

# Synthèse

Ce document s'adresse aux maîtres d'ouvrage publics ou privés et à leurs conseils, aux bureaux d'études sous-sol et thermiques, aux entreprises de forage et en général à tous les acteurs de la filière pompe à chaleur (PAC) géothermique. Il a pour ambition de présenter l'ensemble des éléments à connaître avant d'initier une démarche visant à développer ou réaliser une opération mettant en œuvre des pompes à chaleur sur champ de sondes\*.

L'utilisation de systèmes thermodynamiques pour assurer soit le chauffage seul, soit le chauffage et le rafraîchissement\* de locaux, est un procédé plus complexe que les procédés traditionnels de chauffage mais plus performant. Ses principaux avantages portent sur la « gratuité » de la ressource géothermale et la possibilité de produire de la chaleur et/ou du froid.

Les pompes à chaleur (PAC) géothermiques ont par ailleurs la particularité d'associer deux secteurs d'activité qui n'ont, *a priori*, pas de rapport direct : la géologie et le génie climatique. Le développement de cette technologie doit gérer la mise en adéquation entre d'une part la ressource géothermale dont la température est imposée, et d'autre part des bâtiments dont les besoins énergétiques sont également fixés ; les principaux éléments variant sont donc la conductivité thermique des terrains, la puissance thermique appelée et, dans le cas de bâtiments, les courbes de régulation (lois d'eau).

Malgré des contraintes spécifiques, il n'en demeure pas moins vrai que la pompe à chaleur géothermique est une technique qui présente des atouts indiscutables, en termes de maîtrise de l'énergie, de protection de l'environnement et d'intégration architecturale. Les pompes à chaleur dites « réversibles » qui assurent la double fourniture de chaud et de froid sont particulièrement adaptées aux bâtiments du secteur tertiaire où les besoins en rafraîchissement sont souvent indispensables.

Le secteur tertiaire est important en France et le développement des PAC géothermiques réversibles constitue une solution qu'il est important d'examiner à l'occasion de programmes neufs ou de réhabilitation.

La filière pompe à chaleur géothermique nécessite que les installations soient conçues, réalisées et entretenues dans les règles de l'art par des professionnels compétents tant dans les domaines des installations de sous-sol, que des installations de surface. Ce guide a pour objet de rappeler les grands principes de mise en œuvre de ces installations et de mentionner les principales normes auxquelles il se réfère.

\* Se reporter au lexique p97.

# Sommaire

<b>Présentation synthétique d'un système type pour une opération de géothermie sur champ de sondes .....</b>	<b>8</b>
① Le système d'échange d'énergie dans le sous-sol .....	9
② Avantages des systèmes géothermiques sur champ de sondes.....	9
<b>Les systèmes géothermiques sur champ de sondes .....</b>	<b>10</b>
① Principe général.....	10
② Éléments constitutifs du système géothermique sur champ de sondes .....	10
2.1 Échangeur géothermique : le champ de sondes .....	10
2.2 Liaison entre le champ de sondes et le bâtiment.....	12
2.3 La pompe à chaleur .....	14
2.4 Distribution dans le bâtiment .....	15
③ Dynamique d'un champ de sondes .....	16
<b>Choix du système d'échange (sol ou aquifère) en fonction des caractéristiques et de l'implantation du projet .....</b>	<b>18</b>
① Choix du système en fonction de la ressource exploitable (sol – aquifère).....	18
② Choix du système en fonction des besoins énergétiques à couvrir .....	19
③ Critères technico-économiques supplémentaires .....	19
④ Restrictions techniques et réglementaires d'implantation de l'échangeur .....	20
⑤ La maintenance .....	20
⑥ Conclusion .....	21
<b>Différents types d'usage et de fonctionnement de la pompe à chaleur .....</b>	<b>22</b>
① Une offre étendue.....	22
② Précautions d'usage.....	22
③ Production de chaud (chauffage) .....	23
④ Production d'eau chaude sanitaire.....	23
⑤ Rafraîchissement par geocooling .....	24
⑥ Production de froid (PAC réversible).....	25
⑦ Production de chaud et de froid (thermofrigopompe) .....	25
<b>Détermination et optimisation des besoins.....</b>	<b>28</b>
① Détermination des besoins.....	28
1.1 Eau chaude sanitaire.....	29
1.2 Chauffage - Déperditions statiques .....	29
1.3 Chauffage - Déperditions volumiques.....	29
1.4 Besoins de froid .....	30

<b>2</b>	<b>Exigences de la RT 2012</b>	<b>30</b>
2.1	Coefficient Bbio	30
2.2	Caractéristiques thermiques minimales – Ponts thermiques	31
2.3	Limitations des consommations énergétiques	31
<b>3</b>	<b>Réglementation thermique des bâtiments existants</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>Préconisations visant à limiter les besoins</b>	<b>33</b>
4.1	Réduire les besoins de chauffage	33
<b>5</b>	<b>Taux de couverture suivant la ressource accessible</b>	<b>39</b>
5.1	Choix du taux de couverture	39
5.2	Réhabilitation	40
<b>Conception des installations de surface</b>		<b>41</b>
<b>1</b>	<b>Principes généraux</b>	<b>41</b>
<b>2</b>	<b>Choix des émetteurs</b>	<b>41</b>
2.1	Émetteurs à eau (chaud et froid)	41
2.2	Émetteurs à air	42
<b>3</b>	<b>Distribution dans le bâtiment</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>Régulation de l'émission</b>	<b>44</b>
4.1	Lois de régulation dites lois d'eau	44
4.2	La régulation en pratique	45
<b>5</b>	<b>Gestion de la circulation dans le champ de sondes</b>	<b>46</b>
5.1	Puissance et débit	46
5.2	Principes de la régulation côté sondes	47
5.3	Quand utiliser la régulation ?	48
<b>6</b>	<b>Simulation thermique dynamique</b>	<b>50</b>
6.1	Simulation thermique dynamique du bâtiment	50
6.2	Simulation thermique dynamique du champ de sondes et plate-forme	52
<b>Caractéristiques du sous-sol</b>		<b>53</b>
<b>1</b>	<b>Paramètres liés à la géologie</b>	<b>53</b>
<b>2</b>	<b>Transfert de chaleur</b>	<b>53</b>
<b>3</b>	<b>Paramètres physiques liés aux terrains</b>	<b>56</b>
3.1	La conductivité thermique	56
3.2	La capacité calorifique	57
3.3	Influence de la présence d'un aquifère	58
<b>4</b>	<b>Bilan énergétique du sol</b>	<b>58</b>
<b>5</b>	<b>Interactions thermiques entre sondes</b>	<b>59</b>

<b>Dimensionnement d'une solution PAC sur champ de sondes .....</b>	<b>61</b>
<b>1</b> Principes généraux de dimensionnement .....	61
<b>2</b> Paramètres à prendre en compte.....	61
2.1 Nature du sous-sol.....	62
2.2 Contraintes physiques.....	62
2.3 Contraintes imposées par le bâtiment.....	62
2.4 Choix techniques.....	62
2.5 Principes de la simulation dynamique.....	62
2.6 Résultat de STD : l'équilibre du système.....	63
2.7 Résultat de STD : les régimes de fonctionnement.....	65
2.8 Résultat de STD : la performance .....	65
<b>3</b> Logiciels de dimensionnement de l'échangeur géothermique.....	65
 <b>Mise en œuvre d'une solution PAC sur champ de sondes.....</b>	 <b>66</b>
<b>1</b> Configuration générale des ouvrages .....	66
<b>2</b> Programme de forage et acquisition de données.....	66
<b>3</b> Analyse géophysique sur site .....	67
<b>4</b> Test de réponse thermique .....	67
4.1 Principe.....	68
4.2 Méthodologie.....	69
4.3 Détermination de la conductivité.....	70
4.4 Détermination de la résistance thermique de la sonde .....	70
<b>5</b> Acquisition des données thermiques <i>in situ</i> .....	71
<b>6</b> Installation des boucles de sondes.....	72
<b>7</b> Cimentation des boucles de sondes.....	74
<b>8</b> Essais de mise en pression .....	76
<b>9</b> Raccordements et régulation .....	77
<b>10</b> Procès-verbal de réception de l'ouvrage.....	77
<b>11</b> Mise en exploitation, contrôle du bon fonctionnement.....	77
 <b>Exploitation, suivi et maintenance .....</b>	 <b>77</b>
<b>1</b> Surveillance et entretien des installations de surface .....	77
<b>2</b> Surveillance et entretien du champ de sondes .....	78
 <b>Réglementation applicable à la réalisation de champ de sondes.....</b>	 <b>79</b>
<b>1</b> Le code minier.....	79
<b>2</b> Le code civil.....	79

<b>Mécanismes d'accompagnement et procédures incitatives .....</b>	<b>81</b>
<b>① Le crédit d'impôt .....</b>	<b>81</b>
<b>② Le Fonds chaleur .....</b>	<b>81</b>
<b>③ Certificats d'économie d'énergie .....</b>	<b>82</b>
<b>Aspects économiques .....</b>	<b>83</b>
<b>① Champ de sondes .....</b>	<b>83</b>
1.1 Études et maîtrise d'œuvre .....	83
1.2 Réalisation du champ de sondes.....	83
1.3 Équipements et raccordement du champ de sondes.....	83
1.4 Maintenance .....	84
<b>② Équipements de surface .....</b>	<b>84</b>
2.1 Investissements .....	84
<b>Aspects environnementaux .....</b>	<b>85</b>
<b>① L'énergie du sous-sol : une énergie renouvelable .....</b>	<b>85</b>
<b>② Émissions de CO<sub>2</sub> .....</b>	<b>85</b>
<b>③ Taux d'émission .....</b>	<b>85</b>
<b>④ Impact des fluides (installations géothermiques) .....</b>	<b>85</b>
4.1 Fluides frigorigènes (PAC).....	85
4.2 Fluides caloporteurs (champ de sondes).....	86
<b>Domaines d'applications appropriés .....</b>	<b>87</b>
<b>① Principes généraux – Choix du système .....</b>	<b>87</b>
<b>② Retours d'expériences.....</b>	<b>88</b>
<b>Points à retenir pour l'installation d'une PAC géothermique sur champ de sondes .....</b>	<b>91</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>92</b>
<b>① Déroulement d'une opération de pompe à chaleur géothermique sur champ de sondes .....</b>	<b>92</b>
<b>② Dimensionnement d'une opération sur champ de sondes – Aide à la décision.....</b>	<b>93</b>
<b>③ Valeurs de conductivités thermiques en fonction du type de roche (source SIA 384/6) ..</b>	<b>94</b>
<b>Pour en savoir plus .....</b>	<b>95</b>
<b>Lexique .....</b>	<b>97</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>102</b>