour les mailles concernées et de les ajouter ou soustraire selon la nature des travaux envisagés et/ou réalisés.

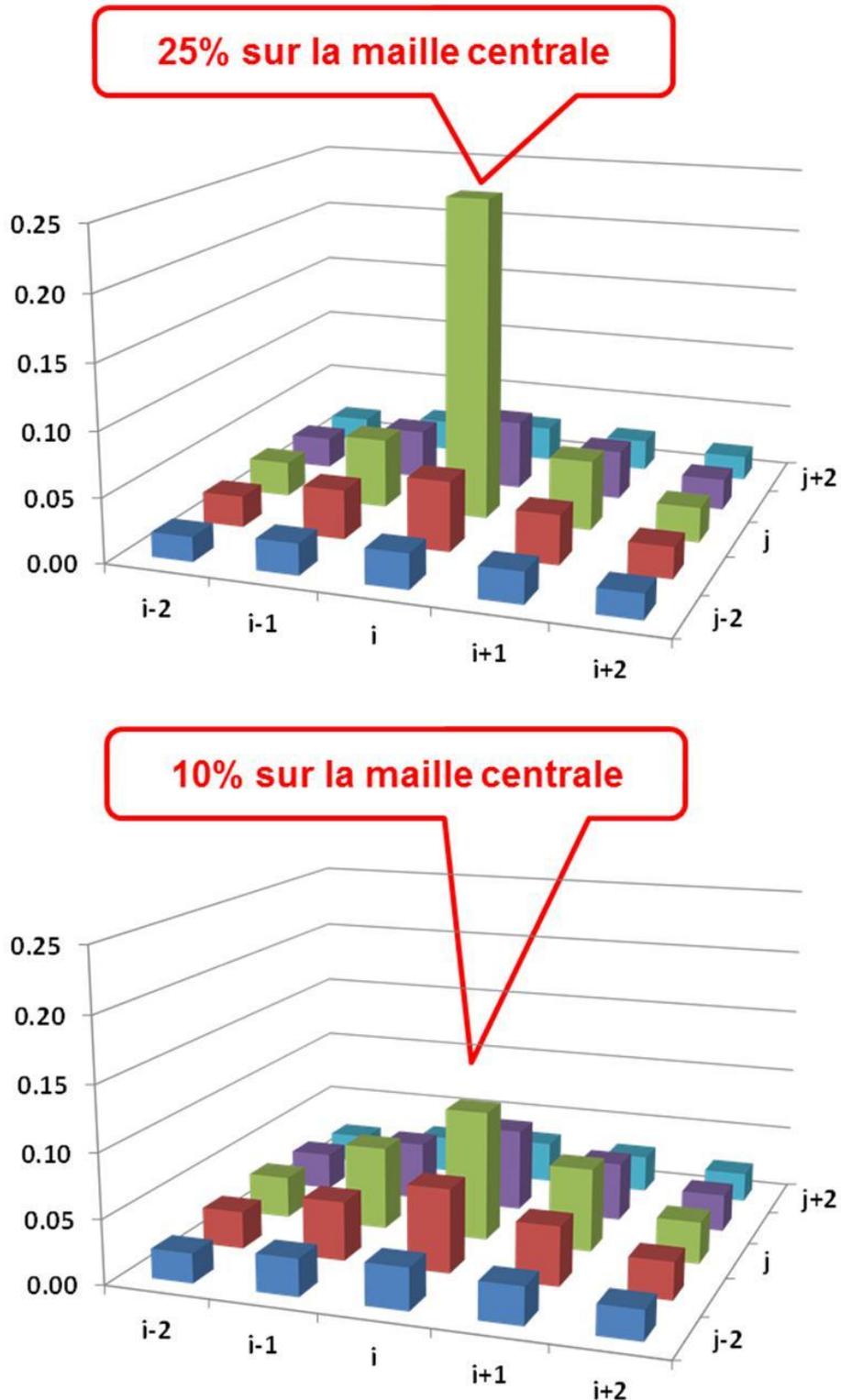


Illustration 62 : Exemple de répartition de l'énergie des bâtiments selon la méthode des mailles

A l'échelle d'une commune, on constate que la méthode des mailles est relativement bien adaptée, tant pour visualiser les particularités des secteurs que pour constater les comportements les plus extrêmes en matière de demande thermique.

Du point de vue de la géothermie, cette approche est directement compatible avec une comparaison des ressources disponibles qui sont également exprimées à l'échelle de mailles carrées de 25 m x 25 m.

De plus, la prise en considération d'éventuels projets de requalification urbaine ou nouveaux est facilitée car il est aisé de venir cumuler de nouvelles demandes dans chacune des mailles.

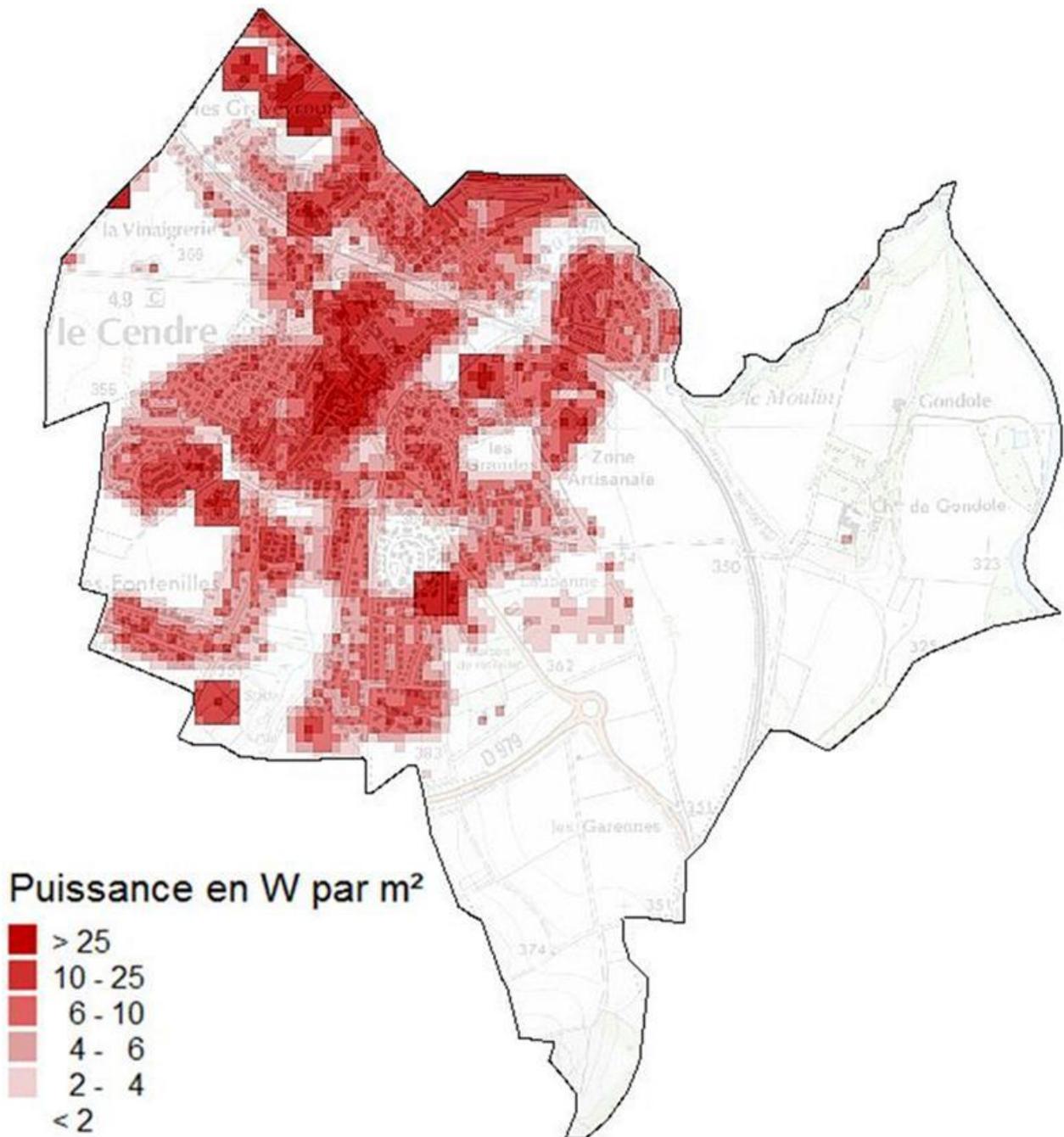


Illustration 63 : Application de la méthode des mailles à l'échelle de la commune du Cendre

5.4.4. Synthèse comparative des deux méthodes disponibles

Constats

En définitive, la méthode des mailles semble ressortir comme étant plus simple à mettre en application que celle des polygones, du fait qu'il n'est pas nécessaire de recourir à un opérateur pour délimiter les périmètres. L'avantage corolaire de la méthode des mailles est que certains biais d'interprétation sont évités puisque le traitement est effectué au plus près des données brutes. De ce fait, la méthode des mailles paraît donc plus fiable.

Par ailleurs, la méthode des mailles est facilement automatisable tout en restituant des informations directement comparables avec les informations disponibles dans les modèles de description des ressources géothermiques, lesquels peuvent également être restitués à l'échelle de mailles aussi petites que 25 m x 25 m.

La méthode des mailles représente, en conséquence, un outil puissant pour détailler les grandeurs énergétiques en jeu.

Toutefois, la méthode des mailles ne semble pas aussi pertinente que la méthode des polygones en matière de restitution visuelle, notamment du fait de la finesse de l'information et de délimitations peu tranchées (Illustration 64). Une extraction des résultats relatifs au secteur observé permet alors d'obtenir la visualisation souhaitée en notant que la pertinence aux frontières est renforcée vis-à-vis des phénomènes physiques en jeu.

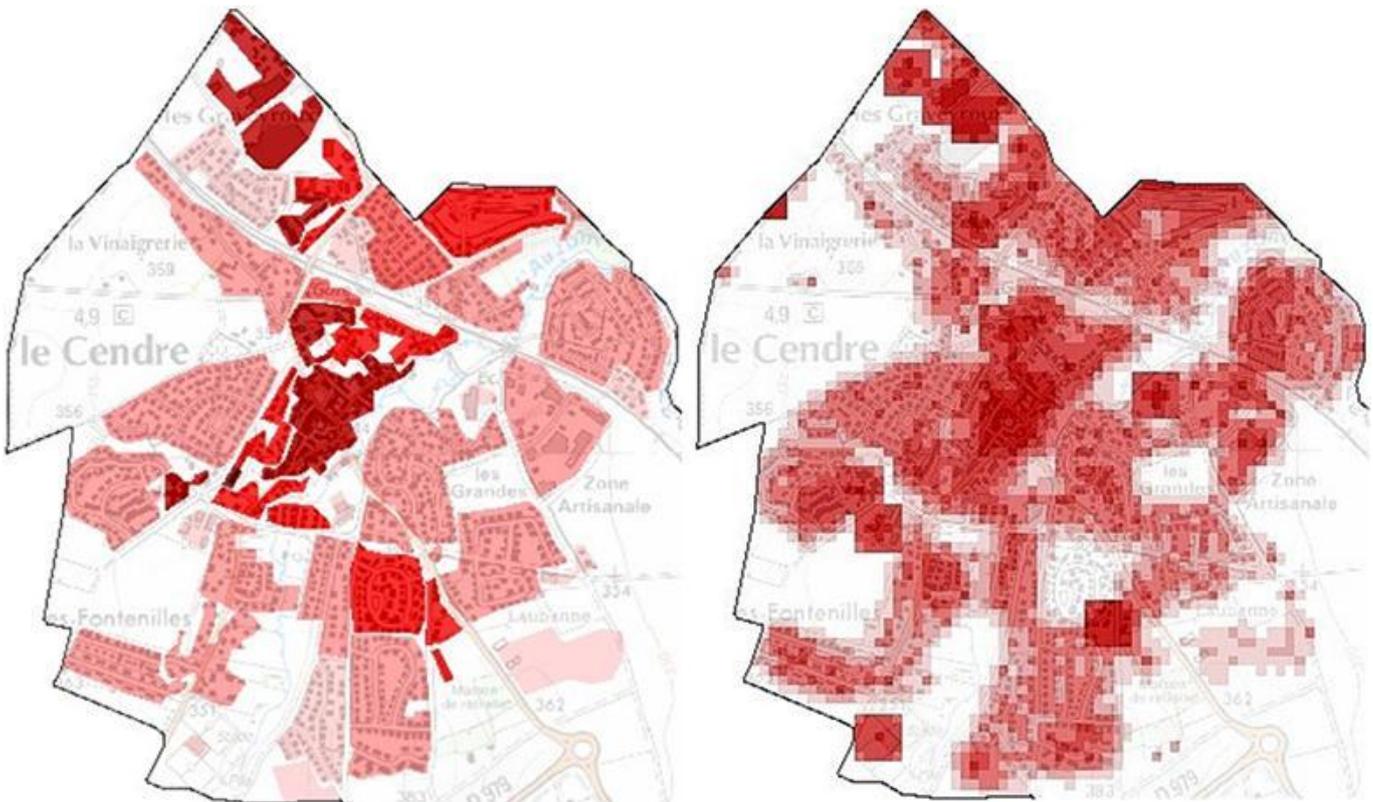


Illustration 64 : Comparaison de la méthode des polygones et de celle des mailles sur la ville du Cendré

Constats relatifs à la méthode des polygones à l'échelle de Clermont Communauté

Visuellement, à l'échelle de l'ensemble du territoire de Clermont Communauté, la méthode des polygones pourrait sembler donner des résultats intéressants en ce sens où, si les polygones traités sont de grande étendue, ils peuvent ressortir distinctement les uns des autres.

Ainsi, la figure ci-dessous (Illustration 65) propose une restitution obtenue pour l'ensemble du territoire qui montre bien la densité de demande thermique allant croissante avec la densité urbaine. Toutefois, si elle met bien en évidence les demandes de chacun des polygones, **cette approche présente toutefois plusieurs biais et inconvénients** que l'on rappellera par les exemples ci-après :

- le travail est difficilement automatisable, notamment pour arbitrer certaines situations aux limites entre deux polygones ;
- la pertinence des polygones vis-à-vis des phénomènes observés n'est pas démontrée. Par exemple, les limites des ilots IRIS sont souvent tracées en fonction des voies de circulation ou des espaces verts. Or, ces limites et espaces peuvent parfaitement, du point de vue géothermique, être exploités par plusieurs ilots voisins ;
- il n'est pas possible d'affiner à l'intérieur d'un polygone, sauf à le remplacer par plusieurs polygones plus petits ce qui, là encore, est difficilement automatisable.

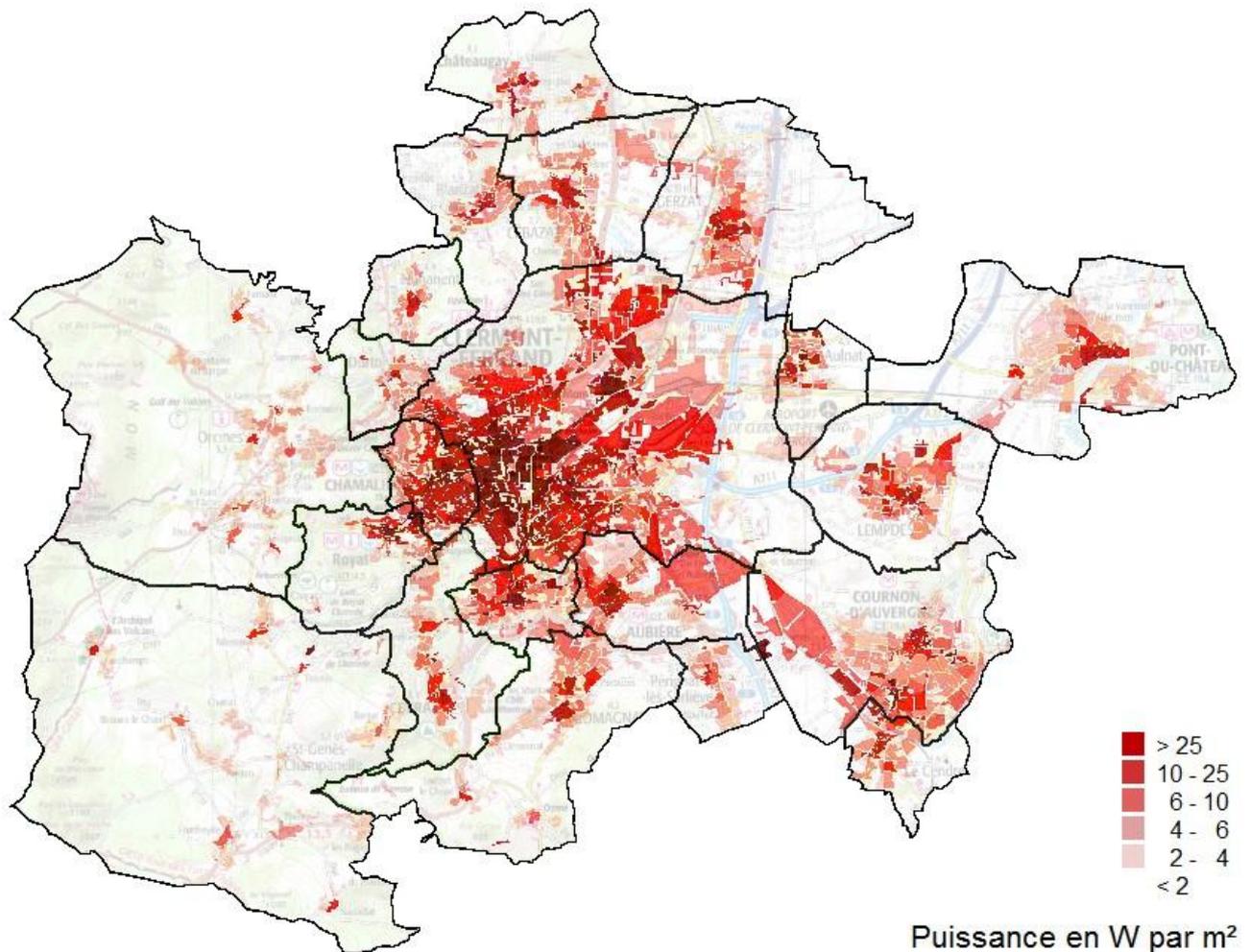


Illustration 65 : Application directe de la méthode des polygones à l'échelle de Clermont Communauté

Constats relatifs à la méthode des mailles à l'échelle de Clermont Communauté

Sur la figure ci-dessous (Illustration 66), le fond topographique n'a pas été représenté afin de mieux exposer la finesse de restitution que propose la méthode des mailles lorsque ces mailles ont une dimension aussi petite que 25 m x 25 m.

Si on compare avec la carte précédente (Illustration 65), on constate notamment que les voies de circulation ne sont plus guère visibles, ce qui signifie que l'on admet que la méthode des mailles permet de considérer ces espaces comme disponibles pour les bâtiments limitrophes qui souhaiteraient y exploiter une ressource géothermique.

En cela, il s'agit donc d'une différence fondamentale entre les deux méthodes, la méthode des mailles introduisant moins de biais que celle des polygones lors de la répartition des grandeurs entre les surfaces de restitution.

De plus, la méthode des mailles est grandement automatisable et cette automatisation se prête bien à des extractions ilot par ilot, y compris en effectuant divers calculs sur chaque ilot, par exemple les valeurs cumulées ou moyennes.

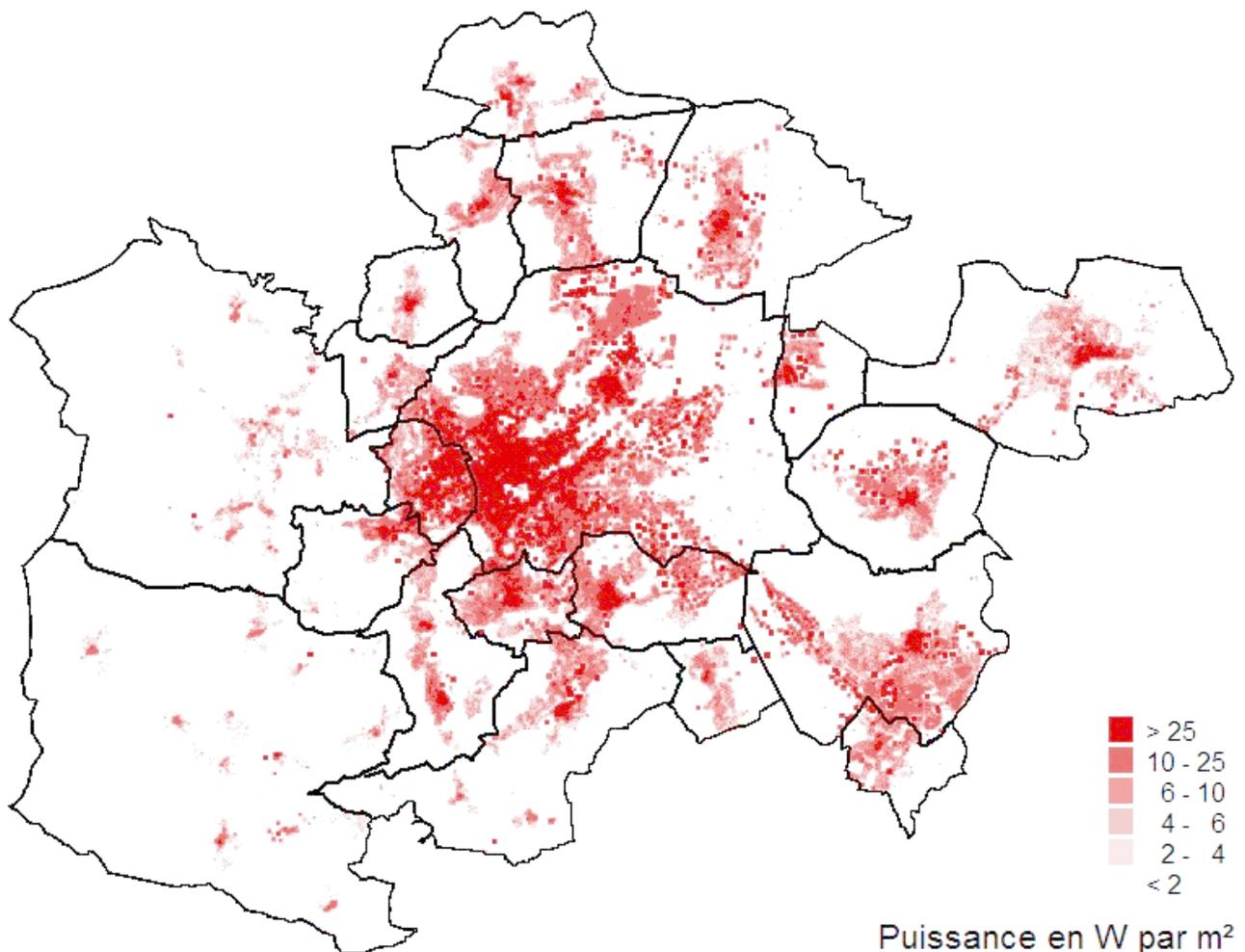


Illustration 66 : Application directe de la méthode des mailles à l'échelle de Clermont Communauté

Synthèse : méthode des mailles pour les calculs et des polygones pour les extractions

Lorsqu'il s'agit de restituer les résultats, par exemple la demande thermique selon le mode d'usage des bâtiments, on est généralement amené à constituer des regroupements en zones géographiques où se concentrent des propriétés similaires (usagers, demande spécifique, année de construction, projet d'aménagement, îlot IRIS ...). Ces zonages sont des polygones. Plutôt que d'effectuer directement le traitement à l'échelle de chaque polygone, il est suggéré, comme montré en page précédente, de produire d'abord les résultats détaillés par la méthode des mailles puis d'extraire les restitutions SIG souhaitées pour chaque polygone. Le logigramme ci-dessous (Illustration 67) synthétise la méthodologie proposée.

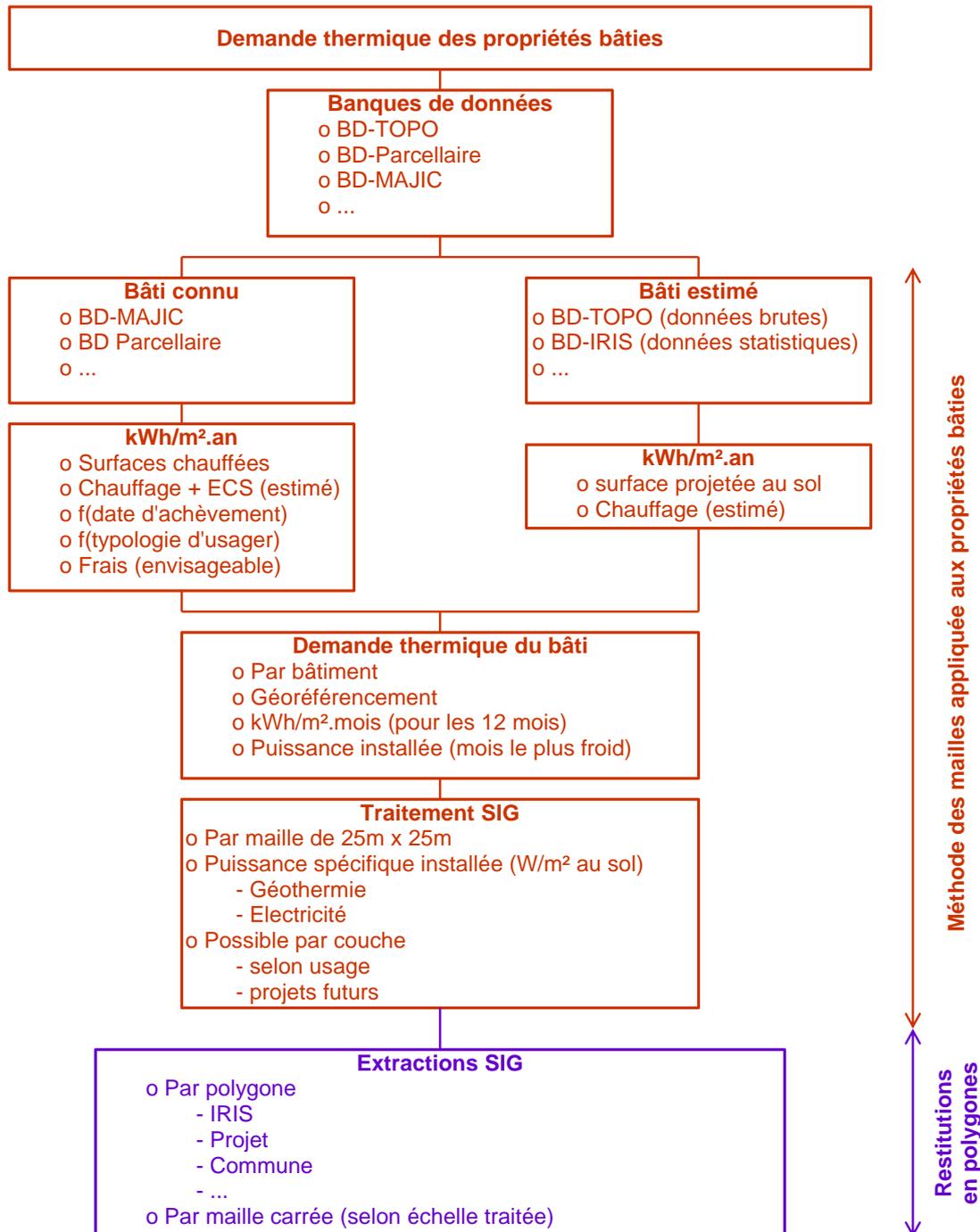


Illustration 67 : Logigramme proposé pour traiter les données thermiques des bâtiments

6. Analyse des solutions techniques

6.1. PRINCIPES GENERAUX, CONVENTIONS ET DEFINITIONS

6.1.1. Difficultés identifiées, observations et suggestions

L'analyse du contexte géologique et hydrogéologique sur le territoire de Clermont Communauté montre des potentialités géothermiques assez sensiblement différentes de celles attendues.

Certes, on savait que la géothermie basse énergie (BE), consistant à exploiter des horizons géothermiques pour produire de l'énergie thermique directement exploitable pour le chauffage, était largement hypothétique mais, au regard des ouvrages, notamment géotechniques, ayant rencontré de l'eau, il était attendu une disponibilité plus large des nappes aquifères superficielles, c'est-à-dire typiquement localisées à moins de 100 m de profondeur.

Or, il s'avère que Clermont Communauté ne peut pas tabler, pour sa programmation, sur une large contribution de la géothermie sur aquifères superficiels, cette forme de géothermie présentant l'intérêt de se prêter aisément à la planification de réseaux de chaleur urbain, petits ou grands, du fait des puissances thermiques élevées accessibles via la technique du doublet géothermique sur nappe aquifère et, en l'occurrence, via une exploitation au moyen de pompes à chaleur centralisées ou réparties le long du réseau.

Aussi, en cours de réalisation de l'étude, il a été décidé d'adjoindre divers paragraphes relatifs aux potentialités sur sondes géothermiques verticales (SGV), cette technique pouvant être appliquée depuis l'échelle de l'installation individuelle jusqu'à l'échelle du réseau de chaleur urbain, typiquement jusqu'à quelques mégawatts de puissance souscrite.

C'est donc avec cette nouvelle lecture des solutions géothermiques que sont introduites ci-après les machineries thermodynamiques et les réseaux de chaleur, les techniques géothermiques sur aquifères et sur SGV et les techniques sur eaux usées.

Dans ce dernier cas, il est apparu que devaient être traitées à la fois l'énergie récupérable dans les égouts et, à titre indicatif, l'énergie récupérable directement dans chaque bâtiment, cela afin de contribuer notamment à diminuer l'appel d'énergie sur la géothermie.

6.1.2. Conventions

Dans le présent document, portant sur le développement de la géothermie sur le territoire de Clermont Communauté, on considère uniquement les techniques géothermiques superficielles dites de "Très Basse Energie" (TBE). Elles représentent l'essentiel des opérations qui peuvent être mises en place à l'échelle du territoire. On présente donc dans ce chapitre les composants qui sont impliqués dans un système énergétique recourant à cette géothermie superficielle.

Machinerie thermodynamique et réseaux de chaleur. Pour pouvoir être utilisées, les ressources géothermiques superficielles nécessitent une machinerie, dite machinerie thermodynamique, qui a pour fonction de produire l'énergie sous la forme directement utile à l'utilisateur. Le cas échéant, un réseau de distribution est également nécessaire. Selon le besoin, il

transporte de l'énergie thermique à basse température (rafraîchissement direct, pompes à chaleur) ou à plus haute température (chauffage et ECS).

Technique géothermique en boucle ouverte ou géothermie sur aquifère. Il s'agit d'exploiter l'eau des aquifères superficiels. Sauf rares exceptions, cette solution nécessite le pompage et la réinjection de l'eau dans un même niveau hydrogéologique. Cette solution, économiquement intéressante lorsqu'elle est faisable, ne peut être mise en œuvre que sous des conditions n'étant pas partout réunies sur le territoire de Clermont Communauté. Cette solution est adaptée au rafraîchissement comme au chauffage. Les solutions sur aquifères sont représentées par la technique du doublet géothermique.

Technique géothermique en boucle fermée ou géothermie sur sondes verticales. Il s'agit d'échanger de la chaleur avec le sous-sol en enterrant verticalement des conduites fermées dans lesquelles on fait circuler de l'eau. Cette solution, plus coûteuse en investissement initial que celle sur aquifère, est assez largement envisageable sur le territoire de Clermont Communauté. Elle présente alors l'intérêt d'une longue durée de vie sans maintenance. Les solutions sur échangeurs géothermiques enterrés sont représentées par la technique de la sonde géothermique verticale (SGV).

Techniques de récupération de la chaleur des eaux usées. Ces techniques sont ici perçues comme une ressource complémentaire pouvant permettre de restreindre la sollicitation des autres sources énergétiques, notamment géothermiques. Usuellement, seule la production de chaleur est mise en œuvre avec ces techniques.

6.1.3. Ressource géothermale

Historiquement, la géothermie se définissait comme "*l'exploitation de la chaleur stockée dans l'écorce terrestre et ayant pour origine à la fois le refroidissement du noyau terrestre et la désintégration naturelle des éléments radioactifs contenus dans les roches profondes*". Cette chaleur se manifeste par le gradient géothermique (élévation de la température avec la profondeur) qui est en moyenne de l'ordre de 3 °C par 100 m à l'échelle de la Terre. Ce gradient géothermique provient du flux géothermique qui est typiquement de l'ordre de 60 mW/m², ce qui est très faible au regard, par exemple du flux solaire incident. Des variations locales de gradient géothermique sont néanmoins observables.

Cette présentation pourrait laisser à penser que l'exploitation de la géothermie n'a pour objet que de livrer de la chaleur et que des conditions propices sont à réunir. En fait, l'énergie géothermique est disponible pratiquement partout à la surface du globe. La possibilité de mettre en œuvre les diverses technologies géothermiques dépendra alors du contexte géologique et hydrogéologique local et des choix économiques du maître d'ouvrage.

Important : Dans le cas de la géothermie superficielle, cette source d'énergie peut être utilisée pour le chauffage, la climatisation, le rafraîchissement ou la production d'électricité par le biais de différentes technologies. On désignera donc ci-après par "chaleur" indifféremment une forme d'énergie pour des applications de chauffage ou pour des applications de rafraîchissement :

- dans le cas de l'utilisation de la géothermie pour la production de chaleur, le système est constitué d'une source de chaleur géothermale dénommée « source froide » en ce sens où elle est refroidie par le prélèvement de chaleur ;
- dans le cas de l'utilisation de la géothermie pour du rafraîchissement, le système est constitué d'une source géothermale dénommée « source chaude » en ce sens où elle est réchauffée lors de l'injection de la chaleur qui a été prélevée dans le bâtiment.

Le milieu souterrain peut être constitué de roches perméables ou imperméables, compactes, poreuses ou fissurées. Lorsque ces formations géologiques sont suffisamment poreuses et/ou fissurées et gorgées d'eau, elles sont dites "aquifères" ou "nappes d'eau souterraine" ou désignées comme "réservoirs géothermiques". Les formations aquifères se rencontrent dans des couches géologiques sédimentaires (craie, calcaire, sable, ...), cristallines ou volcaniques. On distinguera les aquifères superficiels des aquifères profonds. Les aquifères profonds se trouvent, dans les bassins sédimentaires, au-delà d'une centaine de mètres et peuvent atteindre pour certains des profondeurs exploitées en géothermie pouvant dépasser 2 000 m. Les principaux bassins sédimentaires français sont le Bassin Parisien et le Bassin Aquitain mais on trouve également d'autres bassins ou fossés d'effondrement de taille plus modeste : Alsace, couloir rhodanien, Bresse, Limagne, Hainaut, etc.

Important : En géothermie, on considère que les caractéristiques physiques de ces aquifères permettent une exploitation géothermique lorsqu'il est possible de prélever de l'eau en quantité suffisante par captage (puits de production), et de réinjecter cette eau dans un puits de réinjection afin de ne perturber en aucune façon les équilibres hydrogéologiques. Pour les aquifères superficiels, cette réinjection n'est pas toujours une obligation mais il s'agit néanmoins d'une recommandation forte.

Outre la nature et les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du milieu concerné, une ressource géothermique est également caractérisée par son niveau de température (exprimé en °C). Or, le niveau de la température peut être impacté par le prélèvement ou l'injection d'énergie thermique. Aussi, alors que la température initiale de la ressource dépend de la profondeur et du gradient géothermique local, la température d'exploitation de la ressource évoluera dans le temps sous l'action des cycles de prélèvement et de réinjection, des apports naturels en provenance du sous-sol lui-même et des échanges géoclimatiques, ces derniers allant, en principe, dans le sens d'un rétablissement de l'équilibre initial.

6.1.4. Différents types de géothermie

Pour qualifier l'exploitation des différentes ressources géothermales, on distingue généralement : la géothermie très basse énergie (TBE), la géothermie basse énergie (BE) et la géothermie haute énergie (HE). Les désignations "géothermie moyenne énergie" ou "géothermie intermédiaire" sont parfois employées.

Géothermie très basse énergie (TBE)

La géothermie très basse énergie correspond à l'utilisation des ressources thermiques dont la température initiale est inférieure à 30 °C. A cette température, la ressource ne peut généralement pas être exploitée pour du chauffage par un simple échangeur de chaleur, et nécessite donc la mise en place d'une **pompe à chaleur géothermique (PACg)**.

Pour une application de chauffage, une PACg prélève l'énergie de la source de chaleur à basse température (roche, nappe aquifère) pour augmenter la température d'un fluide secondaire jusqu'à une température compatible avec l'usage. Pour un usage de climatisation, le processus est inverse et l'énergie est prélevée dans le bâtiment avant d'être injectée dans les formations géologiques, sans nécessairement recourir à une PACg.

La ressource géothermique de très basse énergie correspond à l'énergie naturellement présente dans le proche sous-sol, ou dans les aquifères peu profonds. Ces nappes superficielles de très basse énergie sont usuellement situées à une profondeur inférieure à 100 m et leur température est typiquement de 11 à 12 °C.

Tous les aquifères superficiels exploitables peuvent être sollicités, y compris les nappes alluviales qui accompagnent la rivière Allier. Toutefois, il est rappelé qu'il est recommandé de procéder à une réinjection de l'eau, ce qui nécessite que l'aquifère soit apte à la réinjection pour être considéré comme étant favorable à une exploitation géothermique.

Par ailleurs, en géothermie de très basse énergie sur aquifère, on pourra considérer que le débit exploitable doit pouvoir être supérieur à 5 m³/h pour représenter un intérêt économique évident en secteur d'habitat collectif ou de tertiaire. En deçà, l'examen d'autres techniques géothermiques sera à envisager, par exemple la technique des sondes géothermiques verticales.

Géothermie basse énergie (BE)

La géothermie basse énergie correspond à l'utilisation des ressources géothermiques dont la température est usuellement comprise entre 30 °C et 90 °C. Ces ressources sont exploitables de plusieurs manières, en fonction de la température de la ressource : soit par échange direct de chaleur, soit par l'intermédiaire d'une **pompe à chaleur (PAC)**.

Hors anomalies thermiques, les ressources présentant des températures supérieures à 30 °C sont localisées dans les formations aquifères assez profondes, typiquement au-delà de 600 m de profondeur. Avec les perméabilités de fissures (systèmes de failles) qui se rencontrent en région Auvergne et l'histoire relativement récente du volcanisme, des ressources BE existent, soit localement (eaux thermominérales), soit de manière plus étendue, en particulier dans la zone de la Limagne s'étendant partiellement sous Clermont-Ferrand.

Toutefois, la ressource géothermique en basse énergie n'a pas été démontrée à ce jour. Citons par exemple le forage "Beaumont-1" à Clermont-Ferrand qui, à une profondeur de 1 335 m, fait état d'une température de 44 °C sans intérêt particulier, le débit d'essais (26 m³/h) montrant une aptitude géothermique très insuffisante de ce point de vue.

Géothermie haute énergie (HE)

La géothermie haute énergie correspond à l'utilisation des ressources thermiques (eau et vapeur) dont la température est comprise entre 90 °C et 150 °C (énergie intermédiaire) ou supérieure à 150 °C (haute énergie). Ces ressources peuvent être utilisées pour la production d'électricité, éventuellement en cogénération, et sont localisées à proximité des zones volcaniques actuelles ou récentes ou des zones à fort gradient thermique.

Du fait de son contexte géologique (volcanisme), la région Auvergne a fait l'objet d'études de longue date pour explorer comment exploiter ce type de ressources, en notant que les verrous à lever portent sur la qualification des réserves d'énergie autant que sur les niveaux pérennes de la température.

A ce jour, les exploitations en région Auvergne se limitent à des ressources à faible puissance thermique, même si le niveau de la température peut être localement élevé.

6.2. MACHINERIES THERMODYNAMIQUES ET RESEAUX DE DISTRIBUTION

6.2.1. Présentation

On désigne ici par "machinerie thermodynamique" l'équivalent d'une chaufferie conventionnelle (chaudière au bois, à gaz ou au fuel). En géothermie TBE, la spécificité est qu'une machinerie thermodynamique peut également délivrer du frais ou du froid, par exemple pour les usages du confort thermique, toutes ces fournitures pouvant être simultanées.

Tant pour l'exploitation des ressources géothermiques en très basse énergie (TBE) que pour l'exploitation de l'énergie des eaux usées, le recours à une telle machinerie est indispensable. A minima, la machinerie comporte un échangeur de chaleur qui permet de découpler le fluide circulant dans les formations souterraines et celui circulant dans les réseaux et les bâtiments.

Pour assurer la production de chaleur, une machinerie comporte un dispositif thermodynamique de type "pompe à chaleur" qui permet d'ajuster le niveau de la température conformément à l'usage (chauffage, ECS.). La combinaison avec une chaufferie thermique reste toujours possible.

Important : En géothermie très basse énergie, on distingue toujours l'**usage direct**, c'est-à-dire sans pompe à chaleur, et l'usage avec pompe à chaleur. En effet, pour assurer la production de frais, le recours à une pompe à chaleur n'est généralement pas nécessaire en géothermie superficielle car la température du sous-sol est directement adaptée. Ce ne sera pas le cas pour assurer de la climatisation.

De même, on distinguera les machineries centralisées, qui distribuent l'énergie thermique au moyen d'un réseau de chaleur, des machineries réparties dans les bâtiments. Ces dernières peuvent soit disposer de leur propre installation géothermique, soit recourir à une installation géothermique mutualisée. Dans ce dernier cas, un réseau de chaleur particulier distribue l'énergie qui circule à la température de la ressource géothermique. **Il s'agit des réseaux en boucle tempérée.**

Nota : Dans tous les cas de figure, l'utilisateur final peut disposer d'un dispositif thermodynamique qui lui est propre afin d'ajuster à ses besoins particuliers le niveau de la température distribuée. C'est notamment le cas pour l'eau chaude sanitaire si la température distribuée par le réseau est trop faible. Dans ce cas, le réseau assure uniquement un préchauffage.

Notion d'usage direct de la ressource géothermique

Lorsqu'une machinerie thermodynamique est nécessaire, c'est qu'il faut adapter le niveau de la température entre celle de la ressource géothermique et celle du fluide caloporteur qui circule dans les bâtiments (eau en général) en fonction des besoins : réchauffage pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, rafraîchissement pour la climatisation. Lorsque le niveau de la température de la ressource géothermique correspond directement aux besoins de l'utilisateur, alors on pourra n'installer qu'un échangeur de chaleur qui aura pour fonction de découpler le fluide qui distribue la chaleur dans les bâtiments et celui qui circule dans les formations géologiques pour puiser l'énergie, ce fluide pouvant, le cas échéant, être directement l'eau d'une nappe aquifère.

Ce cas se présente donc lorsque le niveau de la température de la ressource convient aux usages dans le bâtiment. Par exemple, une température d'aquifère à moins de 15 °C convient pour directement rafraîchir des locaux tertiaires. Une température supérieure à 25 ou 30 °C commence à être directement utilisable pour certaines applications de chauffage.

Justification de l'utilisation des pompes à chaleur

En règle générale, notamment pour les applications de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire (ECS), la température des formations géologiques superficielles (jusqu'à typiquement 200 m de profondeur) reste insuffisante pour pouvoir être exploitée en usage direct. Aussi, afin d'adapter le niveau de la température, une pompe à chaleur doit être utilisée. Le plus souvent, une machinerie thermodynamique comporte une (ou plusieurs) pompe à chaleur à compression mécanique, le compresseur étant le plus souvent entraîné par un moteur électrique. On peut trouver également des compresseurs entraînés par des moteurs thermiques (moteur à gaz ou à biogaz) ou par des turbines à vapeur. Il existe également des machines thermodynamiques à sorption (compression thermo-chimique) qui sont pilotées par une source de chaleur plutôt que par un compresseur mécanique. Cette chaleur peut provenir, par exemple, d'une combustion (gaz naturel, biomasse, ...) ou de toute autre source thermique comme par exemple du solaire thermique.

Dans le présent rapport, l'acronyme **PACg** désigne les pompes à chaleur géothermiques. Ces machines consomment moins d'énergie motrice (électricité, gaz ...) qu'elles n'en restituent en énergie thermique. En géothermie, les PACg à compresseur électrique restituent aujourd'hui au moins trois fois plus d'énergie thermique qu'elles ne consomment d'énergie électrique, y compris en prenant en considération l'énergie nécessaire pour faire circuler le fluide caloporteur dans la boucle géothermique.

Pour les dispositifs équipés de PACg, selon les besoins, il est possible d'assurer la fourniture du chaud (chauffage et/ ECS), du froid (climatisation) ou les deux alternativement ou simultanément. Ces fonctionnalités sont décidées à l'étape de la conception de la machinerie thermodynamique qui sera implantée dans la chaufferie.

Important : Dans la mesure du possible, il est recommandé de recourir à un usage direct de la ressource géothermique (sans pompe à chaleur) si les niveaux de la température sont compatibles avec un des services requis par l'utilisateur. En géothermie très basse énergie, il est donc recommandé de recourir au rafraîchissement direct dès que cela est possible, ce qui revient à ne pas utiliser la pompe à chaleur pour ce service.

Dans tous les cas de figure, quelle que soit la technologie utilisée pour produire de la chaleur ou du rafraîchissement, les dispositifs terminaux (émetteurs dans le cas du confort thermique) doivent être compatibles avec le niveau de température de la chaleur fournie par la machinerie.

Présentation des modes de distribution de l'énergie thermique

Une fois l'énergie thermique apportée au niveau souhaité de la température, il faut la distribuer auprès des utilisateurs. Dans ce rapport, on va considérer deux grandes familles de solutions :

- Cas 1 : la machinerie thermodynamique et les ouvrages géothermiques sont associés à un seul bâtiment, individuel ou collectif. Dans ce cas, l'énergie est considérée comme immédiatement disponible au pied du bâtiment considéré ;
- Cas 2 : la (ou les) machinerie(s) thermodynamique(s) et les ouvrages géothermiques sont associés à plusieurs bâtiments. Dans ce cas, il faudra un réseau de chaleur et/ou de frais et/ou tempéré pour distribuer l'énergie jusqu'au pied de chaque bâtiment.

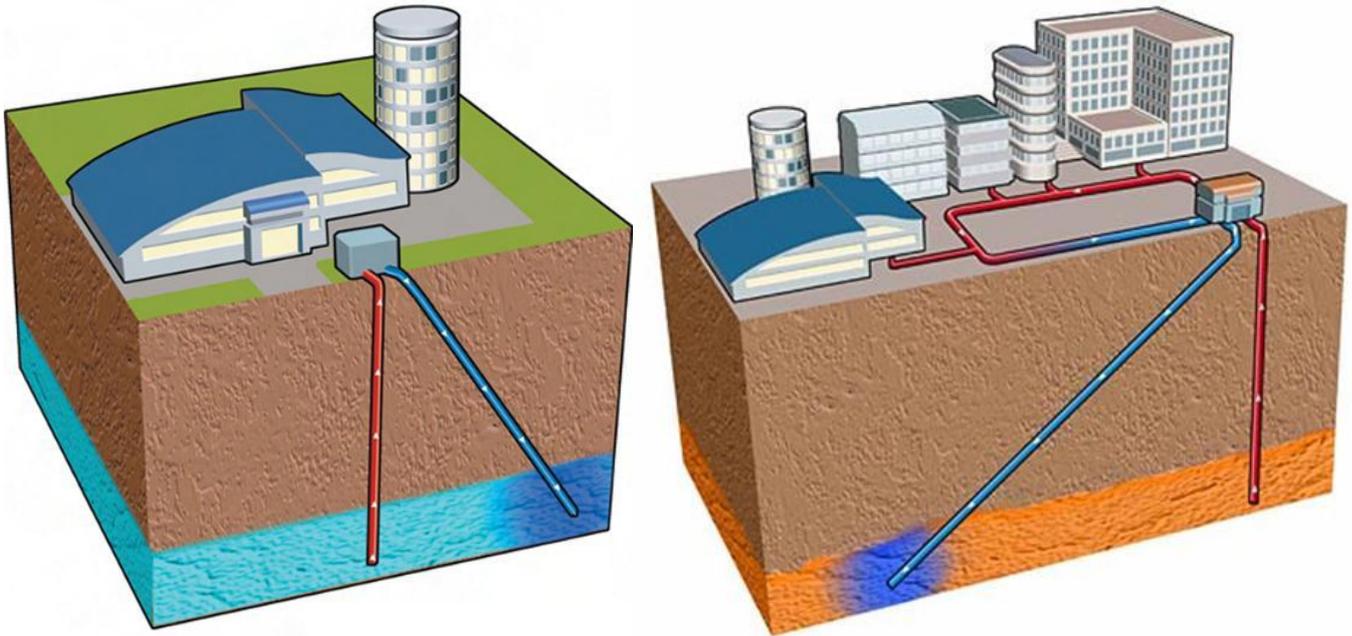


Illustration 68 : Modes de distribution d'une énergie géothermique à du collectif/tertiaire : associé à un bâtiment (gauche) ou en réseau de chaleur (droite)

6.3. NOTION DE STOCKAGE PERIODIQUE DE L'ENERGIE THERMIQUE

En puisant de la chaleur dans les terrains en hiver, le chauffage des bâtiments revient à refroidir ces terrains. A l'inverse, en puisant de la fraîcheur dans les terrains en été, le rafraîchissement des bâtiments revient à réchauffer ces terrains.

Aussi, s'il n'y a pas de transport convectif, par exemple par circulation de l'eau d'un aquifère, les quantités d'énergie injectées dans les terrains (froid en hiver ou chaud en été) diffuseront relativement lentement dans les roches environnantes. Ainsi, à titre indicatif, on peut considérer que, sur une période de six mois, l'énergie n'aura diffusé que d'environ une dizaine de mètres dans les roches voisines du stockage, l'écart des températures entre le milieu environnant et la température injectée étant un paramètre déterminant. On constate donc que certaines formations géologiques peuvent représenter des milieux propices au stockage géologique d'énergie thermique.

On distinguera alors essentiellement deux types de techniques :

- techniques de stockage sur aquifère (ATES – Aquifer Thermal Energy Storage) ;
- techniques sur sondes géothermiques (BTES – Borehole Thermal Energy Storage).

L'acronyme générique UTES (Underground Thermal Energy Storage) désigne l'ensemble des solutions géothermiques de stockage d'énergie thermique.

Nota : Dans le présent document, les techniques de stockage sont mentionnées pour mémoire mais ne sont pas prises en considération dans les estimations, la décision de réaliser un tel système revenant aux concepteurs. Toutefois, on retiendra pour mémoire que les fondations géothermiques incorporent systématiquement une part de stockage inter-saisonnier d'énergie thermique.

6.3.1. Usage direct de la ressource géothermique

Les installations géothermiques qui utilisent directement la température de la ressource géothermique fonctionnent en échangeant de la chaleur avec les formations géologiques, à savoir les roches et/ou les nappes d'eau souterraine. Cela signifie que la température de ces formations géologiques se situe, "naturellement", au bon niveau de température pour pouvoir satisfaire les usages. Elle doit être suffisamment élevée pour satisfaire les besoins de chauffage (géothermie basse énergie) ou suffisamment basse pour satisfaire les usages de rafraîchissement. Dans le cadre de cette étude, seule l'application à du rafraîchissement direct peut être envisagée.

Le rafraîchissement direct (également connu sous le nom de free-cooling ou direct-cooling) fonctionne sur un principe similaire à celui employé en géothermie basse énergie pour le chauffage lorsque la température de la source géothermique est adaptée.

Dans le cas d'un système sur nappe aquifère, l'eau géothermale est prélevée dans l'aquifère au niveau d'un forage de prélèvement ou **puits de production**, puis elle circule jusqu'à un échangeur de chaleur qui permet de transférer la chaleur depuis l'eau prélevée vers le "circuit géothermique", appelé aussi boucle secondaire ou circuit secondaire. L'eau géothermale refroidie (cas du chauffage) ou réchauffée (cas du rafraîchissement direct) est ensuite renvoyée dans l'aquifère d'origine par le biais d'un second forage dit **puits de réinjection** (Illustration 68). Le circuit de l'eau géothermale est parfois appelé boucle ou circuit primaire.

Dans le cas d'installations sur échangeurs géothermiques enterrés, le principe est identique à celui décrit pour les nappes aquifères, si ce n'est que l'eau circule en circuit fermé dans les conduites enterrées.

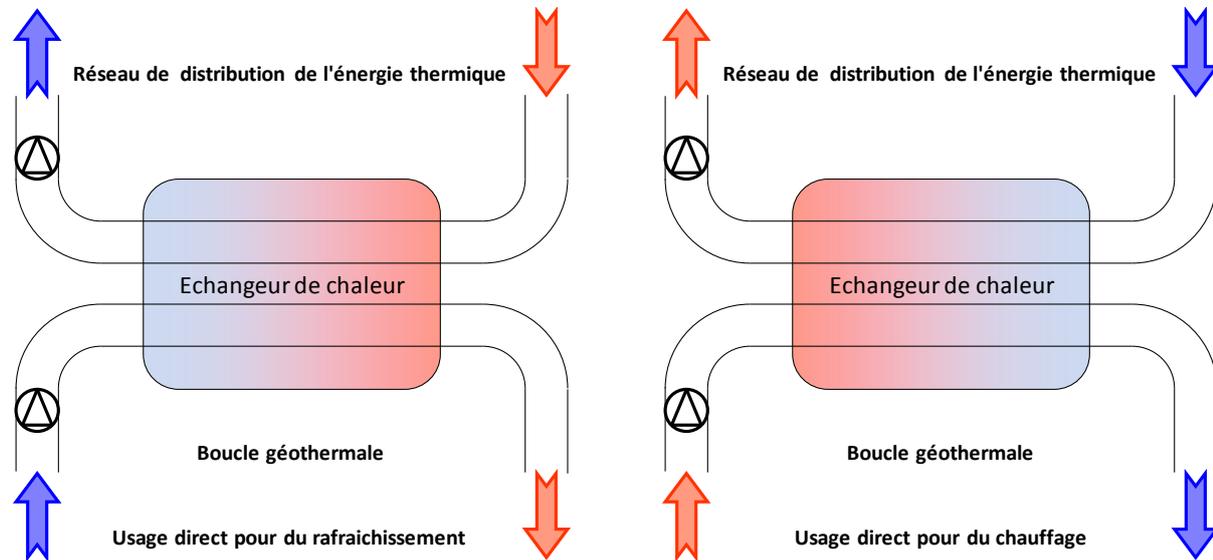


Illustration 69 : Principe de l'échange de chaleur en usage direct pour du rafraîchissement et pour du chauffage

Cette technique ne peut être mise en œuvre que lorsque la température de la source est compatible avec l'usage. Pour du rafraîchissement, une température entre 15 °C et 20 °C reste parfaitement adaptée, les valeurs inférieures étant évidemment envisageables. Pour une utilisation en climatisation, une température inférieure à 7 °C semblerait nécessaire au regard

des pratiques actuelles. Sous la latitude de Clermont-Ferrand, ce niveau de température ne semble pas pouvoir être disponible dans les conditions naturelles.

Le rafraîchissement direct, lorsqu'il est thermiquement envisageable, doit toujours être préféré à une climatisation. L'intérêt du rafraîchissement direct réside dans l'économie réalisée sur la dépense d'énergie (énergie électrique employée pour la circulation des fluides caloporteurs) vis-à-vis de l'énergie thermique utile, un ratio égal à 20 étant un bon ordre de grandeur pour la boucle géothermale. Aucune machinerie thermodynamique n'est actionnée dans ce mode. Les seuls équipements en service restent alors :

- les ouvrages géothermiques ;
- des échangeurs de chaleur ;
- des pompes de circulation ;
- des émetteurs dans les locaux (ventilo-convecteurs, planchers ou plafonds rafraîchissants, ...).

6.3.2. Pompes à chaleur géothermique (PACg)

Comme esquissé lors de la présentation plus avant dans le présent chapitre, si la température naturelle de la ressource souterraine n'est pas suffisamment élevée pour mettre en pratique l'utilisation directe de chaleur pour du chauffage, on aura alors recours aux pompes à chaleur géothermiques. Le même raisonnement s'applique au cas du rafraîchissement et on utilisera une pompe à chaleur en mode climatisation dans le cas où la température de la ressource géothermique est trop élevée pour assurer du rafraîchissement direct.

Principe et performances énergétiques

Une pompe à chaleur est un système thermodynamique qui fonctionne entre deux sources thermiques avec lesquelles de la chaleur (énergie thermique) sera échangée :

- la source froide (source que l'on refroidit) ;
- la source chaude (source que l'on réchauffe).

Le principe consiste à prélever des calories à basse température dans un milieu (source froide) et à les transférer à plus haute température dans un autre (source chaude). Dans la pompe à chaleur, ce transfert se fait via un fluide frigorigène qui présente un point d'ébullition adapté aux températures en jeu. Ce fluide, en faible quantité, circule en circuit fermé, et le transfert de chaleur de la source froide vers la source chaude nécessite un apport extérieur d'énergie (compresseur entraîné par un moteur électrique pour les systèmes les plus courants).

Dans un fonctionnement classique en mode chauffage, la source froide correspond au milieu extérieur (nappe aquifère, sous-sol) et la source chaude correspond au bâtiment à chauffer. Ce sera l'inverse en mode rafraîchissement, le bâtiment jouant le rôle de la source froide (source que l'on refroidit) et le sol jouant le rôle de la source chaude.

Important : En mode chauffage, la quantité d'**énergie utile** (énergie délivrée) est la somme de l'**énergie motrice** (électricité dans le cas général) et de l'**énergie géothermique** prélevée. En mode climatisation, l'énergie géothermique sera la somme de l'énergie utile (énergie prélevée dans le bâtiment) et de l'énergie motrice. De ce fait, l'énergie échangée avec la source géothermique peut être significativement plus importante en mode climatisation qu'en mode chauffage.

Une pompe à chaleur est caractérisée par son **Coefficient de Performance (COP)** qui est le rapport entre la puissance utilisée par le chauffage (P_{CH}) et la puissance dépensée sous forme mécanique. L'énergie mécanique est généralement apportée par un compresseur entraîné par

un moteur électrique (P_{Elec}). Un COP égal à 4 signifie que pour 1 kWh dépensé en électricité, l'utilisateur disposera de 4 kWh thermiques, ce qui signifie que 3 kWh seront puisés dans la ressource géothermique :

$$COP = \frac{P_{CH}}{P_{Elec}}$$

Les autres constituants de la PACg sont un échangeur côté source froide dénommé "évaporateur" et un échangeur côté source chaude nommé "condenseur". Dans le cas d'une géothermie sur aquifère, un échangeur supplémentaire peut être implanté pour assurer le découplage du circuit de la pompe à chaleur de celui de la boucle géothermale afin de, notamment, faciliter la maintenance. La puissance P_{FR} prélevée sur la source froide (ressource géothermique en mode chauffage) est :

$$P_{FR} = P_{CH} - P_{Elec} \quad \text{où} \quad P_{FR} = P_{CH} \times \left(1 - \left(\frac{1}{COP}\right)\right)$$

Dans la pratique, la performance des PAC n'atteint pas celle du cycle théorique de Carnot du fait des rendements des équipements du système (moteurs, échangeurs, nature du fluide frigorigène, pertes de charges des circuits frigorifiques,...). D'une manière générale, le COP d'une machine thermodynamique varie avec les conditions de fonctionnement, essentiellement les températures des deux sources. Ainsi, le COP des machines thermodynamiques est déterminé en laboratoire pour des régimes imposés de températures Entrée-PAC / Départ-PAC des sources chaudes et froides. Par exemple pour la norme EN 14511 appliquée à la géothermie sur aquifère, le régime 40 °C/45 °C pour la source chaude et 10 °C/7 °C pour la source froide. D'une manière générale, on retiendra qu'en mode chauffage et pour une même machine, le COP sera d'autant plus élevé que l'écart de température entre la ressource et le milieu à chauffer sera faible (Illustration 70).

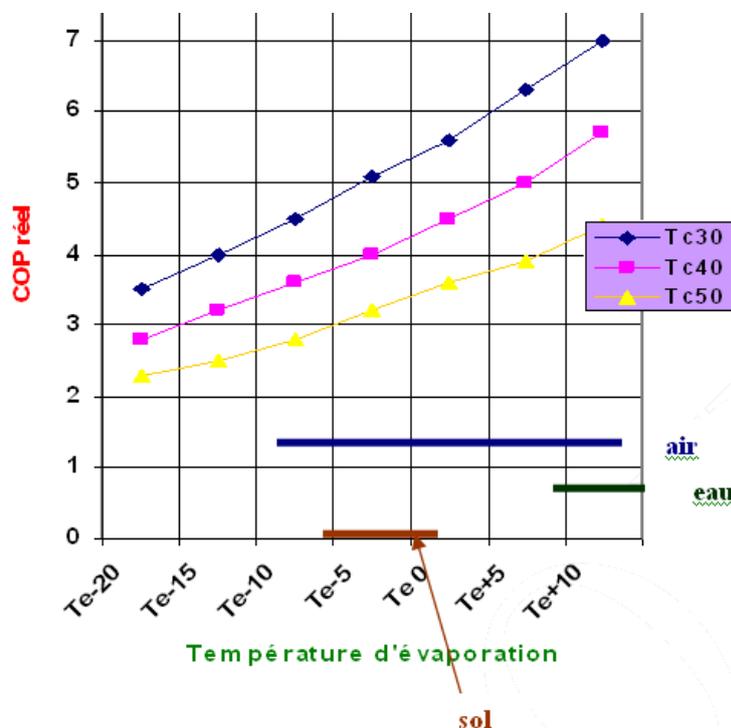


Illustration 70 : Evolution du COP d'une pompe à chaleur eau/eau en fonction de la température d'évaporation (T_e) et de la température de condensation à la source chaude (T_c)

Important : la puissance frigorifique d'une PAC réversible ne peut pas être directement rapportée à la puissance thermique en mode chauffage car les conditions de fonctionnement diffèrent notablement. En effet, la performance du système thermodynamique est fonction à la fois de la température où l'on prélève les calories (source froide) et du milieu où l'on transfère la chaleur (source chaude).

6.3.3. Réseaux de distribution de l'énergie thermique

Dans le présent document, on distingue les réseaux de distribution de l'énergie où l'eau circule à une température voisine de celle du proche sous-sol (réseau en boucle tempérée) de ceux où l'eau circule à une température directement utilisable pour le chauffage.

Boucle tempérée pour la distribution de l'énergie géothermique : PACg distribuées

En distribution en boucle tempérée, la température de départ dans le réseau de distribution de l'énergie est proche de la température de la source géothermique, l'écart de température étant appelé pincement de l'échangeur. La valeur du pincement est de l'ordre de 2 °C et moins pour les échangeurs les plus performants (à plaque, coaxiaux, multitubulaires ...), et de 3 °C à 4 °C pour les autres échangeurs. Les échangeurs en matériaux synthétiques ont des pincements moins favorables. De la même façon, la température de réinjection dépend du pincement de l'échangeur de chaleur. À noter que, en règle générale, si de l'eau circule de part et d'autre de l'échangeur, alors les deux débits seront du même ordre de grandeur.

En géothermie très basse énergie, la température de la ressource se situera typiquement entre 10 °C et 15 °C. De ce fait, le niveau de la température en sortie de l'échangeur sera du même ordre de grandeur. Il peut être alors intéressant de distribuer directement cette énergie via un réseau de chaleur pour les deux motivations suivantes :

1. les pertes thermiques le long du réseau sont limitées du fait d'un écart de température très faible avec les sols environnants, l'isolation des conduites étant alors facultative ;
2. les usages des bâtiments raccordés peuvent être diversifiés, chacun d'entre eux pouvant ajuster à ses besoins le niveau de la température via une pompe à chaleur. Dans ce cas, on parle de réseau de chaleur à pompes à chaleur distribuées (Illustration 71).

L'alternative aux réseaux de chaleur en boucle tempérée se décline en deux ordres :

1. installation d'ouvrages géothermiques au pied de chaque bâtiment ;
2. distribution en réseau de chaleur (voir ci-après).

Réseau de chaleur : PACg centralisée

En géothermie très basse énergie, la distribution en réseau de chaleur d'une énergie thermique à un niveau de température suffisant pour le chauffage ne peut pas s'envisager sans pompe à chaleur, laquelle sera implantée dans un local à proximité immédiate de l'échangeur de chaleur sur la boucle géothermique (sur nappe aquifère) ou des collecteurs de raccordement avec les échangeurs géothermiques (sur champ de sondes géothermiques verticales ou sur fondations géothermiques).

La température du réseau de chaleur (Illustration 72) pourra alors correspondre à celle des besoins pour le chauffage (par exemple 35 °C ou 45 °C) ou à celle de l'eau chaude sanitaire (par exemple 70 °C). Pour l'ECS, la solution alternative est de considérer que le réseau assure uniquement le préchauffage et que chaque bâtiment dispose de moyens de relève.

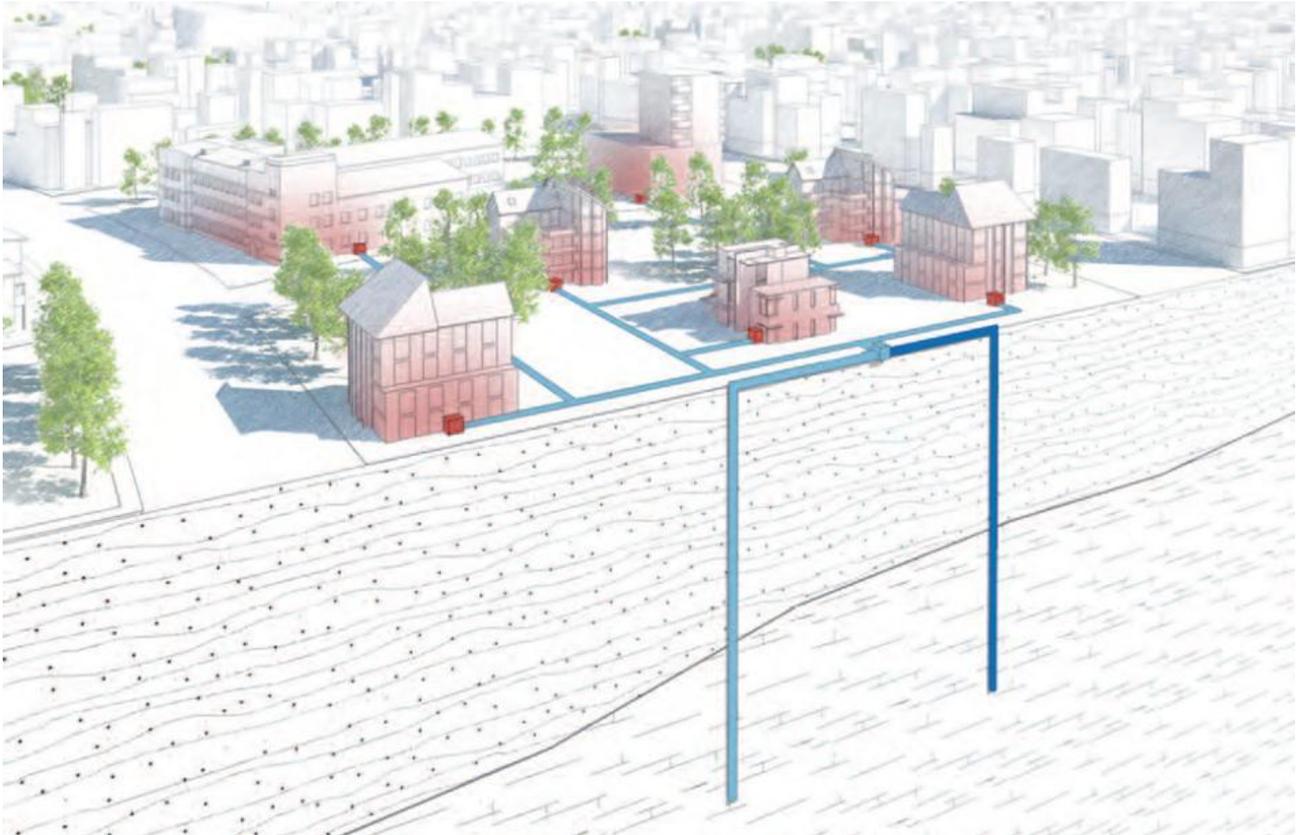


Illustration 71 : Principe du réseau de chaleur en PACg distribuées

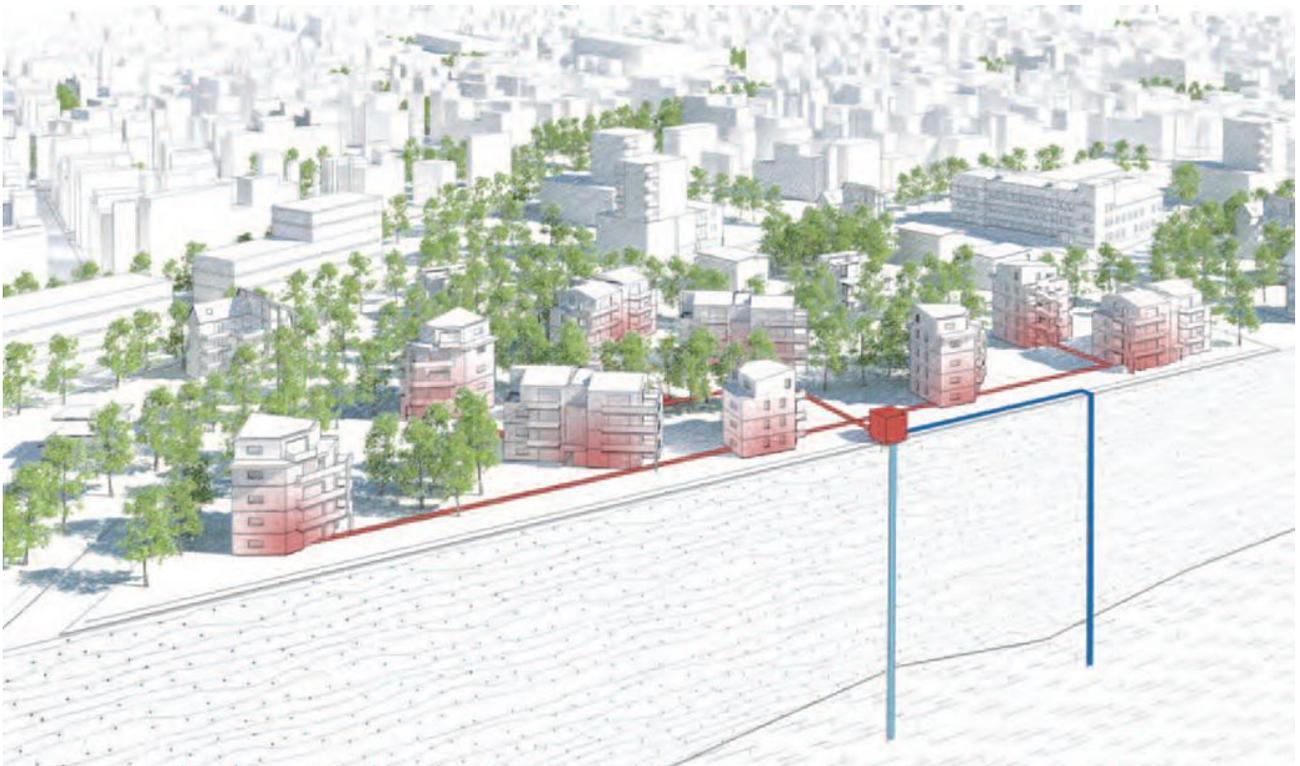


Illustration 72 : Principe du réseau de chaleur en PACg centralisée

Nota : Le réseau de chaleur à PACg centralisée ci-avant (Illustration 72) est comparable à ce qui est installé pour des chaufferies ou une cogénération sur combustibles fossiles, biogaz ou bois-énergie. La combinaison de la géothermie avec une autre source est donc possible. Dans tous les cas, qu'il s'agisse d'un réseau en PACg distribuées ou en PACg centralisée et quel que soit l'usage, des sous-stations doivent être implantées au pied des bâtiments (Illustration 73). Il s'agit d'échangeurs de chaleur qui permettent de découpler les deux circuits, celui du réseau de chaleur et les circuits internes du bâtiment.

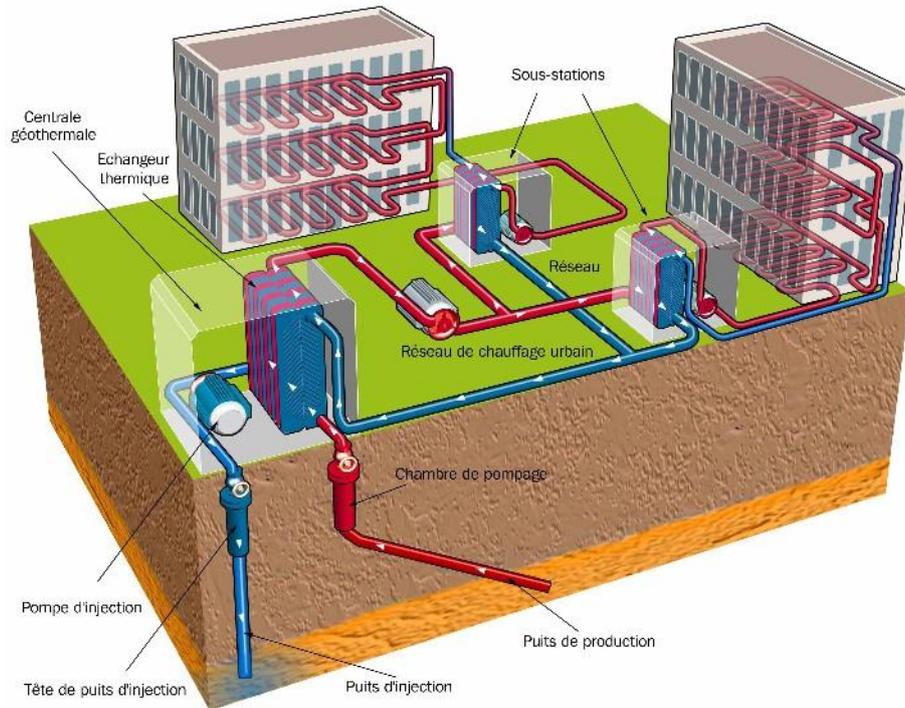


Illustration 73 : Principe du réseau de chaleur et de ses sous-stations

Retour de chaleur du réseau

Par principe, l'eau distribuée par le réseau de chaleur tourne en circuit fermé. Pour la géothermie superficielle, tous les abonnés sont desservis à la même température. Les sous-stations sont donc alimentées en parallèle (Illustration 74). Ce n'est pas toujours le cas pour des circuits à haute température (chaufferie ou géothermie profonde) où des circuits peuvent être en cascade, c'est-à-dire alimentés par le circuit de retour des secteurs en amont. Cette configuration n'est pas recommandée sur Clermont Communauté.

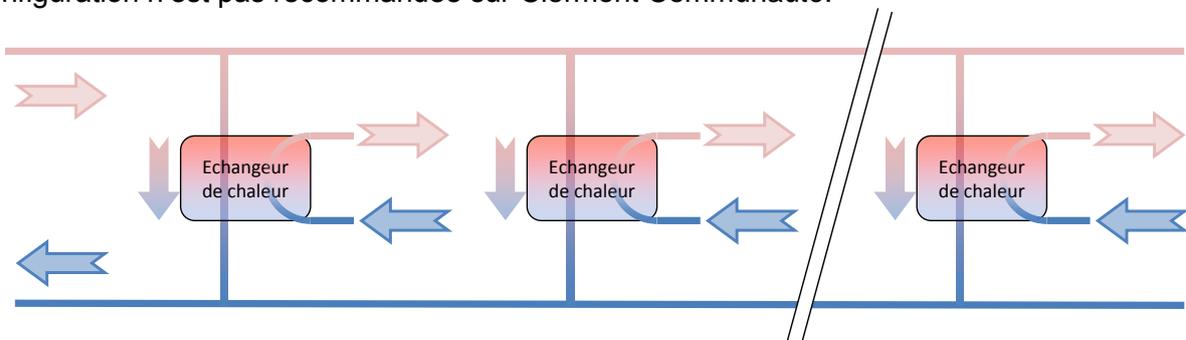


Illustration 74 : Principe de distribution de l'énergie aux sous-stations d'un réseau de chaleur

6.4. TECHNIQUE DU DOUBLET SUR NAPPE AQUIFERE (BOUCLE OUVERTE)

Ce chapitre a pour objet de décrire les particularités de l'exploitation d'un doublet géothermique, notamment en termes de mise en place et de fonctionnement. Les informations d'ordre technique sont reportées en annexe.

Présentation

La technique du doublet géothermique est adaptée pour exploiter la chaleur disponible dans l'eau des aquifères. Dans le cas des aquifères superficiels localisés sur le territoire de Clermont Communauté, le niveau de la température est compatible avec les applications de chauffage et de rafraîchissement :

- pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, une pompe à chaleur est indispensable ;
- le rafraîchissement des locaux peut se faire en usage direct alors que les applications de climatisation nécessitent une pompe à chaleur.

Pour les communes de Clermont Communauté situées en plaine, la température de l'eau des aquifères situés à une profondeur comprise entre – 20 m et – 30 m est de l'ordre de 11 °C en moyenne sur l'année. Cette température fluctue assez peu. Pour les communes situées plus en altitude, comme par exemple Saint-Genès-Champanelle, pour cette même profondeur, la température de l'eau des secteurs aquifères est inférieure à 9 °C en moyenne sur l'année.

Technique du doublet géothermique sur nappe aquifère

Sur le schéma qui suit (Illustration 75), on constate que le chemin suivi par l'eau géothermale depuis son prélèvement jusqu'à sa réinjection constitue la "**boucle géothermale**". Ce fonctionnement comprenant un puits de prélèvement et un puits de réinjection est appelé "doublet géothermique". **Cette boucle est une boucle ouverte.**

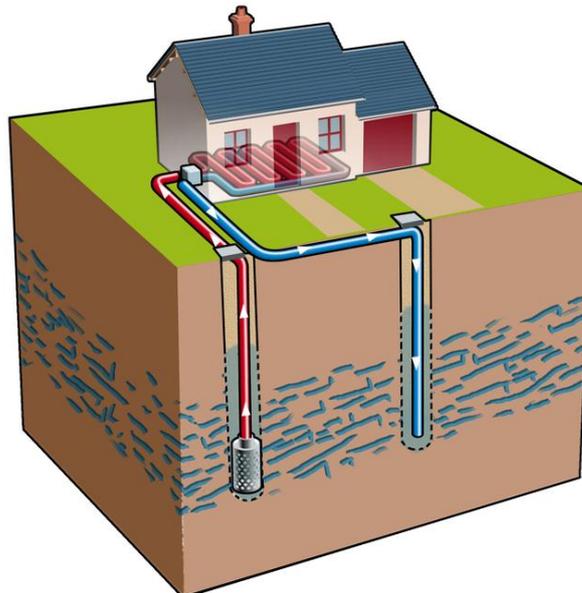


Illustration 75 : Principe du doublet géothermique sur aquifère superficielle (source : BRGM)

A minima, les installations de ce type nécessitent donc la création de deux ouvrages pour, respectivement, le pompage de l'eau (ouvrage de production) et pour la réinjection.

Pour une installation donnée, selon les conditions hydrogéologiques et les besoins thermiques, il est alors possible d'implanter plusieurs doublets en parallèle. De même, le nombre des ouvrages de production et d'injection pourra être différent. Ce choix doit s'appuyer sur les conclusions d'un bureau d'études spécialisé.

De plus, afin d'assurer une durée de vie correcte à l'installation et d'éviter tout risque de dégradation de la ressource en eau souterraine, les ouvrages doivent impérativement être réalisés selon les règles de l'art, notamment la norme AFNOR NF X10-999 et le fascicule de documentation FD X10-980.

Conditions nécessaires pour une mise en place

Pour fonctionner correctement, une installation sur doublet géothermique doit bénéficier d'un débit d'eau régulier et suffisant. Dans certains cas, si la pression de l'eau contenue dans le réservoir permet au fluide de jaillir au-delà de l'altitude du sol, le puits est artésien et peut se suffire à lui-même jusqu'à un certain débit. Dans le cas usuel (c'est le cas sur le territoire de Clermont Communauté), il est nécessaire d'avoir recours à un dispositif de pompage. A minima, ce dispositif de pompage comporte une pompe hydraulique immergée, c'est-à-dire descendue en profondeur dans l'ouvrage et, parfois, un pompe pour assurer la réinjection. Cela se produit lorsque les forages sont artésiens ou en cas de fort débit d'exploitation.

Habituellement, on a tendance à considérer qu'une exploitation géothermique n'est intéressante que si le débit de production peut être supérieur à 5 m³/h en continu pendant la saison de chauffage ou pendant la saison de rafraîchissement. A titre indicatif, un tel débit autorise une puissance thermique de l'ordre de 30 kW correspondant à la quantité de chaleur échangée avec l'eau de l'aquifère.

Nota : Sur le territoire de Clermont Communauté, il est constaté que nombre de secteurs se situent légèrement sous ce seuil de 5 m³/h. Il est donc important de rappeler que, localement, et sous réserve de validation par un hydrogéologue, une installation individuelle peut exploiter des débits plus faibles, par exemple de 2 à 3 m³/h.

Justification de la réinjection

Afin de préserver la ressource en eau souterraine, il est toujours recommandé de pratiquer la réinjection de l'eau géothermale dans l'aquifère d'origine, eau refroidie en cas d'usage pour du chauffage et réchauffée en cas d'usage pour du rafraîchissement. La réinjection permet, notamment, de maintenir les pressions au sein du réservoir aquifère. Outre le fait de limiter la dépense énergétique de pompage (électricité) pour l'installation elle-même, cette réinjection limite considérablement les impacts sur les ouvrages avoisinants. Elle est donc essentielle.

Incidence du fonctionnement sur le milieu environnant et extension spatiale d'un doublet

L'eau est prélevée via un premier forage de production et, après passage dans l'échangeur de la machinerie thermodynamique, cette eau est en principe réinjectée via un deuxième forage (principe du doublet). La principale contrainte hydraulique est de maintenir le niveau piézométrique dans les limites acceptables, en particulier dans le puits de réinjection afin d'éviter une remontée en surface et/ou le long de l'ouvrage (Illustration 76). Si, conformément aux règles de l'art, les précautions de dimensionnement et de réalisation sont prises pour éviter les interférences hydrauliques et thermiques entre les puits d'injection et de production et les doublets géothermiques ou forages environnants, la technique du doublet est une de celles qui respectent le mieux le milieu naturel.

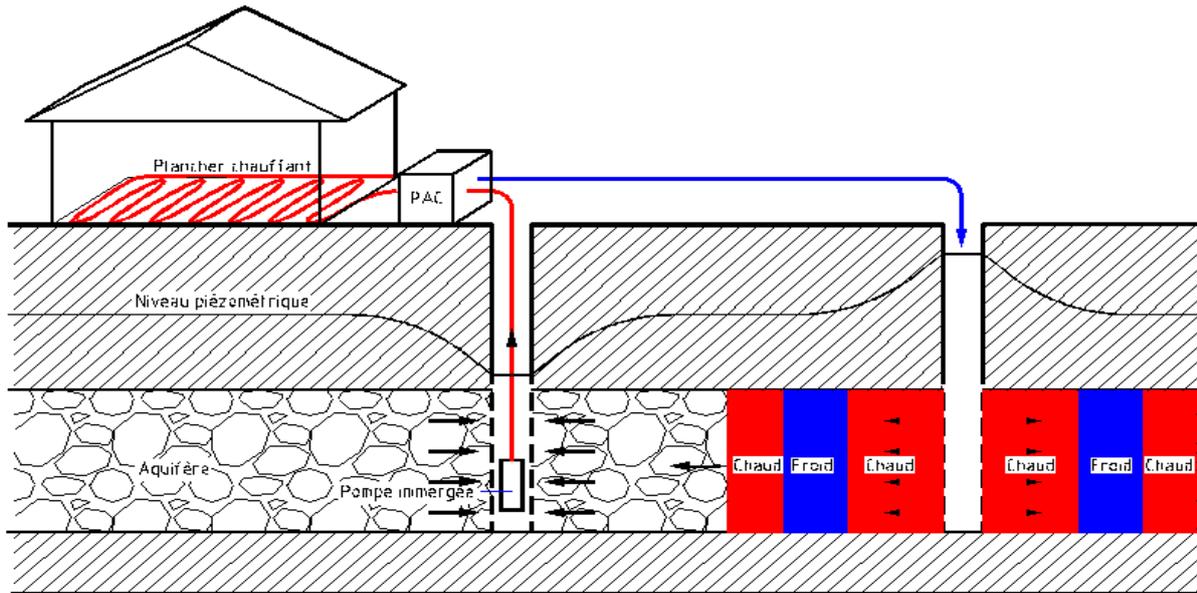


Illustration 76 : Visualisation des paramètres hydrauliques d'un doublet géothermique

Au voisinage des ouvrages de réinjection, on va constater la création d'une zone froide ou chaude selon l'usage (Illustration 76) d'extension progressivement croissante. Evidemment, cette zone peut se déplacer sous l'influence de l'écoulement de la nappe. En conséquence, les doublets doivent être dimensionnés de façon à ce que les fronts thermiques ne perturbent pas les puits de production, y compris pour les exploitations voisines. Il s'agit de gérer durablement la ressource et son exploitation et d'éviter les interférences.

Des règles de calcul permettent d'estimer ces zones d'influences. En première approximation, pour une nappe aquifère donnée, on pourra estimer un rayon d'influence thermo-hydraulique R_{th} qui est un indicateur représentatif de la progression de la "bulle thermique". Ce rayon R_{th} dépend directement du débit Q et du temps t de fonctionnement de l'ouvrage. On peut convenir d'une représentation simplifiée à l'aide de la formule suivante :

$$R_{th} = k \cdot \sqrt{Q \cdot t}$$

où k est une constante déterminée par essai ou estimée par calcul pour l'aquifère considéré.

Cette indication de distance contribue à l'expression de la puissance géothermique pouvant être installée. En effet, en observant la formule ci-avant, on peut déduire que la surface matérialisée par le rayon R_{th} est directement proportionnelle au débit Q . Or, la puissance géothermique est également proportionnelle au débit Q . On peut donc établir un lien entre la puissance géothermique pouvant être extraite et l'unité de surface au sol.

Il s'agit d'une puissance spécifique qui s'exprime en W/m^2 . Elle est représentative de la puissance géothermique pouvant être installée, c'est-à-dire de la puissance thermique pouvant être extraite dans la période de l'année qui sollicite le plus la géothermie.

Au chapitre 3, dans le paragraphe relatif à la restitution des ressources géothermiques, c'est le rayon R_{th} ci-dessus qui a été employé pour exprimer, pour chacun des secteurs aquifères de Clermont Communauté, la distance D à respecter entre deux ouvrages, puis pour proposer une puissance spécifique pour chacun des secteurs aquifères identifiés.

6.5. TECHNIQUE DE LA SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE (BOUCLE FERMEE)

Ce chapitre a pour objet de décrire les particularités des sondes géothermiques verticales, notamment en termes de mise en place et de fonctionnement. Les informations d'ordre technique sont reportées en annexe.

6.5.1. Présentation

La technique des sondes géothermiques verticales est adaptée pour exploiter les échanges de chaleur avec les formations géologiques sans que ces dernières aient besoin d'être aquifères.

Dans le cas des niveaux géologiques superficiels (typiquement à moins de 100 m de profondeur) localisés sur le territoire de Clermont Communauté, le niveau de la température est compatible avec les applications de chauffage et de rafraîchissement :

- pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, une pompe à chaleur est indispensable ;
- le rafraîchissement des locaux peut se faire en usage direct alors que les applications de climatisation nécessitent une pompe à chaleur.

Pour les communes de Clermont Communauté situées respectivement en plaine et en altitude, les gradients géothermiques indicatifs sont représentés par l'illustration 77 ci-dessous.

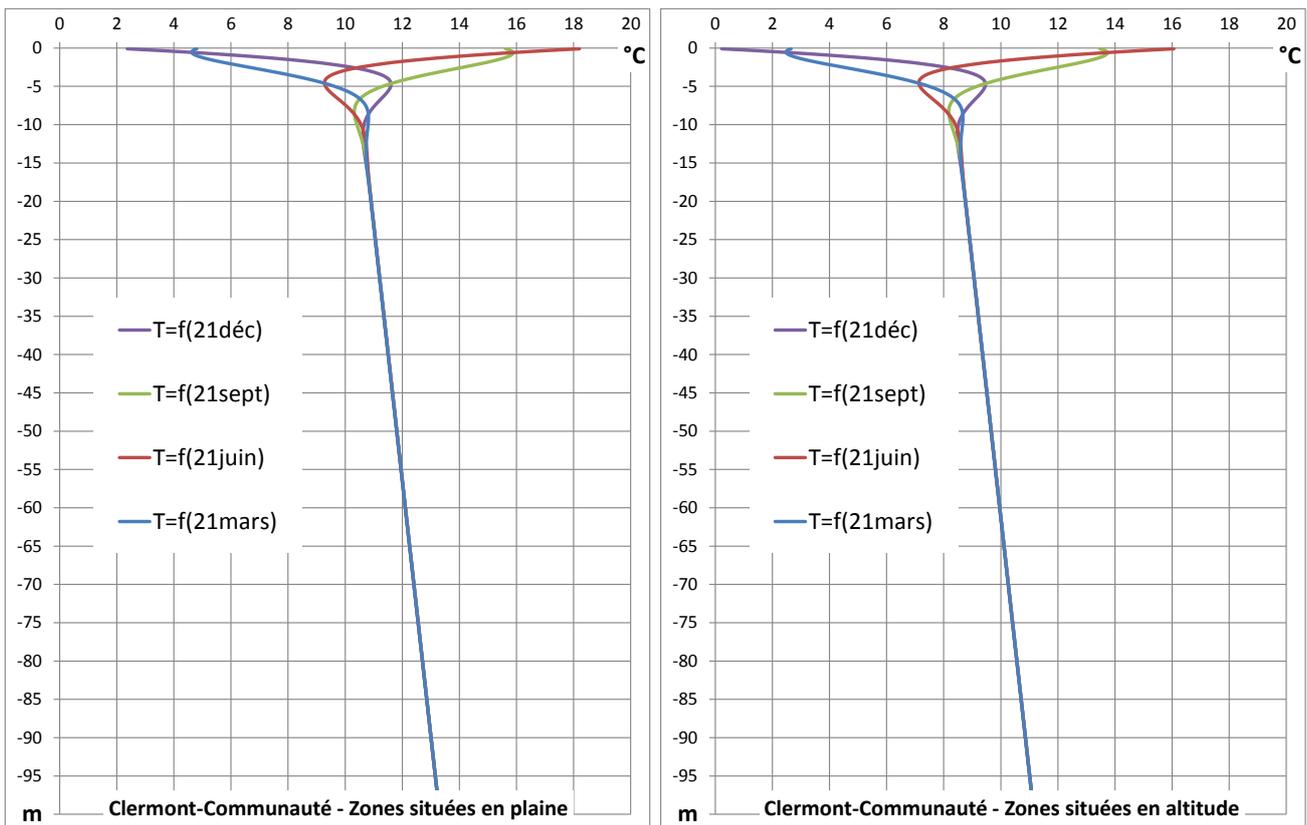


Illustration 77 : Gradients géothermiques indicatifs sur le territoire de Clermont Communauté

Technique de la sonde géothermique verticale (SGV)

Sur le schéma qui suit (Illustration 78), on constate que le fluide caloporteur circule dans des conduites étanches installées dans des forages, plusieurs forages pouvant être implantés en parallèle. Chacun de ces ouvrages contient une sonde géothermique qui n'échange que de la chaleur avec les formations géologiques. **Le fonctionnement se fait en boucle fermée.**

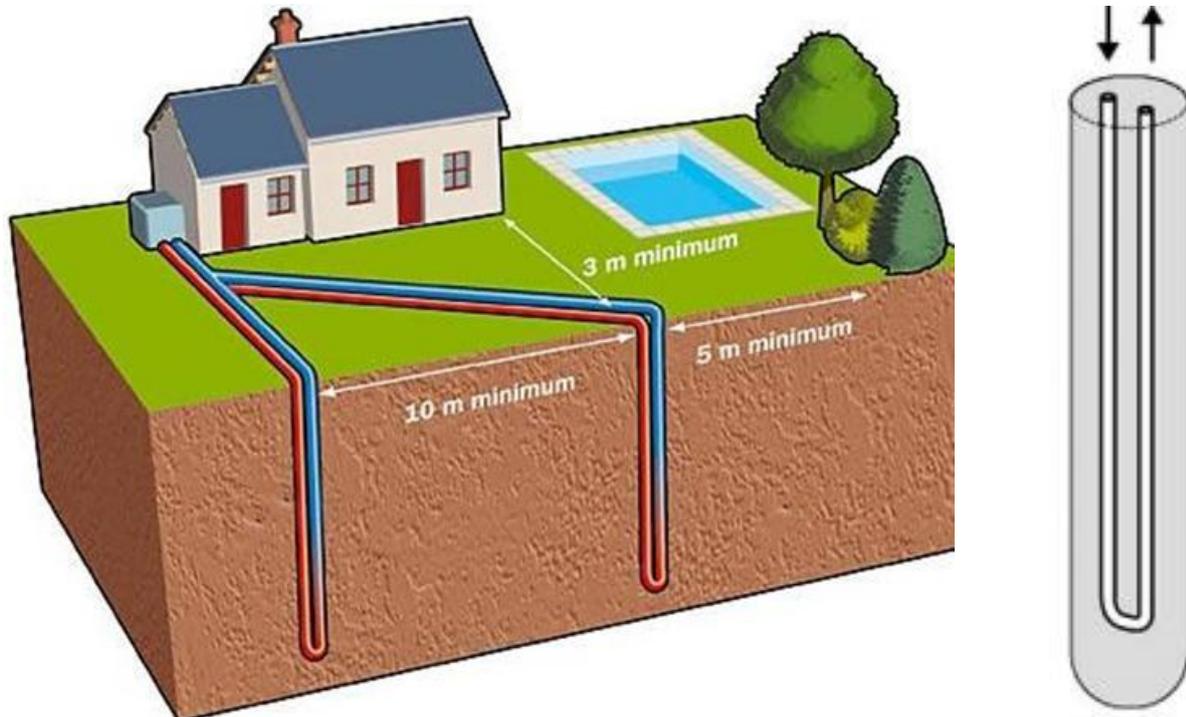


Illustration 78 : Principe de la sonde géothermique verticale (source : BRGM)

Il existe plusieurs techniques d'échangeur de chaleur enterré mais seule la technique des sondes géothermiques verticales est prise en considération dans le présent rapport pour représenter cette famille de solutions. A une échelle urbaine, ne sont réellement significatives en termes de puissances thermiques installées que ces techniques sur sondes géothermiques et champs de sondes géothermiques, et les fondations géothermiques, cette dernière technologie étant réservée aux bâtiments neufs.

Sur le principe, ces techniques sont des échangeurs de chaleur dont l'extension est majoritairement verticale. Le phénomène physique exploité est la diffusion de la chaleur par conduction thermique dans les roches (solides). Le paramètre déterminant est donc la surface d'échange entre l'échangeur géothermique et les roches avec lesquelles on souhaite échanger de l'énergie thermique, pour le chauffage ou pour le rafraîchissement.

Typiquement, les sondes géothermiques verticales ont un diamètre compris entre 120 mm et 180 mm et leur profondeur va d'une cinquantaine de mètres à 200 m, la profondeur usuelle étant 100 m. La bonne qualité du contact entre les conduites en matière synthétique (PEHD) et les formations géologiques nécessite une cimentation.

Conditions nécessaires pour une mise en place

Une SGV pour un usage individuel présente l'intérêt de mobiliser qu'une relativement faible emprise foncière, notamment pendant la phase de foration. Dans la pratique, une SGV peut

être implantée en tout lieu où un forage peut être réalisé, c'est-à-dire là où il n'y a pas de restriction (cavité souterraine, zone protégée, risque géologique ...). Ces zones de restriction sont connues des bureaux d'études et des autorités. Les sondes géothermiques peuvent donc être implantées en ville, des autorisations et/ou des moyens techniques spécifiques pouvant être nécessaires pour pouvoir réaliser les travaux de forage.

En l'absence de note de calcul formulée sous contrôle d'un maître d'œuvre compétent, on retiendra qu'il n'est pas possible d'implanter des sondes géothermiques sans respecter les précautions de distance représentées par l'illustration 78.

Important : Typiquement, la puissance thermique unitaire d'une sonde géothermique est comprise entre 3 kW et 6 kW. De ce fait, pour satisfaire les besoins du confort thermique d'un bâtiment, plusieurs sondes géothermiques pourront être nécessaires.

Si l'usage prioritaire est le mode chaud (chauffage + ECS), la puissance installée des SGV doit satisfaire ce besoin lors de la période la plus froide de l'année, soit vers la fin janvier sur le territoire de Clermont Communauté.

En été, le système raccordé aux sondes géothermiques peut être inversé pour fonctionner en mode rafraîchissement direct ou en mode climatisation (si la PACg est réversible). Si ce besoin est plus important que celui du mode chaud, alors le calcul de la puissance installée se fera pour la période estivale. Ce sera le cas pour certains locaux tertiaires où l'excédent d'énergie thermique à évacuer peut être très élevé proportionnellement aux besoins en chauffage.

Incidence du fonctionnement sur le milieu environnant

La puissance thermique que peut échanger une sonde géothermique est admissible au regard des quantités d'énergie contenues dans les formations géologiques et des apports d'énergie thermiques en provenance, notamment, des échanges thermiques avec l'atmosphère à la surface du sol.

Toutefois, il faut remarquer que l'utilisation hivernale d'une sonde géothermique a pour conséquence de refroidir le sol alors que l'utilisation pour du rafraîchissement estival a pour conséquence de réchauffer le sol. Or, la diffusion thermique de la chaleur (chaud ou froid) dans les roches reste faible car ces milieux sont assez peu conducteurs de la chaleur, même lorsqu'ils sont saturés en eau.

De ce fait, il peut être judicieux de prévoir une utilisation des sondes géothermiques qui alterne les demandes en chaud et en froid. Cela aura pour effet de rendre imperceptible l'usage d'une SGV au-delà d'une distance pouvant être très courte.

Dans le présent document, on considère qu'une mise en place sans condition particulière, qui respecte les règles de l'art pour la mise en place et l'exploitation, ne génère pas d'interférence perceptible par le voisinage au-delà d'une dizaine de mètres.

Quantitativement, cela signifie qu'une densité à l'hectare de l'ordre de 15 à 20 sondes géothermiques individuelles est envisageable sans risque notable d'interférence thermique.

C'est précisément cet ordre de grandeur qui est pris en considération dans le présent document (16 sondes à l'hectare) sachant que le mode d'exploitation de ces sondes peut permettre une densification significative des implantations. Toutefois, l'intervention d'un bureau d'études compétent est alors recommandée. Ce point est discuté ci-après avec les champs de sondes.

Cas particulier des champs de sondes géothermiques

Le cas particulier de l'implantation d'un grand nombre de sondes géothermiques dans un espace restreint correspond à la technique du champ de sondes géothermiques. Cette technique peut être mise en œuvre pour des puissances thermiques allant de quelques dizaines de kW (à partir de 10 ou 15 sondes) à quelques centaines de kW (typiquement 100 ou 150 sondes), voire plusieurs MW, soit, selon leur profondeur, de l'ordre de 300 sondes et plus.

Dans ce cas précis des champs de sondes, le bureau d'études devra exprimer les conditions de mise en place et d'exploitation qui garantissent la pérennité de la ressource géothermique. Il s'agit notamment de considérer les quantités d'énergie thermique qui peuvent être puisées instantanément et annuellement de manière à ne pas provoquer un épuisement momentané ou progressif de la ressource.

Le calcul du bureau d'études portera alors sur l'équilibre entre les puisages pour le mode chaud et les puisages pour le mode froid. En effet, l'utilisation hivernale a pour conséquence de refroidir le sol alors que l'utilisation pour du rafraîchissement a pour conséquence de réchauffer le sol. Un équilibre peut donc être trouvé entre ces échanges et ce que peut fournir le milieu naturel : roches, infiltration d'eau de pluie, aquifères éventuels ...

Le bureau d'études pourra alors implanter les sondes à des distances les unes des autres significativement inférieures à celles indiquées pour les sondes individuelles (Illustration 78) pour favoriser la constitution de stocks thermiques à des niveaux qui favorisent la performance énergétique annuelle du système :

- en hiver, il s'agit de constituer un stock froid suffisant pour autoriser le rafraîchissement estival en usage direct pendant toute la saison estivale ;
- en été, il s'agira de contribuer à régénérer l'énergie contenue dans les roches à un niveau de température proche de la température initiale, voire de constituer un stock chaud à un niveau de température supérieur à la température initiale des roches.

Dans tous les cas de figures ci-avant, les interférences avec le milieu avoisinant pourront être grandement limitées et, par exemple, rester imperceptibles au-delà d'une dizaine de mètres de distance vis-à-vis de la bordure du champ de sondes.

Localisation des sondes et champs de sondes vis-à-vis du bâti

Contrairement aux idées reçues, les sondes géothermiques peuvent parfaitement être implantées sous un bâtiment neuf. Dans ce cas, il faudra s'assurer que l'exploitation thermique du sous-sol ne viendra pas perturber les géostructures qui portent le bâtiment, en établissant un programme d'exploitation été/hiver à long terme et en s'assurant continuellement que ce programme est respecté. Ce type d'implantation reste rare et la technique des fondations géothermiques est plus souvent mise en œuvre, bien que procurant moins de puissance thermique et étant plus contrainte en termes de plage de températures admissibles.

En requalification et en développement urbain, les champs de sondes sont généralement recouverts d'espaces verts et ils desservent les bâtiments environnant au travers d'un réseau ou d'un micro-réseau.

Contrairement à la technique du doublet sur aquifère, la technique des sondes et champs de sondes paraît envisageable sur l'ensemble du territoire de Clermont Communauté, hormis dans les zones de restriction qui s'appliquent à la réalisation de forages.

Cas particulier des fondations géothermiques

Les fondations géothermiques (Illustration 79), parfois dénommées "géostrucures énergétiques" ou "fondations thermoactives", sont des échangeurs de chaleur enterrés au même titre que les champs de sondes géothermiques verticales ci-avant décrits.

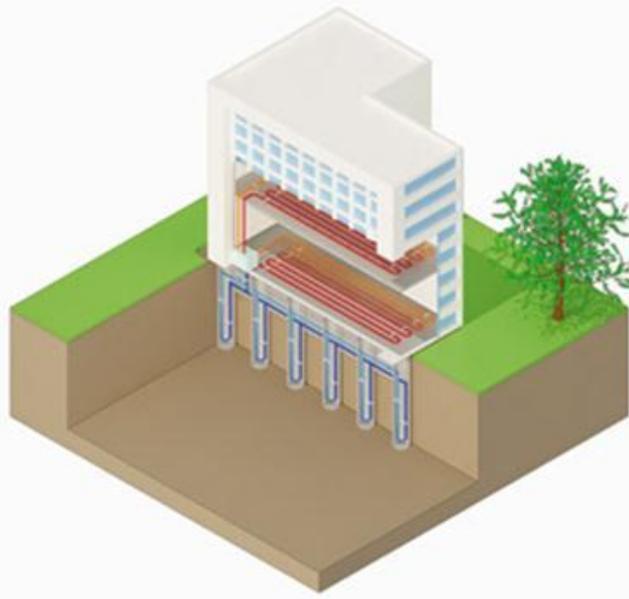


Illustration 79 : Principe des fondations géothermiques (source : BRGM)

Toutefois, leur mise en place est réservée aux constructions nouvelles. L'état de l'art montre qu'il est possible d'envisager différentes géostrucures énergétiques, essentiellement :

- les pieux et micro-pieux de fondation ;
- les parois moulées ;
- les dalles et radiers.

Sauf rares exceptions, ces géostrucures énergétiques sont exclusivement affectées aux usages du bâtiment sur lesquelles il repose. L'intérêt mis en avant est que le coût à la mise en place n'est qu'un surcoût marginal car une part importante des dépenses est déjà, de toute façon, engagée pour la réalisation indispensable des fondations. D'une manière générale, le principe technique revient à équiper tout ou partie des éléments de fondations de conduites noyées dans les bétons de manière à pouvoir y faire circuler un fluide caloporteur, généralement de l'eau claire. Le fonctionnement sera obligatoirement constitué d'une part de prélèvement de chaleur (chauffage, ECS) et d'une part d'injection de chaleur (rafraîchissement, climatisation).

Important : Cette technique est soumise à une contrainte forte liée à la préservation des fonctionnalités de portance du bâti. Pour cette raison, la plage des températures admissibles auxquelles les sols peuvent être portés est particulièrement restreinte. Par exemple, en mode "prélèvement de chaleur" le fluide caloporteur circulant dans les géostrucures ne pourra pas descendre sous 6 °C alors qu'il peut avoisiner 0 °C pour les sondes géothermiques. De même, en mode "injection de chaleur", on préférera ne pas porter le fluide trop au-delà de 20 °C alors que cette limite est portée à 40 °C pour les sondes géothermiques.

Il en résulte que la puissance géothermique installée reste relativement faible, pouvant couvrir toutefois les besoins d'un bâtiment collectif / tertiaire de plusieurs étages.

6.6. TECHNIQUES POUR EXPLOITER L'ENERGIE DES EAUX USEES

Ce chapitre a pour objet de décrire les particularités des solutions de récupération de l'énergie thermique contenue dans les eaux usées. Ce chapitre est relativement détaillé pour palier à la faible accessibilité des informations sur ces techniques vis-à-vis de celles sur les techniques géothermiques. Des compléments d'information technique figurent également en annexe.

6.6.1. Observations

Présence d'eaux claires parasites permanentes (ECP) dans les réseaux

Sur le territoire de Clermont Communauté, il a été constaté que les réseaux étaient en cours de rénovation suite à un diagnostic effectué il y a quelques années (rapport SAFEGE, 2009). Toutefois, certaines des conduites conservent encore une part significative d'Eaux Claires Parasites Permanentes (ECP) dans les données qui ont pu être consultées. Si ce débit d'ECP devait perdurer, alors ces conduites pourraient être le siège d'une récupération d'énergie, la technique à mettre en œuvre étant alors comparable à celle d'une opération géothermique, avec toutefois la contrainte de la température en dessous de laquelle il ne faudrait pas descendre afin de ne pas perturber le fonctionnement de la STEP.

Finalité du projet ECOCITE

Une des finalités du projet ECOCITE est de proposer des méthodes allant dans le sens de l'efficacité énergétique. Aussi, la question de la récupération des énergies contenues dans les eaux usées a été abordée en distinguant les énergies contenues dans les eaux grises (intérieur du bâtiment), dans les eaux noires (intérieur du bâtiment) et dans les égouts.

6.6.2. Définitions : eaux usées, eaux grises, eaux noires

Les eaux usées sont des eaux altérées par les activités humaines à la suite d'un usage domestique, industriel, artisanal, agricole ou autre. Elles sont considérées comme polluées et, à ce titre, doivent être traitées avant tout rejet dans le milieu naturel. Les eaux usées sont qualifiées **d'eaux grises** lorsqu'elles sont peu chargées en matières polluantes, par exemple quand elles sont d'origine domestique, résultant du lavage de la vaisselle, des mains, des bains ou des douches. On parle **d'eaux noires** lorsqu'elles contiennent diverses substances plus polluantes ou plus difficiles à éliminer telles que des matières fécales, des produits cosmétiques, ou tout type de sous-produit industriel mélangé à l'eau. On parlera aussi d'**eaux brutes** pour désigner les eaux dans les réseaux urbains (égouts) et d'**eaux épurées** pour désigner l'eau autorisée au rejet dans le milieu naturel en sortie de STEP (station d'épuration), la terminologie « **eaux brutes** » ne qualifiant en rien la qualité de cette eau.

Dans un réseau circulent également des flux généralement très peu pollués constitués d'**eaux claires**, souvent dénommées "eaux claires parasites", ou ECP, qui sont constituées des eaux permanentes (ECP) issues des infiltrations et des captages volontaires (ruisseaux canalisés dans les égouts) et des eaux météoriques (ECPM). Dans les **réseaux unitaires** et contrairement aux **réseaux séparatifs**, les eaux pluviales sont mélangées aux eaux usées, ce qui a pour effet d'augmenter périodiquement les débits et d'impacter le niveau de la température, généralement à la baisse, été comme hiver.

Le passage en réseau séparatif étant considéré comme extrêmement onéreux (1 500 €/m), d'une manière assez générale, la tendance est à réguler les débits d'eaux pluviales (souvent considérées en milieu urbain comme devant être traitées en STEP avant rejet dans le milieu

récepteur) via des stockages tampon (collecteurs équipés de vannes, bassins, ...). Une régulation dynamique est alors nécessaire.

6.6.3. Présentation de la technologie de récupération d'énergie dans les égouts

On peut considérer que la **récupération de la chaleur dans les égouts** a atteint une dimension commerciale au début des années 80, notamment avec l'installation du stade de Bâle (système Rabtherm conçu par Urs Studer, Illustration 80).

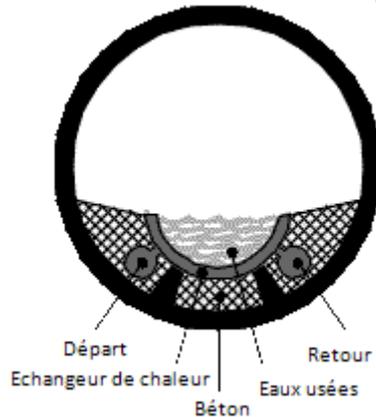


Illustration 80 : Principe du système Rabtherm installé dans les égouts

Quant à la **récupération de l'énergie des eaux usées avant déversement dans les égouts** (donc avant la sortie du bâtiment), elle semble commercialement remonter à seulement une petite vingtaine d'années même si des systèmes de récupération d'énergie des douches peuvent, ici et là, avoir été constatés antérieurement. En fait, il apparaît que l'amélioration des performances des pompes à chaleur est à l'origine de l'essor récent de ces techniques de récupération. Cela a été le cas à Bâle. Cela est également le cas pour les techniques qui s'appliquent à la **récupération d'énergie dans les eaux de rejet en aval des stations d'épuration** (STEP), la première installation étant peut-être celle d'Obermeilen à côté du lac de Zurich en 1975. Enfin, pour être complet, on remarquera que l'intérêt pour ces techniques se voit renforcé par la prise en considération des eaux usées comme source thermique pour le **rafraîchissement ou même la production de froid** (Illustration 81), les évolutions des systèmes thermodynamiques en étant, là encore, la clé de décision.

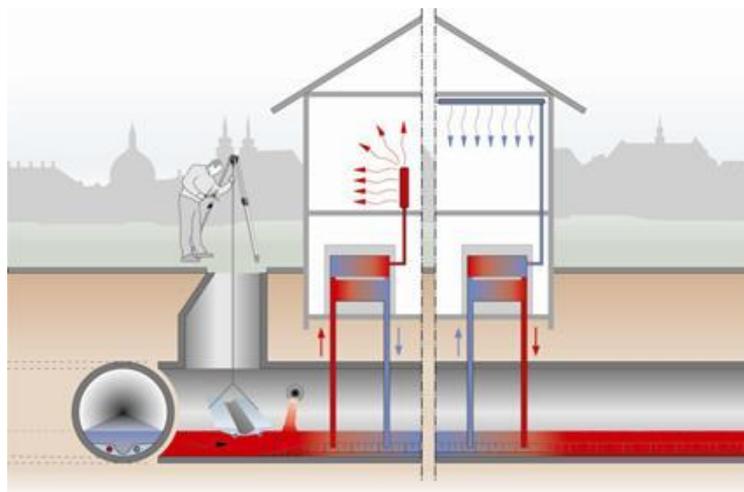


Illustration 81 : Principe d'utilisation des eaux usées pour le chauffage et pour le rafraîchissement

Maturité des techniques de récupération d'énergie dans les eaux usées

Avec un recul de quelques décennies, on peut considérer que les techniques, très succinctement évoquées ci-avant, sont arrivées à maturité et que, en conséquence, les bureaux d'études disposent de la compétence nécessaire pour mener à bien les études de pré faisabilité puis les études de détail. Néanmoins, on gardera à l'esprit la limite matérialisée par l'énergie que peuvent **continument** céder les eaux usées : 4.18 kJ/kg.°C.

Or, le débit d'eaux usées en milieu construit (secteur urbain) n'est pas infini, et surtout n'est pas permanent, sauf peut-être pour des conduites très importantes qui, seules, peuvent assurer un débit minimum à défaut d'être constant. Aussi, tout comme le projet WWH (Intelligent Energy Europe Waste Water-Heat), on pourra considérer que la récupération de l'énergie dans les égouts sera, du point de vue technico-économique, envisageable à partir du raccordement de 5 000 équivalent-habitants (EH), producteurs chacun d'environ 150 litres d'eau usée par jour. Le débit annuel moyen correspondant sera alors de 8.7 l/s (litres par seconde) dans le collecteur principal. Statistiquement, on peut vérifier cette hypothèse indicative en se basant sur les consommations d'eau potable indiquées par le graphique ci-dessous (ramenées à l'habitant et non pas au bâtiment), la tendance étant toutefois à la baisse en résultante des travaux engagés par les collectivités pour réduire les consommations.

Household water consumption in a European comparison

Data in litres per inhabitant and day *) household water consumption incl. small trades; latest available data
Source: OECD 1999; IWSA 1999; BGW Water Statistics 2004

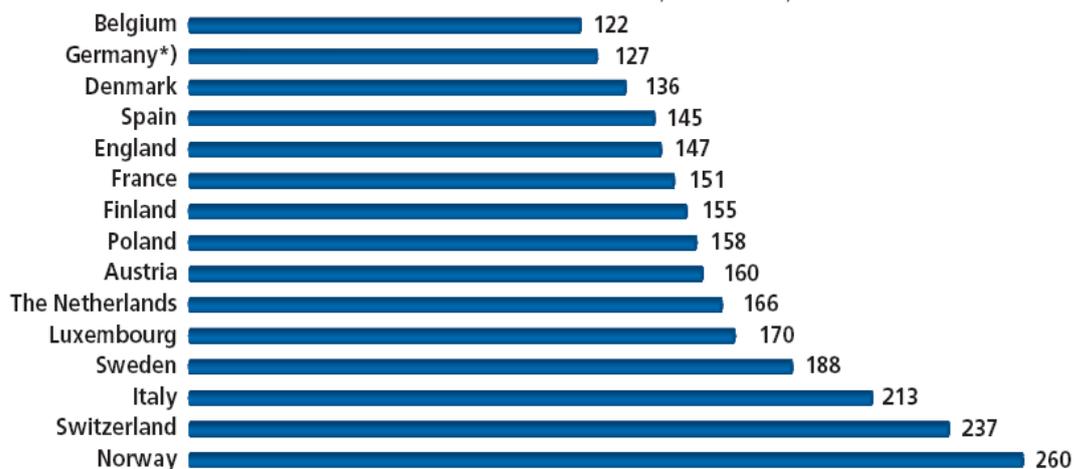


Illustration 82 : Quantités d'eaux en jeu par habitant en Europe

Disponibilité de la ressource thermique des eaux usées

Actuellement, les techniques de récupération de l'eau dans les égouts sont fortement envisagées par les collectivités locales. Aussi, sans pour autant émettre d'avis sur la pertinence de ces techniques, il est important de rapidement disposer d'un descriptif synthétique de la ressource thermique, et surtout de sa disponibilité.

Pour se faire une idée, il faut d'abord connaître les débits d'eaux dans l'égout que l'on voudrait équiper. Il faut alors disposer de mesures ou d'estimations des quantités d'eaux usées **et** les quantités parasites (eaux claires) qui constituent le mélange, sachant que les eaux claires ont tendance à abaisser le niveau de la température.

En principe, cette information est disponible car elle est utile au dimensionnement des stations d'épuration dont le fonctionnement est basé sur la charge polluante.

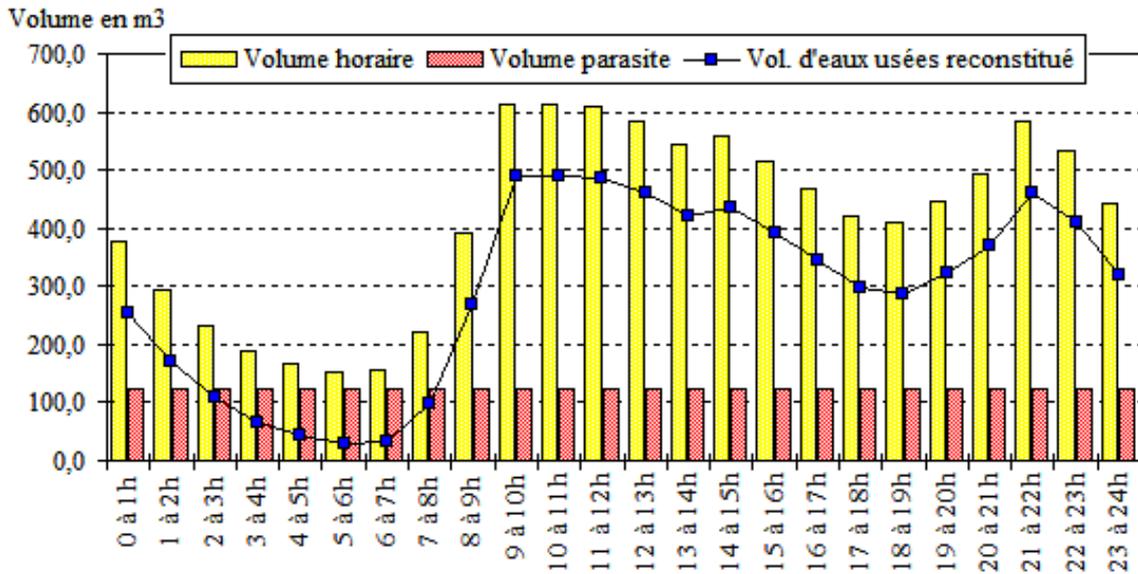


Illustration 83 : Constitution du flux d'eaux usées durant une journée

Le graphique ci-avant (Illustration 83) est extrait des données de la communauté urbaine de Bordeaux (CUB). Il montre que le débit des eaux claires (volume parasite) est relativement stable le long de la journée considérée.

Par calcul, on peut reconstituer le cycle quotidien du débit des eaux usées qui circule dans l'égout. Ce débit transportant plus de chaleur que les eaux claires, il est le plus intéressant pour les applications de chauffage. A l'inverse, pour les applications de rafraîchissement ou de production de froid, ce sont plutôt les eaux claires qui sont intéressantes, du moins en saison chaude. Le graphique ci-après (Illustration 84) montre que le débit mini (nocturne), qui est proche du débit des eaux parasites, varie relativement peu le long de l'année. Ainsi, le débit peut varier au fil des saisons mais, le plus souvent, les fluctuations resteront modérées, voire négligeables, comme le montre le graphique ci-après.

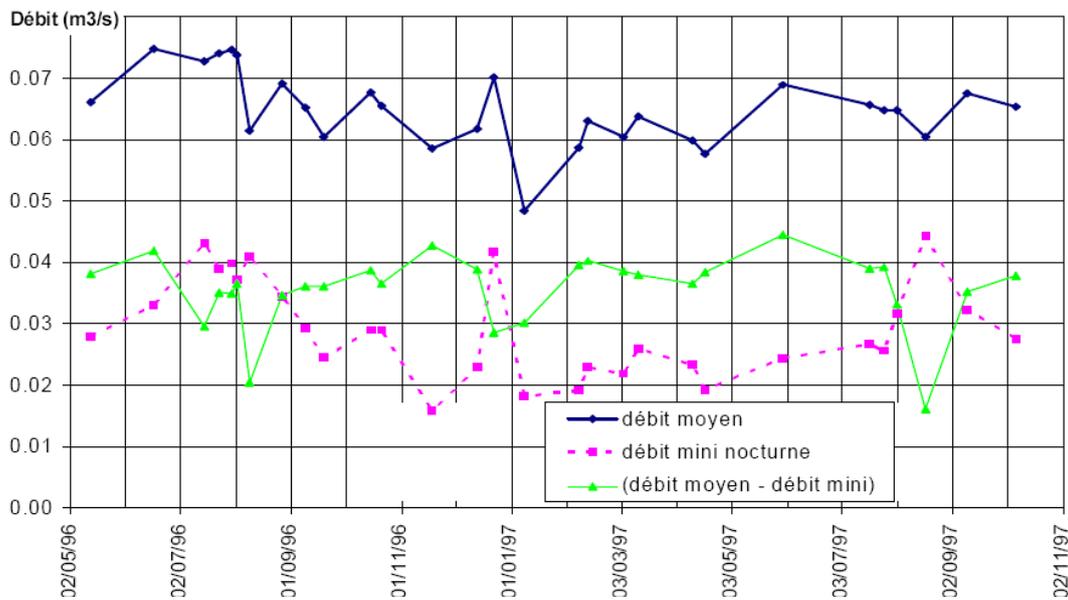


Illustration 84 : Débit moyen d'eaux usées selon la période de l'année

Evidemment, il faudra s'assurer que les spécificités périodiques liées à l'urbanisation du secteur restent sans incidence notable, comme c'est généralement le cas ainsi que le montre le graphique ci-après (Illustration 85), également basé sur les données de la CUB.

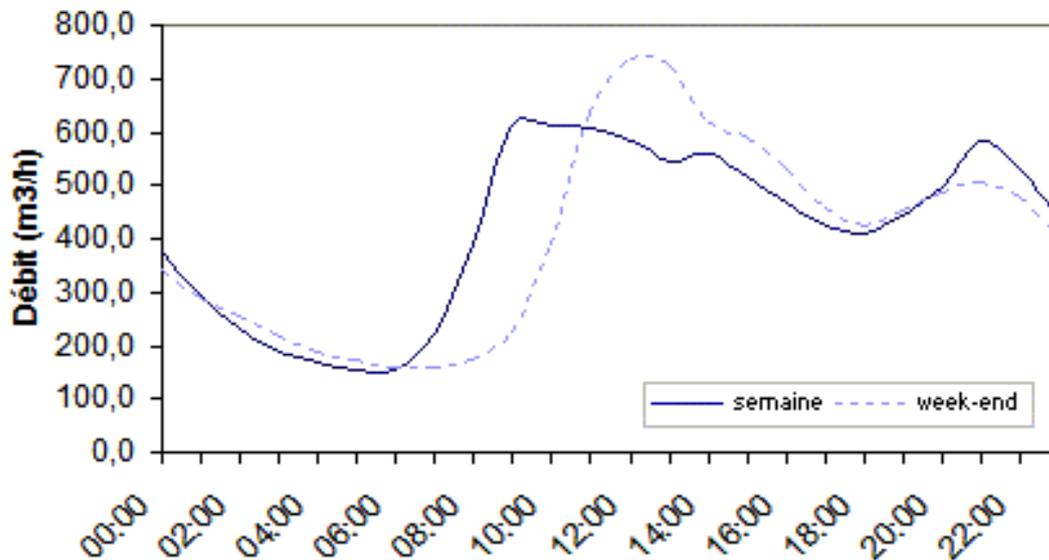


Illustration 85 : Débit d'eau selon le jour de la semaine

6.6.4. Quantités indicatives d'énergies en jeu

Energie dépensée pour produire l'ECS

Pour fixer simplement les ordres de grandeur, on va admettre un taux d'occupation moyen de 2 EH par logement et une surface moyenne de 70 m² par logement. Si l'énergie dépensée pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) est de 26 kWh/m² (source RT 2012, exprimée en énergie primaire, mais assimilée ici à de l'énergie utile), on aura une **dépense énergétique pour la production d'ECS de 910 kWh/an.EH.**

Energie disponible dans les eaux usées

La chaleur spécifique de l'eau est de 4.18 kJ/kg.°C. En admettant une production quotidienne de 150 litres d'eaux usées par jour et par équivalent.habitant (EH), l'énergie thermique disponible correspondante est de **63.6 kWh/an.EH** pour chaque °C prélevé ou apporté selon que l'application est pour du chauffage (via une PAC) ou pour du rafraîchissement (en usage direct), la température des effluents urbains se situant entre 12 et 20 °C (plus rarement jusqu'à 25 °C). Quelle que soit la conduite du réseau d'eaux usées, le débit d'eau restera fluctuant le long d'une journée et les études technico-économiques indiquent qu'un débit minimum de 8 à 10 kg/s est souhaitable pour pouvoir en exploiter l'énergie. Si l'inertie thermique des matériaux des conduites le permet, ce débit minimum pourra être relativement proche du débit moyen des conduites à faible débit.

Techniquement, on va considérer que, dans un égout, on va pouvoir échanger l'énergie qui correspond à un abaissement ou une élévation de 2 à 3 °C (4 °C dans certains cas) de la température des eaux usées qui y circulent, cela afin d'éviter les incidences sur le fonctionnement de la station d'épuration en aval. Par exemple, à un débit de 10 kg/s d'eaux usées correspondra une puissance thermique échangée de 84 kW si ΔT est de 2 °C (4.18 J/kg.°C x 10 kg/s x 2 °C = 84 kW).

Cette puissance thermique sera collectée par l'échangeur implanté dans l'égout et, corrigée des pertes dans les conduites, elle sera transportée vers la machinerie thermodynamique chargée de la transformer en une forme thermique exploitable (chaud, frais ou froid). Usuellement, il est admis que la distance entre l'échangeur dans les égouts et la machinerie thermodynamique ne doit pas excéder 300 m. En effet, la limite de puissance thermique disponible qui est associée à un débit d'eaux usées se voit confirmée par la limite acceptable sur le débit de fluide caloporteur (généralement de l'eau traitée) dans la boucle de récupération d'énergie, ce débit étant entretenu par des pompes électriques dont on doit limiter la consommation. La dépense électrique de pompage sera liée à la géométrie des échangeurs utilisés (dans les égouts et dans la machinerie) et à la longueur des conduites.

A l'étape de la préfaisabilité, on va pouvoir considérer que l'énergie de pompage ne doit pas excéder 5 % de l'énergie thermique collectée dans les égouts. De ce fait, il faudra éviter les débits trop importants dans la boucle de captage. Ainsi, par exemple, pour le même contexte que ci-avant, on pourra choisir de limiter le débit d'eau dans la boucle de captage thermique sous 2 kg/s (7.2 m³/h). Par voie de conséquence, il faudra imposer un ΔT de 10 °C aux bornes des échangeurs de chaleur dans la boucle de captage. Aussi, même si le pincement de l'échangeur dans l'égout est faible (typiquement moins de 1 °C), il faudra que la température du fluide caloporteur en entrée de l'échangeur soit d'au moins 10 °C inférieure à celle des eaux usées en amont de la zone d'échange (cas du mode chauffage). Par voie de conséquence, on peut difficilement imaginer un dispositif de récupération d'énergie thermique dans un égout sans pompe à chaleur (PAC) puisque la température des eaux usées des réseaux urbains oscille typiquement entre 12 °C en hiver et 20 °C en été. Autrement, il faudrait admettre un débit supérieur dans la boucle de récupération, or ce débit coûte en pompage.

Energie dépensée pour le retraitement

Le fonctionnement des systèmes d'assainissement requiert naturellement de l'énergie (pompage des effluents, aération...). Pour le service de l'assainissement, les ratios moyens donnés par les exploitants des grandes villes en France sont de l'ordre de 70 Wh/m³ pour le transport (pompage / relevage) et 2.8 kWh/kg de DBO₅ traitée (demande biochimique d'oxygène en cinq jours). Ramené à l'équivalent habitant (EH), cela représente chaque année de l'ordre de 3.8 kWh/an pour le transport et 61 kWh/an pour l'épuration, soit un total d'environ **65 kWh par an et par EH**, des valeurs jusqu'à 120 kWh/an.EH n'étant aucunement aberrantes. A contrario, les effluents de la station d'épuration peuvent donc aussi être considérés comme des sources potentielles d'énergie thermique :

- 1) la matière organique contenue dans les eaux usées, bien que partiellement oxydée au cours du traitement, est pour l'essentiel transformée en boue par la plupart des traitements. La boue est constituée pour environ 75 % de matière organique. Le contenu énergétique de la boue se situe vers 6 kWh/kg et, ramenée à l'équivalent habitant (EH), **l'énergie potentielle des boues est d'environ 88 kWh/an.EH** (exprimé sur PCI - Pouvoir Calorifique Inférieur) ;
- 2) une part de la matière organique des effluents est constituée de matières grasses. Ces dernières, récupérées en partie, ont un PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) de l'ordre de 33 kJ/g. Ramenée à l'équivalent habitant (EH), **l'énergie potentielle des graisses est d'environ 1.3 kWh/an.EH** (exprimé sur PCI) ;
- 3) dans le cas d'une chute d'eau en sortie de STEP, l'effluent ou l'eau traitée possède une énergie potentielle proportionnelle à la hauteur de chute (9.81 J/l.m). Ramenée à l'équivalent habitant (EH), **l'énergie potentielle des chutes d'eau en sortie de STEP est d'environ 1.5 kWh/an.EH** pour 10 m de hauteur de chute.

Récapitulatif des quantités indicatives d'énergie en jeu

Dépense de production d'ECS	910 kWh/an.EH
Dépense d'énergie pour le retraitement	65 kWh/an.EH
Récupération d'énergie dans l'eau usée	63 kWh/an.EH par °C de ΔT
Energie potentielle des boues de STEP	88 kWh/an.EH
Energie potentielle des graisses de STEP	1.3 kWh/an.EH
Energie potentielle des chutes d'eau	1.5 kWh/an.EH pour 10 m de chute

Illustration 86 : Quantités indicatives pour les énergies en jeu

Précisions sur la notion d'Équivalent-Habitant (EH)

L'EH est une unité de mesure permettant d'évaluer la capacité d'une station d'épuration. Cette unité de mesure se base sur la quantité de pollution émise par personne et par jour et exprimée en DBO₅ (demande biochimique d'oxygène en cinq jours). La directive européenne 91-271 du 21 mai 1991 définit l'équivalent-habitant comme la charge organique biodégradable ayant une demande biochimique d'oxygène en cinq jours (DBO₅) de 60 grammes d'oxygène par jour.

Définition : 1 EH = 60 g de DBO₅/jour (valeur maximum), soit 21,6 kg de DBO₅/an.

Convention : 1 EH = 150 litres d'eaux usées (flux hydraulique) par jour.

Nota : En réalité, un habitant produit entre 50 et 200 litres d'eaux usées par jour.

A titre indicatif, on pourra ramener à des bâtiments les grandeurs ci-dessous en charges polluantes dans les eaux usées domestiques en débits (Illustration 87).

Bâtiment ou complexe	Equivalent-habitant (EH)	Débit d'eaux usées (litres / jour)
Habitation de 4 pièces principales ou moins	4 EH	Convention de dimensionnement
Habitation de 5 pièces principales et plus	1 EH par pièce principale	
Usager permanent (habitant)	1 EH	150
Pensionnat, caserne, maison de repos	1 EH	150
Ecole (demi-pension) ou similaire	1/2 EH	75
Ecole (externat) ou similaire	1/3 EH	50
Hôpitaux, cliniques, etc.	3 EH par lit	450
Maison de soin	1.5 EH par lit	225
Personnel d'usine (par poste de 8h)	1/2 EH	75
Personnel de bureau, magasin	1/2 EH	75
Hôtel-restaurant, pensions de famille	2 EH par chambre	300
Hôtel (sans restaurant)	1 EH par chambre	150
Terrain de camping	1 à 1.5 EH par emplacement	150 à 225
Camping résidentiel	2 EH par emplacement	300
Locaux sportifs	1/20 EH par usager	7.5
Autres lieux publics	1/20 à 1/30 EH par usager	5.0 à 7.5

Illustration 87 : Grandeurs indicatives pour l'Equivalent-Habitant et les débits d'eaux usées

6.6.5. Analogie entre l'énergie de l'eau des égouts et l'énergie géothermique

Par analogie, on peut remarquer que les techniques de récupération d'énergie dans les eaux usées des égouts présente des similitudes avec les techniques employées en géothermie superficielle, notamment les machineries qui sont pratiquement semblables.

De plus, les eaux usées résultent d'un captage d'eau potable. De ce fait, si une analogie doit être effectuée, il est naturel de le faire par comparaison avec une solution géothermique qui exploiterait une ressource similaire à celle du captage d'eau potable.

Concernant les énergies électriques nécessaires pour le pompage et/ou la circulation dans la boucle primaire, elles sont globalement similaires à moins de 5 % de l'énergie thermique échangée. Ce point n'est donc pas déterminant.

Analogie avec une géothermie sur nappe aquifère

Vis-à-vis d'une technique de récupération de chaleur par géothermie sur nappe aquifère superficielle, une technique de récupération de chaleur sur eaux usées des égouts va typiquement abaisser la température des eaux usées de 2 à 4 °C, alors qu'une géothermie sur aquifère superficiel va typiquement abaisser la température de 6 °C. De ce fait, les débits d'eaux usées nécessaires à une puissance thermique donnée seront légèrement plus élevés. De plus, le débit dans les égouts est fluctuant, ce qui, si l'énergie qui y est disponible n'est pas surabondante, peut obliger à anticiper les demandes et à augmenter la dimension des réservoirs tampon.

En termes de maintenance, une boucle d'eau géothermale sur nappe superficielle nécessite, en général, une maintenance et une surveillance faibles, ce qui, là encore, rend les différences peu déterminantes.

On notera néanmoins les singularités suivantes (Illustration 88).

Géothermie sur nappe	Eaux usées des égouts
Température de la ressource	
<ul style="list-style-type: none"> • Constante sur l'année 	<ul style="list-style-type: none"> • Chaude en été (bon pour l'ECS mais pénalisant pour le rafraîchissement) • Froide en hiver (pénalisant pour l'ECS et le chauffage)
Disponibilité de la ressource	
<ul style="list-style-type: none"> • Constante (régulée par le pompage) 	<ul style="list-style-type: none"> • Cycles hebdomadaires • Cycles saisonniers
Occurrence	
<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite une nappe aquifère • Respect des réglementations 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite au moins 5 000 logements en amont du prélèvement thermique
Technicité spécifique	
<ul style="list-style-type: none"> • Doublet de pompage / réinjection 	<ul style="list-style-type: none"> • Echangeur dans les égouts • Boucle de transport (maxi 500 m)

Illustration 88 : Singularités vis-à-vis d'une géothermie sur aquifère superficiel

Analogie avec une géothermie sur champ de sondes (et éventuellement sur fondations géothermiques)

Du point de vue technique, les captages d'énergie thermique dans les eaux usées des égouts sont très semblables aux techniques géothermiques sur champs de sondes ou sur fondations géothermiques. En effet, dans tous les cas, il y a :

- i) implantation d'un échangeur,
- ii) transport de l'énergie avec un fluide caloporteur,
- iii) valorisation avec une machinerie thermodynamique.

En géothermie sur échangeurs enterrés de type "champ de sondes" ou "fondation géothermique", les valeurs de ΔT exploitable seront comparables à celles des techniques sur égouts et s'établissent entre 2 à 4 °C.

Toutefois, la stratégie d'exploitation est sensiblement différente puisque les techniques géothermiques en question sont disponibles en permanence et, de plus, peuvent permettre une accumulation saisonnière d'énergie thermique alors que le prélèvement dans les égouts subit les cycles de la température des eaux usées.

En termes de maintenance, une boucle d'eau sur échangeur géothermique nécessite, en général, une maintenance pratiquement nulle. De plus, la durée de vie des équipements est réputées très longue, la durée de vie des conduites enterrées étant garantie au-delà de 50 ans. Ce point est différentiant vis-à-vis des techniques de récupération d'énergie dans les égouts.

On notera également les singularités ci-après présentées (Illustration 89).

Géothermie sur champs d'échangeurs	Eaux usées des égouts
Température de la ressource	
<ul style="list-style-type: none"> • Accumulation de frigories en hiver • Accumulation de calories en été • Peut être pilotée par l'exploitant 	<ul style="list-style-type: none"> • Chaude en été (bon pour l'ECS mais pénalisant pour le rafraîchissement) • Froide en hiver (pénalisant pour l'ECS et le chauffage)
Disponibilité de la ressource	
<ul style="list-style-type: none"> • Toujours disponible • Peut être gérée par zones 	<ul style="list-style-type: none"> • Cycles hebdomadaires • Cycles saisonniers
Occurrence	
<ul style="list-style-type: none"> • Respect des réglementations 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite au moins 5 000 logements en amont du prélèvement thermique
Technicité spécifique	
<ul style="list-style-type: none"> • Echangeurs à implanter dans les terrains ou dans les fondations 	<ul style="list-style-type: none"> • Echangeur dans les égouts • Boucle de transport (maxi 500 m)

Illustration 89 : Singularités vis-à-vis d'une géothermie sur champ de sondes ou fondations

7. Bibliographie

- ANTEA Group (2011).** Lycée Pierre Boulanger, Pont du Château (63). Etude de préfaisabilité pour l'alimentation en eau souterraine d'une pompe à chaleur. Rapport n° 60603/A. 18 p.
- ANTEA Group (2011).** Evaluation du potentiel de récupération d'énergie thermique dans les réseaux d'assainissement de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Rapport N°A61689/A pour l'Observatoire Régional de l'Energie Provence-Alpes-Côte d'Azur.
- ANTEA (2006).** Construction de l'Hôtel de région Auvergne à Clermont-Ferrand. Etude de faisabilité géothermique. Rapport n° 41768/A. 12 p.
- A'urba (2010).** Potentialités de récupération des calories des eaux usées pour les sites de projets du territoire communautaire. Rapport d'étude de l'Agence d'Urbanisme Bordeaux métropole Aquitaine.
- Belkessa R. (1976).** Données hydrogéologiques acquises en Limagne de Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme), carte géologique à 1/5000 Clermont-Ferrand. Rapport BRGM n° 76 SGN MCE. 24 p.
- Bertin C., Rouzaire D., Vigouroux P., Loizeau M. (2003).** Amélioration de la connaissance des ressources en eau souterraine des sites thermaux en Auvergne. Site de Royat-Chamalières (63). Rapport BRGM RP-52195-FR. 99 p., 10 ann.
- BRGM (1989).** Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. Région de Clermont-Ferrand Est. Echelle 1/25000. Rapport n° 89AUV020.
- BRGM (2007).** Inventaire départemental des cavités souterraines hors-mines du Puy-de-Dôme. BRGM/RP-55860-FR. 98 p.
- BRGM (2007).** Aubière (63). Cartographie des cavités souterraines et diagnostic préliminaire des risques associés à leur présence. BRGM/RP-54570-FR. 64 p.
- BRGM (2010).** Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Puy-de-Dôme. BRGM/RP-59125-FR. 225 p.
- CETE-BRGM (2009).** Bilan hydrogéologique des bassins de la Chaîne des Puys. Rapport définitif. CETE Lyon/LRPC 63/07/19728 - BRGM RP-57092-FR.167 p.
- D'Arcy D., Jeambrun M. (1983).** Construction du S.G.R. à Clermont-Ferrand. Forage d'eau pour P.A.C. aux Cézeaux. Rapport BRGM 83 AUV 008.
- Drouillat C. (2006).** Les sources de l'amphithéâtre clermontois. Master 1 Géoenvironnement. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.
- Risler J.-J., D'Arcy D. (1974).** Les zones d'émergences préférentielles d'eaux thermo-minérales à Clermont-Ferrand. Rapport BRGM 74 SGN 431 MCE. 14 p, 5 ann.
- Risler J.-J. (1973).** Projet de piscine à Chamalières (Puy-de-Dôme). Possibilité d'alimentation en eau souterraine chaude. Rapport BRGM 73 SGN 122 MCE. 8 p.
- SEAU - Société d'équipement d'Auvergne (1968).** Rénovation urbaine du fond de Jaude. Etude préliminaire des formations et de la nappe. 10 p., 2 ann.
- SOGREAH (2010).** Délimitation des aires d'alimentation des captages prioritaires en région Auvergne. SIAEP Basse Limagne, SIAEP Rive Gauche de la Dore et SIAEP Dore Allier. Rapport de phase n° 1741569.

Annexe 1.

Synthèses cartographiques pour les eaux usées

A titre d'information, chacune des pages à suivre présente, par ordre alphabétique pour chacune des communes de Clermont Communauté, une carte des potentialités thermiques sur eaux usées, à savoir les seuils de débit autorisant une exploitation thermique des eaux usées. Lorsqu'elle est disponible dans l'étude SAFEGE de 2009, la carte des réseaux de la commune a été reportée sur la même page.

La version numérique de ces cartes des potentialités thermiques sur eaux usées réalisées par le BRGM fait l'objet d'un atlas disponible sur CD-ROM.

**Figure en partie haute de la page :
Cartes des seuils de débits des réseaux d'eaux usées
en vue d'une exploitation thermique (toutes ces cartes sont disponibles)**

-

Selon un code couleur, cette figure présente le seuil de débit des réseaux d'eaux usées au regard d'une exploitation thermique – Ce seuil est fixé à 18 m³/h (5 l/s)

Lorsque le débit n'est pas connu, le BRGM a calculé une estimation.

Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
-  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
-  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
-  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique

**Figure en partie basse de la page :
Cartes des affectations des réseaux d'eaux usées Source SAFEGE 2009
(toutes les cartes ne sont pas disponibles)**

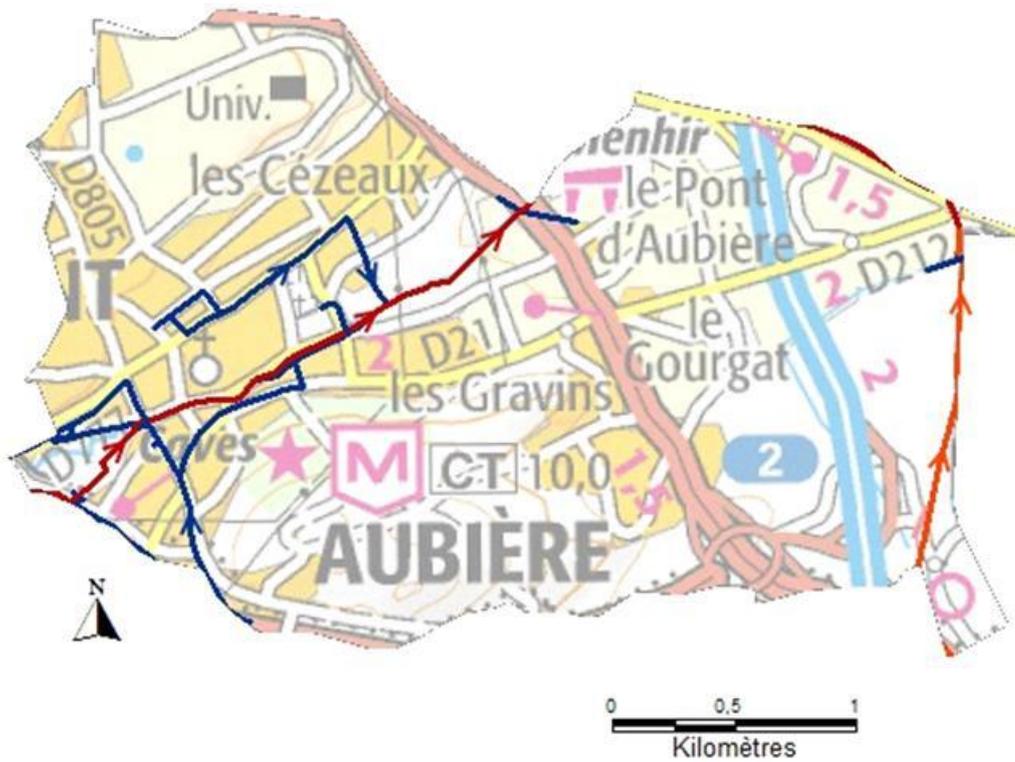
-

Selon un code couleur, cette figure présente l'affectation des réseaux d'eaux usées et localise les différents ouvrages caractéristiques

Lorsque le débit n'est pas connu, le BRGM a calculé une estimation.

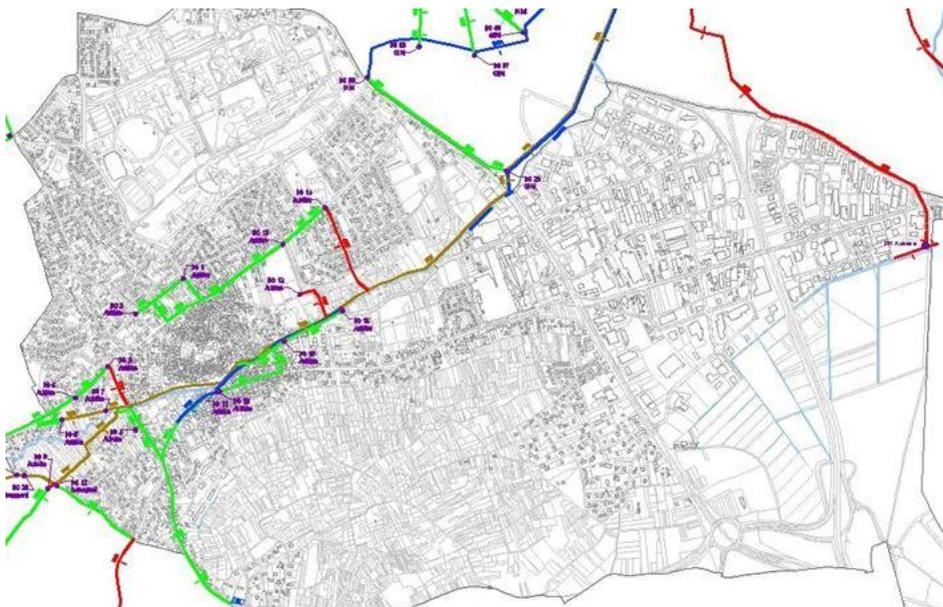
-  Réseaux unitaires
-  Réseaux d'eaux usées
-  Réseaux d'eaux pluviales et ruisseaux
-  Réseau intercommunal
-  Déversoir d'orage
-  Postes de refoulement

Potentialités sur eaux usées pour la commune d'Aubière

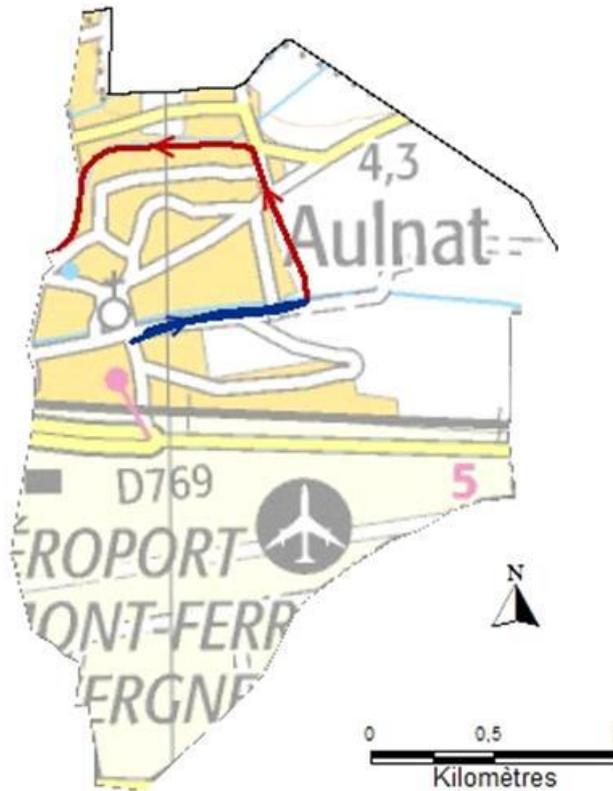


Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
-  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
-  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
-  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique
-  STEP



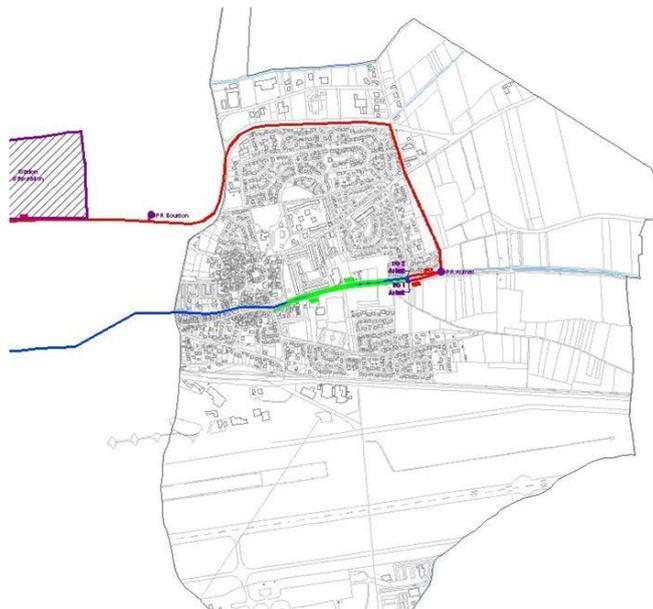
Potentialités sur eaux usées pour la commune d'Aulnat



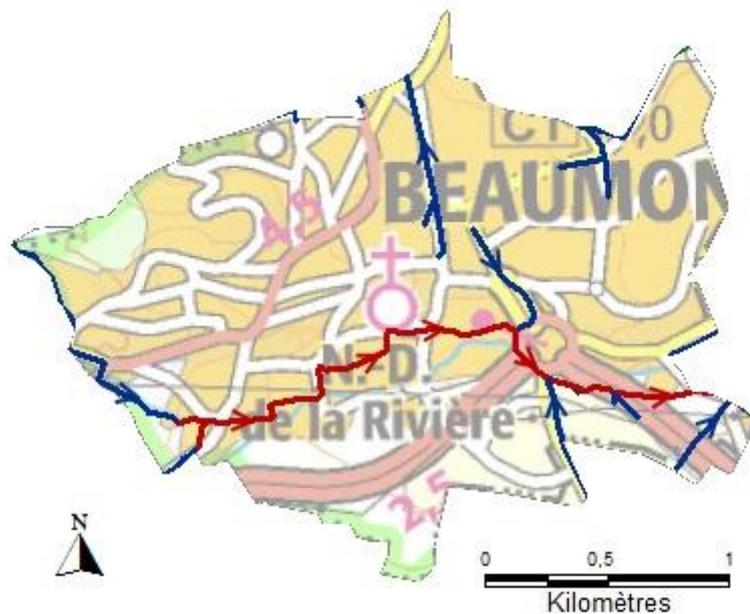
Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
-  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
-  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
-  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique

 STEP

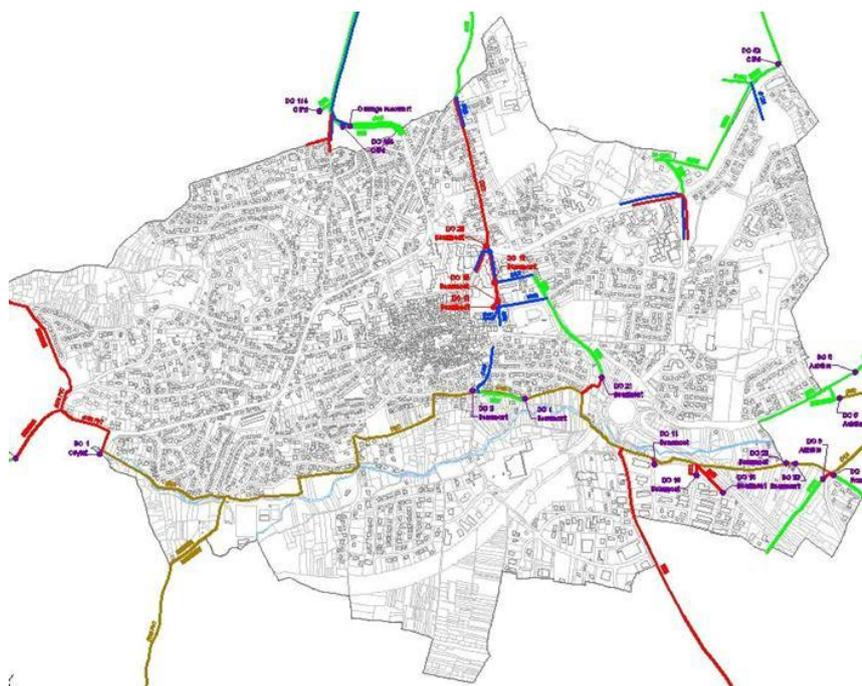


Potentialités sur eaux usées pour la commune de Beaumont

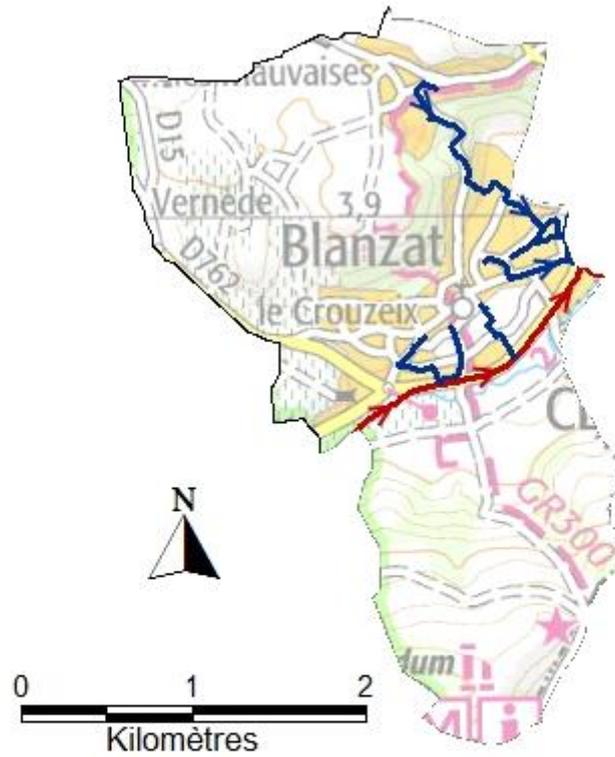


Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
 -  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
 -  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
 -  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique
-  STEP



Potentialités sur eaux usées pour la commune de Blanzat



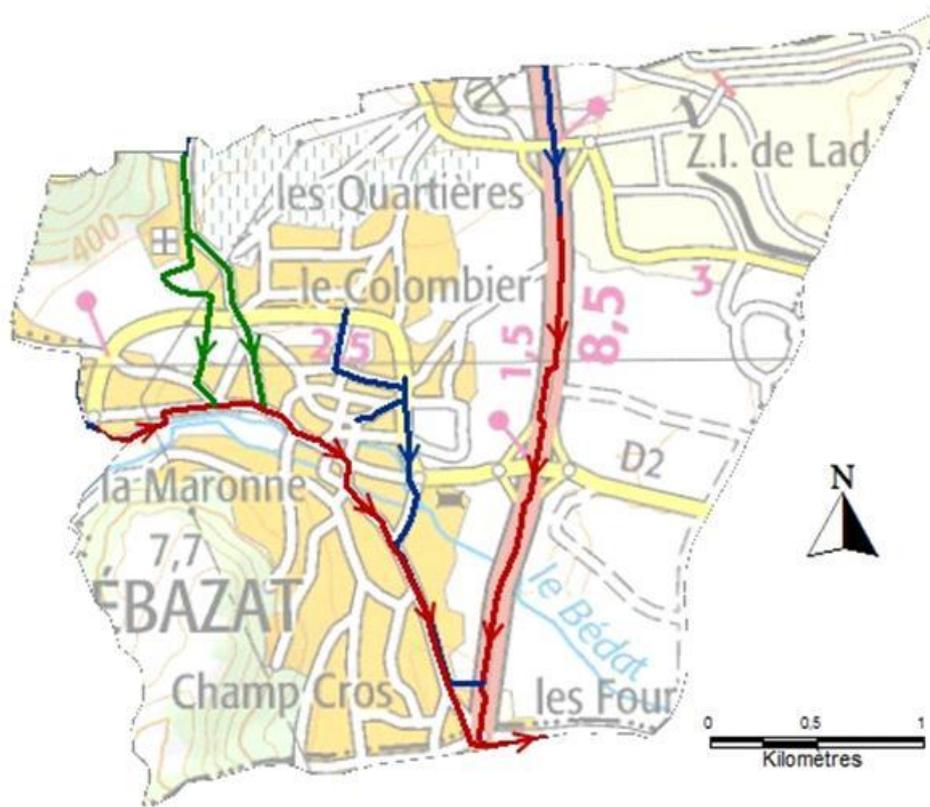
Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
-  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
-  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
-  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique

 STEP



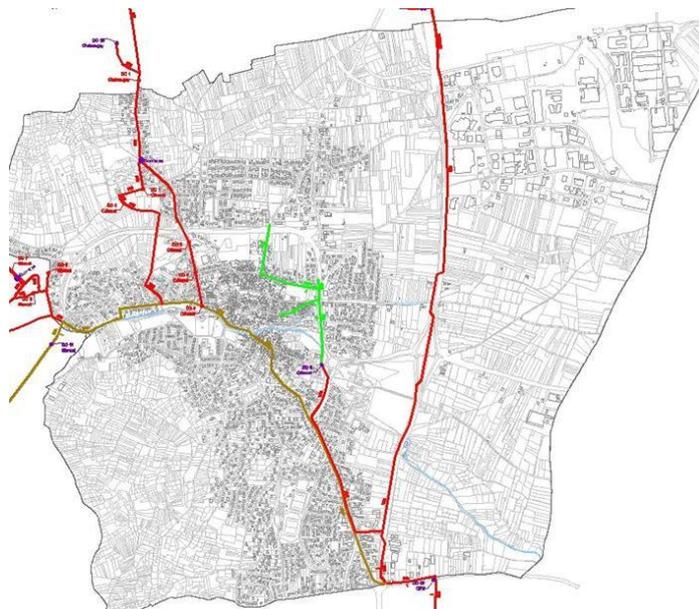
Potentialités sur eaux usées pour la commune de Cébazat



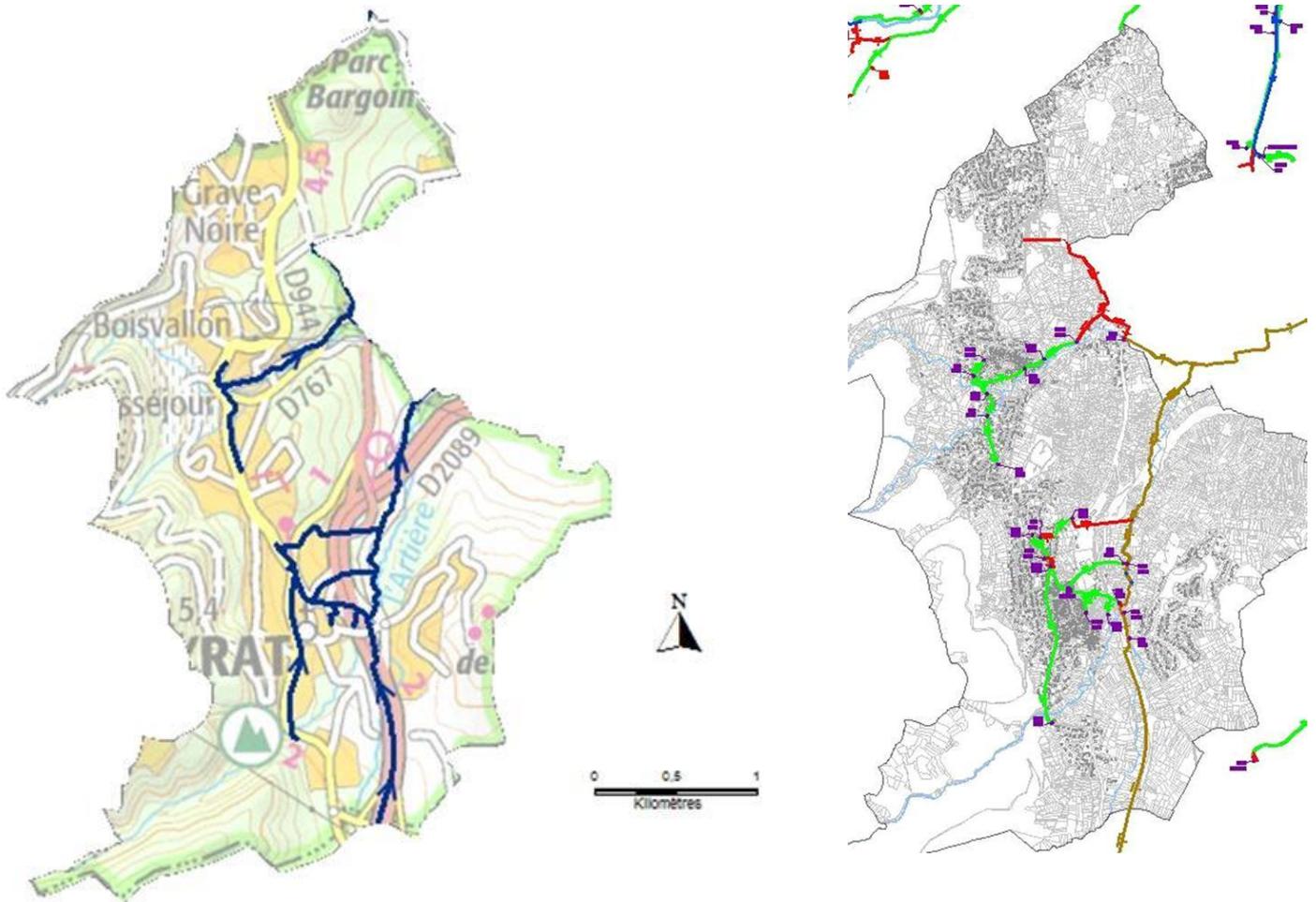
Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
-  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
-  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
-  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique

 STEP



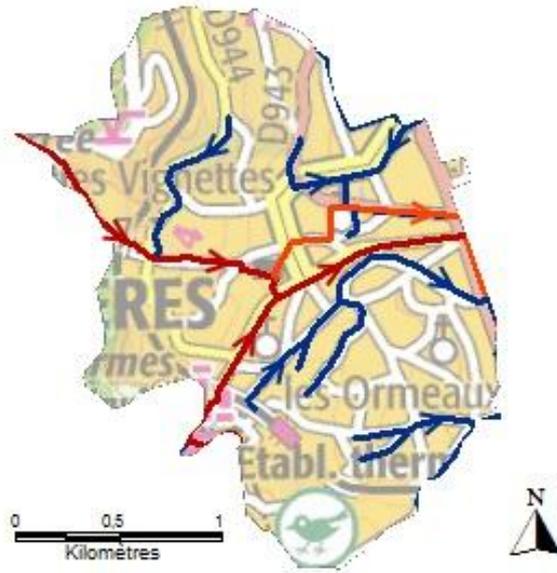
Potentialités sur eaux usées pour la commune de Ceyrat



Débit réseau intercommunal

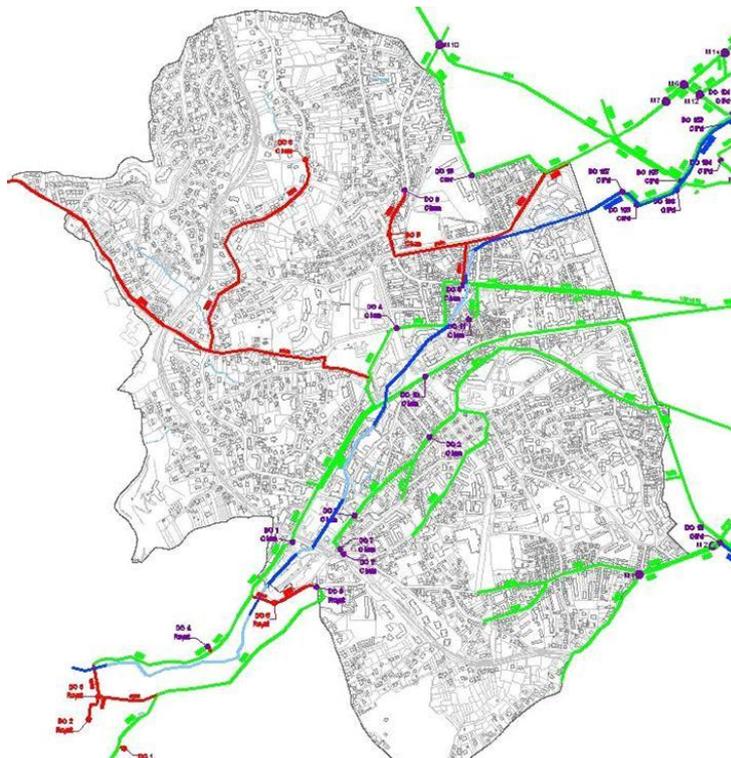
-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
-  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
-  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
-  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique
-  STEP

Potentialités sur eaux usées pour la commune de Chamalières



Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
 -  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
 -  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
 -  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique
-  STEP

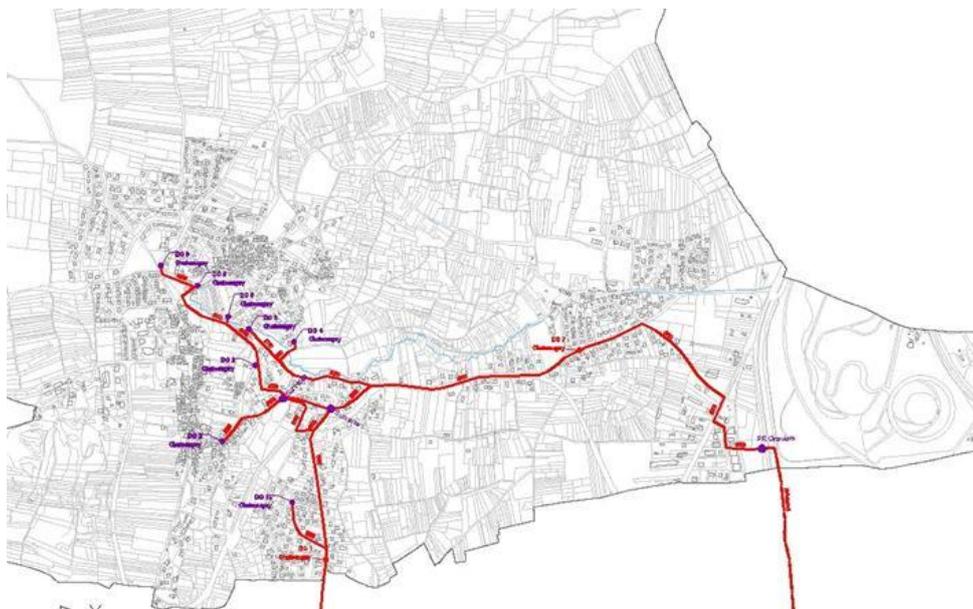


Potentialités sur eaux usées pour la commune de **Châteaugay**

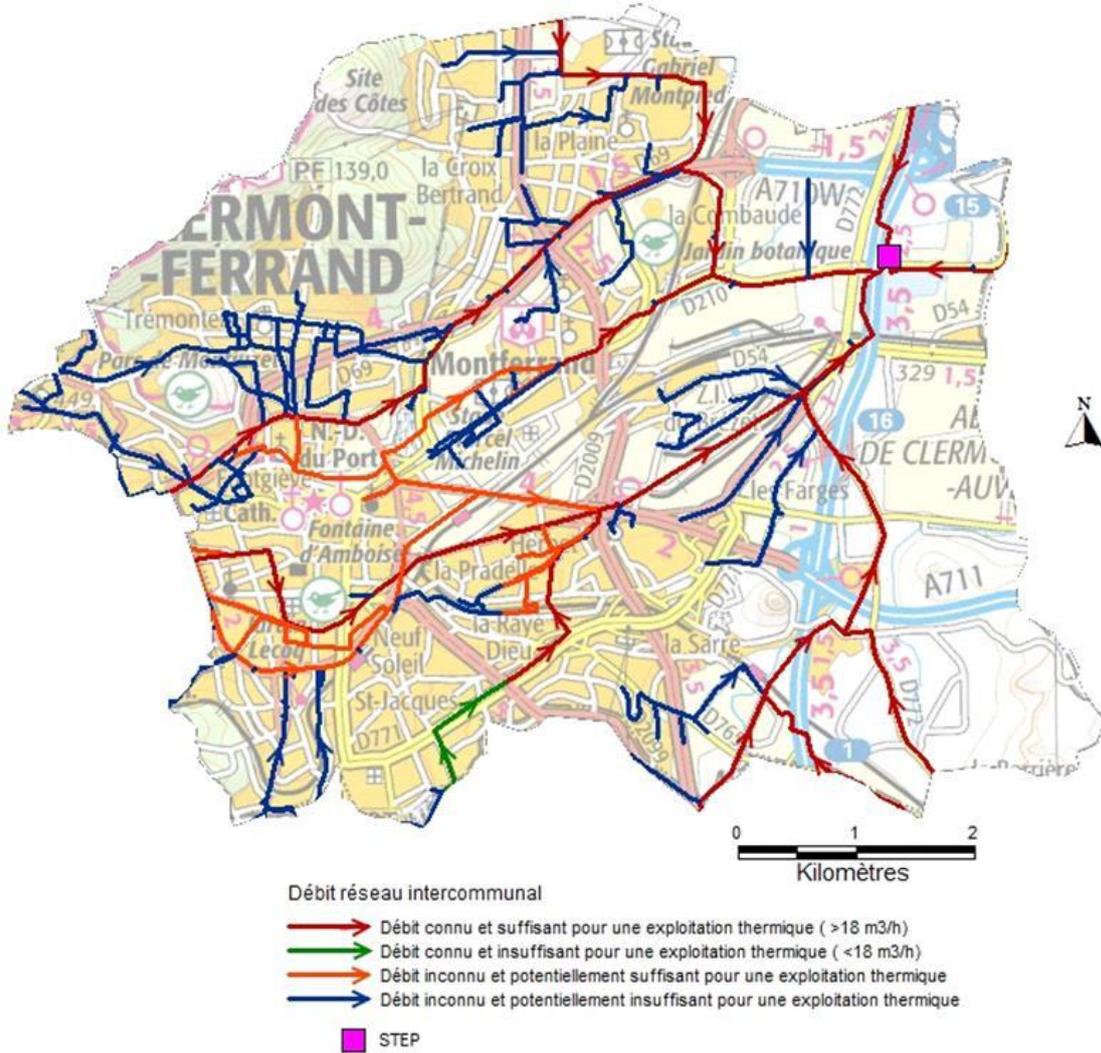


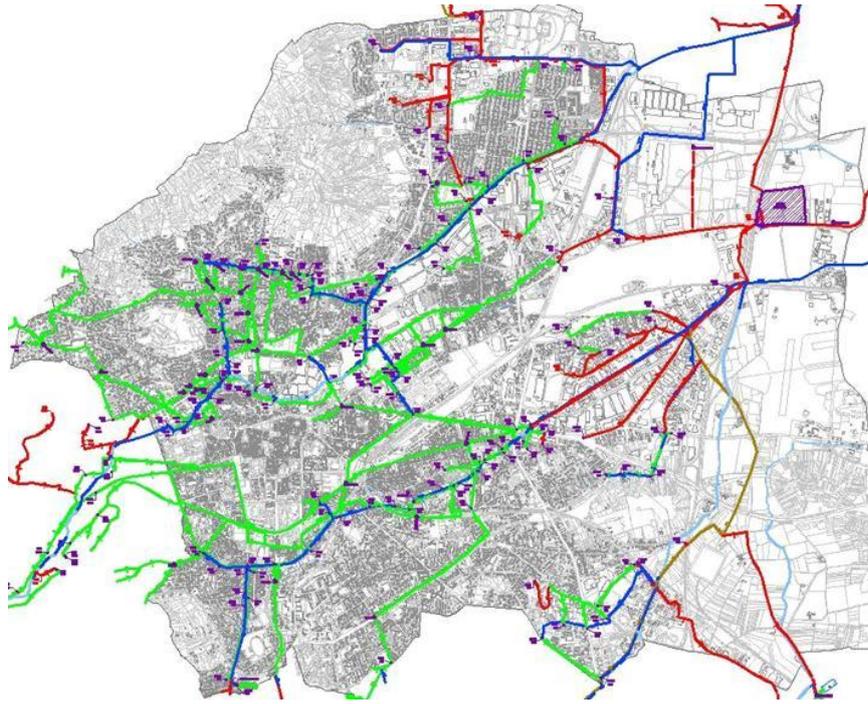
Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
-  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
-  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
-  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique
-  STEP

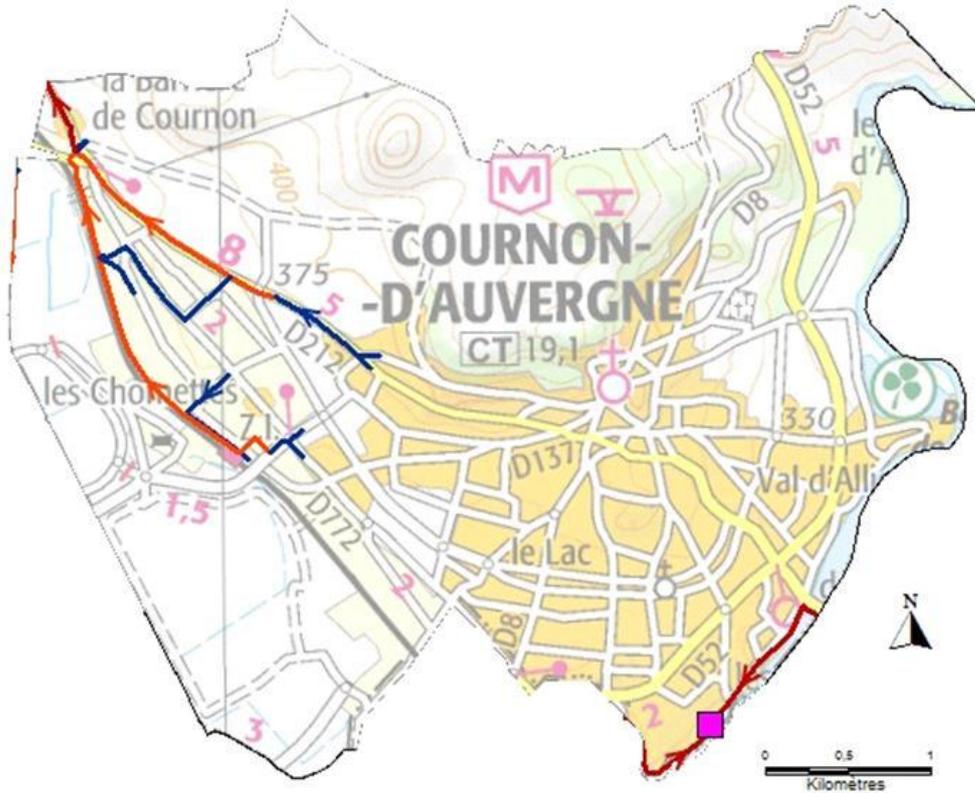


Potentialités sur eaux usées pour la commune de Clermont-Ferrand





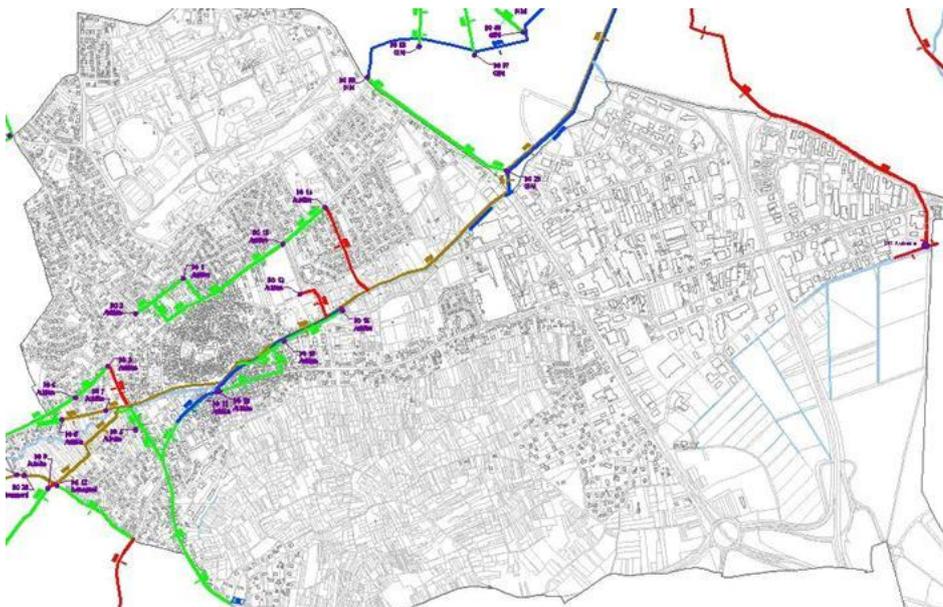
Potentialités sur eaux usées pour la commune de Cournon d'Auvergne



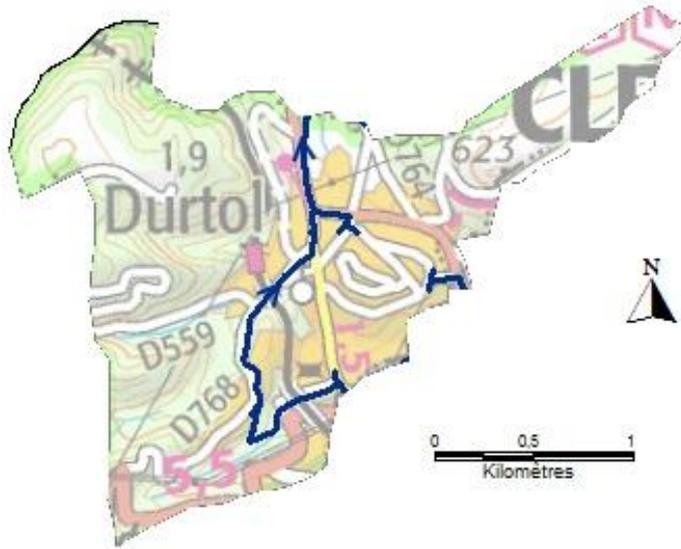
Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
-  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
-  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
-  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique

 STEP



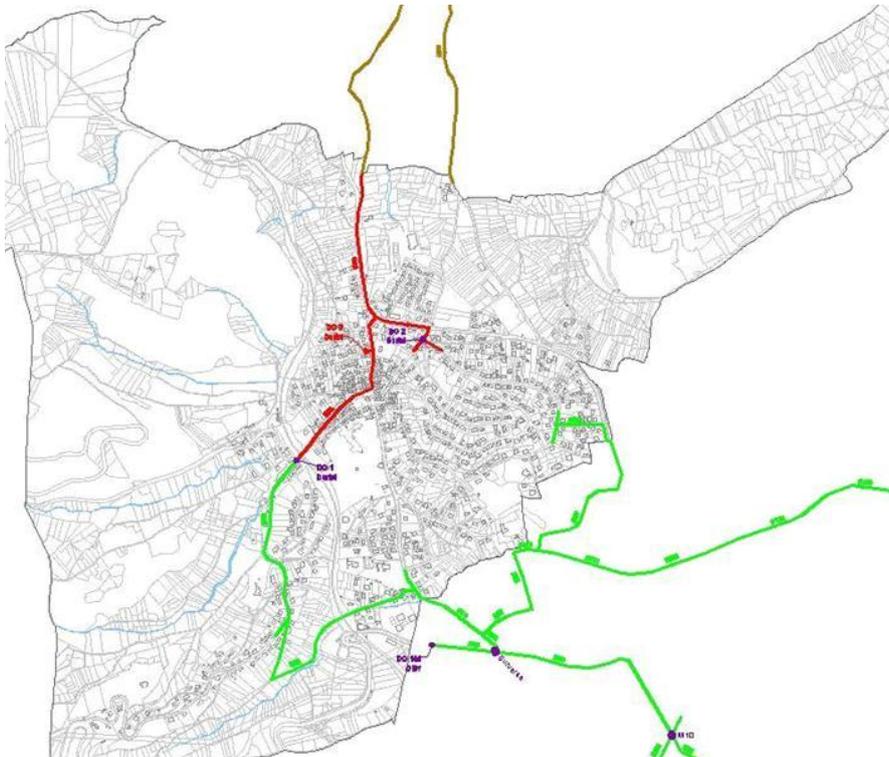
Potentialités sur eaux usées pour la commune de **Durtol**



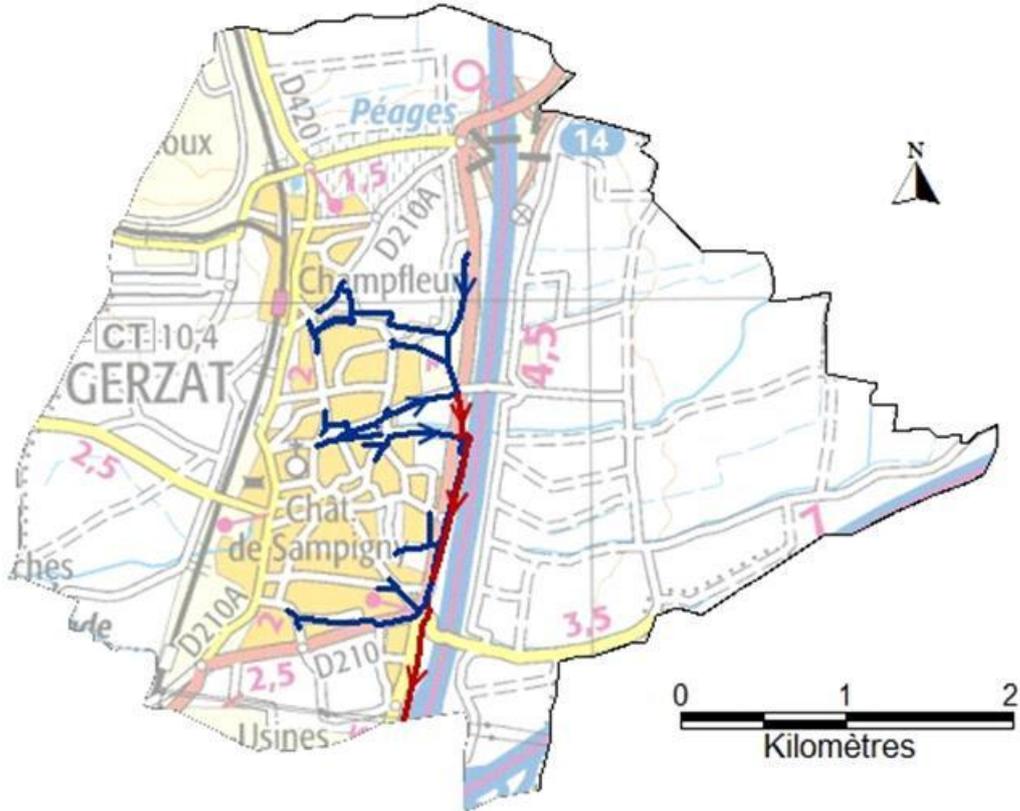
Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
-  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
-  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
-  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique

 STEP



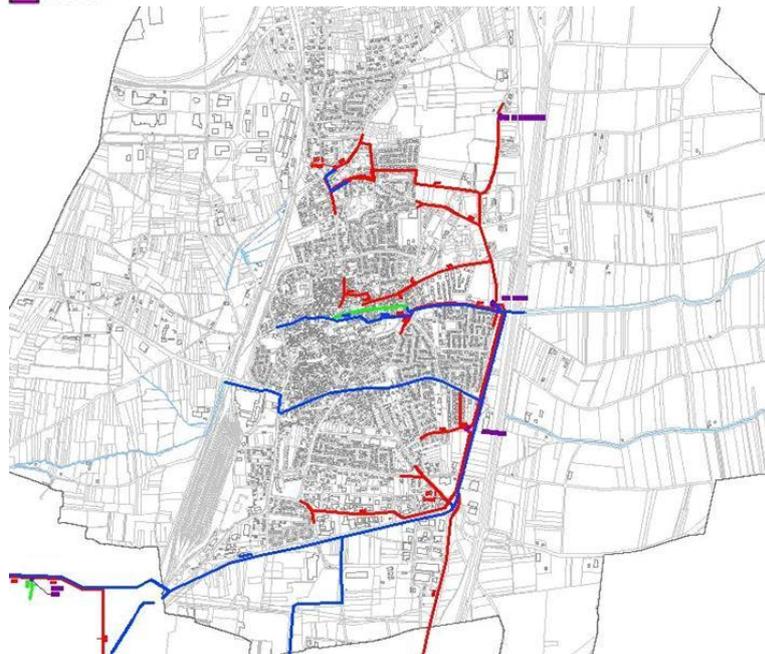
Potentialités sur eaux usées pour la commune de Gerzat



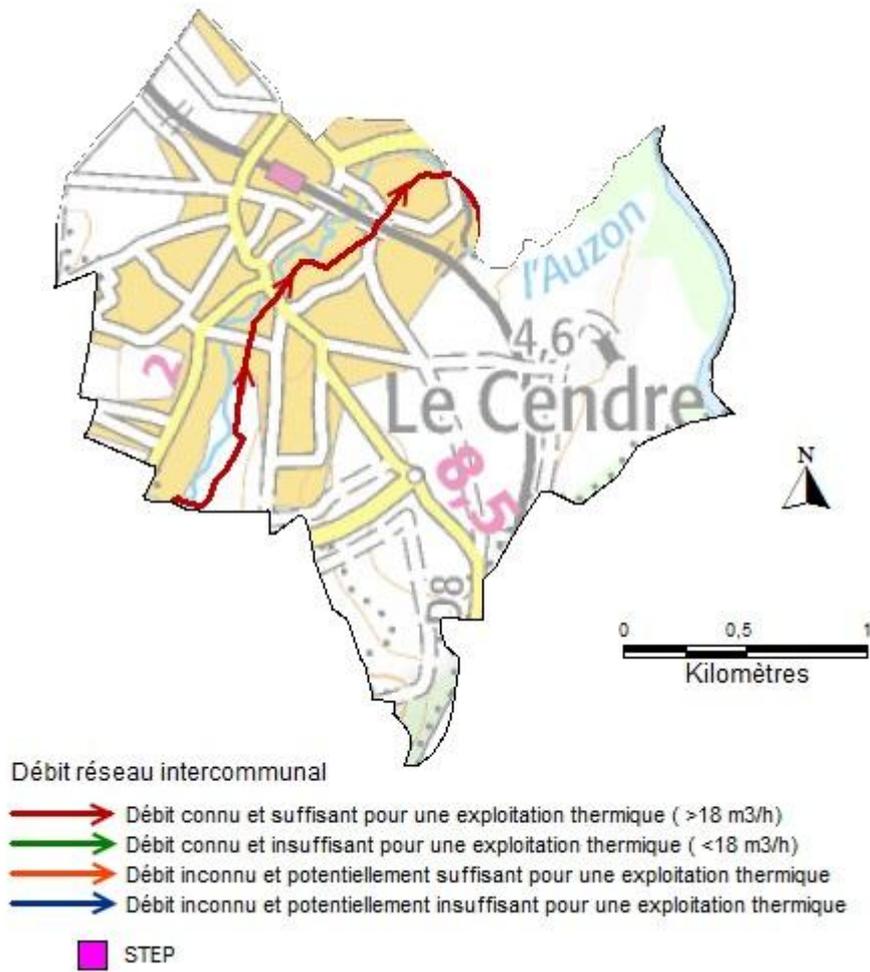
Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m3/h)
-  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m3/h)
-  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
-  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique

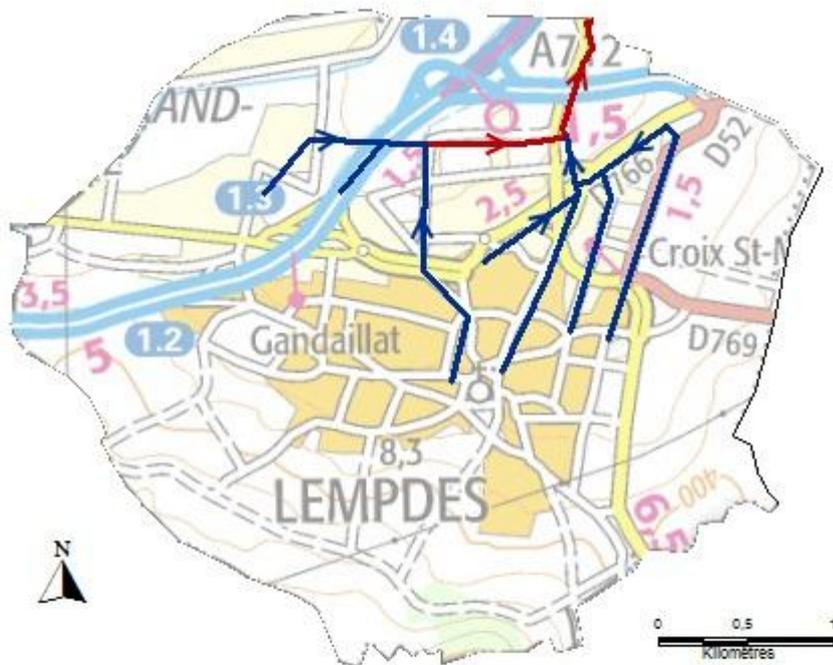
 STEP



Potentialités sur eaux usées pour la commune du Cendré



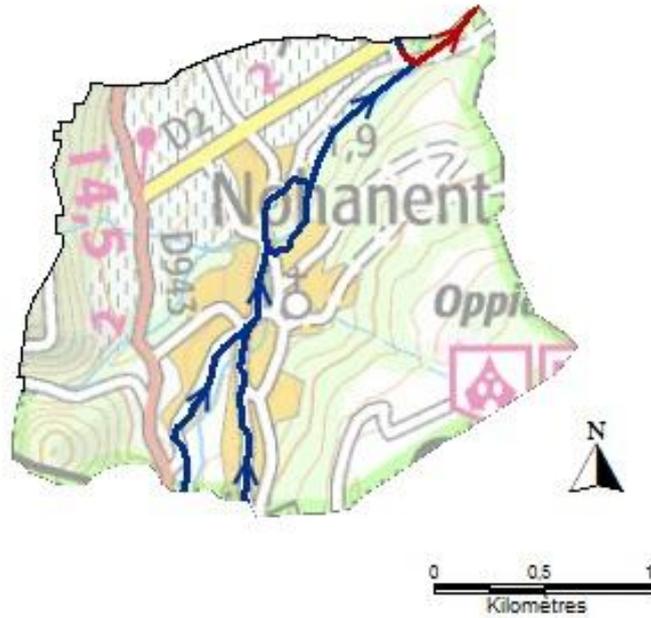
Potentialités sur eaux usées pour la commune de Lempdes



Débit réseau intercommunal

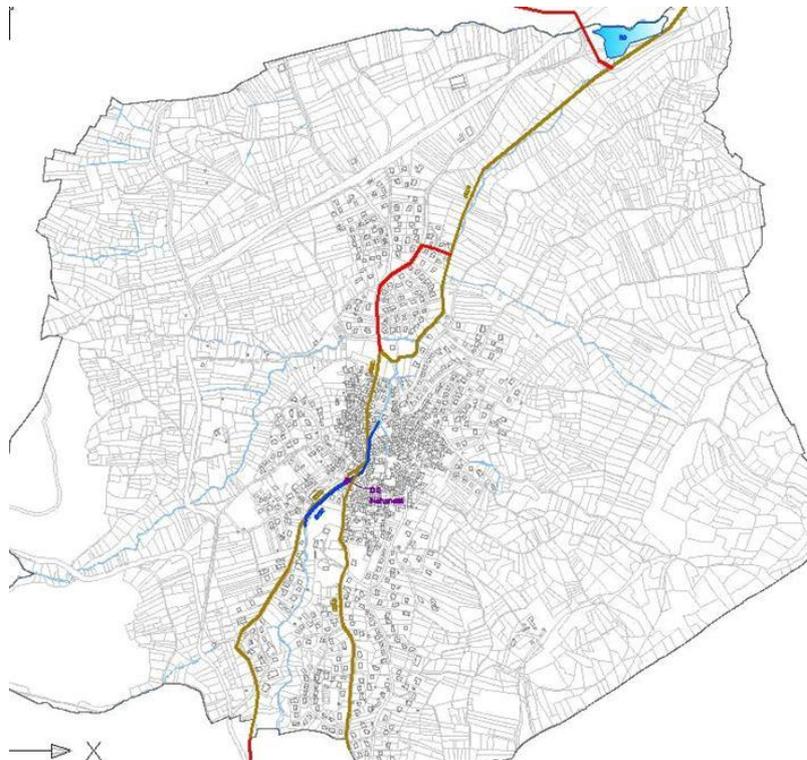
-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
-  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
-  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
-  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique
-  STEP

Potentialités sur eaux usées pour la commune de Nohanent

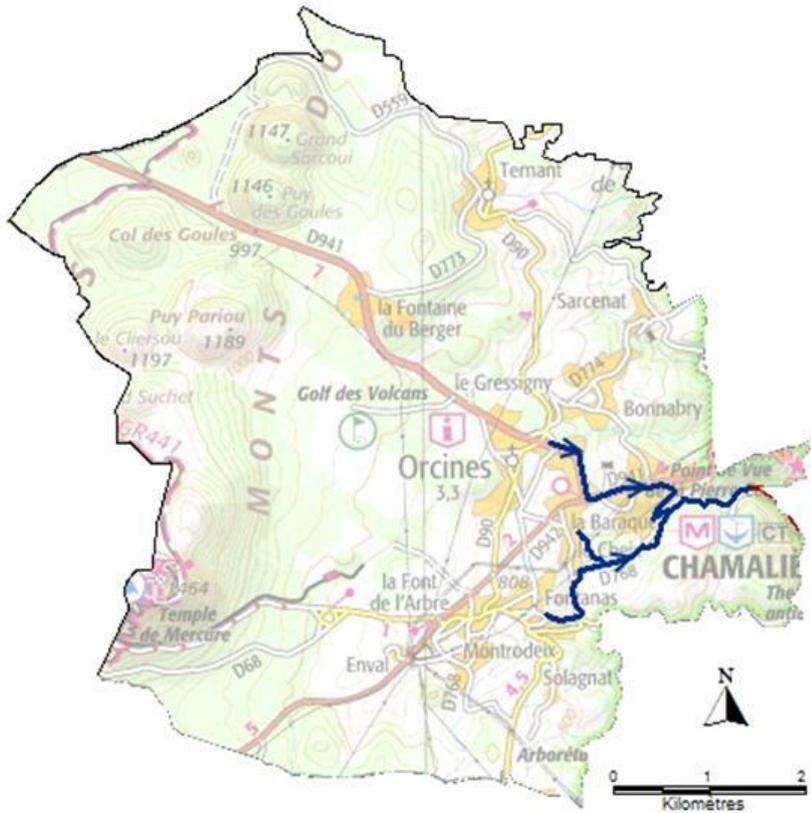


Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
 -  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
 -  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
 -  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique
-  STEP



Potentialités sur eaux usées pour la commune d'Orcines



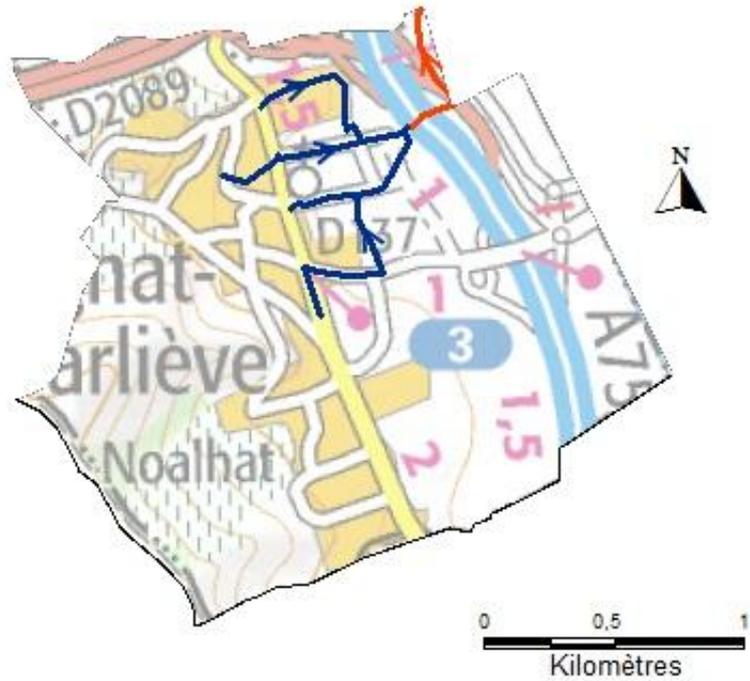
Débit réseau intercommunal

- Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m3/h)
- Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m3/h)
- Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
- Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique

STEP

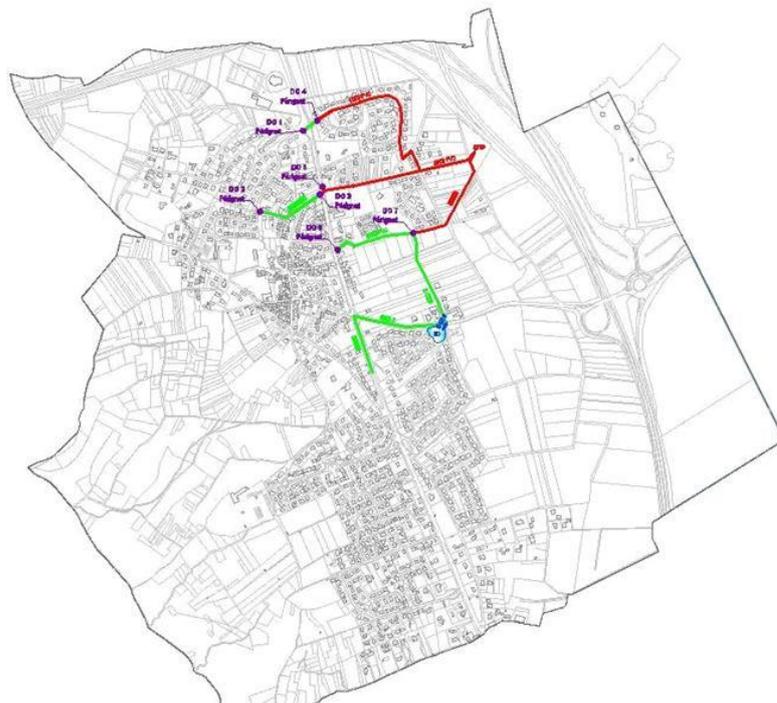


Potentialités sur eaux usées pour la commune de Pérignat-lès-Sarliève

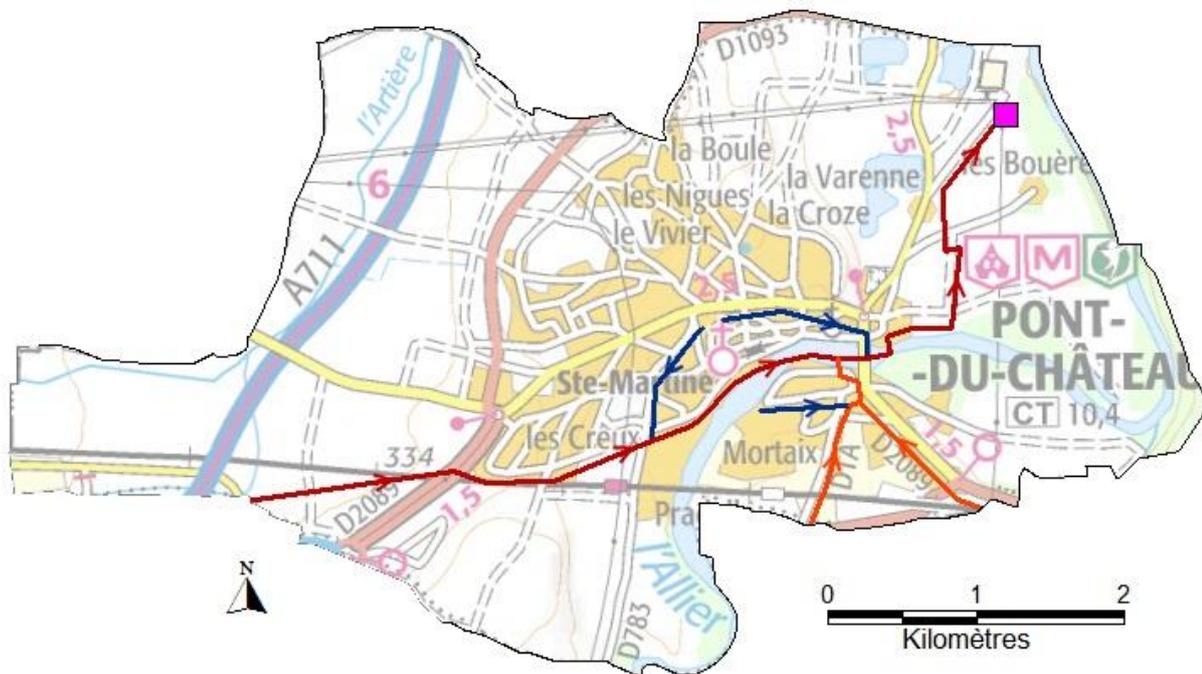


Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
 -  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
 -  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
 -  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique
-  STEP



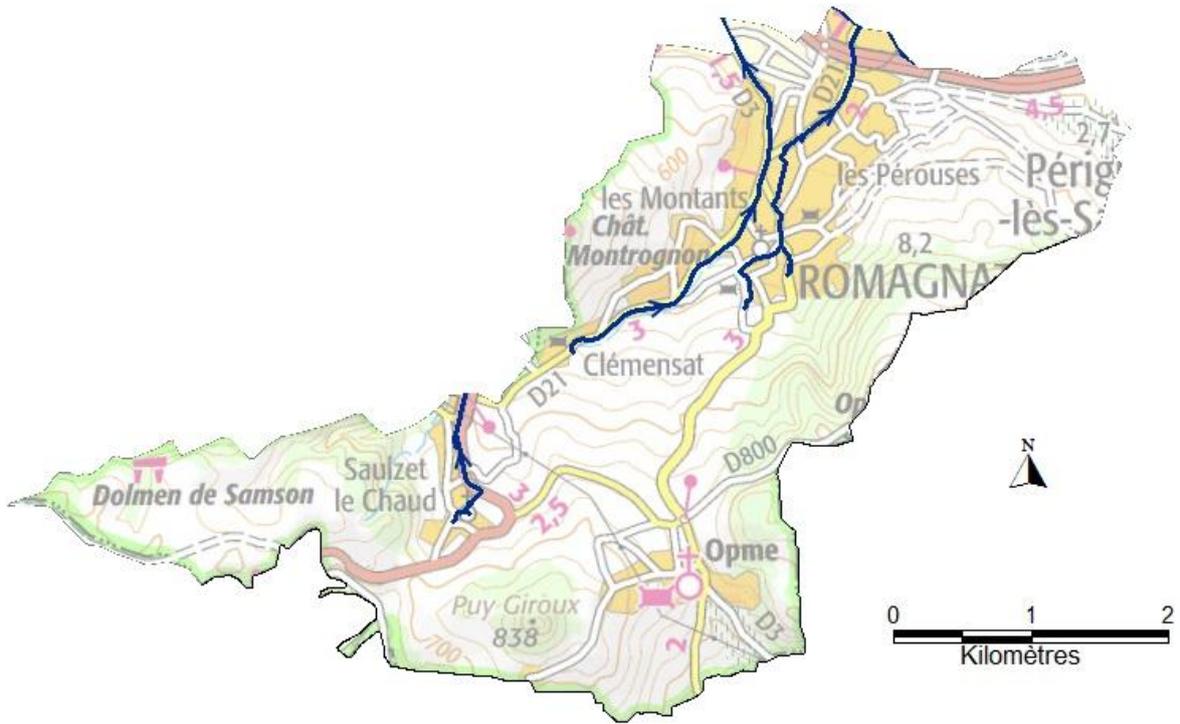
Potentialités sur eaux usées pour la commune de Pont-du-Château



Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m3/h)
-  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m3/h)
-  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
-  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique
-  STEP

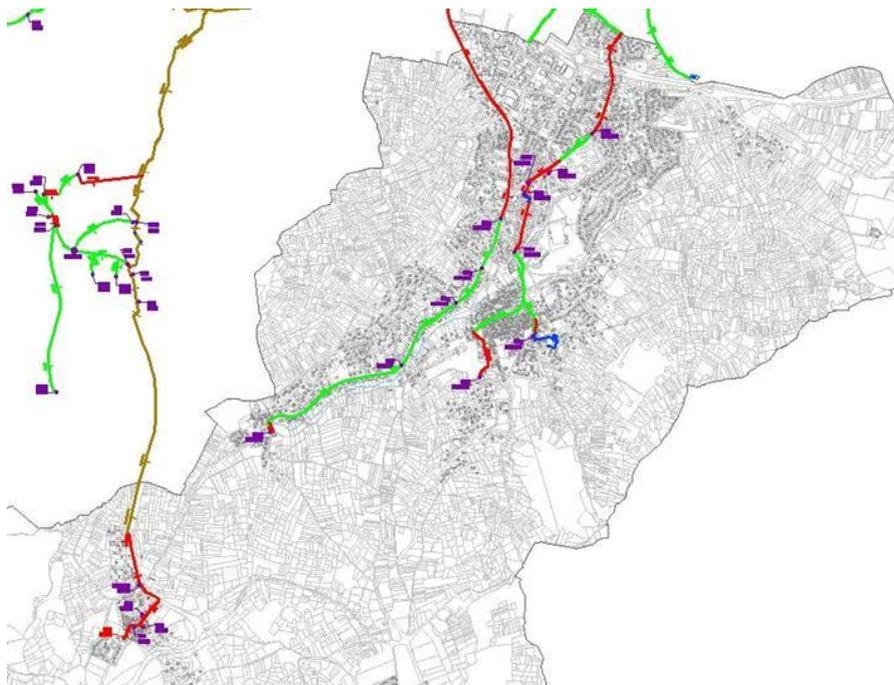
Potentialités sur eaux usées pour la commune de Romagnat



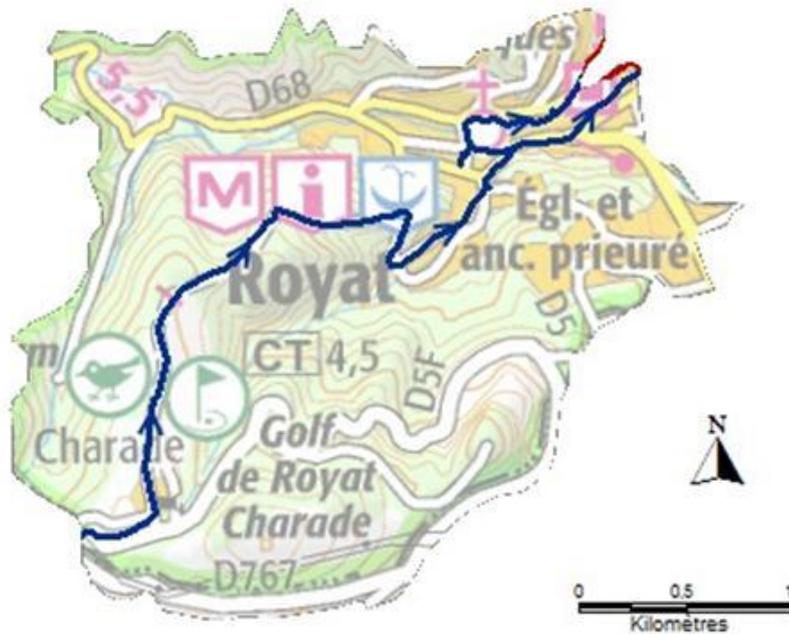
Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique ($>18 \text{ m}^3/\text{h}$)
-  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique ($<18 \text{ m}^3/\text{h}$)
-  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
-  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique

 STEP

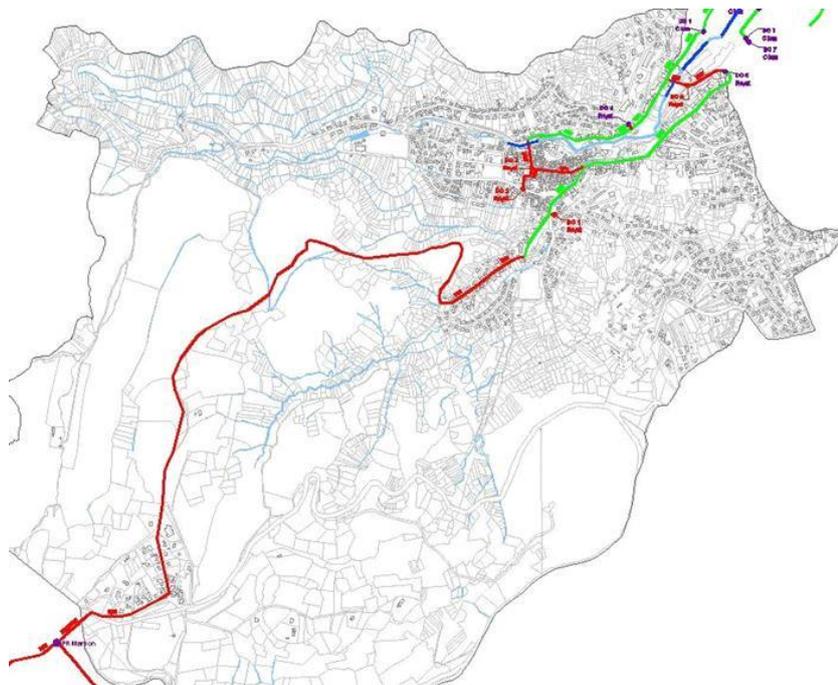


Potentialités sur eaux usées pour la commune de Royat

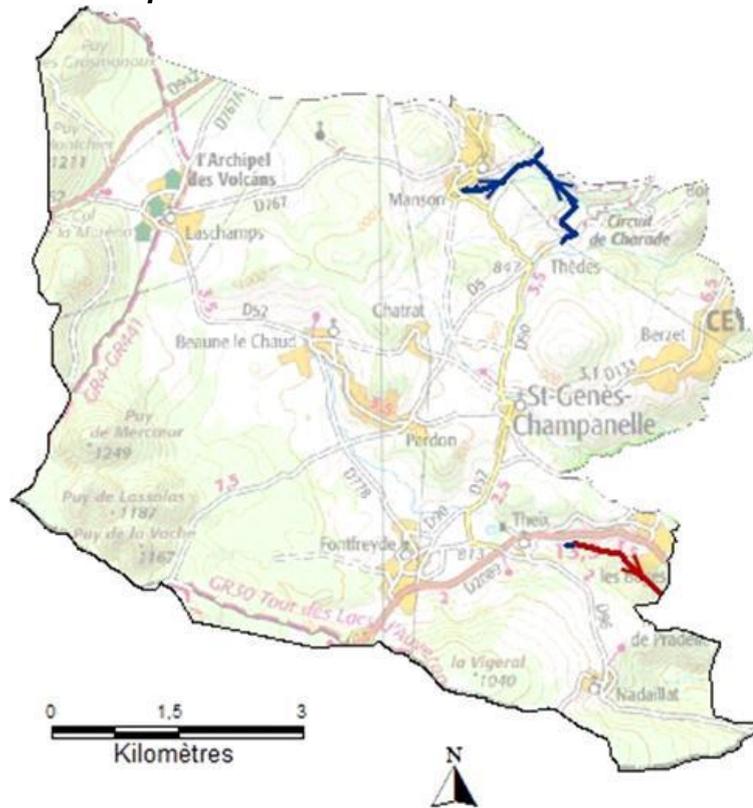


Débit réseau intercommunal

-  Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
 -  Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
 -  Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
 -  Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique
-  STEP



Potentialités sur eaux usées pour la commune de **Saint-Genès-Campanelle**



Débit réseau intercommunal

- Débit connu et suffisant pour une exploitation thermique (>18 m³/h)
- Débit connu et insuffisant pour une exploitation thermique (<18 m³/h)
- Débit inconnu et potentiellement suffisant pour une exploitation thermique
- Débit inconnu et potentiellement insuffisant pour une exploitation thermique

■ STEP



Annexe 2.

Compléments relatifs aux techniques de géothermie très basse énergie (TBE)

Annexe 2.1 : Machinerie thermodynamique

Annexe 2.2 : Doublets géothermiques

Annexe 2.3 : Sondes géothermiques verticales
et stockage périodique d'énergie thermique

Annexe 2.1 : Machinerie thermodynamique

Présentation

Dans les systèmes collectifs et les réseaux de distribution d'énergie thermique, par analogie aux chaufferies (chaudière au bois, à gaz ou au fuel) et aux centrales de traitement de l'air, il est préférable de désigner les dispositifs qui utilisent des pompes à chaleur par la terminologie '**machinerie thermodynamique**'.

A minima, la machinerie comporte un échangeur de chaleur qui permet de découpler le fluide circulant dans les formations souterraines et celui circulant dans les réseaux et les bâtiments.

En géothermie très basse énergie (TBE), la spécificité est qu'une machinerie thermodynamique peut délivrer du chaud comme du frais ou du froid en échangeant avec la même ressource énergétique. En ce sens, un rapprochement avec les solutions aérothermiques pourrait être avancé mais il faut noter que la géothermie TBE permet le rafraîchissement en usage direct dans de bien meilleures conditions.

Dans le cas de cette étude portant sur les ressources superficielles du territoire de Clermont Communauté, outre des échangeurs de chaleur, une machinerie thermodynamique comportera toujours des pompes à chaleur, d'où la dénomination "thermodynamique". Selon l'usage, on pourra distinguer :

- pour assurer la production de chaleur, une machinerie comporte au moins une pompe à chaleur qui permet d'ajuster le niveau de la température conformément à l'usage (chauffage, ECS,). La combinaison avec une chaufferie thermique à combustible ou une autre source renouvelable reste toujours possible ;
- pour assurer le confort thermique estival, la machinerie pourra fonctionner en **usage direct**, c'est à dire sans pompe à chaleur pour assurer la production de frais, ou recourir à une pompe à chaleur en mode climatisation.

A l'échelle d'un bâtiment collectif/tertiaire ou d'un réseau de distribution, le recours à une telle machinerie est indispensable, tant pour l'exploitation des ressources géothermiques en très basse énergie (TBE) que pour l'exploitation de l'énergie des eaux usées.

A l'échelle d'un réseau de distribution, on distinguera les **machineries centralisées**, qui distribuent l'énergie thermique au moyen d'un réseau de chaleur ou d'un réseau d'eau glacée, et les **machineries réparties / distribuées** dans les bâtiments, qui distribuent l'énergie d'origine géothermique via un **réseau en boucle tempérée** (température proche de la température ambiante).

Dans tous les cas de figures introduits ci-avant, l'usager final peut disposer d'un dispositif qui lui est propre afin d'ajuster à ses besoins le niveau de la température délivrée. C'est notamment le cas pour l'eau chaude sanitaire si la température du réseau est trop faible. Dans ce cas, le réseau permet uniquement d'assurer un préchauffage.

Techniques de pompes à chaleur géothermique (PACg)

Introduction

Il existe aujourd'hui deux grandes familles de pompes à chaleur selon la nature de l'énergie apportée au système :

- Les pompes à chaleur à **compression**. De l'énergie mécanique est fournie pour entraîner un compresseur. Généralement cette énergie mécanique provient d'un moteur électrique mais toute autre solution peut être envisagée. La gamme disponible des puissances thermiques unitaires en géothermie commence vers 1 kW et peut atteindre quelques MW, aussi bien en production de chaud qu'en production de froid.
- Les pompes à chaleur à **sorption**. La compression est dite "thermochimique". Cet effet résulte d'un apport d'énergie thermique à relativement haute température : solaire, combustion ou énergie fatale. La ressource géothermique TBE fournit alors un complément d'énergie, typiquement de l'ordre de 30 % à 40 % de l'énergie thermique livrée. Cette technique reste largement moins diffusée que les solutions à compression mécanique. La gamme des puissances disponibles commence au-delà d'une dizaine de kW et peut, théoriquement, atteindre une dizaine de MW.

L'intérêt d'une source géothermique pour une pompe à chaleur réside dans la température de cette ressource qui reste relativement stable, en particulier en comparaison avec les solutions qui échangent avec l'air ambiant.

De plus, notamment pour les usages liés au confort thermique, la température d'une ressource géothermique est souvent mieux adaptée que celle de l'air ambiant, cela pour deux raisons :

1. les échangeurs thermiques eau/eau sont plus performants que les échangeurs eau/air ;
2. la température de la ressource géothermique est, en moyenne, plus favorable que celle de l'air, en été comme en hiver.

Ce dernier constat ne sera pas vrai toute l'année pour certaines applications, comme c'est par exemple le cas pour la production d'ECS en période estivale. Néanmoins, en moyenne annuelle, les dispositifs thermodynamiques sur eau (ou sol) restent significativement plus performants que ceux échangeant avec de l'air. De plus, certaines techniques géothermiques permettent un usage direct, ce qui améliore encore la performance annuelle. Il en est de même pour les techniques de stockage géothermique.

Reste un point essentiel dans le processus de décision, à savoir la maîtrise des conditions de fonctionnement qui permettent d'optimiser les paramètres d'entretien et de maintenance des solutions géothermiques, là où les solutions aérothermiques subissent les aléas climatiques.

Principe des pompes à chaleur à compression mécanique

Une PAC à compression mécanique fonctionne grâce à un apport extérieur **d'énergie mécanique**, le compresseur mécanique étant le plus souvent entraîné par un moteur électrique (Illustration 90). Toute autre motorisation reste envisageable.

En mode production de chaud (chauffage, ECS ...), la chaleur est prélevée à la source froide (aquifère, sous-sol ...) via la circulation d'un fluide caloporteur, généralement de l'eau, additionnée ou non d'antigel dans le cas des boucles fermées.

En entrée de la pompe à chaleur, un échangeur de chaleur permet le découplage entre le fluide en provenance de la ressource géothermique et le fluide frigorigène. En mode chauffage, cet échangeur assure la fonction d'**évaporateur** et le fluide frigorigène, qui y est réchauffé, passe de l'état liquide à l'état de vapeur dont la température s'établit à un niveau légèrement inférieur

à celui de la source géothermique. Typiquement, selon la technologie de l'échangeur, on peut obtenir un écart de température entre la source géothermique et la vapeur entre 1 °C et 3 °C.

La vapeur se dirige ensuite vers le compresseur qui la comprime et augmente sa pression, ce qui a pour effet d'augmenter sa température. Typiquement, la température sera augmentée de 30 °C à 40 °C, voire d'une cinquantaine de degrés pour les PAC haute température.

La vapeur haute pression et haute température est alors dirigée vers le **condenseur**, c'est-à-dire un échangeur de chaleur où l'énergie va être cédée à la source chaude, c'est-à-dire au fluide que l'on souhaite réchauffer (eau, air ...). En perdant sa chaleur, la vapeur du fluide frigorigène, toujours sous pression, passe à l'état liquide, lequel peut-être recueilli dans un réservoir.

En passant ensuite au travers d'un **détendeur** (soupape de détente), le fluide va alors perdre de la pression et de la température. Ce détendeur, qui peut être réglable et/ou piloté, est en fait une perte de charge qui est située juste avant l'évaporateur, ce qui signifie que le fluide passe pratiquement immédiatement à l'état de vapeur à la sortie du détendeur. La température atteinte peut alors être très basse et, le cas échéant, passer en négatif.

C'est cette température qui pilote la température du fluide caloporteur qui va être dirigé vers la source géothermique pour y capter de la chaleur (cas des sondes géothermiques en boucle fermée), ou pour y être réinjecté (cas des boucles ouvertes sur aquifère).

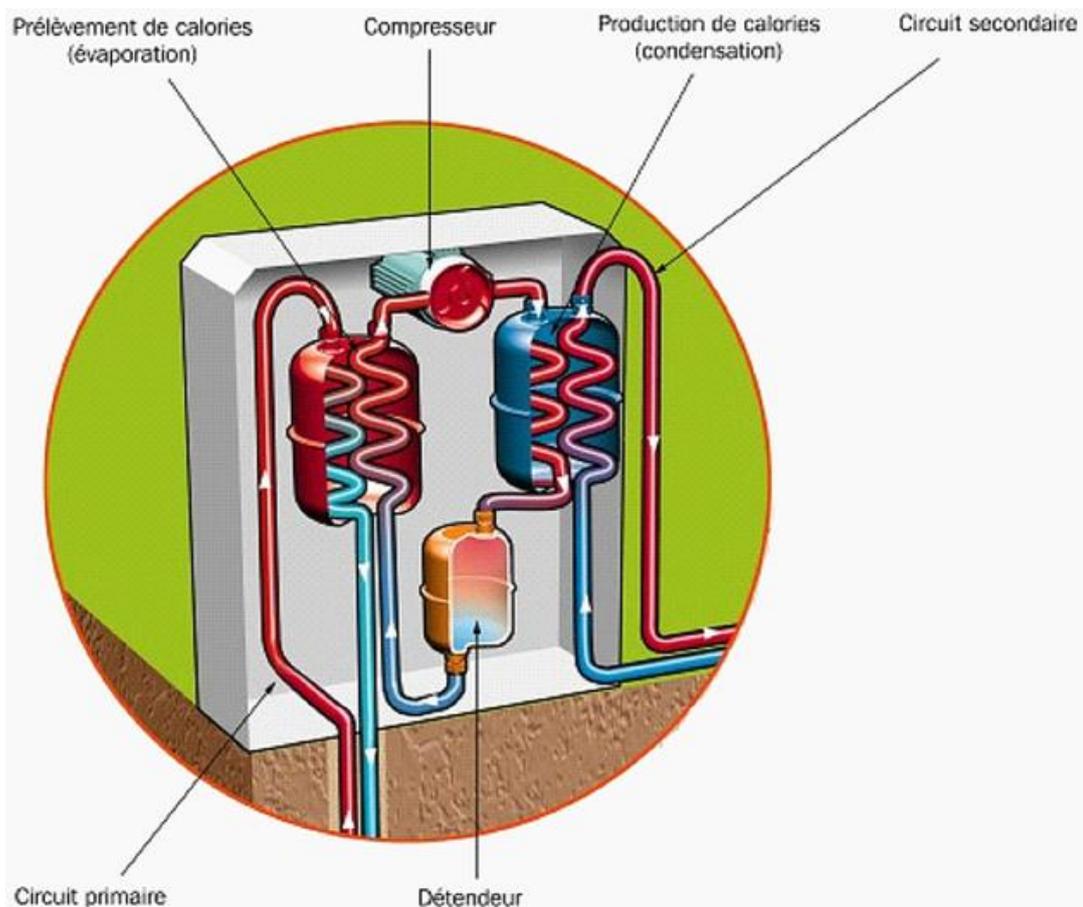


Illustration 90 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur à compression (source : BRGM).

Pompe à chaleur à sorption (adsorption et absorption)

Le terme sorption recouvre des processus physicochimiques pendant lesquels un composé liquide et/ou un gaz est absorbé ou dissout dans un autre liquide (pompe à chaleur à absorption) ou est retenu à la surface d'un corps solide (pompe à chaleur à adsorption). On peut dire qu'il s'agit d'une compression thermochimique.

Les pompes à chaleur à sorption fonctionnent sans qu'il y ait changement de phase de type liquide \leftrightarrow vapeur comme dans les PAC à compression mécanique. Pour l'essentiel, les phénomènes du cycle thermodynamique intéressent un fluide restant dans la phase liquide. Sous l'action de la chaleur, ce fluide peut interagir avec des solides (pompes à chaleur à adsorption) ou avec des composés chimiques en solution (pompe à chaleur absorption). Il faut donc distinguer deux techniques qui sont présentées ci-après.

Les PAC à sorption se distinguent des PAC à compression mécanique par le fait que l'énergie apportée au système est directement de **l'énergie thermique**. Ce système présente l'intérêt de pouvoir produire de la chaleur (ou du froid) avec peu de pièces en mouvement. Historiquement, les PAC à sorption ont d'abord été utilisées pour la production de froid (réfrigérateur).

Pour pouvoir être comparées aux PAC à compresseur, il est nécessaire de ramener l'énergie employée pour la compression (mécanique) à l'énergie primaire qui a effectivement été mobilisée :

- **Le COP d'une pompe à chaleur à compresseur** entraîné par un moteur électrique doit être ramené à l'énergie primaire en affectant le coefficient multiplicatif de 2.58 conventionnel pour l'électricité.

COP sur énergie électrique finale	2	3	4
COP sur énergie primaire	0.78	1.16	1.55

- **Le COP d'une pompe à chaleur à sorption** se réfère directement à l'énergie primaire employée pour produire l'énergie thermique qui pilote le processus thermodynamique. Ainsi, le COP machine fourni par une PAC à absorption sera souvent rapporté à une énergie finale qui est égale à une énergie primaire (gaz, bois, ...). Dans le cas du solaire, il n'est évidemment pas nécessaire de raisonner en énergie primaire.

Important : Pour les combustibles, on prendra le soin de raisonner en pouvoir calorifique supérieur (PCS) et non pas en pouvoir calorifique inférieur (PCI), ce dernier cas désignant l'énergie utilisable si on ne récupère pas l'énergie de condensation de l'eau des fumées.

A titre d'illustration, si on se réfère au gaz naturel, on aura typiquement un COP de 1.1 à 1.3 sur PSC pour une PAC géothermique à absorption (1.3 à 1.6 sur PCI).

Du point de vue du COP, ces technologies de pompes à chaleur sont donc comparables.

- **Principe des pompes à chaleur à adsorption**

Cette technologie encore très peu répandue se limite aux petites puissances thermiques, au maximum 10 kW. Le principe de fonctionnement de la pompe à chaleur à adsorption s'appuie sur les caractéristiques du gel de silice ou de la zéolithe, une substance microporeuse très stable et non polluante qui est capable de dégager de la chaleur lorsqu'elle adsorbe de l'eau (réaction exothermique lors du passage de la forme déshydratée à la forme hydratée).

Bien que le principe soit validé depuis quelques décennies, la commercialisation de machines sur ce principe ne débute réellement que depuis peu de temps. Le cycle se déroule en deux étapes successives. Ce n'est donc pas un processus continu.

- 1) Pendant la phase d'adsorption, dans la partie basse de la pompe à chaleur, l'eau présente dans un réservoir sous vide est chauffée. Cette eau, même à basse température, se transforme en vapeur et migre vers le haut du réservoir.

La microporosité de la zéolithe permet de piéger une grande quantité de vapeur (adsorption). La chaleur d'adsorption est utilisée au niveau de la source chaude si possible à basse température (plancher chauffant par exemple). La réaction exothermique d'adsorption peut atteindre 85 °C avec de l'eau initialement à moins de 10 °C.

- 2) Pendant la phase de désorption, dès que la zéolithe saturée d'eau, le minéral est chauffé par un apport thermique (brûleur à gaz, solaire ...). L'eau est alors libérée sous forme de vapeur (désorption). Au contact d'un échangeur, cette vapeur va se condenser en libérant de la chaleur et couler vers la partie inférieure de la pompe à chaleur. Le système peut redémarrer dans un nouveau cycle d'adsorption.

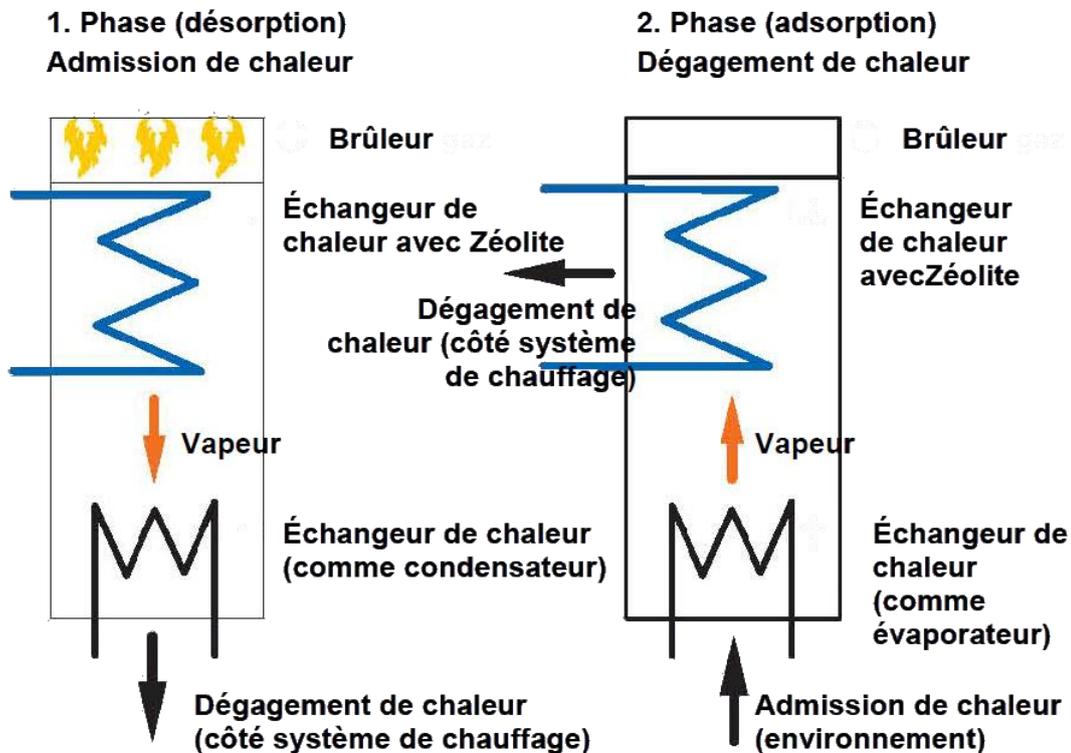


Illustration 91 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur à adsorption (source : Viessmann).

• **Principe des pompes à chaleur à absorption**

Cette technologie encore peu répandue se limite aux puissances thermiques supérieures à une trentaine de kilowatts. Elle peut se combiner à une chaudière à condensation. Le cycle thermo-chimique d'une pompe à chaleur à absorption est continu et comprend 4 temps. Généralement, de l'eau joue le rôle d'un solvant dans lequel un composé chimique (agent frigorigène), à température d'ébullition plus faible que celui de l'eau, va être absorbé et désorbé. Dans les applications de chauffage, le mélange eau / ammoniac (NH₃) reste le plus utilisé. Dans les applications de climatisation, le bromure de lithium est le plus utilisé.

- 1) Dans l'évaporateur, comme pour une pompe à compression mécanique, la chaleur est puisée dans la source froide (source géothermique) sous l'effet de l'évaporation à basse température du fluide frigorigène, en l'occurrence l'ammoniac. Ce fluide frigorigène provient, sous forme liquide, du condenseur via une soupape de détente.
- 2) Ces vapeurs sont dirigées vers l'absorbeur où elles vont être dissoutes (absorption) dans l'eau chaude (solvant). Ce processus est exothermique et libère de la chaleur au niveau de température le plus haut du cycle. C'est donc dans l'absorbeur que le fluide caloporteur sera porté à sa plus haute température avant d'être dirigé vers les émetteurs de chaleur ou la production d'eau chaude sanitaire.
- 3) L'eau chaude chargée en agent frigorigène est alors pompée dans le compresseur thermique où l'agent frigorigène va être porté à ébullition.
- 4) La phase gazeuse (agent frigorigène) à relativement haute pression se dirige naturellement vers le condenseur où de la chaleur va être cédée au fluide caloporteur qui ainsi sera préchauffé. Dans le condenseur, le fluide frigorigène va donc être refroidi et va se condenser. Dans le même temps, l'eau chaude (solvant) va circuler depuis le générateur vers l'absorbeur via une soupape de détente.

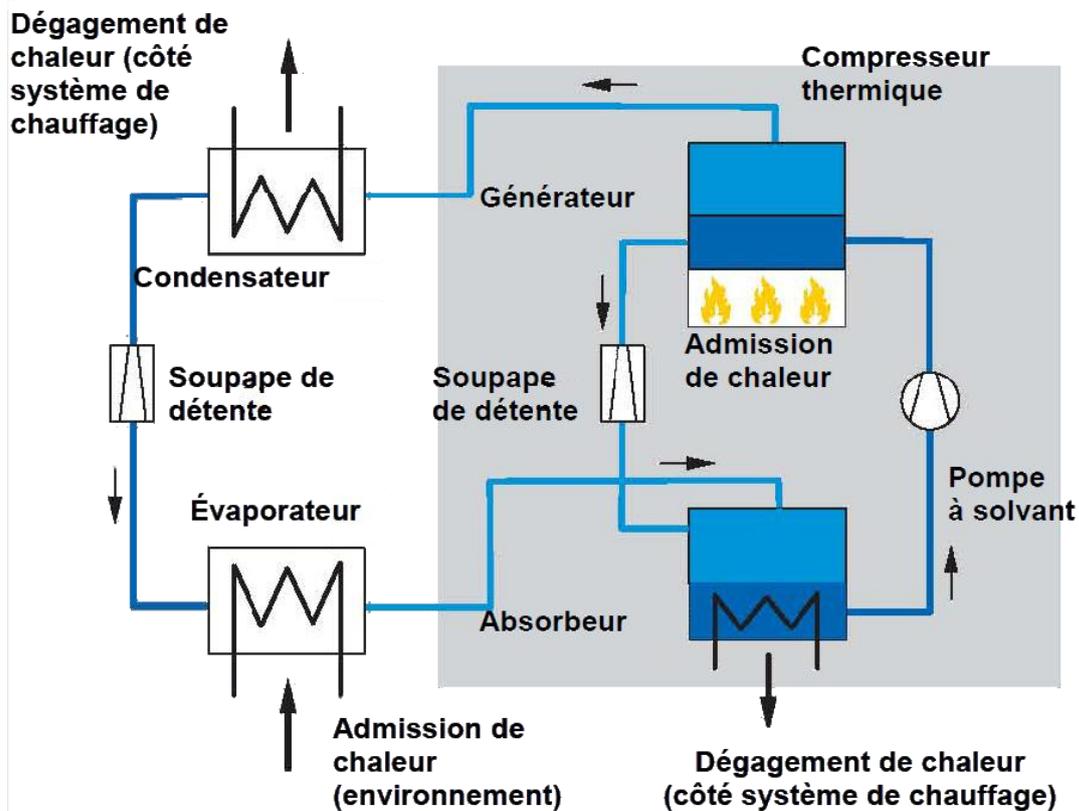


Illustration 92 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur à absorption (source : Viessmann).

Raccordement des pompes à chaleur à une ressource géothermique

Pompe à chaleur à compression versus pompe à chaleur à sorption

Selon la nature de la source froide (source que l'on refroidit en prélevant de l'énergie), on distinguera essentiellement deux types de pompe à chaleur géothermique indépendamment de la technologie utilisée (compression, adsorption, absorption ...) :

- **pompe à chaleur en boucle ouverte sur aquifère** : la source froide (mode chauffage) correspond à l'eau d'une nappe souterraine ;
- **pompe à chaleur en boucle fermée sur échangeur enterré** : la source froide (mode chauffage) correspond au sous-sol lui-même indépendamment de la présence d'un aquifère. Le prélèvement de calories se fait par échange.

Quelles que soient i) la technologie de la pompe à chaleur et ii) la ressource géothermique, le rafraîchissement direct sera toujours préféré à une climatisation. Si tel est le cas, les pompes à chaleur à compression et à sorption se différencient comme indiqué ci-après pour le mode chauffage. Si une climatisation s'impose, alors les PAC à sorption ne sont candidates qu'en cas de pilotage thermique par une source fatale ou gratuite.

La puissance d'échange avec la ressource géothermique à installer reste fonction de la performance de la pompe à chaleur et de la technologie employée, surtout si c'est le mode "chauffage" qui est dimensionnant.

Ainsi, pour une même puissance thermique livrée, une pompe à chaleur à compression électrique devra disposer d'une puissance géothermique trois fois supérieure vis-à-vis d'une pompe à chaleur à absorption. Par exemple pour une puissance thermique de 40 kW (utilisation finale), la puissance géothermique disponible pour du rafraîchissement direct sera de 10 kW pour une PAC à absorption et de 30 kW pour une PAC à compression électrique.

Technologie	Puissance géothermique	Puissance de pilotage	Puissance disponible pour du rafraîchissement direct
PAC à compresseur (COP = 4 sur énergie électrique)	30 kW	10 kW (électricité)	30 kW
PAC Gaz à absorption (COP = 1.23 sur PCS)	10 kW	30 kW (gaz)	10 kW

Illustration 93 : Comparaison des puissances installées entre PAC électrique et PAC à sorption

A contrario, l'investissement pour les équipements géothermiques sera trois fois moindre pour une PAC à absorption vis-à-vis d'une PAC à compression électrique de même puissance thermique et, par voie de conséquence, la puissance disponible pour du rafraîchissement direct sera également trois fois moindre. C'est donc sur le fonctionnement, plus précisément sur la facture en énergie (gaz, bois, électricité ...) que le différentiel va s'exprimer. Selon les données GRDF, le coût du kWh électrique s'établit toujours à environ deux fois celui du kWh de gaz naturel, soit en décembre 2013 pour du chauffage exprimé en PCI (pouvoir calorifique inférieur) et exprimés en centimes d'Euros par kWh :

14.75 pour l'électricité, 7.34 pour le gaz naturel et 6.05 pour les granulés de bois en vrac

Sur ce critère en mode chauffage, les pompes à chaleur à compression électrique ou à sorption en restent donc à des coûts de fonctionnement similaires. C'est donc sur le critère de la capacité de rafraîchissement ou de climatisation que se fera la différence.

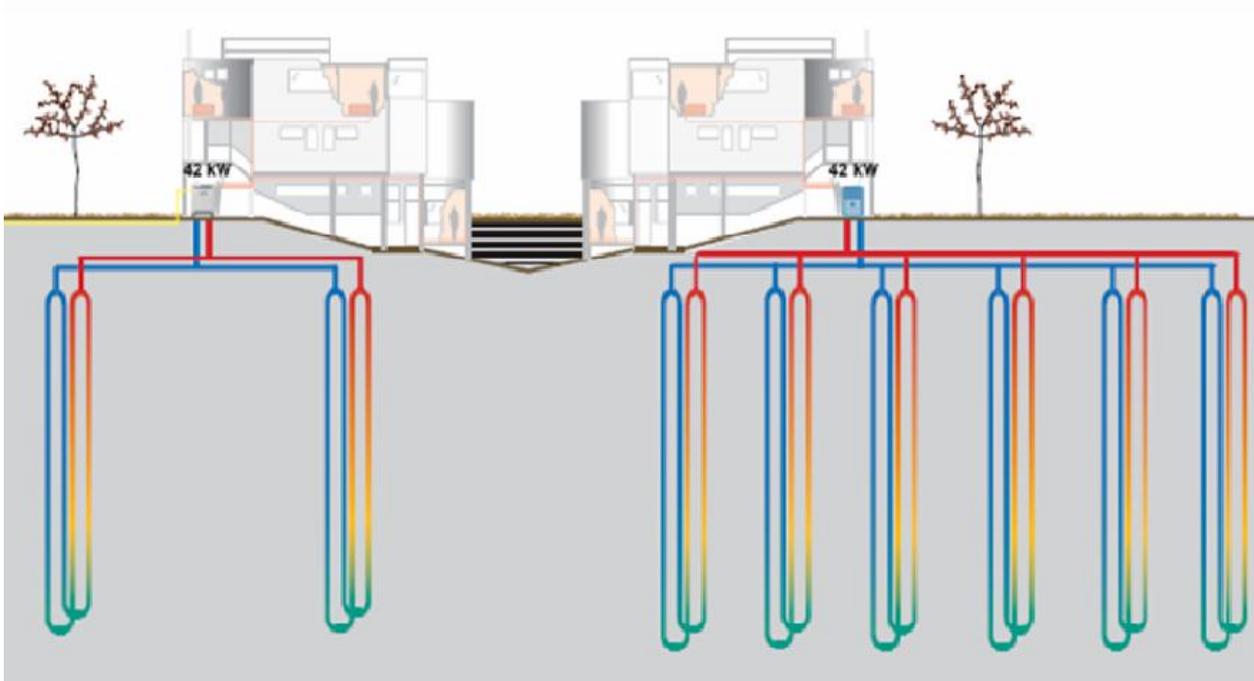


Illustration 94 : Comparaison des d'installations géothermiques entre une PAC à sorption (à gauche) et une PAC à compression électrique (à droite) (source : ADEME)

Particularités liées aux pompes à chaleur pour la géothermie sur aquifère superficiel

• Principe de fonctionnement

Le principe des pompes à chaleur sur aquifère repose sur le prélèvement et le transfert des calories contenues dans les eaux souterraines, majoritairement situées à des profondeurs inférieures à 100 m dans le cas de la présente étude.

Le principe de fonctionnement de la pompe à chaleur sur aquifère est pratiquement similaire à celui d'une PACg sur échangeurs enterrés, notamment les sondes géothermiques verticales (voir plus loin). Toutefois, le fonctionnement en diffère par une température de source géothermique qui reste pratiquement constante toute l'année.

De plus, sans que cela soit formellement obligatoire, il est fortement recommandé d'installer un échangeur intermédiaire qui aura pour objet de totalement découpler le circuit géothermal du circuit de la pompe à chaleur. Les raisons sont de deux ordres :

- garantir une protection en s'assurant que le fluide frigorigène et l'eau géothermale ne puissent jamais entrer en contact. En effet, l'échangeur en entrée de pompe à chaleur est parcouru d'un côté par le fluide frigorigène ;
- faciliter la maintenance et l'entretien courant, notamment pour le nettoyage éventuel de l'échangeur en contact avec l'eau géothermale. En effet, seules les pompes à chaleur équipées d'échangeurs multitubulaires autorisent une maintenance aisée.

Dans les deux cas, cette précaution (non obligatoire), consistant à implanter un échangeur intermédiaire, est également liée à la tenue des matériaux.

L'intérêt corolaire est que le montage de cet échangeur de chaleur permet l'usage direct, notamment pour du rafraîchissement, car il est partie intégrante du système permettant le by-pass de la pompe à chaleur.

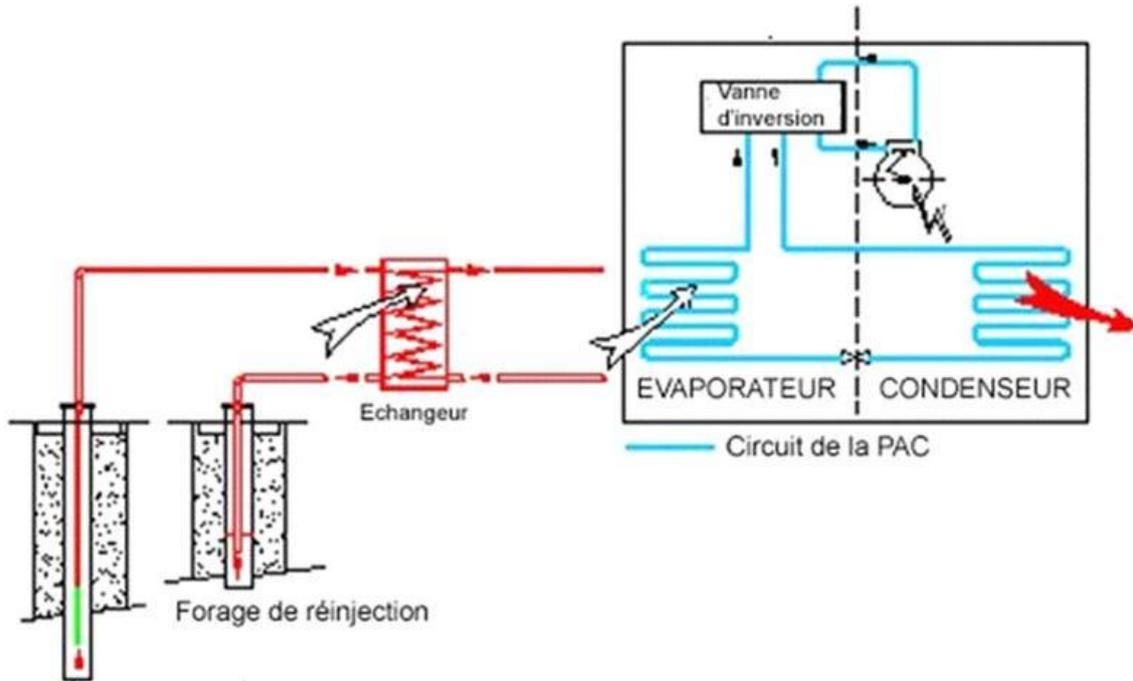


Illustration 95 : Découplage par un échangeur de chaleur (source : ALTO / BRGM)

Avec un échangeur intermédiaire, le fonctionnement de la boucle géothermale sera alors identique au cas des exploitations en échanges directs de chaleur.

Une opération sur aquifère permet de couvrir des besoins de chauffage, d'eau chaude sanitaire (ECS) et/ou de froid, le cas échéant en usage direct (sans recourir à une PAC). En fonction des caractéristiques de l'aquifère (débit, température), il est possible de fournir des puissances de chauffage de plusieurs dizaines ou centaines de kW à plusieurs MW.

Le débit d'eau nécessaire pour couvrir les besoins en énergie thermique peut être calculé, par exemple, selon la formule suivante en période hivernale :

$$D_{FR} = \frac{\left(1 - \frac{1}{COP}\right) \times P_{CH}}{1,16 \times \Delta T}$$

avec

D_{FR} : débit d'hiver, en m³/h,

P_{CH} : puissance de chauffage en kW,

COP : coefficient de performance de la machine,

ΔT : différence entre les températures de pompage et de réinjection

Illustration : Pour une puissance de chauffage de 100 kW, un COP machine égal à 4, une température de pompage de 12 °C et une température de réinjection de 6 °C, le débit d'eau géothermale nécessaire serait de 10 m³/h, ce qui représente une puissance géothermique de 77 kW. Dans le cas réel, il y a un compromis à trouver entre la variation de température et le débit de pompage, en fonction du contexte local.

A titre indicatif, on retiendra ainsi en première approche qu'un débit d'eau de 10 m³/h peut permettre une puissance thermique installée de l'ordre 100 kW pour le système de pompe à chaleur à compression électrique sur aquifère superficiel.

- **Procédure technique pour la mise en œuvre de pompes à chaleur sur aquifère**

La validation d'un projet de pompe à chaleur sur nappe nécessite, en plus des études de conception nécessaire à tout projet, une approche spécifique de la connaissance de la ressource en eau souterraine qui sera sollicitée. Les principales étapes de la mise en œuvre sont les suivantes :

- **Déterminer les besoins**

Il s'agit de déterminer les puissances chaud et froid qu'il faudra fournir au bâtiment.

- **Convertir ces deux puissances en débit d'eau à prélever sur la nappe**

- **Identifier la (les) ressource(s)**

L'analyse des données et l'estimation du débit nécessaire pour satisfaire tout ou partie des besoins thermiques permettront une première orientation.

Dans l'analyse de l'adéquation besoins / ressources, il n'est pas toujours pertinent de chercher à couvrir la totalité des besoins avec la solution PAC sur nappe. L'analyse du fonctionnement dynamique du bâtiment et des systèmes peut mettre en évidence des appels de puissance importants sur de très courtes périodes.

- **Étudier la faisabilité hydrogéologique**

Cette étape requiert l'intervention d'un bureau d'études spécialisé, car il s'agit d'affiner la démarche d'identification préalable de la ressource, en intégrant en particulier le nombre et le dimensionnement préalable des ouvrages, leur positionnement prévisionnel en fonction des contraintes du site.

Une première approche réglementaire doit également être réalisée à ce niveau, ce qui permettra de connaître les documents administratifs à prévoir.

- **Ne pas négliger la conception, le suivi et la réception des travaux sur les ouvrages**

Dès la première étape, un bureau d'études hydrogéologiques intervient en tant qu'assistant au maître d'ouvrage (AMO). Il sera présent de la phase de conception jusqu'à la réception des travaux, tant pour les aspects techniques et financiers des ouvrages (forages, équipements, maintenance) que pour la partie administrative et réglementaire.

Enfin, il faut noter qu'il existe une procédure de « garantie sur la ressource en eau souterraine à faible profondeur utilisée à des fins énergétiques ». Il s'agit de la procédure AQUAPAC, destinée à couvrir le risque d'aléa sur la ressource et sa pérennité.

Ces différentes étapes doivent être menées en concertation avec les autres intervenants du projet, afin d'obtenir le meilleur ajustement besoins/ressources. Une analyse économique devra comprendre une étude comparative afin de justifier la solution pompe à chaleur sur nappe, intégrant les coûts d'investissement, les coûts de fonctionnement (énergie, maintenance), le renouvellement dans une perspective à au moins 30 ans ainsi que l'aspect environnemental.

Particularités liées aux pompes à chaleur pour les sondes géothermiques verticales

Du fait d'une évolution de la température des terrains en cours de saison, le COP saisonnier d'une pompe à chaleur sur SGV est moins favorable que celui d'une pompe à chaleur sur

aquifère. Toutefois, l'écart reste assez peu perceptible pour les systèmes alternant les usages de chauffage et de rafraîchissement.

Avec les techniques sur échangeurs géothermiques enterrés, l'énergie thermique du sous-sol est directement exploitée sans avoir à pomper l'eau d'un aquifère. Ces dispositifs peuvent être mis en œuvre dans les zones dépourvues de nappe d'eau souterraine exploitable. Ainsi, dans les endroits où le sous-sol ne révèle pas d'aquifères exploitables, ou si l'exploitation des aquifères superficiels présente des difficultés, il est possible, pour des usages thermiques, d'échanger de la chaleur avec le sous-sol via des échangeurs de chaleur qui seront enterrés et seront parcourus par un fluide caloporteur.

Ce fluide caloporteur devra respecter les prescriptions en vigueur s'il venait à fuir dans le milieu naturel. Par ailleurs, sa viscosité devra être maintenue à un niveau acceptable pour ne pas impacter la performance énergétique du système en induisant de fortes dépenses pour le pompage. Sur le principe, les pompes à chaleur sont très proches de celles fonctionnant sur nappe aquifère, des différences techniques pouvant se noter au niveau des échangeurs et des pompes de circulation.

Par contre, le fonctionnement diffère sur un cycle annuel en ce sens ou, en mode chauffage, la température du sous-sol va progressivement s'abaisser. Il en sera de même de la température d'entrée dans l'évaporateur de la pompe à chaleur qui verra alors son COP légèrement baisser en cours de saison de chauffe. Par contre, ce phénomène est bénéfique pour la performance en mode rafraîchissement ou en mode climatisation qui bénéficiera alors, du moins en début de saison, d'une température de sol plus basse. En l'absence d'usage pour le rafraîchissement, une régénération du stock thermique se produit naturellement.

Lors du dimensionnement des sondes verticales, on va considérer que la température de la source va diminuer progressivement en cours de la saison de chauffe, en principe pour atteindre une température qui doit rester positive. Typiquement, la baisse de température est de l'ordre de 7 °C (Illustration 96). Du fait de la baisse de la température des terrains, le COP de la pompe à chaleur va baisser progressivement pendant la saison de chauffage, de l'ordre de 15 % à 20 % pour la baisse de température de 7 °C ci-avant.

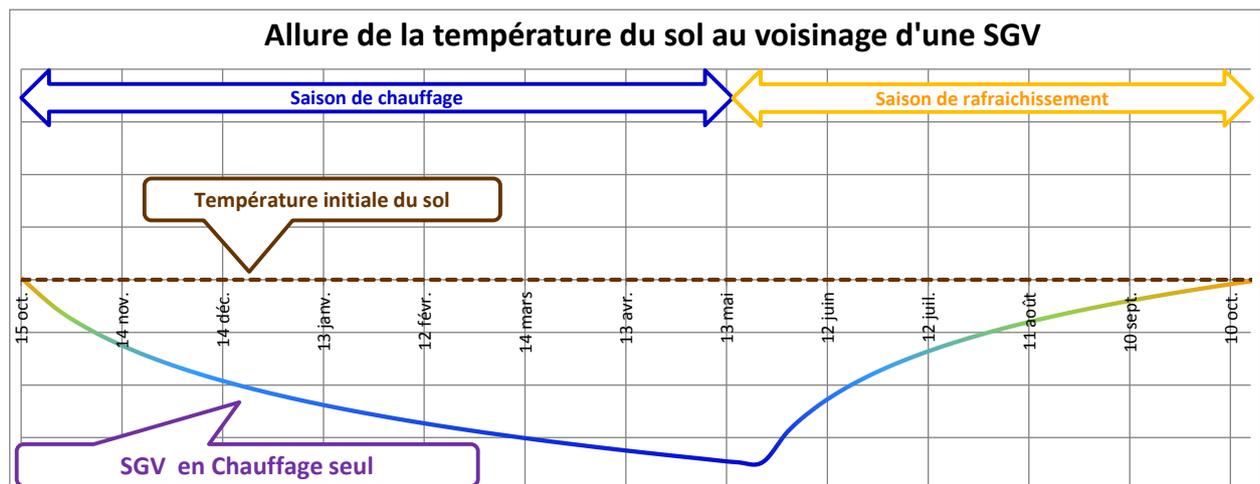


Illustration 96 : Allure de la température en entrée de la pompe à chaleur après plusieurs années pour une SGV utilisée uniquement pour du chauffage

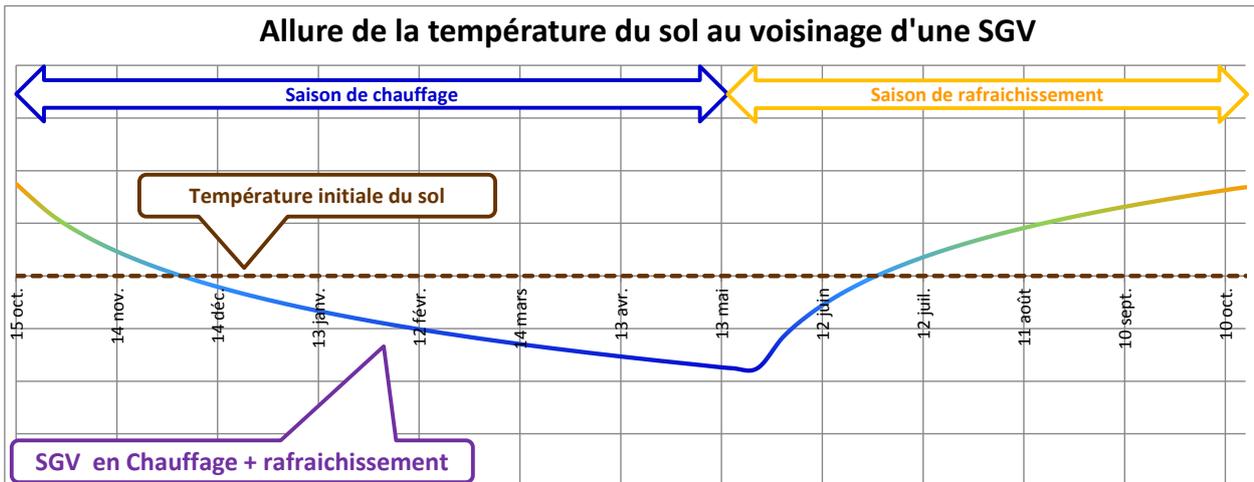


Illustration 97 : Allure de la température en entrée de la pompe à chaleur après plusieurs années pour une SGV utilisée pour du chauffage en hiver et pour du rafraîchissement en été

Particularités liées aux pompes à chaleur pour les échangeurs compacts

Dans le cas des champs de sondes géothermiques (Illustration 98), on va accroître le nombre des sondes géothermiques afin de maximiser le COP saisonnier. Pour cela on privilégiera les modes d'exploitation alternant les usages de chauffage et les usages de rafraîchissement (Illustration 97). Pour les champs de sondes, on peut alors parler de stockage inter-saisonnier.

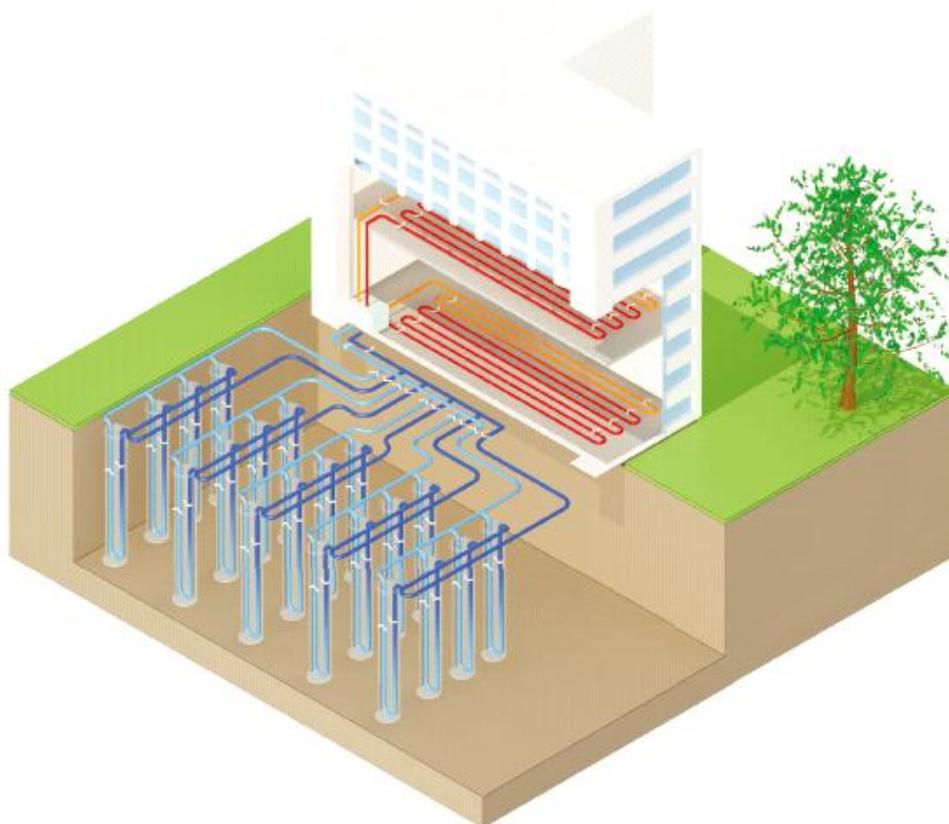
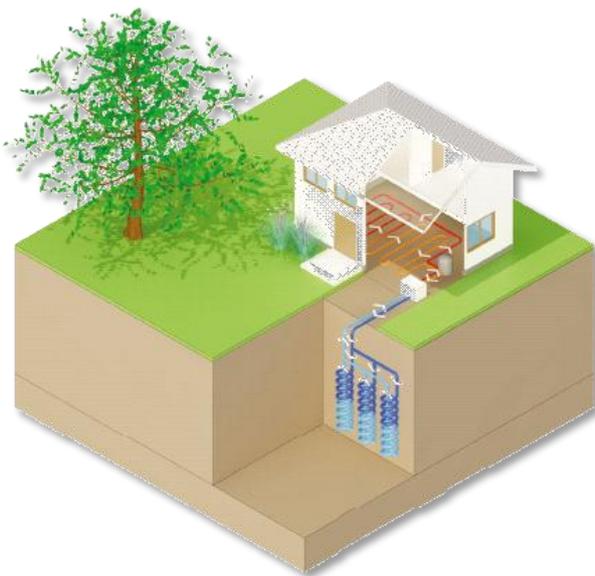


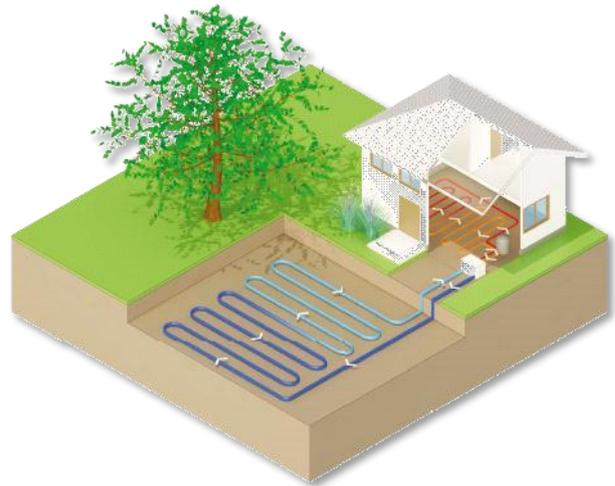
Illustration 98 : Bâtiment raccordé à un champ de sondes géothermiques (source : BRGM)

Particularités liées aux pompes à chaleur pour les échangeurs compacts et horizontaux

Ces échangeurs ne sont pas étudiés dans le cadre de la présente étude car ils sont réservés aux usages individuels hors des zones les plus urbanisées. De plus, sur le territoire de Clermont Communauté, du fait de la rigueur hivernale, on retiendra que, pour les **échangeurs géothermiques compacts et horizontaux**, la température de la source froide pourra passer significativement en dessous de 0 °C en cours de saison de chauffe. De ce fait, le COP reste généralement inférieur à celui de la même machine fonctionnant sur nappe aquifère ou sur sonde géothermique verticale.



Echangeurs compacts



Echangeurs horizontaux

Illustration 99 : Echangeurs géothermiques compacts et horizontaux (source : BRGM)

Production de froid (eau glacée) et pompes à chaleur réversibles

Lorsque les niveaux des températures de la source géothermique et du système de distribution sont incompatibles avec du rafraîchissement direct, il sera possible de recourir à deux machineries thermodynamiques indépendantes pour la production de chaud et pour la production de froid, à des PAC réversibles ou à des assemblages de type thermo-frigo-pompes, ces dernières fournissant simultanément tous les services (chauffage, ECS, froid).

En hiver, une pompe à chaleur réversible assure la production de chaleur et, en été, la production de froid pour alimenter un circuit d'eau glacée, cette production pouvant, éventuellement, être en temps partagé avec la production d'ECS. Pour ce faire, il convient d'inverser le sens de circulation du fluide frigorigène dans la PAC grâce à un jeu de vannes commandées par l'automatisme.

En mode froid, la chaleur est prélevée au milieu intérieur (source froide) et rejetée dans le milieu extérieur (source chaude). Dans les mêmes conditions qu'une PAC classique, les PAC réversibles pourront utiliser soit la chaleur du sous-sol, soit la chaleur d'une nappe d'eau souterraine. C'est ce dernier cas, pour la technique du doublet géothermique, qui est illustré par les graphiques ci-après. Dans les grandes lignes, deux configurations possibles selon que le système exploite ou non les éventuelles aptitudes au stockage inter-saisonnier d'énergie thermique. Pour la géothermie sur aquifères, cela peut impliquer de spécialiser les ouvrages afin de favoriser la formation de bulles chaudes et de bulles froides. Dans ce cas, chaque

ouvrage devra être équipé d'une pompe d'exhaure (Illustration 100). Le sens de circulation de l'eau dans la boucle géothermale sera alors inversé à chaque changement de saison.

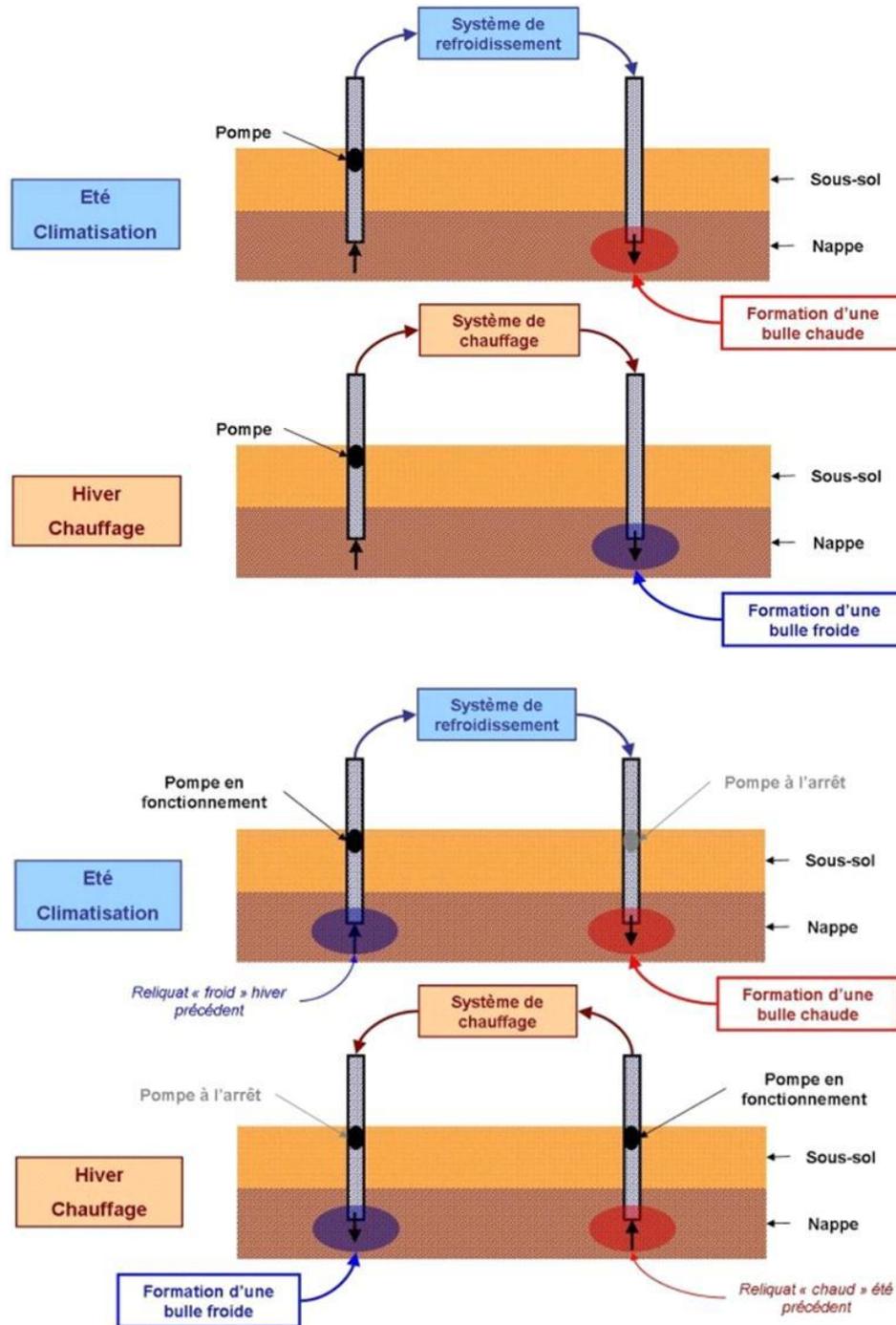


Illustration 100 : Schéma de principe du fonctionnement de la PAC réversible - En haut, cas avec un seul sens de circulation - En bas, cas avec les deux puits équipés de pompes d'exhaure

Pour les champs de sondes géothermiques verticales, que la pompe à chaleur soit réversible joue surtout sur la distance qui sépare les sondes géothermiques. En effet, elles peuvent être plus rapprochées s'il est thermiquement possible d'exploiter l'alternance entre le mode chauffage et le mode rafraîchissement. Aucune inversion du sens de circulation du fluide caloporteur n'est nécessaire pour cette technologie.

- **Montage en thermofrigopompe**

Physiquement, une pompe à chaleur produit simultanément du chaud et du froid. Or, certains bâtiments, du tertiaire notamment, ont des besoins simultanés de froid et de chaud toute l'année (cliniques, hypermarchés, locaux tertiaires ...).

Sur le principe, les montages de type thermofrigopompe ont pour objet de satisfaire les besoins de chaleur et de froid par au moins deux réseaux de distribution distinctifs (Illustration 101), par exemple : réseau de chaleur, réseau d'eau glacée et réseau d'eau chaude sanitaire.

En général, pour satisfaire les différents niveaux de température et de puissance requis, les machineries thermodynamiques comprendront, a minima, deux pompes à chaleur, une d'entre elles pouvant être réversible afin d'autoriser une adaptation à la saisonnalité des demandes en chaud et en froid.

En outre, ce montage permet de moins solliciter les sources d'énergie renouvelable car les rejets thermiques des pompes à chaleur peuvent être utilisés au lieu d'être rejetés dans le milieu naturel.

Ce type de montage est donc recommandé en géothermie. Il existe de nombreuses variantes techniques, la figure ci-après n'illustrant qu'une d'entre elles.

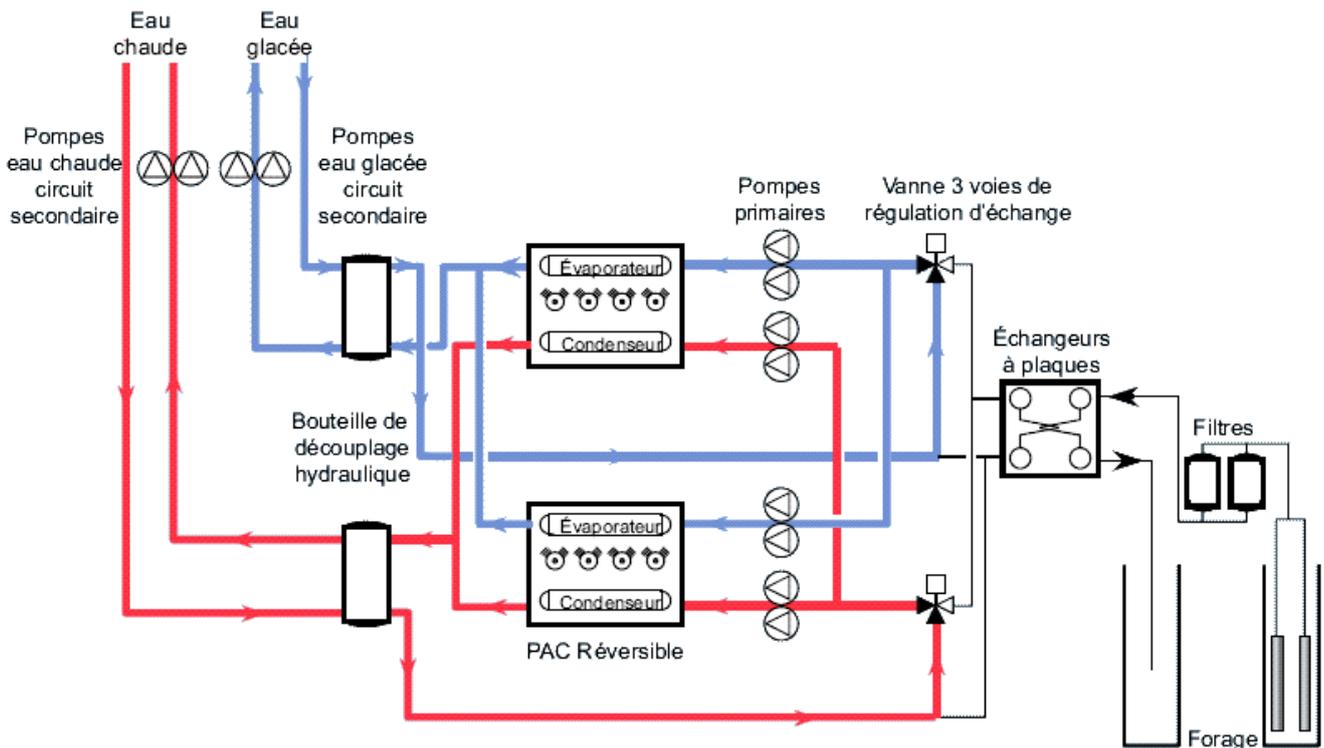


Illustration 101 : Exemple d'un schéma de principe d'une thermofrigopompe

Annexe 2.2 : Doublets géothermiques

Technique du doublet géothermique sur nappe aquifère (boucle ouverte)

Cette technique est largement décrite dans la littérature et sur les réseaux informatiques. L'objet de cette annexe est de synthétiser graphiquement quelques variantes selon l'échelle de mise en place et le contexte urbain concerné.

D'une manière générale, la réinjection de l'eau pompée pour en prélever de l'énergie thermique est fortement recommandée sans être formellement obligatoire. La justification est la préservation des équilibres hydrauliques dans les milieux souterrains. La technique du doublet représente l'essentiel de ces techniques qui utilisent au moins un puits de réinjection.

Sur le territoire de Clermont Communauté, les opérations de géothermie sur aquifère superficiel nécessite l'intervention d'un bureau d'études spécialité afin de préciser localement les conditions de réalisation d'une opération.

Doublet géothermique

Sur les deux schémas qui suivent, le chemin suivi par l'eau géothermale depuis son prélèvement jusqu'à sa réinjection constitue la "**boucle géothermale**". Ce fonctionnement comprenant un puits de prélèvement et un puits de réinjection est appelé "doublet géothermique". **Cette boucle est une boucle ouverte.**

On dénomme "**circuit géothermique**" la boucle secondaire qui correspond au réseau de distribution de la chaleur. Cette boucle permet l'approvisionnement des utilisateurs en énergie thermique. Cette boucle est une **boucle fermée**, c'est-à-dire que l'eau reste dans les conduites du réseau. Elle est découplée de l'eau géothermale par un échangeur de chaleur.

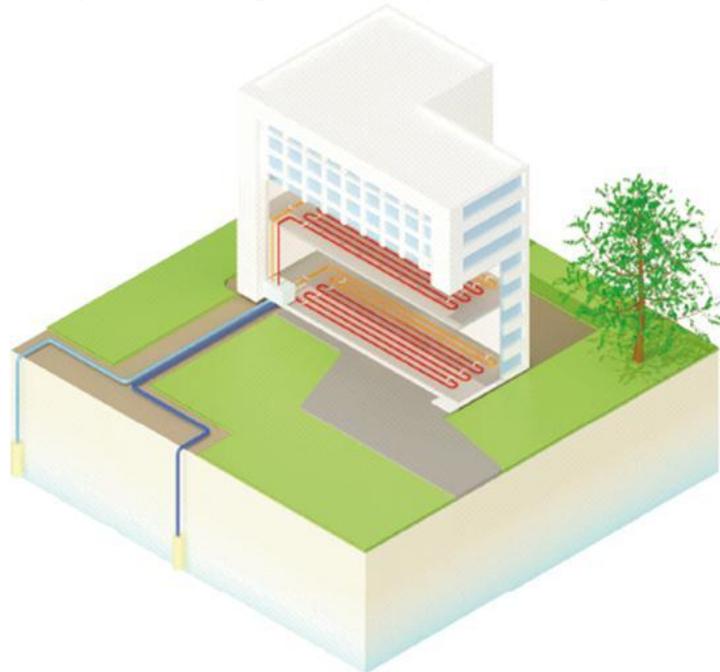


Illustration 102 : Equipements géothermiques à l'échelle d'un bâtiment collectif

En secteur urbain, ce sont surtout les usages collectifs qui seront recherchés plutôt que les usages individuels. En effet, la technique de la géothermie sur aquifère superficiel permet, en principe, de satisfaire des puissances raccordées relativement élevées même si le débit d'eau géothermal pompé reste faible.

En général, on considère que le débit de l'aquifère doit être de 5 m³.h et plus pour présenter un intérêt économique certain. A titre indicatif, dès la disponibilité d'un débit supérieur à 5 m³/h, on peut considérer que la puissance géothermique exploitable est de l'ordre de 30 kW. Dans ce cas, une pompe à chaleur en mode chauffage aura une puissance thermique restituée de l'ordre de 40 kW. Avec les normes de construction et de rénovation actuelles, une telle puissance thermique installée correspond déjà à des ensembles collectifs ou tertiaires.

Toutefois, sur le secteur de Clermont Communauté, on constate plusieurs zones favorables à la géothermie superficielle, certaines pouvant atteindre ou dépasser des débits de 60 m³/h. Sans représenter des débits importants, ces valeurs autorisent toutefois la mise en œuvre de petits réseaux de distribution d'énergie thermique, plusieurs doublets géothermiques pouvant alors être combinés sur le même réseau.

En secteurs urbanisés relativement denses, la production et la distribution de l'énergie d'origine géothermique sur aquifère pourra alors s'envisager de plusieurs façons qui se schématisent en trois variantes :

1. chaque bâtiment dispose de son propre équipement géothermique (Illustration 103) ;
2. chaque bâtiment dispose de sa propre machinerie thermodynamique mais l'équipement géothermique est mis en commun pour plusieurs bâtiments (Illustration 104) ;
3. les installations géothermiques et la machinerie thermodynamique sont mises en commun pour l'ensemble des bâtiments (Illustration 105).

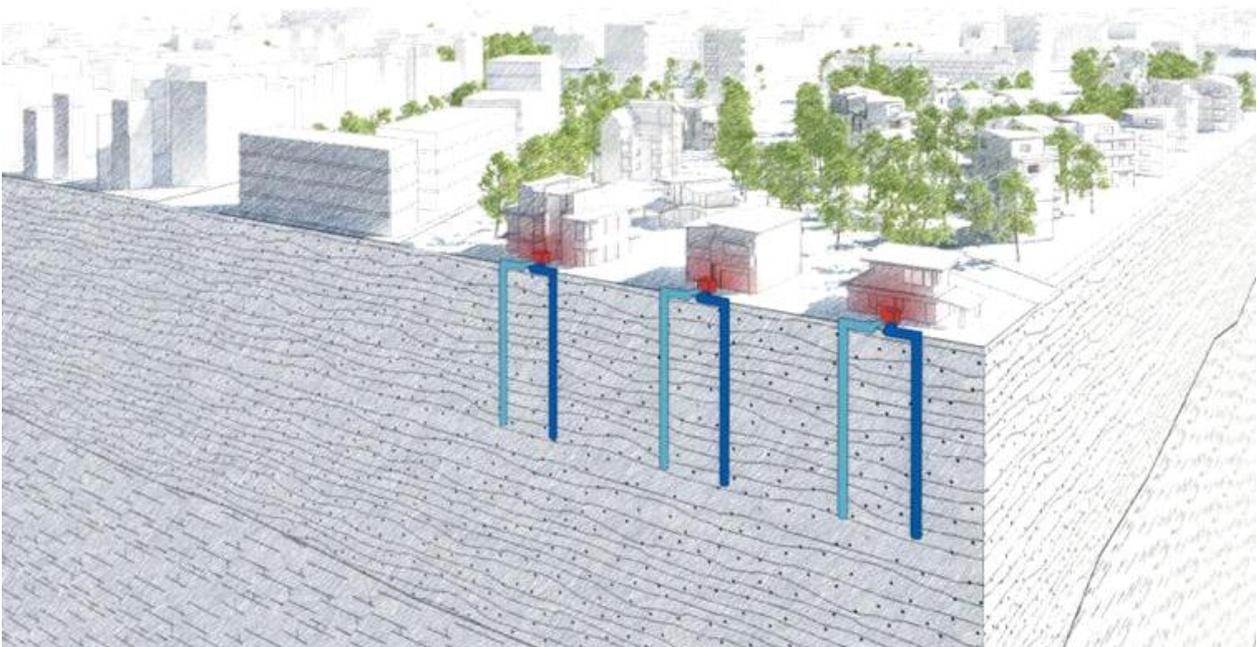


Illustration 103 : Secteur urbain où chaque bâtiment dispose de son propre équipement géothermique

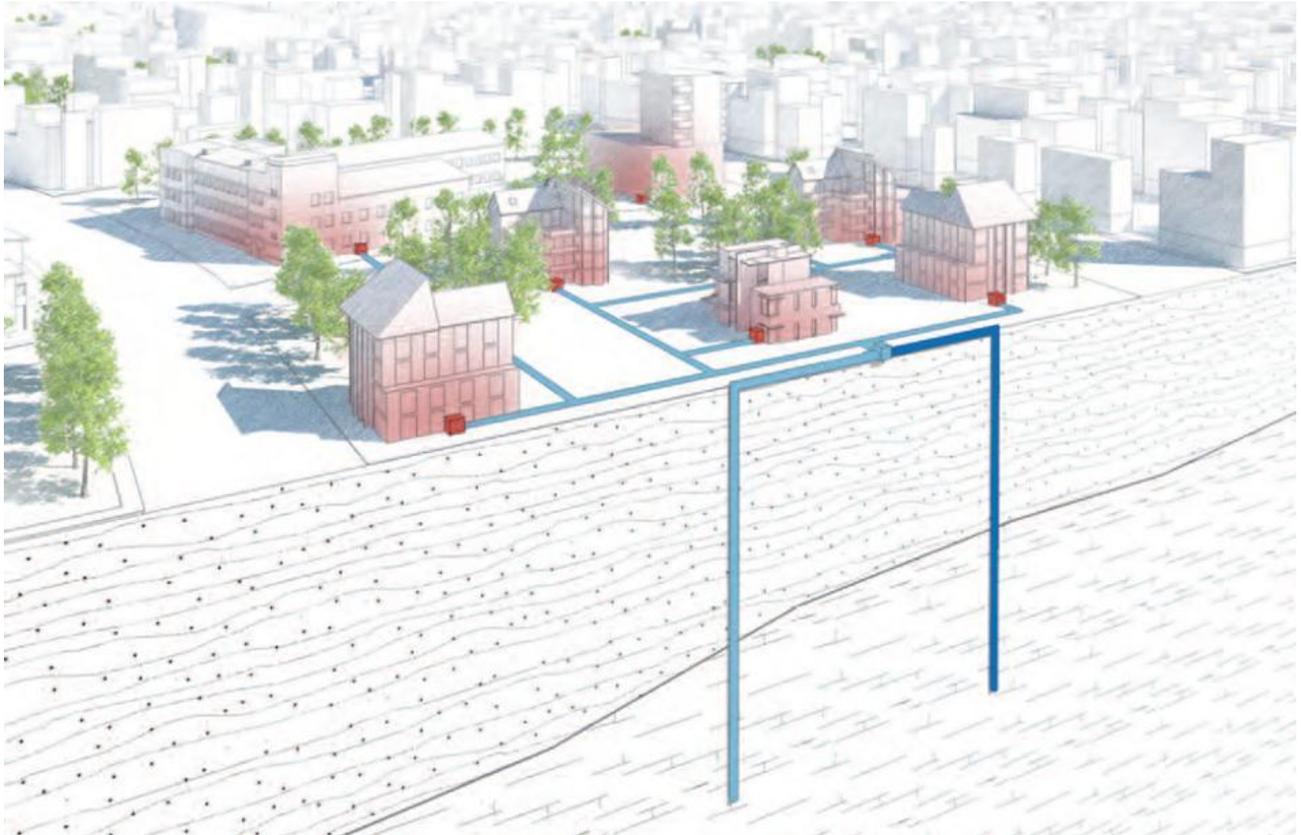


Illustration 104 : Secteur urbain où la boucle géothermale est mise en commun mais où chaque bâtiment dispose de son installation géothermique

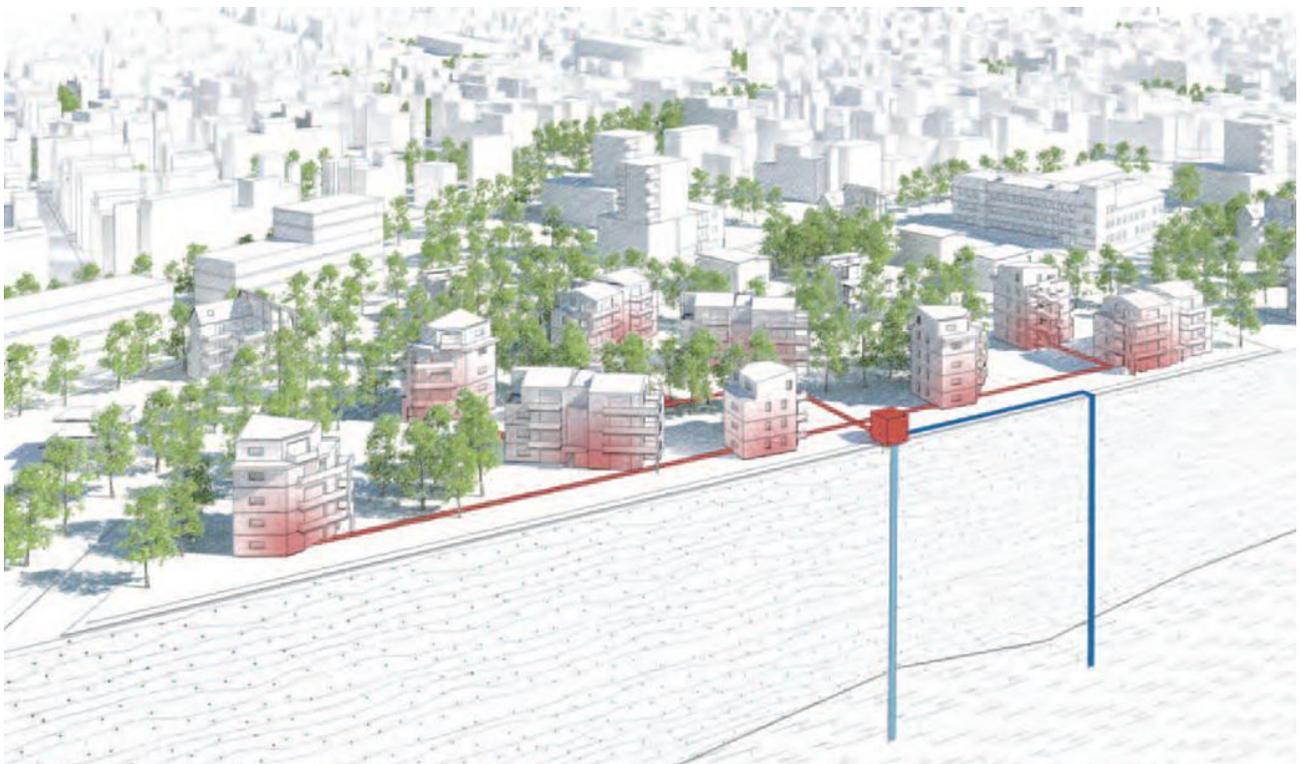


Illustration 105 : Secteur urbain où toutes les installations géothermiques sont mises en commun

Dispositif de pompage

On rappellera que les installations géothermiques sur aquifère nécessitent la création de deux forages (recommandation). Ceux-ci doivent être réalisés selon les règles de l'art (norme AFNOR NF X10-999 et fascicule de documentation FD X10-980) afin d'assurer une durée de vie correcte à l'installation et afin d'éviter toute interférence hydraulique avec le voisinage.

Pour fonctionner correctement, une installation sur doublet géothermique doit bénéficier d'un débit d'eau régulier et suffisant. Dans certains cas, si la pression de l'eau contenue dans le réservoir permet au fluide de jaillir au-delà de l'altitude du sol, le puits est artésien et peut se suffire à lui-même jusqu'à un certain débit. Dans le cas contraire, ou bien pour exploiter un débit supérieur au débit artésien, il est nécessaire d'avoir recours à un dispositif de pompage.

Le dispositif de pompage sera descendu en profondeur pour être certain, en toute saison, qu'il reste immergé sous l'effet du rabattement qui résulte du pompage (Illustration 106). Un phénomène similaire se produit dans le puits d'injection, à ceci près que le cône correspond à un niveau d'eau supérieur à celui de la nappe au repos. Il faut donc s'assurer qu'il ne peut pas se produire de débordement.

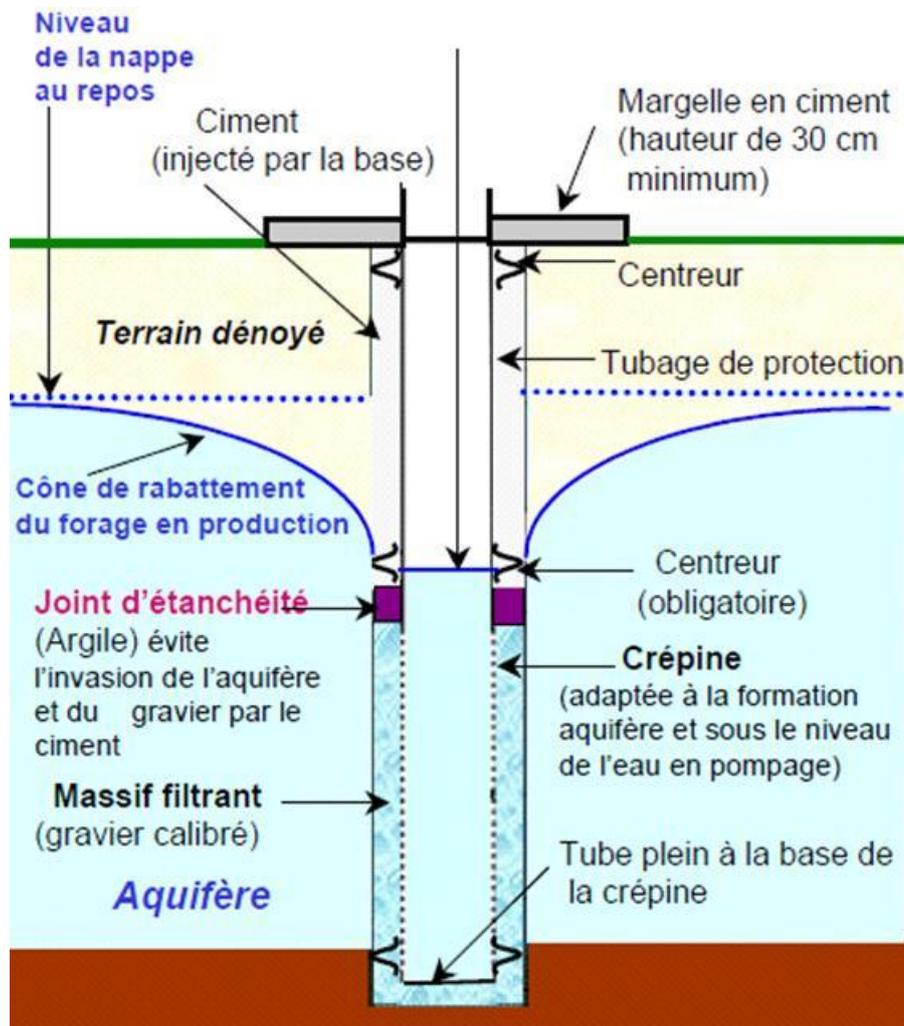


Illustration 106 : Visualisation du cône de rabattement lors du pompage dans un puits de production

Annexe 2.3 : Sondes géothermiques verticales et stockage périodique d'énergie thermique

Technique de la sonde géothermique verticale (boucle fermée)

Cette technique est largement décrite dans la littérature et sur les réseaux informatiques. L'objet de cette annexe est donc de synthétiser graphiquement quelques variantes selon l'échelle de mise en place et le contexte urbain concerné. Sur le territoire de Clermont Communauté, les opérations sur sondes géothermiques verticales semble pouvoir être envisagées partout hormis dans les zones où réaliser des ouvrages est encadré (zones protégées, cavités ...).

Sondes géothermiques verticales (SGV)

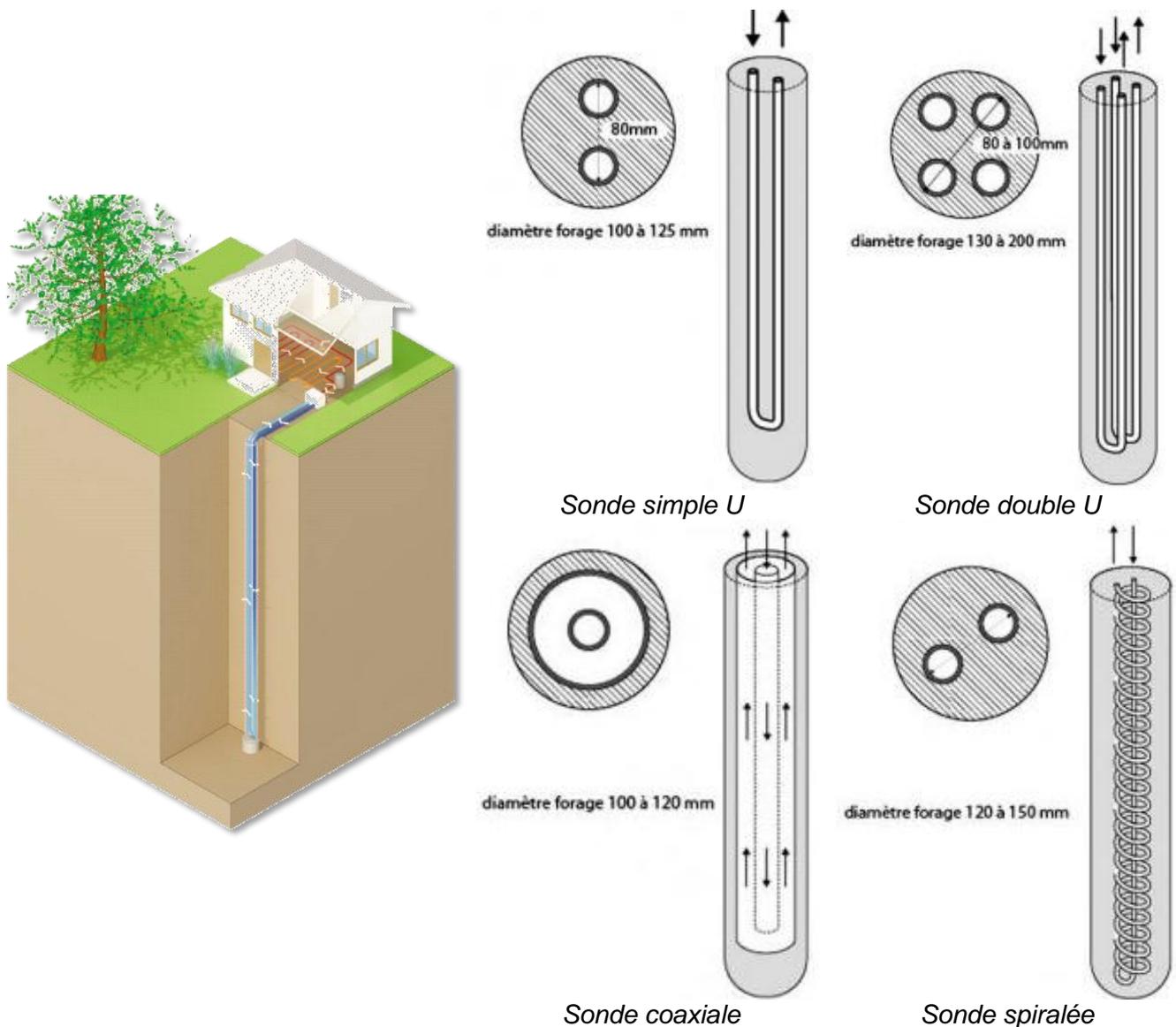


Illustration 107 : Différentes variantes de réalisation des sondes géothermiques verticales

Les sondes géothermiques verticales (SGV) sont des échangeurs de chaleur verticaux qui sont implantés dans des forages à une profondeur généralement inférieure à 100 m. Ces échangeurs verticaux sont parcourus par un fluide caloporteur qui circule dans une boucle fermée. On dénombre quatre principales variantes de sondes géothermiques verticales (Illustration 107) ; la technique de la sonde en double U étant la plus répandue en France.

Cette sonde est composée de deux tubes en U en PEHD (polyéthylène haute densité) placés dans un forage. Le contact entre ce capteur et le sous-sol se fait par l'intermédiaire d'un mélange ciment-bentonite.

La réalisation de ces ouvrages fait l'objet d'une réglementation et de recommandations qui portent tant sur la réalisation du forage que sur l'équipement de l'ouvrage, en particulier la cimentation qui doit à la fois assurer la conduction thermique et l'étanchéité à l'éventuelle circulation d'eau le long de l'ouvrage.

L'usage actuel en France est de ne pas dépasser 100 m de profondeur pour les sondes géothermiques verticales. Dans certains pays voisins, on opère assez régulièrement jusqu'à 200 m voire 300 m. Techniquement, des sondes géothermiques jusqu'à 800 m de profondeur sont disponibles dans les catalogues de constructeurs (Illustration 108). Dans tous les cas, y compris pour la réalisation d'ouvrages profonds, une SGV présente l'avantage de mobiliser une relativement faible emprise foncière, y compris pendant la phase de foration.



Illustration 108 : Prototype de sonde double U profonde (source : REHAU)

Dimensionnement des sondes géothermiques verticales

Important : Une sonde géothermique verticale peut être implantée dans des terrains de nature variée, y compris des formations aquifères (Illustration 109).

Une sonde géothermique verticale ne peut être dissociée d'une pompe à chaleur pour assurer le chauffage et la production d'ECS. De ce fait, la puissance installée doit **satisfaire le besoin moyen** lors de la période la plus froide de l'année, si l'usage prioritaire est le mode chaud (chauffage + ECS). En général, la période la plus froide de l'année se situe vers la fin janvier.

En été, le système peut être inversé pour fonctionner en mode rafraîchissement direct ou en mode climatisation si la PACg est réversible. Pour certains bâtiments, mais ce ne devrait pas être le cas sur le territoire de Clermont Communauté, le mode climatisation peut être le plus exigeant en matière d'échange géothermique de chaleur. On dimensionnera alors le système pour le mois de juillet ou le mois d'août.

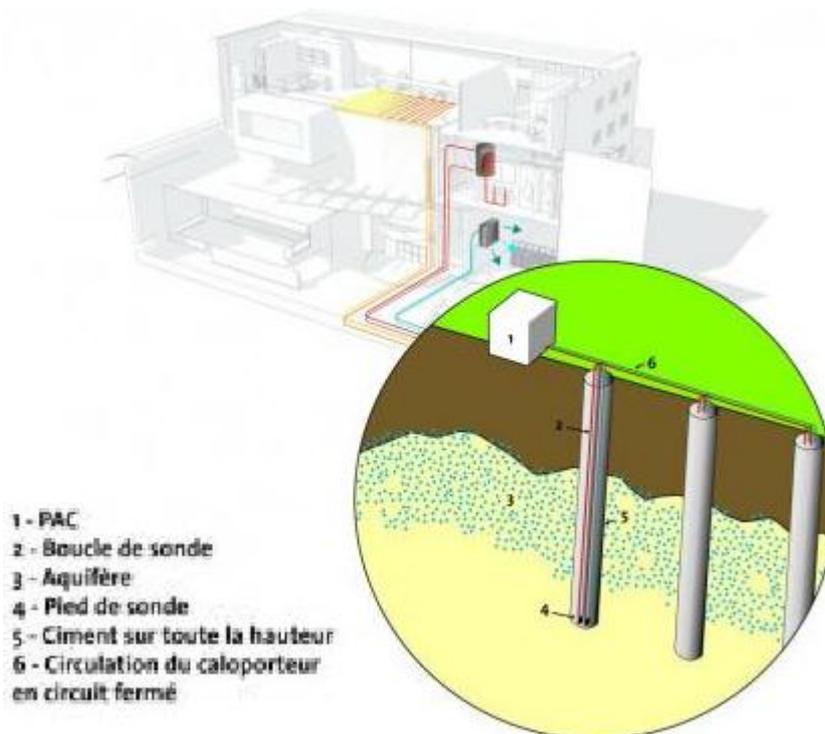


Illustration 109 : Schéma conceptuel d'implantation d'un système sur sondes géothermiques verticales

Important : Contrairement aux ouvrages sur aquifère, une sonde géothermique verticale n'a pratiquement pas de surpuissance, même sur des périodes très courtes.

De ce fait, la surpuissance, par exemple pour les courtes périodes de grand froid (quelques heures à quelques jours), devra pouvoir être assurée par la machinerie thermodynamique, soit en dimensionnant correctement les ballons tampon, soit en prévoyant un appoint thermique.

Plus encore pour une installation sur sondes géothermiques que pour une installation sur aquifère, le dimensionnement sera donc opéré en évitant les fortes pointes correspondant à des très courtes durées de fonctionnement. Dans la pratique, cela signifie qu'il vaut mieux faire fonctionner une installation géothermique continument plutôt que de la faire fonctionner que sur

des très courtes durées, par exemple inférieures à quelques dizaines de minutes. Cette recommandation est également favorable à la durée de vie des pompes à chaleur.

Le fait de dimensionner pour un fonctionnement continu plutôt que pour un fonctionnement par courtes périodes a pour conséquence de limiter le nombre des sondes géothermiques qui seraient à réaliser pour une même livraison d'énergie thermique.

Le nombre des ouvrages à réaliser dépend des paramètres thermiques des roches traversées (contexte géologique et hydrogéologique). Les principaux paramètres sont la conductivité thermique du sol qui s'exprime en W/m.K et la capacité thermique du sol qui s'exprime en MJ/m³.K. Ces valeurs peuvent être estimées à partir de banques de données relatives aux sols ou mesurées in-situ avec un test de réponse thermique (TRT).

Le test de réponse thermique caractérise l'ensemble du système sol / sonde géothermique. En règle générale, on ne cherche pas à connaître le détail des paramètres pour chacun des niveaux géologiques traversés mais uniquement l'aptitude thermique globale.

Le principal résultat est une grandeur moyenne qui va caractériser la puissance thermique nominale qui peut être échangée. On l'exprime en ramenant ce résultat au mètre de profondeur de la sonde géothermique. Ce TRT est fortement recommandé pour les champs de sondes géothermiques, la première sonde géothermique réalisée et soumise à un TRT permettant alors de dimensionner le reste du champ (voir plus loin).

Pour un pré-dimensionnement d'une sonde géothermique et sous réserve d'une information disponible relative à la coupe géologique, on pourra procéder à une estimation des paramètres thermiques en se reportant au tableau ci-après (Illustration 110) qui donne également une idée de la profondeur totale à forer en fonction de la performance de la pompe à chaleur.

	Conductivité thermique		Puissance thermique indicative		Profondeur indicative de la SGV en mètres par kW thermiques			
	(W/m.K)		(W/m)		COP = 3		COP = 3.5	
	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi
Roches indurées à conductibilité thermique élevée	3.00			70		19.5		10
Roches indurées ou Roches meubles saturées d'eau	1.50	3.00		50		13		14
Sous-sol de mauvaise qualité (roches meubles sèches)		1.50		20		33		36
Gravier, Sable humide	1.80	2.40	55	65	10	12	11	13
Argile, Limon humide	1.70		30	40	17	22	18	24
Gravier, Sable sec	0.40			20	33		36	
Calcaire massif	2.90		45	60	11	15	12	16
Grès	2.50		55	65	10	12	11	13
Gneiss	2.90		60	70	9.5	11	10	16
Granite	3.4		70		9.5	12	10	13

Illustration 110 : Paramètres indicatifs pour les propriétés des sondes géothermiques verticales

Champs de sondes géothermiques verticales

Pour assurer des puissances comparables à celles d'une géothermie sur aquifère, on pourra concevoir des installations regroupant un grand nombre de sondes géothermiques. Une telle installation est dénommée champ de sondes géothermiques. Les règles de l'art proposent plusieurs arrangements, les deux grandes approches possibles étant les suivantes :

2. Les SGV sont implantées à distance respectable les unes des autres dans l'objectif de leur conférer un fonctionnement indépendant les unes des autres.

En première approche, on peut admettre qu'une distance entre sondes d'une dizaine de mètres les rend relativement indépendantes les unes des autres si la durée cumulée du fonctionnement reste limitée, par exemple à 50 % du temps en saison hivernale. En première approche, on va considérer que les puissances d'extraction indicatives du tableau ci-avant (Illustration 110) peuvent être conservées.

3. Les SGV sont implantées à une distance relativement faible les unes des autres afin de pouvoir bénéficier d'un effet de stockage périodique.

En première approche, on va considérer que les puissances d'extraction indicatives du tableau ci-avant (Illustration 110) doivent être minorées de 20 % à 40 %. L'intérêt du système résidera alors dans la gestion du stock thermique qui aura pour effet de très significativement améliorer les COP saisonniers de la machinerie thermodynamique. De plus, ces systèmes sont compatibles avec le stockage périodique d'énergie thermique, par exemple issue de panneaux solaires.

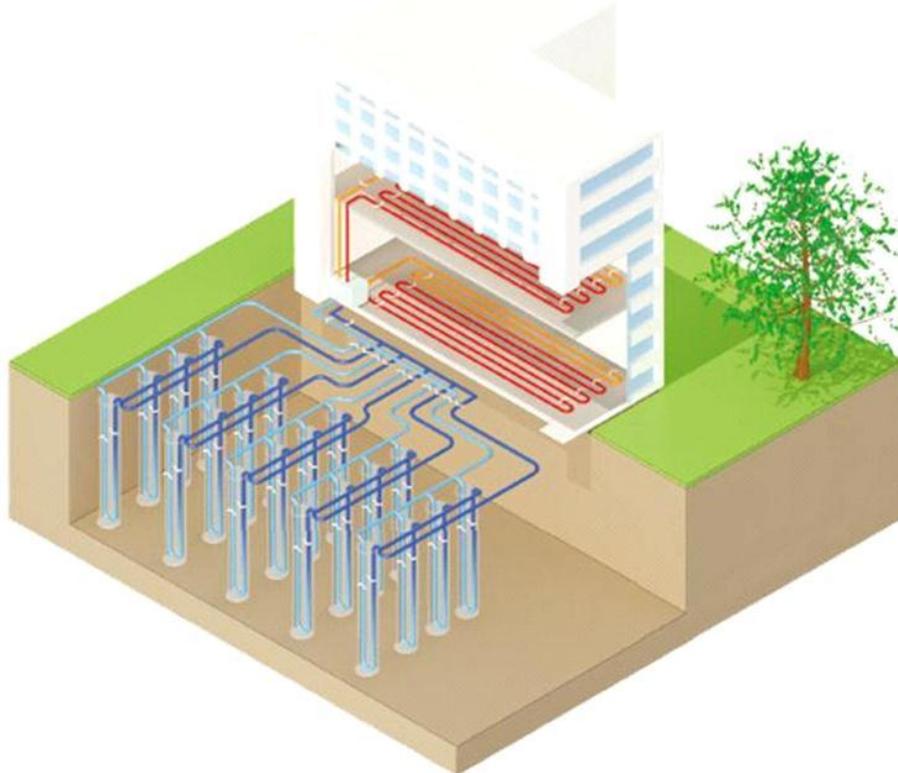


Illustration 111 : Schéma conceptuel d'un champ de sondes géothermiques verticales

Les installations les plus puissantes peuvent compter plus de 200 sondes, éventuellement à des profondeurs dépassant 100 m. Les puissances installées en chaud comme en frais peuvent atteindre, voire dépasser, 2 MW.

Stockage inter-saisonnier en champs de sondes géothermiques verticales

Important : Dans ce document, le stockage d'énergie thermique dans les aquifères n'est pas traité car il semble incompatible avec les paramètres hydrogéologiques du territoire de Clermont Communauté. Seuls les champs de sondes géothermiques sont donc présentés.

Sur le principe, le fait d'implanter des sondes géothermiques en grand nombre dans un volume restreint se justifie d'autant plus que les besoins thermiques seront alternés entre demande pour le chauffage et demande pour la climatisation ou le rafraîchissement. En effet, en fin de saison de chauffage, la température des terrains est abaissée de quelques degrés, ce qui va permettre d'améliorer la performance énergétique du système au début de la saison de rafraîchissement. De même, en fin de saison de rafraîchissement, les terrains sont réchauffés, ce qui améliore la performance du système en début de saison de chauffage.

Il s'agit là d'un premier niveau de stockage inter-saisonnier d'énergie thermique et on peut utiliser cette technique géothermique dès que l'on dispose d'énergies thermiques excédentaires. On adaptera les niveaux de la température du sous-sol et la machinerie thermodynamique à la nature de ces sources thermiques. Sur le territoire de Clermont Communauté, ce sont surtout les excédents d'origine solaire, directs ou indirects (climatisation), qui semblent correspondre à une réalité pour les bâtiments tertiaires ou d'activité économique ou commerciale, comme c'est le cas pour l'illustration ci-après. Pour cet hôtel situé en périphérie de Toulouse, des panneaux solaires thermiques, localisés en couverture du parking, produisent, assez souvent, plus d'énergie thermique que nécessaire pour l'eau chaude sanitaire. Aussi, périodiquement, un excédent d'énergie est injecté dans le petit champ de 19 sondes géothermiques (Illustration 112).

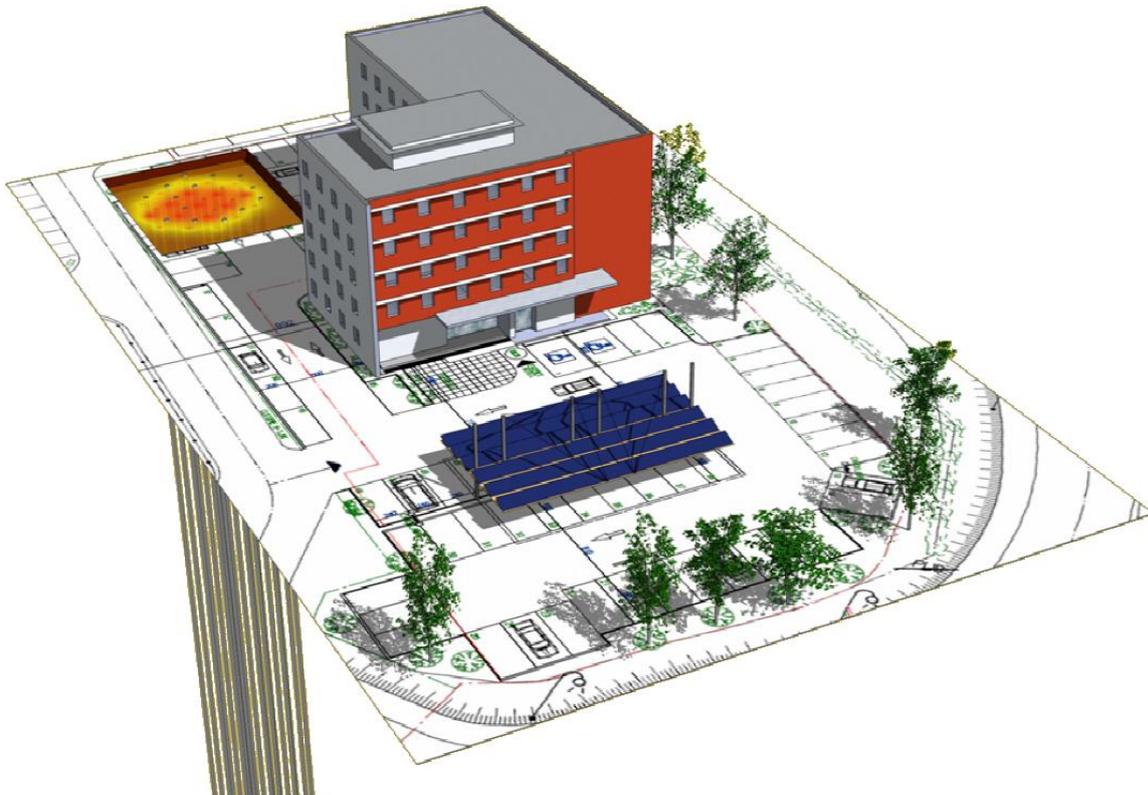


Illustration 112 : Schéma d'un stockage géothermique d'énergie d'origine solaire (source : Groupe Accord)

Stockage inter-saisonnier dans les fondations géothermiques

Contrairement aux stockages inter-saisonniers en champs de sondes géothermiques, qui peuvent bénéficier de larges plages de puissances thermiques et de températures des roches, les fondations géothermiques sont contraintes par le volume des fondations et une plage de température acceptable relativement étroite. Toutefois, les normes actuelles de construction conduisent à des demandes thermiques compatibles avec leurs performances thermiques. En fait, il est plus juste de parler de régénération thermique assistée que de stockage. En effet, le principe même des fondations géothermiques impose de maintenir un équilibre de température entre les injections de chaleur en été et de frigories en hiver. Autrement, la fonction de portance des fondations pourrait être altérée à terme car, du fait de leur situation sous le bâti, la régénération thermique naturelle serait insuffisante (apports géothermiques et climatiques).

Il y a autant de techniques de fondations géothermiques que de techniques de fondations. Depuis les micropieux aux parois moulées et aux radiers, toutes utilisent des boucles fermées réalisées à partir de conduites noyées dans le béton des fondations.



Illustration 113 : Vue des principales techniques de fondations géothermiques

Annexe 3.

Techniques pour l'exploitation de l'énergie dans les réseaux urbains d'eaux usées et dans les eaux grises des bâtiments

Récupération d'énergie dans les réseaux urbains d'eaux usées

Etant peu ou mal représentées dans la littérature ou sur les réseaux informatiques, ces techniques sont donc largement décrites dans la présente annexe. En particulier, la récupération d'énergie dans les eaux grises est peu répandue en France alors que la majeure partie de la chaleur de ces effluents domestiques (salles de bains, lessives, cuisine, vaisselles, ...) est rejetée à l'égout à une température significativement plus élevée que celle du réseau d'eau potable qui, selon la saison (et le taux de mélange avec les eaux pluviales), aura une température comprise entre 13 et 20 °C (parfois 25 °C), respectivement en hiver et en été.

Généralités

La récupération d'énergie dans les réseaux urbains d'évacuation des eaux usées (égouts), exploite, le plus souvent, l'énergie contenue dans les eaux usées constituées d'un mélange des eaux grises et des eaux noires pour les réseaux séparatifs auxquelles il faut ajouter, pour les réseaux unitaires, des eaux parasites (eaux pluviales et/ou d'infiltration).

Techniquement, il s'agit d'installer des échangeurs de chaleur directement dans les réseaux urbains (égouts), le plus souvent en les couplant à des pompes à chaleur (PAC) car le niveau de température reste relativement bas (eaux tièdes), ce qui, par contre, pourrait autoriser une utilisation directe en période estivale pour de la climatisation, voire du rafraîchissement direct (free-cooling), notamment si les eaux usées sont à une température inférieure à 20 °C (cas fréquent même en été).

On considère que l'exploitation est (économiquement) envisageable lorsque le débit moyen dans la conduite dépasse 8 à 10 litres par seconde (débit journalier moyen par temps sec), si possible plus de 12 litres par seconde, ce qui signifie un raccordement de 8 000 à 12 000 personnes. La puissance d'échange thermique recherchée est typiquement de 150 kW (valeur cible) et l'abaissement de la température des eaux usées sera de quelques degrés (typiquement 2 à 3 °C), une contrainte pouvant provenir de certaines STEP, à procédé biologique notamment, qui préfèrent une température d'entrée supérieure à 15 °C.

Pour les conduites importantes, parcourues par plus de 300 l/s, on pourra échanger une puissance de 5 kW par m² d'échangeur alors qu'on installe typiquement environ 1 m² d'échangeur par mètre linéaire de l'égout. Pour les conduites plus courantes, on en restera à des puissances spécifiques autour de 1.0 kW à 1.5 kW par m² installé.

		Leverkusen	Singen	Zurich Wipkingen	Zwingen	Binningen
Débit de dimensionnement	<i>m/s</i>	21	36	105		
Longueur de l'échangeur	<i>m</i>	120	30	200	10	141
Puissance de l'échangeur	<i>kW</i>	170	172	847	52	230
Demande d'énergie <i>MWh/an</i>	<i>Chaud</i>	1200	1620	8 600	330	2 850
	<i>Froid</i>	545	140			
Énergie fournie par l'eau <i>MWh/an</i>	<i>Chaud</i>	840	980	3 100	184	1 800
	<i>Froid</i>	545	140			
COP saisonnier		3.0	3.9	3.0	5.0	3.5

Illustration 114 : Exemples de valeurs de dimensionnement pour différentes réalisations dans les égouts (source : Rabtherm)

Principales solutions techniques

a) Posé dans une canalisation à écoulement gravitaire (neuf ou existant)

Un échangeur en inox est posé dans la partie basse de la canalisation où circulent les eaux usées, en général sur le fond si la géométrie le permet. Les conduites de circulation du fluide caloporteur sont placées à la périphérie de la canalisation selon les possibilités techniques, la contrainte étant de ne pas perturber l'écoulement.

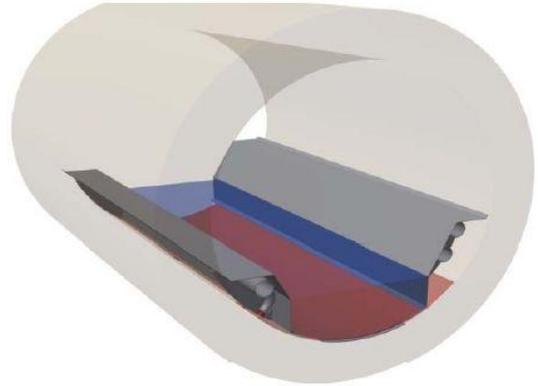


Illustration 115 : Principe de l'échangeur de chaleur ajouté à une canalisation existante, en neuf comme en rénovation, écoulement gravitaire (source : KASAG)

b) Intégré à une canalisation gravitaire (neuf ou rénovation lourde)

Un échangeur en inox est noyé dans la partie basse de la canalisation (en béton par exemple), où circulent les eaux usées, alors que des conduites sont noyées dans le béton, sans localisation préférentielle, pour la circulation du fluide caloporteur. Il existe des conduites de ce type également en PEHD.



Illustration 116 : Principe de l'échangeur de chaleur intégré dans une canalisation en béton neuve ou rénovée, écoulement gravitaire (source : KASAG)

c) Canalisation en écoulement sous pression (neuf ou rénovation lourde)

La canalisation où circulent les eaux usées est intégralement constituée d'un échangeur en inox noyé dans le béton tout comme les conduites de fluide caloporteur. Il existe également des conduites de ce type tout INOX ou en PEHD.

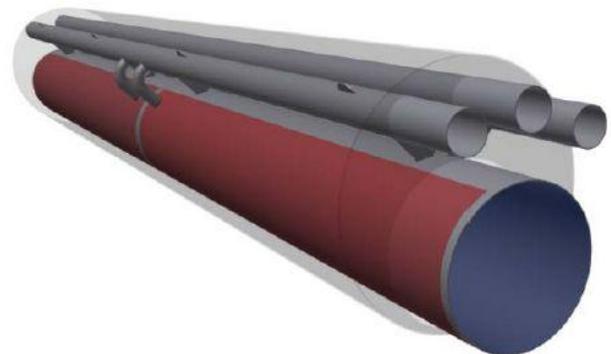


Illustration 117 : Principe de l'échangeur de chaleur intégré dans une canalisation en béton neuve ou rénovée, écoulement sous pression (source : KASAG)

d) Conduites en dérivation d'eaux usées

Destinées à l'origine aux eaux grises ou épurées, ces conduites en inox double peau sont implantées pour récupérer l'énergie avant déversement des eaux (grises de préférence) dans les égouts ou des eaux épurées dans le milieu naturel.

Elles s'installent aussi dans les égouts sur des dérivations d'eaux usées où elles peuvent être fonctionnelles jusqu'à des diamètres d'environ 100 mm, ces eaux usées devant rester pompables.

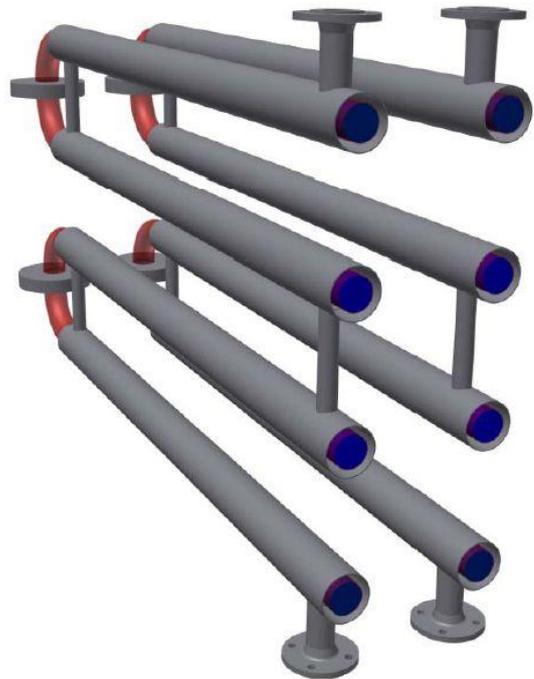
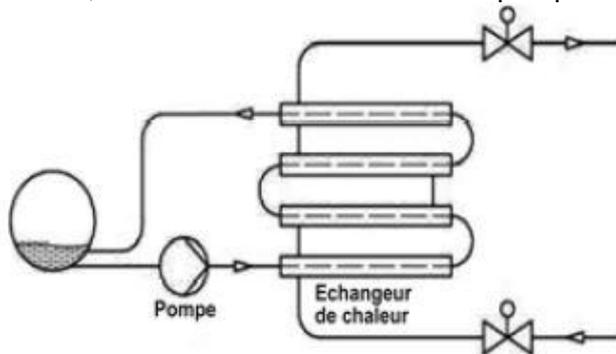


Illustration 118 : Principe de l'échangeur sur dérivation des eaux usées en neuf comme en rénovation, écoulement sous pression (source : KASAG)

e) Echangeurs noyés dans l'écoulement

Parmi les systèmes les plus simples, on citera les échangeurs constitués d'un serpentin immergé dans le flux d'un canal d'eaux usées. Ce type d'équipement se caractérise par un investissement restreint malgré les matériaux qui sont aujourd'hui employés (PE-RT + aluminium multicouche). Dans l'exemple ci-dessous de 2008, la puissance extraite est typiquement de 8 kW (4 fois 2 kW). La puissance extraite correspond à la demande des bureaux et locaux sanitaires de la STEP (195 m²), soit 32 000 kWh/an de chauffage et 28 000 kWh/an d'ECS.



Illustration 119 : Exemple de système à noyer dans des canaux (source : GERES-gmbh)

Performances typiques des échangeurs sur eaux usées

Les graphiques ci-dessous ont été compilés à partir des documentations des constructeurs pour les principales solutions techniques employées sur les eaux usées, l'approche en serpent, relativement marginale, étant exclue car considérée comme réservée aux eaux claires ou épurées. Ces graphiques représentent les performances indicatives des différentes approches technologiques exprimées, comme la puissance thermique pouvant être extraite par mètre linéaire de canalisation équipée, fonction du diamètre de la canalisation ou conduite.

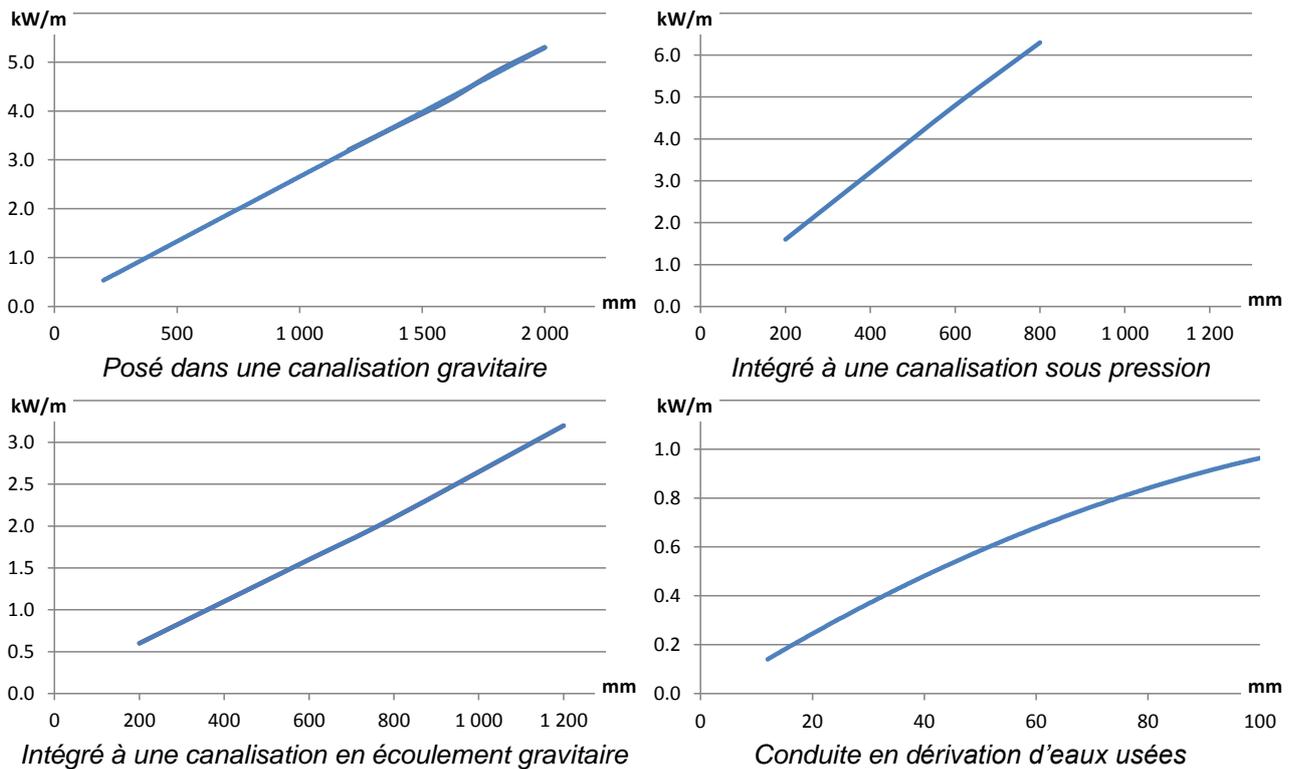


Illustration 120 : Performances indicatives des échangeurs thermiques sur eaux usées

En superposant les quatre courbes sur un même graphique, on constate que les performances thermiques s'inscrivent en deux grandes tendances selon que l'écoulement est en conduite forcée ou gravitaire.

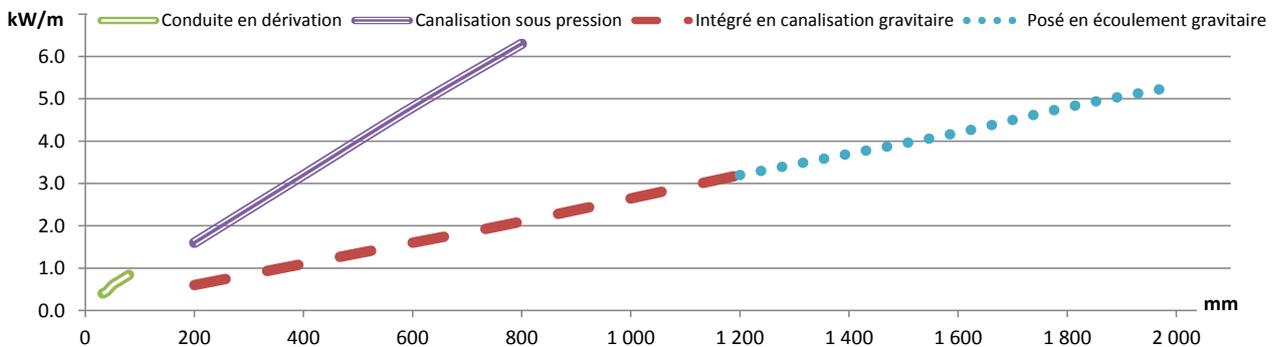


Illustration 121 : Superposition des performances indicatives des échangeurs sur eaux usées

Echangeurs dans les canalisations en écoulement gravitaire

Antériorité

Les auteurs considèrent que le système (commercial) pionnier est celui imaginé au début des années 80 pour le centre sportif de Bâle par Urs Studer (procédé Rabtherm). Ce procédé est de type "gouttière" comme la majorité des installations.

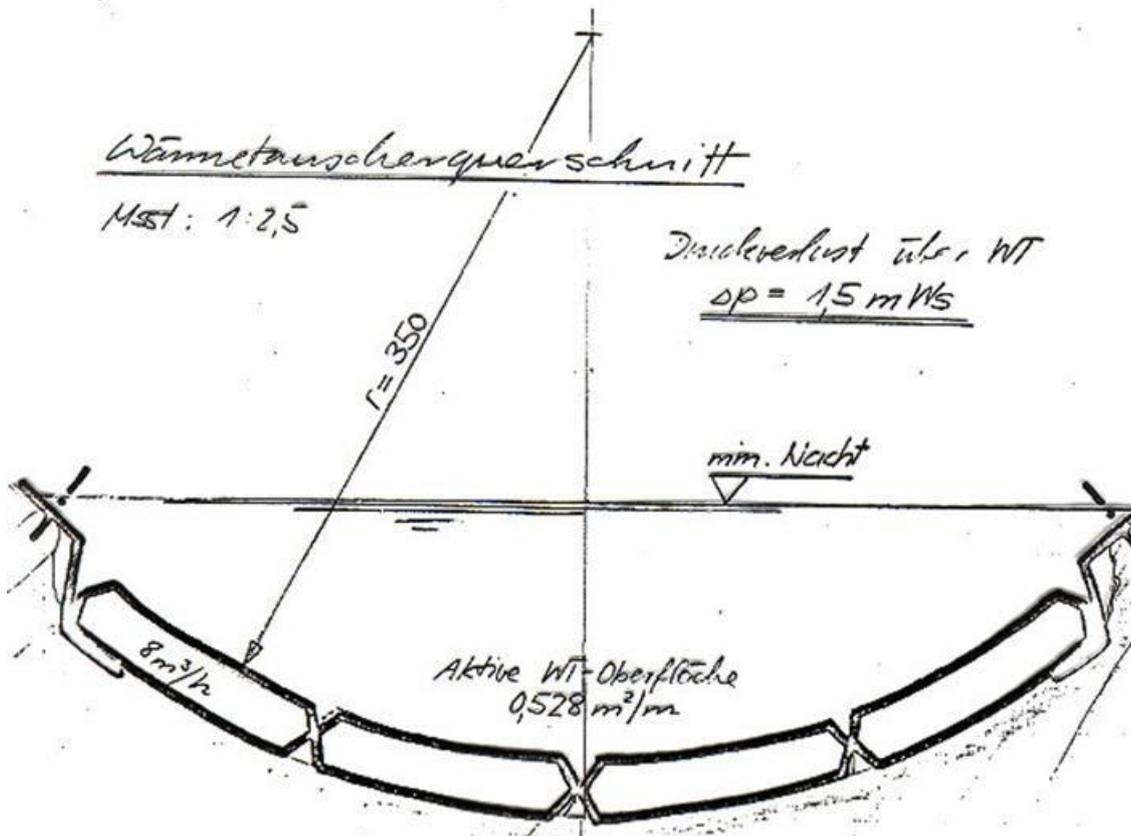


Illustration 122 : Extrait du dimensionnement pour le centre sportif de Bachgraben, Bâle, 1982

Conceptuellement, les dispositifs sont majoritairement constitués de plusieurs éléments, globalement raccordés en série, dont la longueur unitaire va de 1 m de long pour les plus courts, qui sont implantés dans les conduites anciennes, à quelques mètres pour les conduites neuves pré-équipées.

Les éléments sont assemblés entre eux de manière à constituer un échangeur à contre-courant, d'une longueur totale typique entre 20 m et 200 m.

Selon que l'on a accès ou non aux deux extrémités de l'égout, et selon la longueur totale de l'échangeur, il faudra propager plusieurs conduites de jonction en jonction :

- une conduite (au moins) transporte l'eau (froide) issue de la PAC vers l'aval de l'échangeur, pouvant être située en central au fond ou surélevée sur un côté ;
- les autres conduites répartissent progressivement les échanges de chaleur de part et d'autre de l'égout en remontant le courant d'eaux usées.

Systemes posés en fond de canalisation

Plus modulables, les échangeurs tout inox posés en fond de canalisation semblent, petit à petit, prendre le dessus sur les échangeurs, également en inox, noyés dans des formes en béton moulées, lesquelles représentent une solution très proche des conduites neuves conçues d'origine avec des échangeurs intégrés.



Illustration 123 : Vue d'échangeurs en inox livrés sur palette (source : Rabtherm)



Illustration 124 : Vue d'échangeurs en béton livrés sur palette (source : Rabtherm)

Echangeurs intégrés posés en fond de canalisations



Illustration 125 : Exemple d'exécution de canalisation gravitaire en béton (source : Rabtherm)

En canalisations neuves comme en rénovation et, évidemment, lorsque les accès le permettent, il y a possibilité d'intégrer directement les échangeurs de chaleur et les conduites de fluide caloporteur dans le béton de la canalisation. La conception et la mise en place sont facilitées mais il ne semble pas qu'il y ait un avantage déterminant vis-à-vis de la pose d'un échangeur en fond de canalisation. Cette seconde approche semble offrir plus de modularité, en particulier pour façonner un caniveau spécifique tout en gardant une exécution standard (cylindrique) pour le corps des canalisations.



Illustration 126 : Echangeur béton rapporté vis-à-vis d'une exécution standard (source : Rabtherm)

Design et mise en place pour les écoulements gravitaires

Canaliser les eaux usées pour mieux puiser l'énergie

La plupart des échangeurs implantés dans des canalisations existantes doivent être réalisés sur mesure. De ce fait, le nombre réel de variantes techniques est sans fin.

Systématiquement, dans le cas d'une installation dans un égout existant comme pour une implantation neuve, on dessine l'échangeur pour optimiser la concentration des eaux usées afin d'en récupérer efficacement l'énergie lors des périodes à débit faible comme à débit nominal. Dans la pratique, il s'agit :

- i) d'aménager un caniveau plus ou moins large pour les eaux usées ;
- ii) de privilégier une circulation adaptée du fluide caloporteur dans l'échangeur pour favoriser la collecte d'énergie ;
- iii) de prendre en considération les périodes de forts débits où lorsque l'eau déborde de ce caniveau, l'énergie étant alors collectée différemment.

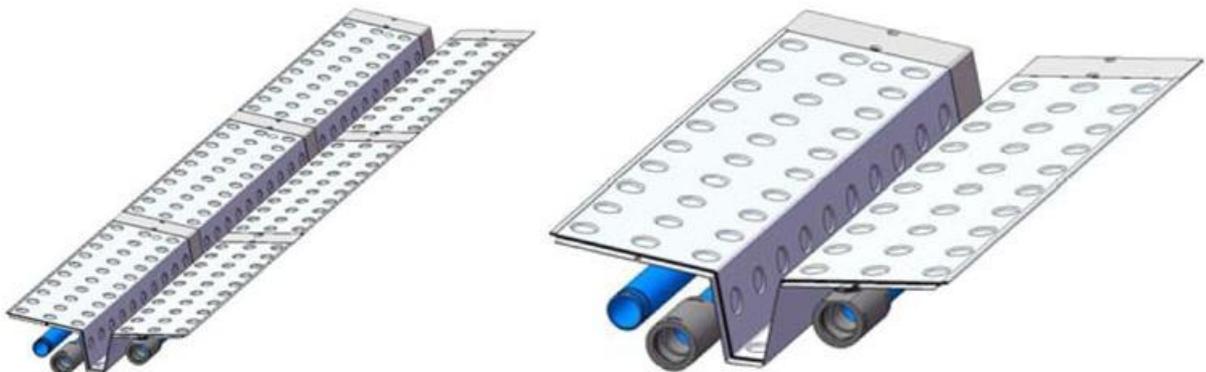
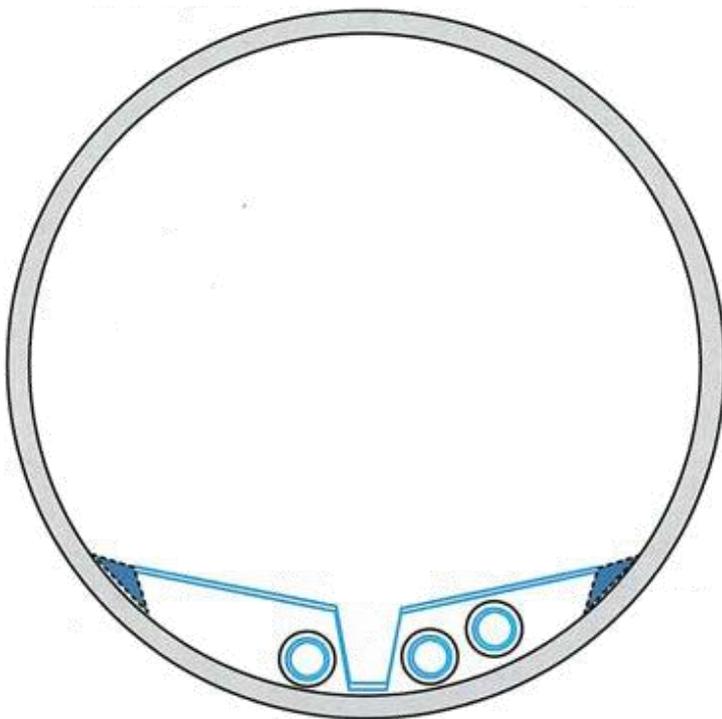


Illustration 127 : Exemple de dessin optimisant l'écoulement à faible débit (source : UHRIG)

Emplacement des conduites

Les illustrations précédentes montrent une géométrie déclinée largement, qui ménage un caniveau central très marqué pour les périodes de faibles débits et des zones latérales évasées pour favoriser les échanges dès que le débit augmente.



Illustration 128 : Différentes exécutions de la géométrie classique en caniveau central

Les illustrations ci-après portent sur les égouts où les eaux usées n'ont pas nécessairement besoin d'être canalisées pour que l'échange thermique puisse être exploité. C'est notamment le cas lorsque le débit est toujours relativement important au regard de la section de l'égout.

Lorsque le débit reste significatif en permanence, on ne pourra pas toujours maintenir les conduites sous l'échangeur comme c'est le cas dans l'exemple ci-dessous. Par voie de conséquence, il y aura nécessité de reporter les conduites plus en hauteur sur les côtés, voire sous la voûte (voir pages suivantes).



Illustration 129 : Implantation dans un égout en tranchée couverte à Chessière (source : UHRIG)

Si les conduites de fluide caloporteur ne sont pas situées sous l'échangeur, il faudra alors aménager des liaisons fluides et mécaniques, section par section, sans pour autant impacter les surfaces d'échange thermique. De fait, les situations ne seront pas toutes aussi simples que pour les trois configurations favorables ci-après.

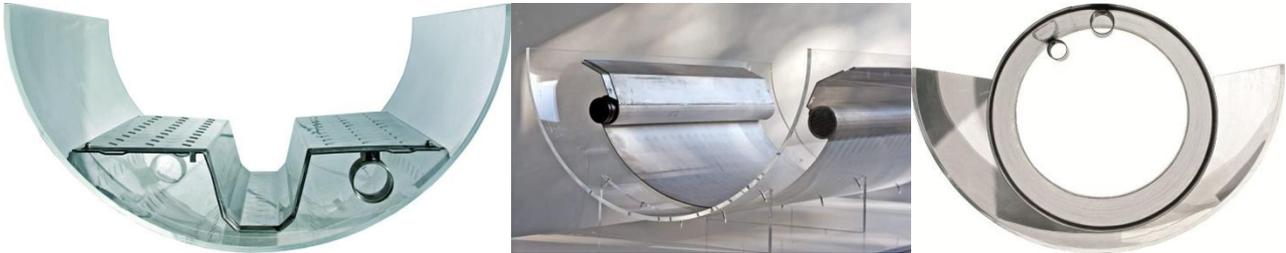


Illustration 130 : Trois options favorables de positionnement des conduites de fluide caloporteur

Dans les exemples ci-après, ces conduites de fluide caloporteur ne sont plus situées sous l'échangeur mais implantées latéralement ou reportées en partie supérieure de l'égout. Dans tous les cas, les équipements sont réalisés sur mesure.



Illustration 131 : Exemple de conduites reportées aux extrémités latérales de l'échangeur à Nanterre (source : UHRIG)



Illustration 132 : Vue des conduites reportées en partie haute et du système de liaison à intervalles réguliers, dispositif implanté à Valenciennes (source : UHRIG)

Pour les égouts de Paris, le raccordement des échangeurs aux conduites doit ménager le passage sur les trottoirs placés de part et d'autre de l'écoulement.

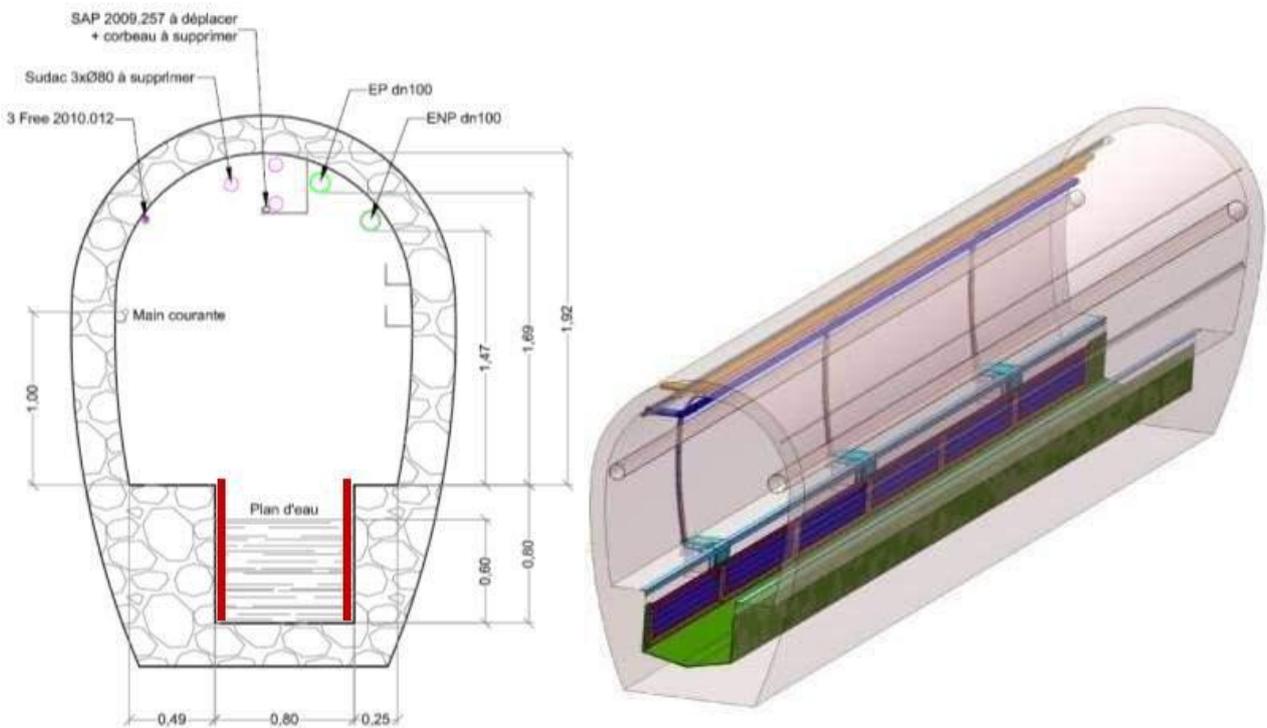


Illustration 133 : Principe des conduites reportées en partie haute et du système de liaison en PEHD, dispositif de l'école de Wattignie et de l'Élysée à Paris (source : UHRIG)

De plus, la forme de l'écoulement a nécessité le développement d'échangeurs plans qui ont été répartis de chaque côté de l'écoulement et non pas au fond comme cela se pratique usuellement.

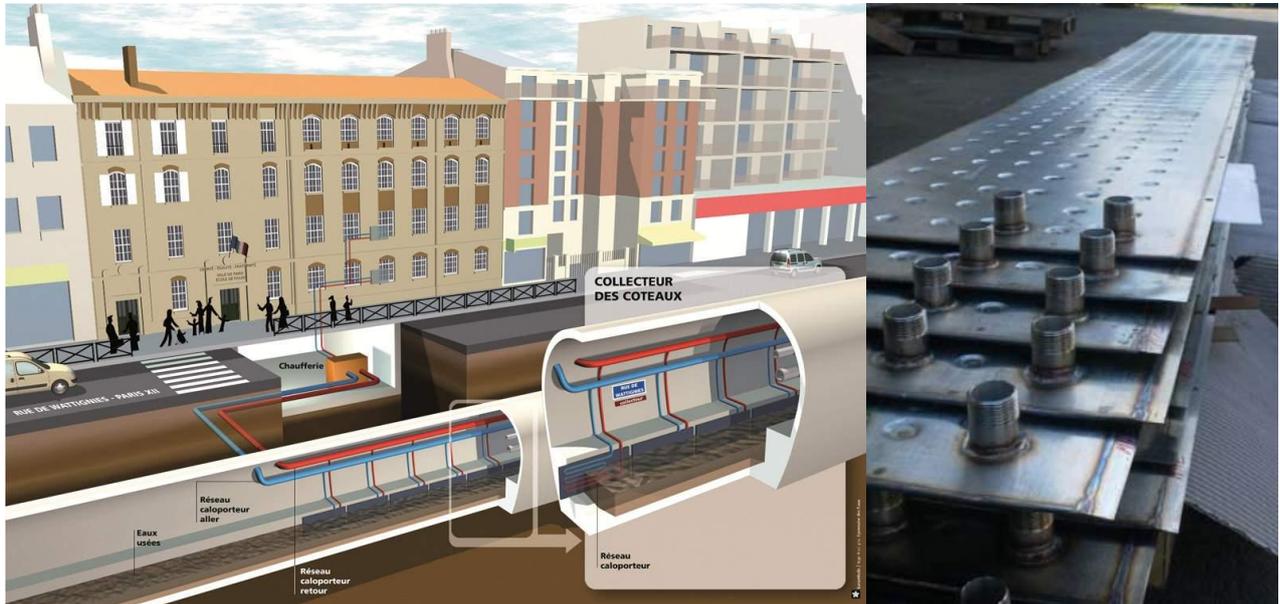


Illustration 134 : Schéma d'implantation des échangeurs dans l'égout de la rue de Wattignie et du Palais de l'Élysée et vue des échangeurs latéraux (source : Degrés-Bleus et UHRIG)

A Dijon, la problématique se situe à mi-chemin entre la conduite en écoulement gravitaire et la conduite forcée. De fait, l'échangeur développé spécifiquement recouvre pratiquement la quasi-totalité des surfaces périphériques, les deux conduites de fluide caloporteur étant presque jointives en partie haute.

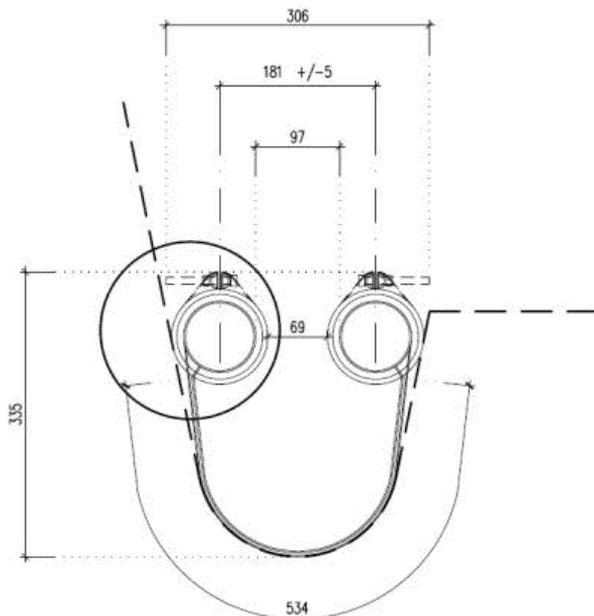


Illustration 135 : Principe adopté pour le petit égout de Dijon (source : UHRIG)

Contraintes d'accès

Souvent, pour les installations dans des égouts existants, les contraintes d'accès pour la mise en place peuvent impacter le design des échangeurs, qui doit également tenir compte de la forme de l'égout et du profil de débit pour assurer la performance thermique.



Illustration 136 : Exemple d'accès contraignant pour le design et la mise en place des éléments

Assemblage des sections

L'assemblage devra éviter une circulation d'eaux usées trop importante sous l'échangeur même si, dans l'absolu, cela perturbe assez peu la performance énergétique grâce au montage à contre-courant.

Un assemblage par simple emboîtement mécanique est, en principe, suffisant et il n'est pas nécessaire d'assurer une étanchéité entre les sections hormis pour les conduites du fluide caloporteur.



Illustration 137 : Vue détaillée des points d'ancrage entre sections d'un échangeur

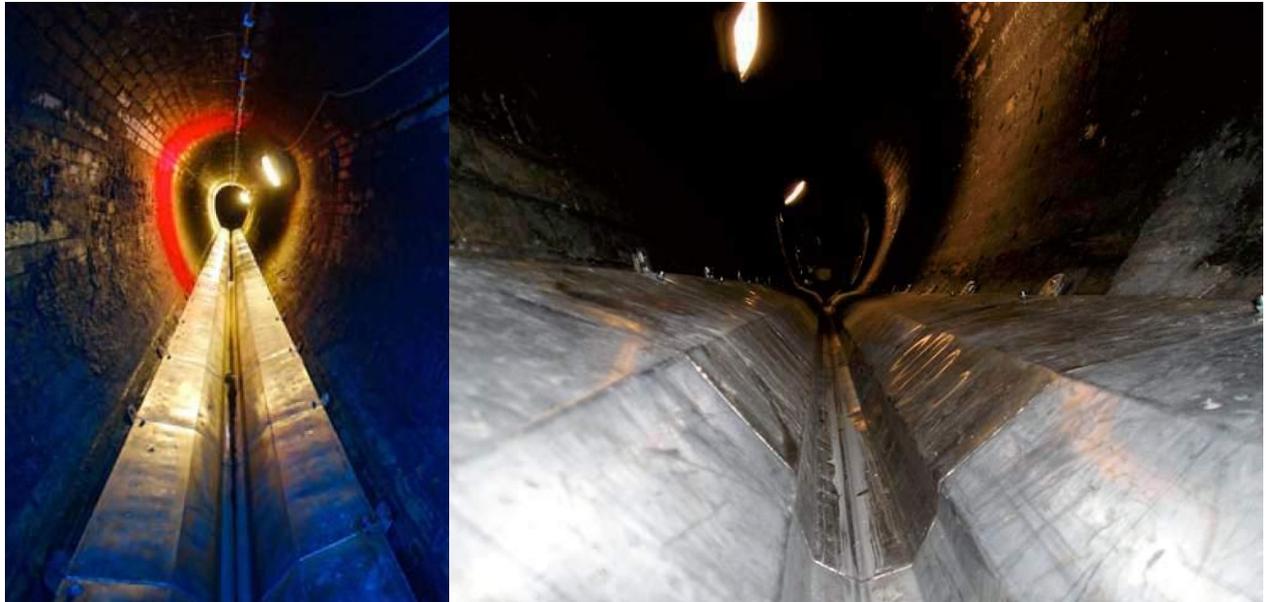


Illustration 138 : Vue d'un assemblage terminé dans un égout ancien : conduites thermiques placées de part et d'autre sous l'échangeur (source : UHRIG)

Echangeurs en matériaux souples (avant mise en place)

Le principe semble provenir d'une extrapolation des techniques de réhabilitation des réseaux avec des gaines en composites polymérisables in-situ par les UVA (chemisage), une nappe de petits tuyaux (souples) parcourus par un fluide caloporteur étant ajoutée en partie basse de la conduite rénovée (exemple des systèmes Heatliner-Brandenburger ou Smatex-Multicom).

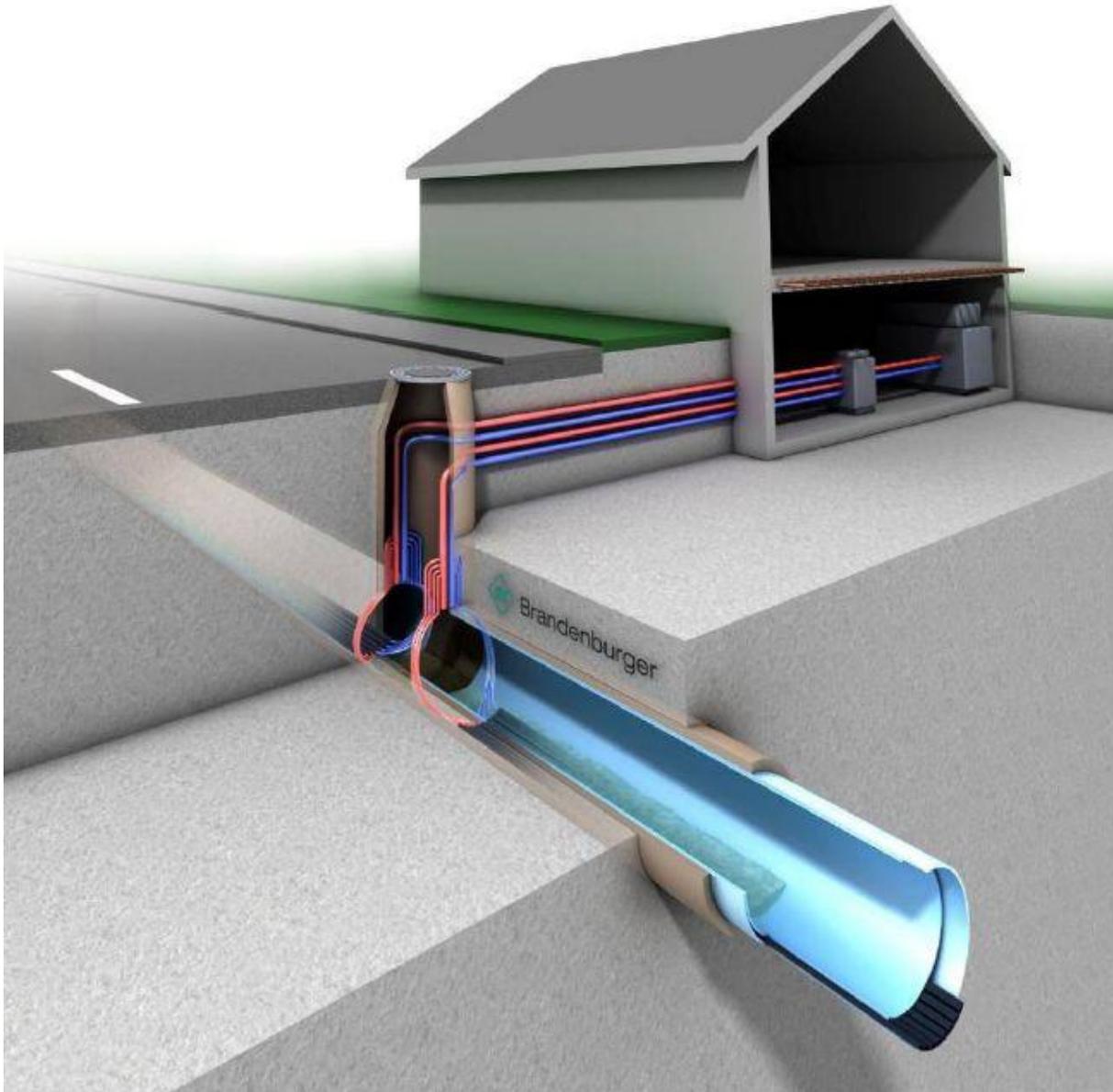


Illustration 139 : Principe du système BB-Heatliner de Brandenburger

L'intérêt du système est qu'il peut être techniquement envisagé dans des conduites de relativement petite section, dès 200 mm, l'utilisation restant toutefois envisagée préférentiellement à partir de débits supérieurs à 8 l/s.

Pour une longueur équipée de 50 m, la puissance de captage thermique commence vers 4 kW et peut atteindre 25 kW (voir graphique en page suivante).



Illustration 140 : Vue de la gaine une fois durcie (polymérisée) et des tuyaux de l'échangeur

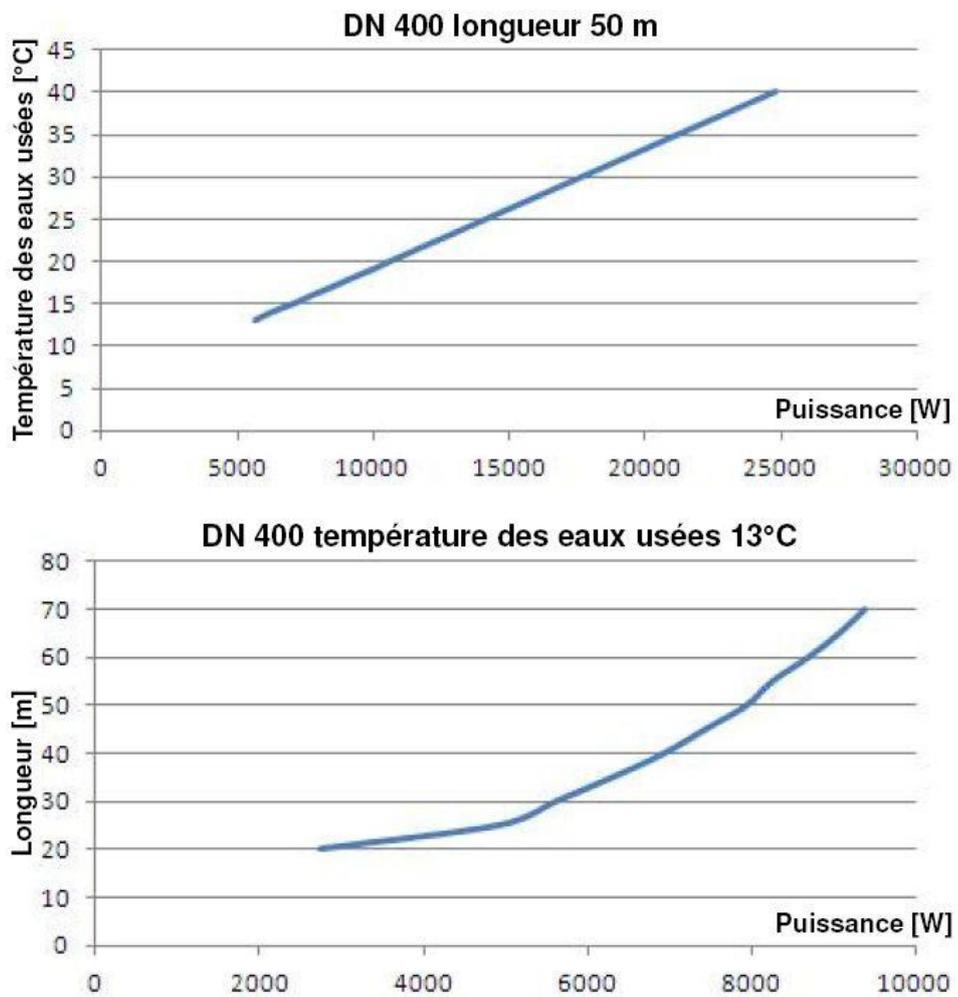


Illustration 141 : Performance typique de l'échangeur du système BB-Heatliner de Brandenburger



Illustration 142 : Exemple d'étape de mise en place du système Heatliner avec gaine durcissable

Dispositifs intégrés aux canalisations sous pression

Généralités

Du point de vue thermique, en conduite forcée, le principe est de répartir les échangeurs thermiques sur toute la périphérie de la canalisation en notant que ce type de canalisation peut également fonctionner en gravitaire.

Les constructeurs ont développé des techniques en double enveloppe (double paroi) qui permettent à la fois de prélever et d'évacuer la chaleur et des techniques, peut-être un peu moins performantes du point de vue thermique, mais plus simples en matière de conception : les techniques avec conduites enroulées autour de la canalisation.



Illustration 143 : Exemple de canalisation en double peau "tout inox" (source : Rabtherm)

Dispositifs intégrés en matériaux synthétiques vs géothermie superficielle

L'observation des solutions autorisées par les matériaux synthétiques, notamment représentées par le système ThermPipe de la société Frank, illustre bien la proximité et les synergies entre les exploitations de la chaleur des eaux usées et de la chaleur géothermique, en l'occurrence dans le proche sous-sol. Le système ThermPipe est dérivé du système de canalisations pour égouts PKS (Polyethylen Kanarohr System), produit correspondant à la gamme renforcée des canalisations de la société Frank.

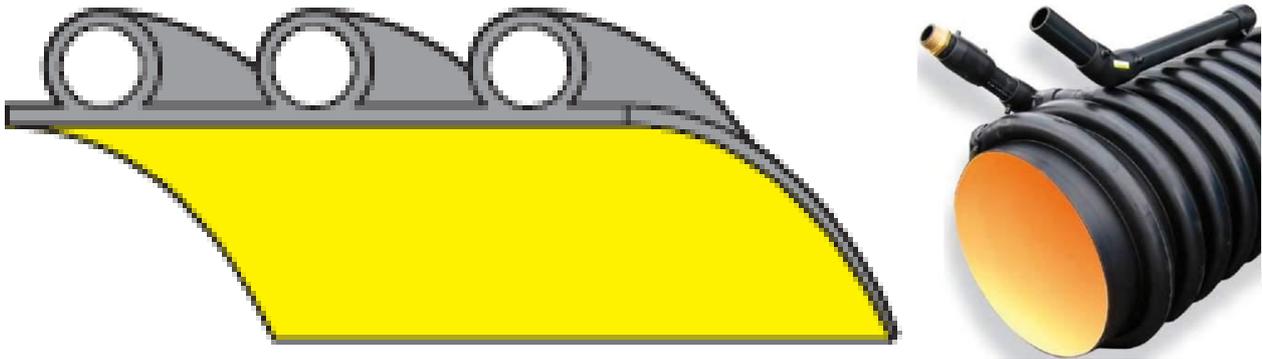


Illustration 144 : Détail des exécutions du système ThermPipe de la société Frank

Un tel dispositif est assez bien adapté au secteur résidentiel, y compris le petit collectif et le tertiaire. Sur le principe, les canalisations d'eaux usées étant systématiquement mises en place, le surcoût pour l'équipement en échangeurs géothermiques et de récupération d'énergie des eaux usées sera des plus réduits, ce qui permet d'équiper des longueurs importantes de canalisation.

Comme le dispositif va être capable de simultanément capter l'énergie dans la canalisation d'eaux usées et l'énergie disponible dans le sol environnant, la performance, même avec une circulation faible d'eaux usées, sera au rendez-vous.

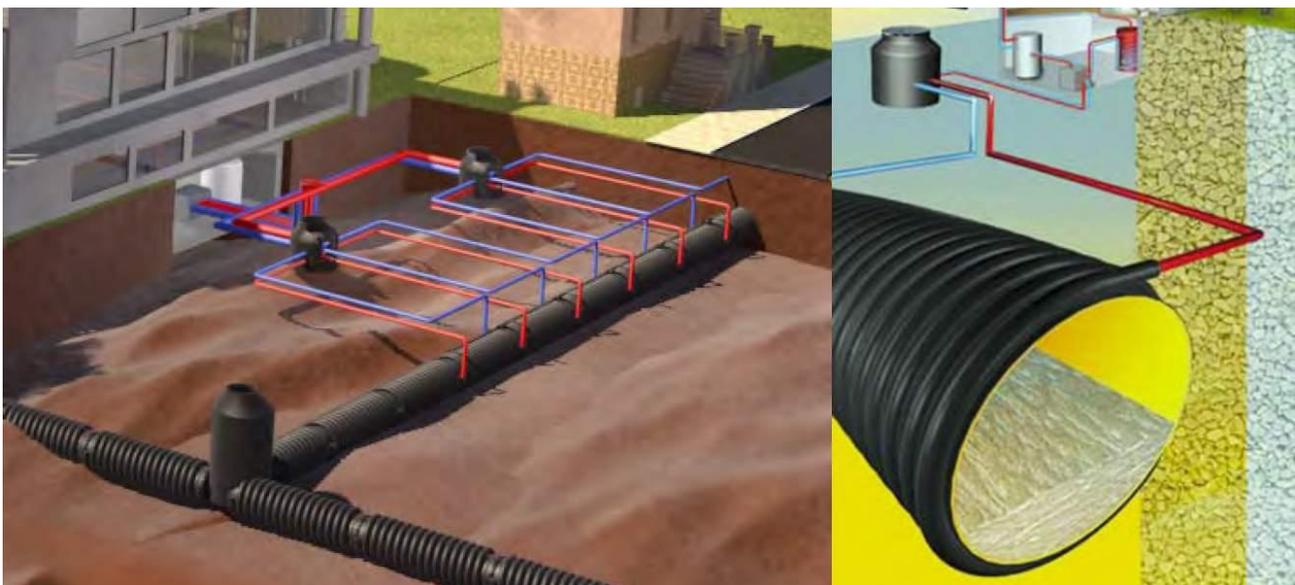


Illustration 145 : Extrait des brochures ThermPipe de la société Frank

Techniquement, les canalisations sont livrées en tronçons de 6 m constitués de sections de 2 m pouvant être raccordées en série ou en parallèle.



Illustration 146 : Exemples de raccordement du système ThermPipe

D'après la documentation du constructeur Frank, les énergies qui peuvent être échangées sont reproduites par le graphique ci-dessous. Ainsi, par exemple, une canalisation de diamètre 1 000 mm (1 m) installée en fond de fouille (à 4.5m de profondeur) permettrait une capacité d'échange thermique d'environ 1 kW/m en moyenne sans que le débit d'eaux usées soit nécessairement important, mais un raccordement de plusieurs milliers d'EH en amont est largement conseillé.

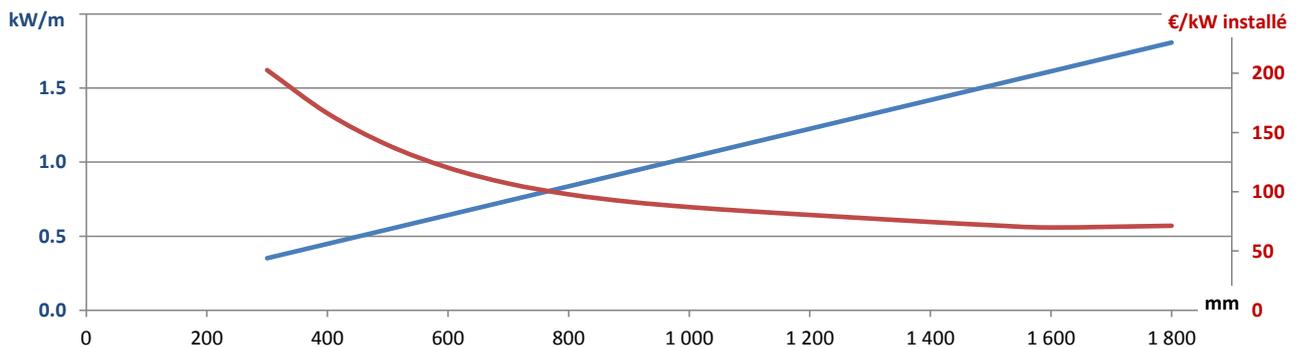


Illustration 147 : Energie minimale échangée avec le sol par le système ThermPipe et estimation des surcoûts d'installation ramenés au kW installé

En géothermie seule, une telle capacité d'échange avec le sol est obtenue :

- avec une corbeille de 1 m à 1.2 m de diamètre pour une hauteur de 2.5 m répartie entre les profondeurs de - 1 m et - 3.5 m ;
- avec un échangeur horizontal enterré à 1 m de profondeur d'une surface entre 90 m² et 150 m² selon la nature du sol et le diamètre des conduites enterrées ;
- avec une sonde géothermique verticale de 20 m de profondeur.

Là encore, on constate que si l'équipement des canalisations d'eaux usées permet, à surcoût réduit, un accès à une puissance d'échange thermique significative, la contribution des eaux usées peut paraître relativement modeste. Pour que la circulation d'eaux usées garantisse une certaine régénération thermique (gage d'un COP élevé pour les pompes à chaleur), notamment en période hivernale, cela nécessite de disposer en amont d'un raccordement de quelques milliers d'EH, ce qui est contraignant.

Dispositifs intégrés dans les regards ou les relevages

La récupération d'énergie peut s'envisager dans une fosse de relevage ou des regards où débouchent les eaux usées. Le prélèvement thermique reste conditionné par les débits. Ainsi, dans les illustrations ci-après (système Feka, Suisse), la puissance indicative des échanges thermiques est inférieure à 15 kW. La pompe à chaleur qui est raccordée alimente les besoins en ECS de 96 personnes.

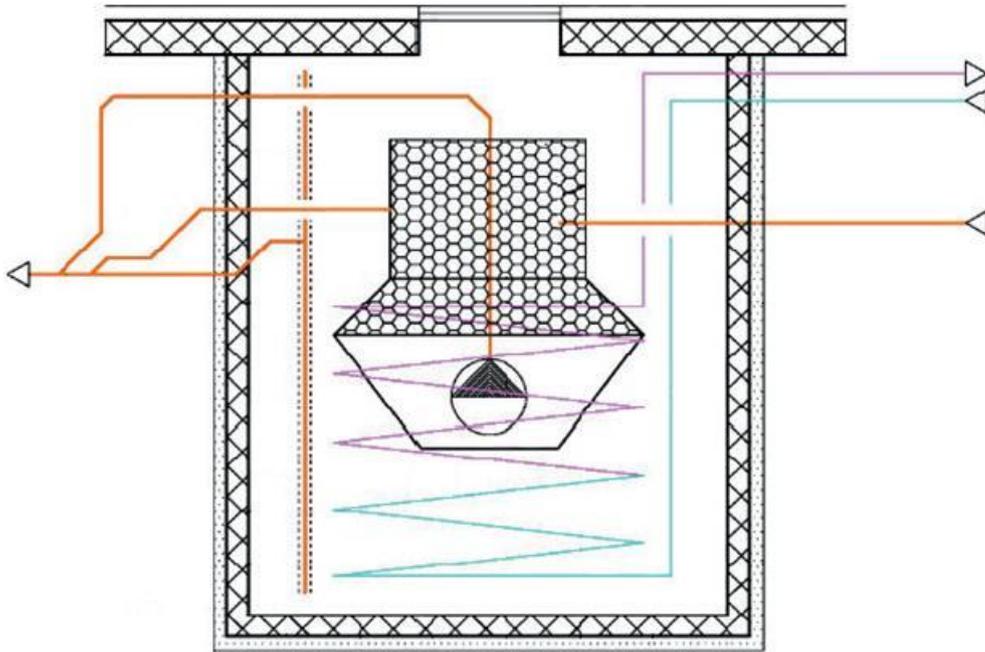


Illustration 148 : Principe de la récupération dans les fosses et regards (système Feka)

Dispositifs sur dérivation des eaux usées

Le principe de la récupération d'énergie sur dérivation revient à détourner une partie du flux des égouts et à installer les échangeurs dans le local technique et non pas dans les égouts. Un des intérêts est de faciliter la maintenance et l'exploitation. Les échangeurs de chaleur sont généralement de type coaxial et fonctionnent en conduite forcée avec un rendement d'échange relativement favorable vis-à-vis des solutions dans les égouts, mais l'énergie de pompage des eaux usées peut être significative.

Les techniques sur dérivation peuvent être envisagées en tout point d'un système d'égouts, y compris en aval des stations d'épuration. En fait, c'est surtout lorsque le dispositif est implanté sur des eaux peu chargées et peu sales (eaux grises ou en sortie de station d'épuration) que l'intérêt semble le plus évident. Les performances énergétiques des échangeurs sont alors favorables, ce qui peut se répercuter sur les investissements vis-à-vis des solutions dans les égouts.

Vis-à-vis d'une solution géothermique de puissance thermique équivalente, un tel dispositif va éviter les ouvrages verticaux d'accès à la ressource (puits de production et de réinjection). Par contre, à performances comparables, l'échangeur de chaleur restera significativement plus volumineux et onéreux. De plus, les incidences de l'encrassement et du colmatage sont infiniment plus présentes.



Illustration 149 : Principe d'un dispositif en dérivation pour alimenter un immeuble



Illustration 150 : Composants d'un système sur dérivation des eaux des égouts (source : Kasag)

Récupération d'énergie dans les eaux grises du bâtiment

Généralités

Stratégiquement, il s'agit de **récupérer l'énergie au plus près du lieu de production**, donc de mettre en place des systèmes dans le bâtiment. On distinguera deux grandes approches selon que la récupération se fait à l'échelle individuelle ou collective, ce dernier cas étant similaire pour les locaux commerciaux ou industriels.

- **Le premier intérêt** de récupérer l'énergie au plus près du lieu de production des eaux usées réside dans le niveau de la température qui peut significativement dépasser 30 °C alors que, sans récupération, la température à la sortie du bâtiment dépasse rarement 25 °C, une valeur vers 20 °C étant courante.
- **Le deuxième intérêt** est que les dispositifs échangent la chaleur avec des eaux grises, lesquelles sont peu chargées. De ce fait, il y a limitation de l'entretien nécessaire pour maintenir la performance thermique.
- **Le troisième intérêt** est que la question du recyclage des eaux grises (collectives) peut être traitée conjointement avec celle de la récupération de l'énergie thermique (par exemple système Pontos de Hansgrohe).
- **Le quatrième intérêt**, si le rejet d'eaux grises (en sortie d'immeuble) se fait à une température de l'ordre 20 °C ou moins, est de pouvoir envisager un usage pour du rafraîchissement direct, sans recourir nécessairement à une PAC.

Dans les paragraphes qui suivent, les deux approches suivantes vont être illustrées :

- les technologies de récupération à l'échelle individuelle ;
- les technologies de récupération à l'échelle collective.

Technologies de récupération à l'échelle individuelle

Le principe général est d'installer des échangeurs de chaleur au plus près des siphons. Dans ce cas, l'usage prioritaire est le réchauffage direct de l'eau froide en amont du mélangeur (utilisation), une alimentation du dispositif de production d'ECS étant évidemment recommandée. De fait, à l'échelle individuelle, **la récupération est instantanée**, c'est-à-dire qu'elle est en phase avec l'appel d'eau chaude.

Quelles que soient les technologies d'échangeur utilisées, l'abaissement de la température des **eaux grises** peut atteindre typiquement une dizaine de degrés, la réelle limite dépendant du différentiel de température entre l'arrivée d'eau froide et l'évacuation de l'eau grise. De fait, la récupération est donc à opérer, de préférence, juste en aval des points procurant la température la plus élevée, les douches notamment. In fine, on considère que les systèmes correctement dimensionnés peuvent typiquement récupérer 50 % de l'énergie disponible dans les eaux grises, celles des douches ayant le contenu énergétique le plus élevé. Comme le montre le schéma ci-après (source Solenove), le principe général consiste à implanter un échangeur de chaleur dans le circuit d'évacuation des eaux grises au plus près du lieu de production, le but étant de récupérer le niveau de température le plus élevé possible afin de réchauffer l'eau froide "à la demande".

Pour éviter tout risque d'encrassement de l'échangeur, généralement en cuivre, celui-ci est implanté en position verticale (écoulement gravitaire) et exploite le fait que l'eau a tendance à s'écouler en film à la périphérie de la conduite verticale.

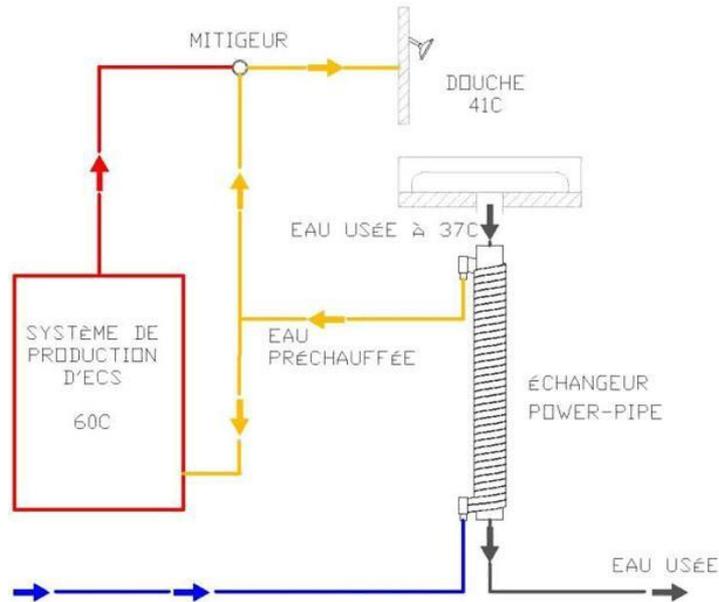


Illustration 151 : Principe d'implantation d'un dispositif individuel de récupération instantanée (montage "Equal-Flow")

Selon la documentation Solenove, le montage "Equal-Flow" (ci-dessus) procure la meilleure efficacité énergétique dans la mesure où l'énergie qui n'est pas appelée par le circuit d'eau froide de la douche l'est par la production d'ECS. Si toutefois la production d'ECS n'est pas raccordable (production collective par exemple), le montage "eau-froide seulement" est employé (voir schéma ci-après). D'autres montages sont envisageables selon la configuration du logement et/ou de l'éventualité d'une récupération groupée pour plusieurs étages, l'efficacité énergétique d'une récupération directe groupée étant, approximativement, inférieure de 25 % vis-à-vis des systèmes individuels. Mais on remarque que ce constat ne vaut pas si une machinerie thermodynamique est implantée.

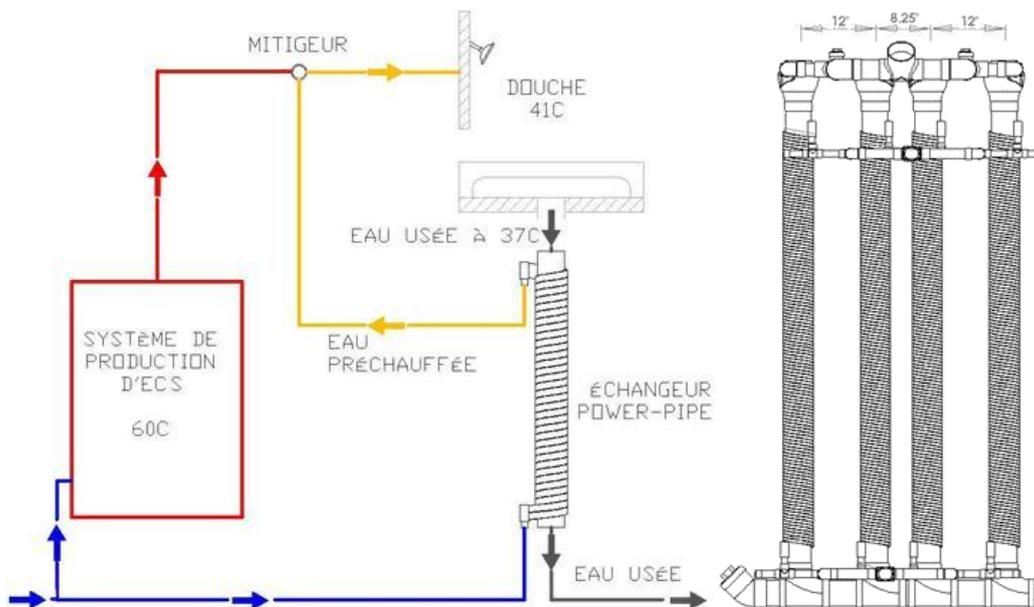


Illustration 152 : Montage "eau-froide seulement" lorsque l'ECS est d'origine collective (à gauche) et "groupé" lorsqu'il n'est pas possible de récupérer l'énergie individuellement

Le principe consistant à utiliser directement l'énergie récupérée dans les eaux grises est relativement ancien mais en France, contrairement aux pays du nord, l'essor commercial semble tardif. Ainsi, au Canada, d'après les études menées autour de la plate-forme AQUASIM du CSTB, on dénombreait au moins quatre marques commerciales au début des années 2000 : Retherm, Watercycles, GFX et Power-Pipe, seule la dernière technologie semblant actuellement largement diffusée en France, par Solenove qui dispose d'un arrêté titre-V accordé fin 2010.



Illustration 153 : Systèmes Retherm, Watercycles, GFX et Power-Pipe (de gauche à droite ; source : C. Zaloum, Natural Resources Canada, 2007)

En Europe, ce sont les pays du nord qui démontrent le dynamisme le plus marqué pour la récupération individuelle de l'énergie des eaux grises, notamment aux Pays-Bas, de nombreux produits étant exportés, y compris vers la France.

Parmi les produits disponibles en France, un des plus aboutis pourrait être le Douche-WTW-DDS de ITHO-DAALDEROP (www.ithodaalderop.nl) et un des plus épurés pourrait être le RECOH-VERT de HEI-TECH (www.hei-tech.nl), produit que l'on retrouve d'ailleurs sous plusieurs marques, par exemple Technea (www.technea.nl/). Un arrêté titre-V a été publié pour ce produit en janvier 2012.

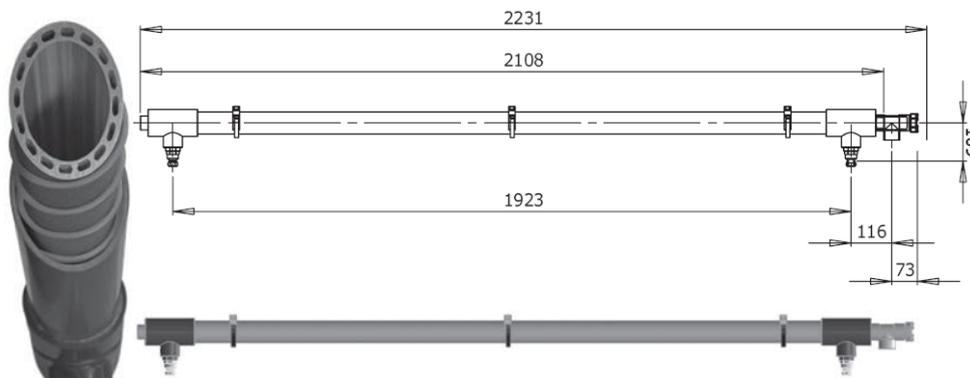


Illustration 154 : Récupérateur Douche-WTW-DDS (ITHO-DAALDEROP)



Illustration 155 : Récupérateur RECOH-VERT (HEI-TECH, TECHNEA, ...)

Depuis quelques années, on constate également l'arrivée sur le marché de dispositifs de récupération qui sont plus ciblés (moins polyvalents), en particulier ceux qui sont intégrés au plus près du bac à douche ou placé juste en dessous. Ainsi, toujours en provenance des Pays-Bas, on peut citer les systèmes RECOH-TRAY et RECH-DRAIN de HEI-TECH ou SIDENSO (www.sidenso.nl) et DOUCHEBAK de BRIES (www.brieswaterenergie.nl).

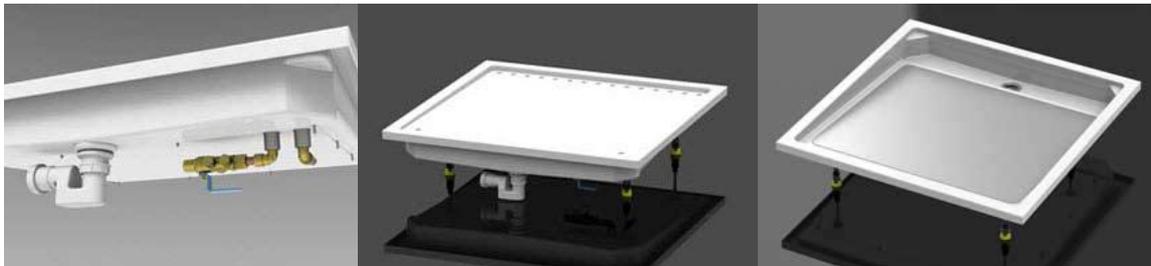


Illustration 156 : Système DOUCHEBAK avec équipement intégré de récupération (BRIES)



Illustration 157 : Vue du système RECOH-DRAIN adapté à l'individuel (HEI TECH)

En France, on peut citer le produit compact EGTech (www.ehtech.fr) qui présente la particularité d'exploiter la turbulence au lieu du film le long des tubes verticaux. Il s'agit d'un échangeur à plaques soudées qui est équipé d'un circuit de décaissage (automatique à l'eau), les eaux relativement chargées restant néanmoins à proscrire.

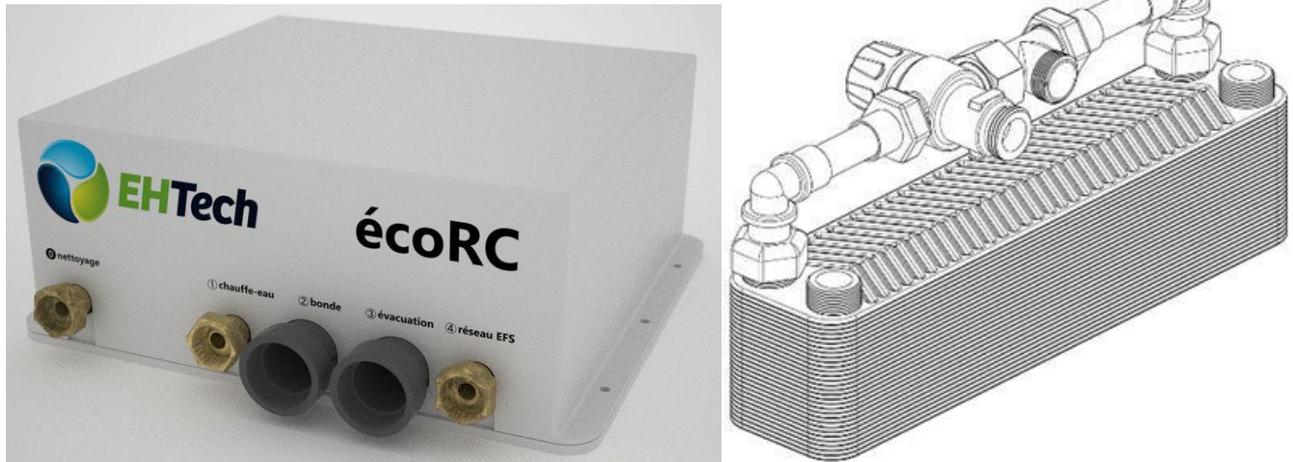


Illustration 158 : Plan de l'échangeur dans le dispositif EHTech-DUO

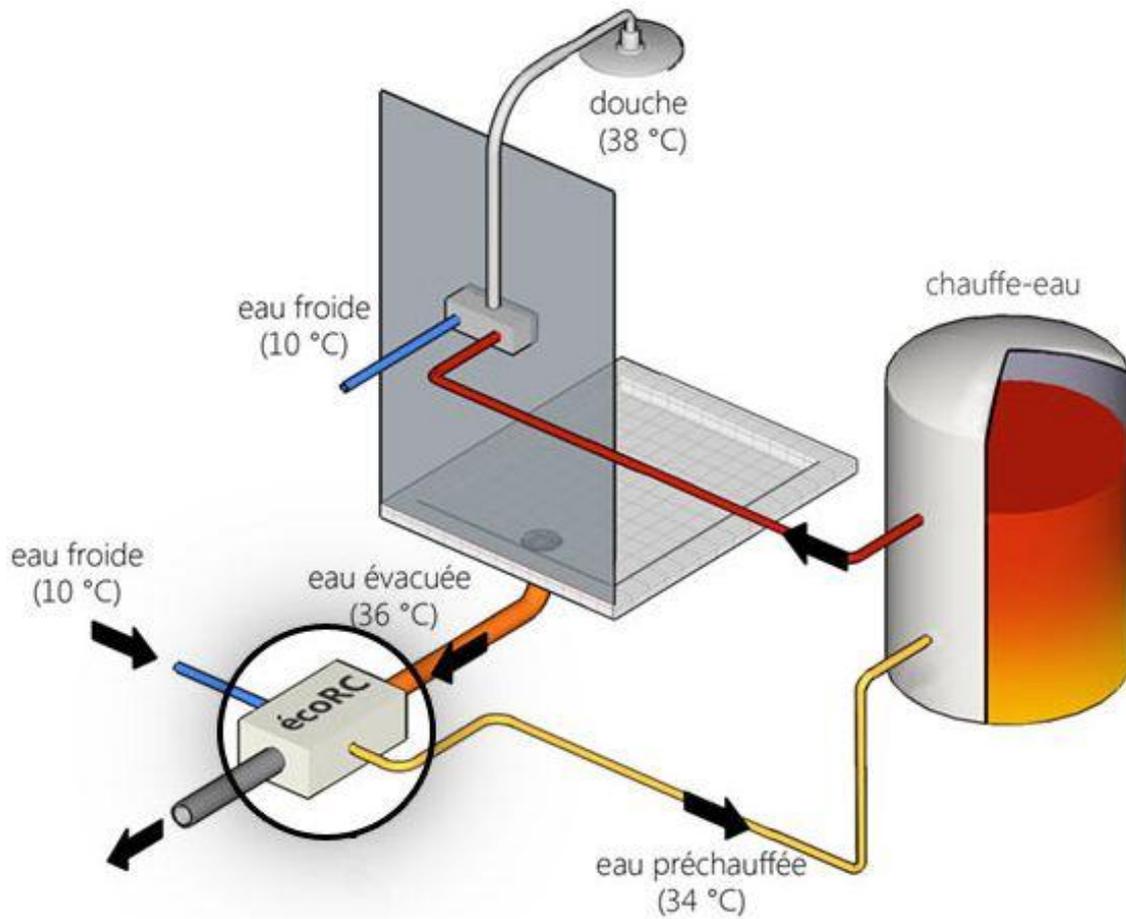


Illustration 159 : Principe d'installation des dispositifs EHTech

Performances à attendre pour les récupérateurs gravitaires individuels

Si la mise en œuvre des échangeurs gravitaires verticaux est particulièrement simple et alors que la maintenance est faible, les performances optimales de ces échangeurs nécessitent toutefois un dimensionnement relativement soigné.

Par exemple, si la puissance échangée augmente avec le débit d'eaux grises, l'efficacité énergétique est alors dégradée comme le montrent les deux graphiques ci-après (source : RenewABILITY - Solenove, Ontario).

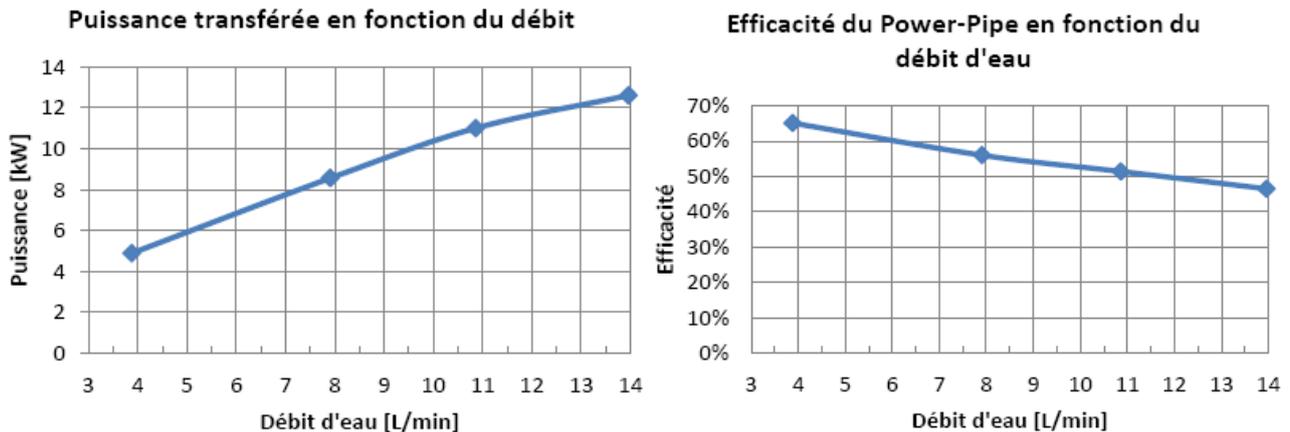


Illustration 160 : Incidence du débit d'eaux grises, Power-Pipe R3-60 (source : Solenove)

Par ailleurs, en aucun cas l'efficacité de la récupération d'énergie ne peut dépasser 70 %. En fait, il est admis que le taux de récupération de l'énergie se situe vers 50 %, l'énergie contenue dans les eaux grises étant rapportée à la température de l'eau froide, c'est-à-dire typiquement entre 10 °C l'hiver (avec un mini en février-mars) et 12 à 16 °C l'été (avec un maxi en septembre).

Si on se réfère aux graphiques ci-dessus, la puissance typique d'un échangeur gravitaire est de l'ordre de 10 kW pour un débit d'eaux grises de 10 l/mn.

Selon les marques, le diamètre et la longueur de l'échangeur pourront varier mais, globalement, cette puissance d'échange est obtenue avec un unique tube.

Pour le cas de Solenove (RenewABILITY-Energy-Inc), la hauteur de l'échangeur sera d'environ 2.5 m et pour EcolInnovation-Inc la hauteur pourra n'être que de 1.0 m avec le système ECO-GFX.

A noter que le temps effectif de fonctionnement des récupérateurs d'énergie sur les eaux grises reste relativement faible. Pour un logement usuel (2 à 4 personnes), les estimations de durées d'utilisation des douches sont de l'ordre de 250 heures par an, soit approximativement 5 heures par semaine.

Si la puissance de récupération est de 10 kW, alors l'énergie récupérée serait d'environ 2 500 kWh par an.

Un premier pas vers les installations collectives

La majorité des constructeurs cités ci-avant proposent également des solutions plus orientées vers les installations collectives, à commencer par les piscines. La principale différence vis-à-vis d'un système individuel est que la récupération de l'énergie n'est plus obligatoirement en phase avec l'appel d'eau chaude, une des solutions les plus simples étant d'accumuler "passivement" des eaux grises. Les systèmes de chez GRIES ou de chez OSO sont représentatifs de cette approche.

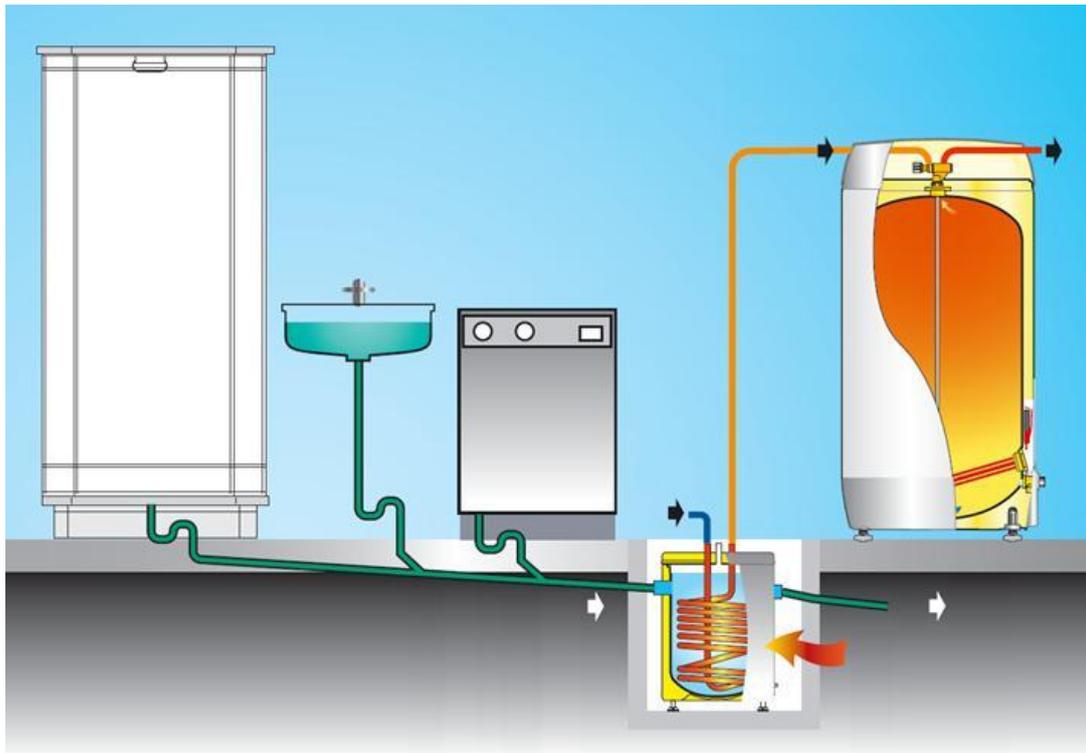


Illustration 161 : Petit accumulateur / échangeur (source : OSO ; www.osohotwater.no)

Avec le système Thermocycle-WRG (FORTSTNER), distribué en France par Energie-Efficente (www.energie-efficente.com), on peut considérer qu'un premier pas est totalement franchi vers l'installation centralisée, éventuellement collective. En effet, ce système va stocker les eaux grises dans un accumulateur, lequel est parcouru par un serpentin (en inox) où circulera de l'eau chaude sanitaire en vue de préchauffage.

De fait, la valorisation de l'énergie récupérée peut être déconnectée des appels d'eau chaude, le déphasage restant toutefois limité à quelques heures. Un système de filtrage retient les résidus transportés par les eaux grises et un processus de nettoyage automatique rejette à intervalle de temps programmable la charge de résidus vers le réseau. Une dérivation permet aussi de garantir une utilisation sans faille.

Côté eaux chaudes, les dispositifs comme le ThermoCycle (FORTSTNER) sont souvent présentés en combinaison avec des technologies employées dans le domaine du solaire, comme l'accumulateur de la société FORSTNER qui permet une combinaison avec de multiples sources, la rentabilité ne semblant envisageable qu'avec une mutualisation entre plusieurs logements.

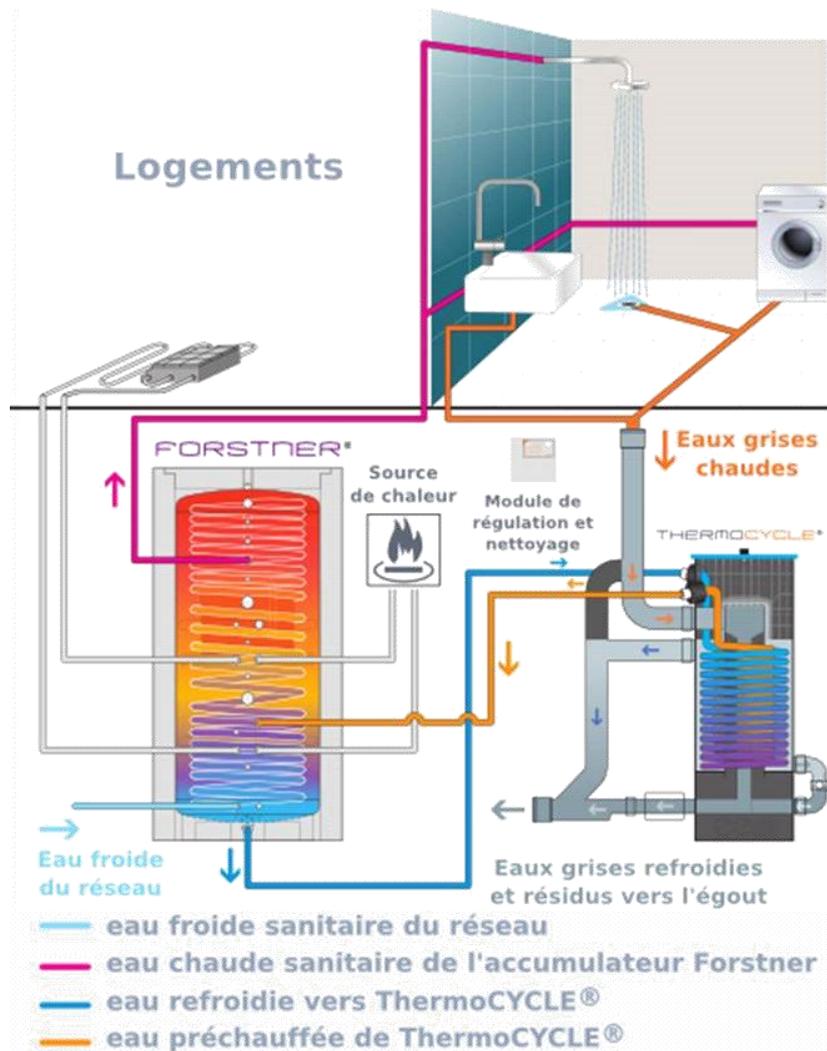


Illustration 162 : Combinaison des accumulateurs de récupération et d'eau chaude

Technologies de récupération à l'échelle collective

En installations collectives, commerciales ou industrielles, la stratégie est d'installer des échangeurs de récupération de chaleur en un point de regroupement en amont de l'évacuation (sortie d'immeuble) et/ou du prétraitement si un recyclage des eaux grises est opéré. Là encore, on préférera travailler sur les **eaux grises**, en évitant un mélange avec les eaux noires ou une dilution avec les eaux pluviales. Toutefois, l'objectif de disposer d'une température $> 30\text{ °C}$ n'est pas impératif car les systèmes à pompes à chaleur disposent d'un COP intéressant (> 4 , voire > 5) dès une température d'environ 20 °C . Or, à condition que les conduites restent correctement isolées, il n'y aura pas de perte d'énergie, le niveau de la température pouvant toutefois être abaissé par dilution. L'énergie sera donc récupérable avec une efficacité acceptable. On peut distinguer essentiellement deux approches :

1. si l'usage est direct (préchauffage), le rejet au réseau excédera de quelques degrés le niveau de température correspondant à celui de l'eau froide du réseau ;
2. s'il est fait usage d'une PAC, le rejet au réseau pourra descendre sous 10 °C . Dans ce cas, si cette approche se généralise, vouloir exploiter l'énergie du réseau urbain d'eaux usées pourrait perdre significativement de son intérêt.

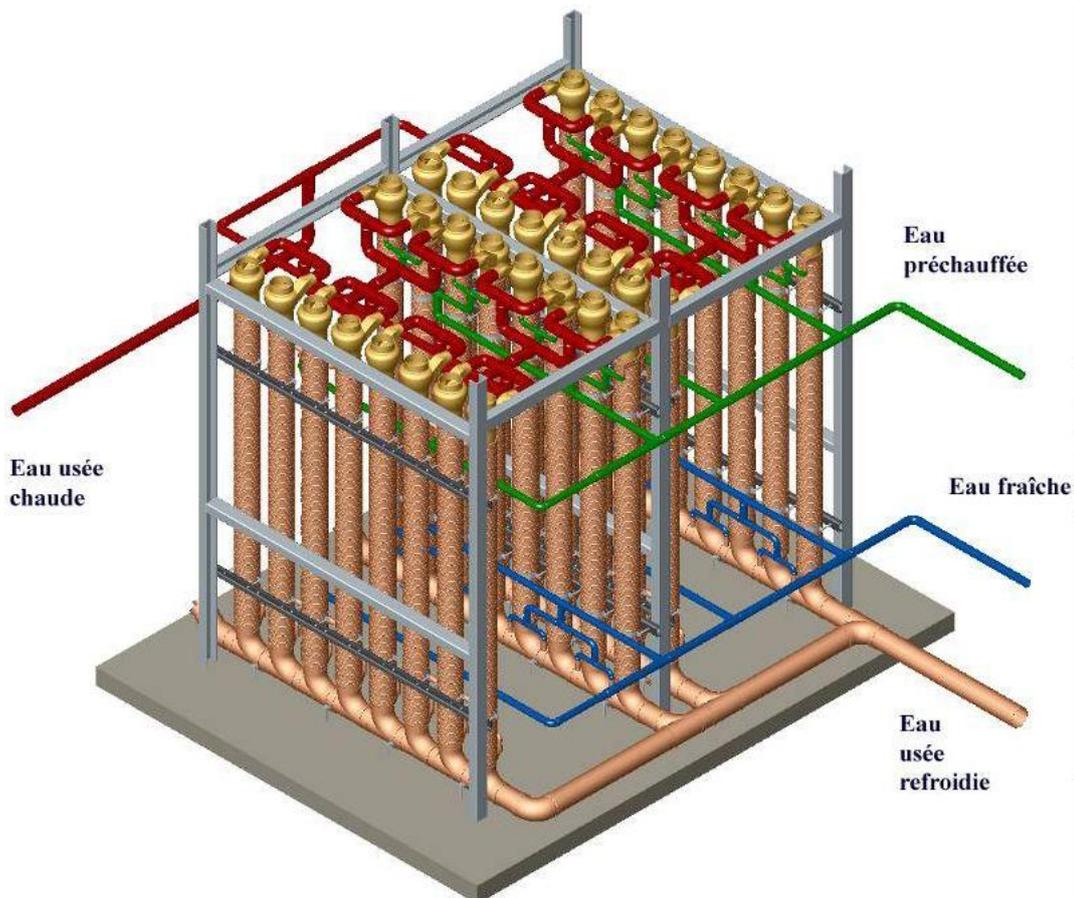
A noter :

- Si le rejet d'eaux grises (en sortie d'immeuble) se fait à une température de l'ordre de 20 °C ou moins, la question de les utiliser pour du rafraîchissement direct ou via une PAC doit être envisagée.
- Selon le contexte, la question du recyclage des eaux grises (collectives) est à envisager conjointement avec la récupération de l'énergie thermique (par exemple système PONTOS de HANSGROHE).

En fait, dès que le dispositif s'applique à une échelle collective, industrielle ou commerciale, les ingénieries examinent toutes les opportunités de valorisation thermique. Le choix de les appliquer ou non relève alors de la maîtrise d'ouvrage.

Récupérer uniquement l'énergie des eaux grises

En installation collective, industrielle ou commerciale, l'échangeur restera le composant clé du dispositif. De ce fait, les systèmes verticaux, qui sont efficaces à l'échelle individuelle, demeurent opérants à l'échelle collective, notamment en raison de leur relative insensibilité à l'encrassement. Aussi, on constate qu'ils sont assez largement mis en œuvre, sauf certitude de disposer d'eaux grises peu chargées (piscines) qui permettent le recours à des échangeurs plus compacts (à plaques par exemple). Comme illustré par les vues ci-après, les échangeurs gravitaires seront mis en œuvre en batterie, l'enjeu étant de garantir un bon échange thermique en limitant le débit dans chaque unité.



*Illustration 163 : Exemple de dispositif de récupération pour installation de lavage de véhicules
(source : Power-Pipe - RenewABILITY-Energy-Inc)*



Illustration 164 : Système Thermodrain (Eco-GFX) implanté dans une laverie
(source : EcoInnovation-Inc, www.ecoinnovation.ca)

Pour les dispositifs présentés ci-avant, la puissance thermique des échangeurs peut dépasser 200 kW (typiquement 10 kW par tube) mais le temps de fonctionnement réellement efficace ne dépasse que rarement une dizaine d'heures par jour. En effet, le dispositif reste encore conditionné par l'appel d'eau chaude, même si des stockages tampons peuvent être implantés, sur les eaux grises comme sur l'eau chaude. Même si des systèmes de régulation sont implantés à des fins d'optimisation énergétique, ces installations gardent en commun une gestion passive des eaux grises, c'est-à-dire qu'on exploite préférentiellement un niveau de température relativement élevé en préchauffage de l'utilisation, cela en utilisant l'écoulement gravitaire des eaux grises.

Avec l'implantation de tampons d'accumulation et d'une régulation, on va s'orienter vers une approche plus industrielle tendant progressivement à coupler deux finalités :

1. récupérer l'énergie des eaux grises ;
2. recycler (réutiliser) l'eau si elle est peu chargée / polluée.

Par exemple, l'offre Degrés-Bleus Eau-Chaude de la Lyonnaise des Eaux, qui résulte d'un accord récent avec la société DOMELYS (CaH₂O), traite uniquement la récupération de l'énergie. Les principaux clients restent donc les piscines et autres centres aquatiques, une économie d'énergie de 30 % à 50 % étant recherchée.

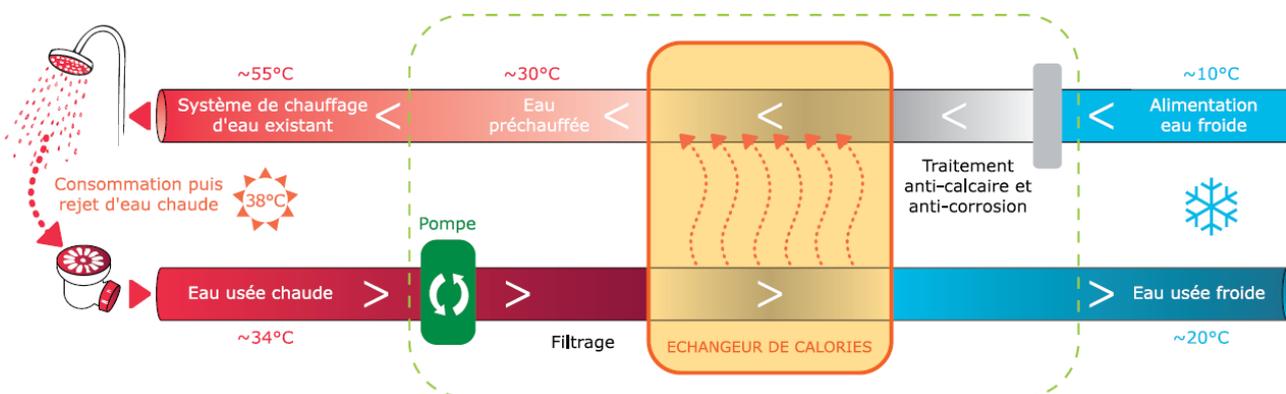


Illustration 165 : Schéma de principe de l'offre "Degrés-Bleus Eau Chaude" de GDF-SUEZ



Illustration 166 : Détail d'une installation CalH₂O (Domelys) exploitant un échangeur à plaques

Récupérer l'énergie des eaux grises et recycler l'eau

Avec des dispositifs comme le HeatCycle combiné au système AquaCycle de PONTOS-HANSGROHE, une marche est franchie avec, après une étape de récupération d'énergie, un dispositif qui va procéder à une épuration des eaux grises en vue d'un recyclage dans les chasses d'eau ou pour l'irrigation.

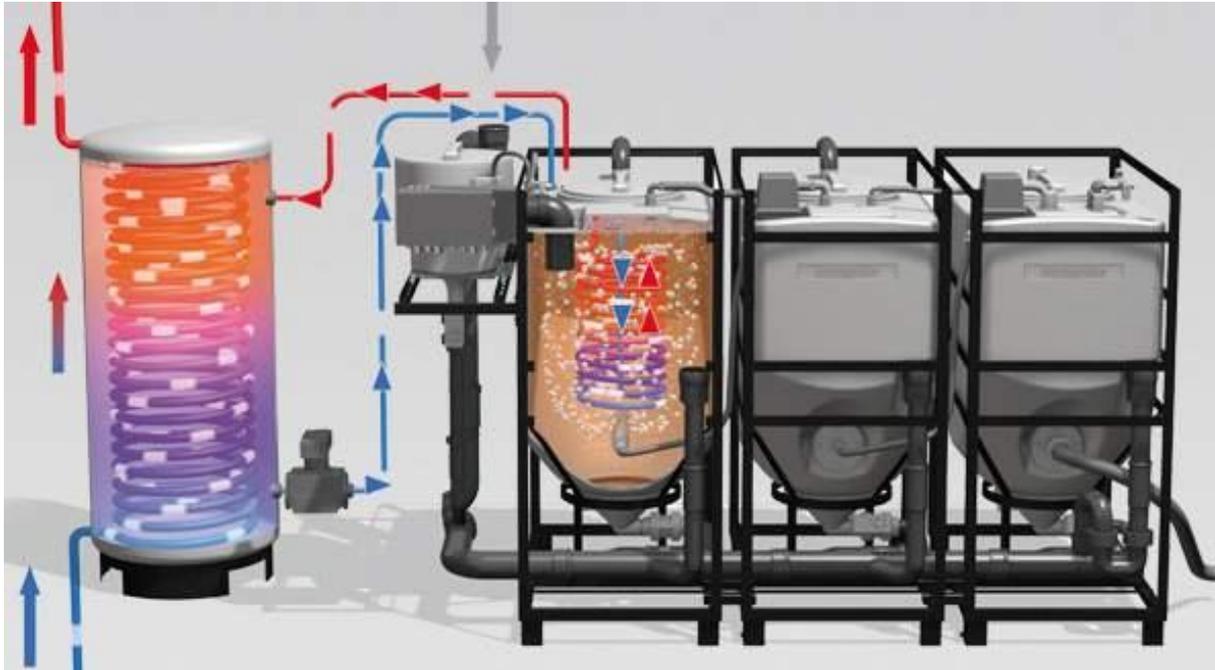


Illustration 167 : Dispositif HeatCycle de PONTOS-HANSGROHE



Illustration 168 : Dispositif HEATCYCLE couplé à un accumulateur FORSTNER à Freiburg

Pour que la récupération de la chaleur exploite la chaleur des eaux grises des douches et des baignoires afin de réchauffer l'eau de service, la première chambre de nettoyage de

l'AquaCycle a été équipée d'un échangeur qui récupère la chaleur des eaux grises. Evidemment, un tel dispositif impose un circuit de distribution spécifique pour les eaux recyclées qui peuvent être redirigées vers les WC ou vers l'irrigation. On notera que de tels dispositifs pour eaux recyclées sont relativement standards. Ils sont identiques aux circuits sur eaux brutes non traitées comme ceux que l'on retrouve sur des installations exploitant une géothermie sur aquifère.



Illustration 169 : Vue du système complet installé dans une résidence étudiante (65 personnes) à Fribourg-en-Brisgau en Allemagne

Pour l'installation représentée sur l'illustration ci-avant (AquaCycle Pontos 3000-6), la récupération de chaleur sur les eaux grises est raccordée à une trentaine de douches et l'eau recyclée alimente tous les WC. L'unité de récupération de la chaleur économise environ 20 % des dépenses pour la production d'ECS. Le système ci-avant, composé de 6 cuves de 430 litres, est dimensionné pour 3 000 litres par jour et son potentiel de recyclage est de 1 000 m³ à 1 100 m³ par an. A noter que ce système est modulaire et ne connaît pas de réelle limite d'application, les plus gros systèmes pouvant être constitués de cuves de 1 500 litres chacune.

Annexe 4.

Acronymes et définitions

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

ADUHME : Association pour un Développement Urbain Harmonieux par la Maîtrise de l'Energie

BE : Basse Energie (s'applique à la géothermie basse énergie)

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

COP : COefficient de Performance (s'applique aux pompes à chaleur)

DO : Déversoir d'Orage (s'applique aux réseaux d'eaux usées)

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

ECS : Eau Chaude Sanitaire

EPIC : Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

PAC : Pompe A Chaleur

PACg : Pompe A Chaleur géothermique

PCET : Plan Climat Energie Territorial

PR : Poste de Refoulement (s'applique aux réseaux d'eaux usées)

SGV : Sonde Géothermique Verticale

SIG : Système d'Information Géographique

RT 2012 : Réglementation Thermique 2012

SRCAE : Schéma Régional Climat, Air, Energie

TBE : Très Basse Energie (s'applique à la géothermie très basse énergie)

AQUAPAC

Procédure (de type assurance) utilisée pour garantir la ressource en eau à faible profondeur exploitée par une pompe à chaleur.

Aquifère

Formation géologique (sol ou roche), contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable, constituée de roches perméables dont les pores ou fissures communiquent et sont suffisamment larges pour que l'eau puisse y circuler.

On distingue :

- Aquifère à nappe libre : l'aquifère reposant sur une couche très peu perméable est surmontée d'une zone non saturée en eau.
- Aquifère captif (ou nappe captive) : l'eau souterraine est confinée entre deux formations très peu perméables. Lorsqu'un forage atteint une nappe captive, l'eau remonte dans le forage.

Dans ce document, une formation aquifère est susceptible de stocker et de transmettre des quantités d'eau telles que l'on peut en exploiter un débit significatif par captage, soit à des fins d'alimentation en eau potable, soit pour des usages de géothermie très basse énergie.

Banque des données du sous-sol - BSS

La Banque des données du Sous-Sol est la base des données nationale pour les ouvrages souterrains déclarés sur le territoire français. Elle regroupe les informations techniques acquises lors de la réalisation de travaux souterrains et collectées auprès des foreurs et des maîtres d'ouvrage.

Sa consultation peut se faire :

- sur le site InfoTerre™,
- dans chaque direction régionale du BRGM ;
- au centre national de consultation du BRGM à Paris.

Bassin artésien

Structure géologique, souvent de grandes dimensions, dans laquelle l'eau est sous pression et peut jaillir en surface au travers un forage.

Boucle géothermale

Circuit de l'eau souterraine (eau géothermale) puisée dans l'aquifère et qui y retourne après avoir échangé de l'énergie thermique à la boucle géothermique située en surface.

Boucle géothermique

Circuit localisé en surface, généralement de l'eau de la ville, et utilisé pour exploiter l'énergie géothermique. Un échangeur de chaleur sépare l'eau de la boucle géothermale et l'eau de la boucle géothermique.

Caractéristiques de l'eau

Le terme de qualité porte sur le caractère corrosif et ou incrustant de l'eau de nappe qui est déterminé à partir des paramètres suivants :

- le titre hydrotimétrique ou dureté de l'eau (exprimé en degré français ou TH) lié à la concentration en ions calcium (Ca^{2+}) et qui influe sur le caractère incrustant de l'eau exploitée ;
- les concentrations (en mg/L) en ions calcium (Ca^{2+}), sulfates (SO_4^{2-}), magnésium (Mg^{2+}) qui peuvent générer des dépôts sur les crépines et les parois des pompes, tuyauteries et échangeurs.
- la concentration (en mg/L) de l'ion chlorure (Cl^-) qui influe sur le pouvoir corrosif de l'eau.

Capteurs enterrés

Il s'agit d'échangeurs de chaleur enfouis directement dans le sous-sol. Ils sont généralement constitués de tubes en polyéthylène haute densité dans lesquels circule en boucle fermée un fluide caloporteur (eau) prélevant l'énergie du sol ou du sous-sol.

- Les capteurs peuvent être enterrés horizontalement dans le sol en une nappe localisée à faible profondeur (de 0,60 m à 1,20 m). On parle dans ce cas d'échangeurs ou "capteurs horizontaux".
- Les capteurs de 2 à 3 m de hauteur peuvent être enfouis à faible profondeur dans le sol. On parle dans ce cas d'échangeurs compacts.
- Les capteurs peuvent être enterrés verticalement dans le sol. Dans ce cas ils sont placés dans un (des) forage(s) de plusieurs dizaines de mètres de profondeur et scellés par du ciment spécial. On parle dans ce cas de "sonde géothermique". Selon l'usage et la nature du sol, la puissance thermique d'une sonde géothermique est de l'ordre de 30 à 50 Watts par mètre de profondeur.

Centrale géothermique (ou machinerie thermodynamique)

Ensemble des équipements de surface assurant l'échange de chaleur (énergie) avec le fluide géothermal et le départ vers le circuit de distribution de l'énergie (chaleur ou électricité). La centrale comprend également tous les équipements nécessaires à ce transfert (systèmes de régulation, échangeurs, pompes...). Tous ces équipements peuvent être regroupés dans un même bâtiment.

Cimentation

La cimentation d'un tubage dans un forage consiste à cimenter l'espace annulaire entre le tubage et la paroi naturelle du forage. Cette cimentation a pour but de sceller le tubage aux terrains traversés ce qui permet de protéger la qualité des eaux souterraines en évitant le mélange d'eaux de différents niveaux et l'infiltration d'eau de surface. Dans le cas d'une exploitation des nappes aquifères, le ciment est généralement peu conducteur de la chaleur. Dans le cas d'une sonde géothermique, la cimentation consistant à sceller les capteurs dans le forage est opérée avec un ciment spécial facilitant les échanges thermiques avec les roches.

Climatisation

Désigne le rafraîchissement des bâtiments à l'aide de pompes à chaleur. Dans le cas d'une PAC réversible, le cycle du fluide frigorigène peut s'inverser vis-à-vis du mode chauffage. Le condenseur devient l'évaporateur de la pompe à chaleur, l'évaporateur devient le condenseur.

Coefficient de performance - COP

Le COP traduit la performance énergétique d'une pompe à chaleur. Il s'exprime par le rapport entre la quantité de chaleur délivrée et l'énergie (électrique) consommée par le compresseur.

Par exemple, pour une pompe à chaleur dont le COP est égal à 4, une quantité d'énergie électrique consommée de 1 kWh correspondra à une fourniture d'énergie thermique de 4 kWh. Il s'agit là du COP-machine, lequel correspond à un point de fonctionnement donné.

On définit également le COP-saisonnier qui tient compte de tous les points de fonctionnement sur une année entière (en anglais : SPF – seasonal performance factor)

Dans les deux cas, certains chiffres incorporent l'énergie de pompage dans les ouvrages géothermiques, d'autres non. Il convient donc de vérifier ce qui est réellement pris en compte.

Colonne de production (colonne d'exhaure)

Conduite verticale disposée dans un forage servant à pomper l'eau souterraine.

Coefficient d'efficacité frigorifique - EER

Il s'agit d'un rendement qui s'applique aux pompes à chaleur réversibles pour qualifier la production de froid alors que le COP est utilisé pour qualifier la production de chaud. En mode

chauffage, la puissance motrice du compresseur est entièrement utilisée sous forme de chaleur et s'ajoute à l'énergie géothermique prélevée, alors qu'en mode climatisation elle est évacuée vers la source géothermique. Le rendement énergétique, et donc le coût de fonctionnement d'un climatiseur ou d'une pompe à chaleur en mode climatisation, dépendent principalement de la température de l'installation. Or, en mode climatisation, l'écart de température entre la source froide (circuit d'eau glacée dans le bâtiment) et la source chaude (fluide caloporteur circulant dans les formations géologiques) est plus faible qu'en mode chauffage. De ce fait, l'EER d'une PAC réversible est rarement dégradé vis-à-vis du COP de cette même PAC.

Doublet (géothermique)

Ensemble de deux forages associés, l'un étant dédié à la production du fluide géothermal, l'autre à la réinjection de ce fluide dans l'aquifère d'origine.

Cette configuration présente plusieurs avantages :

- absence de rejets dans l'environnement (circuit en boucle fermée),
- pérennité du débit hydraulique,
- stabilité des pressions d'exploitation.

Emmagasinement (ou coefficient d'emmagasinement)

Rapport du volume d'eau libérée ou emmagasinée, par unité de surface de l'aquifère, à la variation de charge hydraulique Δh correspondante. Le coefficient d'emmagasinement est utilisé pour caractériser plus précisément le volume d'eau exploitable et il conditionne l'emmagasinement de l'eau souterraine mobile dans les vides du réservoir. De ce fait, pour une nappe captive, ce coefficient peut être très faible.

Energie thermique, énergie thermique utile

Désigne une quantité de chaleur contenue dans une réserve finie ou consommée durant une période donnée. Cette énergie correspond généralement à une valeur et/ou une dépense. Dans ce rapport, l'énergie thermique correspond essentiellement à l'énergie nécessaire au confort thermique des usagers. Elle représente donc l'énergie utile.

Energie géothermique

Désigne une quantité de chaleur qui est échangée avec les formations géologique ou qui peut l'être. Vis-à-vis de l'énergie thermique utile, l'énergie géothermique diffère en fonction des autres apports énergétiques. Par exemple pour un chauffage par pompe à chaleur géothermique, l'énergie utile est la somme de l'énergie géothermique et de la consommation d'énergie électrique (compresseur et circulation). Pour une climatisation par pompe à chaleur géothermique, l'énergie utile de rafraîchissement et l'énergie électrique s'additionnent et sont injectées dans la formation géothermique.

Forage

Désigne en principe l'opération (opération de foration) consistant à réaliser un ouvrage de type "puits géothermique" ou "sonde géothermique". En langage courant "forage géothermique" désigne un ouvrage déjà réalisé et équipé. Différentes techniques de forage existent :

- le havage consiste à creuser le terrain à la base du tubage en position verticale. Le tubage s'enfonce sous l'effet de son poids. Limité à des ouvrages très peu profonds ;
- le battage consiste à briser la roche en laissant régulièrement tomber un outil (le trépan). Ce procédé ancien peut être utilisé dans des formations "dures". Un tubage de travail est utilisé pour protéger les parois du terrain ;
- le rotary est une méthode par rotation et broyage. Les déblais sont entraînés vers la surface par la circulation d'un fluide de forage (boue de forage) dans l'espace annulaire entre le terrain et le train de tige ;
- le marteau fond de trou fonctionne à l'air comprimé par percussion d'un taillant. Il est utilisé en terrain dur et fissuré (roches cristallines, carbonatées, volcaniques,..).

- le tubage à l'avancement consiste à enfoncer un tube au fur et à mesure de l'avancement de la foration. L'association marteau fond de trou et tubage à l'avancement permet de conserver les avantages de la technique de forage dans des terrains instables.

Forage artésien (puits artésien)

Lorsqu'un forage atteint une nappe captive, l'eau remonte dans le forage. Cette remontée peut aller jusqu'au jaillissement de l'eau au-dessus de la surface du sol. On dit alors que le puits est artésien.

Free cooling (rafraîchissement direct)

Il s'agit d'utiliser directement la capacité de refroidissement de la ressource sans utiliser une pompe à chaleur.

Géothermal - Géothermique

Subtilité de la langue française permettant de distinguer :

- le circuit géothermal dans lequel circule le fluide naturel issu du réservoir (fluide géothermal),
- du circuit géothermique dans lequel circule de l'eau (ou un fluide d'échange) réchauffée par échange avec le fluide géothermal.

Géothermie très basse énergie (TBE)

S'applique usuellement lorsque la température initiale du niveau géologique ou hydrogéologique où s'effectue l'échange de chaleur ou le prélèvement d'énergie thermique est inférieure à 30 °C. Aussi, on parle parfois de géothermie "très basse température". En géothermie TBE, on peut exploiter l'eau des aquifères peu profonds ou bien échanger de la chaleur avec les roches du sous-sol au moyen d'une "sonde géothermique".

Pour assurer les besoins de chaleur des bâtiments, l'énergie ainsi récupérée nécessite généralement l'usage d'une pompe à chaleur. Les pompes à chaleur réversibles permettent également de faire de la climatisation. Lorsque la température de la ressource TBE est suffisamment basse, ce qui est généralement le cas, alors le rafraîchissement direct des locaux est possible, c'est-à-dire sans recourir à une pompe à chaleur.

Géothermie basse énergie (BE)

S'applique usuellement lorsque la température initiale du niveau géologique ou hydrogéologique où s'effectue l'échange de chaleur ou le prélèvement est supérieure à 30 °C et inférieure à 90 °C. Ces ressources BE sont usuellement localisées à des profondeurs situées au-delà de 500 m. L'énergie disponible peut être utilisée directement pour le chauffage urbain, le chauffage de serres, le thermalisme ...

Géothermie moyenne énergie

Exploitation de la chaleur du sous-sol typiquement comprise entre 90 °C et 150 °C. L'énergie peut être soit utilisée directement pour assurer des besoins de chaleur et/ou pour produire de l'électricité, par exemple par l'intermédiaire d'un circuit à fluide volatil (cycle de Rankine). Usuellement, une exploitation en cogénération est recherchée.

Géothermie haute énergie (HE)

Exploitation de la chaleur du sous-sol à des températures généralement supérieures à 150 °C, usuellement pour la production d'électricité. Le fluide exploité est un mélange d'eau et de vapeur ou de la vapeur seule.

Gradient hydraulique

Décroissance de la charge (hydraulique) par unité de distance dans la direction de l'écoulement.

Hydrogéologie

Désigne une des branches des sciences de la Terre dont l'objet est la connaissance des conditions géologiques, hydrologiques et des lois physiques qui régissent l'origine, la présence, les mouvements et les propriétés des eaux souterraines. Elle désigne également l'application de ces connaissances aux actions humaines sur les eaux souterraines, notamment à leur prospection, à leur captage et à leur protection.

Joule (J)

Le joule est l'unité légale pour désigner l'énergie dans le Système International d'unités. Le joule traduit une quantité d'énergie assez petite. C'est pourquoi on utilise très souvent les multiples de cette unité : kJ (le kilojoule qui est égal à 1000 joules), MJ (le mégajoule qui est égal à un million de joules). Son symbole est J. Cette unité a longtemps été exprimée en calorie avec l'équivalence d'une calorie égale à 4,18 joules. En géothermie, on utilise couramment le kiloWatt-heure (kWh) et ses multiples.

kW - kiloWatt

Exprime une puissance : $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$

kWh - kilowatt heure

Unité d'énergie égale à l'énergie consommée par un appareillage de 1 000 W (ou 1 kW) pendant une heure ; $1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J}$

Massif filtrant

Il s'agit d'un massif de gravier ou de sable (terme générique : gravel pack) mis en place entre la crépine et le terrain dans le but d'empêcher le passage des éléments les plus fins localisés dans l'aquifère capté.

Mur (de la nappe)

Niveau inférieur de la nappe généralement constitué par une formation imperméable. Peut correspondre au toit du substratum. (voir toit et substratum)

Nappe libre

Aquifère saturé en eau et non surmonté d'une couche imperméable. Nota : une nappe phréatique est la première nappe libre rencontrée et la pression exercée sur le toit de cette nappe est égale à la pression atmosphérique.

Nappe captive

Aquifère saturé en eau et prisonnier entre deux couches imperméables où l'eau est généralement sous pression. Si l'une ou l'autre des deux couches est faiblement aquifère, la nappe sera semi-captive.

Nappe perchée

Nappe libre généralement localisée, souvent périodique, matérialisant l'interception de l'eau de percolation par un horizon peu perméable.

Nappe phréatique

Nappe à surface libre, comprise dans un aquifère qui comporte une zone non saturée, une zone saturée et une zone de fluctuation.

Il s'agit généralement de la première nappe d'eau souterraine rencontrée depuis la surface.

Niveau piézométrique

Niveau réel et/ou fictif pour lequel la pression de l'eau est égale à la pression atmosphérique. C'est le niveau pouvant se mesurer dans un puits ouvert, c'est-à-dire le niveau libre de l'eau observé dans un puits ou forage. Le niveau piézométrique est rapporté à un niveau de référence (nivellement général de la France - NGF).

Pompe à chaleur - PAC et pompe à chaleur géothermique - PACg

Dispositif thermodynamique permettant d'extraire de l'énergie d'une source géothermique, ici à très basse température (TBE), pour la transposer à un autre niveau de température correspondant à un usage précis. Ce transfert thermique se fait grâce à l'exploitation des changements de phase d'un fluide frigorigène (gaz, liquide). Ce changement de phase nécessite un apport d'énergie, le plus souvent via un compresseur mécanique entraîné par un moteur électrique. D'autres technologies existent, par exemple les pompes à chaleur à sorption.

- Une PAC produit de la chaleur lorsque de l'énergie thermique est prélevée dans le milieu naturel : eau souterraine ou de surface, sous-sol, sol, air ...
- Une PAC assure de la climatisation lorsque la chaleur est prélevée dans un milieu fermé (habitation) avant d'être rejetée dans le milieu naturel.
- Une PAC assurant du chauffage et de la climatisation est une PAC réversible.

Perméabilité

Aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide.

Pieux géothermiques (géostuctures énergétiques ou fondations thermoactives)

Lorsque la construction d'un bâtiment nécessite des fondations sur pieux en béton pour assurer la fonction de portance, il est possible d'équiper ces pieux de capteurs (tubes de polyéthylène noyés dans le béton). Les capteurs sont ensuite connectés à une pompe à chaleur.

Plancher chauffant basse température

Émetteur de chaleur constitué de tubes dans lesquels circule un liquide restituant la chaleur aux pièces à chauffer. Intégré à une chape de béton, il est dimensionné pour que sa température de surface reste modérée (environ 23 °C). Un plancher chauffant peut assurer aussi le rafraîchissement d'une habitation, on parle alors de plancher chauffant-rafraîchissant.

Pompage d'essai (essais de pompage, tests de pompage)

Après la réalisation d'un forage, les pompages d'essais consistent en une série de tests et mesures ayant pour objectifs :

- de vérifier la capacité de production (ou d'injection) du forage (débit),
- d'évaluer l'influence du futur prélèvement sur les ouvrages voisins (rayon d'influence).

Porosité

Caractéristique intrinsèque des terrains. Elle est égale au rapport du volume des vides sur le volume total de la roche, et s'exprime en pourcentage. La porosité totale d'une roche est très variable : de 1 à 50 %. Plus la roche est poreuse, plus elle contiendra de l'eau. On distingue la porosité de matrice (ou d'interstice) de la porosité de fissures (ne pas confondre porosité et perméabilité : si les "vides" du terrain ne sont pas interconnectés, l'eau ne pourra pas circuler).

Potentiel géothermique

Par convention, on définit le potentiel géothermique comme étant le résultat du croisement des demandes en énergie avec l'énergie que peuvent fournir les ressources géothermiques. En principe, ce calcul est effectué pour la période de l'année qui nécessite les échanges d'énergie les plus importants. En France métropolitaine, dans le cas de la géothermie superficielle (géothermie très basse énergie - TBE) qui est utilisée pour le confort thermique des bâtiments,

le calcul est effectué pour le mois de janvier en mode chauffage et pour le mois de juillet en mode rafraîchissement.

Puissance d'une nappe

Désigne la hauteur d'eau mesurée depuis le mur de la nappe (ou le substratum). Usuellement, elle correspond à l'épaisseur saturée en eau d'une nappe aquifère.

Puissance thermique et puissance thermique utile

D'une manière générale, désigne la puissance thermique d'un équipement. Usuellement, elle correspond à la puissance thermique utile, c'est-à-dire celle qui satisfait le besoin de l'utilisateur.

Puissance géothermique

Désigne la puissance thermique échangée avec le sous-sol. Dans le cas de l'utilisation dans un système de chauffage par pompe à chaleur géothermique (PACg), la puissance géothermique s'additionne à la puissance électrique consommée par la pompe à chaleur pour constituer la puissance thermique utilisable pour satisfaire le besoin thermique de l'utilisateur. La correspondance entre la puissance géothermique, la puissance électrique et la puissance thermique utile d'une pompe à chaleur est définie par son coefficient de performance (COP).

Rabattement

Abaissement du niveau piézométrique d'un aquifère engendré par un pompage. La courbe caractéristique permet de définir le débit maximal d'exploitation.

Rafraîchissement direct

Désigne le rafraîchissement des bâtiments à l'aide de dispositifs exploitant directement la température de la ressource géothermique, c'est-à-dire sans recourir à une pompe à chaleur fonctionnant en mode climatisation.

Rapport de fin de travaux

Comme pour tout type de travaux, un rapport de fin de travaux de forage doit être fourni. Il contient entre autre : les dates de réalisation, la localisation du (des) forage(s), la nature des niveaux géologiques traversés, l'équipement des forages, les résultats des pompages d'essai.

Réseau de chaleur

Un réseau de chaleur, encore appelé réseau de chauffage urbain, est un ensemble de canalisations qui empruntent, en général, le sous-sol des voies publiques pour distribuer de la chaleur en milieu urbain. Par extension, la désignation "réseau de chaleur" inclut également les réseaux d'eau glacée ou les réseaux en boucle tempérée. On distinguera les réseaux de chaleur où la production d'énergie est centralisée de ceux où la production d'énergie thermique est réalisée par des machineries réparties sur le réseau. Ce dernier cas correspond notamment aux réseaux en boucle tempérée où le fluide caloporteur circule à une température assez peu différente de la température du sol en surface. Dans tous les cas, les utilisateurs sont raccordés au réseau via un échangeur de chaleur (sous-station).

Réservoir géologique

Formation géologique dans laquelle circule l'eau souterraine.

La porosité et la perméabilité de la roche du réservoir caractérisent l'aquifère.

Ressource géothermale

Une ressource géothermale peut être simplement définie comme un réservoir dont on peut extraire de l'énergie pour utilisation directe de la chaleur ou pour produire de l'électricité, dans des conditions techniquement et économiquement viables.

Il existe des ressources géothermales, chaque réservoir ou gisement géothermal ayant ses propres caractéristiques et une localisation verticale et géographique spécifique.

Sonde géothermique

Échangeur de chaleur constitué de tubes de polyéthylène insérés verticalement dans un forage de plusieurs dizaines de mètres de profondeur et scellés dans celui-ci par du ciment réalisé spécialement à cet effet. Ces tubes sont parcourus par un fluide caloporteur, généralement de l'eau éventuellement additionnée d'un additif antigel. Différentes solutions techniques existent en France : sonde coaxiale, sonde en simple U (une seule boucle dans l'ouvrage), sonde en double U (deux boucles dans un ouvrage, solution la plus répandue en France).

Source chaude

En thermodynamique, la source chaude est la source qui est réchauffée lors des processus. C'est donc la source qui accumule de la chaleur. En mode rafraîchissement direct ou en mode climatisation, on peut considérer également que c'est la source qui cède des frigories.

Source froide

En thermodynamique, la source froide est la source qui est refroidie lors des processus. C'est donc la source qui cède de la chaleur. On peut également considérer que la source froide est celle qui accumule des frigories.

Substratum

Sol rocheux, peu ou pas perméable, recouvert de sédiments ou d'altérites. Désigne souvent la couche peu ou pas perméable située sous une nappe (voir mur).

Tep : Tonne d'équivalent pétrole (pouvant être noté tep, TEP)

La tonne d'équivalent pétrole est une unité de mesure de l'énergie couramment utilisée par les économistes de l'énergie pour comparer les énergies entre elles. C'est l'énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole moyen, ce qui représente environ 11 600 kWh. Les anglo-saxons utilisent également le baril équivalent pétrole, ou BOE (barrel of oil equivalent) qui vaut environ 0,135 tep, selon l'équivalence 1 tep = environ 7,3 barils (le baril étant une mesure de capacité valant 159 litres). En France, les coefficients de conversion sont fixés par l'Observatoire de l'énergie, reprenant la méthode commune aux organisations internationales (AIE, Commission européenne, ONU, Conseil mondial de l'énergie).

Tertiaire

Les bâtiments du secteur tertiaire abritent des activités de service et administratifs. La répartition des besoins de chauffage et/ou de climatisation de ces bâtiments peuvent être différents selon le domaine d'activité : bureaux, hôpitaux...

Thermal Energy Storage - TES

En géothermie superficielle, on définit deux technologies de stockage inter-saisonnier d'énergie thermique :

- Les dispositifs convectifs de type ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) comportent, théoriquement, au moins deux zones (l'une chaude et l'autre froide) entre lesquelles, au fil des cycles périodiques, un même fluide (l'eau de l'aquifère) circulera alternativement dans un sens puis dans l'autre en passant par les installations en surface où s'effectuent les échanges de chaleur. Un stockage de type ATES comprend un stock chaud et un stock froid.

- Les champs de sondes géothermiques constituent des stockages diffusifs de type BTES (Borehole Thermal Energy Storage). Un tel stockage se matérialise par l'exploitation d'un volume unique de roches souterraines. Au cours d'un cycle, généralement saisonnier, la température de ce volume va varier entre deux extrêmes, induisant une sorte de "respiration" thermique du volume impacté par le dispositif de stockage.
- Les fondations géothermiques constituent une autre technique de stockage diffusif.

Thermie (th)

Ancienne unité pour désigner une quantité d'énergie.

1 th = 1.10^6 cal = 4,1855 MJ (Méga Joules)

Thermodynamique

Partie de la physique traitant des relations entre les phénomènes thermiques et mécaniques.

Toit de la nappe (ou surface)

Désigne le niveau supérieur de la nappe constitué par une formation imperméable dans le cas d'une nappe captive (voir mur).

Transmissivité (ou coefficient de transmissivité)

Paramètre affecté à toute l'épaisseur de l'aquifère qui désigne le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de l'aquifère, sous l'effet du gradient hydraulique. Elle est égale au produit de la conductivité hydraulique par l'épaisseur de la partie saturée de l'aquifère. La transmissivité permet d'évaluer le débit que peut capter un forage.

Ventilo convecteur

Échangeur à air ventilé constitué de 2 ou 4 tuyaux, ou 2 tuyaux - 2 fils qui distribue selon les besoins du chaud ou du froid.

W - Watt

Le watt est l'unité légale de puissance. Il correspond à la quantité d'énergie consommée ou produite par unité de temps, soit un joule par seconde. Son symbole est W.

On utilise très souvent ses multiples : le kW (kilowatt) avec 1 kW égal à 1 000 W.

Wh - Wattheure

C'est l'unité de travail équivalente à 3 600 joules. C'est le travail accompli par une puissance de 1 Watt pendant 1 heure.

On utilise le plus souvent des multiples exprimés en kWh (kilowattheure), en MWh (mégawattheure) ou TWh (térawattheure), avec 1 MWh = 1 000 kWh et 1TWh = 1 million de kWh.

Exemple : une ampoule de 20 Watts fonctionnant pendant 50 heures consomme 1 000 Wh, soit 1 kWh (un kiloWattheure).

Zone non saturée

Zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe libre.

Zone saturée

Zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices des roches, formant, dans un aquifère, une nappe d'eau souterraine.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans cedex 2 - France
Tel. : 02 38 64 34 34

Direction Régionale Auvergne

12, avenue des Landais
63170 Aubière - France
Tél. : 04 73 15 23 00