

Géothermie Très Basse Énergie : Modèles simplifiés dans une optique macro-économique

Rapport final

BRGM/RP-60754-FR

Mars 2012

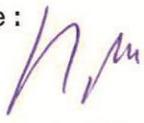
Étude réalisée dans le cadre
de la convention ADEME-BRGM 09 05 C 0119

H. Lesueur

Vérificateur :
Nom : Romain VERNIER
Date : 13/06/2012
Signature :

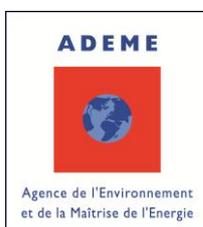


Approbateur :
Nom : Alain DESPLAN
Date : 14/05/12
Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Mots clés : Géothermie très basse énergie, Économie, Coûts, Modèles simplifiés.

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

Lesueur H. (2012) – Géothermie très basse énergie : modèles simplifiés dans une optique macro-économique. Rapport final. BRGM/RP-60754-FR. 170 p., 55 fig., 48 tabl., 4 ann.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE

Usuellement, les études relatives aux techniques géothermiques, même très détaillées du point de vue des processus techniques et énergétiques, traitent le volet économique sur la base de considérations pour le moins rudimentaires. De ce fait, rares sont les examens des sensibilités aux paramètres. De même, la mise en évidence d'une éventuelle criticité ou d'optima économiques n'est pratiquement jamais abordée.

Dans cette étude, réalisée dans le cadre de la convention ADEME-BRGM 09 05 C 0119, on va donc rechercher la mise au point de modèles simplifiés qui permettent de reproduire les effets représentatifs des situations réelles, dès lors que ces effets peuvent avoir une incidence économique, soit avant la décision d'investissement soit pendant le fonctionnement.

C'est d'ailleurs plus particulièrement sur le fonctionnement que les modèles simplifiés insistent en développant la prise en considération de la saisonnalité, cette dernière se manifestant dans les performances énergétiques, essentiellement des techniques géothermiques diffusives, et aussi dans les tarifs de l'énergie électrique dont on sait que la structure de la tarification est appelée à évoluer.

Les modèles simplifiés ne revendiquent pas la fidélité absolue aux lois de la physique et de la thermique mais les paramètres de sortie qu'ils produisent recouvrent bien les effets attendus pour conduire une analyse économique. Ce résultat est valide à l'échelle de la description d'une opération élémentaire. Il devrait l'être également à l'échelle d'un territoire où l'on va chercher à agréger un ensemble d'opérations géothermiques existantes ou envisagées à des fins d'analyse macroéconomique.

Toute la force de cette étude est d'être parvenue à un modèle unique qui décrit l'ensemble des techniques de géothermie très basse énergie (TBE), ce modèle étant implémenté dans EXCEL, sans une seule ligne de code. Ce modèle décrit une opération élémentaire en prenant finement en considération les conditions géoclimatiques locales (chroniques météo et de température du sol) qui ont été renseignées au pas de temps mensuel pour 150 localisations en France, le reste du territoire étant accessible par correction d'altitude et/ou saisie des paramètres thermiques du sol s'ils sont connus.

Dans cette étude, le bâtiment est défini au travers de sa surface raccordée, de son profil de consommations d'énergies thermiques exprimé selon la RT en kWh/m².an et par les chroniques de DJU (degrés-jours-unifiés - chauffage, climatisation, rafraîchissement) calculées à partir des chroniques de température de l'air extérieur.

In fine, les chroniques de coût de fonctionnement sont détaillées, en heures pleines et creuses, pour chacune des quatre demandes : chauffage, ECS (eau chaude sanitaire), climatisation et rafraîchissement direct. Ainsi, le modèle simplifié permet de notamment

visualiser l'incidence des RT-2012 et RT-2020 vis-à-vis de la situation existante. Pour renforcer l'intérêt macroéconomique, la présente étude introduit une technique géothermique sur aquifère de référence en remplacement de la traditionnelle solution sur gaz naturel qui n'est pas pertinente puisqu'elle ne fournit pas les mêmes services.

PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE

Depuis quelques décennies, les techniques géothermiques sont exploitées en France métropolitaine pour des applications thermiques, cela de manière quasi exclusive. Pourtant, l'analyse des déploiements passés et à venir de ces techniques reste assez peu développée malgré une évidente nécessité si on se réfère aux objectifs du Grenelle.

Ainsi, à ce jour, les analyses économiques sont le plus souvent indirectes. Par exemple, on analyse le marché des pompes à chaleur pour jauger la géothermie très basse énergie (TBE) ou les réseaux de chaleur pour évoquer la géothermie basse énergie (BE).

La pertinence des études reste alors insuffisante, une cause pouvant être imputable à la réelle difficulté qu'ont les analystes à décrire simplement « la géothermie ». Un effort doit donc être produit pour faciliter la prise en considération de la grande diversité des techniques géothermiques, ou plus précisément, pour appréhender les effets perceptibles sur les paramètres économiques analysés.

Dans cet objectif, la présente étude propose des outils qui devraient favoriser les investigations macroéconomiques, notamment à l'échelle d'un large territoire.

La démarche méthodologique repose, pour les principales techniques géothermiques, sur la mise au point et la validation de modèles simplifiés qui ont pour finalité de produire des « chroniques de fonctionnement et/ou de consommation ». Elles sont établies à une échelle de temps mensuelle, suffisante pour pouvoir apprécier la saisonnalité car, contrairement aux énergies fossiles ou au bois-énergie par exemple, les techniques géothermiques ont une sensibilité pouvant être marquée vis-à-vis de phénomènes saisonniers (température du sol, tarification de l'électricité...). Les principales avancées de cette étude seront alors :

- la mise au point de descriptions simplifiées qui permettent de manipuler, à l'échelle macroscopique, *les effets* des techniques géothermiques sans pour autant avoir à les maîtriser ni à décrire le détail des contextes élémentaires ;
- de plus, les modèles sont, pour partie, adimensionnés vis-à-vis de la taille du bâti et leur paramétrage autorise très simplement l'exploration des sensibilités ;
- la prise en considération de la *saisonnalité*, ce que n'autorisent pas les démarches au pas de temps annuel tel que pratiqué actuellement ;
- l'introduction d'une « *solution géothermique de référence* » (technique sur nappe aquifère) qui permet, notamment, d'éviter les effets économiques liés à la machinerie thermodynamique lors d'une inter-comparaison.

De plus, cette solution de référence est préférable au gaz (usuellement pris en référence) qui ne traite que le volet « chaleur » des énergies thermiques alors que le rafraîchissement peut être déterminant avec la géothermie.

Dans la pratique, cette étude est construite comme une trousse à outils mise au service des analyses macro-économiques. Les modèles simplifiés produisent des résultats conçus pour pouvoir alimenter un processus d'analyse en coût global. Ainsi, l'exploitation des modèles simplifiés proposés, en les complétant par des modules économiques à concevoir sur le même principe, par exemple relatifs à la maintenance ou à la fin de vie, devrait constituer une suite logique à la présente étude.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

L'étude a conduit au développement et à la validation de modèles simplifiés qui autorisent la **manipulation des effets des techniques géothermiques**, surtout pour les effets qui ont une incidence sensible à l'échelle macroéconomique. Ces modèles simplifiés ont été répartis en deux classes.

- **Modélisation des dispositifs géothermiques**

Les modèles simplifiés développés dans cette classe ont pour finalité de décrire, globalement de manière adimensionnée, les comportements des systèmes géothermiques.

Les données d'entrée principales sont les conditions géoclimatiques locales, le profil énergétique du bâtiment selon la RT (en kWh/m².an pour les usages de chauffage, ECS, climatisation et/ou rafraîchissement direct), et une description sommaire du dispositif géothermique (essentiellement : extension verticale et profondeur de l'ouvrage et classe de dimensionnement).

Les données de sortie principales sont des chroniques mensuelles sur dix cycles annuels (ou plus) de temps de fonctionnement, d'énergie électrique consommée et d'énergie géothermique échangée (en kWh/m².an), chaque chronique étant restituée pour chacun des quatre usages.

Important : un **modèle unique** décrit toutes les techniques de géothermie TBE, lesquelles sont systématiquement rapportées à une technique de géothermie sur aquifère (réaliste ou purement virtuelle selon les localisations).

- **Modèles d'exploitation/utilisation**

Les modèles simplifiés développés dans cette classe ont pour finalité de décrire le fonctionnement des dispositifs géothermiques ci-avant et, plus précisément, de produire des dépenses électriques d'exploitation en lien avec le dimensionnement (et donc l'investissement).

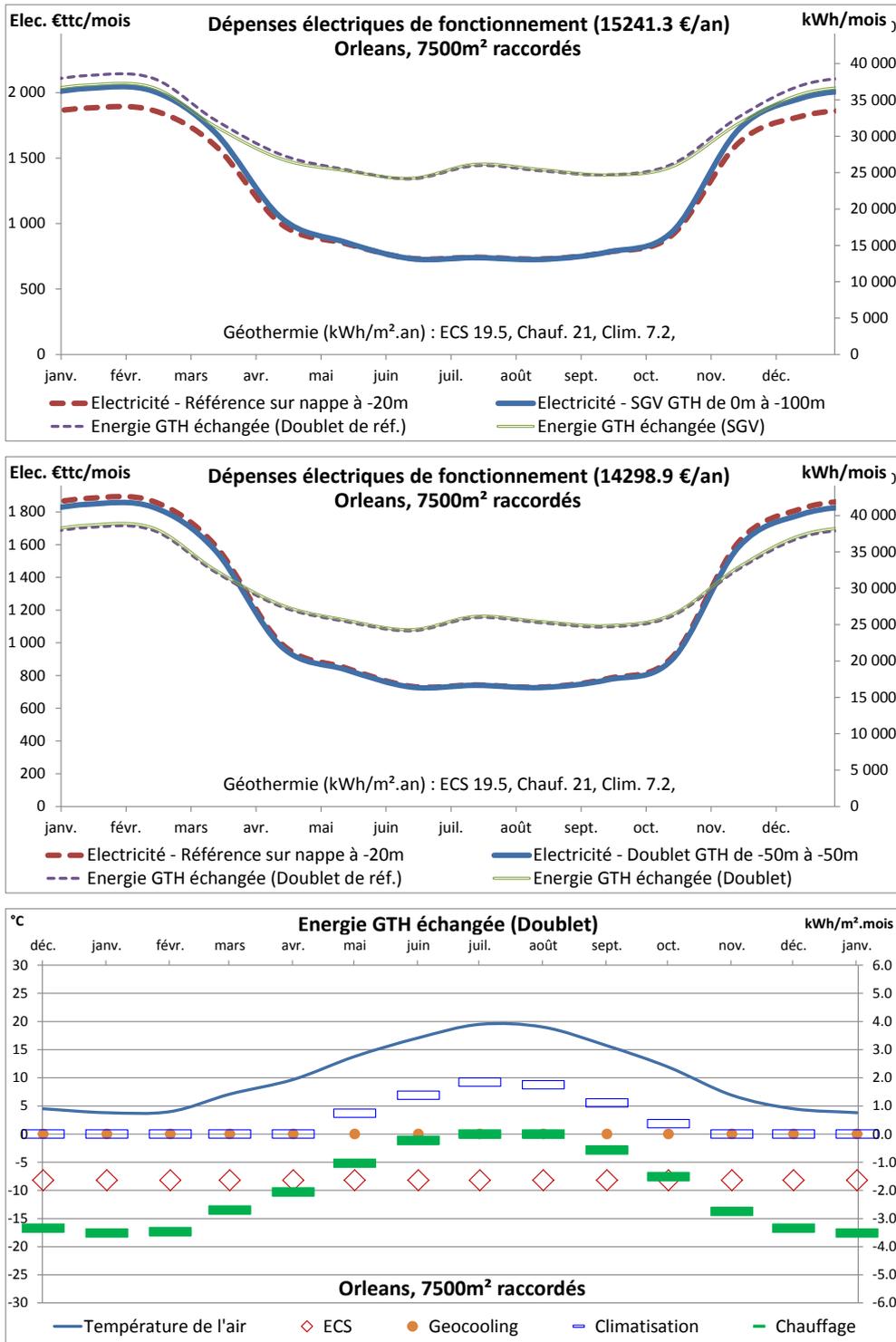


Figure 1 : Exemple de chroniques comparatives des coûts électriques de fonctionnement pour des sondes géothermiques (SGV) et un doublet à 50 m de profondeur et pour la solution géothermique de référence – Cas du bâti de 7 500 m² en climat orléanais.

Les données d'entrée principales sont, outre la propagation de la description du dispositif géothermique ci-avant, une dimension du bâti raccordé (en m²) et les orientations tarifaires.

Important : si un **modèle unique** décrit tous les modes d'utilisation, des « curseurs » permettent de tester la sensibilité aux différents paramètres du dimensionnement et de l'exploitation.

La trousse à outils, qui a été mise au point, décrit bien l'ensemble des paramètres sensibles en géothermie très basse énergie, cela en offrant une bonne visibilité sur les causes et les effets.

De plus, l'étude est parvenue à une simplification très avancée propice à la transposition à l'échelle macroéconomique, les inconnues à ce jour demeurant les retours sur opérations réelles pour décrire la maintenance et la fin de vie (valeur à l'échéance ou valeur résiduelle).

PERSPECTIVES

L'étude a abouti au développement de modèles simplifiés qui constituent une trousse à outils efficace pour décrire les techniques géothermiques de très basse énergie (TBE), les effets sensibles du point de vue économique, notamment sur les coûts de fonctionnement (exploitation), étant bien restitués. En particulier, ces modèles simplifiés répercutent la saisonnalité des performances énergétiques et la sensibilité aux modes de tarification de l'énergie électrique.

L'effort de simplification a porté sur la mise au point d'un modèle unique apte à prendre en charge indifféremment toutes les techniques TBE et, simultanément, une référence basée sur une géothermie TBE sur nappe aquifère, cette solution de facilitant l'inter-comparaison ou l'analyse économique. Par extension, une certaine forme de géothermie BE est, de fait, prise en charge par ces modèles simplifiés mais elle ne représentait pas une priorité puisqu'on a surtout cherché dans cette étude à bien retranscrire la composante Frais/Froid qui pourrait être décisive avec les bâtis BBC (RT-2012) et passifs (RT-2020).

Si l'étude était restreinte à la description des comportements technico-économiques des parties « géothermie » du système thermique du bâtiment, elle reste néanmoins compatible avec une déclinaison qui intégrerait, par exemple, la prise en considération d'un réseau de distribution d'énergies thermiques (pas uniquement de chaleur) raccordé à des sources géothermiques.

Il s'agira là d'une question délicate car, probablement, faudra-t-il être en mesure de décrire la valeur économique de l'énergie qui circule dans le réseau. Or, la diversité des réseaux que l'on peut envisager, surtout en géothermie TBE, n'a pas encore fait l'objet d'un travail suffisant qui permette d'envisager une approche simplifiée mais pertinente de la description (nombre de tubes, PAC centralisée et/ou PAC décentralisées, ECS, valorisation des eaux grises, hybridation des sources thermiques...). Toutefois, à titre prospectif, un premier pas a été fait dans le cadre de

cette étude en examinant la structure du mix énergétique qui compose « l'énergie » qui circule dans un réseau de chaleur raccordé à de la géothermie basse énergie (BE). Cependant, l'analyse d'autres contextes doit pouvoir être conduite avant de statuer sur l'approche qui décrira le mieux le positionnement de la géothermie BE et/ou TBE raccordée à un réseau de chaud, de tiède, de frais et/ou de froid.

Une autre déclinaison éventuelle de cette étude pourrait être de décrire la sensibilité économique au stockage périodique d'énergie thermique (chaud ou frais) qui peut se coupler à la géothermie TBE ou BE. Là encore, la diversité des solutions imaginées est grande et l'effort de simplification ne paraît pas encore évident à conduire. Néanmoins, la littérature semble commencer à livrer quelques retours qui pourraient être analysés avec pertinence, en Allemagne et au Canada notamment, avec dans pratiquement tous les cas avec une composante solaire.

Mais, avant d'étendre l'étude vers les techniques de géothermie BE, de réseaux et de stockage périodique, la prochaine étape qui doit suivre immédiatement les travaux de la présente étude sera de réaliser la transposition à l'échelle macroéconomique. Il s'agira de dire les règles d'addition/agrégation qui doivent être respectées pour propager à l'échelle d'un territoire les comportements locaux produits à l'aide des modèles simplifiés, notamment en scénarisant le déploiement des solutions et l'évolution des marchés de la géothermie et des énergies.

Sommaire

1. Introduction	17
1.1. QUESTION TRAITÉE PAR L'ÉTUDE.....	17
1.2. PHILOSOPHIE DE L'ÉTUDE	17
1.3. DIFFICULTÉS RENCONTRÉES ET PROPOSITIONS.....	18
1.4. TECHNIQUES GÉOTHERMIQUES PRISES EN CONSIDÉRATION	19
1.5. EXAMEN DE LA PROBLÉMATIQUE	20
1.6. ORIENTATIONS STRATÉGIQUES.....	21
1.7. LIVRABLES DE L'ÉTUDE	22
1.8. DOMAINE DE VALIDITÉ DE L'ÉTUDE ET LIMITATIONS.....	23
1.9. ÉTAPES DE L'ÉTUDE	24
2. Représentation du système géothermique	25
2.1. PRINCIPE GÉNÉRAL	25
2.2. RÉPARTITION EN MODÈLES SIMPLIFIÉS.....	26
2.3. ARCHITECTURE SIMPLIFIÉE DES MODÈLES	27
3. Modèles de dispositifs géothermiques.....	29
3.1. MODÈLE GÉOCLIMATIQUE SIMPLIFIÉ.....	30
3.1.1. Source de données.....	30
3.1.2. Correction d'altitude et pré-calcul des DJU	31
3.1.3. Calcul des profils de température du sous-sol.....	33
3.2. MODÈLES SIMPLIFIÉS DE PROFIL THERMIQUE DU BÂTIMENT.....	37
3.2.1. Démarche	37
3.2.2. Expression des grandeurs usuelles.....	38
3.2.3. Expression des valeurs par défaut pour le calcul adimensionné	39
3.2.4. Sensibilité des valeurs par défaut à la zone climatique	40
3.2.5. Chroniques mensuelles de demande d'énergies thermiques	41
3.3. MODÈLES SIMPLIFIÉS DES SOURCES GÉOTHERMIQUES (TEMPÉRATURE DES SOURCES)	42

3.3.1.	Modèles simplifié de source géothermique sensible à la température extérieure <i>et</i> aux usages (Cas 1)	43
3.3.2.	Modèles simplifiés de source géothermique majoritairement sensible aux usages (Cas 2)	49
3.3.3.	Modèles simplifiés de source géothermique à température constante (Cas 3).....	54
3.4.	MODÈLE DE MACHINERIE THERMODYNAMIQUE.....	58
3.4.1.	Modèle simplifié de COP en mode chauffage.....	59
3.4.2.	Modèle simplifié de COP en mode climatisation.....	61
3.4.3.	Modèle simplifié de COP en mode rafraîchissement direct	62
3.4.4.	Modèle simplifié de COP en géothermie BE.....	62
3.5.	MODÈLE DE CHRONIQUES DE CONSOMMATION ÉLECTRIQUE SPÉCIFIQUE ET DE TEMPS DE FONCTIONNEMENT	63
3.5.1.	Modèle simplifié de consommation électrique spécifique	64
3.5.2.	Modèle simplifié de temps de fonctionnement.....	66
3.5.3.	Modèle de circulation du fluide géothermique	77
3.6.	UTILITÉ DES MODÈLES DE DISPOSITIFS GÉOTHERMIQUES	78
4.	Modèles de coûts d'exploitation des systèmes géothermiques TBE	79
4.1.	MODÉLISATION DE L'INVESTISSEMENT	81
4.1.1.	Modèle simplifié d'investissement pour les ouvrages souterrains des techniques sur nappe aquifère	83
4.1.2.	Modèle simplifié d'investissement pour les SGV (cas 2).....	87
4.1.3.	Modèle simplifié d'investissement pour les échangeurs de subsurface (cas 1).....	90
4.1.4.	Modèle simplifié d'hybridation d'énergies et d'appoint.....	91
4.1.5.	Modèle simplifié d'investissement pour les machineries thermodynamiques.....	93
4.1.6.	Modèle simplifié d'investissement pour les coûts des auxiliaires	98
4.1.7.	Modèle de dimensionnement des pompes de circulation	99
4.2.	MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT	103
4.2.1.	Modèle de tarification des charges (électricité).....	104
4.2.2.	Modèle de tarification des recettes (énergie thermique)	108
4.3.	COÛTS DIFFÉRÉS	109
4.4.	TRANSPOSITION EN GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE	110
5.	Vers une représentation simplifiée de la géothermie BE (Basse Énergie).....	111
5.1.	SPÉCIFICITÉS DES TECHNIQUES GÉOTHERMIQUES BE.....	111

5.2. VALEUR DE L'ÉNERGIE CIRCULANT DANS LE RÉSEAU.....	112
5.3. TARIFICATION DE L'ÉLECTRICITÉ EN GÉOTHERMIE BE.....	118
5.4. PERSPECTIVES.....	119
6. Résultats pour le géothermie TBE : validation des modèles simplifiés.....	121
7. Vers une transposition à l'échelle macro-économique - Esquisse de cahier des charges	141
7.1. PROBLÉMATIQUE	141
7.1.1. Avant-propos	141
7.1.2. Questionnements.....	141
7.1.3. Risques (économiques) et VaR (Valeur à Risque)	143
7.2. DÉMARCHE EN COÛT GLOBAL (OU COÛT DU CYCLE DE VIE - CCV)	145
7.2.1. Démarche en Temps de Retour (sur investissement).....	148
7.3. PRINCIPE DE SUPERPOSITION / AGRÉGATION.....	149
8. Conclusions	151

Liste des figures

Figure 1 : Exemple de chroniques comparatives des coûts électriques de fonctionnement pour des sondes géothermiques (SGV) et un doublet à 50 m de profondeur et pour la solution géothermique de référence – Cas du bâti de 7 500 m ² en climat orléanais.	6
Figure 2 : Organigramme des techniques géothermiques BE et TBE avec mise en valeur des aptitudes au stockage périodique de l'énergie thermique.	19
Figure 3 : Représentation schématique du système géothermique.	25
Figure 4 : Représentation schématique des liaisons logiques entre modèles simplifiés.	28
Figure 5 : Exemple de recalcul des températures pour la station de Bourg-en-Bresse.	31
Figure 6 : Exemple simulé d'une chronique de la température du sous-sol non perturbé sur une année pour quatre profondeurs (gradient géothermique 3 °C/100 m).	34
Figure 7 : Exemple de résultat du traitement des données géo-climatiques pour calculer les profils thermiques saisonniers - Cas d'un climat froid : Bourg-en-Bresse.	35
Figure 8 : Exemple de résultat du traitement des données géoclimatiques pour calculer les profils thermiques saisonniers - Cas d'un climat chaud : Ajaccio.	36
Figure 9 : Huit zones géographiques pour le bâtiment neuf (40 à 65 kWh(ep)/m ² /an). Cas du résidentiel et de l'immobilier de bureau (sans refroidissement).....	40

Figure 10 :	Exemple de température saisonnière de corbeilles géothermiques normalement dimensionnées pour deux modes d'usage estival - Cas d'un climat froid : Bourg-en-Bresse.....	47
Figure 11 :	Exemple de température saisonnière de corbeilles géothermiques normalement dimensionnées pour deux natures des usages estivaux - Cas d'un climat chaud : Ajaccio.....	48
Figure 12 :	Exemple de comparaison des modes climatisation ou rafraîchissement en présence d'ECS pour des corbeilles géothermiques - Cas d'un climat chaud : Ajaccio.....	49
Figure 13 :	Exemple de température saisonnière d'une sonde géothermique normalement dimensionnée pour deux modes de refroidissement - Cas d'un climat froid : Bourg-en-Bresse.....	52
Figure 14 :	Exemple de température saisonnière d'une sonde géothermique normalement dimensionnée pour deux modes de refroidissement - Cas d'un climat chaud : Ajaccio.....	53
Figure 15 :	Exemple de comparaison des modes climatisation ou rafraîchissement en présence d'ECS pour des sondes géothermiques - Cas d'un climat chaud : Ajaccio.....	54
Figure 16 :	Exemple de température d'une nappe aquifère sollicitée pour du chauffage et du rafraîchissement - Cas d'un climat froid : ville de Bourg-en-Bresse (nappe des cailloutis).....	56
Figure 17 :	Allure des profils thermiques - Cas d'un climat froid : Bourg-en-Bresse.....	57
Figure 18 :	Exemple de dérive thermique d'un aquifère sollicité par des climatisations et de l'atténuation par du prélèvement pour de d'ECS - Cas d'un secteur urbanisé : Lyon.....	58
Figure 19 :	Évolution du COP _{chaud} fonction de la température de la source froide. Cas d'une évolution à raison de 3 % par °C (COP nominal donné pour 12 °C).	60
Figure 20 :	Allures des évolutions du COP _{froid} fonction de la température de la source géothermique - Cas d'une évolution à raison de 3 % par °C.....	61
Figure 21 :	Chroniques de températures pour les mêmes conditions que les tableaux en page précédente avec géocooling - Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.....	69
Figure 22 :	Chroniques de températures avec un surdimensionnement des corbeilles géothermiques et géocooling - Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.....	69
Figure 23 :	Chroniques pour la solution géothermique de référence sur aquifère. Temps de fonctionnement (en haut) et Consommations électriques spécifiques (en bas). Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.....	71
Figure 24 :	Chroniques de temps de fonctionnement pour des corbeilles géothermiques normalement dimensionnées (en haut) et surdimensionnées (en bas). Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.....	72
Figure 25 :	Chroniques de consommations électriques spécifiques pour des corbeilles géothermiques normalement dimensionnées (en haut) et surdimensionnées (en bas). Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.....	74
Figure 26 :	Illustration du poids de l'ECS sur les chroniques de fonctionnement dans le cas du bâti BBC – Exemple du climat froid : Bourg-en-Bresse.....	74

Figure 27 :	Illustration des chroniques spécifiques de fonctionnement dans le cas du bâti BBC-Rénovation – Exemple du climat froid : Bourg-en-Bresse.....	75
Figure 28 :	Illustration des conditions du fonctionnement dans le cas du bâti BBC-Rénovation (20 000 m ²) – Exemple du climat froid : Bourg-en-Bresse.....	76
Figure 29 :	Chroniques de températures sans géocooling – Climat froid : Bourg-en-Bresse.....	76
Figure 30 :	Logigramme illustrant l'enchaînement des modèles de coûts d'exploitation.	80
Figure 31 :	Allures des courbes constituant la structure de coûts d'investissement. Cas des doublets sur aquifère (valeurs constatée pour du bâti non BBC).....	83
Figure 32 :	Coûts indicatifs d'ouvrages géothermiques – Cas des doublets sur aquifère (valeurs constatées pour du bâti non BBC).....	84
Figure 33 :	Détail des coûts indicatifs d'investissement des doublets de faible puissance (valeurs constatée pour du bâti non BBC).	85
Figure 34 :	Coûts typiques pour les sondes géothermiques et les champs de sondes.	89
Figure 35 :	Allures des coûts spécifiques des machines thermodynamiques (prix public) fonctions de la puissance installée (source COSTIC, 2007).	94
Figure 36 :	Modèle de coût spécifique des pompes à chaleur fonction de leur puissance.	95
Figure 37 :	Validation du modèle de coût spécifique des pompes à chaleur pour les petites puissances (sources Costic et CIAT).....	96
Figure 38 :	Coûts spécifiques des pompes à chaleur retenus pour le modèle simplifié.	96
Figure 39 :	Lien entre le coût spécifique des pompes à chaleur et la surface raccordée.	97
Figure 40 :	Impact de la puissance de circulation sur l'efficacité énergétique du dispositif. ...	101
Figure 41 :	Analyse du tarif bleu domestique (année 2011).....	105
Figure 42 :	Proposition de linéarisation de la part fixe du tarif bleu (année 2011).	106
Figure 43 :	Exemple de valeur de l'énergie du réseau (en été) selon la température extérieure et de valeur de l'énergie sur le réseau en fonction de la semaine de l'année (projections de 2015 à 2045 avec une inflation de 2 % par an).	112
Figure 44 :	Bouquet énergétique d'un réseau dimensionné pour la géothermie BE en été....	113
Figure 45 :	Bouquet énergétique d'un réseau avec géothermie BE sous-dimensionnée en été.	114
Figure 46 :	Allure typique d'une courbe monotone d'un réseau de chaleur dimensionné pour la géothermie.....	115
Figure 47 :	Allures des courbes de chauffe pour différents réseaux de chaleur (avec ECS).	116
Figure 48 :	Allure de la courbe de température de retour d'un réseau géothermique.	117
Figure 49 :	Allure de la courbe de débit géothermique fonction de la température extérieure.....	117
Figure 50 :	Parts variable (gauche) et fixe (droite), pour une puissance souscrite de 600 kW pour les différents abonnements du tarif vert A5.	118
Figure 51 :	Chroniques de températures géoclimatiques et des DJU.....	122

Figure 52 : Profil thermique du sol.	123
Figure 53 : Températures moyennes du sol imposées par le modèle au voisinage des sondes. Sondes indépendantes pour le panneau du haut - Champ de sonde pour le panneau du milieu - Illustration d'une autre possibilité du modèle pour le panneau du bas.	139
Figure 54 : Éléments du Coût Global et du Coût du Cycle de Vie (H. Joumni, ISO/DIS 15686-5 ISO).	145
Figure 55 : Puissances thermiques de soutirage en fonction de la conductibilité thermique du terrain, ECS = eau chaude sanitaire (selon B. Sanner, 1999).	169

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemple de données de la station climatique de Bourg-en-Bresse (source : NASA/RetScreen).	30
Tableau 2 : Estimation des erreurs de recalcul des DJU. Cas des stations de Bourg-en-Bresse (climat froid) et d'Ajaccio (climat chaud).	32
Tableau 3 : Paramètres saisis (en jaune) et calculés (en bleu) nécessaires au calcul de la température du sous-sol non-perturbé.	34
Tableau 4 : Indication de consommations d'énergies selon la classe du bâtiment pour le gaz à condensation, le réseau de chaleur et les PAC géothermiques (trois valeurs du COP).	38
Tableau 5 : Valeurs indicatives des demandes d'énergie thermique selon la classe du bâtiment.	39
Tableau 6 : Valeurs indicatives pour le calcul des demandes en ECS.	39
Tableau 7 : Chroniques mensuelles pour le BBC neuf - Cas d'un climat chaud : Ajaccio.	41
Tableau 8 : Description simplifiée de l'ouvrage géothermique.	42
Tableau 9 : Exemple de valeurs cibles des températures en fin de saison pour le dimensionnement des échangeurs géothermiques souterrains.	43
Tableau 10 : Exemple de valeurs cibles des températures en fin de saison pour le dimensionnement des échangeurs géothermiques souterrains.	51
Tableau 11 : Source froide - Paramétrage de l'approximation des courbes du COP _{chaud}	60
Tableau 12 : Ordres de grandeur des COP chaud et froid.	62
Tableau 13 : Données d'entrée relatives aux sources géothermiques pour le calcul des temps de fonctionnement - Cas du climat chaud : Ajaccio.	64
Tableau 14 : Profil thermique du bâtiment (en énergie utile) pour le calcul des temps de fonctionnement - Cas du bâtiment BBC (2 personnes) en climat chaud : Ajaccio.	64

Tableau 15 : Exemple de chroniques énergétiques mensuelles adimensionnées et de référence (nappe aquifère à -20 m de profondeur) - Cas du climat chaud : Ajaccio.....	65
Tableau 16 : Exemple de temps de fonctionnements nominaux. Cas d'un bâtiment BBC de 20 000 m ² en climat chaud : Ajaccio.....	66
Tableau 17 : Temps de fonctionnement pour le cas de référence et le cas réel avec deux compresseurs (géothermie de subsurface) - Cas du climat chaud : Ajaccio.....	67
Tableau 18 : Temps de fonctionnement pour le cas de référence et le cas réel avec un compresseur (géothermie de subsurface) - Cas du climat chaud : Ajaccio.....	68
Tableau 19 : Temps de fonctionnement pour le cas de référence et le cas réel (géothermie de subsurface) - Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.....	68
Tableau 20 : Temps de fonctionnement pour le cas de référence et le cas réel avec corbeilles sur-dimensionnées - Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.....	70
Tableau 21 : Paramétrage des investissements cas de la solution de référence sur aquifère.....	84
Tableau 22 : Coefficient de correction de surface selon la classe du bâtiment.....	86
Tableau 23 : Paramétrage des investissements, cas de la solution de référence sur aquifère.....	86
Tableau 24 : Paramétrage de l'investissement pour les doublets géothermiques.....	86
Tableau 25 : Paramétrage du dimensionnement et des coûts des SGV.....	87
Tableau 26 : Paramétrage de l'investissement pour des SGV.....	89
Tableau 27 : Paramétrage de l'investissement pour des corbeilles géothermiques.....	90
Tableau 28 : Paramétrage de l'investissement pour des échangeurs géothermiques horizontaux.....	90
Tableau 29 : Exemple de table de référence pour la ventilation des échanges géothermiques. Cas de la station climatique d'Ajaccio pour du bâti BBC neuf.....	92
Tableau 30 : Ordres de grandeur de l'investissement pour le pompage, cas de la géothermie sur aquifère (BE et TBE).....	102
Tableau 31 : Ordre de grandeur des investissements pour le pompage. Cas de la géothermie TBE sur échangeurs.....	103
Tableau 32 : Synthèse des tarifs domestiques et professionnels (année 2011).....	107
Tableau 33 : Conditions générales des tests de validation, Orléans, BBC-Rénovation.....	124
Tableau 34 : Résultats économiques, Orléans, 1 000 m ² , BBC-Rénovation – GTH-Horizontale.....	126
Tableau 35 : Résultats économiques, Orléans, 1 000 m ² , BBC-Rénovation – GTH-Compacte.....	127
Tableau 36 : Résultats économiques, Orléans, 1 000 m ² , BBC-Rénovation – GTH sur SVG.....	128

Tableau 37 : Résultats économiques, Orléans, 1 000 m ² , BBC-Rénovation – GTH sur Nappe.	129
Tableau 38 : Résultats économiques, Orléans, 1 000 m ² – Tarif Bleu Base.	130
Tableau 39 : Résultats économiques, Orléans, 1 000 m ² , Tarif Bleu Pro.	131
Tableau 40 : Résultats économiques, Orléans, 7 500 m ² , Tarif Bleu-HC domestique.	133
Tableau 41 : Résultats économiques, Orléans, 7 500 m ² , Tarif Bleu-HC Pro.	134
Tableau 42 : Résultats économiques, Orléans, 7 500 m ² , Tarif jaune MU.	135
Tableau 43 : Résultats économiques, Orléans, 7 500 m ² , SGV indépendantes.	136
Tableau 44 : Résultats économiques, Orléans, 7 500 m ² , Champ de sondes.	137
Tableau 45 : Résultats économiques, Orléans, 7 500 m ² , Sondes indépendantes.	138
Tableau 46 : Valeurs empiriques pour le « dimensionnement sommaire » d'une installation de sonde géothermique dans différentes roches (source CREGE, Suisse).	169
Tableau 47 : Paramètres des sols selon les directives SIA D025 et DO136 (inspirées de la VDI Richlinien 4640, part 2, 2001).	170
Tableau 48 : Paramètres thermiques des matériaux (compilation).	170

Liste des annexes

Annexe 1 : Définitions des termes économiques	153
Annexe 2 : Glossaire	157
Annexe 3 : Stations géo-climatiques modélisées	163
Annexe 4 : Grandeurs indicatives pour les sols	167

1. Introduction

1.1. QUESTION TRAITÉE PAR L'ÉTUDE

La question abordée dans cette étude est celle de la boîte à outils économique qu'il faudra manipuler pour apprécier la place de la filière géothermique dans les perspectives énergétiques françaises et européennes à moyen terme des 3 x 20 (horizon 2020) et à plus long terme du Facteur 4 (horizon 2050).

Cette étude, en tant que première étape d'une démarche contributive à l'analyse macroéconomique, propose une méthode simplifiée de description des différentes techniques géothermiques de très basse énergie (TBE) et de basse énergie (BE), en excluant donc les techniques ayant pour finalité la production d'électricité.

L'étape qui suivra cette étude aura à formaliser et valider la transposition vers les analyses macroéconomiques à l'échelle d'un territoire. Dans cette perspective, la présente étude a validé les modèles simplifiés qui structurent les éléments d'analyse économique en rendant cohérentes les descriptions représentatives de chacune des différentes techniques géothermiques disponibles ou attendues.

1.2. PHILOSOPHIE DE L'ÉTUDE

Dans une démarche d'accompagnement des filières de géothermie Très Basse Énergie (TBE) et, dans une moindre mesure Basse Énergie (BE), collecter des informations et pouvoir les interpréter en termes économiques apparaît comme une demande forte face à l'hétérogénéité des quelques informations disponibles.

En effet, la diversité des techniques concernées et des modes d'utilisation / exploitation est telle qu'à ce jour, il ne semble pas avoir été testé, et encore moins validé, de démarche méthodologique à finalité macroéconomique, une des raisons pouvant revenir à la difficulté rencontrée pour fiabiliser les données.

L'enjeu de la présente étude est de proposer et de discuter une méthodologie consistant à formuler des modèles simplifiés qui reproduisent les comportements dans leur contexte local, lesquels modèles pourront alors être agrégés à une échelle macroéconomique pour répondre aux questionnements de l'analyste.

L'idée de l'étude est donc, plutôt que de chercher à effectuer un traitement statistique ou de réconciliation des données hétérogènes, de décrire chaque situation élémentaire avec le même outil afin de générer implicitement la cohérence des données à analyser.

L'approche méthodologique de la présente étude a veillé à rester compatible avec les démarches en « coût global » (Coût du Cycle de Vie – CCV). Toutefois, il a été recherché le moyen de s'affranchir du détail des investissements, du fonctionnement (exploitation) et du renouvellement, la fin de vie restant délicate à formaliser en géothermie. De même, il a fallu parvenir à gommer les biais liés à la grande diversité

des contextes d'opérations géothermiques. Autrement, une vraie difficulté subsisterait pour rendre homogènes et comparables les informations collectées, en admettant qu'elles soient en nombre représentatif.

La première interrogation à laquelle a été soumise la présente étude a porté sur la finalité prioritaire des analyses macroéconomiques afin d'orienter la formalisation des instruments d'analyse, ci-après dénommés modèles simplifiés.

Le livrable de cette étude propose et valide une trousse à outils composée de modèles simplifiés, certes moins précis que des descriptions détaillées d'opérations élémentaires mais néanmoins adaptés à la retranscription des effets physiques et économiques réels, notamment pour ce qui est lié au pas de temps mensuel qui permet d'exprimer les différences de comportement entre techniques géothermiques.

De plus, une technique géothermique a été introduite comme technique de référence (géothermie sur nappe aquifère) au lieu de la traditionnelle technique de type « gaz à condensation ». Outre la justification physique, ce choix peut éviter d'avoir à prendre en compte le détail des équipements thermiques du bâti qui, étant identiques entre les solutions géothermiques, n'interviennent pas dans la différenciation.

En définitive, en formulant ces modèles simplifiés qui facilitent la comparaison entre les diverses situations élémentaires (TBE en priorité et BE dans une moindre mesure), le travail décrit dans le présent document valide une première étape dans le cheminement vers l'analyse macroéconomique en coût global appliqué à l'accompagnement du déploiement des techniques géothermiques.

1.3. DIFFICULTÉS RENCONTRÉES ET PROPOSITIONS

L'étude s'intéresse à deux familles de technologies géothermiques : les techniques de Très Basse Énergie (TBE) et, dans une moindre mesure, de Basse Énergie (BE).

- Pour la géothermie TBE, il est proposé de rapporter chaque opération élémentaire à une technique de référence apte à fournir l'énergie thermique pour l'ECS et pour le confort thermique (chauffage hivernal **et** rafraîchissement estival). De ce fait, la solution de référence est naturellement une solution comportant une composante géothermique sur nappe aquifère (source à température constante). La fluctuation de la demande est rapportée à la température extérieure pour simplifier la transposition à l'échelle macroéconomique.

La difficulté identifiée par la présente étude a porté, non seulement sur les descriptions simplifiées du système thermique, mais également sur la formalisation des indicateurs économiques. Par exemple, le temps de retour pour une installation individuelle est une notion délicate à manier sans recette.

- Pour la géothermie BE, il y aura des difficultés à s'affranchir des coûts du réseau de chaleur spécifiques à la géothermie sauf à ne considérer que les coûts des énergies (fonctionnement) vis-à-vis des solutions concurrentes : gaz ou bouquet énergétique. Or, disposer des coûts d'investissement et de maintenance est délicat à ce jour. Une autre difficulté identifiée par la présente étude porte alors sur l'attribution d'une

valeur économique fonction de la saison afin d'intégrer les structures saisonnières des coûts des énergies.

Comme pour la géothermie TBE, la demande en énergie thermique est à rapporter à la température extérieure, ce qui simplifie la transposition à l'échelle macro-économique (territoire, région...). Pour les réseaux de chaleur, on note une spécificité portant sur le foisonnement qui est intégré de fait.

1.4. TECHNIQUES GÉOTHERMIQUES PRISES EN CONSIDÉRATION

Les solutions géothermiques qui ont pour première finalité la production d'énergie électrique ou mécanique sont incompatibles avec les modèles de l'étude.

Les fondations géothermiques, sont exclues du périmètre de l'étude. En effet, pour cette technique, la régénération thermique de la ressource enterrée est, en grande partie, assurée par le procédé selon des règles assez peu liées aux phénomènes naturels, lesquels sont au cœur des modèles de la présente étude.

Dans cette étude, seules sont traitées les techniques géothermiques qui ont pour finalité la fourniture d'énergie thermique, que le niveau de la température de l'énergie délivrée la destine à du chauffage ou à du rafraîchissement.

Il est proposé de répartir les techniques géothermiques comme représenté par le diagramme ci-dessous qui positionne les techniques BE et TBE.

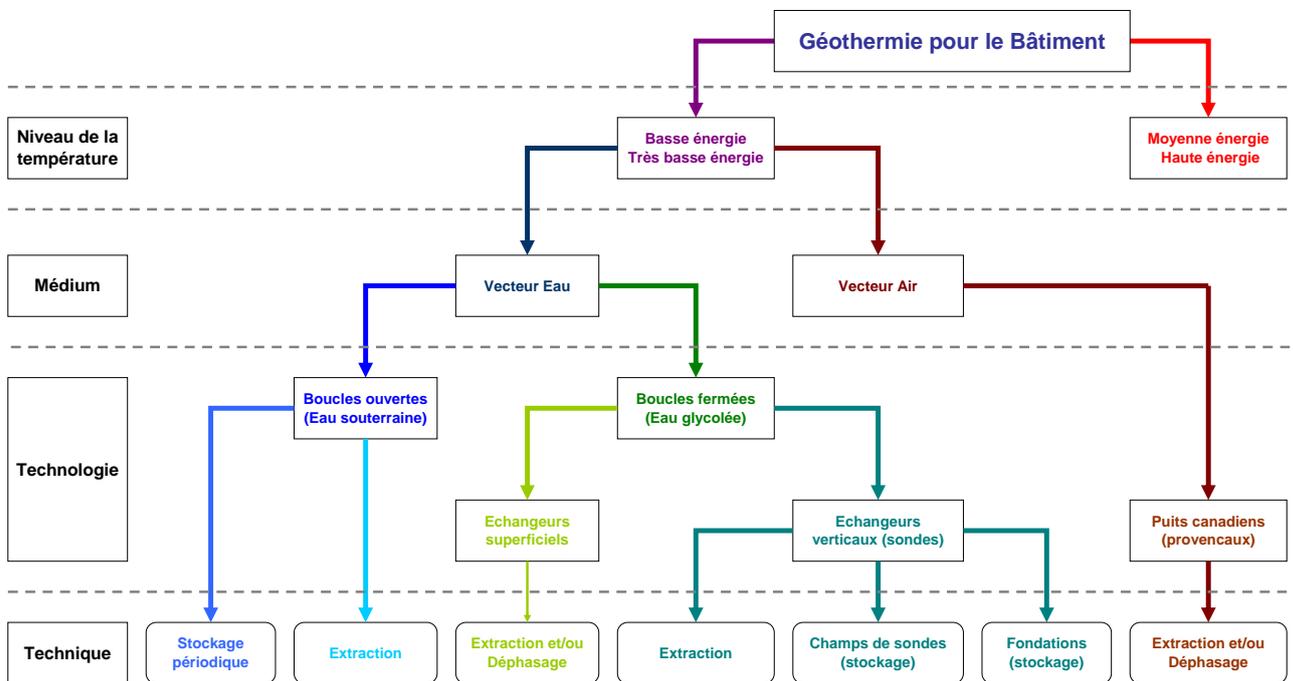


Figure 2 : Organigramme des techniques géothermiques BE et TBE avec mise en valeur des aptitudes au stockage périodique de l'énergie thermique.

Important. Pour chaque technique géothermique, le schéma ci-avant mentionne l'éventuelle aptitude à la maîtrise de la régénération de la charge thermique des terrains ou aquifères (stockage ou déphasage thermique), cette aptitude pouvant impacter favorablement la performance énergétique et donc la performance économique et environnementale. La présente étude ne valorise cette aptitude qu'au travers des usages de rafraîchissement (géocooling) ou de climatisation.

1.5. EXAMEN DE LA PROBLÉMATIQUE

La variété des techniques géothermiques, ayant pour vocation la fourniture d'énergie thermique, est amplifiée par la diversité des applications imaginées par les ingénieries. Cette large distribution des solutions rend donc particulièrement délicate l'analyse des retours sur opérations qui, de fait, manquent de cohérence entre eux si l'objectif est une description macroéconomique.

À noter que ce constat reste valide pour les installations chez les particuliers (donc sans intervention d'une ingénierie) tant la diversité des configurations est grande, ne serait-ce que, par exemple, sur la façon de gérer l'appoint thermique, ce qui renvoie aux modes de dimensionnement.

La présente étude recherche donc en priorité l'expression de descriptions simplifiées de chaque technique mais aussi une cohérence entre tous les modèles pour autoriser la transposition à une échelle macroéconomique.

Ainsi, à titre d'illustration, l'approche proposée traite les usages (charge thermique) de manière indirecte, par exemple en se rapportant à la température extérieure fonction de la localisation et de l'altitude comme dans la méthode DPE-3CL. De même, les bâtiments ne sont connus que par la surface totale et le profil thermique (demandes annuelles rapportées au m² conformément à la présentation de la RT-2012).

Solution de référence

Dans ce même objectif de simplification, la solution de référence a été recherchée dans le but de pouvoir s'affranchir, autant que faire se peut, des incertitudes liées la machinerie thermique (thermodynamique) implantée dans le bâtiment.

De ce fait, sélectionner la solution de référence parmi les techniques géothermiques s'impose ; cela d'autant plus que la solution gaz (à condensation ou non), souvent prise en référence, est malcommode puisqu'elle ne peut à elle seule servir de référence pour les usages thermiques de climatisation et/ou de rafraîchissement.

Représentativité des modèles simplifiés

Les simplifications introduites ci-avant doivent permettre aux non-spécialistes de manipuler les grandeurs, non pas à des fins techniques, mais à des fins exclusivement d'analyse macroéconomique, c'est-à-dire à des fins d'analyses de sensibilités par exemple pour qualifier la sensibilité aux coûts des énergies primaires (de l'électricité).

Il est donc primordial que ces modèles simplifiés puissent reproduire les effets liés à des particularités qui sont propres aux techniques géothermiques vis-à-vis des autres techniques thermiques, en particulier :

- **Saisonnalité** : du fait de fluctuations possibles de la température de la ressource, certaines techniques géothermiques sont sensibles aux tarifications des énergies, essentiellement l'électricité : heures creuses/pleines, mais aussi périodes préférentielles où avec pénalités. À l'avenir, on peut aussi s'attendre à la montée en puissance de tarifications saisonnières comme celles que l'on peut constater à l'échelle industrielle chez les opérateurs de réseaux de chaleur. De ce fait, les modèles simplifiés reproduisent la saisonnalité.
- **Déphasage/stockage thermique** : la température de la ressource peut, dans une certaine mesure, être pilotée de manière à accumuler de la chaleur (ou de la fraîcheur). Sans aller jusqu'à modéliser un stockage géologique ou on impose la température, les modélisations simplifiées peuvent gérer un décalage thermique vis-à-vis d'un comportement conventionnel pour traduire l'accumulation d'énergie (chaud et/ou froid) en cours de saison. Dans les modèles, outre un rééquilibrage à chaque cycle annuel (même conditions en début de saison que la première année), il est possible d'imposer une dérive thermique progressive dans le temps.

Pertinence des résultats

Pour conduire une analyse en coût global, le principal verrou à lever porte essentiellement sur la représentation des fonctionnements qui doit impérativement être réaliste sans pour autant nécessiter une connaissance détaillée de chaque opération. Sur ce point, il a été constaté qu'il fallait :

- rechercher la reproduction des effets sans nécessairement décrire avec exactitude la réalité physique. Il est alors laissé à l'analyste la liberté de faire varier les degrés de liberté dans des limites compatibles avec l'analyse de sensibilité qu'il conduit ;
- produire des résultats sous la forme de « chroniques saisonnières », le pas de temps « suffisamment » représentatif étant mensuel ;
- manipuler des grandeurs adimensionnées vis-à-vis des équipements de surface, les chroniques de température de la ressource géothermale étant un bon indicateur de la réponse du système géothermique au même titre que la température de l'air (DJU) est un bon indicateur de la chronique de demande du bâti ;
- transposer à l'échelle macroéconomique en superposant les opérations unitaires, chacune restant réaliste pour son dimensionnement *et* pour son fonctionnement.

1.6. ORIENTATIONS STRATÉGIQUES

Pour cette étude, le pas de temps mensuel a été préféré à d'autres pas de temps, hebdomadaire par exemple. Il y a deux raisons à cela :

- l'ensemble des données géoclimatiques consolidées est assez largement disponible au pas de temps mensuel, ce qui n'est pas le cas pour tous les paramètres à d'autres pas de temps ;

- le choix a été fait de travailler avec le tableur EXCEL sans écrire de ligne de code afin de faciliter la prise en main de la trousse à outils par les éventuels utilisateurs. La manipulation de grandes quantités de données pour les pas de temps plus fins aurait pratiquement imposé l'écriture de routines en VBA.

Cette étude constitue la première étape, relativement technique, d'une démarche d'analyse macroéconomique en coût global avec laquelle elle est compatible.

Cette étape a pour vocation essentielle de formaliser *et* de valider les représentations simplifiées, *au pas de temps mensuel*, qui ont pour unique vocation de reproduire les effets « macroscopiques » des techniques géothermiques élémentaires.

1.7. LIVRABLES DE L'ÉTUDE

Important. Les modèles simplifiés élaborés dans le cadre de cette étude relèvent d'une finalité macroéconomique. S'ils permettent de représenter les effets perceptibles à l'échelle d'une opération élémentaire ils ne prétendent en rien reproduire avec précision la réalité physique ni, surtout, constituer un outil de dimensionnement. Les représentations simplifiées ont été réparties en deux grands ensembles :

- description des dispositifs géothermiques : production de profils adimensionnés :
 - modèles géoclimatiques simplifiés,
 - modèles simplifiés de profil thermique des demandes,
 - modèles simplifiés des sources géothermiques très basse énergie (TBE),
 - modèles simplifiés de machinerie géothermique (COP),
 - modèles simplifiés de temps de fonctionnement.

Cet ensemble de modèles simplifiés représentent l'essentiel des apports innovants de la présente étude. Ils constituent une trousse à outils qui permet d'alimenter les analyses économiques en reproduisant les effets des techniques géothermiques sans pour autant avoir à entrer dans les détails de chaque technique.

Les chroniques mensuelles adimensionnées de grandeurs énergétiques (rapportées au m².mois) et de temps de fonctionnement (en heures par mois) pour l'ECS, le chauffage, la climatisation et le rafraîchissement sont réalistes. Elles sont largement paramétrables et autorisent les analyses de sensibilité.

- exploitation des systèmes : production des coûts :
 - modèle simplifiés d'investissements,
 - modèle simplifiés de coûts de fonctionnement.

Ce second ensemble de modèles simplifiés, pour continuer à être développé, va nécessiter des retours collectés en situations réelles pour, par exemple, un meilleur renseignement des structures de coûts des investissements ou de projection des coûts des énergies.

D'ores et déjà, il est possible de comparer une technique géothermique très basse énergie (TBE) avec une situation géothermique de référence sur nappe aquifère. Il peut s'agir également de regarder l'incidence de la qualité du dimensionnement des échangeurs géothermiques vis-à-vis des charges de fonctionnement ; cela pour différentes classes thermiques de bâtiments.

1.8. DOMAINE DE VALIDITÉ DE L'ÉTUDE ET LIMITATIONS

Validité des résultats

Du point de vue énergétique, ce qui caractérise la ressource géothermique vis-à-vis des autres EnR, c'est la disponibilité et la prévisibilité. Il en découle un intérêt économique qui, aujourd'hui, n'est apprécié qu'à long terme et de manière qualitative.

Si les modèles simplifiés ont été développés pour pouvoir conduire de telles analyses, en aucun cas les résultats et exemples qui illustrent la présente étude ne prétendent constituer une analyse économique. De même, si des hypothèses indicatives sont avancées sur les coûts des énergies pour examiner la validité des modèles et en observer la sensibilité, ces hypothèses, même réalistes, restent indicatives.

Du point de vue économique, ce qui caractérise la géothermie vis-à-vis des autres énergies, c'est l'investissement, les solutions géothermiques étant considérées comme « capitalistiques » vis-à-vis d'autres solutions comme, par exemple, les solutions sur énergie fossiles pour lesquels la part proportionnelle à la consommation est prépondérante. Là encore, l'exploitation des modèles simplifiés de la présente étude a nécessité l'introduction de charges d'investissement qui restent indicatives et ne doivent pas être transposées « en l'état » à des opérations réelles.

Portée de l'approche économique

Les modèles simplifiés ont été développés pour cadrer avec une analyse économique en Coût Global (Coût Global Élémentaire ou Coût de Cycle de Vie). Ils contribuent donc à renseigner quatre postes :

- construction (sans distinction des montages et conceptions de l'opération) ;
- exploitation (fonctionnement) ;
- maintenance (dont renouvellement) – modèle à développer ;
- fin de vie (valeur à l'échéance) – modèle à développer.

Les notions d'externalités, de coûts hors construction et de revenus qui mènent à l'expression du Coût Global Étendu ne sont pas traitées par la présente étude.

La présente étude reste focalisée sur la mise au point d'une méthodologie et de modèles simplifiés axés sur la géothermie très basse énergie (TBE) et dont les résultats sont nécessaires aux analyses économiques. Pour aller plus avant et conduire une analyse macroéconomique à grande échelle, il faudra collecter des données sur opérations, en particulier sur les charges d'investissements en comparaison avec les solutions concurrentes et/ou complémentaires. Ce développement peut représenter une suite à la présente étude.

Un premier niveau d'analyse macroéconomique, ciblée sur la géothermie est néanmoins possible grâce à l'introduction d'une solution géothermique de référence au

lieu du gaz. L'approche par comparaison est alors simplifiée puisqu'elle permet de ne pas prendre en considération les postes identiques pour lesquels les données fiables pourraient être difficiles à collecter.

Validité des modèles simplifiés

Sauf exception, les modèles simplifiés constituent chacun un élément d'analyse technique et/ou économique, seuls les effets macroscopiques étant reproduits.

Ces modèles se rapportent à des critères de température extérieure ou de température de la ressource géothermique qui sont rendus comparables à ceux d'outils technico-économiques existant de référence, notamment RETScreen (www.retscreen.net) administré par Canmet-Energie au Québec en partenariat avec la NASA (USA), le REEEP (Vienne, Autriche), le PNUÉ et le FEM. RETScreen reste toutefois un outil d'étude de projets élémentaires et non pas un outil à vocation macro-économique.

1.9. ÉTAPES DE L'ÉTUDE

L'étude, voir détail dans les chapitres qui suivent, est focalisée sur l'expression de modèles simplifiés qui donnent facilement accès à une estimation du dimensionnement des équipements et, surtout, aux coûts saisonniers du fonctionnement (dépense en énergie électrique).

Synthétiquement, les étapes successives pour parvenir aux coûts de fonctionnement sont matérialisées par les modélisations listées ci-dessous et qui sont décrites en détail dans les chapitres 2 et 3 qui suivent :

- **modélisation des dispositifs géothermiques (géothermie TBE) :**
 - modèle simplifié de conditions géoclimatiques,
 - modèle simplifié de demande du bâtiment,
 - modèle simplifié de source géothermique,
 - modèle simplifié de machinerie géothermique ;
- **modèles d'exploitation/utilisation (géothermie TBE) :**
 - modèle simplifié d'investissement,
 - modèle simplifié de fonctionnement.

Le chapitre 4 propose des éléments de modélisation des investissements en géothermie très basse énergie et de la dépense électrique de fonctionnement.

Le chapitre 5 présente des éléments de réflexion pour porter la démarche de modélisation simplifiée en géothermie basse énergie.

2. Représentation du système géothermique

2.1. PRINCIPE GÉNÉRAL

Parvenir à simplifier la représentation en un **modèle unique** pour toutes les techniques TBE a constitué un verrou qu'il a fallu lever pour mener à bien la présente étude, la finalité étant orientée vers l'analyse en coût global.

Comme illustré par le schéma ci-après, il est proposé de regrouper les grands postes de l'analyse technique et économique en un nombre limité d'éléments et de paramètres influents.

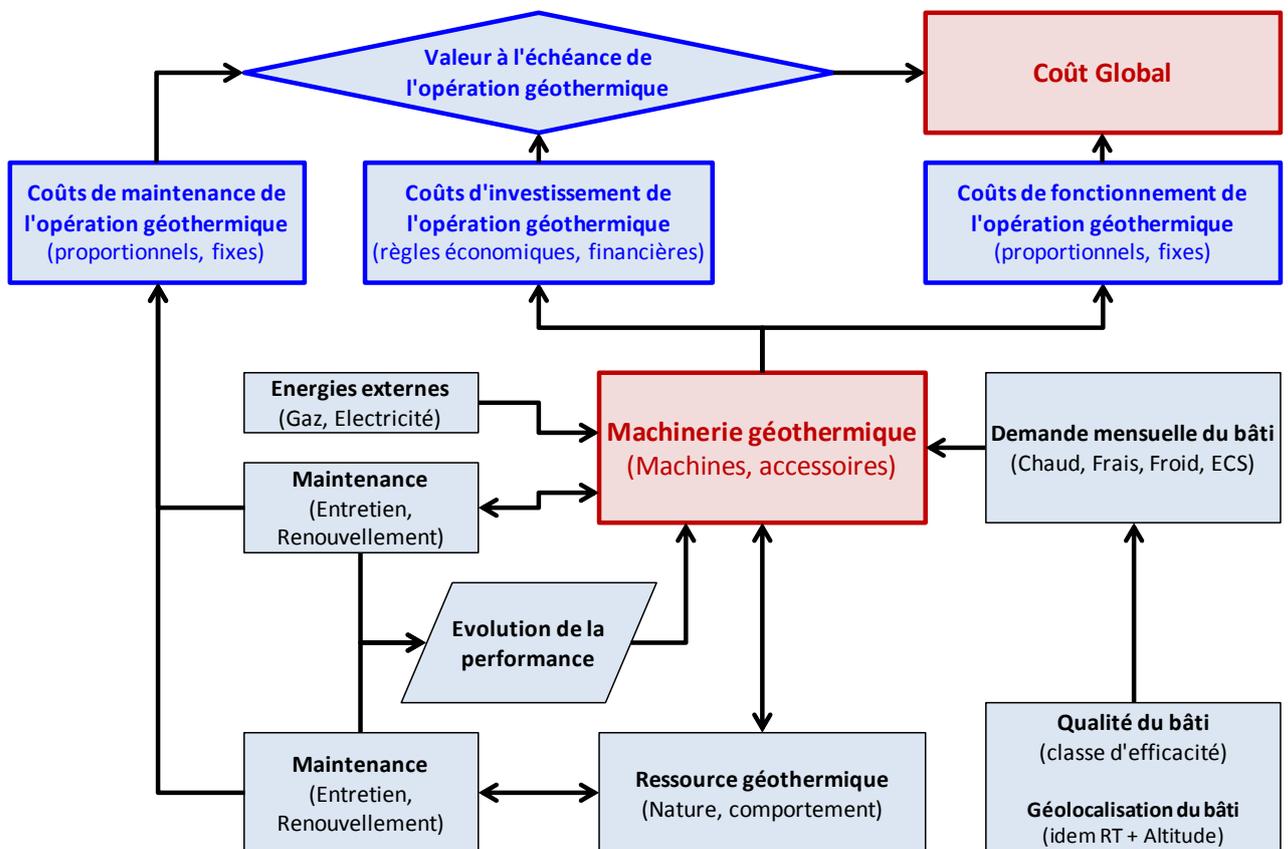


Figure 3 : Représentation schématique du système géothermique.

La finalité macroéconomique n'étant pas de dimensionner ou de décrire une opération en particulier, l'approche schématisée ci-avant diffère par ses modes de description d'autres approches que l'on peut retrouver dans des outils d'analyse d'opérations, comme par exemple RETSCREEN.

En effet, la finalité est de pouvoir traiter simultanément une large diversité de comportements et non pas de représenter avec exactitude un comportement en particulier. Les descriptions permettent donc de faire varier les grandeurs techniques et économiques dans des plages **conformes à ce qui peut être observé**, mais ces plages peuvent être imposées par l'analyste, qui décide des bornes et limites, sans respecter fidèlement toutes les lois physiques.

2.2. RÉPARTITION EN MODÈLES SIMPLIFIÉS

Les modèles simplifiés sont travaillés dans le respect des directives suivantes :

- il est recherché une description des comportements homogène pour toutes les techniques géothermiques en très basse énergie ;
- chaque modèle simplifié exploite un nombre limité de données et paramètres d'entrée ; ce qui signifie que certains paramètres peuvent être figés considérant que leur impact sur la vision (macro-)économique est marginal.

Ainsi que synthétisé par le schéma ci-avant, les modèles simplifiés suivants ont été élaborés.

Modélisation des dispositifs géothermiques (géothermie TBE)

- **Modèle simplifié de conditions géoclimatiques** : en entrée, ce modèle utilise les données météorologiques. Il produit automatiquement des données mensuelles suivantes :
 - les DJU de chauffage, climatisation et rafraîchissement, éventuellement moyennant une correction de l'altitude de la localisation des opérations vis-à-vis de la station météo la plus proche,
 - les profils thermiques de température du sous-sol non perturbé moyennant une hypothèse de diffusivité thermique moyenne du sol.
- **Modèle simplifié de demande du bâtiment** : en entrée, ce modèle utilise les données du modèle géoclimatique et des informations saisies par l'analyste relatives aux bâtiments (taille et efficacité énergétique). En sortie, ce modèle produit les chroniques de demandes mensuelles en énergie thermique :
 - chroniques de demandes en chaleur pour le chauffage et l'ECS,
 - chroniques de demandes en froid/frais pour la climatisation et/ou le rafraîchissement.
- **Modèle simplifié de source géothermique** : en entrée, ce modèle utilise les sorties du modèle géoclimatique et les saisies de l'analyste relatives à la technique employée, à l'épaisseur utile du dispositif géothermique souterrain et à la qualité du dimensionnement.

En sortie, ce modèle produit les chroniques thermiques (en °C), adimensionnées vis-à-vis de la demande du bâti en énergies thermiques, du sous-sol sollicité via les dispositifs géothermiques souterrains.

La qualité du dimensionnement est paramétrable. Le principe préconisé est le suivant :

- dispositif sous-dimensionné (surexploitation de la ressource),
 - dispositif normalement dimensionné (exploitation nominale de la ressource),
 - dispositif sur dimensionné (sous-exploitation de la ressource).
- **Modèle simplifié de machinerie géothermique** – En entrée, ce modèle utilise les données du modèle géoclimatique, du modèle de source géothermique et du modèle de bâtiment.
- En sortie, ce modèle produit des chroniques énergétiques mensuelles représentatives du fonctionnement de machinerie thermodynamique associée au bâtiment :
- chroniques de COP mensuel moyen fonction des évolutions de la température du sous-sol sollicité pour le cumul des usages thermiques (chauffage, ECS, Froid, Frais),
 - chroniques de consommation d'énergie électrique pour satisfaire la production d'énergie thermique (dispositif thermodynamique + circulation).

Modèles d'exploitation/utilisation (géothermie TBE)

- **Modèles simplifié d'investissement** : ce modèle propose des valeurs par défaut pour chacune des quatre grandes techniques de géothermie très basse énergie, ces valeurs étant paramétrées pour être représentatives des situations connues. Les investissements des techniques diffusives sont calculés directement en fonction de la demande du bâti raccordé alors que ceux de la géothermie sur aquifère admettent une faible corrélation sur ce point mais une forte corrélation avec la profondeur des ouvrages.
- **Modèle simplifié de fonctionnement** : ce modèle calcule les dépenses en énergie électrique indépendamment pour la machine thermodynamique (PAC) et pour la circulation ; ce qui permet de traiter le rafraîchissement direct. Les tarifs domestiques et professionnels ont été modélisés (base 2011) et les chroniques mensuelles de consommation sont restituées en distinguant les parts proportionnelles en heures creuses et en heures pleines et la prime fixe (abonnement) ; cela pour chacun des usages.
- **Modèle simplifié de maintenance** : à ce jour, ce modèle ne paraît pas pouvoir être développé faute d'informations suffisamment cohérentes entre elles.
- **Modèles simplifié de valeur à l'échéance** (valeur résiduelle) : à ce jour, ce modèle ne paraît pas pouvoir être développé faute d'informations.

2.3. ARCHITECTURE SIMPLIFIÉE DES MODÈLES

Important. Les modèles simplifiés ont pour objet de permettre la prise en considération de phénomènes sans nécessairement en offrir une représentation fidèle à la réalité physique. Ces modèles permettent à l'analyste de manipuler les bons ordres de grandeur des paramètres dont il souhaite étudier la sensibilité. Il lui appartient de fixer les bornes et limites qui cadrent avec l'analyse qu'il conduit.

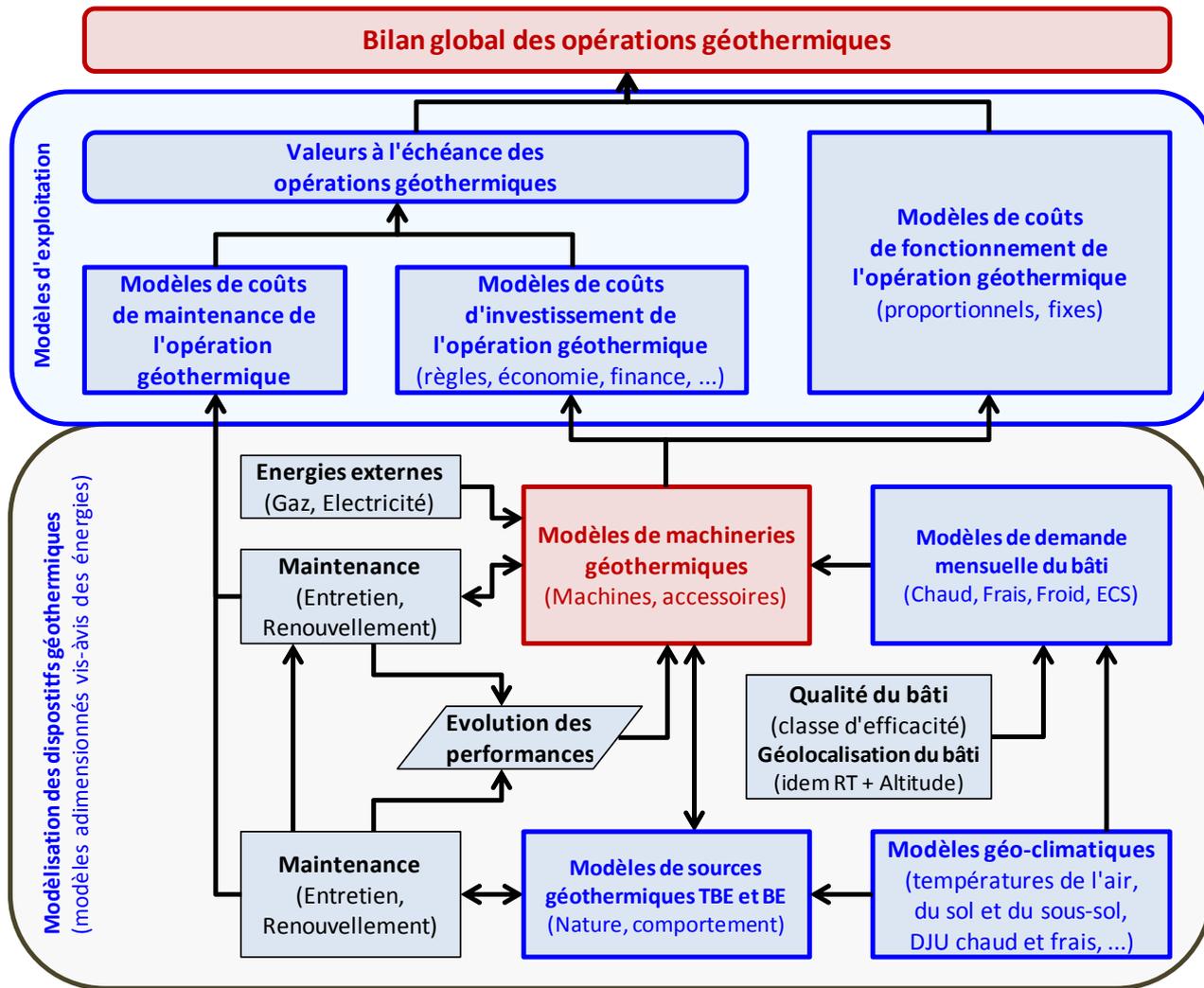


Figure 4 : Représentation schématique des liaisons logiques entre modèles simplifiés.

En reprenant la représentation du système géothermique introduite ci-avant, on peut visualiser le regroupement des modèles descriptifs développés pour la présente étude et détaillés au chapitre 3. Des éléments de modélisation de l'exploitation sont proposés au chapitre 4 pour l'investissement et pour la dépense électrique de fonctionnement. Sur le schéma ci-avant, sont également visualisés (en grisé) certains paramètres conjoncturels dont les incidences peuvent être significatives.

3. Modèles de dispositifs géothermiques

Dans ce chapitre sont exposés les modèles simplifiés qui permettent de produire les chroniques mensuelles (adimensionnées), lesquelles seront ensuite appliquées à l'échelle réelle du bâtiment, du quartier ou du territoire via des modèles d'exploitation du système géothermique. Les modèles de dispositifs géothermiques comprennent :

- **Modèle simplifié de conditions géoclimatiques** : en entrée, ce modèle utilise les données météorologiques. Il produit automatiquement des données mensuelles suivantes :
 - les DJU de chauffage, climatisation et rafraîchissement, éventuellement moyennant une correction de l'altitude de la localisation des opérations vis-à-vis de la station météo sélectionnée,
 - les profils thermiques de température du sous-sol non perturbé moyennant une hypothèse de diffusivité thermique moyenne du sol.
- **Modèle simplifié de source géothermique** : en entrée, ce modèle utilise les sorties du modèle géoclimatique et les saisies de l'analyste relatives à la technique employée, à l'épaisseur utile du dispositif géothermique souterrain et la qualité du dimensionnement.

En sortie, ce modèle produit les profils thermiques (en °C) adimensionnés vis-à-vis de la demande en énergie thermique du sous-sol sollicité par des dispositifs géothermiques souterrains.

La qualité du dimensionnement (basé sur le mode chauffage) est paramétrable. Le principe préconisé est le suivant :

 - dispositif sous-dimensionné (surexploitation de la ressource),
 - dispositif normalement dimensionné (exploitation nominale de la ressource),
 - dispositif sur dimensionné (sous-exploitation de la ressource).
- **Modèle simplifié de demande du bâtiment** : en entrée, ce modèle utilise les données du modèle géoclimatique et des informations saisies par l'analyste relatives aux bâtiments (taille et efficacité énergétique). En sortie, ce modèle produit un les chroniques de demandes mensuelles en énergie thermique.
 - chroniques de demandes en chaleur pour le chauffage et l'ECS,
 - chroniques de demandes en froid/frais pour la climatisation et/ou le rafraîchissement.
- **Modèle simplifié de machinerie géothermique** : en entrée, ce modèle utilise les données du modèle géoclimatique, du modèle de source géothermique et du modèle de bâtiment.

En sortie, ce modèle produit des profils énergétiques mensuels représentatifs du fonctionnement de machinerie thermodynamique associée au bâtiment :

 - chroniques de COP mensuel moyen fonction des évolutions de la température du sous-sol sollicité pour les usages thermiques : chauffage, ECS, Froid, Frais,

- chroniques de temps de fonctionnement et de consommation d'énergie électrique pour satisfaire la production d'énergie thermique (dispositif thermodynamique + circulation).

3.1. MODÈLE GÉOCLIMATIQUE SIMPLIFIÉ

3.1.1. Source de données

Dans la présente étude, il est proposé de travailler à l'échelle des chroniques des moyennes mensuelles qui sont disponibles pour la majeure partie des stations météo de France (environ 150 stations). Plus précisément, il est proposé d'exploiter la même présentation des données climatiques que celles qui sont implémentées dans l'outil RETSCREEN et qui couvrent une large proportion des pays de la planète. Ces données sont consolidées par la NASA.

Station climatique: Bourg-en-Bresse								
	46,21	°N	Latitude					
	5,21	°E	Longitude					
	445,83	m	Élévation					
	-4,91	°C	Temp. extérieure de calcul de chauffage					
	23,39	°C	Temp. extérieure de calcul de climatisation					
	18,37	°C	Amplitude des températures du sol					
	20,94	°C	Amplitude des moyennes du sol					
	Temp. de l'air	Humidité relative	Rayon. solaire quotidien horizontal	Pression Atmo.	Vitesse du vent	Temp. du sol	Calcul DJU chauffage (à 18 °C)	Calcul DJU climatisation (à 10 °C)
	°C	%	kWh/m ² /j	kPa	m/s	°C	°C-j	°C-j
Janv.	-0,02	80,7 %	1,24	94,66	4,16	-0,71	558,62	0,00
Févr.	1,06	77,1 %	2,02	94,59	3,65	0,70	474,32	0,00
Mars	4,28	73,2 %	3,32	94,49	4,05	4,46	425,32	0,00
Avril	7,28	67,7 %	4,25	94,14	3,60	8,01	321,60	0,00
Mai	12,35	63,7 %	5,23	94,36	3,35	13,55	175,15	72,85
Juin	15,89	58,9 %	5,85	94,53	3,00	17,62	63,30	176,70
Juillet	18,42	56,6 %	6,04	94,59	3,01	20,23	0,00	261,02
Août	18,32	58,7 %	5,21	94,57	2,88	19,75	0,00	257,92
Sept.	13,92	66,0 %	3,76	94,57	3,10	14,68	122,40	117,60
Oct.	9,86	74,5 %	2,19	94,55	3,16	9,95	252,34	0,00
Nov.	3,91	80,3 %	1,35	94,46	3,90	3,52	422,70	0,00
Déc.	1,09	81,5 %	1,02	94,62	4,02	0,40	524,21	0,00
Annuel	8,91	69,9 %	3,46	94,51	3,49	9,40	3 339,96	886,09
			Mesuré à		10,0	0,0	m	

Tableau 1 : Exemple de données de la station climatique de Bourg-en-Bresse (source : NASA/RetScreen).

L'exemple ci-dessus synthétise le format des données disponibles. Ces données ont été mise en forme sous EXCEL pour 154 stations ; certaine d'entre elles n'étant pas situées sur le territoire métropolitaine (voir liste en annexe). D'autres stations géo-climatiques peuvent être ajoutées.

Pour les besoins de la présente étude, les modèles simplifiés permettent également de calculer les DJU de rafraîchissement pour estimer les échanges géothermiques en rafraîchissement direct (geocooling). Ils permettent également de recalculer les DJU de chauffage et de climatisation pour d'autres température de base que, respectivement, 18 °C et 10 °C.

3.1.2. Correction d'altitude et pré-calcul des DJU

Pour la présente étude, on doit disposer d'un processus automatisé d'estimation des profils mensuels des **données climatiques** des **données représentatives des demandes thermiques** et de la **température du sol non perturbé**, pour ce dernier point en fonction de la profondeur.

Correction liée à l'altitude

Les stations climatiques produisent des données rattachées à l'altitude de la station. Pour une transposition en un autre lieu peu distant de la station climatique, il convient d'effectuer des corrections. Il s'agira d'estimations qui ne tiennent pas compte de phénomènes climatiques locaux. On convient dans la présente étude d'une correction d'altitude conforme à celle de l'atmosphère standard, à savoir une correction simplifiée représentée par une droite dont la pente est de de 6,5 °C par tranche de 1 000 m (source : ISA - International Standard Atmosphere). Dans la présente étude, la correction est appliquée directement aux valeurs mensuelles de la température de l'air et aux valeurs mensuelles de la température du sol. L'exemple ci-après est pour le cas de la station météo de Bourg-en-Bresse dont l'élévation (officielle) est de 445,83 m, alors qu'on envisagerait un projet en contrebas à une altitude de 200 m. La correction de température est alors de + 1,6 °C. Elle est répercutée sur la température de l'air comme sur celle de la surface du sol. Le recalcul des données atmosphérique et de température du sol est synthétisé par le tableau suivant :

Bourg en Bresse	Altitude Station : 446 m		Altitude projet : 200 m	
	Température de l'air	Température du sol	Température de l'air	Température du sol
	°C	°C	°C	°C
Janvier	-0,02	-0,71	1,58	0,89
Février	1,06	0,70	2,66	2,30
Mars	4,28	4,46	5,88	6,06
Avril	7,28	8,01	8,88	9,61
Mai	12,35	13,55	13,95	15,15
Juin	15,89	17,62	17,49	19,22
Juillet	18,42	20,23	20,02	21,83
Août	18,32	19,75	19,92	21,35
Septembre	13,92	14,68	15,52	16,28
Octobre	9,86	9,95	11,46	11,55
Novembre	3,91	3,52	5,51	5,12
Décembre	1,09	0,40	2,69	2,00
Annuel	8,91	9,40	10,51	11,00
	Températures de la station		Températures recalculées	

Figure 5 : Exemple de recalcul des températures pour la station de Bourg-en-Bresse.

Recalcul des DJU en fonction de la correction d'altitude

Lorsqu'on effectue un changement d'altitude vis-à-vis de la station climatique la plus proche, il convient de ré-estimer en conséquence les DJU pour le chauffage et pour la climatisation, qui seront à la base de l'évaluation des besoins énergétiques mensuels des bâtiments modélisés. En théorie, les DJU des bases de données sont calculés quotidiennement au pas de temps d'une dizaine de minutes et référencée par défaut à une température extérieure égale à :

- 18 °C pour les DJU de chauffage ;
- 10 °C pour les DJU de climatisation.

Nota : la présente étude introduit le s DJU de rafraîchissement, calculés en fonction du DJU de climatisation et de la température de l'air extérieur.

- Par défaut, les DJU de rafraîchissement sont référencés à une température extérieure égale à 18 °C.

Bourg en Bresse	Altitude Station : 445,8 m	
	Chaud : 18 °C	Clim. : 10 °C
	°C-j	°C-j
Janvier	558.62	0.00
Février	474.32	0.00
Mars	425.32	0.00
Avril	321.60	0.00
Mai	175.15	72.85
Juin	63.30	176.70
Juillet	0.00	261.02
Août	0.00	257.92
Septembre	122.40	117.60
Octobre	252.34	0.00
Novembre	422.70	0.00
Décembre	524.21	0.00
Annuel	3 339.96	886.09
DJU de la station		

Altitude projet : 445,8 m		
Chaud : 18 °C	Clim. : 10 °C	Fait : 18 °C
°C-j	°C-j	°C-j
542.10	0.00	0.00
509.70	0.00	0.00
413.10	0.00	0.00
323.10	0.00	0.00
171.00	73.50	0.00
64.80	179.70	0.00
0.00	255.60	12.60
0.00	252.60	9.60
123.90	120.60	0.00
245.70	0.00	0.00
424.20	0.00	0.00
508.80	0.00	0.00
3 326.40	882.00	22.20
DJU recalculés		

Ajaccio, Campo Oro	Altitude Station : 9,0 m	
	Chaud : 18 °C	Clim. : 10 °C
	°C-j	°C-j
Janvier	297.60	0.00
Février	263.20	0.00
Mars	235.60	12.40
Avril	159.00	81.00
Mai	37.20	210.80
Juin	0.00	312.00
Juillet	0.00	412.30
Août	0.00	418.50
Septembre	0.00	312.00
Octobre	27.90	220.10
Novembre	162.00	78.00
Décembre	263.50	0.00
Annuel	1 446.00	2 057.10
DJU de la station		

Altitude projet : 9,0 m		
Chaud : 18 °C	Clim. : 10 °C	Fait : 18 °C
°C-j	°C-j	°C-j
289.50	0.00	0.00
283.50	0.00	0.00
229.50	15.00	0.00
160.50	84.00	0.00
37.50	207.00	0.00
0.00	315.00	72.00
0.00	402.00	159.00
0.00	408.00	165.00
0.00	315.00	72.00
28.50	216.00	0.00
163.50	81.00	0.00
256.50	0.00	0.00
1 449.00	2 043.00	468.00
DJU recalculés		

Tableau 2 : Estimation des erreurs de recalcul des DJU.
Cas des stations de Bourg-en-Bresse (climat froid) et d'Ajaccio (climat chaud).

La réévaluation des DJU est réalisée à partir des températures de l'air extérieur corrigées et de celles de la station de référence Sans chroniques détaillées, tout recalcul à partir des chroniques mensuelles introduit une erreur, mais elle restera relativement peu impactante comme le montre le tableau 2 qui permet de valider le calcul, l'erreur étant inférieure à 1 %.

3.1.3. Calcul des profils de température du sous-sol

Pour la présente étude, on réalise un traitement mathématique des données géoclimatiques de manière à produire *automatiquement* les valeurs mensuelles de la **température du sol non perturbé** en fonction de la période de l'année et de la profondeur. À un instant donné, la température du sol prendra en considération :

- la localisation géoclimatique et l'éventuelle correction d'altitude vis-à-vis de la station météo la plus proche ;
- la période de l'année considérée ;
- la profondeur d'enfouissement considérée.

Gradient géothermique

Au-delà d'une profondeur d'une dizaine de mètres, on admettra que seul le gradient géothermique est déterminant pour estimer la valeur de la température du sous-sol. On conviendra d'une valeur par défaut de 3 °C par tranche de 100 m pour le gradient géothermique. Sauf disposition contraire, on négligera dans cette étude les anomalies thermiques.

Diffusivité thermique

La température non perturbée de la première dizaine de mètres du sous-sol peut varier dans le temps, sous l'influence des fluctuations géoclimatiques, le gradient géothermique restant le seul paramètre au-delà d'une dizaine de mètres. Dans la pratique, il s'agit d'implémenter la pénétration des ondes thermiques saisonnières qui dépendent des conditions climatiques locales et d'un paramètre lié aux propriétés du sol : la diffusivité thermique.

La diffusivité thermique, généralement notée avec la lettre *a* (parfois *k*), est calculée en divisant la conductivité thermique (en w/m.K) par le produit de la masse volumique et de la capacité thermique massique (en J/kg.K). Typiquement, une valeur de la diffusivité thermique peut être comprise entre 5,0 E-7 et 6,0 E-7 m²/s.

Estimation de la température non perturbée

La littérature scientifique et technique propose une approche simplifiée qui fait l'hypothèse d'une évolution sinusoïdale de la température de surface du sol en fonction des cycles annuels. Cette hypothèse permet une solution analytique aux équations de

transfert de la chaleur. L'expression de la température du proche sous-sol en fonction du temps et de la profondeur prend alors l'allure suivante :

$$T_{sz}(t) = T_{su,moy} + \Delta T_{su} \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{a_{sol} \cdot \Delta t}}} \cos\left(\frac{2\pi t}{\Delta t} - z \sqrt{\frac{\pi}{a_{sol} \Delta t}}\right)$$

où :

T représente la température en °C ; a représente la diffusivité thermique en m²/s ;
 t représente le temps en secondes ; z représente la profondeur en m ;
 Δt représente la durée d'un cycle, soit une année (3 153 600 secondes).

Équation 1 : Équation générale exprimant la température du proche sous-sol en fonction de la profondeur et de la période de l'année.

Gradient géothermique :	0,03 °C/m	ρ masse volumique :	1 900 kg/m ³
N°jour du Tmin :	22 Jours	Cm capacité thermique :	2 000 J/kg.K
Offset (décalage) :	202 Jours	λ conductivité thermique :	2 W/m.K
Amplitude thermique :	10,47 °C	a Diffusivité thermique :	5.26E-07 m ² /s
Tsurface moyen :	11,00 °C	(a = λ/ρ.Cm)	

Tableau 3 : Paramètres saisis (en jaune) et calculés (en bleu) nécessaires au calcul de la température du sous-sol non-perturbé.

Dans le tableau ci-avant, le jour le plus froid de l'année est le 22 janvier ; cette valeur étant approximativement valide pour l'ensemble des stations climatiques sur le territoire métropolitain. L'offset est le décalage d'origine (202 = 180 + 22) pour la formule de diffusion de la chaleur ci-avant qui, dans la littérature, utilise la fonction COSINUS. Pour le cas des ondes thermiques dans le sol, la fonction SINUS (non usuelle) aurait évité le décalage de 180 jours s'ajoutant au N° du jour le plus froid.

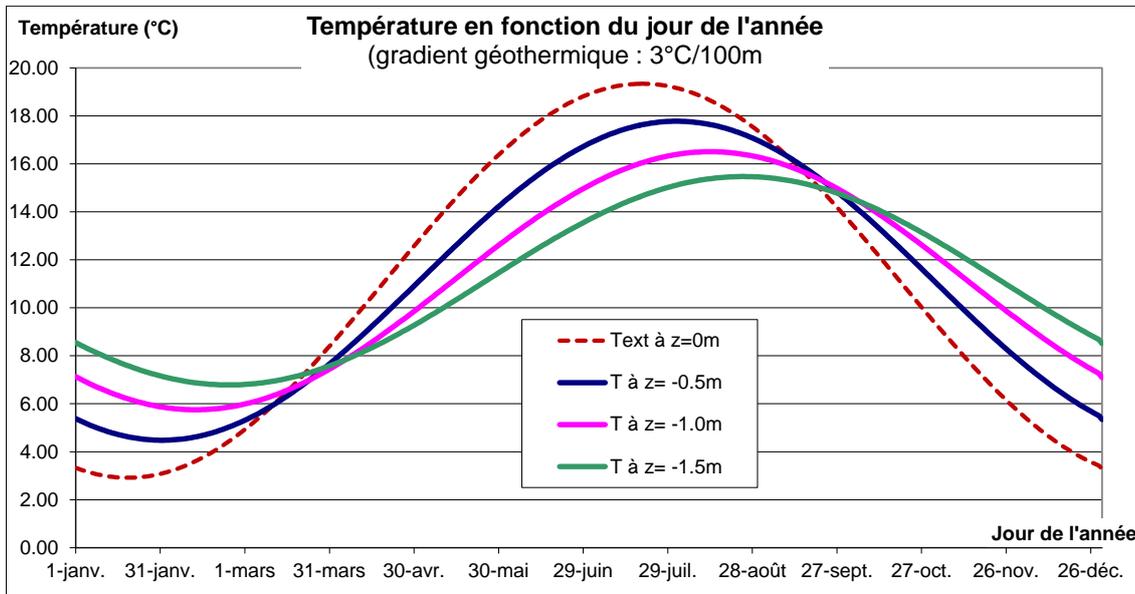


Figure 6 : Exemple simulé d'une chronique de la température du sous-sol non perturbé sur une année pour quatre profondeurs (gradient géothermique 3 °C/100 m).

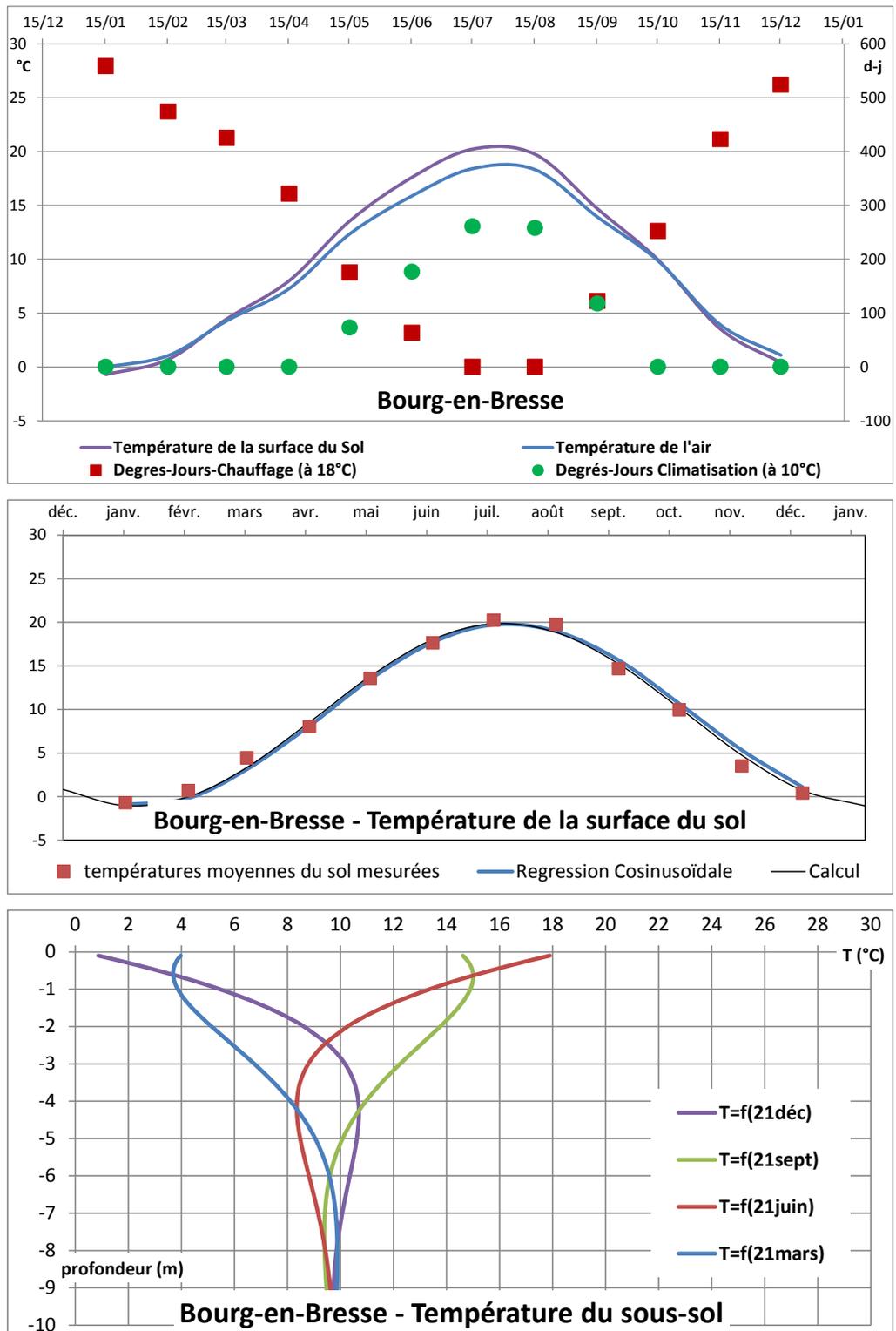


Figure 7 : Exemple de résultat du traitement des données géo-climatiques pour calculer les profils thermiques saisonniers - Cas d'un climat froid : Bourg-en-Bresse.

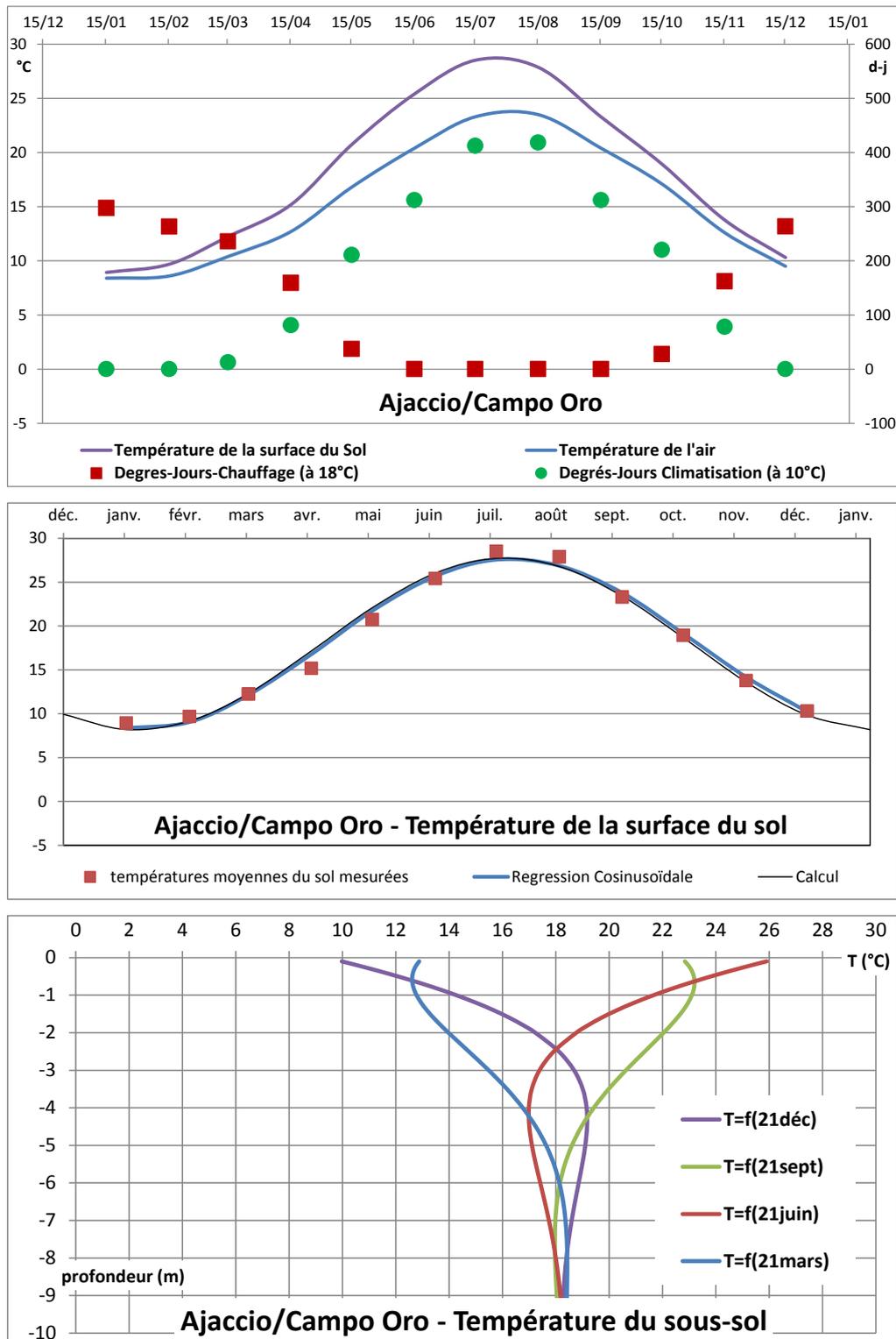


Figure 8 : Exemple de résultat du traitement des données géoclimatiques pour calculer les profils thermiques saisonniers - Cas d'un climat chaud : Ajaccio.

Le traitement numérique mis au point calcule la régression sinusoïdale de la chronique (au pas mensuel) réellement constatée au lieu d'une station météorologique. Les résultats sont injectées dans la formule ci-avant pour estimer le profil de température du sous-sol non perturbé fonction du temps.

Les exemples en pages suivantes illustrent les résultats de ces calculs pour deux climats extrêmes : Bourg-en-Bresse et Ajaccio avec, dans les deux cas, un gradient géothermique égal à 3 °C/100 m, une diffusivité égale à 5,3 E-7 m²/s et la date du jour le plus froid de l'année située le 22 janvier.

Important. Sauf disposition contraire, il est suggéré de conserver à l'identique ces mêmes valeurs pour toutes les localisations en France métropolitaine.

3.2. MODÈLES SIMPLIFIÉS DE PROFIL THERMIQUE DU BÂTIMENT

Dans une démarche en « modèle simplifié », un des buts est de produire des grandeurs adimensionnées, la finalité macroéconomique renforçant ce point. En effet, dans ce contexte, décrire la réalité physique d'une opération n'a pas de sens mais, par contre, les indicateurs doivent pouvoir être réalistes.

3.2.1. Démarche

L'objectif d'établir le profil thermique du bâtiment pour les seuls usages climatiques (chaud, frais, froid) peut être construit sur la seule base de la température extérieure corrélée à la classe du bâtiment et au zonage climatique conformément à la réglementation thermique. L'indicateur d'entrée préconisé est alors le DJU sous ses déclinaisons pour les modes chaud, frais et climatisation.

La difficulté, que l'on retrouve systématiquement dans toutes les études, provient de la prise en considération de l'ECS. En effet, la production d'ECS ne peut être adimensionnée vis-à-vis des quantités d'énergie en jeu. Il sera fixé.

La destination de la présente étude étant l'échelle macro-économique, on travaillera sur la base d'observations retranscrites par la littérature. Ainsi, existent de très nombreux travaux ou observatoires qui produisent des synthèses, les cas traités restant toutefois en nombre insuffisants pour avoir une valeur statistique. Néanmoins, les incidences des éventuelles erreurs à l'échelle macro-économique seront accessibles par l'analyse de la sensibilité au paramètre ECS.

Dans la présente étude, l'approche retenue est la suivante :

- grandeurs adimensionnées (par défaut) : la production d'ECS sera cumulée au chauffage pour le pré-calcul adimensionné du système géothermique.

Pour une classe de bâtiment donnée et une localisation géoclimatique, on admet une répartition (par défaut) de la demande de chaud entre ECS et chauffage. Cette répartition est d'abord construite à l'échelle annuelle (application des réglementations thermiques par exemple), puis ventilée au pas de temps mensuel :

- le profil de demande pour le chauffage suit l'indicateur DJU,

- la demande d'ECS est la même pour chaque mois de l'année et elle ne dépend pas de la qualité du bâtiment ;
- grandeurs quantitatives : à l'étape de l'établissement des coûts (investissement, fonctionnement, maintenance...), la production d'ECS peut être précisée, par exemple rapportée au m² SHON et/ou au mode d'usage des locaux (habitation, commercial, tertiaire...).

Dans la présente étude à vocation macro-économique, il est davantage envisagé de regarder la sensibilité au paramètre ECS que de décrire des situations réelles.

Important. Les raisonnements doivent être basés sur les quantités d'énergie consommées ou puisées et non pas sur leur valeur en énergie primaire.

3.2.2. Expression des grandeurs usuelles

Les données issues des observations conduisent aux échanges indicatifs d'énergie avec le sous-sol qui sont reproduits ci-dessous et qui sont comparés aux énergies d'un réseau de chaleur et du gaz collectif à condensation.

kWh/m ² .an (énergie finale)	Gaz collectif à condensation	PAC géothermique						Réseau de Chaleur
		COP annuel 2		COP annuel 3		COP annuel 4		
Rendement ou COP	0,87							0.85
Chauffage + ECS	Gaz	Elec.	GTH	Elec.	GTH	Elec.	GTH	Chaleur
BBC Neuf	36,8	16,0	16,0	10,7	21,3	8,0	24,0	37,6
BBC rénovation	62,1	27,0	27,0	18,0	36,0	13,5	40,5	63,5
RT-2005	96,6	42,0	42,0	28,0	56,0	21,0	63,0	98,8
Bâtiment social moyen	137,9	60,0	60,0	40,0	80,0	30,0	90,0	141,2
Bâtiment peu performant	204,6	89,0	89,0	59,3	118,7	44,5	133,5	209,4
Limite classes E à F	271,3	118,0	118,0	78,7	157,3	59,0	177,0	277,6
Chauffage seul	Gaz	Elec.	GTH	Elec.	GTH	Elec.	GTH	Réseau
BBC Neuf	6,9	3,0	3,0	2,0	4,0	1,5	4,5	7,1
BBC rénovation	32,2	14,0	14,0	9,3	18,7	7,0	21,0	32,9
RT-2005	66,7	29,0	29,0	19,3	38,7	14,5	43,5	68,2
Bâtiment social moyen	108,0	47,0	47,0	31,3	62,7	23,5	70,5	110,6
Bâtiment peu performant	174,7	76,0	76,0	50,7	101,3	38,0	114,0	178,8
Limite classes E à F	241,4	105,0	105,0	70,0	140,0	52,5	157,5	247,1
ECS seul	Gaz	Elec.	GTH	Elec.	GTH	Elec.	GTH	Réseau
BBC Neuf	29,9	13,0	13,0	8,7	17,3	6,5	19,5	30,6
BBC rénovation	29,9	13,0	13,0	8,7	17,3	6,5	19,5	30,6
RT-2005	29,9	13,0	13,0	8,7	17,3	6,5	19,5	30,6
Bâtiment social moyen	29,9	13,0	13,0	8,7	17,3	6,5	19,5	30,6
Bâtiment peu performant	29,9	13,0	13,0	8,7	17,3	6,5	19,5	30,6
Limite classes E à F	29,9	13,0	13,0	8,7	17,3	6,5	19,5	30,6

Tableau 4 : Indication de consommations d'énergies selon la classe du bâtiment pour le gaz à condensation, le réseau de chaleur et les PAC géothermiques (trois valeurs du COP).

Les données indicatives retranscrites dans le tableau 4 ont été déterminées sur la base des hypothèses simplifiées qui sont indiquées dans le tableau en page suivante qui synthétise les demandes usuelles en énergies utiles pour le chauffage et pour l'ECS.

Ces hypothèses sont déduites des résultats de l'enquête diffusée en 2010 à ses adhérents par l'association AMORCE et portant sur les prix de la chaleur en 2009. Ces informations confirment d'autres observations comme par exemple celles de l'observatoire BBC (<http://www.observatoirebbc.org>), cet observatoire ne prenant pas encore en considération les pompes à chaleur géothermiques.

3.2.3. Expression des valeurs par défaut pour le calcul adimensionné

Dans la présente étude, le calcul adimensionné vis-à-vis des quantités d'énergie en jeu correspond à une démarche comparable à celle des « valeurs par défaut » que l'on peut retrouver dans de nombreux outils logiciels, par exemple ceux traitant de la performance énergétique du bâtiment. **Toutes ces grandeurs sont évidemment ajustables dans les modèles proposés.**

À titre indicatif, dans la présente étude, les valeurs (par défaut) implémentées dans les modèles simplifiés du système géothermique ont donné lieu à un calcul des ratios ECS / Chauffage (colonne de droite du tableau ci-après).

Demande en énergie utile	Chauffage + ECS	Chauffage seul	ECS seul	<u>ECS</u> Chauffage
	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	/
BBC Neuf	32	6	26	4,33
BBC rénovation	54	28	26	0,93
RT-2005	84	58	26	0,45
Bâtiment social moyen	120	94	26	0,28
Bâtiment peu performant	178	152	26	0,17
Limite classes E à F	236	210	26	0,12

Tableau 5 : Valeurs indicatives des demandes d'énergie thermique selon la classe du bâtiment.

Important. Si l'on devait ne retenir qu'une valeur par défaut pour les nouveaux clients des systèmes géothermiques, la présente étude garderait le ratio ECS/Chauffage égal à 1 :

$$\frac{\text{ECS}}{\text{Chauffage}} = 1$$

Cette valeur traduit imparfaitement la performance qui peut être atteinte pour le BBC neuf mais elle est bien représentative du BBC rénovation appelé à monter en puissance à compter du 1^{er} janvier 2013.

Calcul indicatif des besoins en ECS

Besoins quotidiens :	En base 75 litres pour 2 personnes
Énergie utile quotidienne :	14 125 kJ pour un Δt de 45 °C (75 x 4,185 x 45) 3,92 kWh (3 600 kJ par kWh)
Énergie utile annuelle :	1 432 kWh/an
Surface de logement typique :	90 m ²
Énergie spécifique pour l'ECS :	16 kWh/m ² .an (pour 2 personnes et 90 m ² de bâti)

Tableau 6 : Valeurs indicatives pour le calcul des demandes en ECS.

On peut se faire une idée de ce que représente l'ECS en négligeant les différentes pertes dans le système de distribution et les énergies récupérables selon les saisons.

3.2.4. Sensibilité des valeurs par défaut à la zone climatique

L'approche à vocation macroéconomique n'a pas à détailler des projets individuels et les profils de demande sont introduits par l'analyste selon des critères qu'il détermine par ailleurs. Néanmoins, le présent paragraphe montre la cohérence entre les zones climatiques telles que présentées par la RT-2012 (approche similaires à celle de la RT2005) et le traitement effectué au travers des modèles simplifiés de la présente étude appliqués aux demandes en chauffage, rafraîchissement et/ou climatisation.

Alors que les modèles simplifiés de la présente étude travaillent directement à partir des chroniques géoclimatiques, le zonage de la réglementation thermique RT-2012 (arrêté du 26/10/2010) distingue huit grandes zones en France (H1a, H1b, H1c, H2a, H2b, H2c, H2d et H3) : seules les zones H3 étant, en principe, susceptibles d'être équipées d'un refroidissement actif des logements (climatisation).

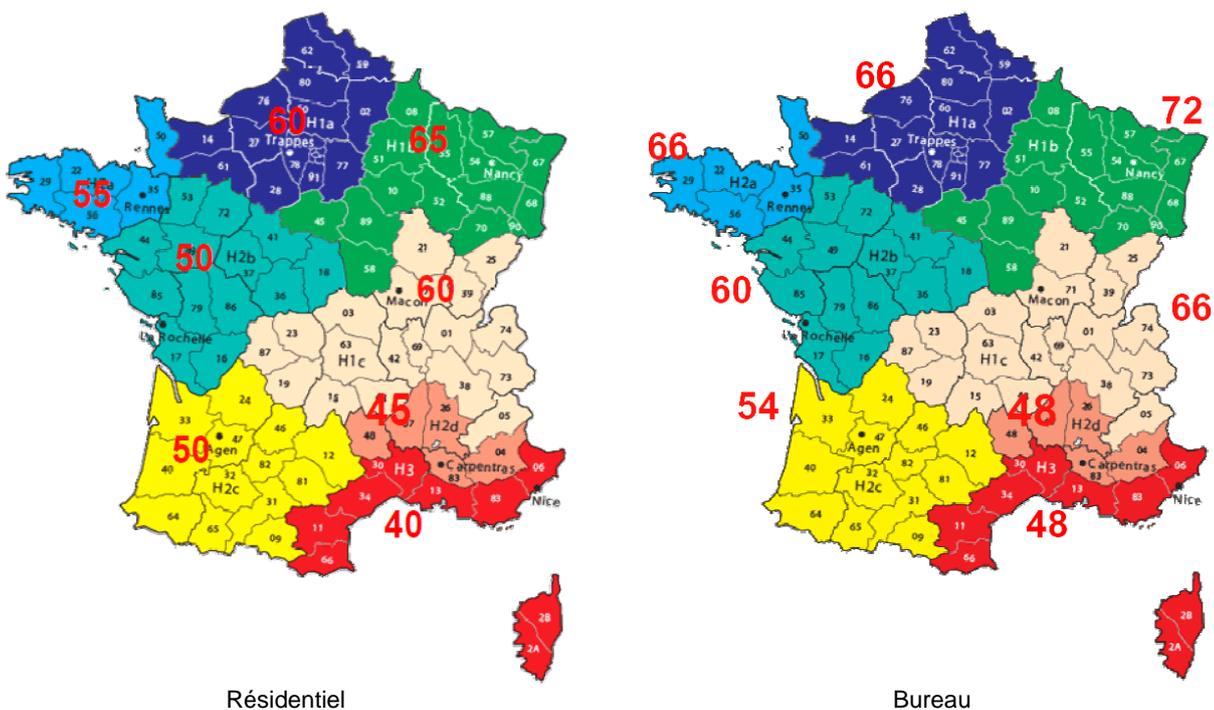


Figure 9 : Huit zones géographiques pour le bâtiment neuf (40 à 65 kWh(ep)/m²/an).
Cas du résidentiel et de l'immobilier de bureau (sans refroidissement).

Dans la RT-2012, de nombreuses modulations sont introduites pour prendre en compte tous les cas de figure mais, pour une même zone, on constate que les modulations ne sont pas identiques pour toutes les catégories de bâtiment, ni même entre Cep et Bbio pour une même zone et une même catégorie de bâtiment. De ce fait, afin de préserver la lisibilité lors de l'étape de transposition à l'échelle

macroéconomique, il a été décidé dans la présente étude de ne pas faire expressément référence aux différents cas de figure distingués par la RT-2012.

Important. Il reviendra à l'analyste de manipuler des grandeurs de demande thermique en rapport avec les dispositions réglementaires et/ou la situation du territoire qu'il entend étudier.

3.2.5. Chroniques mensuelles de demande d'énergies thermiques

La RT propose une correction (modulation) en fonction de l'altitude. Elle prévoit uniquement trois grands niveaux d'altitude : < 400 m, < 800 m et > 800 m :

- Dans la présente étude, la modulation d'altitude est automatisée en appliquant une correction corrélée à l'atmosphère standard ; à savoir une correction simplifiée représentée par une droite dont la pente est de de 6,5 °C par tranche de 1 000 m (source : ISA - International Standard Atmosphere). Au cas par cas, cette correction est calculée à partir de la station météo sélectionnée.
- Pour parvenir aux chroniques mensuelles de demandes adimensionnées, il faut imposer le profil de consommation annuelle en Chauffage, Rafraîchissement et Climatisation. Dans la présente étude, les chroniques mensuelles adimensionnées de demandes pour le confort climatique seront ventilées au prorata des DJU de la station climatique (calculés à partir des courbes de température de l'air et corrigées de l'altitude) ; par défaut :
 - DJU chauffage à 18 °C,
 - DJU Climatisation à 10 °C,
 - DJU rafraîchissement à 18 °C.
- La demande d'ECS sera considérée comme constante toute l'année.

Ajaccio/Campo Oro	ECS	Chauffage	Climatisation	Rafraîchissement
	MWh/m ² ,mois	MWh/m ² ,mois	MWh/m ² ,mois	MWh/m ² ,mois
Janvier	-2,17	-1,20	0,00	0,00
Février	-2,17	-1,17	0,00	0,00
Mars	-2,17	-0,95	0,04	0,00
Avril	-2,17	-0,66	0,25	0,00
Mai	-2,17	-0,16	0,61	0,00
Juin	-2,17	0,00	0,93	0,00
Juillet	-2,17	0,00	1,18	0,00
Août	-2,17	0,00	1,20	0,00
Septembre	-2,17	0,00	0,93	0,00
Octobre	-2,17	-0,12	0,63	0,00
Novembre	-2,17	-0,68	0,24	0,00
Décembre	-2,17	-1,06	0,00	0,00
kWh/m²,an	-26,00	-6,00	6,00	0,00

Tableau 7 : Chroniques mensuelles pour le BBC neuf - Cas d'un climat chaud : Ajaccio.

Il reviendra alors à l'analyste de définir des profils d'usage thermique, en conformité ou non avec la RT. Actuellement, la RT distingue huit grandes zones auxquelles sont

affectés des objectifs de Cep (consommation énergétique exprimée en énergie primaire) ; ces objectifs étant modulés en fonction :

- de l'usage du bâtiment (ou partie de bâtiment) et de sa catégorie CE1/CE2 (Mctype) ;
- de la localisation géographique (Mcgeo) et de l'altitude (Mcalt) ;
- des émissions de gaz à effet de serre des énergies utilisées (Mcges) ;
- de la surface moyenne des logements et selon la nature de construction (Mcsurf).

L'exemple ci-avant reprend les valeurs du BBC neuf pour le cas d'Ajaccio avec une demande en climatisation identique à la demande en chauffage. Les valeurs précédées d'un signe moins correspondent à la demande de chaleur.

3.3. MODÈLES SIMPLIFIÉS DES SOURCES GÉOTHERMIQUES (TEMPÉRATURE DES SOURCES)

La température initiale d'une source géothermique peut varier dans le temps, sous l'influence des fluctuations géoclimatiques et/ou en résultante des sollicitations du système géothermique. Pour cette étude, on distinguera les trois cas suivants :

- **Cas 1** : la température de la ressource géothermique varie en fonction de son utilisation et de la température extérieure. Ce sera le cas des échangeurs géothermiques de subsurface : échangeurs horizontaux, corbeilles peu profondes.
- **Cas 2** : la température de la ressource géothermique varie uniquement en fonction de son utilisation. Ce sera les cas des échangeurs verticaux : sondes géothermiques et champs de sondes géothermiques ; les fondations géothermiques étant exclues du périmètre de la présente étude.
- **Cas 3** : la température de la ressource géothermique est constante. Ce sera le cas de dispositifs géothermiques sur nappe aquifère. **Ce cas est essentiel, car il permet de constituer la solution technico-économique de référence.**

Ouvrage géothermique (cas de la corbeille géothermique)		
Haut de l'ouvrage géothermique	-1	m (saisi)
Bas de l'ouvrage géothermique	-4	m (saisi)
Milieu de l'ouvrage géothermique	-2,5	m (calculé)

Conditions de base du fonctionnement (pour le milieu de l'ouvrage)		
Température initiale	12,96	°C (calculé)
Date de début de la saison de chauffe	1-oct.	(Saisi)
N° du jour de l'année (début saison de chauffe)	274	(calculé)
ΔT maximal autorisé (saison de chauffe)	-7	°C (saisi)
Dérive thermique du cycle 1	0,0	°C (saisi)

Tableau 8 : Description simplifiée de l'ouvrage géothermique.

Important. Dans la présente étude, le comportement thermique du sous-sol n'est pas directement rattaché à la quantité d'énergie puisée. Ce comportement est reproduit en lien avec une notion de « **qualité du dimensionnement** » au regard du

dimensionnement considéré comme « **nominal** », ce qui traduit une situation subie ou décidée lors de l'investissement.

La température des terrains est alors le bon indicateur (en °C) et l'analyste qualifiera la qualité du dimensionnement en imposant le ΔT maximal autorisé (saison de chauffe) vis-à-vis de la température du sol non perturbé.

Tous les modèles de sources géothermiques sont basés sur une description sommaire de l'ouvrage géothermique souterrain **qui s'avère pertinente pour tous les modèles.**

3.3.1. Modèles simplifié de source géothermique sensible à la température extérieure *et* aux usages (Cas 1)

Ce modèle simplifié s'applique principalement aux échangeurs, de subsurface dont la performance est liée aux incidences des échanges géoclimatiques. En effet, le niveau de température du proche sous-sol est impacté par la climatologie, laquelle voit ses effets atténués par la profondeur d'enfouissement des échangeurs géothermiques.

Expression du paramétrage de la température de la ressource

L'approche simplifiée consiste à fixer les conditions vis-à-vis d'un fonctionnement nominal en les traduisant en matière de température, par exemple :

Qualité du dimensionnement des ouvrages géothermiques de subsurface	Température du sol au voisinage de la profondeur médiane de l'ouvrage	
	Valeurs représentatives pour le ΔT	Valeurs cible relativement à la température non-perturbée
sous-dimensionnée	ΔT de -7 °C à -11 °C	Tnon-perturbée - 10 °C
normalement dimensionnée	ΔT de -3 °C à -7 °C	Tnon-perturbée - 7 °C
surdimensionnée	ΔT de -1 °C à -3 °C	Tnon-perturbée - 3 °C

Tableau 9 : Exemple de valeurs cibles des températures en fin de saison pour le dimensionnement des échangeurs géothermiques souterrains.

Représentation de la température de la source géothermique

(Source froide en mode chauffage – Source chaude en mode rafraîchissement)

Physiquement, le paramètre déterminant serait la température du fluide caloporteur en entrée de la pompe à chaleur, ce paramètre impactant précisément le COP du système et donc la consommation d'énergie (électricité pour le compresseur dans le cas d'une PAC conventionnelle).

Dans la présente étude, on fait l'hypothèse simplificatrice de ne considérer que la température moyenne du sol au voisinage des ouvrages comme indicateur pour estimer les impacts sur la performance du système thermodynamique et donc sur la performance économique. De fait, par exemple, on ne cherche pas à détailler les éventuels pincements des échangeurs thermiques.

Important. On estimera donc le COP directement à partir de la température de la source géothermique, ce qui est une approche pertinente à l'échelle économique.

Ce sont surtout les techniques géothermiques TBE qui sont concernées, en particulier les techniques exploitant des échangeurs de subsurface. Pour ces techniques, la température de la source froide (source que l'on refroidit en mode chauffage) va fluctuer pendant la saison de chauffe en tendant à accentuer la baisse naturelle de la température du sous-sol.

À l'inverse, les échanges pour le rafraîchissement et la climatisation tendent à induire un accroissement de la température du sous-sol.

Dans tous les cas, les phénomènes thermiques naturels dans le sous-sol tendront à compenser le ΔT vis-à-vis de la température non perturbée du sous-sol.

En définitive pour la présente étude, la température moyenne du sol sera impactée par deux phénomènes : l'incidence des échanges climatiques (voir plus avant) et les puisages thermiques en réponse à la demande des bâtiments.

Dans la représentation simplifiée, on admettra les points suivants :

- les estimations sont exprimées en température (en °C) et elles sont adimensionnées vis-à-vis de la quantité d'énergie en jeu ;
- les données d'entrée essentielles sont :
 - la profondeur médiane de l'ouvrage géothermique. Elle est calculée en saisissant les profondeurs utiles du haut et du bas de l'ouvrage souterrain,
 - le ΔT relatif maximum vis-à-vis de la température non-perturbée pour la profondeur médiane de l'ouvrage géothermique, ce ΔT exprimant la qualité du dimensionnement (voir page précédente),
 - dans la pratique, le dimensionnement est imposé selon les règles de l'art et le référentiel normatif. Il se traduit en particulier par l'imposition d'un ΔT maximum en fin de saison. Les modèles simplifiés admettent ce ΔT en fin de saison et, en cours de saison, la progression mensuelle de l'écart de température vis-vis de la température naturelle non perturbée est estimée à partir des DJU et du puisage thermique (tous usages cumulés) du bâtiment ;
- sauf disposition particulière, la température naturelle du sol correspond à la température initiale non perturbée du sous-sol, c'est-à-dire à la température considérée comme étant en équilibre avec le milieu naturel ;
- les températures naturelles et perturbées du sous-sol sont calculées à partir des données géoclimatiques pour la profondeur médiane de l'ouvrage géothermique ;
- pour tous les cycles annuels successifs, les puisages peuvent repasser par une situation d'équilibre ou être grevés d'une dérive thermique due aux puisages (positive ou négative). Elle est imposée par l'analyste qui peut, en particulier, observer ainsi la sensibilité de la « qualité du dimensionnement ».
Compte tenu des effets naturels qui tendent à compenser les écarts de température, ce décalage ne peut s'accroître indéfiniment et une modération progressive

automatique est introduite dans le modèle. La dérive est indiquée par l'analyste pour l'année 1. Cette dérive sera progressivement atténuée de manière à ce que la dérive thermique cumulée à l'année 10 soit égale à 2 fois la dérive de l'année 1.

Dans la pratique, l'approche simplifiée revient à imposer un **écart relatif maximum** vis-à-vis de la situation nominale référencée à la température non perturbée. Les étapes du raisonnement sont les suivantes :

- proposer un « dimensionnement nominal virtuel » produisant les mêmes effets (exprimés en termes de température du sous-sol) qu'un dimensionnement réel qui appliquerait des ratios recommandés par la littérature :
 - indiquer les profondeurs du haut et du bas de l'ouvrage géothermique enterré afin d'en définir la **hauteur utile**,
 - calculer la profondeur médiane de l'ouvrage géothermique,
 - **fixer un ΔT relatif maximum** vis-à-vis de la température non-perturbée pour la profondeur médiane de l'ouvrage géothermique. Ce ΔT relatif est l'indicateur de la « qualité » du dimensionnement introduit plus avant dans le présent document,
 - fixer l'éventuel taux de dérive annuelle (en °C pour le cycle 1) ;
- en cours de saison, estimer à chaque instant (chaque mois dans la présente étude) la température du sous-sol pour la profondeur médiane de l'ouvrage souterrain :
 - calculer, selon le profil de demande du bâtiment (proportion d'ECS, Chauffage, Froid et Frais en un an), les demandes mensuelles d'ECS, Chauffage, froid et frais (par défaut, le dispositif géothermique est dimensionné sur le chaud). Cette demande reste adimensionnée,
 - estimer, pour les cycles successifs, le ΔT mensuel relatif vis-à-vis de la température non-perturbée en additionnant (en respectant le sens des échanges thermiques) les demandes pour du Chaud (chauffage + ECS), du frais et du froid,
 - imputer l'éventuelle dérive thermique au fil des cycles successifs,
 - calculer, pour les cycles annuels successifs, la résultante mensuelle de la température du sous-sol perturbée par les demandes thermiques.

Important. La température de la source résulte des effets cumulés des quatre usages Chauffage, ECS, Climatisation et/ou rafraîchissement. En saison estivale, la demande en froid peut donc, par exemple, compenser la demande en chaud.

Les illustrations ci-après reprennent les climats extrêmes de Bourg-en-Bresse et d'Ajaccio pour plusieurs typologies des demandes thermiques. Les échangeurs pris en considération sont des corbeilles géothermiques implantées entre -1 m de profondeur et -4 m de profondeur. Dans les deux cas, le dimensionnement a été estimé en mode chauffage pour un ΔT maximum de -7 °C vis-à-vis de la température non perturbée du sous-sol à -2,5 m de profondeur. Le cas de Bourg-en-Bresse montre un « **pré-dimensionnement normal** » qui évite une température mensuelle trop négative.

Pour tous les cas de figure, les estimations des demandes ont été estimées sur la base des DJU calculées sur le lieu des stations météo à partir de la température de l'air extérieur et de l'éventuelle correction d'altitude :

- DJU chauffage calculés à 18 °C (source NASA/RESTSCREEN) ;
- DJU de climatisation calculés à 10 °C (source NASA/RESTSCREEN) ;
- DJU de rafraîchissement calculés à 18 °C.

Sur l'exemple ci-après (fig. 10), on peut constater que les corbeilles géothermiques dimensionnées sur la base du mode chauffage sont à même de satisfaire la température de confort tant en mode rafraîchissement (en haut) qu'en mode climatisation (en bas), la température de l'ouvrage restant dans des gammes de températures raisonnables et compatibles avec un rafraîchissement direct.

Sur l'exemple ci-après (fig. 11), on constate que les corbeilles géothermiques ne peuvent pas assurer la température de confort en mode rafraîchissement (en haut) et que le mode climatisation (en bas), dimensionné sur la base du mode chauffage, conduirait à une surchauffe très significative du proche sous-sol.

L'illustration ci-après (fig. 12) reprend le cas d'Ajaccio de la page antérieure avec climatisation ou rafraîchissement en ajoutant une production d'ECS calibrée pour une demande annuelle sensiblement comparable à celle du chauffage. Le dimensionnement nominal modélisé est pour un ΔT maximum de -7 °C pour la demande cumulée de chaud (chauffage + ECS).

Dans ce contexte, on constate que la production d'ECS par le système géothermique conduit à une température du sous-sol proche d'une compatibilité avec du rafraîchissement direct, la température du sous-sol étant abaissée de quelques degrés (panneau supérieur du graphique). On constate évidemment le même effet sur le mode climatisation (panneau du bas). Pour ce dernier cas, il est à noter que, sans ECS, le dimensionnement de la géothermie serait, en principe, à calibrer sur la base de la climatisation et non pas sur celle du chauffage.

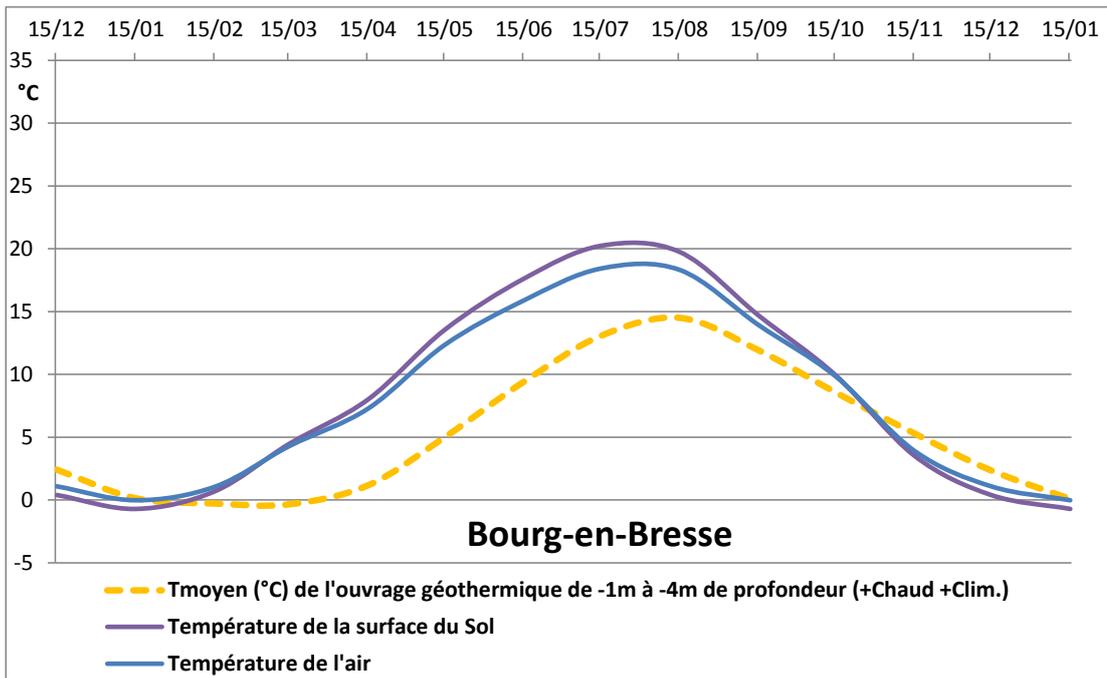
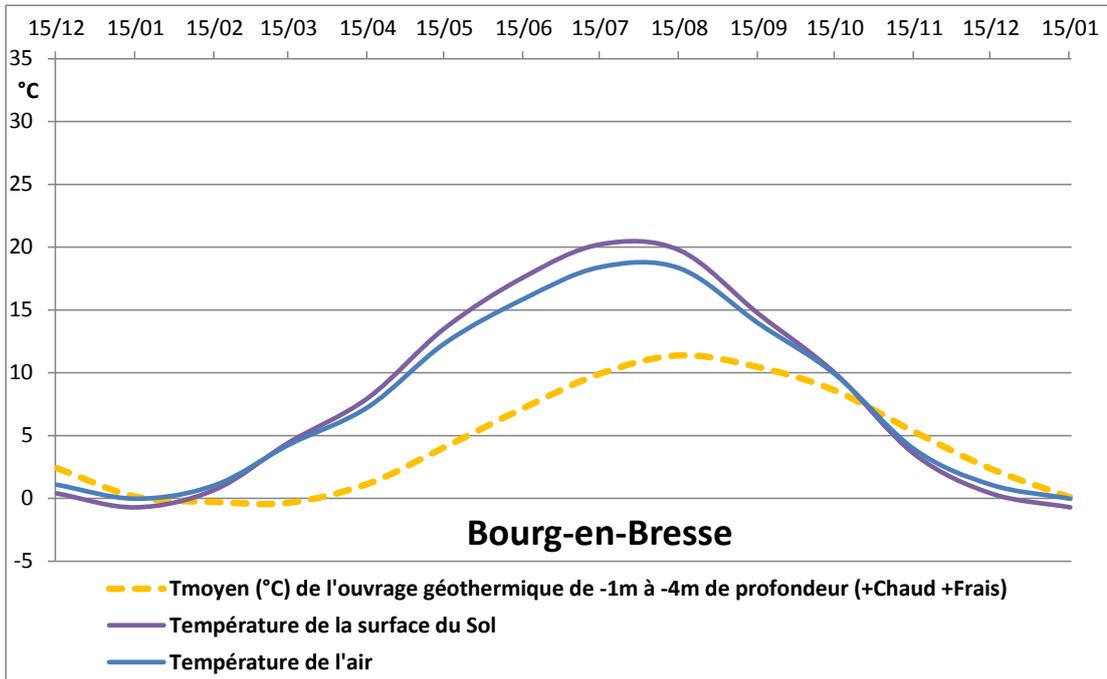


Figure 10 : Exemple de température saisonnière de corbeilles géothermiques normalement dimensionnées pour deux modes d'usage estival - Cas d'un climat froid : Bourg-en-Bresse.

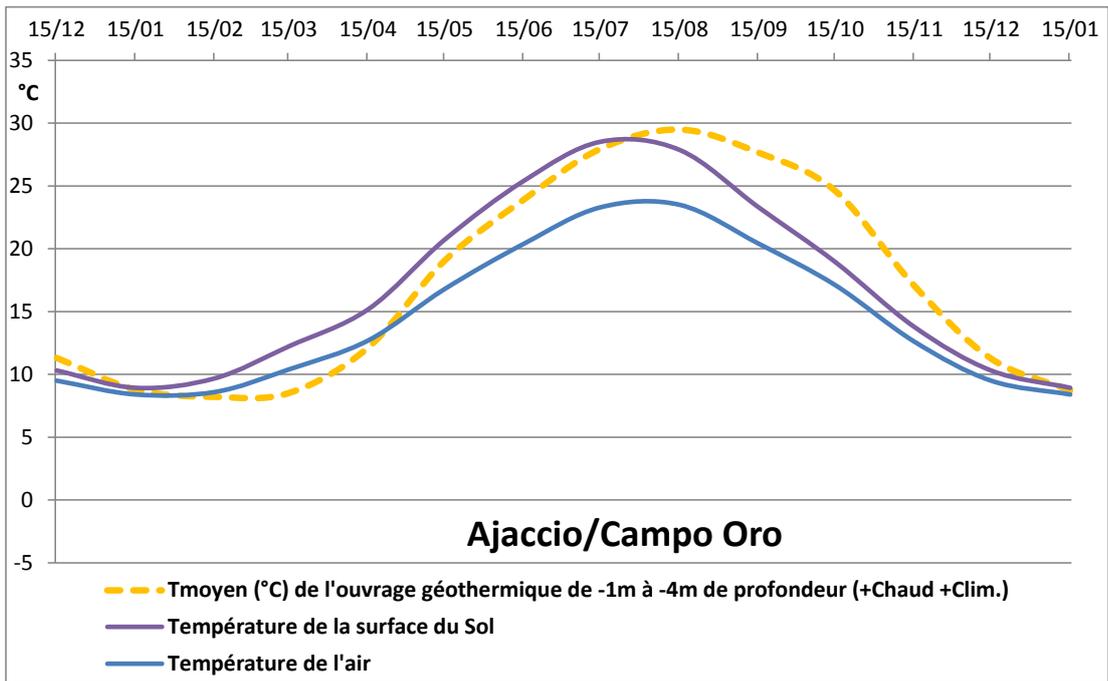
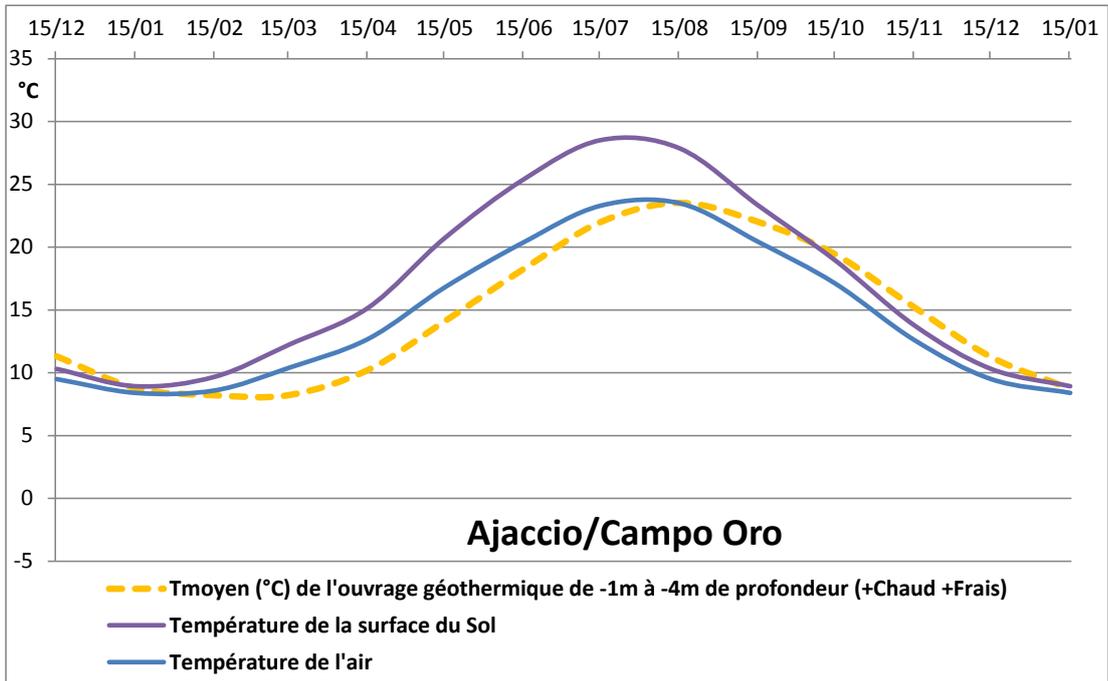


Figure 11 : Exemple de température saisonnière de corbeilles géothermiques normalement dimensionnées pour deux natures des usages estivaux - Cas d'un climat chaud : Ajaccio.

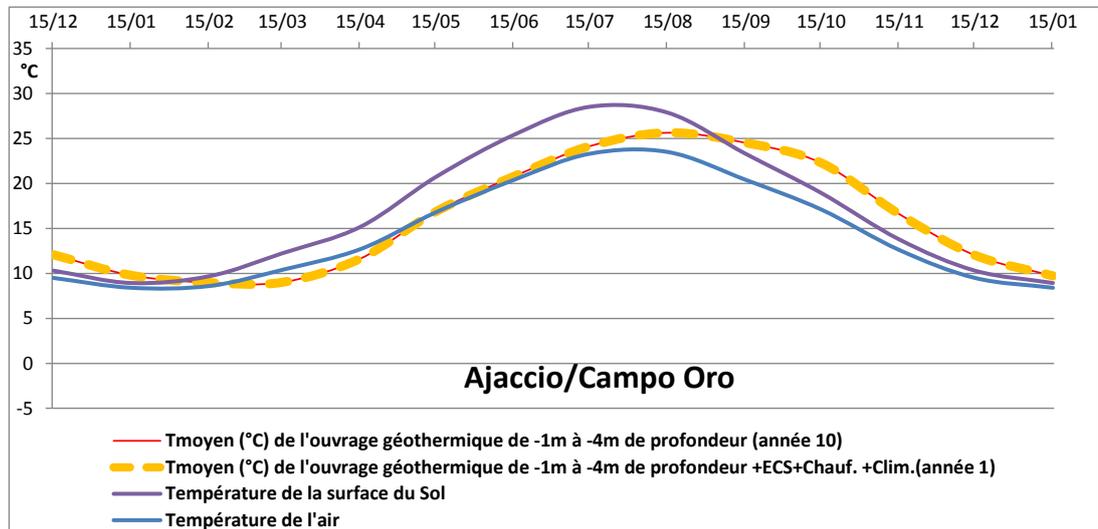
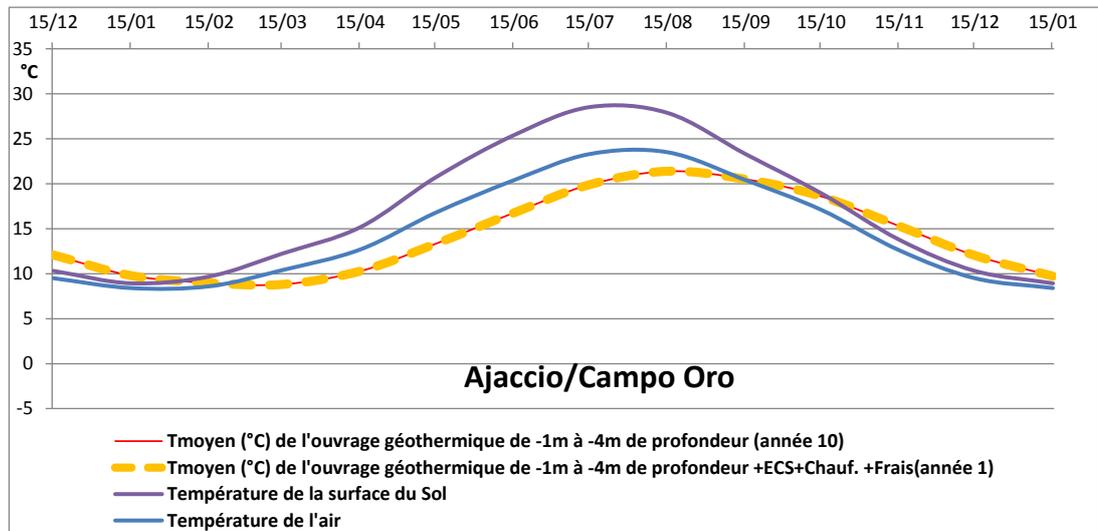


Figure 12 : Exemple de comparaison des modes climatisation ou rafraîchissement en présence d'ECS pour des corbeilles géothermiques - Cas d'un climat chaud : Ajaccio.

3.3.2. Modèles simplifiés de source géothermique majoritairement sensible aux usages (Cas 2)

Ce cas s'applique aux échangeurs géothermiques implantés suffisamment profonds pour ne pas être significativement influencés par les échanges avec l'atmosphère. Typiquement, c'est le cas des sondes géothermiques.

Pour les sondes géothermiques (éventuellement en champ) l'évolution de la température dépend presque exclusivement de la quantité d'énergie qui est échangée, cette quantité d'énergie étant pilotée par la demande du bâtiment, c'est-à-dire par la température extérieure (via les DJU dans le présent modèle).

Dans le modèle simplifié, on considère que le dimensionnement est effectué pour satisfaire des critères de performance thermique dont l'indicateur est la température du sous-sol. De ce fait, la quantité d'énergie réellement échangée n'intervient pas directement sur la température du sous-sol, le calcul étant adimensionné vis-à-vis de ce paramètre.

Expression du paramétrage de la température de la ressource

Pour les dispositifs géothermiques concernés (sondes géothermiques et assimilés), on considèrera que tous les cycles annuels successifs de demande sont similaires. Dans la représentation simplifiée, comme pour les dispositifs géothermiques à faible profondeur, on admettra les points suivants :

- sauf disposition particulière, la température naturelle du sol correspond à la température initiale non perturbée du sol, c'est-à-dire à la température considérée comme étant en équilibre avec le milieu naturel. La température du sous-sol est calculée automatiquement à partir des données géoclimatiques de la station ;
- pour tous les cycles annuels successifs, on considèrera que les paysages sont identiques et qu'il n'y a pas de dérive thermique d'un cycle à l'autre dû aux paysages en dehors d'une valeur que peut imposer l'analyste ;
- la donnée d'entrée prioritaire est le ΔT relatif maximum vis-à-vis de la température non-perturbée pour la profondeur médiane de l'ouvrage géothermique ;
- l'analyste pourra imposer un décalage thermique (ou une dérive), positif ou négatif, pour observer la sensibilité de la « qualité du dimensionnement ».

Important : La présente étude entend s'affranchir des conditions strictement locales, en particulier l'hydrogéologie du milieu. De ce fait, les profils thermiques sont relativement arbitraires. Ils représentent l'effet d'une classe de dimensionnement vis-à-vis du milieu naturel :

- un surdimensionnement des échangeurs géothermiques atténue les effets thermiques. Cela se matérialise par un ΔT relatif maximum vis-à-vis de la température non-perturbée qui reste restreint, par exemple inférieur à 4 °C ;
- un sous-dimensionnement des échangeurs géothermiques accentue les effets thermiques. Cela se matérialise par un ΔT relatif maximum vis-à-vis de la température non-perturbée accentué, par exemple supérieur à 10 °C.

Dans le modèle simplifié, les effets liés à la succession du mode chauffage et d'un mode de rafraîchissement sont cumulables (superposables). Dans la présente étude, on admet un dimensionnement par défaut sur la base du mode chauffage, les modes rafraîchissement et/ou climatisation prenant toutefois automatiquement le dessus s'ils sont dominants. Les estimations des demandes sont produites sur la base des DJU calculées sur le lieu des stations météo à partir de la température de l'air extérieur après correction d'altitude :

- DJU chauffage calculés à 18 °C (source NASA/RESTSCREEN) ;
- DJU de climatisation calculés à 10 °C (source NASA/RESTSCREEN) ;

- DJU de rafraîchissement recalculés à 18 °C.

Dans ce cadre, pour un système de sondes géothermiques, l'approche simplifiée consiste à fixer les conditions d'un fonctionnement nominal en les traduisant en matière de ΔT relatif maximum vis-à-vis de la température non-perturbée, ce ΔT relatif maximum concernant la profondeur médiane de l'ouvrage géothermique.

On retrouve en cela exactement le même principe que pour les échangeurs géothermiques de subsurface :

Qualité du dimensionnement des ouvrages géothermiques verticaux	Température du sol au voisinage de la profondeur médiane de l'ouvrage	
	Valeurs représentatives pour le ΔT	Valeurs cible relativement à la température non-perturbée
sous-dimensionnée	ΔT de -7 °C à -11 °C	Tnon-perturbée - 10 °C
normalement dimensionnée	ΔT de -3 °C à -7 °C	Tnon-perturbée - 7 °C
surdimensionnée	ΔT de -1 °C à -3 °C	Tnon-perturbée - 3 °C

Tableau 10 : Exemple de valeurs cibles des températures en fin de saison pour le dimensionnement des échangeurs géothermiques souterrains.

Nota : un paramètre supplémentaire est mis à disposition de l'analyste pour lui permettre la prise en considération des dérives thermiques qui résultent d'un écart vis-à-vis du dimensionnement nominal.

On pourra utiliser ce paramètre pour éventuellement simuler l'effet de l'injection dans le sous-sol d'une énergie excédentaire, par exemple d'origine solaire, éventuellement ajoutée à de la climatisation ou du rafraîchissement.

Les illustrations ci-après reprennent les climats extrêmes de Bourg-en-Bresse puis d'Ajaccio pour plusieurs typologies des demandes thermiques. Les échangeurs pris en considération sont des sondes géothermiques dont la hauteur utile de 100 m a été localisée entre -5 m de profondeur et -105 m.

Dans tous les cas, le dimensionnement a été estimé en mode chauffage pour un ΔT maximum de -7 °C vis-à-vis de la température non perturbée à -52,5 m de profondeur.

Le cas de Bourg-en-Bresse montre un « **pré-dimensionnement normal** », c'est-à-dire évitant une température (mensuelle) du sous-sol trop négative. En fait, cette température reste positive.

Pour le cas d'Ajaccio, la question ne se pose même pas.

Sur l'exemple de Bourg-en-Bresse ci-avant (fig. 13), on constate que la sonde géothermique dimensionnée sur la base du mode chauffage peut assurer efficacement la température de confort en mode rafraîchissement et en mode climatisation, ce dernier mode semblant pouvoir être évité puisque la température du sous-sol reste sous 15 °C.

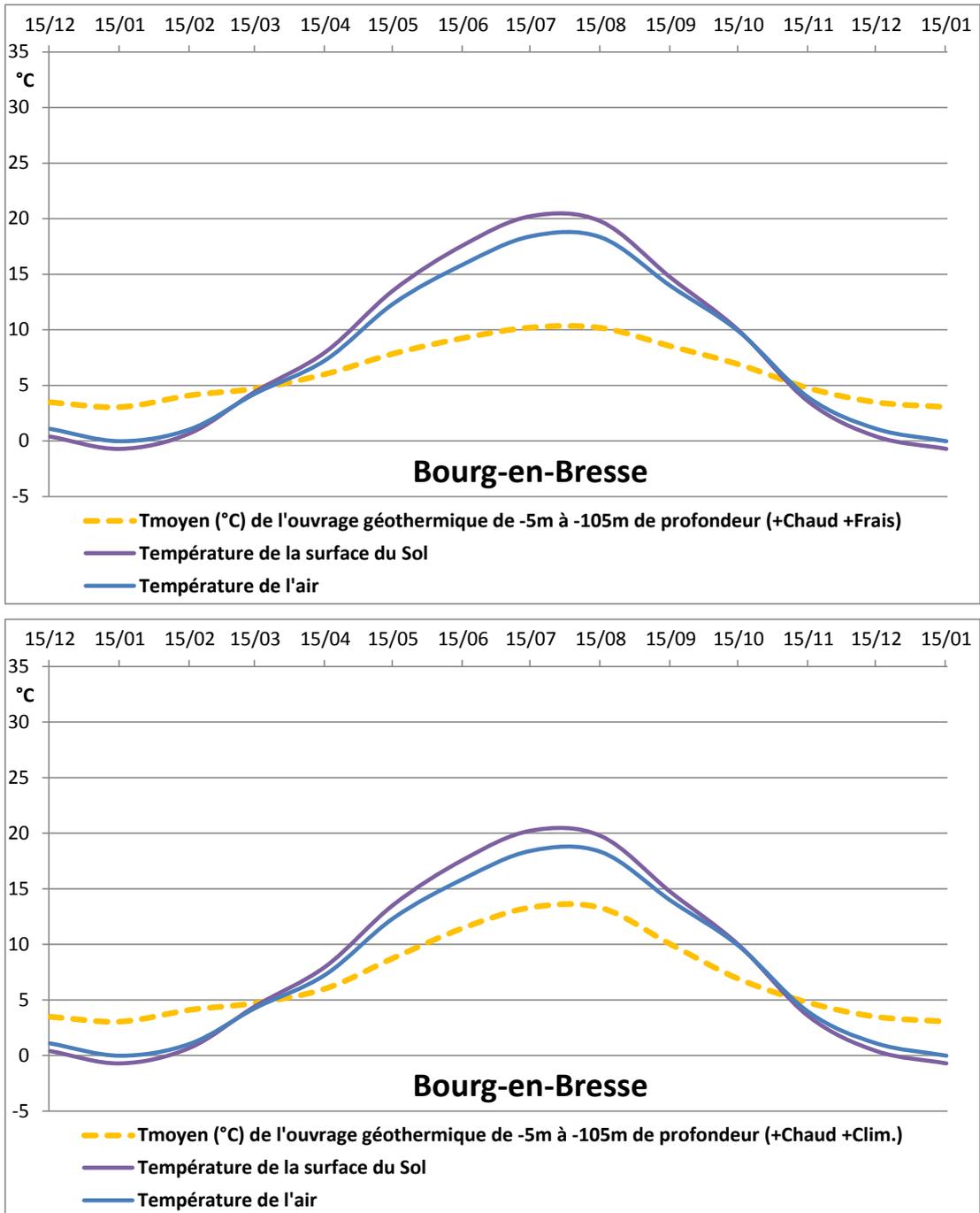


Figure 13 : Exemple de température saisonnière d'une sonde géothermique normalement dimensionnée pour deux modes de refroidissement - Cas d'un climat froid : Bourg-en-Bresse.

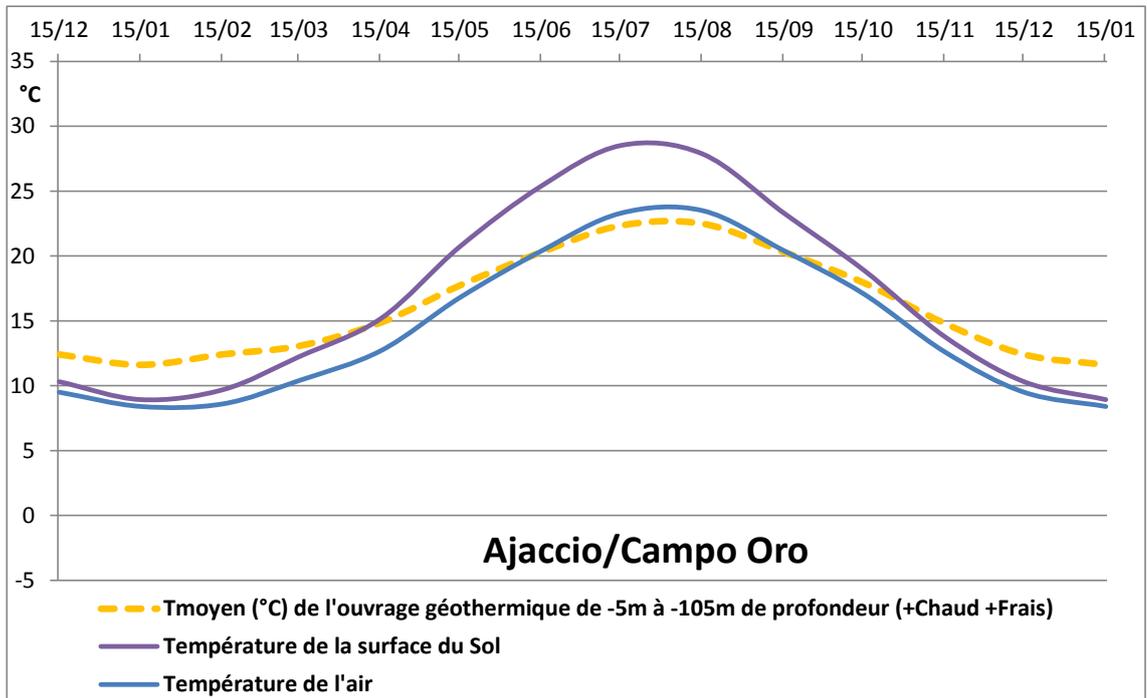
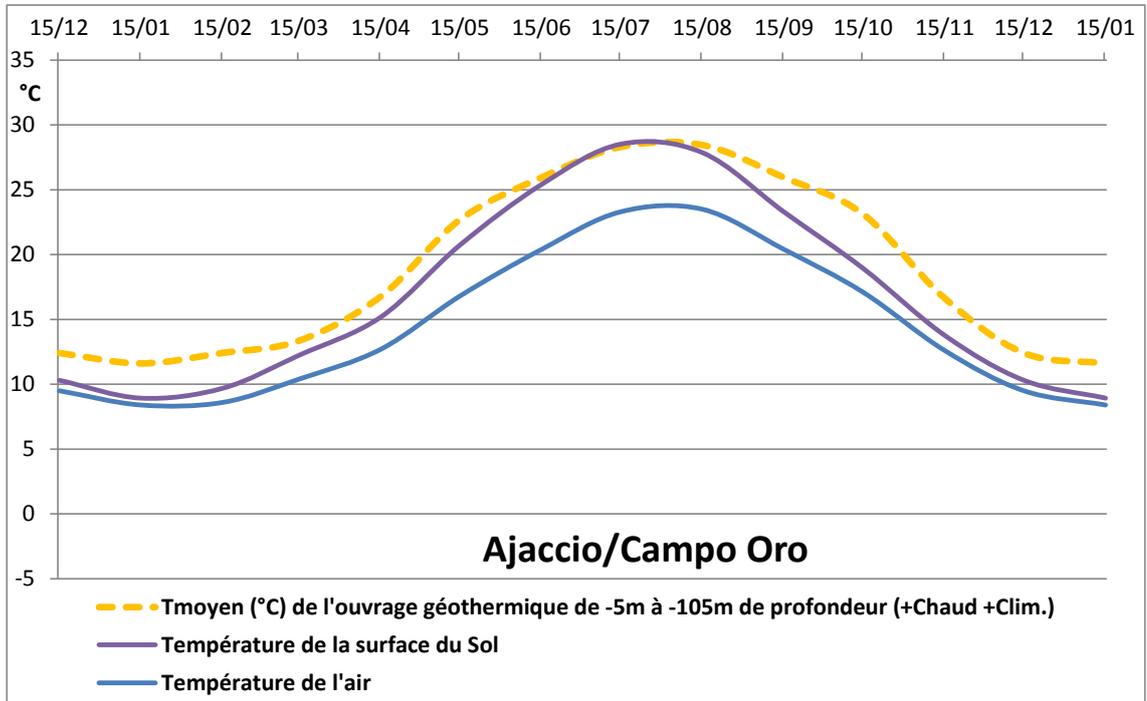


Figure 14 : Exemple de température saisonnière d'une sonde géothermique normalement dimensionnée pour deux modes de refroidissement - Cas d'un climat chaud : Ajaccio.

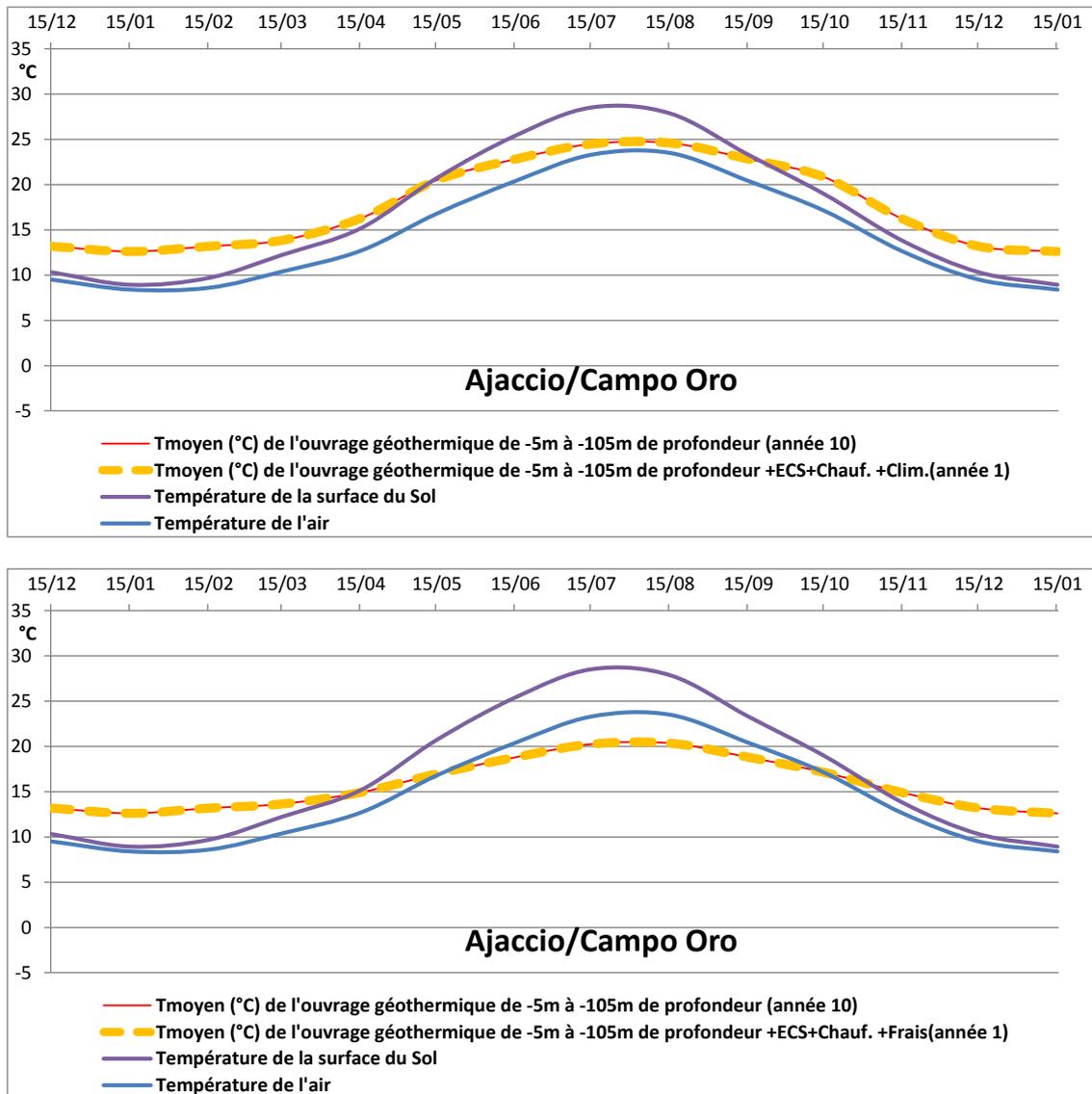


Figure 15 : Exemple de comparaison des modes climatisation ou rafraîchissement en présence d'ECS pour des sondes géothermiques - Cas d'un climat chaud : Ajaccio.

Sur l'exemple d'Ajaccio (fig. 14), on constate que la sonde géothermique ne peut pas assurer la température de confort en mode rafraîchissement et que le mode climatisation dimensionné sur la base du mode chaud (Chauffage seul) conduit à une surchauffe significative du sous-sol.

Toujours pour l'exemple d'Ajaccio, en introduisant la production d'ECS dans le système géothermique (fig. 15), on peut effectuer les constats suivants :

- contrairement au cas sans ECS, le dimensionnement est effectué sur un mode chaud qui véhicule annuellement une quantité d'énergie plus importante que le mode climatisation ;

- la production d'ECS abaisse (pour le cas pris en exemple) la température estivale du sous-sol de quelques degrés, ce qui améliore d'autant l'efficacité énergétique de la machinerie thermodynamique ;
- le mode rafraîchissement direct devient pratiquement opérationnel ; ce qui n'était pas le cas sans ECS – reste à savoir si un dispositif de type thermo-frigo-pompe ne serait pas préférable mais cette analyse sort du domaine des modèles simplifiés.

3.3.3. Modèles simplifiés de source géothermique à température constante (Cas 3)

Pour les dispositifs géothermiques sur nappe aquifère, la température de la ressource géothermique restera considérée comme constante toute l'année et d'une année à l'autre.

À noter que, dans le cas de concentrations d'exploitations géothermiques ou de systèmes de stockage périodiques, la température d'une nappe aquifère peut évidemment varier mais ce cas ne figure pas dans le périmètre « standard » de la présente étude.

Les dispositifs concernés en priorité par cette étude sont des doublets géothermiques.

On distinguera les cas suivants :

- le doublet géothermique est exploité uniquement pour du chauffage. Selon la profondeur de la ressource, il pourra s'agir d'une technique géothermique de basse énergie (BE – ressource comprise typiquement entre 30 °C et 90 °C) ou de très basse énergie (TBE – ressource à moins de 30 °C) ;
- le doublet géothermique peut être exploité pour du chauffage et/ou pour du rafraîchissement. Typiquement, il s'agira d'une technique géothermique de très basse énergie (TBE) dont la ressource sera inférieure à 20 °C ;
- le doublet géothermique est exploité exclusivement pour du rafraîchissement et/ou de la climatisation. Typiquement, il s'agira d'une technique géothermique de très basse énergie (TBE) dont la ressource sera inférieure à 16 °C.

Expression du paramétrage de la température de la ressource

Dans la représentation simplifiée des nappes aquifères, on admettra que :

- sauf disposition particulière, la température de l'aquifère correspond à la température initiale non perturbée du sol à la profondeur désignée pour la nappe aquifère calculée à partir des sources NASA/RETSCREEN ;
- les puisages sont identiques pour tous les cycles annuels successifs ;
- il est apporté à l'analyste la possibilité d'imposer une dérive thermique, positive ou négative, pour, par exemple, observer la sensibilité à une éventuelle perturbation générée par des ouvrages voisins (situation non standard).

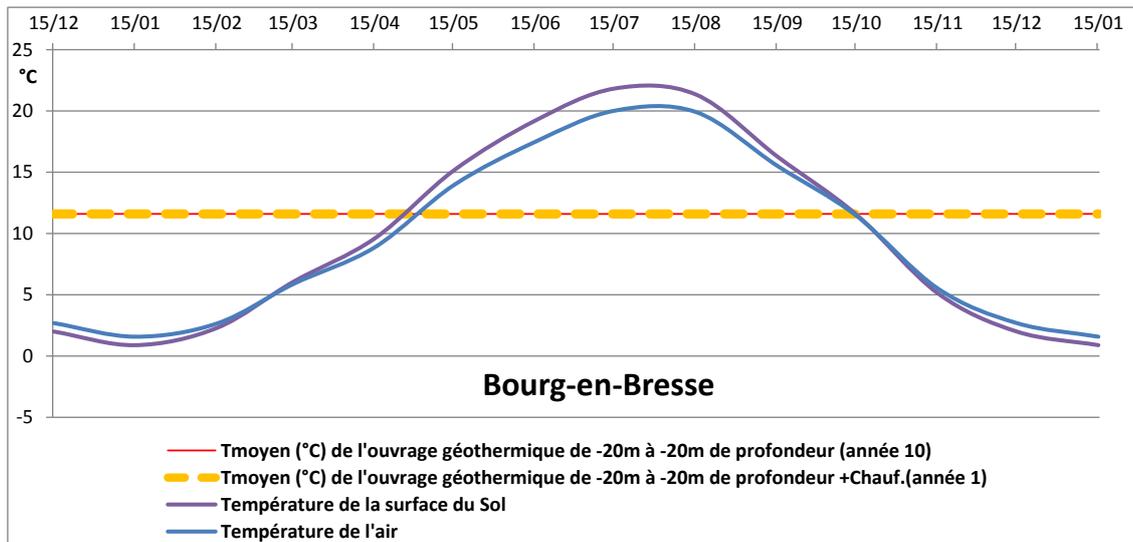


Figure 16 : Exemple de température d'une nappe aquifère sollicitée pour du chauffage et du rafraîchissement - Cas d'un climat froid : ville de Bourg-en-Bresse (nappe des cailloutis).

La figure 17 illustre le modèle de détermination de la température non-perturbée du sous-sol qui est employée pour déterminer la température d'une nappe aquifère. Dans le cas ci-avant, proximité de la ville de Bourg-en-Bresse (altitude 200 m) située en contrebas de la station météo (élévation 445 m), la température atmosphérique annuelle moyenne est de 8,91 °C et la température annuelle moyenne de la surface du sol est de 11 °C (9,40 °C à la station). Le gradient géothermique est fixé à 3 °C/100 m.

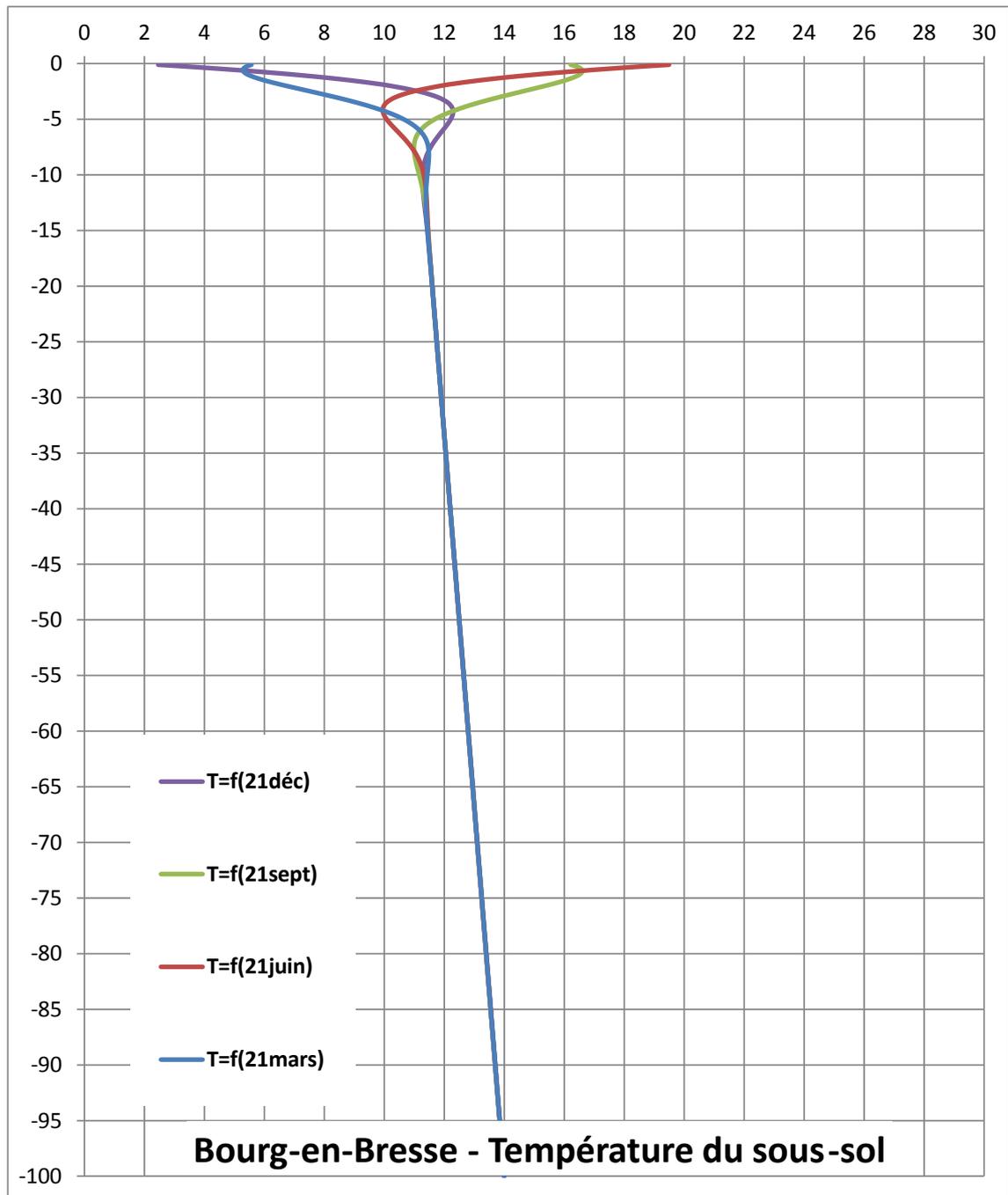


Figure 17 : Allure des profils thermiques - Cas d'un climat froid : Bourg-en-Bresse.

Dérive thermique pour une nappe aquifère

Le modèle simplifié permet de traiter sommairement le cas des dérives thermiques des aquifères. Ainsi, comme illustré par l'exemple ci-dessous, l'analyste peut traiter le cas d'une forte densité de climatisations géothermiques dans un voisinage donné,

l'analyste devant veiller à introduire des paramètres qui produisent des effets réalistes, car le modèle implémenté reste sommaire.

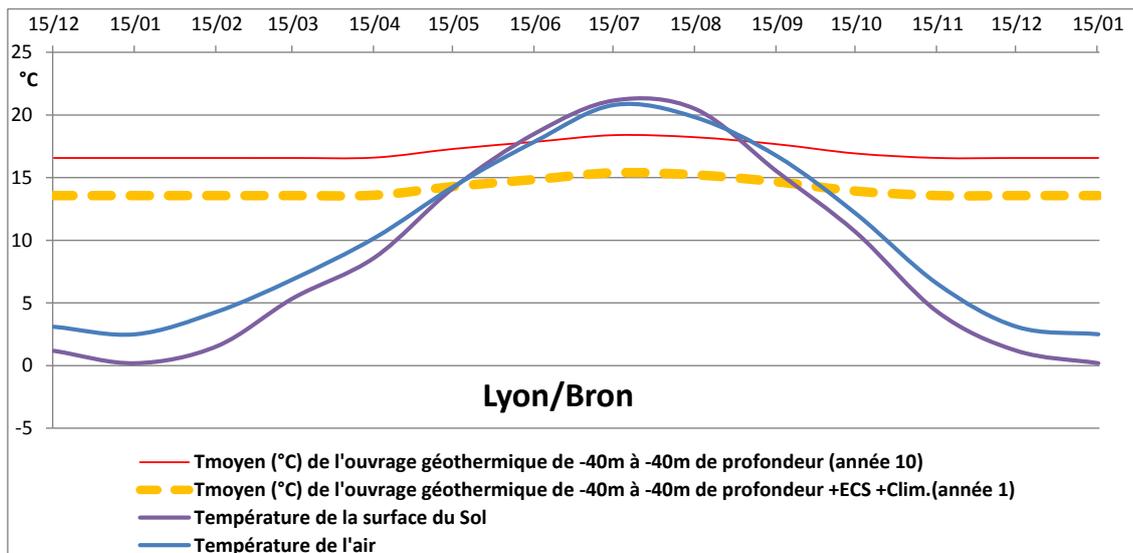
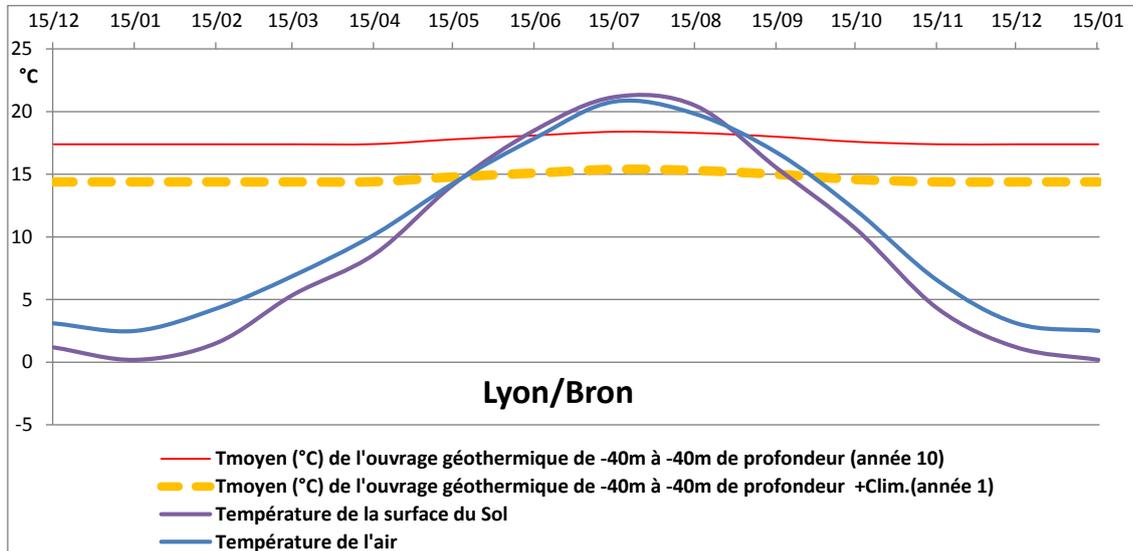


Figure 18 : Exemple de dérive thermique d'un aquifère sollicité par des climatisations et de l'atténuation par du prélèvement pour de d'ECS - Cas d'un secteur urbanisé : Lyon.

3.4. MODÈLE DE MACHINERIE THERMODYNAMIQUE

Dans cette étude, la machinerie thermodynamique reste décrite de manière adimensionnée vis-à-vis des énergies thermiques en jeu même si le modèle de bâtiment fournit une répartition entre les différents usages : chauffage, ECS, rafraîchissement et/ou climatisation.

La performance énergétique est rapportée à la température de la source géothermique (source chaude en mode climatisation et source froide en mode chauffage ou ECS).

Alors que, physiquement, le COP d'une pompe à chaleur dépend de la température d'entrée de l'eau (ou de la saumure), les modèles simplifiés se réfèrent à la température de la source. Ainsi, pour un COP machine donné en régime nominal et selon la nature de la source géothermique, les modèles simplifiés vont se référer aux évolutions de la température de cette source géothermique (source chaude ou froide selon l'usage) pour constituer un profil réaliste du COP sur la durée d'un cycle annuel, le pas de temps mensuel étant retenu pour la présente étude.

La détermination des consommations pour la circulation des fluides découle indirectement du modèle de COP. En effet, le temps de fonctionnement des circulateurs de la boucle géothermale (seule circulation de fluide traitée dans la présente étude) est directement lié au temps de fonctionnement de la PAC, lequel est directement relié au COP.

En définitive, cette approche simplifiée permet de traduire la sensibilité du fonctionnement (dont la consommation d'énergie électrique) lorsque la température de la source évolue en cours de saison, notamment en raison de la sollicitation par le dispositif géothermique ou sous l'incidence des échanges climatiques (cas des échangeurs géothermiques de subsurface).

3.4.1. Modèle simplifié de COP en mode chauffage

Le COP (coefficient de performance) est utilisé pour exprimer, à sa charge nominale, l'efficacité d'une pompe à chaleur, usuellement en mode chauffage. On parle alors de COP-Machine.

Physiquement, le COP est le rapport entre l'énergie utile (délivrée à l'utilisateur) et l'énergie qui a dû être fournie (énergie consommée pour entraîner le compresseur dans le cas d'une PAC).

Usuellement, on va considérer que le COP machine est connu pour une température de la source géothermique (source froide en mode chauffage) testée par le constructeur, par exemple 12 °C. Dans le cas réel, les points de fonctionnement tiennent aussi compte de la température de la source chaude.

En mode chauffage, ce COP va évoluer de façon croissante avec l'augmentation de la température de la source froide. Il va évoluer de façon décroissante avec la baisse de la température de cette même source froide.

IMPORTANT : Dans cette étude, par simplification, on convient de retenir une variation progressive du COP en fonction de la température de la source froide à raison de **3 % par °C** (progression non linéaire).

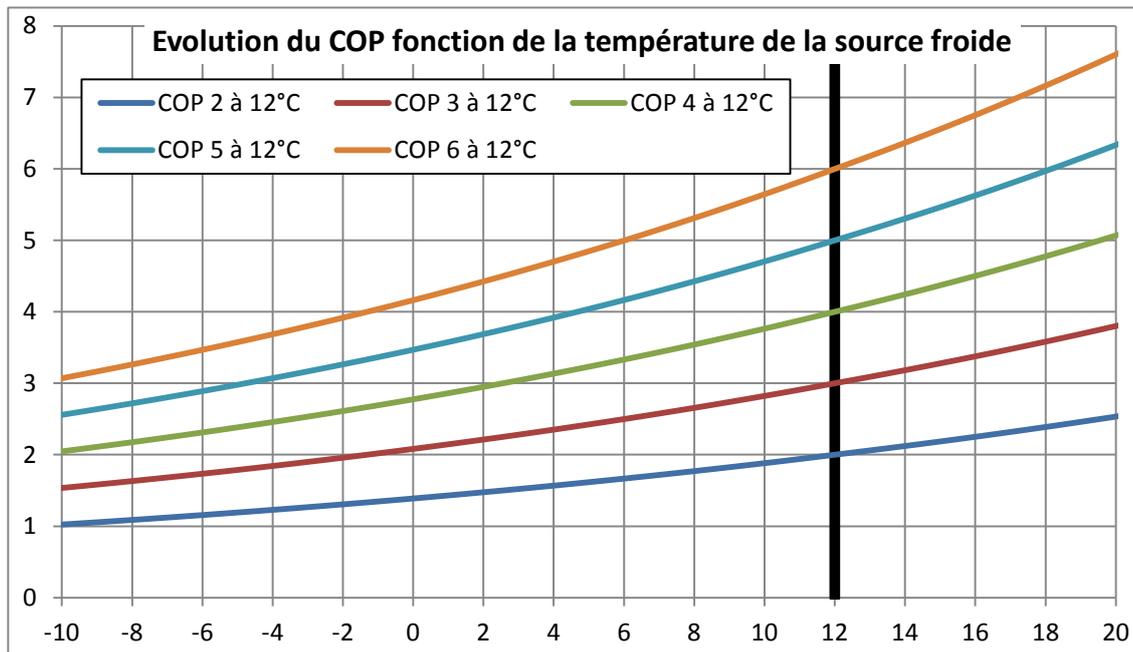


Figure 19 : Évolution du COP_{chaud} fonction de la température de la source froide. Cas d'une évolution à raison de 3 % par °C (COP nominal donné pour 12 °C).

Dans la pratique, ces courbes ci-dessus peuvent être approximées (à ± 0,5 % entre -10 °C et 20 °C) par une fonction de type :

$$\text{COP}_{\text{chaud}} = \text{COP}_{0\text{-chaud}} \times e^{0.030269 \times T}$$

où :

- COP_{0-chaud} est le COP machine à 0 °C (voir tableau ci-dessous) ;
- T est la température de la source froide pour laquelle on veut connaître le COP.

Le tableau ci-après propose les valeurs de COP_{0-chaud} pour différentes valeurs du COP machine à une température de référence donnée :

Tr : température de référence à laquelle le COP est donné par le constructeur	Valeur de COP ₀
2 °C	COP _{0-chaud} = COP _{2-chaud} × 0.94090
4 °C	COP _{0-chaud} = COP _{4-chaud} × 0.88529
6 °C	COP _{0-chaud} = COP _{6-chaud} × 0.83297
8 °C	COP _{0-chaud} = COP _{8-chaud} × 0.78374
10 °C	COP _{0-chaud} = COP _{10-chaud} × 0.73742
12 °C	COP _{0-chaud} = COP _{12-chaud} × 0.69384
14 °C	COP _{0-chaud} = COP _{14-chaud} × 0.65284
16 °C	COP _{0-chaud} = COP _{16-chaud} × 0.61425
18 °C	COP _{0-chaud} = COP _{18-chaud} × 0.57795
Tr entre 2 °C et 18 °C	COP_{0-chaud} = COP_{Tr-chaud} × e^{-0.03046 × Tr}

Tableau 11 : Source froide - Paramétrage de l'approximation des courbes du COP_{chaud}.

3.4.2. Modèle simplifié de COP en mode climatisation

En mode climatisation, l'efficacité énergétique fonction de la température de la source géothermique (source chaude) évolue en sens inverse du mode chauffage. Cette efficacité peut être dénommée EER (Energy efficiency ratio), ce qui permet d'éviter la confusion avec le COP en mode chauffage. L'EER est identique au COP_{froid} mais, parfois, les unités peuvent être différentes !

En mode climatisation, ce qui compte, c'est la chaleur extraite du bâtiment (chaleur absorbée à l'évaporateur de la PAC). En reprenant la définition du COP comme étant le rapport entre l'énergie utile et l'énergie absorbée par le compresseur, le COP_{froid} est obtenu à partir du COP_{chaud} par la formule :

$$COP_{\text{froid}} = COP_{\text{chaud}} - 1$$

Important. Cette relation n'est valide qu'à condition que les températures des sources chaudes et froides restent comparables ; la source froide étant le bâtiment en mode climatisation et la source géothermique en mode chauffage. **Or, ce n'est pratiquement jamais le cas avec les pompes à chaleur géothermiques car les conditions normalisées des essais sont différentes.**

Les données des constructeurs peuvent donc indiquer un COP_{froid} supérieur au COP_{chaud} et une puissance frigorifique également supérieure. Physiquement, la sensibilité du COP_{froid} aux fluctuations de la température de la source géothermique est moindre que celle du COP_{chaud} . Néanmoins, pour la présente étude, il est proposé de rester sur le même ratio de 3 % par tranche de 1 °C.

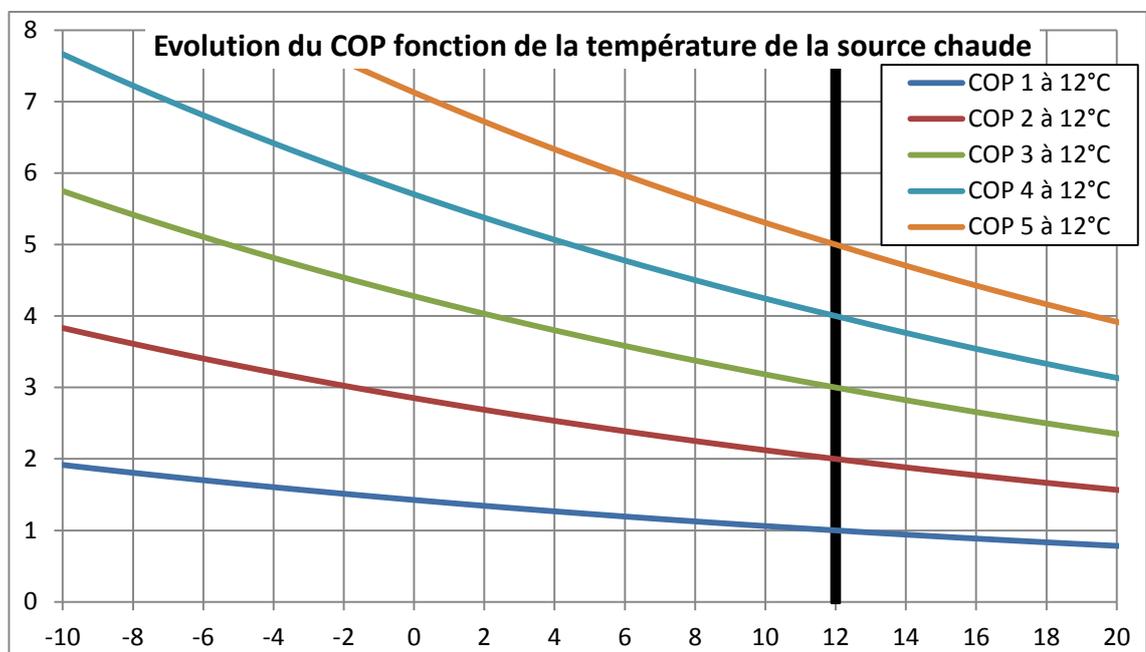


Figure 20 : Allures des évolutions du COP_{froid} fonction de la température de la source géothermique - Cas d'une évolution à raison de 3 % par °C.

Avec une approche similaire à celle du COP_{chaud} , on peut représenter les évolutions du COP_{froid} en fonction de la température de la source géothermique par une fonction de type :

$$COP_{froid} = COP_{0-froid} \times e^{-0.0297494 \times T}$$

où : - $COP_{0-froid}$ est l'ordonnée à l'origine de la courbe du COP machine pour la source géothermique exploitée (voir ci-après),

- T est la température de la source froide pour laquelle on veut connaître le COP.

Sur le même principe que pour le COP_{chaud} , il est proposé une formule simplifiée pour déterminer $COP_{0-froid}$ en fonction de la température T_r de référence de la source géothermique (température moyenne non perturbée) :

$$COP_{0-froid} = COP_{T_r-froid} \times e^{0.0295586 \times T_r}$$

Important. Pour une machine thermodynamique donnée, il convient d'indiquer un COP_{froid} (mode climatisation) réaliste vis-à-vis du COP_{chaud} de la même machine en mode chauffage. L'outil RETSCREEN propose des données par défaut suivantes correspondant à des conditions d'essai normalisées :

Classe de rendement de la PAC	COP_{chaud} (Tintérieur 21 °C)	COP_{froid} (Tintérieur 27 °C)
Standard	2.8	3.5
Moyen	3.2	4.5
Elevé	4.0	5.5

Tableau 12 : Ordres de grandeur des COP chaud et froid.

Dans la pratique, on pourra admettre que le ratio COP_{froid} rapporté au COP_{chaud} se situe entre 1.2 et 1.4, le ratio puissance frigorifique rapportée à la puissance en mode chaud se situant entre 1.1 et 1.4.

Dans la présente étude, il est proposé un ratio COP_{froid} rapporté au COP_{chaud} par défaut égal à 1.2, cela pour une même consommation d'énergie électrique du compresseur.

3.4.3. Modèle simplifié de COP en mode rafraîchissement direct

En mode rafraîchissement direct, le COP machine ne sera pas utilisé, l'énergie de circulation étant comptabilisée par ailleurs.

3.4.4. Modèle simplifié de COP en géothermie BE

La géothermie BE est appliquée exclusivement aux usages directs de la chaleur géothermale. Par définition, le COP machine ne sera pas utilisé, l'énergie de circulation étant comptabilisée par ailleurs.

3.5. MODÈLE DE CHRONIQUES DE CONSOMMATION ÉLECTRIQUE SPÉCIFIQUE ET DE TEMPS DE FONCTIONNEMENT

Les chroniques de consommation spécifique d'énergie électrique et de temps de fonctionnement constituent des informations essentielles des analyses :

- la consommation électrique spécifique et le temps de fonctionnement par défaut proviennent de la solution de référence : géothermie sur nappe aquifère pour la production de chaud (chauffage et/ou ECS) et pour la production de frais (climatisation et/ou rafraîchissement) ;
- les écarts vis-à-vis de cette solution de référence traduisent deux grandes familles de phénomènes :
 - l'impact d'un COP différent qui, souvent, est lié à une évolution de la température de la source géothermique,
 - l'impact d'un dimensionnement différent du nominal (volontaire ou subi).

Dans tous les cas, les impacts, positifs ou négatifs, seront visibles sur les budgets.

Dans la présente étude, on va considérer que les temps de fonctionnement nominaux s'appliquent à la machinerie thermodynamique. Dans la réalité, ils peuvent différer des temps de sollicitation des ouvrages géothermiques en cas de tampon et/ou de système de type thermo-frigo-pompe ou assimilé.

L'approche simplifiée qui a été développée considère que :

- Les machineries thermodynamiques sont à puissance motrice constante. Une puissance variable pourrait être représentée, par paliers, en superposant plusieurs machineries de puissances fixes. Ce cas n'est pas discuté par la présente étude. Dans l'approche simplifiée, une PAC à compresseur électrique consommera une énergie électrique constante dès lors qu'elle est en fonctionnement. Autrement dit, si le COP baisse, l'énergie livrée baisse et si le COP monte, l'énergie livrée augmente alors que la consommation électrique est constante. La traduction pratique est que l'incidence d'une fluctuation de la valeur du COP est directement matérialisée par le temps de fonctionnement de la machinerie thermodynamique.
- Sauf indication contraire, les pompes et circulateurs seront à puissance constante.
- Dans une première étape, les temps de fonctionnement sont calculés séparément pour chacun des quatre usages qui peuvent solliciter l'ouvrage géothermique.
- Le modèle simplifié considèrera ensuite que le temps de fonctionnement résultant suivra une loi qui régit le cumul et/ou la mutualisation des demandes thermiques des quatre usages possibles : Chaud = ECS + Chauffage, Froid et frais, ce dernier usage ne sollicitant pas la PAC.

Ce point est discuté plus avant dans le présent document.

3.5.1. Modèle simplifié de consommation électrique spécifique

Le COP nominal est donné pour le mode chaud et la température supposée de l'aquifère de référence (virtuel ou réel) qui est calculée pour le lieu étudié et la profondeur indiquée (supposée supérieure à 10 m pour ne pas être fluctuante) :

COP_{chaud}	4.00	(Saisie)	Aquifère de référence		
Ratio	1.30	(Saisie)	Haut	-20	m (Saisie)
COP_{froid}	5.2	(Calcul)	Bas	-20	m (Saisie)
COP_{0-chaud}	2.2728	(Calcul)	Milieu	20	m (calcul)
COP_{0-froid}	9.0000	(Calcul)	Tref	18.56	°C (calcul)

Tableau 13 : Données d'entrée relatives aux sources géothermiques pour le calcul des temps de fonctionnement - Cas du climat chaud : Ajaccio.

On fixe alors une « **durée nominale de fonctionnement** » qui correspond au temps de fonctionnement pour le mois le plus sollicité. Typiquement, en climat froid, cette durée peut être de 360 heures pour janvier ou février. En climat chaud, lorsque la climatisation est le mode de sollicitation principal, la durée typique (360 heures par exemple) sera en juillet ou en août. Par exemple, on peut considérer que pour le mois le plus sollicité, le système thermodynamique fonctionnera 12 heures par jour *en moyenne*, soit : $12 \times 30 = 360$ heures pour ce mois le plus sollicité.

Important. L'approche sur la durée moyenne cumulée de fonctionnement sur la durée de la saison de chauffe (2 200 à 2 400 heures par exemple) ne permet pas la prise en considération de fonctionnements où le service principal est l'ECS ou la climatisation.

Cette durée « nominale » est affectée au cas de la température de source géothermique constante (nappe aquifère) qui est également synonyme de COP constant toute l'année. **Il s'agit du cas de référence.**

Afin de parvenir aux consommations électriques spécifiques (hors circulation) et des temps de fonctionnement, il faut faire une hypothèse sur le **profil de demande thermique du bâtiment**. Il s'agit d'indiquer les demandes thermiques cumulées sur une année et rapportées au m² conformément à la réglementation thermique. **Par simplification, ces énergies sont ici exprimées en énergie utile.**

En fonction des COP_{chaud} et COP_{froid} nominaux renseignés ci-avant, on détermine alors les **demandes spécifiques annuelles de référence**, par exemple :

	COP	kWh/an/m ²		
		Demande	Elec.	Géothermie
ECS	4.0	16.00	4.00	12.00
Chauffage		6.00	1.50	4.50
Climatisation	5.2	6.00	1.15	7.15
Rafraîchissement	/	0.00	0.00	0.00

Tableau 14 : Profil thermique du bâtiment (en énergie utile) pour le calcul des temps de fonctionnement - Cas du bâtiment BBC (2 personnes) en climat chaud : Ajaccio.

Pour la localisation étudiée, le modèle simplifié procède alors à une répartition mensuelle des quantités annuelles en jeu sur la base des DJU calculés à partir des données de la station météo sélectionnée, éventuellement en appliquant une correction d'altitude (6,5 °C/1 000 m).

Les étapes sont les suivantes :

- ventilation des demandes mensuelles du bâtiment (en kWh/m².mois) ;
- estimation des quantités d'énergies mensuelles échangées avec le sous-sol pour les quatre usages selon profil de demande du bâtiment (à partir des DJU modulés sur la base du COP de référence) ;
- estimation des consommations électriques (en kWh/m².mois) de la machinerie thermodynamique pour le cas de la source géothermique de référence à température constante.

Important. C'est le modèle de temps de fonctionnement qui déterminera la puissance spécifique des compresseurs des PAC (kW/m²), cette puissance spécifique restant invariante mais pouvant être différente pour le mode Chaud et pour le mode Climatisation si l'analyste choisit, par exemple, de régler les puissances géothermiques de ces deux modes sur des valeurs similaires.

kWh/m ² .mois - Solution géothermique de référence – Ajaccio												
Mois	Demande bâtiment				Électricité compresseur				Échange GTH			
	ECS	Chauf.	Clim.	frais	ECS	Chauf.	Clim.	frais	ECS	Chauf.	Clim.	frais
Janvier	-1.33	-1.20	0.00	0.00	0.33	0.30	0.00	0.00	-1.00	-0.90	0.00	0.00
février	-1.33	-1.17	0.00	0.00	0.33	0.29	0.00	0.00	-1.00	-0.88	0.00	0.00
mars	-1.33	-0.95	0.04	0.00	0.33	0.24	0.01	0.00	-1.00	-0.71	0.05	0.00
Avril	-1.33	-0.66	0.25	0.00	0.33	0.17	0.05	0.00	-1.00	-0.50	0.29	0.00
Mai	-1.33	-0.16	0.61	0.00	0.33	0.04	0.12	0.00	-1.00	-0.12	0.72	0.00
Juin	-1.33	0.00	0.93	0.00	0.33	0.00	0.18	0.00	-1.00	0.00	1.10	0.00
Juillet	-1.33	0.00	1.18	0.00	0.33	0.00	0.23	0.00	-1.00	0.00	1.41	0.00
Août	-1.33	0.00	1.20	0.00	0.33	0.00	0.23	0.00	-1.00	0.00	1.43	0.00
Septembre	-1.33	0.00	0.93	0.00	0.33	0.00	0.18	0.00	-1.00	0.00	1.10	0.00
Octobre	-1.33	-0.12	0.63	0.00	0.33	0.03	0.12	0.00	-1.00	-0.09	0.76	0.00
Novembre	-1.33	-0.68	0.24	0.00	0.33	0.17	0.05	0.00	-1.00	-0.51	0.28	0.00
décembre	-1.33	-1.06	0.00	0.00	0.33	0.27	0.00	0.00	-1.00	-0.80	0.00	0.00
Cumuls kWh/m².an	-16.0	-6.0	6.0	0.0	4.00	1.50	1.15	0.00	-12.00	-4.50	7.15	0.00

Tableau 15 : Exemple de chroniques énergétiques mensuelles adimensionnées et de référence (nappe aquifère à -20 m de profondeur) - Cas du climat chaud : Ajaccio.

Nota. À ce stade de la modélisation, la ventilation des demandes électriques ci-avant suppose une totale indépendance des fonctionnements pour satisfaire les demandes thermiques. Autrement dit, il n'est pas directement considéré que la production estivale de froid permette de réduire la consommation électrique pour la production d'ECS.

3.5.2. Modèle simplifié de temps de fonctionnement

Afin de pouvoir estimer les chroniques mensuelles de temps de fonctionnement, le modèle simplifié nécessite la saisie d'une indication relative au temps de fonctionnement nominal pour le mois le plus chargé, typiquement 360 heures pour le mode de fonctionnement qui sollicite le plus le dispositif géothermique.

Sur le principe, l'algorithme calcule alors la puissance électrique spécifique des compresseurs du mode chaud et du mode froid (en kW/m²) pour la solution de référence sur aquifère.

Cette puissance unitaire (ou ces puissances unitaires) sera ensuite considérée comme constante et invariante et les fluctuations de performance résulteront exclusivement des fluctuations du COP.

Important. En agissant sur les temps de fonctionnement nominal pour le mois le plus chargé de chaque mode (chaud, froid et frais), on va pouvoir considérer que les machines thermodynamiques ont des composants différents pour la production de chaleur et pour la production de froid.

Le modèle calculera indépendamment la puissance électrique du compresseur pour le mode chaud (ECS + Chauffage) et la puissance électrique du compresseur pour le mode froid (si existant). Si l'analyste souhaite simuler une machine réversible à compresseur unique, il pourra agir sur le temps de fonctionnement pour ajuster la puissance du compresseur à la même valeur.

Pour le mode frais, cela agira uniquement sur la puissance de circulation du fluide.

Le tableau ci-dessous illustre avec le même profil de demande thermique d'un bâtiment de 20 000 m² les puissances électriques nominales des compresseurs pour deux choix de dimensionnement des temps de fonctionnement :

Cas pour 2 compresseurs	COP	kWh/an/m ²			Max heures/mois	Compresseur kW
		Demande	Elec.	Géothermie		
ECS	4.0	26.00	4.00	12.00	360	46.74
Chauffage		6.00	1.50	4.50		
Climatisation	5.2	6.00	1.15	7.15	360	12.80
Rafraichissement	/	0.00	0.00	0.00	360	

Cas pour 1 compresseur	COP	kWh/an/m ²			Max heures/mois	Compresseur kW
		Demande	Elec.	Géothermie		
ECS	4.0	26.00	4.00	12.00	360	46.74
Chauffage		6.00	1.50	4.50		
Climatisation	5.2	6.00	1.15	7.15	99	46.55
Rafraichissement	/	0.00	0.00	0.00	99	

Tableau 16 : Exemple de temps de fonctionnements nominaux.
Cas d'un bâtiment BBC de 20 000 m² en climat chaud : Ajaccio.

Algorithme d'estimation des temps de fonctionnement des cycles successifs pour la solution de référence et pour la solution étudiée

Dans un premier temps, on va calculer les temps de fonctionnement pour la solution de référence sur aquifère en recherchant automatiquement, pour chacun des modes, le mois le plus chargé et en lui affectant la valeur de temps maxi de fonctionnement autorisé, les autres durées de fonctionnement étant alors calculées au prorata.

Dans un second temps, pour les cycles annuels successifs, on va calculer les écarts de temps de la solution réelle vis-à-vis de la solution de référence qui sont dus aux variations du COP, lesquelles résultent des fluctuations de la température du sol calculées dans le modèle simplifié de source géothermique.

Les écarts sur le temps de fonctionnement (dus aux variations du COP) vis-à-vis du cas de référence, seront estimés à partir des variations de la température de la source en postulant que la consommation énergétique du compresseur est invariante (puissance électrique constante), les étapes de l'estimation étant alors :

- estimer le COP pour la température moyenne de la source géothermique, pour chaque mois de l'année et pour les cycles annuels successifs ;
- à partir du COP mensuel et à puissance électrique du compresseur inchangée, recalculer la consommation d'énergie électrique mensuelle du compresseur pour satisfaire la demande thermique du bâtiment (inchangée) ;
- recalculer le temps de fonctionnement du cas réel pour les cycles annuels successifs.

Les deux tableaux en exemple ci-après reprennent les données d'entrée de la page précédente pour des échangeurs géothermiques de subsurface, les différences étant à constater uniquement sur le temps de fonctionnement de la climatisation.

Cas pour 2 compresseurs	Temps de fonctionnement (heures/mois) - Ajaccio											
	Solution de référence				Cas réel – Cycle 1				Cas réel – Cycle 10			
Mois	ECS	Chauf.	Clim.	frais	ECS	Chauf.	Clim.	frais	ECS	Chauf.	Clim.	frais
Janvier	232	128	0	0	313	173	0	0	322	178	0	0
février	232	126	0	0	326	176	0	0	336	182	0	0
mars	232	102	13	0	326	143	10	0	336	147	9	0
Avril	232	71	74	0	312	96	56	0	321	99	54	0
Mai	232	17	183	0	282	20	152	0	291	21	147	0
Juin	232	0	278	0	258	0	252	0	266	0	245	0
Juillet	232	0	355	0	239	0	347	0	246	0	336	0
Août	232	0	360	0	229	0	367	0	236	0	356	0
Septembre	232	0	278	0	230	0	281	0	238	0	273	0
Octobre	232	13	191	0	241	13	185	0	248	14	180	0
Novembre	232	72	71	0	268	84	62	0	276	86	61	0
décembre	232	114	0	0	295	144	0	0	304	149	0	0
Cumuls heures/an	2 781	642	1 803	0	3 317	849	1 711	0	3 419	875	1 661	0

Tableau 17 : Temps de fonctionnement pour le cas de référence et le cas réel avec deux compresseurs (géothermie de subsurface) - Cas du climat chaud : Ajaccio.

Pour cet exemple, une dérive thermique a été introduite, elle est de -1 °C la première année et atteint une valeur cumulée de -2 °C au cycle 10. Cette dérive a pour effet de diminuer légèrement le temps de fonctionnement de la climatisation. Dans le cas réel, cette dérive n'a pas lieu d'être pour ce type d'échangeur géothermique.

Cas pour 1 compresseur	Temps de fonctionnement (heures/mois) - Ajaccio											
	Solution de référence				Cas réel – Cycle 1				Cas réel – Cycle 10			
	ECS	Chauf.	Clim.	frais	ECS	Chauf.	Clim.	frais	ECS	Chauf.	Clim.	frais
Mois												
Janvier	232	128	0	0	313	173	0	0	322	178	0	0
février	232	126	0	0	326	176	0	0	336	182	0	0
mars	232	102	4	0	326	143	3	0	336	147	3	0
Avril	232	71	20	0	312	96	15	0	321	99	15	0
Mai	232	17	50	0	282	20	42	0	291	21	40	0
Juin	232	0	76	0	258	0	69	0	266	0	67	0
Juillet	232	0	98	0	239	0	95	0	246	0	92	0
Août	232	0	99	0	229	0	101	0	236	0	98	0
Septembre	232	0	76	0	230	0	77	0	238	0	75	0
Octobre	232	13	52	0	241	13	51	0	248	14	49	0
Novembre	232	72	20	0	268	84	17	0	276	86	17	0
décembre	232	114	0	0	295	144	0	0	304	149	0	0
Cumuls heures/an	2 781	642	496	0	3 317	849	471	0	3 419	875	457	0

Tableau 18 : Temps de fonctionnement pour le cas de référence et le cas réel avec un compresseur (géothermie de subsurface) - Cas du climat chaud : Ajaccio.

Rafraîchissement Direct	COP	kWh/an/m ²			Max heures/mois	Compresseur kW
		Demande	Elec.	Géothermie		
ECS	4.0	26.00	4.00	12.00	360	43.67
Chauffage		6.00	1.50	4.50		
Climatisation	5.2	6.00	1.15	7.15	99	0.0
Rafraîchissement	/	0.00	0.00	0.00	99	

Cas du Géocooling	Temps de fonctionnement (heures/mois) - Ajaccio											
	Solution de référence				Cas réel – Cycle 1				Cas réel – Cycle 10			
	ECS	Chauf.	Clim.	frais	ECS	Chauf.	Clim.	frais	ECS	Chauf.	Clim.	frais
Mois												
Janvier	248	112	0	0	335	151	0	0	345	156	0	0
février	248	105	0	0	349	148	0	0	360	153	0	0
mars	248	85	0	0	352	121	0	0	363	125	0	0
Avril	248	67	0	0	346	93	0	0	356	96	0	0
Mai	248	35	0	0	329	47	0	0	339	48	0	0
Juin	248	13	0	0	308	17	0	0	317	17	0	0
Juillet	248	0	0	99	213	0	0	99	220	0	0	99
Août	248	0	0	75	219	0	0	75	226	0	0	75
Septembre	248	26	0	0	275	28	0	0	283	29	0	0
Octobre	248	51	0	0	281	58	0	0	290	59	0	0
Novembre	248	88	0	0	297	105	0	0	307	108	0	0
décembre	248	105	0	0	316	134	0	0	326	138	0	0
Cumuls heures/an	2 977	687	0	174	3 620	901	0	174	3 732	929	0	174

Tableau 19 : Temps de fonctionnement pour le cas de référence et le cas réel (géothermie de subsurface) - Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.

En reprenant exactement le même dimensionnement que pour le tableau ci-avant mais pour le climat froid de la région de Bourg-en-Bresse (mais sans majoration pour le chauffage selon RT), on va considérer que le rafraîchissement direct peut être mis en place puisque la température du sol de subsurface est compatible avec cet usage.

Les tableaux ci-avant pour le cas de Bourg-en-Bresse ont été obtenus pour un ΔT maximum vis-à-vis du sol non perturbé égal à -7 °C et une dérive thermique s'accroissant progressivement de manière à atteindre -9 °C la 10^{ème} année (approche pessimiste, car on doit pouvoir considérer qu'il n'y a pas de dérive thermique pour des corbeilles géothermiques normalement dimensionnées).

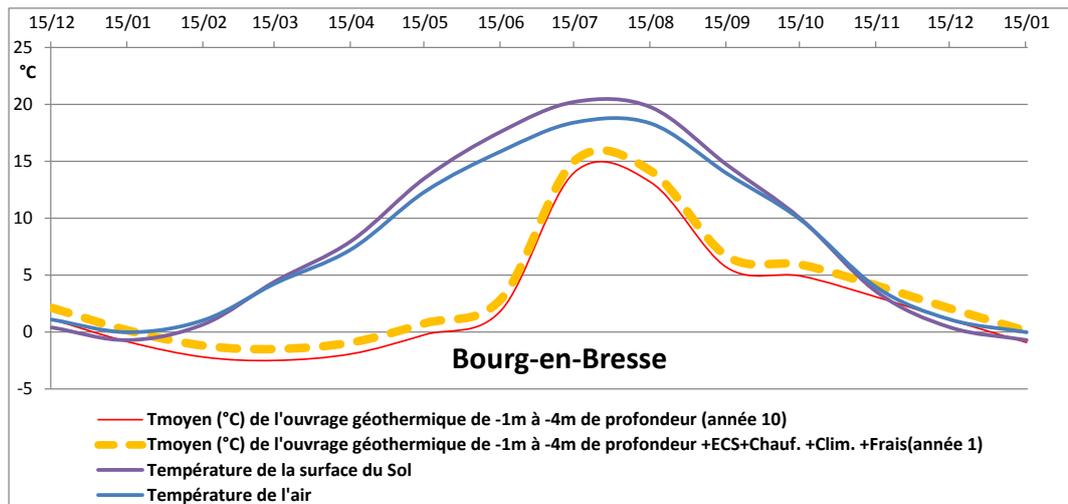


Figure 21 : Chroniques de températures pour les mêmes conditions que les tableaux en page précédente avec géocooling - Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.

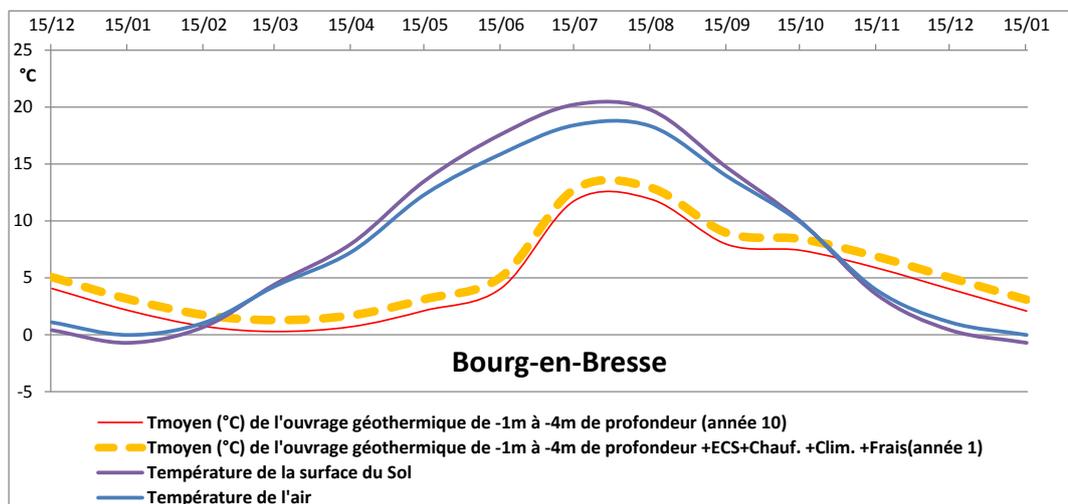


Figure 22 : Chroniques de températures avec un surdimensionnement des corbeilles géothermiques et géocooling - Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.

Un surdimensionnement des ouvrages géothermiques de subsurface (corbeilles géothermiques) pourrait, pour les mêmes services thermiques, conduire aux températures reproduites sur le graphique ci-avant mais avec un bénéfice sur les temps de fonctionnement qui, même s'il est perceptible reste modeste : de l'ordre de 300 heures au total (voir graphique et tableau en page suivante).

Même si la performance est légèrement supérieure, le constat sera relativement semblable pour des ouvrages géothermiques verticaux mais il conviendra d'examiner les énergies nécessaires à la circulation des fluides géothermiques avant de conclure.

Temps de fonctionnement (heures/mois) – Bourg-en-Bresse Cas du surdimensionnement des corbeilles géothermiques												
Mois	Temps de référence				Cas réel – Cycle 1				Cas réel – Cycle 10			
	ECS	Chauf.	Clim.	frais	ECS	Chauf.	Clim.	frais	ECS	Chauf.	Clim.	frais
Janvier	248	112	0	0	306	138	0	0	315	142	0	0
février	248	105	0	0	319	135	0	0	329	140	0	0
mars	248	85	0	0	324	111	0	0	334	115	0	0
Avril	248	67	0	0	319	86	0	0	329	89	0	0
Mai	248	35	0	0	306	44	0	0	315	45	0	0
Juin	248	13	0	0	288	16	0	0	297	16	0	0
Juillet	248	0	0	99	228	0	0	99	235	0	0	99
Août	248	0	0	75	228	0	0	75	235	0	0	75
Septembre	248	26	0	0	257	26	0	0	265	27	0	0
Octobre	248	51	0	0	261	53	0	0	269	55	0	0
Novembre	248	88	0	0	273	97	0	0	282	99	0	0
décembre	248	105	0	0	289	122	0	0	298	126	0	0
Cumuls heures/an	2 977	687	0	174	3 398	829	0	174	3 502	854	0	174

Tableau 20 : Temps de fonctionnement pour le cas de référence et le cas réel avec corbeilles surdimensionnées - Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.

Illustrations pour des corbeilles géothermiques

Comme le montrent les figures ci-après, l'exemple du climat froid permet d'illustrer les effets des fluctuations de la température de la source froide (source géothermique en mode chauffage) qui sont reproduits par le modèle simplifié. En effet, les courbes en pages suivantes montrent comment fluctuent le temps de fonctionnement du dispositif géothermique et les consommations d'énergie électrique (grandeurs ramenées au m² raccordé), pour une demande de chauffage correspondant à du bâti BBC et du rafraîchissement direct (géocooling) dont l'impact est visible sur la température estivale du sol et donc sur la production d'ECS. Ces courbes comparent la situation de référence sur nappe aquifère et les corbeilles géothermiques pour deux valeurs du dimensionnement :

- cas normalement dimensionné (chute de température maximale égale à -7 °C vis-à-vis de la température non-perturbée) – Pas de dérive thermique au fil des cycles annuels (repassage par les conditions initiales chaque année) ;
- cas surdimensionné (chute de température maximale égale à -4 °C vis-à-vis de la température non-perturbée) – Pas de dérive thermique au fil des cycles annuels (repassage par les conditions initiales chaque année).

Les graphiques ci-dessous (fig. 23) représentent les courbes caractéristiques de la solution de référence dans le cas du climat froid de la station climatique de Bourg-en-Bresse. Il s'agit d'une solution virtuelle, car il n'y a pas d'aquifère au droit de cette station située en moyenne altitude.

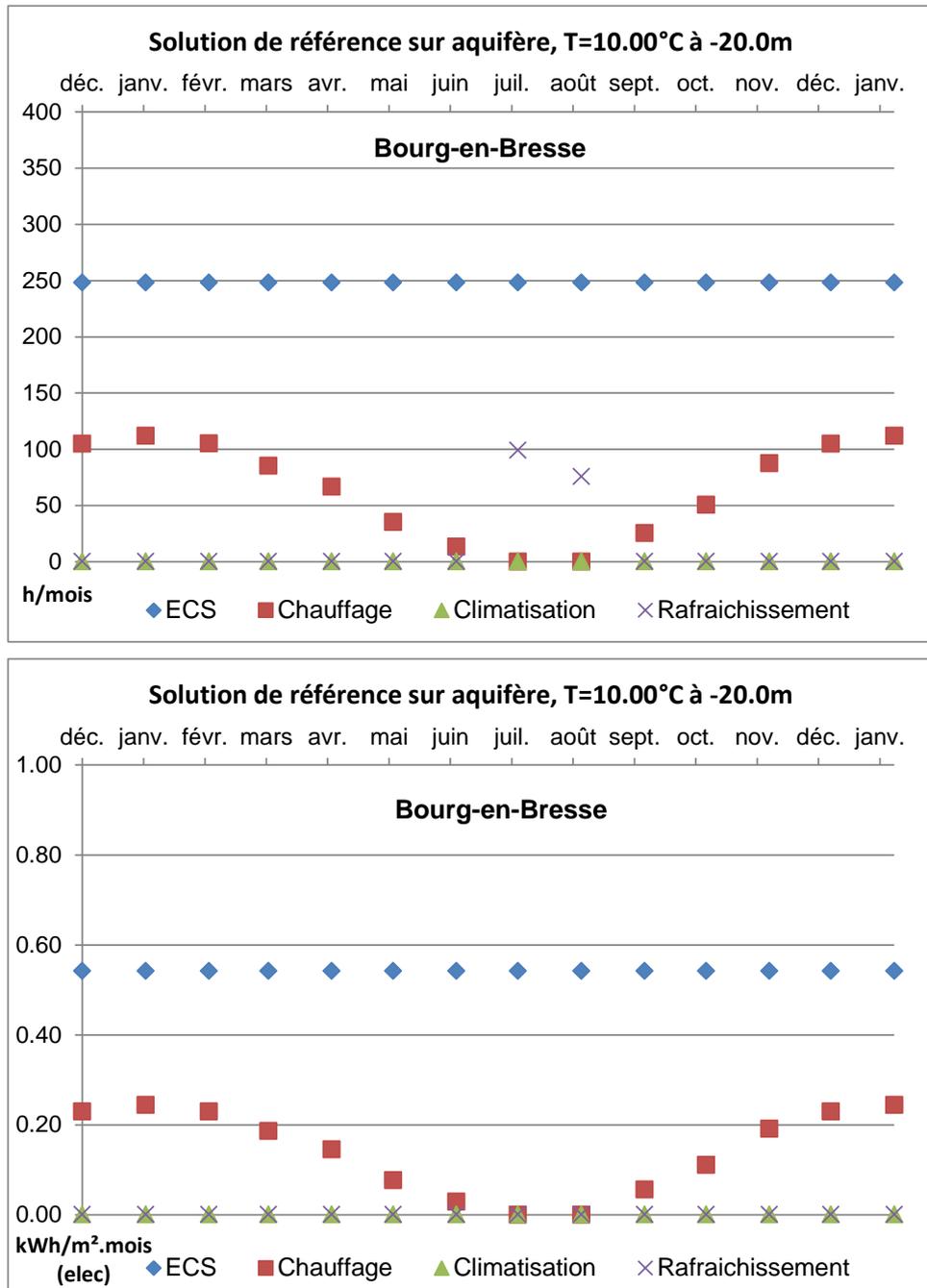


Figure 23 : Chroniques pour la solution géothermique de référence sur aquifère. Temps de fonctionnement (en haut) et Consommations électriques spécifiques (en bas). Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.

Les graphiques ci-dessous (fig. 24) comparent les temps de fonctionnement pour deux dimensionnements des corbeilles géothermiques obtenus en agissant sur le critère de température du sol vis-à-vis du sol non perturbé : -7 °C pour les corbeilles normalement dimensionnées au lieu de -4 °C pour les corbeilles surdimensionnées.

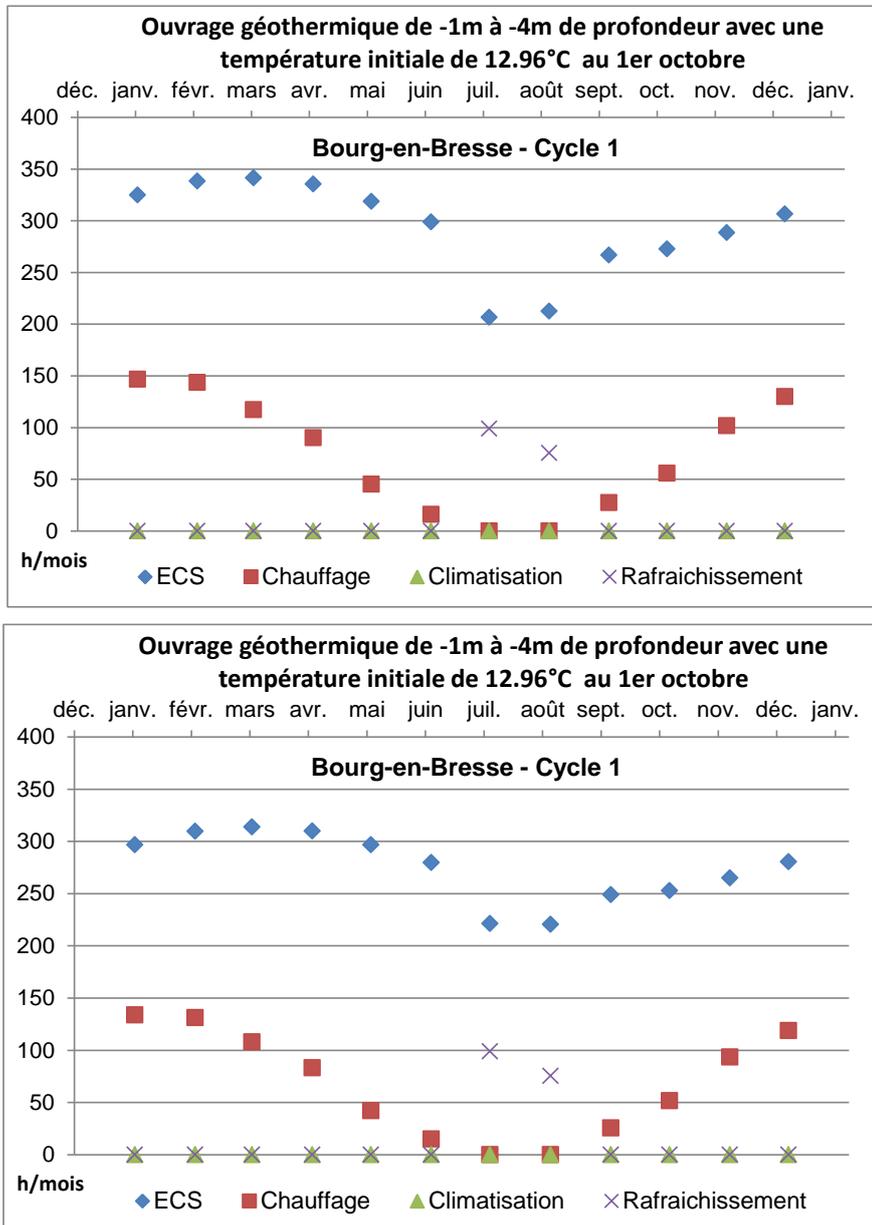


Figure 24 : Chroniques de temps de fonctionnement pour des corbeilles géothermiques normalement dimensionnées (en haut) et surdimensionnées (en bas). Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.

Les graphiques ci-après (fig. 25) comparent les consommations électriques spécifiques pour deux dimensionnements des corbeilles géothermiques obtenus en agissant sur le

critère de température du sol vis-à-vis du sol non perturbé : -7 °C pour les corbeilles normalement dimensionnées au lieu de -4 °C pour les corbeilles surdimensionnées.

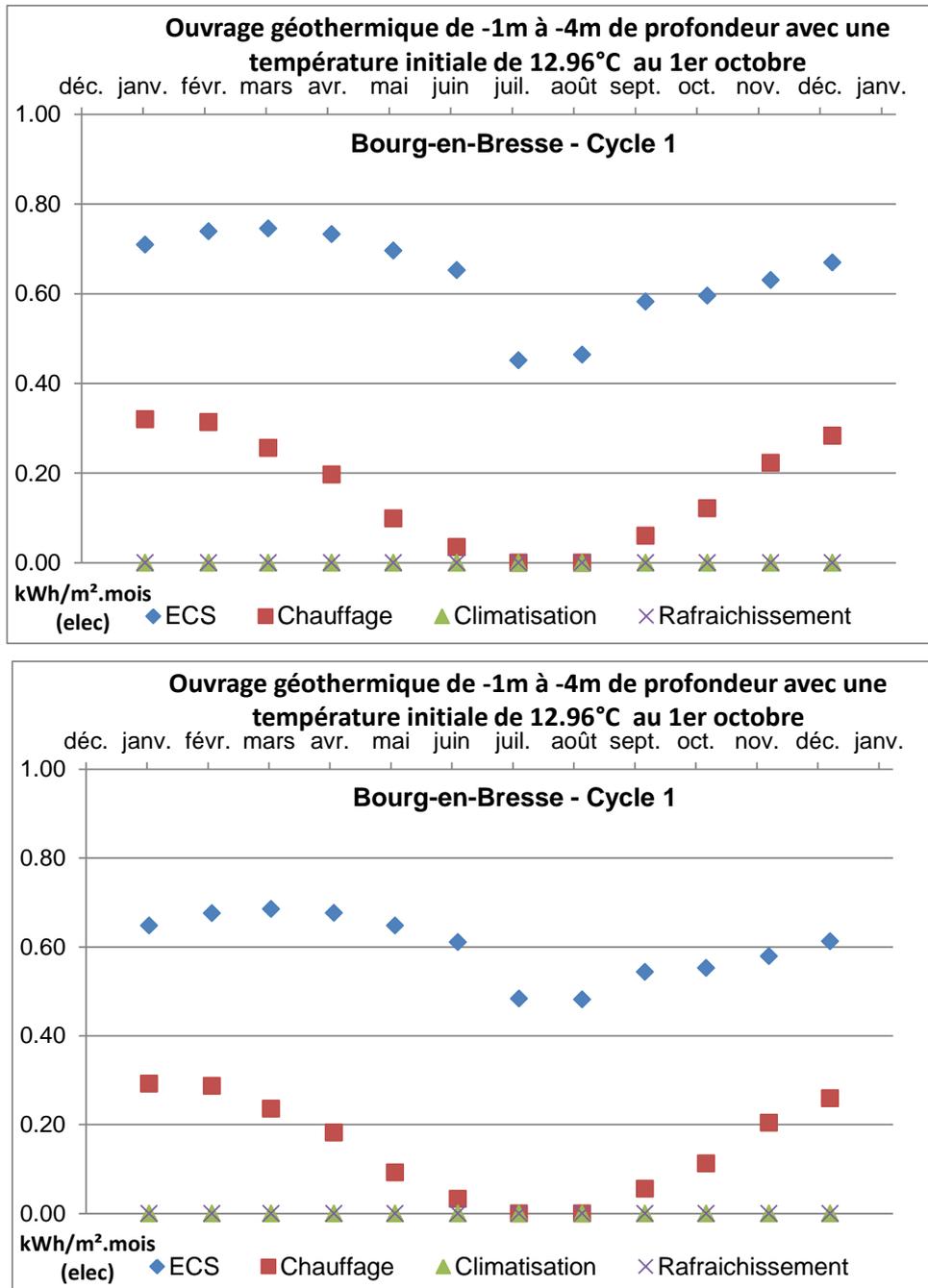


Figure 25 : Chroniques de consommations électriques spécifiques pour des corbeilles géothermiques normalement dimensionnées (en haut) et surdimensionnées (en bas). Cas du climat froid : Bourg-en-Bresse.

Les courbes suivantes (fig. 26) illustrent l'incidence de l'ECS pour le bâti BBC-neuf. Dans les deux cas, la demande de chauffage est à 6 kWh/m².an. La demande d'ECS est à 16 kWh/m².an pour le graphique du haut et à 26 kWh/m².an pour le graphique du bas. On constate que le dimensionnement pour le mode chaud (assez peu de puissance géothermique) implique des temps de fonctionnement important pour le géocooling : 475 heures pour le panneau du haut et 411 heures pour le panneau du bas (soit respectivement 144 kW et 166 kW de puissance géothermique pour 20 000 m²).

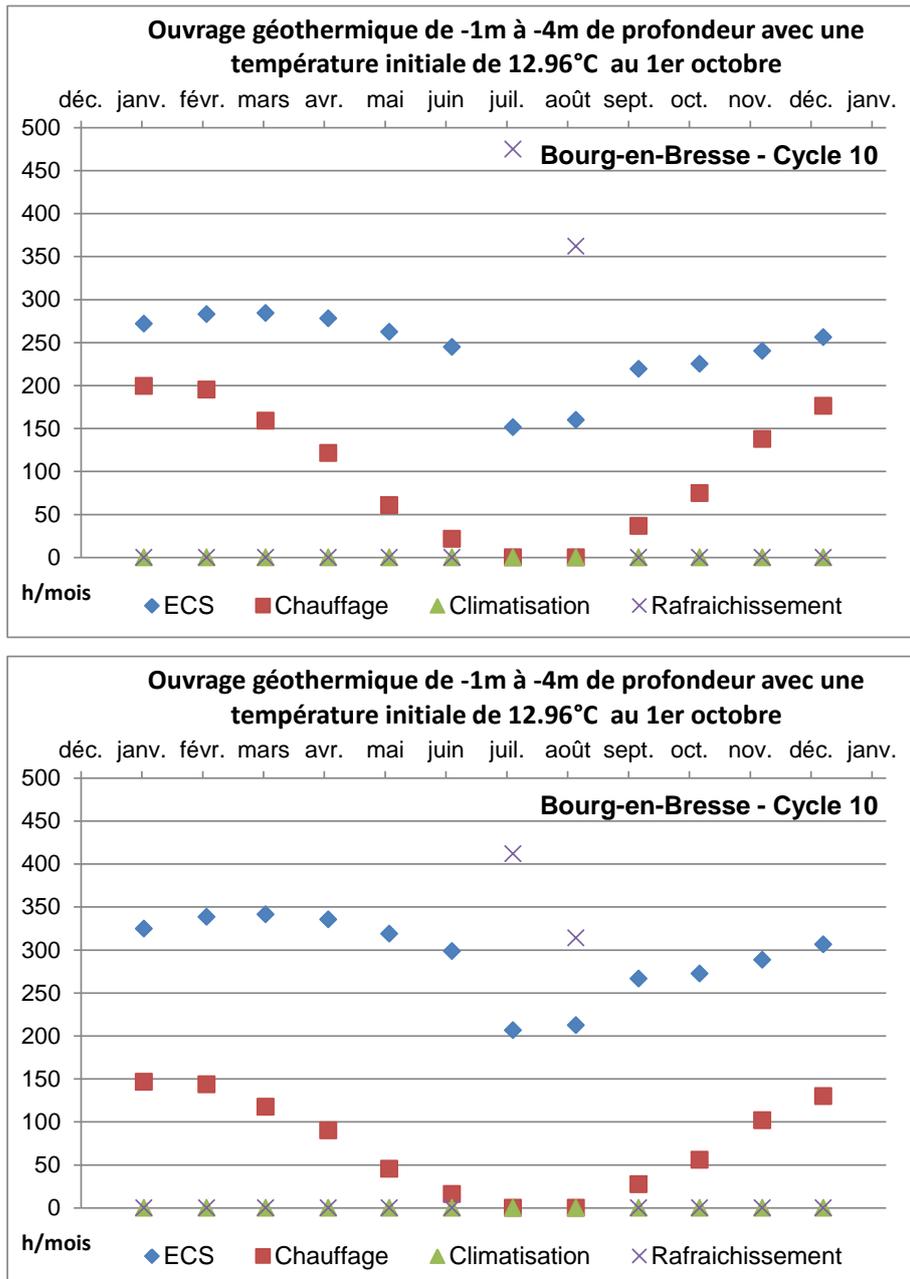


Figure 26 : Illustration du poids de l'ECS sur les chroniques de fonctionnement dans le cas du bâti BBC – Exemple du climat froid : Bourg-en-Bresse.

Les courbes suivantes (fig. 27) reprennent le cas précédent mais, cette fois ci pour le BBC rénovation dont la demande de chauffage est portée à 28 kWh/m².an, l'ECS restant à 26 kWh/m².an (seule l'électricité du compresseur est représentée).

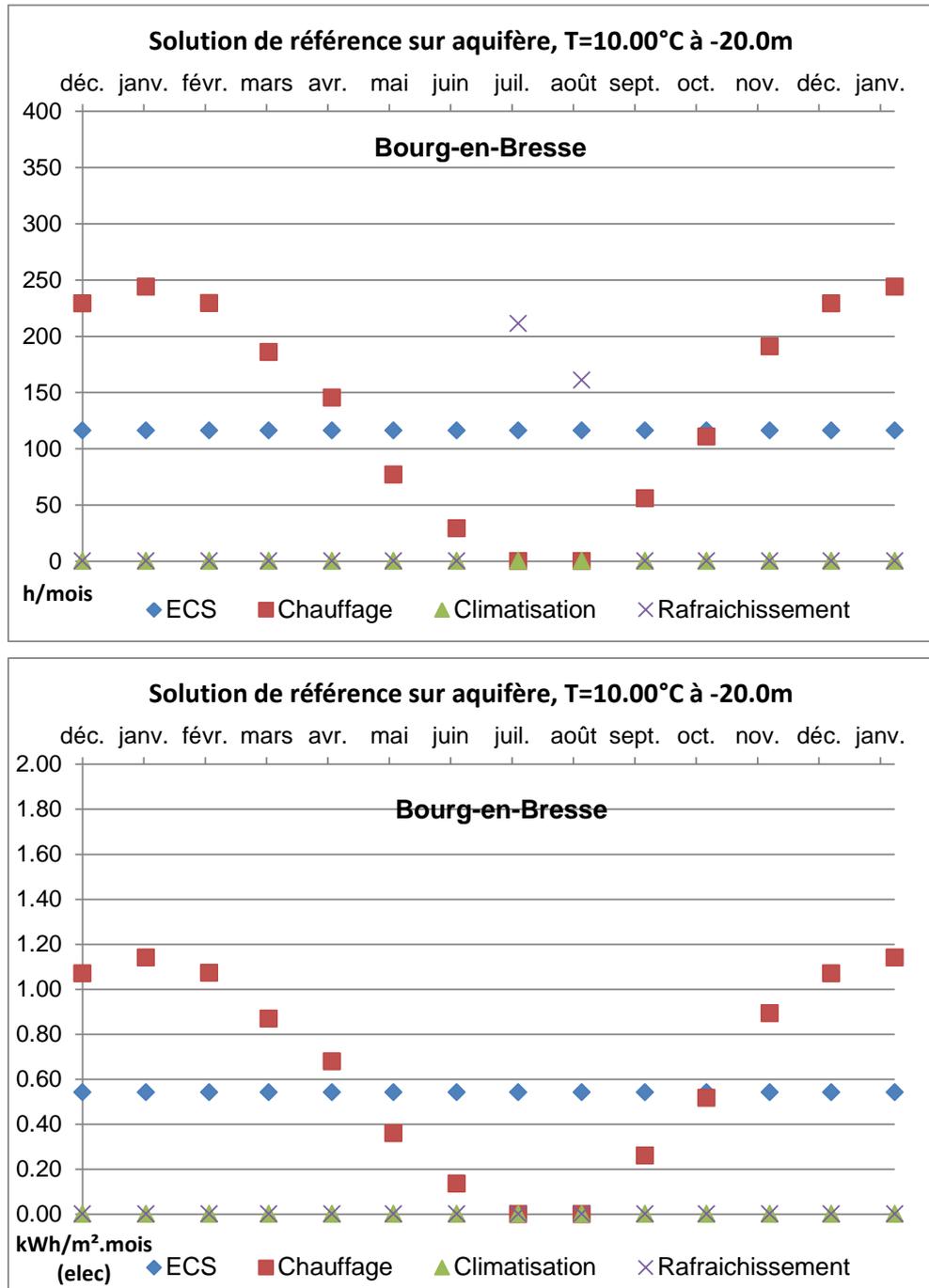
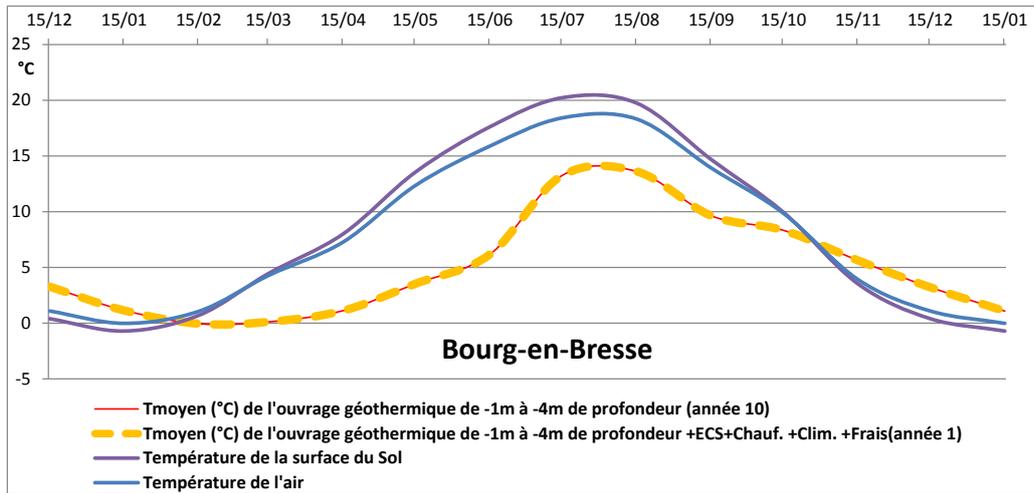


Figure 27 : Illustration des chroniques spécifiques de fonctionnement dans le cas du bâti BBC-Rénovation – Exemple du climat froid : Bourg-en-Bresse.

Pour le BBC rénovation, l'impact des puisages pour l'ECS et du bénéfice thermique tiré du géocooling est moins marqué compte tenu d'un dimensionnement plus conséquent des ouvrages enterrés. En effet, toujours dans l'exemple d'une surface raccordée de 20 000 m², la puissance électrique du compresseur passe à 93,6 kW au lieu de 43,67 kW pour le BBC-neuf et la puissance nominale des échangeurs géothermiques passe à 323 kW au lieu de 166 kW pour le BBC-neuf.



Géocooling	COP	kWh/an/m ²			Max heures/mois	Compresseur kW	GTH kW
		Demande	Elec.	Géothermie			
ECS	4,0	26,00	4,00	12,00	360	93,58	323,18
Chauffage		28,00	1,50	4,50			
Climatisation			1,15	7,15	/	/	
Rafraîchissement	/	6,00	0,00	0,00	211		322,79

Figure 28 : Illustration des conditions du fonctionnement dans le cas du bâti BBC-Rénovation (20 000 m²) – Exemple du climat froid : Bourg-en-Bresse.

Sans géocooling, les chroniques de températures sont les suivantes :

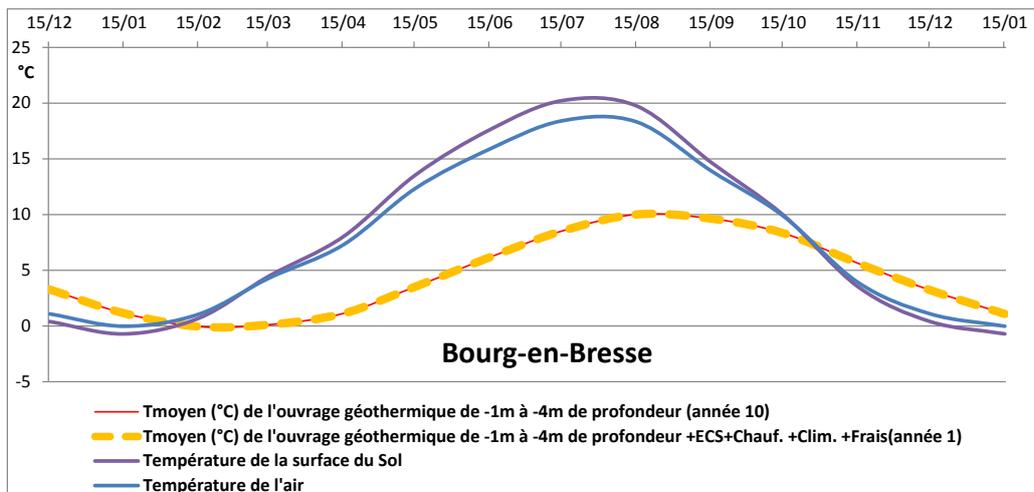


Figure 29 : Chroniques de températures sans géocooling – Climat froid : Bourg-en-Bresse.

3.5.3. Modèle de circulation du fluide géothermique

Rappel : Temps de fonctionnement

Dans la présente étude, on va considérer que les temps de fonctionnement des moyens de pompage / circulation sont **imposés par l'analyste** selon les critères ci-après qui valent également pour les temps de fonctionnement de la machinerie thermodynamique.

- En fonction du temps de fonctionnement mensuel nominal pour le mode chaud, le modèle simplifié propose automatiquement une puissance du compresseur et la puissance géothermique associée pour le mode chaud.
- Par défaut, ce temps sera de 360 heures pour le mois le plus sollicité.
- Pour le mode Climatisation, l'analyste peut agir sur le temps de fonctionnement mensuel nominal pour le mode froid afin d'ajuster manuellement la puissance du compresseur à la valeur souhaitée, la recommandation étant de la choisir entre une puissance de compresseur identique à celle du mode chaud (ECS + Chauffage) ou une puissance d'échange géothermique identique.

Ce processus n'est pas automatisé.

- Pour le mode Géocooling, l'analyste peut agir sur le temps de fonctionnement mensuel nominal pour le mode frais afin d'ajuster manuellement la puissance géothermique, la recommandation étant, si possible, de la choisir identique à celle du mode chaud (ECS + Chauffage). La durée maximale est évidemment 720 heures/mois.

Ce processus n'est pas automatisé.

Énergie de circulation du fluide

On considèrera donc que l'énergie de circulation du fluide géothermique doit pouvoir être distinguée de l'énergie consommée par la PAC ; notamment pour traiter efficacement le cas des usages directs de la chaleur géothermique : rafraîchissement en géothermie TBE et chauffage en géothermie BE.

Dans le modèle simplifié, le temps de circulation sera celui des chroniques mensuelles de temps de fonctionnement du dispositif thermodynamique tel que rappelé ci-dessus. L'énergie de circulation sera donc indexée sur ces chroniques. On distinguera les situations suivantes :

- **Cas 1 et Cas 2** (cas sur échangeurs géothermiques) : le COP fluctue au cours d'une saison ; ce qui fait que le temps de fonctionnement du dispositif thermodynamique va également fluctuer d'un mois à l'autre ;
- **Cas 3** (cas sur aquifère) : la température de la ressource géothermique reste constante. De ce fait, le COP et les temps de fonctionnement du dispositif thermodynamique réel ne différeront pas de la solution de référence sur aquifère.

Important. Par défaut, dans tous les cas, on considérera que l'énergie (ou la puissance) de circulation s'établit à 5 % de la puissance géothermique.

Dans la pratique, les puissances installées pour la circulation dans le circuit primaire (côté géothermie) des dispositifs sur aquifère sont sensiblement plus importantes que celles des dispositifs sur échangeurs géothermiques.

3.6. UTILITÉ DES MODÈLES DE DISPOSITIFS GÉOTHERMIQUES

Le présent chapitre a montré que les modèles simplifiés sont de nature à bien représenter les effets qui peuvent être observés en situations réelles.

En particulier, les chroniques mensuelles de prélèvement d'énergie géothermique et de consommation d'énergie électrique des compresseurs des PAC sont réalistes.

Le chapitre suivant va, notamment, exploiter ces chroniques pour produire des chroniques mensuelles de coûts de fonctionnement :

- les chroniques de prélèvement d'énergie géothermique conduisent à l'énergie de pompage et/ou circulation ;
- moyennant l'introduction des modes de tarification de l'énergie électrique, les chroniques de consommation pour le pompage et pour les compresseurs fournissent les parts fixes et variables des dépenses électriques.

Le chapitre suivant, de manière encore sommaire vu la pertinence des informations disponibles, propose également des estimations des coûts d'investissement.

4. Modèles de coûts d'exploitation des systèmes géothermiques TBE

Présentation

L'estimation des coûts des investissements représente une difficulté majeure de l'analyse macro-économique, laquelle aura à examiner les situations pour les années à venir. Or, notamment, les composants du système thermodynamique entament actuellement une mutation significative. On peut citer explicitement :

- les profils de consommation d'énergies thermiques qui s'inversent pour ce qui est de la production de chaud vis-à-vis de la production d'ECS et qui émergent pour ce qui est de la production de froid et de frais ;
- les incitations réglementaires qui imposent à brève échéance le recours à des composants thermodynamiques pour la production d'ECS, l'offre technique pour de tels dispositifs n'ayant pas encore exploré l'éventail des solutions géothermiques.

En raison de ces incertitudes sur les offres techniques pour les prochaines années, en particulier et à cause d'une connaissance imprécise de la structure actuelle des coûts d'investissements, la présente étude a recherché une méthodologie qui permet de suffisamment s'affranchir du poids des machines thermodynamiques dans l'analyse vis-à-vis des autres techniques thermiques.

C'est en particulier en implémentant une solution de référence sur géothermie au lieu du gaz naturel que cet objectif est atteint. En effet, ces composants implantés dans le bâtiment étant identiques pour toutes les solutions, leur impact devient négligeable lors d'une comparaison.

Restent que les outils simplifiés autorisent néanmoins la prise en considération de ces charges d'investissement si les paramètres peuvent être renseignés par l'analyste avec suffisamment de pertinence.

Pour ce qui relève de la structure des charges électriques de fonctionnement, la présente analyse propose des modélisations qui, bien que simplifiées, procurent un niveau de paramétrage relativement poussé.

Ainsi, non seulement la tarification des coûts des énergies traite nativement la saisonnalité au pas mensuel mais elle permet également une prise en considération des tarifications heures pleines/creuses (et assimilables) grâce aux chroniques des temps de fonctionnement, la connaissance desquelles autorisant une ventilation des charges de fonctionnement par tranche de tarification.

Architecture des modèles simplifiés de coûts d'exploitation

Dans ce chapitre sont exposés les modèles simplifiés qui permettent de traduire en grandeurs économiques les résultats adimensionnés ou rapportés aux grandeurs spécifiques qui sont issus des modèles de dispositifs géothermiques.

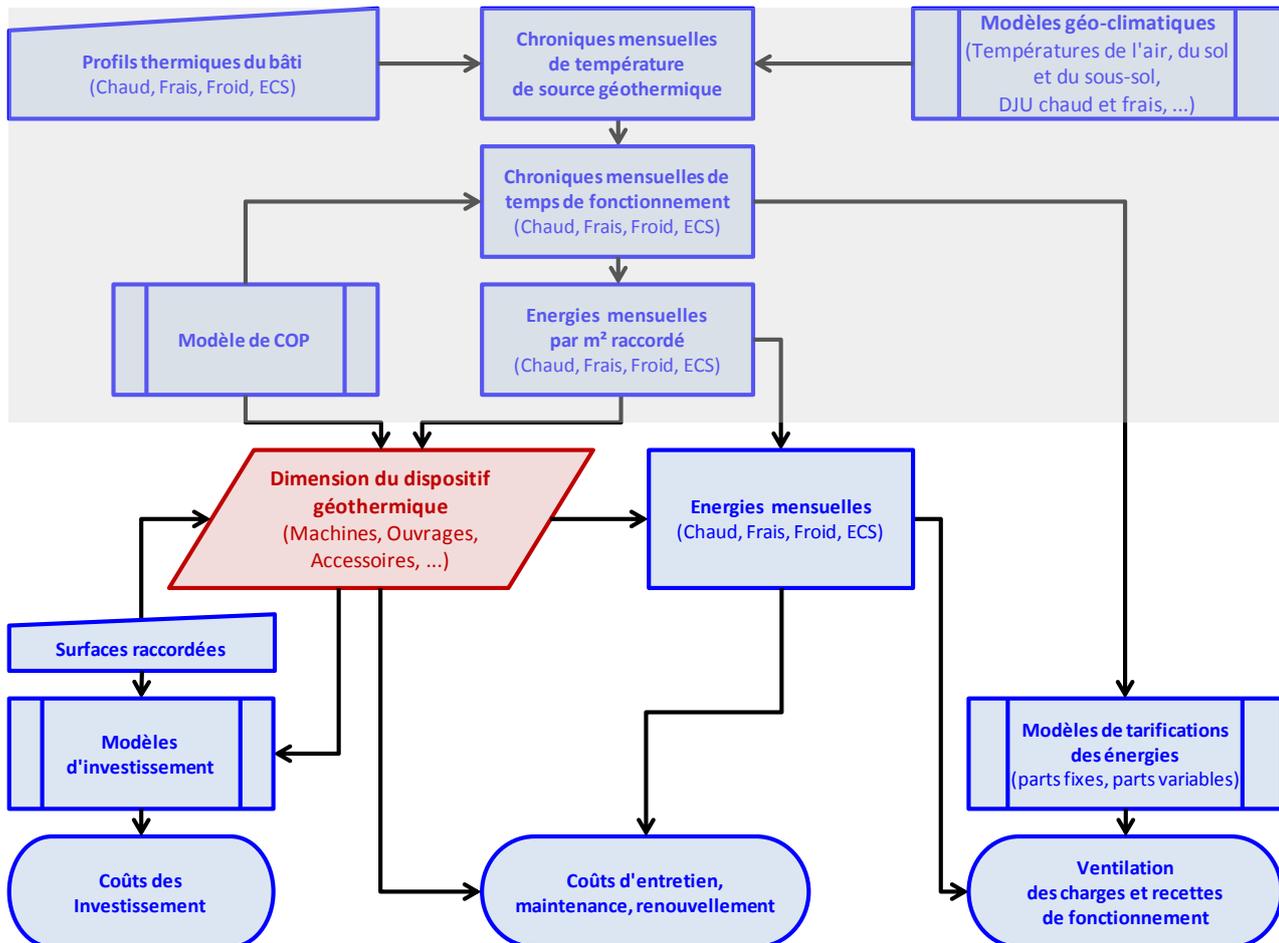


Figure 30 : Logigramme illustrant l'enchaînement des modèles de coûts d'exploitation.

- **Modèles simplifié d'investissement** – Ce modèle, spécifique à chacune des quatre grandes techniques de géothermie TBE, produit des valeurs par défaut réalistes qui ont été paramétrées pour évoluer avec les retours sur expériences. Les valeurs produites sont homogènes entre les quatre représentations.
- **Modèle simplifié de fonctionnement** – Ce modèle est actuellement focalisé sur la production des coûts des consommations d'énergie électriques.
- **Modèle simplifié de maintenance** – Ce modèle reste à implémenter.
- **Modèles simplifié de valeur à l'échéance** – Ce modèle reste à implémenter.

4.1. MODÉLISATION DE L'INVESTISSEMENT

Présentation

Pour la présente étude, l'estimation de l'investissement sera en grande partie automatisée via des modèles simplifiés. L'investissement sera conditionné essentiellement par les paramètres ci-après :

- les demandes quantitatives (en énergie utile) pour les quatre usages thermiques : ECS, Chaud, Froid et Frais. Outre le profil de demande (classe énergétique du bâtiment), le paramètre dimensionnant est alors la surface raccordée (en m²) ;
- les chroniques mensuelles (consommation et/ou temps de fonctionnement) qui intègrent la réponse du sous-sol et donnent donc accès à une perception réaliste du dimensionnement. Les données d'entrée sont fournies par les modèles simplifiés de dispositifs géothermiques.

Une difficulté majeure réside dans le paramétrage des grandeurs par défaut pour couvrir l'ensemble des techniques géothermiques, les « produits géothermiques » étant assez difficilement comparable entre eux.

Nota : Afin de restreindre les incertitudes en cas d'inter-comparaison, Il est proposé dans la présente étude de sélectionner comme solution de référence une solution géothermique (solution à température constante sur nappe aquifère). Cela permet en effet de restreindre le périmètre de l'étude aux seuls composant du système géothermique ; le poste investissement de la PAC pouvant même ne pas être renseignée car les composants du système climatique sont supposés identiques d'une solution à l'autre et ils peuvent donc être sortis du périmètre des analyses. De ce fait, en admettant que certaines valeurs des coûts d'investissement peuvent être imprécises, les valeurs relatives au fonctionnement seront, par contre, valides.

Stratégies proposées pour estimer les prix d'investissement

Dans la pratique, estimer un prix d'investissement peut s'envisager :

- à partir des statistiques des prix du marché :
Les données fiables sont statistiquement insuffisantes mais l'examen des données sur opérations (dossiers Aquapac par exemple) a pu produire, du moins pour les opérations sur aquifère (solution de référence), une pré-estimation relativement réaliste qui peut être paramétrée. Cette estimation produit un coût d'investissement rapporté au m² raccordé. Moyennant une hypothèse sur la classe du bâti, elle donne accès à la taille de l'installation ;
- sur la base du dimensionnement des installations unitaires :
Les modèles simplifiés de dispositifs géothermiques proposés par la présente étude produisent les énergies mensuelles en jeu et des temps de fonctionnement afférents. De ce fait, une estimation du dimensionnement peut être obtenue. Cette estimation du dimensionnement sera confrontée à la taille de l'installation obtenue ci-avant et une correction pourra être proposée par l'analyste.

Démarche méthodologique

Comme introduit ci-avant, l'approche est basée sur la quantification des profils de demandes thermique du bâti et sur les résultats des modèles simplifiés des dispositifs géothermiques qui produisent les chroniques mensuelles **dont on extrait les maxima** pour proposer un dimensionnement et une estimation de l'investissement.

Par analogie avec les modèles simplifiés des sources géothermiques, il va falloir distinguer les techniques géothermiques, le critère étant la sensibilité de la température de la source aux sollicitations par le dispositif géothermique et aux variations climatiques :

- **Cas 1** : la température de la ressource géothermique varie en fonction de son utilisation et de la température extérieure. Ce sera le cas des échangeurs géothermiques de subsurface : échangeurs horizontaux, corbeilles peu profondes ;
- **Cas 2** : la température de la ressource géothermique varie uniquement en fonction de son utilisation. Ce sera les cas des échangeurs verticaux : sondes géothermiques et champs de sondes géothermiques ; les fondations géothermiques étant exclues du périmètre de la présente étude ;
- **Cas 3** : la température de la ressource géothermique est constante. Ce sera le cas de dispositifs géothermiques sur nappe aquifère. **Ce cas est essentiel, car il permet de constituer la solution technico-économique de référence.**

Important. Dans la présente étude, la description sommaire de l'ouvrage géothermique effectuée dans le **modèle simplifié de source géothermique** permet une détection automatique du type d'ouvrage :

- les aquifères ont une épaisseur nulle (bas de l'ouvrage = haut de l'ouvrage) ;
- les SGV ont une épaisseur (hauteur) supérieure à 20 m ;
- les échangeurs horizontaux sont situés à moins de 2 de profondeur ;
- les autres ouvrages sont des échangeurs compacts.

Parts fixes et Parts variables

Pour un ouvrage géothermique, l'estimation de l'investissement comprend en général :

- une part fixe qui est calibrée sur la demande elle-même liée aux m² raccordés ; cette part fixe pouvant se décomposer en plusieurs postes (prestations intellectuelles et charges administratives, forfait technique...) ;
- une part variable qui est physiquement liée aux m² raccordés et à d'autres critères qui déterminent la taille et/ou la morphologie de l'ouvrage comme la géolocalisation de l'ouvrage (par exemple : profondeur de l'ouvrage liée à la présence d'un aquifère et qui influence le temps du chantier et les équipements...) et aux éventuels choix de sur ou sous-dimensionnement.

À noter que les coûts des ouvrages sur aquifère sont, du moins pour ceux à relativement faible profondeur, assez peu corrélés avec la demande thermique réelle

du bâti raccordé. Par contre, la littérature reporte un lien avec les surfaces raccordées (indépendamment de la classe énergétique) et une corrélation avec la profondeur.

4.1.1. Modèle simplifié d'investissement pour les ouvrages souterrains des techniques sur nappe aquifère

D'une manière très générale, tant pour les parts fixes que pour les parts variables, on obtiendra des courbes décroissantes en fonction du nombre de m² raccordés, la difficulté étant évidemment de paramétrer les différentes composantes. Dans le cas des doublets sur aquifère, l'allure générale de ces courbes est la suivante. Elle s'applique à du bâti non BBC, donc peu efficace du point de vue énergétique.

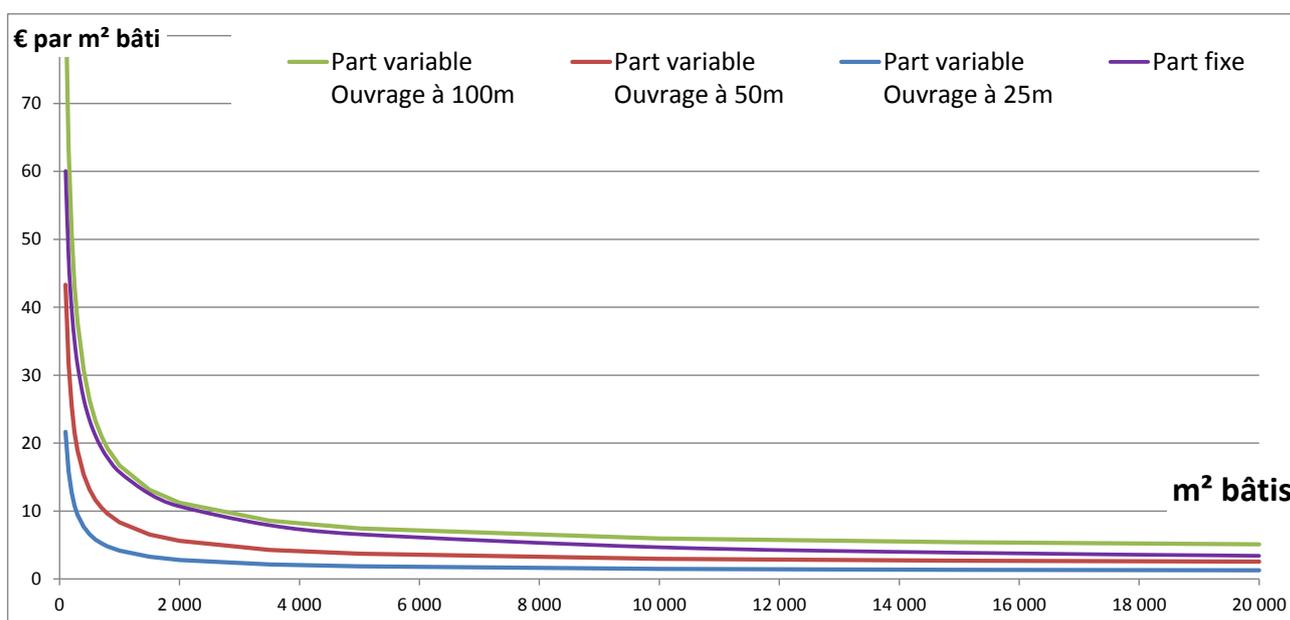


Figure 31 : Allures des courbes constituant la structure de coûts d'investissement. Cas des doublets sur aquifère (valeurs constatées pour du bâti non BBC).

L'exemple ci-avant s'applique à des doublets géothermiques sur aquifères. On propose de les rapporter à des demandes thermiques de bâtiments de type RT-2005 ou normalement performants, donc modérément exigeants en énergie thermique :

- ECS : 26 kWh/m².an (3 à 4 personnes pour un logement de 100 m²) ;
- chauffage : de 50 à 100 kWh/m².an ;
- puissance indicative de la machinerie : 4 à 5 kW pour un logement de 100 m² (0,8 à 1 MW pour 20 000 m² raccordés)

Les coûts **qui ont pu être collectés** sont proportionnels à la surface raccordée. Une modulation (également proportionnelle à la surface) a été ajoutée en fonction de la profondeur de l'ouvrage. Chacun des deux coûts s'exprime de la façon suivante :

$$\text{Coût} = A + B \cdot \text{Surface}_{\text{bâtie}}^C \quad (\text{en } \text{€TTC}/\text{m}^2)$$

L'exploitation de la structure des coûts ci-avant conduit aux montants suivants des investissements, ces valeurs restant évidemment indicatives car les coûts des projets réels peuvent diverger.

	Part proportionnelle	Modulation fonction de la profondeur de l'ouvrage			
		Ouvrage à 25 m	Ouvrage à 50 m	Ouvrage à 100 m	Ouvrage à 2 000 m
A	1,00	1,00	2,00	4,00	80,00
B	950,0	875,0	1 750,0	3 500,0	70 000,0
C	-0,6032	-0,8135	-0,8135	-0,8135	-0,8135

Tableau 21 : Paramétrage des investissements cas de la solution de référence sur aquifère.

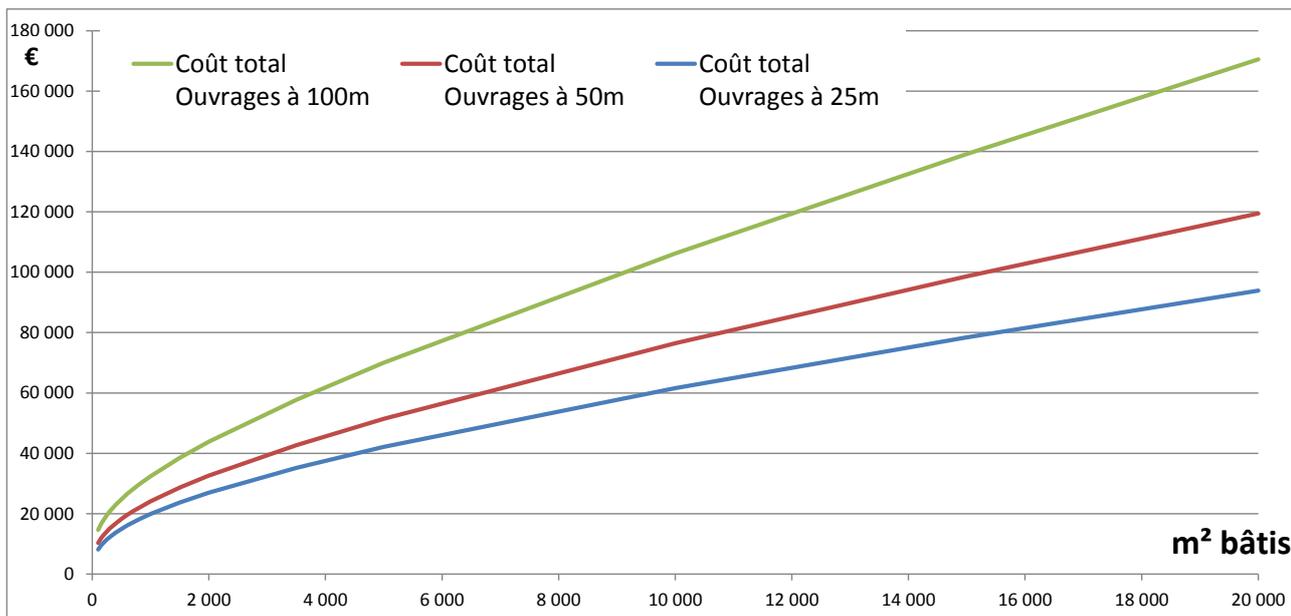


Figure 32 : Coûts indicatifs d'ouvrages géothermiques – cas des doublets sur aquifère (valeurs constatées pour du bâti non BBC).

La formulation proposée semble pouvoir rester valide à des profondeurs importantes et pour des surfaces raccordées conséquentes (géothermie BE).

Ainsi, avec les coefficients A, B et C ci-avant, un ouvrage à 2 000 m de profondeur raccordé à 200 000 m² d'habitation ressort à un niveau d'investissement de 17 M€.

Dans ce cas, la puissance souscrite indicative, selon la classe énergétique ressort entre 7 et 10 MW (9 à 14 MW souscrits en tenant compte d'un taux de foisonnement de 75 % pour le réseau de chaleur).

Important. Dans la présente étude, les coûts des ouvrages sur aquifères sont issus d'un traitement de données collectées sur des opérations existantes, c'est-à-dire pour du bâti à relativement bas niveau de performance énergétique.

On va donc convenir (voir pages suivantes) d'une stratégie de transposition pour le bâtiment à haute performance énergétique.

Les deux graphiques ci-après représentent des zooms des deux graphiques qui précèdent pour les petites installations en notant bien que les données ayant permis la constitution de ces courbes se rapportent à des bâtiments peu efficaces du point de vue énergétique.

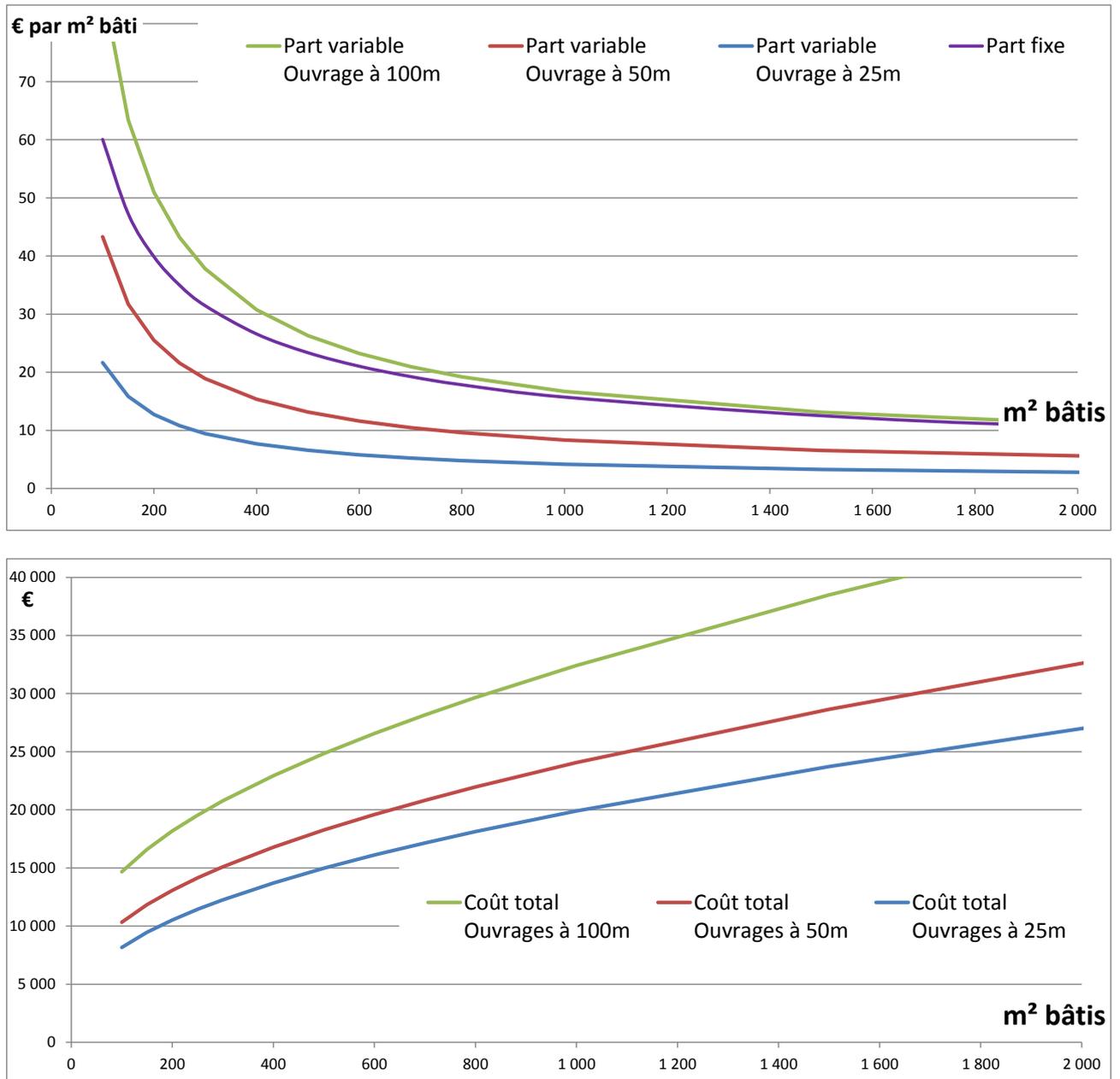


Figure 33 : Détail des coûts indicatifs d'investissement des doublets de faible puissance (valeurs constatées pour du bâti non BBC).

Important. Dans la présente étude, les ouvrages sur aquifère sont toujours des doublets géothermiques.

Transposition pour le bâtiment à haute performance énergétique

Comme indiqué en pages précédentes, les données de coût des ouvrages sur aquifères rapportés au m² raccordé sont connus pour du bâti à relativement bas niveau de performance énergétique ; typiquement du bâtiment social moyennement performant. Dans cette étude, il va être proposé de conserver les mêmes données de coûts des ouvrages mais en effectuant une conversion portant sur les m² raccordés. On prendra comme base 100 le mode chaud du bâtiment social moyen, soit 120 kWh/m².an. On rapportera ensuite la demande de chaud du bâtiment analysé à cette base 100 pour produire un coefficient de correction de surface. Dans les modèles simplifiés, ce coefficient sera calculé automatiquement.

Demande en énergie utile	Chauffage + ECS	Chauffage seul	ECS seul	Coefficient de correction de surface
	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	
BBC Neuf	32	6	26	26,7 %
BBC rénovation	54	28	26	45,0 %
RT-2005	84	58	26	70,0 %
Bâtiment social moyen	120	94	26	100,0 %
Bâtiment peu performant	178	152	26	148,3 %
Limite classes E à F	236	210	26	196,7 %

Tableau 22 : Coefficient de correction de surface selon la classe du bâtiment.

La part proportionnelle et la part modulée par la profondeur seront alors calculées avec la nouvelle surface : **Surface = Coefficient x Surface.Bâtie** et on aura :

Coût des ouvrages (en €/m²) = Surface x (part proportionnelle + Modulation)

	Part proportionnelle (en €TTC/m ²) A + B , Surface ^C	Modulation (en €TTC/m ²) A + B , Surface ^C
A	1,00	0,04 x profondeur
B	950,0	35 x profondeur
C	-0,6032	-0,8135

Tableau 23 : Paramétrage des investissements, cas de la solution de référence sur aquifère.

L'exemple ci-dessous se rapporte à un bâtiment BBC rénovation de 1 000 m² en climat orléanais et justifiant une puissance géothermique maximale de 15,3 kW (calculé).

Paramétrage du dimensionnement et des coûts des doublets géothermiques				
	Ouvrage	Référence		
Profondeur :	35	20	W/m ² de sol (10 à 30 très bon)	
Coefficient :	45 %	45 %		
Surface équivalente :	450	450	m ²	
Part proportionnelle :	11 178,0	11 178,0	€ TTC	A
Modulation par profondeur :	4 457,9	2 547,4	€ TTC	B
Total Doublets :	15 635,9	13 725,4	€ TTC	C

	A	B	C
Part proportionnelle	1	950	-0,6032
Modulation par profondeur	0,0400	35	-0,8135

Tableau 24 : Paramétrage de l'investissement pour les doublets géothermiques.

4.1.2. Modèle simplifié d'investissement pour les SGV (cas 2)

Puissance spécifique des SGV et dimensionnement

Afin d'estimer le dimensionnement des SGV, il faudrait théoriquement émettre des hypothèses sur la puissance spécifique des sondes géothermiques, cela en fonction :

- de leur profondeur et de la nature du terrain ;
- de la distance entre sondes lorsqu'elles sont implantées en champ.

Toutefois, un tel exercice peut être délicat à l'échelle macroéconomique compte tenu de la grande diversité des contextes, ce qui peut induire une réelle difficulté à rendre homogènes et comparables les descriptions réelles. Dans la présente étude, il est donc proposé une approche macroscopique qui va permettre à l'analyste d'examiner la sensibilité au dimensionnement :

- **Fonctionnement** : le modèle de sources géothermiques intègre déjà un critère qui permet de jauger l'incidence du dimensionnement sur les charges de fonctionnement en agissant sur la dérive de la température du sol en fin de saison, laquelle impacte le COP de la machinerie thermodynamique en tenant compte de la profondeur médiane de l'ouvrage géothermique. Dans la présente étude, le fonctionnement prend donc implicitement en considération les critères géométriques des SGV.
- **Investissement** : la présente étude va considérer que le dimensionnement nominal, qui lie la puissance à la longueur forée, va être modulé uniquement en fonction de la distance entre sondes lorsqu'elles sont implantées en champ. Les deux paramètres ci-après sont introduits. La minoration (qui peut être nulle) est typiquement appliquée au-delà d'une puissance installée de 45 kW géothermiques.

Paramétrage du dimensionnement et des coûts des SGV		
Puissance linéaires nominale	50	W/m (saisi)
Minoration de puissance (champ de sondes)	20 %	(saisi)
Modulation des coûts (terrain ou profondeur)	0 %	(saisi de -25 % à +25 %)

Tableau 25 : Paramétrage du dimensionnement et des coûts des SGV.

Coûts standard

Dans le cas des sondes géothermiques, l'usage est de rapporter l'investissement au nombre de mètres forés et équipés alors que le besoin pour les études macroéconomique serait plutôt de rapporter l'investissement au m² raccordé comme cela a été fait pour les doublets géothermiques (voir plus loin).

Pour les coûts des forages, la littérature conduit à proposer une linéarisation des coûts moyens ; cette linéarisation encapsulant les parts fixes et variables. On va considérer l'équation ci-après dont les valeurs par défaut ne sont pas valides pour les sondes profondes (plus de 200 m de profondeur) :

Coût des sondes géothermiques (en k€ TTC) = A + B . Longueur.forée

où A vaut 300 € TTC par défaut (n'est pas affecté par la modulation),
B vaut 59,7 par défaut (correspondant à 60 k€ pour 1 000 m forés).

Incidence de la profondeur des ouvrages et de la nature des terrains

Pour ce qui est de l'incidence de la profondeur sur l'investissement, l'écart de coût est de l'ordre de 2 € par mètre pour une sonde de 200 m de profondeur vis-à-vis d'une sonde de 100 m. Cet écart est lié aux coûts des composants, l'atelier de forage étant souvent identique. La présente étude propose de ne pas en tenir compte. Pour les sondes de faibles profondeurs, un écart de coût serait imputable à l'amortissement de l'atelier de forage dont le coût d'achat est moindre que celui des machines capable de 100 m et plus. En toute logique, il faudrait appliquer une minoration de l'ordre de 15 % à 20 % vis-à-vis du prix par défaut ci-avant mais les machines de ce type restent rares en France (où le standard est une sonde de 100 m).

Concernant l'incidence de la nature du terrain et donc de la difficulté à mener les opérations de forage, on constate, selon les localisations et pour une sonde standard de 100 m de profondeur, des coûts allant de 4 k€ à 9 k€ TTC.

Coûts des raccordements et essais

L'estimation de l'investissement va également nécessiter l'estimation des coûts de raccordement et des essais qui sont loin d'être négligeables vis-à-vis des coûts des sondes géothermiques. On va alors considérer par défaut que ces coûts s'établissent entre 20 % et 60 % du coût standard des forages hors modulation ; la valeur par défaut étant suggérée entre 20 % et 33 %. L'équation est alors la suivante :

$$\text{Coût des raccordements (en k€)} = \text{XX \%} \times \text{Coût SGV (avant modulation)}$$

Coûts des SGV rapportés au m² raccordés

Les modèles simplifiés de chroniques de consommations électriques spécifiques et de temps de fonctionnement produisent également les chroniques d'énergie géothermique spécifique, à la fois pour la technique de référence *et* pour la technique géothermique étudiée. Ces chroniques sont déduites du profil de demande thermique du bâti raccordé conformément à la RT, c'est-à-dire les demandes annuelles rapportées au m². De ce fait, connaissant pour chaque usage le temps de fonctionnement (en heures par mois) et la quantité d'énergie en jeu (en kWh/m².mois), le dimensionnement des SGV peut être rapporté à la surface du bâti raccordé.

Toutefois, contrairement aux ouvrages sur aquifères dont le dimensionnement, du moins pour les petits ouvrages, n'est qu'indirectement lié à la puissance géothermique (le débit d'un ouvrage sur nappe excède souvent assez largement le besoin), les SGV sont en général dimensionnées pour la puissance géothermique demandée. De ce fait, dans cette étude, il est proposé d'envisager le dimensionnement par défaut sur la base des puissances géothermiques calculées pour le Cycle-10.

Nota : On pourra considérer que le dimensionnement est effectué soit pour le mode climatisation soit pour le mode chaud (ECS + chauffage), le mode rafraîchissement direct étant à ce jour considéré comme marginal.

Synthèse des coûts des SGV

Dans la présente étude, on propose de restreindre la plage de variation des coûts entre +25 % et -25 % vis-à-vis de la courbe de coûts standards, cette restriction n'étant toutefois pas intangible.

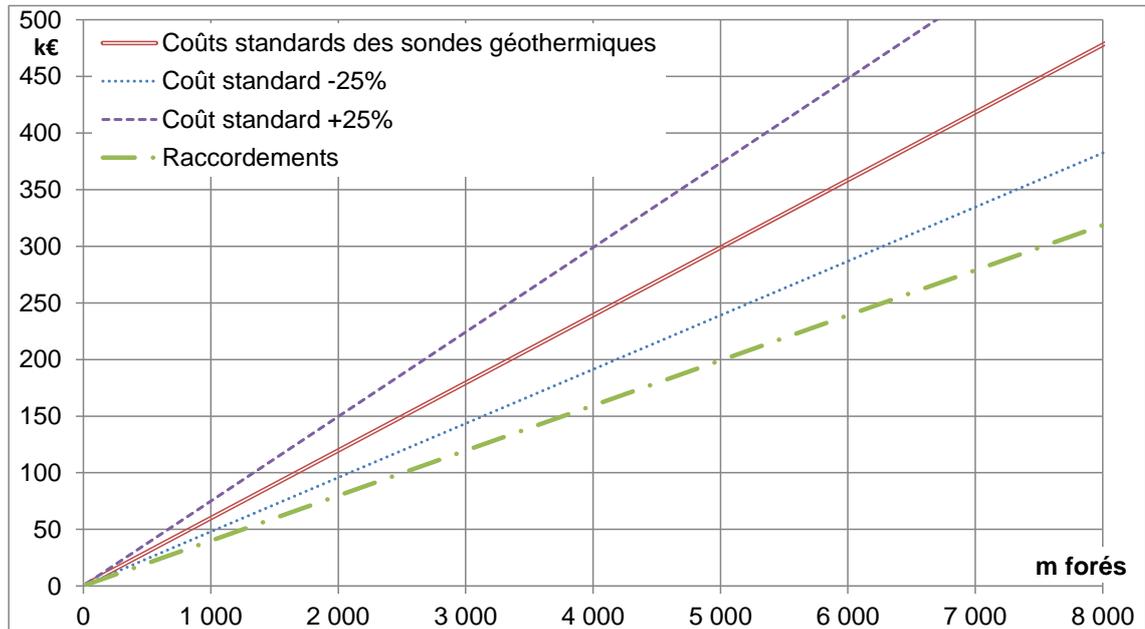


Figure 34 : Coûts typiques pour les sondes géothermiques et les champs de sondes.

Le paramétrage des investissements pour les SGV prendra la forme suivante (exemple d'un bâtiment BBC-rénovation de 1 000 m² en climat orléanais conduisant une puissance géothermique nominale de 15,6 kW (calculé) :

Paramétrage du dimensionnement et des coûts des échangeurs compacts			
Puissance linéaires nominale :	50	W/m (saisi)	
Minoration de puissance :	0 %	Pour champ de sondes (saisi)	
Modulation éventuelle des coûts :	0 %	(saisi de -25 % à +25 %)	
Longueur forée :	320	m forés	A
Coût standard forages SGV :	19 404,0	€ TTC	300
Coût raccords + Essai :	3 880,8	€ TTC	20 %
Modulation sur part forages :	0,0	€ TTC	
Total Investissement SGV	23 284,8	€ TTC	B x foré 59,7 Sur standard

Tableau 26 : Paramétrage de l'investissement pour des SGV.

IMPORTANT. Dans la présente étude, les coûts standards des SGV peuvent paraître élevés vis-à-vis des coûts constatés dans certaines régions. Dans ce cas, une modulation sera appliquée.

4.1.3. Modèle simplifié d'investissement pour les échangeurs de subsurface (cas 1)

Cas des échangeurs compacts (corbeilles géothermiques)

Les coûts des corbeilles géothermiques ont été estimés sur la base de coûts constatés sur les très rares opérations réalisées à ce jour. La structure des coûts a été décomposée en deux postes :

- coûts des fournitures (corbeilles, raccords, collecteurs...) : le coût est proportionnel au nombre de corbeilles ;
- les coûts de mise en place et de raccordement : ce coût est constitué d'une part fixe (amené/repli, chantier...) et d'une part proportionnelle au nombre de corbeilles géothermiques.

Le nombre d'unités à installer est calculé automatiquement en fonction de la surface raccordée et de la classe énergétique du bâtiment sur la base des énergies géothermiques échangées pour le 10^{ème} cycle d'exploitation. L'exemple ci-dessous se rapporte à un bâtiment BBC rénovation de 1 000 m² situé en climat orléanais et justifiant une puissance géothermique maximale de 15,7 kW (calculé).

Paramétrage du dimensionnement et des coûts des échangeurs compacts			
Puissance unitaire nominale	0,7	kW par unité (saisi par l'analyste)	
Nombre d'échangeurs compacts :	23	Unités	€ TTC x Nb unités
Fournitures :	9 200,0	€ TTC	400
Coûts installation et raccordements :	6 560,0	€ TTC	220
Total Échangeurs Compacts	15 760,0	€ TTC	

Tableau 27 : Paramétrage de l'investissement pour des corbeilles géothermiques.

Cas des échangeurs horizontaux

Les coûts d'investissement pour les échangeurs horizontaux sont calculés exactement sur le même principe que ceux des corbeilles ci-avant. Toutefois, le paramètre essentiel à renseigner est la qualité du sol en W/m² : de 10 (mauvais) à 30 (très bon). Dans la présente étude, on ne distingue pas explicitement le diamètre des tubes ni leur densité de répartition. L'exemple ci-dessus est pour le même bâtiment que pour les corbeilles ci-avant, mais la puissance géothermique calculée est portée à 18,1 kW compte tenu d'un meilleur COP en début de saison de chauffe.

Paramétrage du dimensionnement et des coûts des échangeurs compacts			
Qualité du sol :	20	W/m ² de sol (10 à 30 très bon)	
Nombre de m ² à installer :	910	m ²	€ TTC x m ²
Fournitures :	9 100,0	€ TTC	10
Coûts installation et raccordements :	10 600,0	€ TTC	10
Total Échangeurs Horizontaux	19 700,0	€ TTC	

Tableau 28 : Paramétrage de l'investissement pour des échangeurs géothermiques horizontaux.

4.1.4. Modèle simplifié d'hybridation d'énergies et d'appoint

Hybridation et mutualisation

Dans la pratique, les ingénieries thermiques conçoivent les machineries thermodynamiques de manière à, lorsqu'il y a production de froid pour la climatisation, exploiter la chaleur résiduelle pour la production de l'ECS, voire pour d'autres applications.

- Pour les petits systèmes, on considère dans la présente étude que cette fonctionnalité n'est pas réellement disponible sur les PAC 2-services.
De ce fait, la machinerie thermodynamique va produire séparément l'ECS et le froid. Les profils de demande thermique du bâtiment restent inchangés :
 - la demande d'ECS est identique pour tous les mois de l'année,
 - la demande de climatisation est indexée sur le DJU de climatisation.
- Pour les gros systèmes, on va considérer dans la présente étude que cette fonctionnalité est déjà prise en compte dans le profil thermique du bâti et est donc déjà répercutée dans la valeur de demande annuelle d'ECS et de climatisation.
On pourrait envisager l'introduction d'une modulation des chroniques mensuelles de demande d'ECS, la chronique de climatisation restant par contre indexée sur les DJU. À noter que la demande annuelle d'ECS restera inchangée.
Néanmoins, à ce stade de développement des modèles simplifiés, il est considéré que les effets restent marginaux puisque le bâti fortement demandeur en climatisation (locaux tertiaires et commerciaux) est peu demandeur en ECS.
Il restera à traiter dans une étude spécifique les cas des locaux qui ont des demandes comparables en ECS et en climatisation de type hôpitaux, maisons de soins, hôtels...

De même, émergent progressivement des systèmes climatiques du bâtiment qui hybrident différentes énergies, les dispositifs solaires étant en pointe.

Approche méthodologique

Dans la présente étude, il est proposé de gérer cette hybridation en une approche conjointe avec la gestion de l'appoint thermique.

Sur le principe, il est proposé, une approche de type « analyse de sensibilité ». Pour cela, on introduira des « chroniques mensuelles d'énergie thermique externe » qui viendront, par simple addition, moduler les chroniques mensuelles de demandes qui sont calculées pour le bâti sur la base des profils thermique du bâti conformes à la RT.

Pour comprendre le mécanisme, il est nécessaire d'exposer la démarche qui a été implémentée dans les modèles simplifiés sous EXCEL.

Méthode implémentée sous EXCEL

Pour ventiler les énergies annuelles dans les chroniques mensuelles, le modèle travaille sur les chroniques de DJU issue de la météo selon la logique suivante :

- les données d'entrée sont :
 - le profil annuel de demande du bâti en kWh/m².an (ECS, Chauff., Clim., frais),
 - les chroniques de DJU calculés à partir des données météo (Chauff., Clim., frais) ;

	ECS	Chauffage	Clim.	Frais
Demande Bâti (kWh/m ² ,an)	26,00	6,00	6,00	0,00
COP nominal	4,0	4,0	5,2	1
Demande GTH (kWh/m ² ,an)	19.50	4.50	7,15	0,00
Degrés-Jour	'DJU_ECS'	DJUchaud	DJUfroid	DJUfrais
Calculés (°C-J,an)	/	Chaud-18	Froid-10	Frais-18
Calculés selon météo (°C-J,an)	/	-1449,00	2043,00	468
Coefficient de modulation	4,33	1,00	1,00	1,00
Minima	523,25	0,00	0,00	0,00
Janv	-523,25	-289,50	0,00	0,00
Févr	-523,25	-283,50	0,00	0,00
Mars	-523,25	-229,50	15,00	0,00
Avr	-523,25	-160,50	84,00	0,00
Mai	-523,25	-37,50	207,00	0,00
Juin	-523,25	0,00	315,00	72,00
Juil	-523,25	0,00	402,00	159,00
Août	-523,25	0,00	408,00	165,00
Sept	-523,25	0,00	315,00	72,00
Oct	-523,25	-28,50	216,00	0,00
Nov	-523,25	-163,50	81,00	0,00
Déc	-523,25	-256,50	0,00	0,00
Maxima	523,25	289,50	408,00	165,00
Sommes annuelles	-6 279,00	-1 449,00	2 043,00	468,00
Cumuls	Mode chaud		Mode froid	
	-7 728,00		2 511,00	

Tableau 29 : Exemple de table de référence pour la ventilation des échanges géothermiques.
Cas de la station climatique d'Ajaccio pour du bâti BBC neuf.

- l'algorithme est le suivant (signe moins pour les prélèvements de chaleur dans le sol) :
 - en fonction du COP machine (Chaud et Clim), on estime le profil géothermique annuel de demandes à la source géothermique pour chacun des quatre usages,
 - en fonction du profil géothermique annuel, on détermine le coefficient à affecter au DJU-ECS équivalent vis-à-vis des DJU Chauffage,
 - des DJU modulées sont déterminés au prorata des coefficients de modulation vis-à-vis des DJU météo, seul le DJU pour l'ECS étant en fait recalculé.

Pour simplifier la lecture, la table ci-avant est laissée homogène avec les DJU alors qu'elle ne sert qu'à ventiler les différentes grandeurs énergétiques dans les chroniques mensuelles au prorata du ratio entre la valeur annuelle dans la table et la somme annuelle.

Introduction des chroniques d'énergie thermique externe

Sur le principe, pour introduire l'effet d'apports externe d'énergie (par exemple : solaire thermique pour l'ECS ou appoint pour le chauffage), on calculera une table similaire à la table des DJU ci-avant. Une convolution de ces deux tables sera ensuite opérée afin de produire une table résultante qui va donc impacter les profils des demandes en ECS, chauffage, climatisation ou rafraîchissement direct (géocooling).

Dans la cadre de cette étude, cette approche méthodologique a été testée avec des grandeurs arbitraires mais n'a pas été implémentée faute de retours sur expériences suffisants.

- **Cas du solaire thermique**

Un des objectifs d'une prochaine étude pourrait être de prendre en considération les apports solaires thermiques.

À cet effet, la base de données climatique de la feuille EXCEL a été renseignée avec les données liées au rayonnement solaire à partir desquels on sait produire un modèle simplifié de production de chaleur selon la localisation.

Très probablement, l'intérêt serait d'implémenter une dimension de stockage géologique périodique (déphasage thermique ou stockage inter-saisonnier). À ce jour, il semble nécessaire de voir comment, notamment, les marchés des échangeurs géothermiques compacts et des champs de sondes vont se développer, cela afin de disposer de retours sur expérience pour calibrer les modèles simplifiées.

- **Cas des appoints thermiques**

Concernant un appoint thermique pour le chauffage, il ressort que les futurs bâtiments BBC ou passifs auront des niveaux demandes thermiques que pourraient satisfaire à 100 % des dispositifs géothermiques sans que puisse être économiquement justifié le recours à un appoint autre que solaire, les dispositifs de type bois-énergie pouvant être décidés plus sur un critère d'agrément qu'économique.

Sur ce volet appoint thermique, il paraît judicieux d'attendre l'arrivée sur le marché des nouvelles générations de machineries thermodynamiques avant d'avancer plus avant sur les modèles simplifiés.

4.1.5. Modèle simplifié d'investissement pour les machineries thermodynamiques

La dénomination « machinerie thermodynamique » a été introduite vis-à-vis de la dénomination « pompe à chaleur » pour, en particulier, faire allusion aux chauffe-eaux thermodynamiques dont certains peuvent (pourront) être sur géothermie.

Afin de présenter une structure de coûts des investissements des machineries thermodynamiques (pompes à chaleur et accessoires), la littérature propose quelques résultats transposables à une échelle « macroscopiques ».

Ces coûts indicatifs sont usuellement rapportés à la surface du bâti raccordé ou à la puissance thermique installée.

Approche en coûts des PAC rapportés à la puissance installée

Pour ce qui est de l'approche rapportée à la puissance installée, on peut notamment citer le rapport « *Chauffage géothermal en maisons individuelles groupées* » édité en 2007 par le COSTIC avec la collaboration du BRGM et avec l'aide financière de l'ADEME.

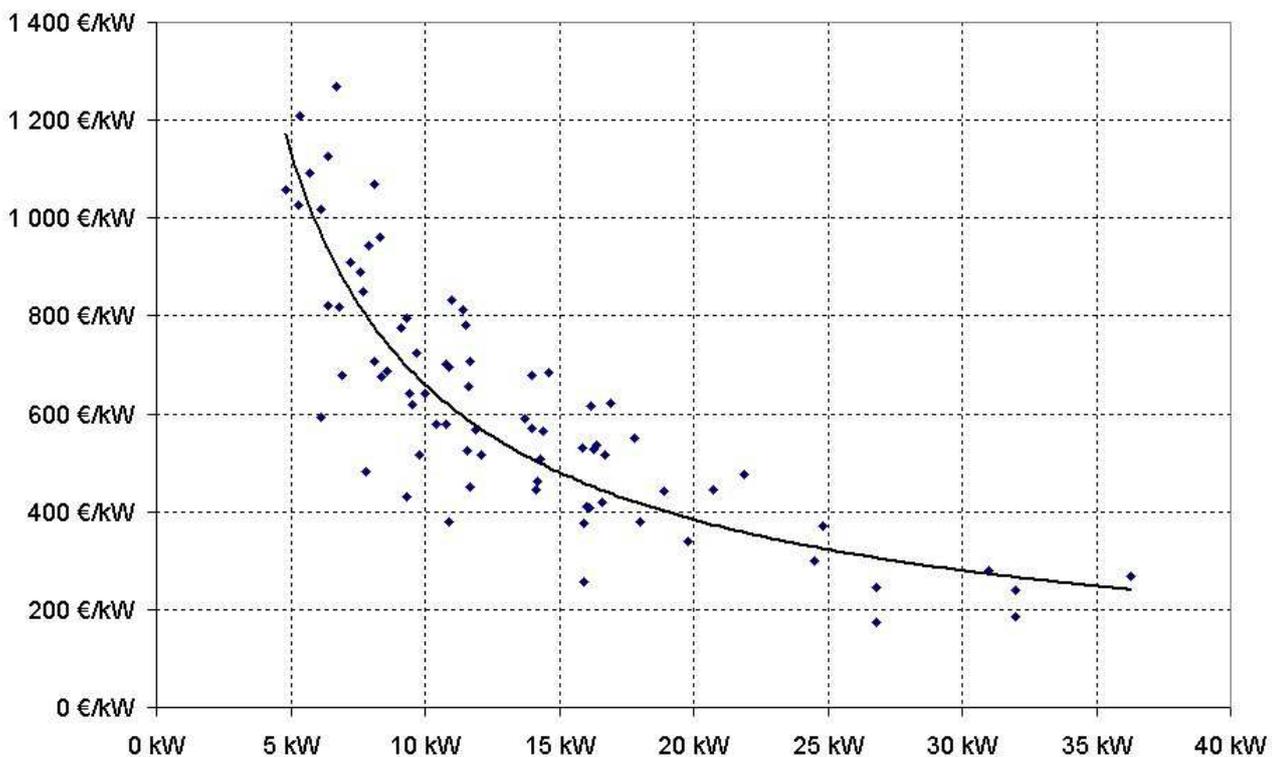


Figure 35 : Allures des coûts spécifiques des machines thermodynamiques (prix public) fonctions de la puissance installée (source COSTIC, 2007).

Dans la présente étude, on considèrera que les structures des coûts pour les machines thermodynamiques seront toujours représentées par des courbes à l'allure semblable à la courbe ci-avant.

Pour établir une modélisation simplifiée, il est donc proposé de paramétrer la courbe ci-avant en introduisant des valeurs des coûts connues et/ou imposées par l'analyste dans une formule de type :

$$\text{Coût} = A + B \cdot P^C$$

où :

- P est la puissance installée,
- A est le coût pour les très grandes valeurs de la puissance installée (projection à l'infini),
- B est le coût pour une puissance installée égale à 1 kW diminuée de A,
- C est calculé en fixant une valeur intermédiaire du coût, par exemple à P = 10kW et en résolvant l'équation ci-avant, ce qui donne :

$$C = \frac{\text{Log}\left(\frac{P - A}{B}\right)}{\text{Log}(10)}$$

Numériquement, on aura sur la base des points de de la courbe du rapport COSTIC :

- coût TTC pour les très grandes valeurs de P : A = 50 €/kW ;
- pour P = 1 kW, le coût est 4 000 €TTC /kW => : B = 3 950 (= 4 000 – 50) ;
- pour P = 10 kW, le coût est 650 €TTC/kW => : C = - 0,81845.

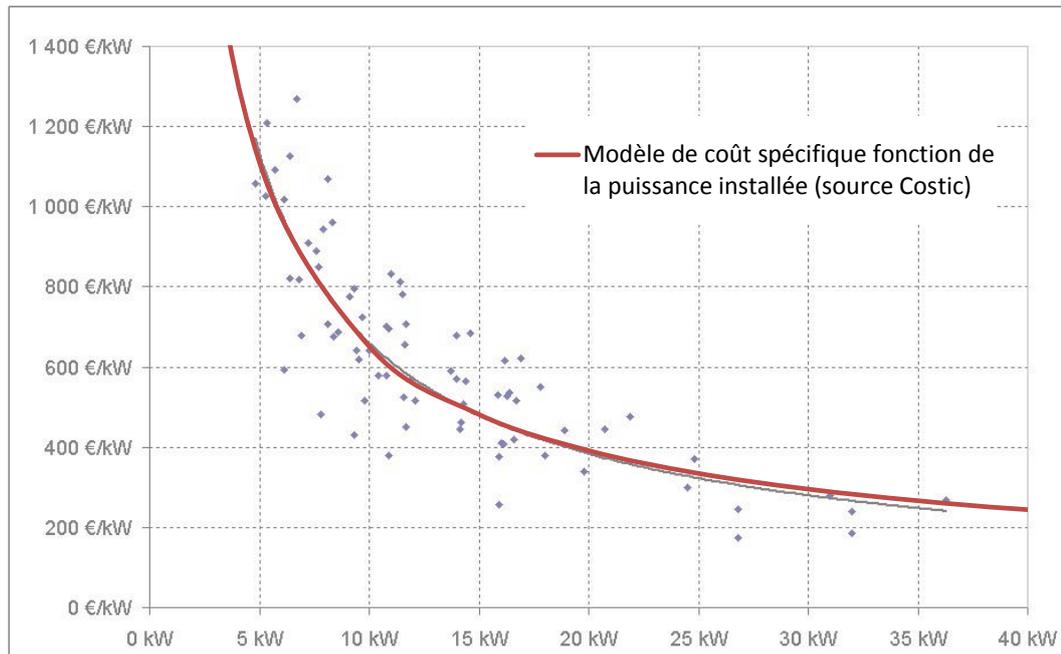


Figure 36 : Modèle de coût spécifique des pompes à chaleur fonction de leur puissance.

Numériquement, le modèle proposé n'a pas de limite de validité contrairement à la répression proposée dans le rapport COSTIC. Cette représentation a donc été confrontée aux prix 2011 des gammes CIAT (AUREA et DYNACIAT) couvrant des puissances unitaires entre 7 kW et 80 kW). On constate que les ratios de 2007 restent valides pour les petites puissances (jusqu'à 4 kW).

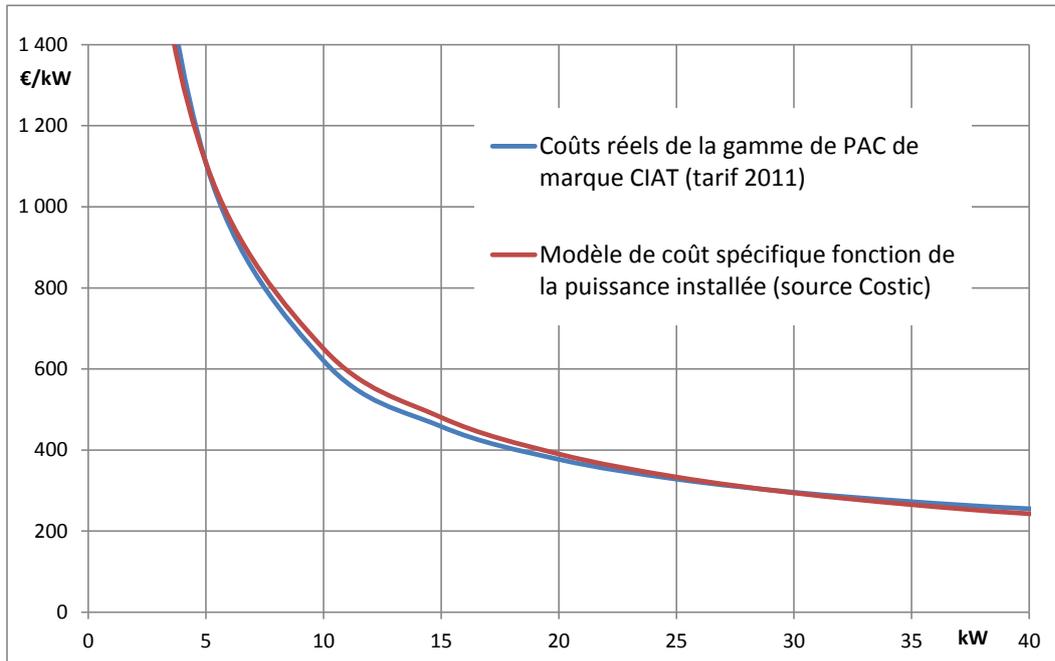


Figure 37 : Validation du modèle de coût spécifique des pompes à chaleur pour les petites puissances (sources Costic et CIAT).

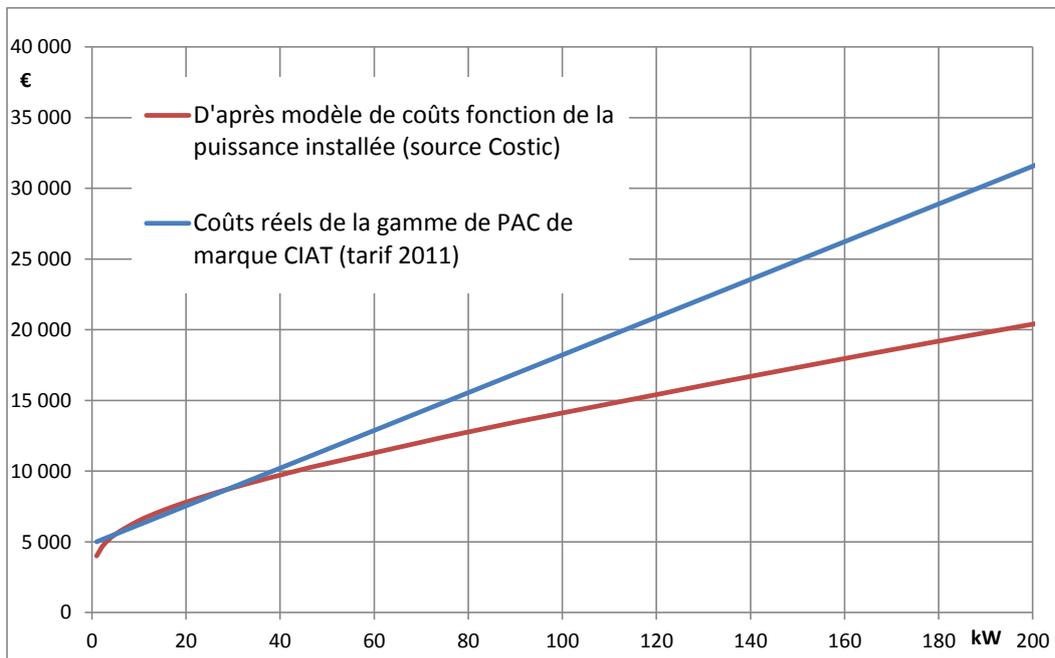


Figure 38 : Coûts spécifiques des pompes à chaleur retenus pour le modèle simplifié.

Numériquement, on aura pour les pompes à chaleur des gammes CIAT :

- coût pour les très grandes puissances : $A = 133$ (en €/kW) ;

- pour $P = 1 \text{ kW}$, le coût est $5\,000 \text{ €TTC/kW} \Rightarrow : B = 4867 (= 5\,000 - 133)$;
- pour $P = 10 \text{ kW}$, le coût est $650 \text{ €TTC/kW} \Rightarrow : C = - 0,7377$.

Dans les faits, ces représentations traduisent des gammes de prix pratiquement linéaires et on préférera donc ce second jeu de valeurs pour le modèle simplifié.

Approche en coûts des PAC rapportés à la surface raccordée

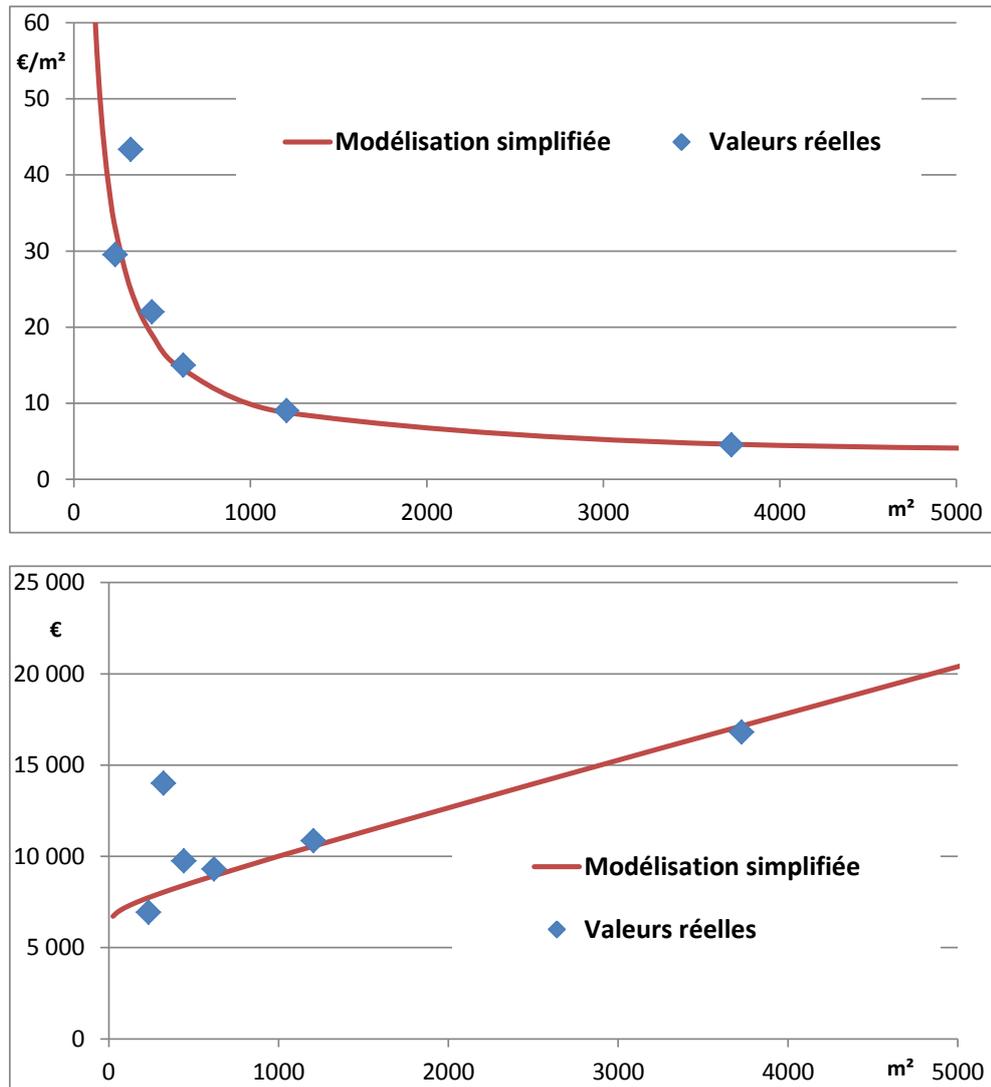


Figure 39 : Lien entre le coût spécifique des pompes à chaleur et la surface raccordée.

Sur la base de quelques retours sur opération, les équipes du BRGM ont cherché à identifier un lien entre la surface raccordée et le coût d'achat de la PAC. Les données (collectées en région Centre) ont été peu nombreuses mais une représentation sur le même principe que pour la puissance installée semble pouvoir être envisagée :

$$\text{Coût} = A + B \cdot S^C$$

où S est la surface raccordé et les paramètres A, B et C sont identiques à ci-avant.

Numériquement, on aura les valeurs suivantes pour le coût spécifique des pompes à chaleur fonction de la surface desservie :

- coût pour les très grandes surfaces : $A = 2,5$ (en €TTC/m²) ;
- si pour une surface de 1 m², le coût est 6 000 €/m² => $B = 5\,997,5$ (= 6 000 – 2,5) ;
- si pour une surface de 1 000 m², le coût est 10 €/m², alors on a : $C = -0,96764$.

Vérification des ordres de grandeur

L'objet de ce paragraphe est de confronter les indications issues des deux approches ci-avant. Le modèle de coûts des PAC fonction de la surface raccordée propose pour un coût d'achat d'une PAC de 10 000 €TTC, une surface raccordée de 1 000 m². Pour ce même montant, une PAC de la gamme CIAT aurait une puissance nominale de 40 kW. En première approche, cette puissance thermique restituée correspond à 3 000 heures de fonctionnement d'une PAC de 40 kW raccordées à un bâtiment de 1 000 m² ayant pour consommation spécifique en énergie utile : 26 kWh/m² pour l'ECS et 90 kWh/m² pour le chauffage. **On peut donc considérer que les modèles sont validés pour ce point de fonctionnement.**

En tout état de cause, les modèles sont paramétrables et peuvent être ajustés.

4.1.6. Modèle simplifié d'investissement pour les coûts des auxiliaires

Dans la présente étude, on convient d'inclure dans le poste « Auxiliaires », les coûts d'installation, de raccordement et de mise en service, étant entendu que le secondaire de la PAC n'est pas pris en considération.

Par contre, dans la présent étude, le poste « Circulation » est traité séparément en raison des charges de maintenance et de fonctionnement qui lui sont directement associées. Ce paragraphe exclut également le cas des réseaux de chaleur.

Majoration de l'investissement pour les PACg réversibles

On convient ici de ne pas introduire de majoration pour les PACg réversibles.

Majoration de l'investissement pour la production de l'ECS

La production de l'ECS étant optionnelle, ce poste est distingué des auxiliaires. La majoration de l'investissement pour l'ECS est indexée sur le coût d'investissement de la PACg. On va considérer ici que le taux de majoration est décroissant avec la taille de l'équipement. Pour cela, on va introduire une part fixe et une part variable :

- **part fixe de la majoration pour l'ECS** : 1 000 €TTC (grandeur paramétrable) ;

- **part variable de la majoration pour l'ECS** : 0,1 € / € investi pour la PACg (grandeur paramétrable).

Illustration : une PAC achetée 10 k€TTC reviendra à 12 k€TTC (10 + 1 + 1) avec l'ECS.

Important. En toute logique, il faudra revoir le poste ECS dans le dispositif. En effet, même si les coûts des équipements thermodynamiques se neutralisent lors des comparaisons avec la solution de référence (sur géothermie), une révision du paramétrage de ce poste pourrait être nécessaire pour traiter la différence entre les PAC couramment installées à ce jour qui ne traitent, le cas échéant, l'ECS qu'en second service et celles qui pourraient traiter l'ECS en 1^{er} service.

Majoration de l'investissement pour les auxiliaires et l'installation

Dans la présente étude, les « auxiliaires » sont restreints à la boucle primaire (côté géothermie).

Pompage et circulation étant reportés sur un autre poste, les auxiliaires recourent néanmoins une large panoplie de composants variable selon les installations : régulation, raccordements électriques, échangeurs, vannes, raccordements aux ouvrages géothermiques...

Pour les grosses installations, on peut compter également les équipements tampon.

On convient ici de considérer l'investissement pour les auxiliaires comme une majoration proportionnelle à l'investissement pour la PAC et l'éventuelle option ECS. Ce poste intègre l'installation, le raccordement et la mise en service. On va considérer ici que le taux de majoration est décroissant avec la taille de l'équipement. Pour cela, on va introduire une part fixe et une part variable :

- **part fixe de la majoration** : 4 000 €TTC (grandeur paramétrable) ;
- **part variable de la majoration** : 0.5 € / € (grandeur paramétrable).

Illustration : une PAC achetée 12 k€TTC (éventuellement avec l'ECS) reviendra à 20 k€ (12 + 4 + 6) une fois raccordée et mise en service (hors ouvrages géothermiques).

Important. L'assiette des charges de maintenance de la machinerie thermodynamique reposera sur ce montant final de l'investissement.

4.1.7. Modèle de dimensionnement des pompes de circulation

Important. Le modèle de dimensionnement des pompes de circulation est essentiel en géothermie. En effet, on sait que si leur puissance est trop élevée vis-à-vis du système géothermique, le COP du système peut être significativement dégradé au point, parfois, de pratiquement annuler l'intérêt énergétique et donc économique d'une solution géothermique avec pompe à chaleur à haute performance.

Usuellement, les pompes de circulation sont représentées sur la base d'une modélisation linéaire entre le débit nominal d'eau géothermale ou de fluide caloporteur et la puissance (électrique) de la pompe de circulation. Cette représentation présente l'inconvénient de ne pas suffisamment mettre en évidence le lien avec l'efficacité du système d'exploitation de l'énergie géothermique.

Dans cette étude, on va donc directement rapporter l'énergie des pompes de circulation à l'énergie géothermique, cette approche ayant l'intérêt d'une compatibilité immédiate avec les usages directs de la géothermie : géocooling et BE (basse énergie).

Approche débit vs puissance de pompage en géothermie sur aquifère

La valeur par défaut du débit de pompage de la géothermie TBE sur aquifère est de l'ordre de 1 m³/h pour une puissance thermique échangée de 5 kW. Pour information, cette valeur de débit correspond à un ΔT de l'eau géothermale de 4,25 °C environ.

- pour un débit nul, la puissance électrique est égale à 0 ;
- pour un débit de 1 m³/h, la puissance électrique nominale nécessaire se situe entre **0,20 et 0,25 kW** pour les ouvrages jusqu'à 100 m ;
- pour information, en géothermie profonde basse énergie, une approximation réaliste de la puissance (en kW pour la somme des deux pompes) est obtenue avec un ratio puissance nominal sur débit nominal (en m³/h) compris entre 1 et 1,5.

Approche débit vs puissance de pompage en géothermie sur échangeurs

La valeur par défaut du débit de pompage de l'eau circulant dans les échangeurs est de l'ordre de 1 m³/h pour une puissance thermique échangée de 5 kW. Contrairement à la géothermie sur aquifère, on ne peut assimiler cette valeur de débit à un ΔT .

- pour un débit nul, la puissance électrique est égale à 0 ;
- pour un débit de 1 m³/h, la puissance électrique nominale se situera entre **0,15 et 0,25 kW**.

Approche puissance de pompage vs puissance géothermique

Important. Dans les modèles simplifiés, on va considérer que le débit du fluide peut ne pas constituer la référence la plus explicite et on préférera directement rapporter la puissance électrique de pompage (circulation) à la puissance géothermique puisée (ou échangée). Dans ce cas, on se rapportera à la valeur par défaut suivante :

$$\text{Ppompage} = \text{Pgéothermique} \times \text{Coefficient}$$

où Coefficient (constant ou non) est exprimé en % de la puissance géothermique.

La gamme usuelle du coefficient peut être entre 3 % et 10 % (voire plus), ce dernier cas peu favorable étant souvent constaté sur les doublets géothermiques à faible

profondeur pour des puissances typiques géothermiques de 5 à 20 kW. **Il s'agit alors d'un surdimensionnement qui dégrade l'efficacité énergétique** de l'opération comme le montrent les graphiques ci-après.

On peut vérifier sur ce graphique l'importance d'un bon dimensionnement de la puissance de la pompe de circulation. On peut notamment constater que, lorsque le COP machine augmente, la puissance géothermique puisée augmente également pour une même énergie utile, ce qui fait que, la puissance de pompage devant être ajustée proportionnellement à l'augmentation de la puissance géothermique, cela induit un optimum pour le COP système.

Important. Par simplification, dans tous les cas, les énergies thermiques résiduelles des pompes seront négligées dans les modèles simplifiés de la présente étude.

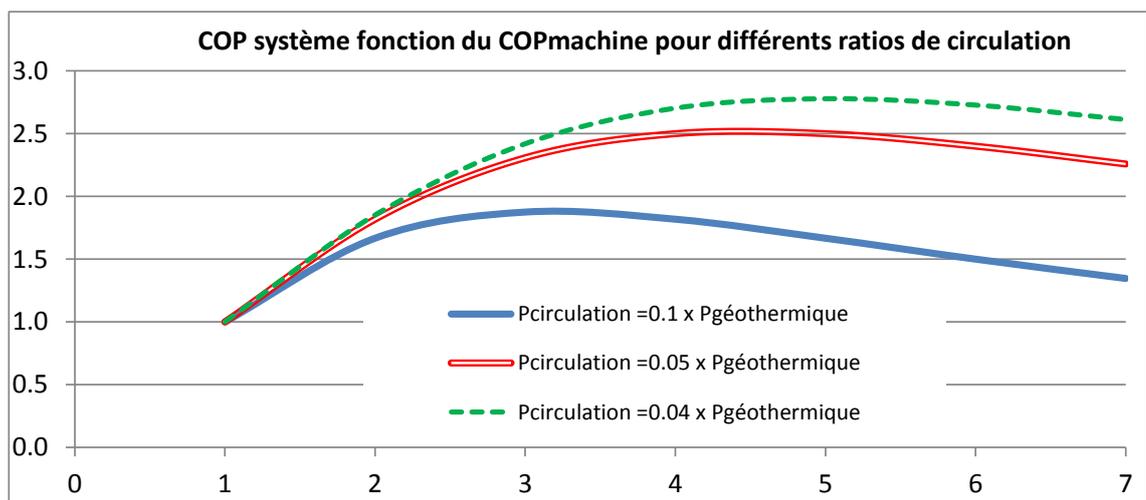
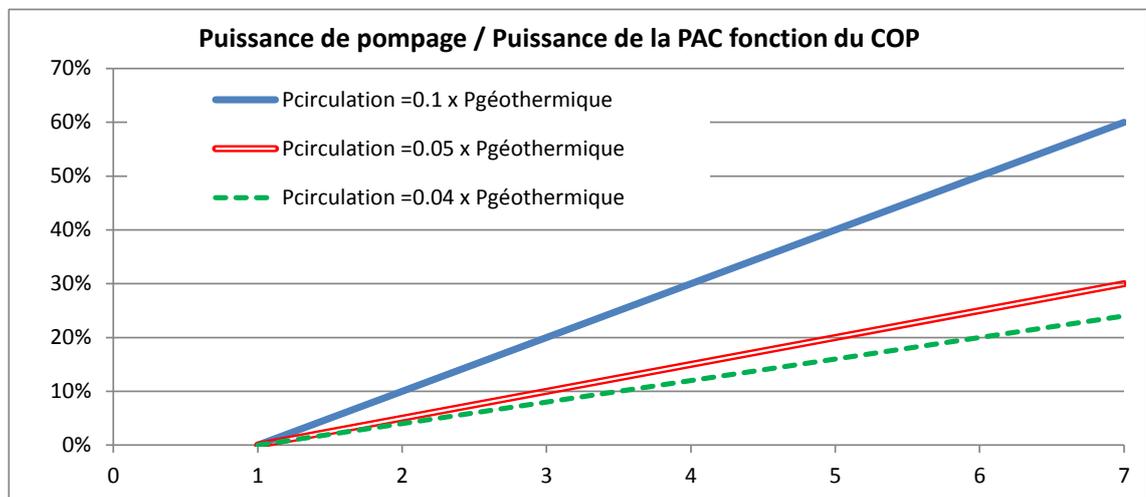


Figure 40 : Impact de la puissance de circulation sur l'efficacité énergétique du dispositif.

Investissement pour les pompes – Cas de la géothermie sur aquifère

L'investissement pour les pompes immergées est, en principe, fonction de la puissance (électrique) et de la profondeur d'immersion, notamment en raison de la longueur des câbles et conduites dans les ouvrages.

Sur la base d'une analyse sommaire des retours sur expériences, on peut proposer la décomposition suivante :

- **part fixe** : A = 200 €TTC (grandeur paramétrable) ;
- **part variable liée au débit** : B = 100 €TTC par m³/h (grandeur paramétrable) ;
- **coefficient multiplicateur lié à la profondeur** (grandeurs paramétrables) : ce coefficient multiplicateur prend indirectement en considération le fait que la puissance géothermique augmente avec la profondeur du fait de la température :
 - pour une profondeur nulle : 1 ,
 - pour une profondeur de 200 m : 2,
 - dans ce cas, la formule est donc : Coef.Multiplicateur = 1 + 0,005 x Z ;
- la formule finale pour l'expression du coût des pompes est alors :

$$\text{Coût_pompe (en €TTC)} = A + B \times P \times \text{Coef.Multiplicateur}$$

- pour l'expression fonction du débit :

$$\text{Coût_pompe (en €TTC)} = 200 + 100 \times Q \times \text{Coef.Multiplicateur}$$

- pour l'expression fonction de la puissance géothermique :

$$\text{Coût_pompe (en €TTC)} = 200 + 20 \times P \times \text{Coef.Multiplicateur}$$

La formulation ci-dessus, valide en géothermie TBE uniquement, fait l'hypothèse simplifiée qu'un débit de 1 m³/h est synonyme d'une puissance géothermique échangée indicative : P = 5 kW.

Illustrations :

Débit nominal (m ³ /h)	Puissance géothermique (kW)	Profondeur d'installation (m)	Investissement (€TTC)
2	10	20	420
2	10	50	450
10	50	20	1 300
50	250	50	6 450
200	1 000	100	30 200
200	1 000	200	40 200
200	1 000	1 000	120 200

Tableau 30 : Ordres de grandeur de l'investissement pour le pompage, cas de la géothermie sur aquifère (BE et TBE).

Investissement pour les pompes – Cas de la géothermie sur échangeurs

On admettra une approche similaire à celle de la géothermie sur aquifère mais sans coefficient multiplicateur liés à la profondeur.

- **part fixe** : A = 300 €TTC (grandeur paramétrable) ;
- **part variable liée au débit** : B = 25 €TTC par m³/h (grandeur paramétrable) ;
- **part variable liées à la puissance** : 5 €TTC/kW (grandeur paramétrable).

La représentation par une formule est identique à celle de la géothermie sur aquifère :

$$\text{Coût_pompe (en €TTC)} = A + B \times P \times \text{Coef.Multiplicateur}$$

où Coef.Multiplicateur = 1.

Illustrations :

Débit nominal (m ³ /h)	Investissement (€TTC)	Puissance nominale (kW)	Investissement (€TTC)
2	350	10	350
2	350	10	350
10	550	50	550
50	1 550	250	1 550
200	5 300	1 000	5 300

Tableau 31 : Ordre de grandeur des investissements pour le pompage.
Cas de la géothermie TBE sur échangeurs.

4.2. MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT

Le modèle de fonctionnement a pour finalité de produire des chroniques mensuelles de coûts de fonctionnement. Ce modèle exploite directement les chroniques mensuelles de temps de fonctionnement et d'énergies spécifiques qui sont produites par les modèles simplifiés relatifs au dispositif géothermique :

- les énergies électriques sont des charges ;
- les énergies thermiques sont des recettes potentielles (modèle à écrire).

Dans une finalité (macro)économique, Il faudra pouvoir distinguer les deux démarches suivantes :

- cas avec des recettes de ventes d'énergie thermiques : on va répartir les chroniques des énergies (charges d'un côté et recettes de l'autre) et les ventilant conformément aux deux tarifications (électricité et énergie thermique) ;
- cas sans recettes de ventes d'énergie thermiques (autoconsommation) : on va répartir les chroniques des énergies tant pour la solution étudiée que pour la solution de référence sur aquifère (cas général de la présente étude).

Dans une démarche de modélisation simplifiée, le principe sera de décrire tous les cas de figure avec un même modèle, le basculement d'un cas à l'autre étant obtenu uniquement en ajustant les valeurs de quelques paramètres.

4.2.1. Modèle de tarification des charges (électricité)

Nota : dans la présente étude, on ne prendra pas en considération les majorations en cas de dépassement. Par exemple, on considèrera qu'il n'y a pas de consommation pendant les périodes EJP (Effacement Jours de Pointe).

Principe général de la tarification de l'électricité

Les tarifs réglementés actuels (bleu, jaune, vert A, B et C) sont explicités dans la loi NOME (Nouvelle organisation du marché de l'électricité).

Les barèmes de tarifications peuvent détailler :

- les primes fixes annuelles sur la puissance souscrite (en €/an) : le montant de la prime fixe dépendra :
 - de la classe de consommation annuelle (effets de seuils),
 - du mode de répartition des utilisations (par périodes courtes, moyennes, longues ou très longues) ;
- les parts variables proportionnelles (en c€/kWh) : le tarif pourra dépendre :
 - de la saison : été ou hiver,
 - de la période (heures creuses, pleines ou de pointe),
 - du jour de la semaine (heures creuses le dimanche),
 - du mode de répartition de la consommation (par périodes courtes, moyennes, longues ou très longues).

Comme on peut le constater en lisant le paragraphe ci-avant, il y a une vraie difficulté à vouloir être exhaustif. En effet, ce niveau de détail, ne doit en aucun cas être restitué dans un modèle simplifié ; cela même si on dispose des tarifs statistiques sur le site de la base de données PEGASE :

<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/r/pegase.html>

Objectif à atteindre

Pour prendre en considération les effets des modulations des tarifications de l'électricité, le modèle simplifié doit être capable de ventiler les consommations d'énergie électrique dans les « bonnes cases » des tarifs.

Dans la présente étude, on va se limiter à deux tarifications équivalentes des heures pleines et des heures creuses, cette dichotomie pouvant toutefois, du moins sur le principe, distinguer la saisonnalité en reproduisant une chronique mensuelle.

Autrement dit, on ne va pas prendre directement en considération tous les modes de répartition tarifaire (TLU, LU, MU ou CU) ni les heures de pointe. Par contre, on va traiter la saisonnalité en deux grandes périodes :

- Hiver : Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars ;
- Été : Avril, Mai, Juin, Juillet, Août, Septembre, Octobre.

Pour cela, on va donc étudier les trois grands tarifs en vigueur, par exemple pour une durée d'utilisation cumulée sur un an (tous usages confondus) aux alentours de 50 % du temps, soit 4 400 heures par an :

• Cas du tarif bleu domestique

Tarif bleu domestique sans heures creuses, par paliers, 3, 6, 9, 12, 15, 18 KVA :

- de 3 à 18 kW, la prime fixe sera (en €TTC) : **11.729 x Puissance.Souscrite** ;
- la part proportionnelle sera (valeur 2011) : 0.1168 €TTC/kWh (valeur 2011) – tarif 3 kW non utilisé.

Tarif bleu domestique avec heures creuses par paliers, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 30, 36 KVA – L'option TEMPO n'étant pas considérée dans la présente étude.

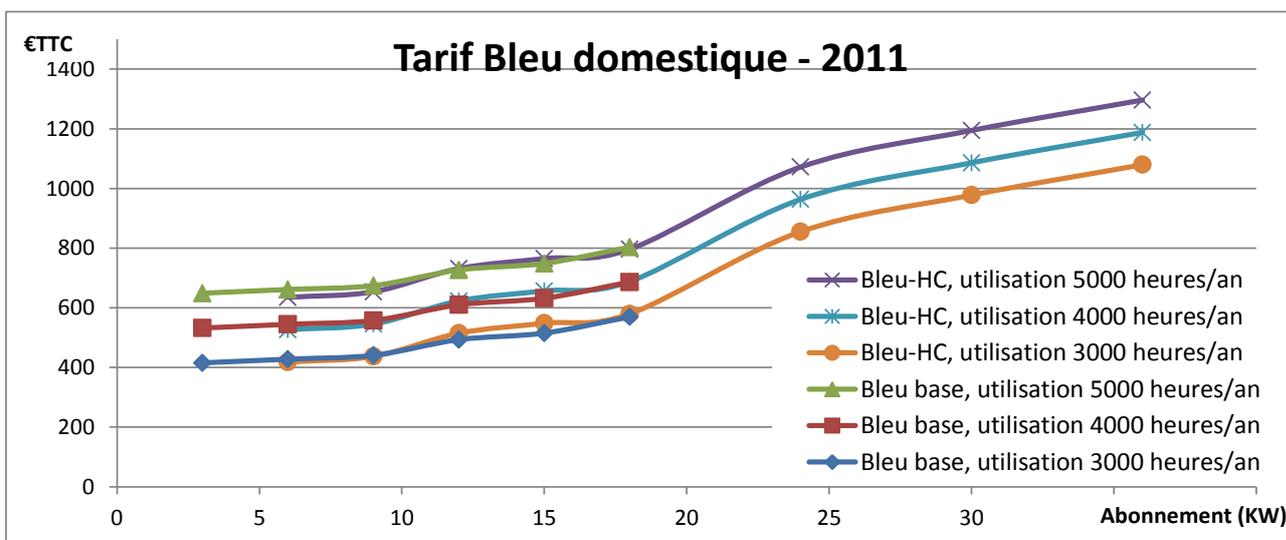


Figure 41 : Analyse du tarif bleu domestique (année 2011).

L'analyse du tarif bleu domestique a été effectuée pour trois durées de fonctionnement à la puissance de l'abonnement, le tarif avec heures creuses supposant une répartition 50/50 entre HP et HC. On constate que pour cette hypothèse, les factures annuelles entre les deux tarifs se recouvrent pour les puissances jusqu'à 18 kW. On pourra donc ne garder que le tarif bleu HC si on veut d'analyser l'incidence des HC.

Une cassure étant constatée sur le tarif bleu HC domestique au-delà de 18 kW, il est proposé de scinder le tarif bleu HC de 6 kW à 18 kW et de 24 kW à 36 kW).

Pour le tarif bleu domestique avec HC :

- de 6 à 18 kW, la prime fixe sera (en €TTC) : **14,523 x Puissance.Souscrite** ;
- de 24 à 36 kW, la prime fixe sera (en €TTC) : **21,447 x Puissance.Souscrite** ;
- la part proportionnelle sera (valeur 2011) :
 - 0,1291 €TTC/kWh pour les heures pleines (valeur 2011),
 - 0,0877 €TTC/kWh pour les heures creuses (valeur 2011).

• **Cas du tarif bleu professionnel**

La prime fixe du tarif bleu professionnel (avec heures creuses de 24 à 36 kW) est significativement majorée vis-à-vis du tarif pour les particuliers. Avec la même approche que pour le tarif bleu domestique, on aura :

- la prime fixe sera égale à (en €TTC) : **29.635 x Puissance.Souscrite** ;
- la part proportionnelle sera (valeur 2011) :
 - 0,1220 €TTC/kWh pour les heures pleines (valeur 2011),
 - 0,0862 €TTC/kWh pour les heures creuses (valeur 2011).

Nota : Le tarif professionnel, pourtant sur la même gamme de puissances souscrites, conduit à une structure de dépenses différente de celle du tarif domestique.

• **Synthèse du modèle pour les tarifs bleus (domestique et professionnel)**

Jusqu'à une puissance souscrite de 36 kW, le tarif bleu est à utiliser, le tarif professionnel conduisant à des valeurs TTC de la prime fixe plus élevées, ce qui signifie que l'abonnement doit être souscrit avec soin. De ce fait, dans le modèle simplifié, l'analyste pourra étudier la sensibilité à ce paramètre. Pour les primes fixes, il est proposé une représentation proportionnelle au montant de la puissance souscrite afin d'établir une cohérence avec les tarifs jaune et vert (A5) :

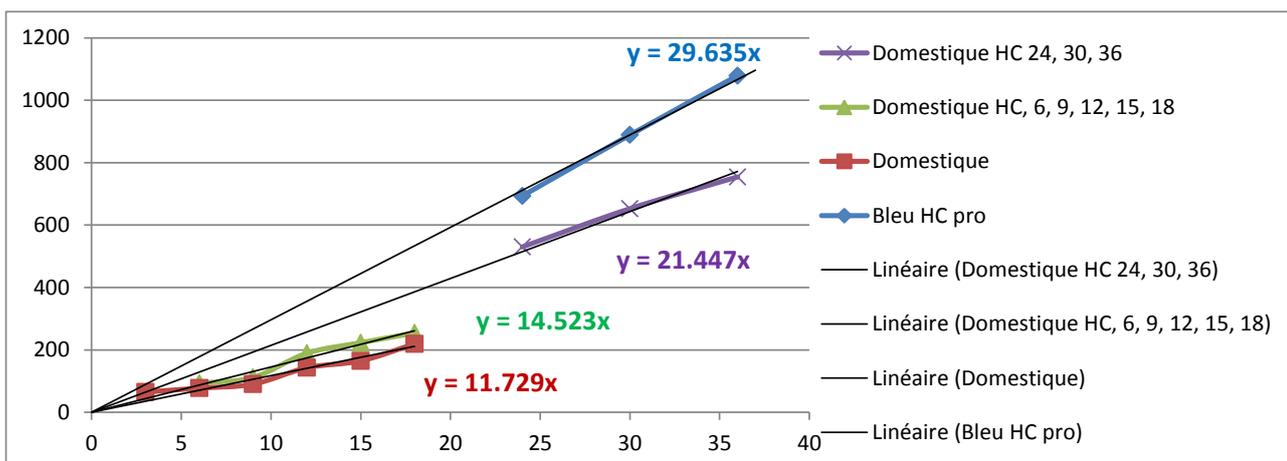


Figure 42 : Proposition de linéarisation de la part fixe du tarif bleu (année 2011).

Important. Les tarifs jaune et vert (option A5) introduisent une saisonnalité qu'il sera intéressant d'examiner en la prolongeant pour les tarifs de moindre puissance, une telle éventualité n'étant pas à exclure pour ces prochaines années, en particulier avec l'émergence des sources d'énergie intermittente et avec une mise en place d'une certaine « intelligence » dans les réseaux (smart-grid).

Le modèle simplifié de la présente étude permet cette analyse de sensibilité.

- **Cas du tarif jaune professionnel**

Tarif Jaune UM (utilisation moyenne) : de 42 kW à 250 kW : La prime fixe est strictement proportionnelle à la puissance souscrite ; laquelle est décidée par l'utilisateur (professionnel) – par simplification, on ne retient dans la présente étude que l'option UM (utilisation moyenne) sans l'option EJP :

- la prime fixe sera égale à (en €TTC) : **38.67 x Puissance.Souscrite** ;
- la part proportionnelle sera (valeur 2011) :
 - 0,1360 €TTC/kWh pour les heures pleines d'hiver (valeur 2011),
 - 0,0991 €TTC/kWh pour les heures creuses d'hiver (valeur 2011),
 - 0,0629 €TTC/kWh pour les heures pleines d'été (valeur 2011),
 - 0,0487 €TTC/kWh pour les heures creuses d'été (valeur 2011).

Tarif vert : au-delà de 250 kW ; la prime fixe est strictement proportionnelle à la puissance souscrite, laquelle est décidée par l'utilisateur (professionnel) – Par simplification, on ne retient dans la présente étude que l'option MU (moyenne utilisation) sans l'option EJP :

- la prime fixe sera égale à (en €TTC) : **58.70 x Puissance.Souscrite** ;
- la part proportionnelle sera (valeur 2011) :
 - 0,0993 €TTC/kWh pour les heures pleines d'hiver (valeur 2011),
 - 0,0665 €TTC/kWh pour les heures creuses d'hiver (valeur 2011),
 - 0,0593 €TTC/kWh pour les heures pleines d'été (valeur 2011),
 - 0,0409 €TTC/kWh pour les heures creuses d'été (valeur 2011).

Important. On constate que les tarifs jaune et vert, malgré leur part fixe élevée, favorisent les heures d'été vis-à-vis des heures d'hiver.

Synthèse des représentations simplifiées des tarifs examinés domestiques et professionnels

Dénomination	Unité	Tarifs domestiques			Tarifs professionnels		
		Bleu base	Bleu HC	Bleu HC	Bleu HC	Jaune UM	Vert MU
Gamme	kW	3,6,9,12,15,18	6,9,12,15,18	24,30,36	24,30,36	42 à 250	+ 250
Coef. prime fixe	€TTC/kW	11,729	14,523	21,447	29,635	38,670	58,700
Tarif HP hiver	€TTC/kWh	0,1168	0,1291	0,1291	0,1220	0,1360	0,0993
Tarif HP été	€TTC/kWh	0,1168	0,1291	0,1291	0,1220	0,0991	0,0665
Tarif HC hiver	€TTC/kWh	0,1168	0,0877	0,0877	0,0862	0,0629	0,0593
Tarif HC été	€TTC/kWh	0,1168	0,0877	0,0877	0,0862	0,0487	0,0409

Tableau 32 : Synthèse des tarifs domestiques et professionnels (année 2011).

4.2.2. Modèle de tarification des recettes (énergie thermique)

En géothermie TBE, on ne dispose pas à ce jour d'information suffisante exprimant les éventuelles recettes d'exploitation.

Pour la géothermie BE, l'examen des prix de vente de chaleur ne nous permet pas de séparer avec précision le prix de vente de la chaleur géothermique dans le mix énergétique. En effet, les valeurs collectées et diffusées, par exemple par l'association AMORCE, produisent des chiffres globalisés desquels il serait hasardeux de déduire des structures de tarification de la part géothermique.

Important. Dans la présente étude, il est donc proposé de ne pas traiter la vente d'énergie et de reporter les examens sur une étude ultérieure.

Néanmoins, une première approche d'examen de la méthodologie envisagée a été testée à partir de retours sur opérations en géothermie basse énergie (BE). Cette méthodologie (voir plus loin) n'est pas, *a priori*, directement transposable à la géothermie TBE et elle doit encore être travaillée avant d'être validée.

Constats

En réseau de chaleur, la puissance totale souscrite par l'ensemble des clients est supérieure à la puissance nominale du réseau, laquelle représente environ 75 % de la puissance souscrite cumulée. Il s'agit du coefficient de foisonnement qui traduit le fait que tous les clients ne consomment pas en même temps.

En réseau de chaleur, le producteur d'énergie peut ne pas être le distributeur. Pour conduire une analyse, il faut donc être capable de savoir à qui est facturée l'énergie géothermique ; cette facturation pouvant ne pas refléter directement la réalité des coûts du marché selon la complexité des accords entre entreprises et/ou collectivités territoriales impliquées (Régies, DSP, Filiales, Syndicats...).

Dans la pratique, en réseau de chaleur, le tarif de vente d'énergie (chaleur) est décomposé en saisons ; lesquelles ne coïncident pas nécessairement avec celles des tarifs électriques. De ce point de vue, on voit que la saisonnalité peut être un critère de conduite que peut actionner l'exploitant pour optimiser sa marge d'exploitation.

Limitations de la méthodologie envisagée

En première approche, il serait envisagé une méthodologie consistant à reconstituer les dépenses de fonctionnement et à appliquer une marge d'exploitation.

Pour estimer cette marge, la difficulté est d'accéder aux charges de fonctionnement des entreprises ; un calcul qui comparerait le prix de vente (facturé) et les dépenses estimées pouvant constituer une approche incomplète en l'absence, par exemple, d'une connaissance des modes de financement des entreprises et des aides accordées.

4.3. COÛTS DIFFÉRÉS

Une approche en coût global doit détailler les coûts d'investissement correspondant aux dépenses engagées depuis l'origine du projet jusqu'à la réception définitive des travaux, ainsi que les coûts « différés » qui recouvrent différents postes de dépense :

- les coûts d'exploitation (hors dépenses énergétiques) ;
- les coûts de maintenance (petit et gros entretien, contrats de maintenance des installations techniques...) ;
- les coûts d'éventuels travaux liés à des modifications fonctionnelles ;
- le coût de pilotage de l'exploitation-maintenance (moyens humains et informatiques, internes et externes) ;
- éventuellement, le coût de fin de vie (démantèlement).

Il a constaté que l'estimation des coûts différés présentait de nombreuses incertitudes et limites, cela pas uniquement en raison des taux d'inflation ou des prix des énergies qui sont incertains mais, aussi et surtout, en raison des grandes incertitudes (pour ne pas dire inconnues) relatives aux poste d'entretien-maintenance et d'estimation de la valeur résiduelle. De plus, différents coûts différés (externes) restent difficilement quantifiables comme ceux qui ne concernent ni le maître d'ouvrage, ni les utilisateurs et sur lesquels portent la plupart des gains d'une technique durable (maîtrise des impacts sur les pollutions de proximité, l'effet de serre et la biodiversité...).

Important. En constatant que les indicateurs aujourd'hui manipulés dans les différentes études consultées cadrent imparfaitement avec les techniques géothermiques, la (re)formulation de divers indicateurs d'efficacité énergétique ou de performance environnementale représente un enjeu significatif qu'il est proposé de traiter lors d'une suite à la présente étude. On sera là dans une démarche comparable au remplacement de la référence à la solution thermique au gaz par une technique de géothermie sur aquifère que la présente étude a introduite.

Modélisation de la maintenance et de l'entretien

Dans la présente étude, on n'a pas pu parvenir à un modèle simplifié de maintenance et d'entretien pour la géothermie TBE. Une esquisse de ce poste en géothermie BE montre que les coûts différés peuvent représenter plusieurs fois les investissements. Néanmoins, les données semblent encore manquer de cohérence pour pouvoir formaliser une modélisation simplifiée. Dans la présente étude, contrairement aux autres travaux qui peuvent être consultés, il a été décidé de ne pas proposer « arbitrairement » un montant proportionnel à l'investissement considérant que l'incertitude sur le montant des investissements est déjà grande. Il est donc proposé de compléter ultérieurement cette modélisation devant reposer sur des considérations validées par l'analyse de retours sur expériences.

Modélisation de la fin de vie (et de la valeur résiduelle)

Cette modélisation ne peut être engagée sans avoir complété l'étape de modélisation de la maintenance et du GER (Gros Entretien Renouvellement).

4.4. TRANSPOSITION EN GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE

Ce chapitre a montré la maturité et la pertinence des modèles simplifiés en géothermie très basse énergie (TBE).

La question posée dans le chapitre qui suit porte sur la mise en place d'une démarche comparable qui conduirait à l'établissement de modèles, également simplifiés, en géothermie basse énergie (BE).

Plusieurs difficultés peuvent perturber la transposition de la démarche appliquée en géothermie TBE vers la géothermie BE, comme, par exemple, la pérennité de la ressource géothermale ou la prise en considération du réseau de distribution de l'énergie thermique.

L'état d'avancement de la réflexion est synthétisé dans le chapitre qui suit.

5. Vers une représentation simplifiée de la géothermie BE (Basse Énergie)

5.1. SPÉCIFICITÉS DES TECHNIQUES GÉOTHERMIQUES BE

Puissances installées et appoints

En géothermie BE, la base du raisonnement économique en matière d'investissement est la puissance installée. Pour cette forme de géothermie (usage direct de la chaleur), la puissance crête est couramment obtenue par un appoint, la géothermie étant la base. Toutefois, par exemple pour des cogénérations, la géothermie peut représenter l'appoint, du moins pour certaines périodes de l'année.

Réseaux de chaleur et foisonnement

Les usages de la géothermie BE se font usuellement au travers de réseaux de chaleur distribuant exclusivement de l'énergie pour le chauffage et l'ECS, ces deux postes pouvant être à identifier distinctement. Du point de vue économique, la particularité (usuelle) d'un réseau de chaleur est le foisonnement qui signifie que la puissance installée (production d'énergie thermique) est inférieure à la somme des puissances souscrites (somme des puissances élémentaires de la demande). La raison est que les consommations sont discontinues et se répartissent dans le temps. Typiquement, le taux de foisonnement est de l'ordre de 75 %. Il y aura donc nécessité de bien prendre en considération ce foisonnement qui peut s'atténuer (taux de 100 %) pour certaines techniques qui sont conçues pour un fonctionnement en continu, notamment via l'exploitation de tampons thermiques (buffers) ou d'inerties thermiques (planchers chauffants chez les usagers par exemple).

Nota : les notions de foisonnement et d'appoint sont, en principe, déconnectées.

Pérennité de la ressource géothermale

Cette notion, initialement, repose (reposait) sur des considérations techniques :

- la décroissance thermique (après percée thermique) pour certaines configurations ;
- la durée de vie des ouvrages qui accèdent à la ressource.

Or, cette notion est, pour une large part, économique et va donc évoluer avec les évolutions des coûts des solutions concurrentes, avec les modifications des formes de demande thermique et avec les progrès technologiques (PACg, Stockages géologiques...). Autrement dit, tant la ressource géothermale que les ouvrages devront prochainement faire l'objet d'une actualisation de la représentation de la notion de pérennité. En déduire la formulation simplifiée à injecter dans un modèle de valeur résiduelle pourra constituer l'enjeu d'une prochaine étude à engager.

5.2. VALEUR DE L'ÉNERGIE CIRCULANT DANS LE RÉSEAU

Valeur instantanée

Le coût **instantané** de l'énergie thermique qui circule dans le réseau doit être déduit du mix énergétique consommé par les différentes sources qui produisent cette énergie, par exemple : UOIM, cogénérations, gaz, fuel, charbon, biomasse... et géothermie. L'énergie des UOIM (usines d'incinération des ordures ménagères) ou de la géothermie est utilisée en base et les énergies fossiles, plus coûteuses, sont sollicitées en phase avec la demande ne pouvant être satisfaite par les UOIM, la géothermie ou la biomasse (bois-énergie). Dans le modèle économique à envisager, des coûts seront à associer à chacune de ces énergies primaires, et l'évolution de ces coûts s'appuiera sur les dernières hypothèses formulées par les économistes.

En général, les énergies de base font l'objet de tarifs contractuels qui distinguent plusieurs périodes dans l'année, par exemple : hiver, intermédiaire et été couvrant respectivement 25 %, 33 % et 42 % de l'année (actuellement). In fine, dans une représentation simplifiée, ce mix s'exprimera pour une période donnée essentiellement en fonction de la température extérieure et, connaissant la température moyenne à une date donnée, en fonction de la période de l'année.

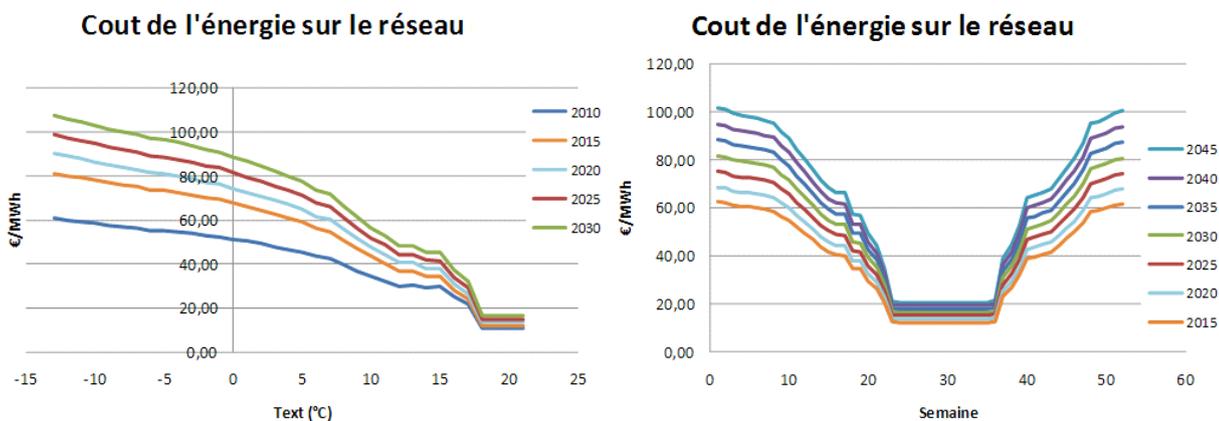


Figure 43 : Exemple de valeur de l'énergie du réseau (en été) selon la température extérieure et de valeur de l'énergie sur le réseau en fonction de la semaine de l'année (projections de 2015 à 2045 avec une inflation de 2 % par an).

Les courbes de valeur de l'énergie du réseau ci-avant ont été obtenues pour un réseau de chaleur virtuel qui simule (voir courbes monotones et courbes de charge annuelles reportées en pages suivantes) les deux configurations suivantes :

- un bouquet énergétique sollicitant du fuel (12 %), du charbon (21 %), de la cogénération au gaz (23 %) et la géothermie **correctement dimensionnée** pour satisfaire les besoins en été ;
- un bouquet énergétique sollicitant du fuel (14 %), du charbon (25 %), de la cogénération au gaz (25 %) et la géothermie **insuffisamment dimensionnée** pour satisfaire les besoins en été.

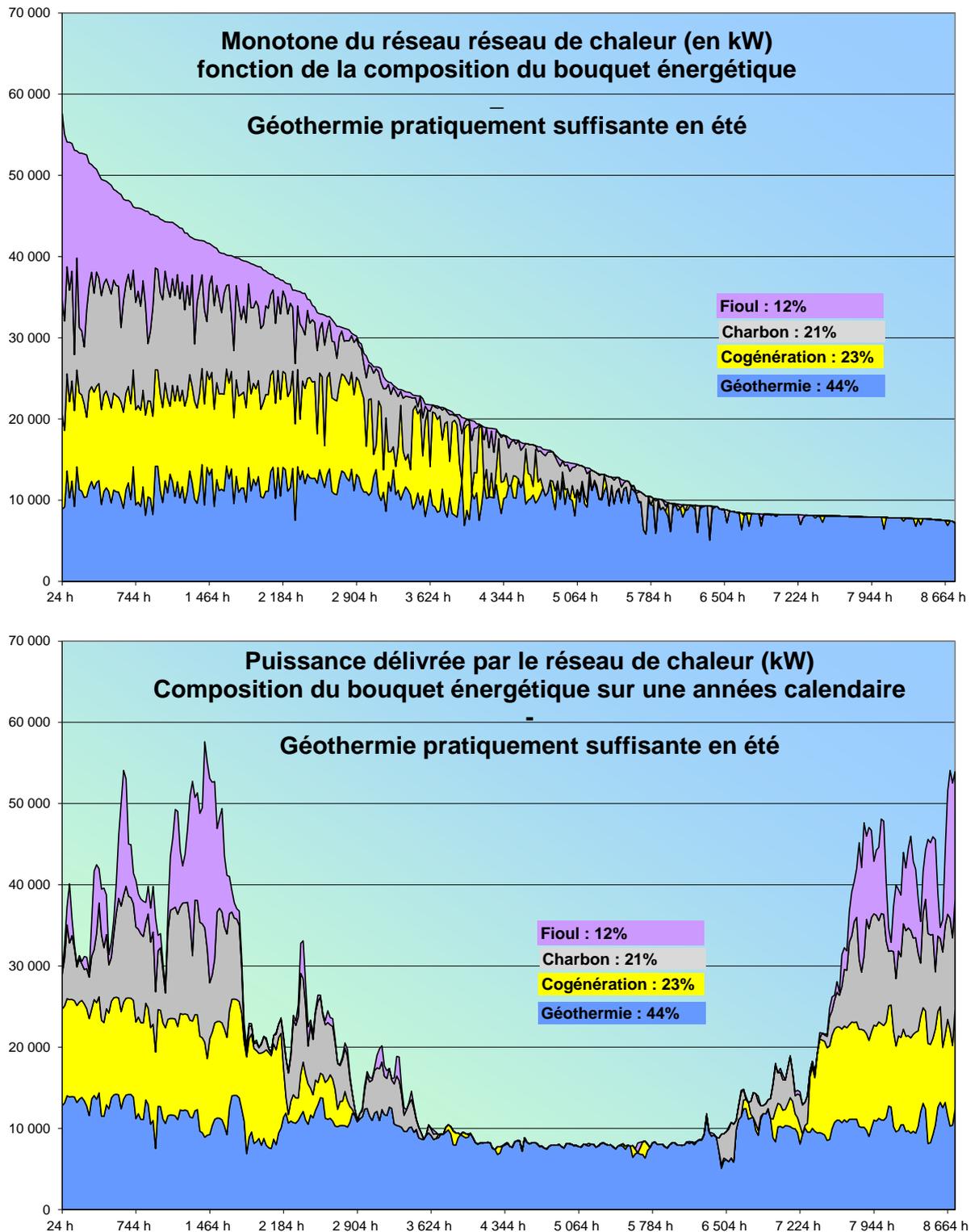


Figure 44 : Bouquet énergétique d'un réseau dimensionné pour la géothermie BE en été.

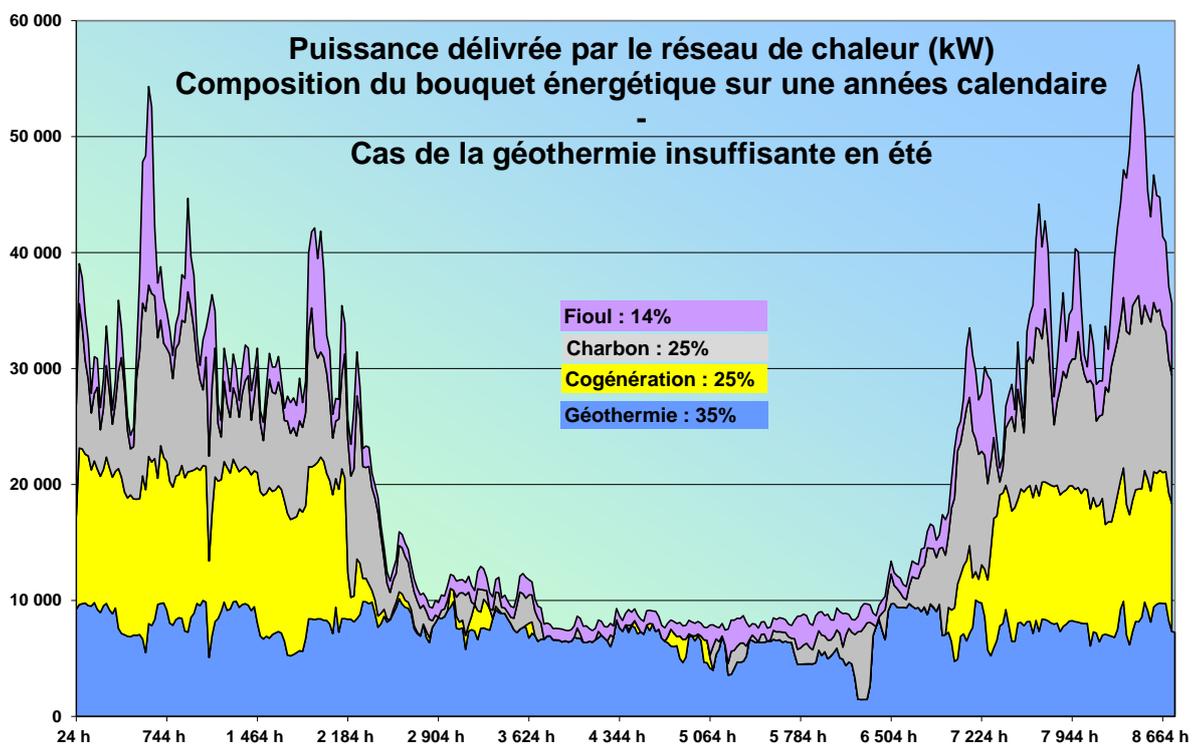
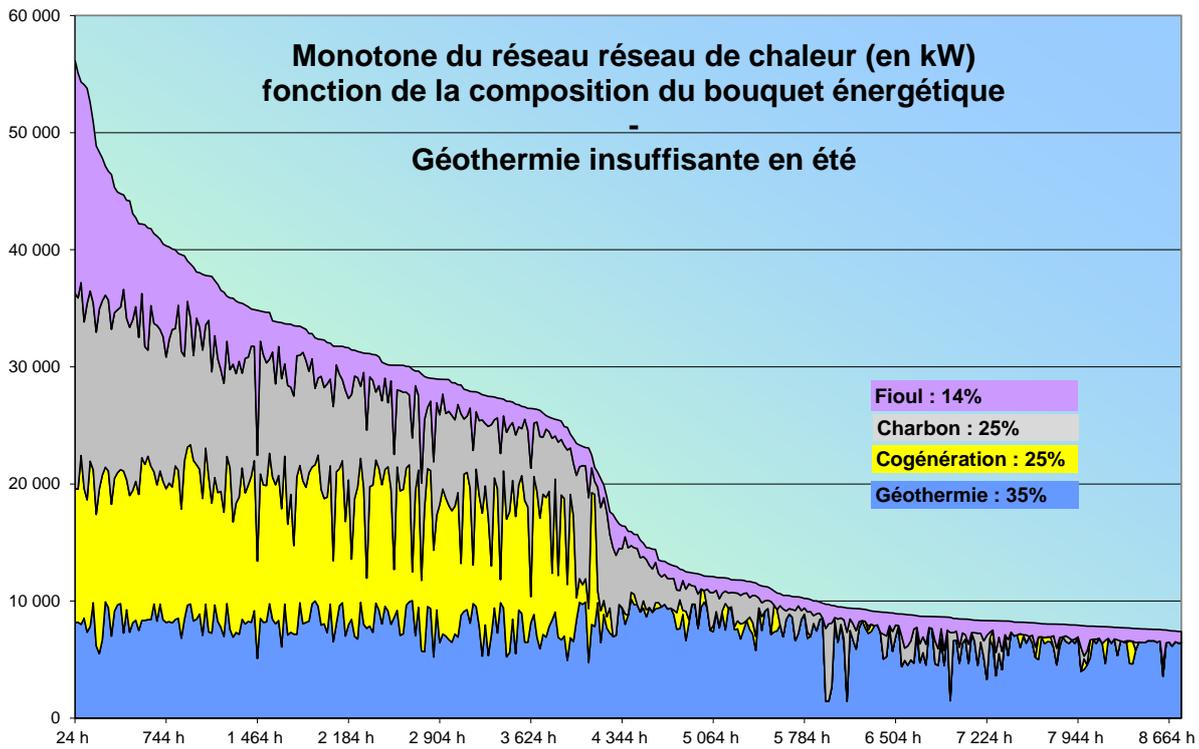


Figure 45 : Bouquet énergétique d'un réseau avec géothermie BE sous-dimensionnée en été.

Interprétation

Du point de vue économique, si une courbe monotone donne le nombre d'heures de fonctionnement à une puissance donnée, elle reste insuffisante pour apprécier la valeur économique de l'énergie au moment où elle est délivrée. Aussi, pour effectuer l'analyse économique, il sera donc nécessaire de travailler sur la courbe de charge le long de l'année, ce qui permet de **prendre en considération les coûts variables des énergies selon les saisons**.

Ainsi, en appliquant le coût de chaque énergie composant le bouquet au moment où elle est consommée, on pourra déduire une information pertinente sur la valeur économique de l'énergie qui circule dans le réseau à chaque période, elle-même tenant compte des coûts des énergies consommées pour produire l'énergie géothermique (électricité).

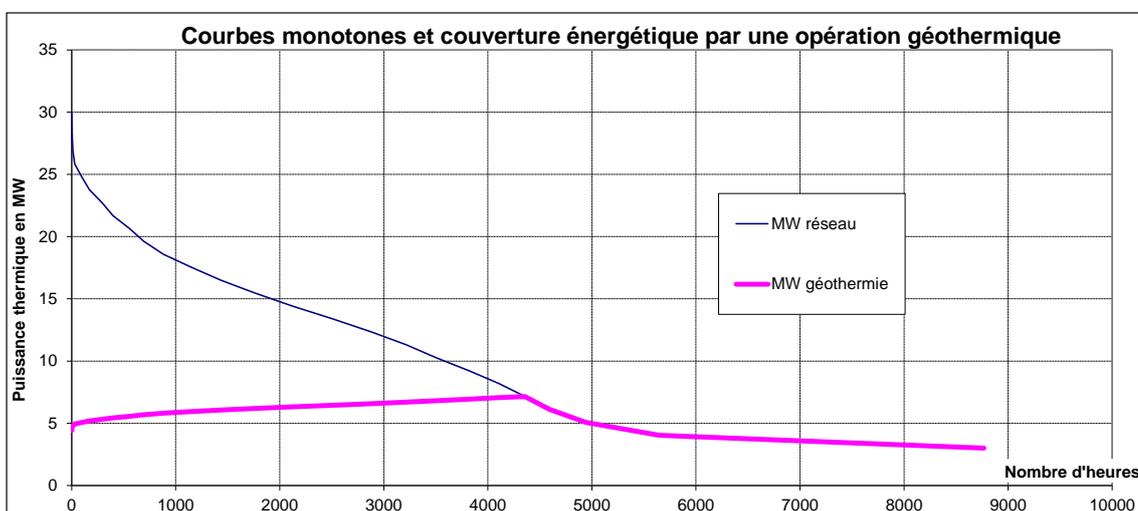


Figure 46 : Allure typique d'une courbe monotone d'un réseau de chaleur dimensionné pour la géothermie.

Cette démarche pourra être reconduite pour exprimer la valeur environnementale.

En s'inspirant des courbes monotones des pages qui précèdent, on peut, seulement dans un second temps, déduire une courbe monotone typique d'un réseau de chaleur.

Important. Toutes les courbes ci-avant (construites intentionnellement sur la base des données de l'année 2005 d'un très gros réseau de chaleur (sans géothermie) auraient tendance à montrer qu'un réseau de chaleur en très basse énergie peut difficilement se passer d'un appoint thermique durant la saison de chauffe. **Cette conclusion n'est pas valide pour les réseaux de chaleur actuellement conçus pour exploiter de la géothermie à relativement basse température, l'écart entre la demande hivernale (chauffage + ECS) et estivale (ECS) étant moins marquée pour le bâti bien isolé.**

Ce point est discuté dans les deux pages qui suivent.

Représentation du réseau de chaleur en géothermie basse énergie

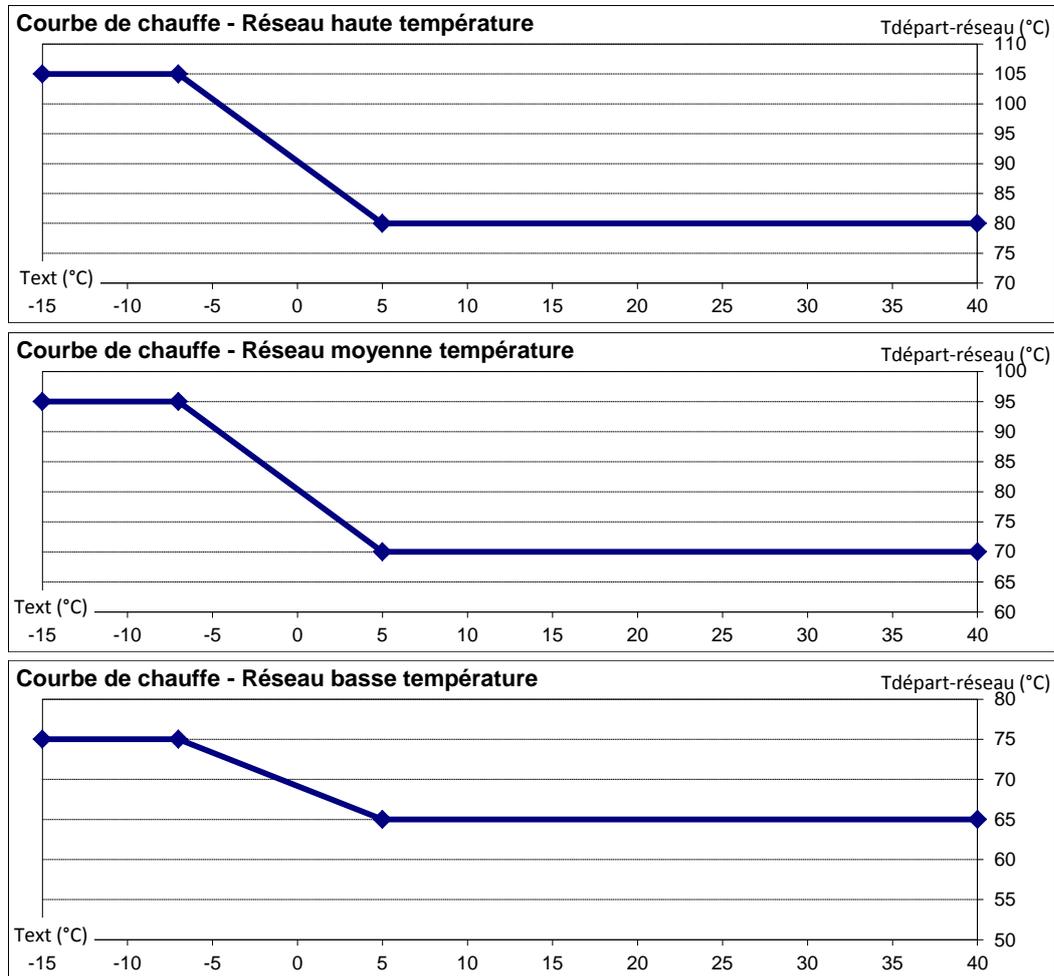


Figure 47 : Allures des courbes de chauffe pour différents réseaux de chaleur (avec ECS).

La nature de la demande exprimera celle du secteur urbain auquel il est raccordé mais en privilégiant une bonne aptitude à exploiter l'énergie géothermie, à savoir :

- une température de départ réseau nominale (maximale) de 70 °C (75 °C) – Dans la pratique, l'impact de la température de départ réseau sur l'analyse économique sera atténué car, même si un appoint est toujours en marche pour la température (Gaz, PAC, Vapeur...), on pourra considérer que cet appoint est opéré avec la même énergie que la solution de référence (courbe du bas ci-dessous) ;
- une température nominale de retour réseau de l'ordre de 40 °C – Cette température de retour est fortement liée à la température extérieure ; on ne considérera ici que des courbes de température pour des réseaux adaptés à la géothermie comme montré en page suivante.

Comportement de la boucle géothermique (basse énergie)

Dans les faits, la période estivale est synonyme d'une température de retour réseau qui peut être relativement élevée, la raison revenant aux contraintes liées à l'ECS.

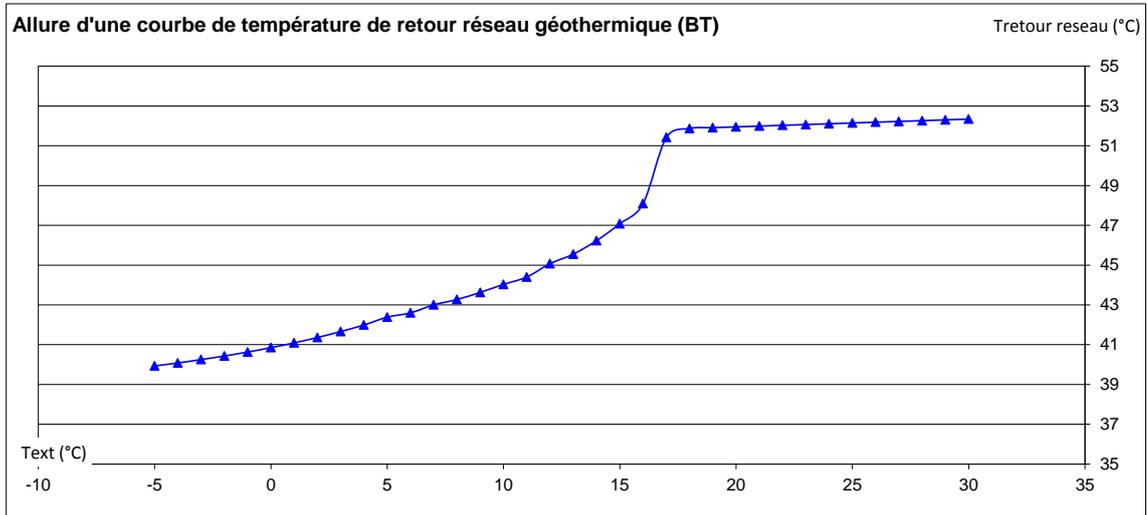


Figure 48 : Allure de la courbe de température de retour d'un réseau géothermique.

En géothermie basse énergie, le débit de la boucle géothermique est toujours variable proportionnellement à la demande, laquelle dépend, comme exposé ci-avant, essentiellement de la température extérieure, en distinguant toutefois la saison de chauffe et la saison durant laquelle seule l'ECS est délivrée.

De fait, un débit géothermique est exprimé en fonction de la température extérieure en notant que, physiquement, le débit de la boucle géothermique est, en principe, relativement proche de la valeur du débit de la boucle secondaire.

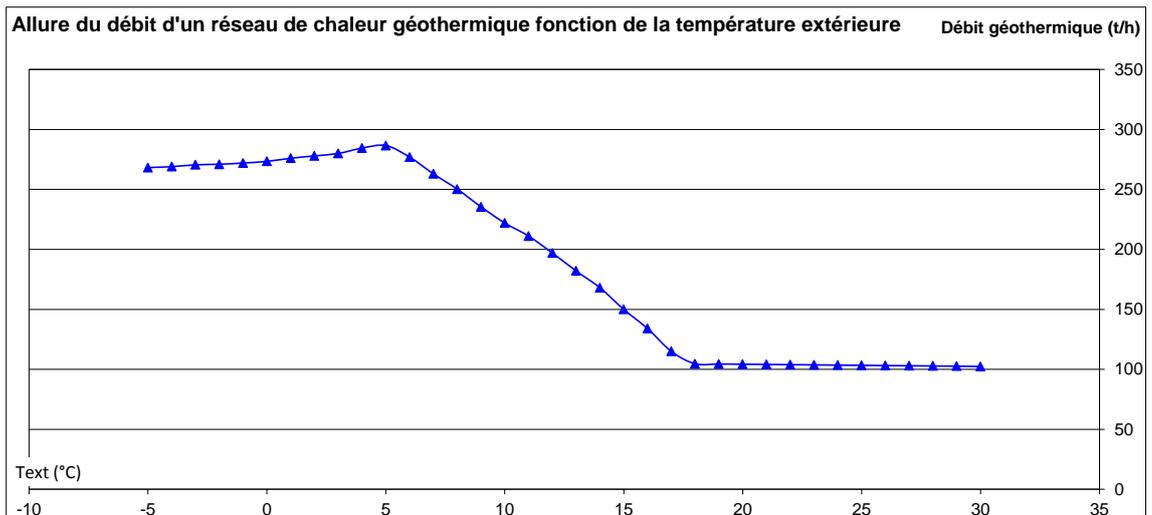


Figure 49 : Allure de la courbe de débit géothermique fonction de la température extérieure.

5.3. TARIFICATION DE L'ÉLECTRICITÉ EN GÉOTHERMIE BE

En géothermie BE, la consommation d'énergie électrique portera essentiellement sur la consommation de pompes d'exhaure et de réinjection ; le débit variable étant indiqué par la courbe ci-avant. La relation entre le débit et les consommations est liée à la perte de charge dans les ouvrages et dans les réservoirs (formule de Jacob par exemple). Le modèle simplifié considérera que la puissance P de pompage est proportionnelle au produit des pertes de charge spécifique et du débit Q :

$$P_{\text{pompage}} = r \cdot (pdc_{\text{réservoir}} + pdc_{\text{tubages}}) \cdot Q$$

où r est déterminé à partir des performances moyennes constatées pour l'exploitation de la géothermie conventionnelle au Dogger : $r = 0,055 \text{ kW} \cdot \text{bar}^{-1} \cdot (\text{m}^3/\text{h})^{-1}$

La tarification d'énergie électrique est composée d'une prime fixe et d'une part variable (proportionnelle à l'énergie consommée). La tarification appliquée est celle du Tarif Vert A5 Option de base. La version du tarif retenu en géothermie BE est en principe la version TLU (Très Longues Utilisations) compte tenu du mode de fonctionnement. La prime fixe annuelle est exprimée en €/kW de puissance souscrite. En géothermie BE, on envisage de ramener la prime annuelle à sa valeur hebdomadaire ou mensuelle, l'analyse ci-après ayant été conduite au pas de temps hebdomadaire.

Le tarif vert décompose l'année en deux grandes saisons : été (d'avril à octobre) et hiver (de novembre à mars). Quatre heures de pointes par jour sont tarifées de décembre à février. Huit heures creuses sont tarifées chaque jour (24 le dimanche). Sur cette base, le tarif Vert A5 distingue cinq prix :

- deux prix en été en fonction du nombre d'heures d'heures pleines estivales (HPE) et d'heures creuses estivales (HCE) ;
- trois prix en hiver en fonction du nombre d'heures de pointe (PTE), d'heures pleines hivernales (HPH) et d'heures creuses hivernales (HCH).

Le modèle envisagé pré-calcule, pour chaque semaine de l'année, la part variable exprimé en €/kWh sur la base du nombre d'heures relevant de chacun des cinq prix. Pour un doublet géothermique au Dogger, la part variable représente 67 % du coût de l'électricité et la part fixe 33 %.

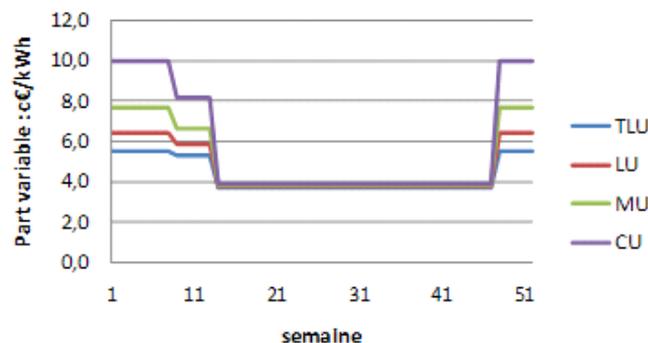


Figure 50 : Parts variable (gauche) et fixe (droite), pour une puissance souscrite de 600 kW pour les différents abonnements du tarif vert A5.

5.4. PERSPECTIVES

Les premières investigations menées pour concevoir des modélisations simplifiées en géothermie BE analogues à celles qui ont été implémentées pour la géothermie TBE (voir résultats dans le chapitre suivant) semblent de nature à en confirmer la faisabilité.

De ce fait, des éléments spécifiques ont été intégrés dans l'esquisse de cahier des charges développée au chapitre 7.

6. Résultats pour le géothermie TBE : validation des modèles simplifiés

Dans ce chapitre, on va progressivement vérifier que les effets restitués par les modèles simplifiés sont bien représentatifs de situations réalistes et que les tendances sont orientées dans les bonnes directions lorsqu'on agit sur un curseur.

Tous les exemples de ce chapitre ont été localisés en référence à la station climatique d'Orléans. Les tableaux de résultats sont la recopie intégrale de la synthèse des résultats de l'application EXCEL développée pour la présente étude. On va respectivement examiner les cas suivants pour lesquels la solution de référence est toujours un doublet géothermique (virtuel) à 20 m de profondeur (Val de Loire) :

- Comparaison des quatre techniques géothermiques TBE et de la solution de référence raccordées à un bâtiment BBC-Rénovation de 1 000 m², respectivement :
 - géothermie horizontale,
 - géothermie sur échangeurs compacts,
 - géothermie sur SGV,
 - géothermie sur Doublet à 50 m de profondeur.
- Sensibilité à la tarification électrique : cas du bâti BBC-Rénovation de 1 000 m² raccordé à un doublet géothermique de 50 m de profondeur.
 - tarif Bleu HC Domestique (idem doublet ci-avant),
 - tarif Bleu option de Base,
 - tarif Bleu HC professionnel.
- Sensibilité à la tarification électrique : cas du bâti BBC-Rénovation de 7 500 m² raccordé à un doublet géothermique de 50 m de profondeur.
 - tarif Bleu HC Domestique (abonnement de 36 kW),
 - tarif Bleu HC professionnel (abonnement de 36 kW),
 - tarif Jaune UM – utilisation moyenne (abonnement de 42 kW).
- Sensibilité à la technique géothermique : cas du bâti BBC-Rénovation de 7 500 m² Tarif Jaune UM – utilisation moyenne (abonnement de 42 kW)
 - doublet à 50 m (idem doublet ci-avant) en rafraîchissement direct,
 - sondes géothermiques indépendantes en rafraîchissement direct,
 - sondes géothermiques en champ de sondes en climatisation,
 - sondes géothermiques indépendantes en climatisation.

Pour tous les cas étudiés, le dimensionnement des ouvrages et l'établissement des coûts d'investissements et de fonctionnement sont établis automatiquement à partir du paramétrage par défaut exposé dans les chapitres qui précèdent.

Les seuls paramètres qui changent sont :

- pour chaque cas un ajustement de la durée mensuelle nominale du mode frais/froid pour avoir une puissance géothermique similaire au mode chaud (ECS+Chauffage) ou une même puissance du compresseur (mode Climatisation) ;
- la demande en rafraîchissement du bâtiment qui passe du géocooling à la climatisation pour le dernier test de sensibilité ;
- la taille du bâti qui passe de 1 000 m² à 7 500 m² pour la sensibilité aux tarifs ;
- pour le champ de sondes du dernier test, une dérive thermique positive et une minoration de la puissance unitaire.

Conditions générales des tests de validation

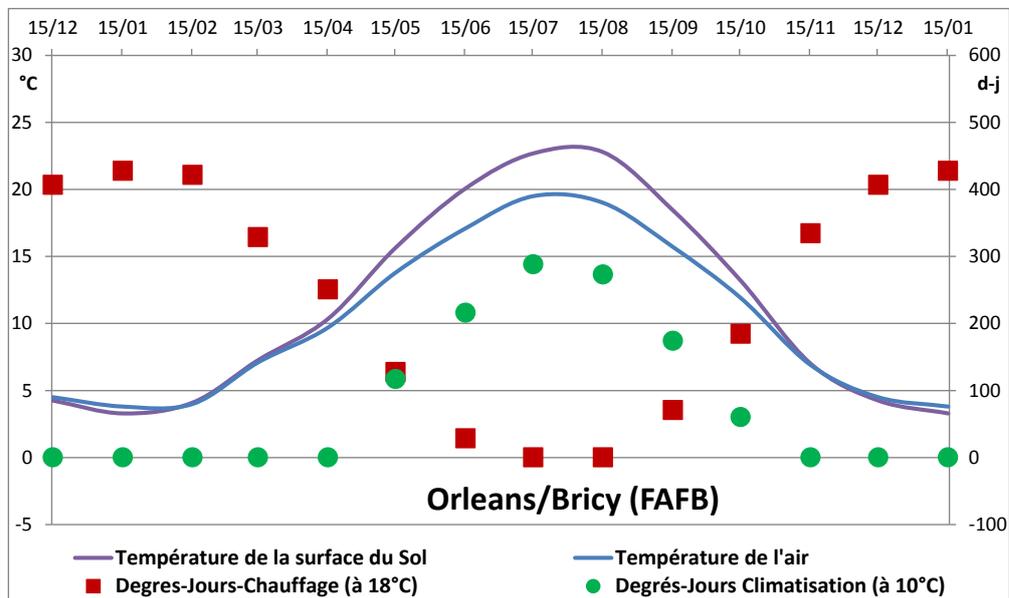


Figure 51 : Chroniques de températures géoclimatiques et des DJU.

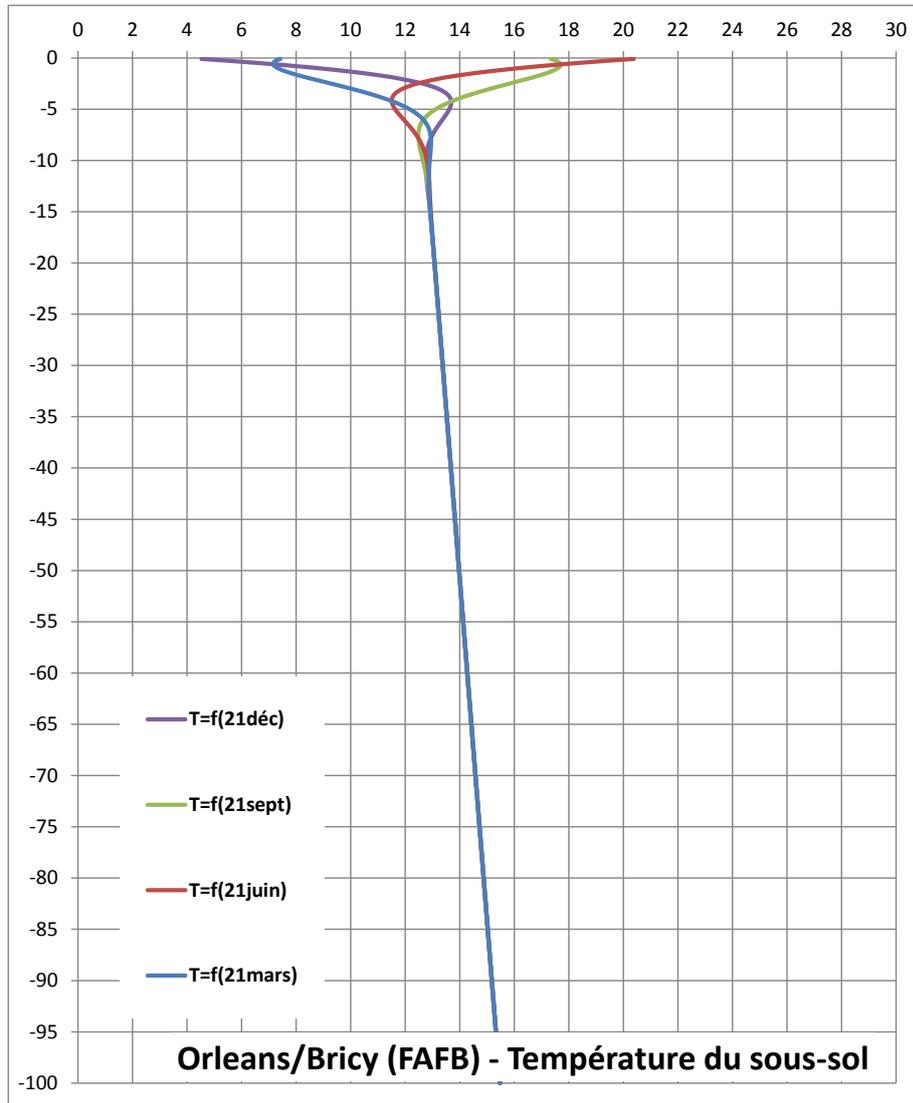


Figure 52 : Profil thermique du sol.

Cas de l'échangeur horizontal (Orléans, 1 000 m², BBC rénovation)

Dans cet exemple (tab. 34), le Bâti BBC rénovation de 1 000 m² justifie l'implantation d'un échangeur horizontal de 920 m² dont l'investissement est plus élevé que celui du doublet de référence et dont le fonctionnement (avec géocooling) est également en faveur du doublet de référence. La puissance électrique de la PACg est de 4,7 kW pour assurer le chauffage et l'ECS (valeurs calculées avec les paramètres par défaut).

Cas des échangeurs compacts (Orléans, 1 000 m², BBC rénovation) (tab. 35)

Vis-à-vis de l'exemple de la page précédente, l'échangeur horizontal est remplacé par 23 corbeilles géothermiques et l'investissement est plus favorable de même que le fonctionnement (avec géocooling) de sorte qu'on se rapproche du doublet de référence. La puissance électrique de la PACg reste à 4,7 kW mais la puissance GTH crête baisse à 15,7 kW au lieu de 18,2 kW pour l'échangeur horizontal (automne).

Cas des SGV (Orléans, 1 000 m², BBC rénovation)

Vis-à-vis des deux exemples des pages précédentes, 320 m forés de SGV remplacent les échangeurs horizontaux ou compacts (tab. 36). L'investissement est le moins favorable alors que le fonctionnement (avec géocooling) se rapproche encore plus du doublet de référence. La puissance électrique de la PACg reste à 4,7 kW, mais la puissance GTH crête est semblable à celles des corbeilles.

Cas du Doublet à 50 m (Orléans, 1 000 m², BBC rénovation)

Vis-à-vis des trois exemples des pages précédentes, un doublet à 50 m remplace les échangeurs diffusifs (tab. 37). L'investissement est intermédiaire entre échangeurs compacts et horizontaux alors que le fonctionnement (avec géocooling) est plus faible, de peu, vis-à-vis du doublet de référence. La puissance électrique de la PACg reste à 4,7 kW mais la puissance GTH crête baisse à 14,7 kW.

Sensibilité du Doublet à 50 m à la tarification électrique – Bâti de 1 000 m²

Les résultats ci-après (tab. 38 et 39) diffèrent du tableau de la page antérieure uniquement par le choix du tarif électrique qui, cette fois, est un tarif domestique option de base (sans heure creuse). On constate une légère différence en faveur du tarif bleu avec HC.

Si on reproduit le même exercice qu'en page précédente mais en choisissant cette fois le tarif Bleu Pro en remplacement du tarif Bleu domestique, on constate pratiquement l'absence d'effet malgré la prime fixe en forte hausse, une raison essentielle revenant à la production d'ECS pratiquement en totalité sur heures creuses.

Résultats essentiels sur l'investissement				Important : Validité à usage macroéconomique exclusivement							
GTH sur Horizontal		Doublet de Référence		SGV		Compacts		Horizontal		Doublet	
Profondeur ouvrage : 1		20		1		1		1		1	
Quantité ouvrages : 910		2		370		26		910		2	
Coûts standards ouvrages : 9 100.0		11 178.0		22 389.0		10 400.0		9 100.0		11 178.0	
Coûts raccordements : 10 600.0		0.0		4 477.8		7 220.0		10 600.0		0.0	
Modulation éventuelle : 0.0		2 547.4		0.0		0.0		0.0		127.4	
Investissement Ouvrages GTH : 19 700.0		13 725.4		26 866.8		17 620.0		19 700.0		11 305.4	
Résultats essentiels sur le fonctionnement											
Orléans/Bricky (FAFB)				Surface Raccordée : 1 000 m²				Tarif élec. : Bleu HC domestique			
Demande (kWh/m ² .an)		ECS : 26.0		Chauffage : 28.0		Clim. : 0.0		géocooling : 6.0			
Nominal GTH (kWh/m ² .an)		19.5		21.0		0.0		6.0			
Heures fonctionnement		1 527 heures		1 848 heures		0 heures		332 heures			
Machine thermo.		COP chaud 4.00		COP froid 5.20		Sans objet		Sans objet			
Puissance PACg + frais		4.7 kW elec		18.2 kW GTH chaud		0.0 kW GTH clim.		18.1 kW GTH frais			
Ouvrage(s) Géothermique(s) de -1m à -1m											
Refrroidissement en fin de saison de chauffage : -4°C et Dérive reportée fin cycle 1: 0°C											
Ouvrage GTH de -1m à -1m, Tinitiale : 16.88°C au 1er octobre											
Solution de référence sur aquifère, T=13.08°C à -20.0m											
Charges de fonctionnement (électricité)											
Part proportionnelle		Part fixe		Grand Total		Part proportionnelle		Part fixe		Grand Total	
ECS+Chauffage	Clim.	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	ECS+Chauffage	Clim.	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois
327.2	0.0	0.0	7.3	334.5	252.6	0.0	0.0	0.0	7.3	259.9	259.9
331.2	0.0	0.0	7.3	338.4	250.2	0.0	0.0	0.0	7.3	257.5	257.5
271.6	0.0	0.0	7.3	278.9	212.7	0.0	0.0	0.0	7.3	220.0	220.0
146.2	0.0	0.0	7.3	153.4	123.2	0.0	0.0	0.0	7.3	130.4	130.4
96.2	0.0	0.0	7.3	103.4	89.5	0.0	0.0	0.0	7.3	96.8	96.8
60.9	0.0	0.0	7.3	68.1	62.4	0.0	0.0	0.0	7.3	69.7	69.7
46.8	0.0	0.0	7.3	69.8	54.6	0.0	0.0	15.8	7.3	77.7	77.7
46.8	0.0	0.0	7.3	64.6	54.6	0.0	0.0	10.5	7.3	72.4	72.4
68.5	0.0	0.0	7.3	75.8	73.9	0.0	0.0	0.0	7.3	81.2	81.2
105.0	0.0	0.0	7.3	112.2	105.1	0.0	0.0	0.0	7.3	112.4	112.4
238.7	0.0	0.0	7.3	246.0	215.2	0.0	0.0	0.0	7.3	222.4	222.4
296.9	0.0	0.0	7.3	304.2	244.2	0.0	0.0	0.0	7.3	251.4	251.4
€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an
2 036.0	0.0	26.3	87.1	2 149.4	1 738.3	0.0	0.0	26.3	87.1	1 851.8	1 851.8
1 824.9	0.0	0.0	Dont PACg	1 511.6	1 511.6	0.0	0.0	0.0	Dont PACg	0.0	0.0
211.1	0.0	26.3	Dont Circulation	226.7	226.7	0.0	0.0	26.3	Dont Circulation	0.0	0.0

Tableau 34 : Résultats économiques, Orléans, 1 000 m², BBC-Rénovation – GTH-Horizontale.

Résultats essentiels sur l'investissement				Important :			
				Validité à usage macroéconomique exclusivement			
GTH sur		Doublet		SGV		Compact	
SGV		de Référence		Horizontal		Doublet	
Profondeur ouvrage :	52.5	20	m	52.5	52.5	52.5	m
Quantité ouvrages :	320	2	Nb ou m ²	320	23	790	2
Coûts standards ouvrages :	19 404.0	11 178.0	€ TTC	19 404.0	9 200.0	7 900.0	11 178.0
Coûts raccordements :	3 880.8	0.0	€ TTC	3 880.8	6 560.0	9 400.0	0.0
Modulation éventuelle :	0.0	2 547.4	€ TTC	0.0	0.0	0.0	6 686.8
Investissement Ouvrages GTH :	23 284.8	13 725.4	€ TTC	23 284.8	15 760.0	17 300.0	17 864.8
Résultats essentiels sur le fonctionnement				Important :			
Orléans/Bricy (FAFB)				Validité à usage macroéconomique exclusivement			
Surface Raccordée :		1 000 m ²		Clim. :		géocooling :	
Demande (kWh/m ² .an)		ECS : 26.0		Chauffage :		28.0	
Nominal GTH (kWh/m ² .an)		19.5		21.0		0.0	
Heures fonctionnement		1 435 heures		COP froid		5.20	
Machine thermo.		COP chaud		4.00		Sans objet	
Puissance PACg + frais		4.7 kW elec		15.6 kW GTH chaud		0.0 kW GTH clim.	
Ouvrage(s) Géothermique(s) de -5m à -100m				Refrondissement en fin de saison de chauffage : -4°C et Dérive reportée fin cycle 1 : 0°C			
Ouvrage GTH de -5m à -100m, Tinitiale : 14.05°C au 1er octobre				Solution de référence sur aquifère, T=-13.08°C à -20.0m			
Charges de fonctionnement (électricité)				Charges de fonctionnement (électricité)			
Part proportionnelle		Part fixe		Part proportionnelle		Part fixe	
Clim.		€TTC/mois		Clim.		€TTC/mois	
ECS+Chauffage		€TTC/mois		ECS+Chauffage		€TTC/mois	
€TTC/mois		€TTC/mois		€TTC/mois		€TTC/mois	
Janv.	273.2	0.0	7.3	280.5	0.0	0.0	7.3
Fév.	270.3	0.0	7.3	277.6	0.0	0.0	7.3
Mars	226.4	0.0	7.3	233.7	0.0	0.0	7.3
Avril	129.5	0.0	7.3	136.7	0.0	0.0	7.3
Mai	92.2	0.0	7.3	99.5	0.0	0.0	7.3
Juin	63.3	0.0	7.3	70.6	0.0	0.0	7.3
Juillet	51.4	0.0	7.3	74.5	0.0	0.0	7.3
Août	52.6	0.0	7.3	70.4	0.0	0.0	7.3
Sept.	75.5	0.0	7.3	82.7	0.0	0.0	7.3
Oct.	109.3	0.0	7.3	116.6	0.0	0.0	7.3
Nov.	229.2	0.0	7.3	236.5	0.0	0.0	7.3
Déc.	263.2	0.0	7.3	270.4	0.0	0.0	7.3
€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an
1 836.2	0.0	26.3	87.1	1 949.6	0.0	26.3	87.1
1 614.6	0.0	0.0	Dont PACg	1 511.6	0.0	0.0	Dont PACg
221.6	0.0	26.3	Dont Circulation	226.7	0.0	26.3	Dont Circulation
Grand Total		Grand Total		Grand Total		Grand Total	
€TTC/mois		€TTC/mois		€TTC/mois		€TTC/mois	
259.9	259.9	259.9	259.9	259.9	259.9	259.9	259.9

Tableau 36 : Résultats économiques, Orléans, 1 000 m², BBC-Rénovation – GTH sur SVG.

Résultats essentiels sur l'investissement				Important : Validité à usage macroéconomique exclusif							
GTH sur Doublet		Doublet de Référence		SGV		Horizontal		Doublet			
Profondeur ouvrage :	50	20	m	50	50	50	50	50	m		
Quantité ouvrages :	2	2	Nb ou m ²	23	780	2	Nb ou m ²	11 178.0	€ TTC		
Coûts standards ouvrages :	11 178.0	11 178.0	€ TTC	19 404.0	9 200.0	7 800.0	11 178.0	€ TTC	€ TTC		
Coûts raccordements :	0.0	0.0	€ TTC	3 880.8	6 560.0	9 300.0	0.0	€ TTC	€ TTC		
Modulation éventuelle :	6 368.4	2 547.4	€ TTC	0.0	0.0	0.0	6 368.4	€ TTC	€ TTC		
Investissement Ouvrages GTH :	17 546.4	13 725.4	€ TTC	23 284.8	15 760.0	17 100.0	17 546.4	€ TTC	€ TTC		
Résultats essentiels sur le fonctionnement											
Orléans/Bricy (FAFB)				Surface Raccordée :		1 000 m²		Important : Validité à usage macroéconomique exclusif			
Demande (kWh/m ² .an)		ECS : 26.0		Chauffage :		28.0		Clim : 0.0			
Nominal GTH (kWh/m ² .an)		19.5		Heures fonctionn.		1.445 heures		géocooling : 6.0			
Machine thermo.		COP chaudière		COP chaudière		4.00		387 heures			
Puissance PACg + frais		4.7 kW elec		COP froid		5.20		Sans objet			
				14.7 kW GTH chaud		0.0 kW GTH clim.		15.5 kW GTH frais			
Ouvrage(s) Géothermique(s) de -50m à -50m											
Refrroidissement en fin de saison de chauffage : 0°C et Dérive reportée fin cycle 1 : 0°C											
Ouvrage GTH de -50m à -50m, Tinitiale : 13.98°C au 1er octobre											
Charges de fonctionnement (électricité)											
Part proportionnelle			Part fixe			Part proportionnelle			Part fixe		
ECS+Chauffage	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	
247.5	0.0	7.3	254.8	252.6	0.0	0.0	7.3	259.9	259.9	259.9	
245.2	0.0	7.3	252.4	250.2	0.0	0.0	7.3	257.5	257.5	257.5	
208.4	0.0	7.3	215.7	212.7	0.0	0.0	7.3	220.0	220.0	220.0	
120.7	0.0	7.3	128.0	123.2	0.0	0.0	7.3	130.4	130.4	130.4	
87.7	0.0	7.3	95.0	89.5	0.0	0.0	7.3	96.8	96.8	96.8	
61.2	0.0	7.3	68.4	62.4	0.0	0.0	7.3	69.7	69.7	69.7	
53.5	0.0	7.3	76.6	54.6	0.0	0.0	7.3	77.7	77.7	77.7	
53.5	0.0	7.3	71.3	54.6	0.0	0.0	7.3	72.4	72.4	72.4	
72.4	0.0	7.3	79.7	73.9	0.0	0.0	7.3	81.2	81.2	81.2	
103.0	0.0	7.3	110.3	105.1	0.0	0.0	7.3	112.4	112.4	112.4	
210.8	0.0	7.3	218.1	215.2	0.0	0.0	7.3	222.4	222.4	222.4	
239.2	0.0	7.3	246.5	244.2	0.0	0.0	7.3	251.4	251.4	251.4	
€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	
1 703.2	0.0	26.3	1 816.7	1 738.3	0.0	0.0	26.3	1 851.8	1 851.8	1 851.8	
1 474.6	0.0	0.0	Dont PACg	1 511.6	0.0	0.0	Dont PACg	1 511.6	0.0	Dont PACg	
228.6	0.0	26.3	Dont Circulation	226.7	0.0	0.0	Dont Circulation	226.7	0.0	Dont Circulation	

Janv.
Fév.
Mars
Avril
Mai
Juin
Juillet
Août
Sept.
Oct.
Nov.
Déc.

Tableau 37 : Résultats économiques, Orléans, 1 000 m², BBC-Rénovation – GTH sur Nappe.

Résultats essentiels sur l'investissement				Important : Validité à usage macroéconomique exclusivement							
GTH sur Doublet		Doublet de Référence		SGV		Compacts		Horizontal		Doublet	
Profondeur ouvrage :	50	20	m	50	50	50	50	780	2	11 178.0	€ TTC
Quantité ouvrages :	2	2	Nb ou m ²	23	23	23	23	7 800.0	0.0	6 368.4	€ TTC
Coûts standards ouvrages :	11 178.0	11 178.0	€ TTC	9 200.0	9 200.0	9 200.0	9 200.0	9 300.0	0.0	17 546.4	€ TTC
Coûts raccordements :	0.0	0.0	€ TTC	6 560.0	6 560.0	6 560.0	6 560.0	0.0	0.0	17 100.0	€ TTC
Modulation éventuelle :	6 368.4	2 547.4	€ TTC	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15 760.0	€ TTC
Investissement Ouvrages GTH :	17 546.4	13 725.4	€ TTC	23 284.8	15 760.0	17 100.0	17 546.4	€ TTC	€ TTC	€ TTC	€ TTC
Résultats essentiels sur le fonctionnement											
Orleans/Bricy (FAFB)				Surface Raccordée : 1 000 m²				Tarif élec. : Bleu base			
Demande (kWh/m ² .an)		ECS : 26.0		Chauffage : 28.0		Clim. : 0.0		géocooling : 6.0		6.0	
Nominal GTH (kWh/m ² .an)		19.5		21.0		0.0		0.0		387 heures	
Heures fonctionnement		1 342 heures		1 445 heures		0 heures		0 heures		Sans objet	
Machine thermo.		COP chaud 4.00		COP froid 5.20		COP froid 5.20		15.5 kW GTH frais		15.5 kW GTH frais	
Puissance PACg + frais		4.7 kW elec		14.7 kW GTH chaud		0.0 kW GTH clim.		0.0 kW GTH clim.		0.0 kW GTH clim.	
Ouvrage(s) Géothermique(s) de -50m à -50m											
Refroidissement en fin de saison de chauffage : 0°C et Dérive reportée fin cycle 1 : 0°C											
Ouvrage GTH de -50m à -50m, Tinitiale : 13.98°C au 1er octobre											
Solution de référence sur aquifère, T=13.08°C à -20.0m											
Charges de fonctionnement (électricité)				Charges de fonctionnement (électricité)				Charges de fonctionnement (électricité)			
Part proportionnelle		Part fixe		Part proportionnelle		Part fixe		Part proportionnelle		Part fixe	
ECS+Chauffage	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois
223.9	0.0	0.0	5.9	229.8	228.6	0.0	0.0	5.9	234.4	228.6	0.0
221.8	0.0	0.0	5.9	227.7	226.4	0.0	0.0	5.9	232.2	226.4	0.0
188.6	0.0	0.0	5.9	194.5	192.5	0.0	0.0	5.9	198.3	192.5	0.0
160.7	0.0	0.0	5.9	166.6	164.0	0.0	0.0	5.9	169.9	164.0	0.0
116.8	0.0	0.0	5.9	122.7	119.2	0.0	0.0	5.9	125.1	119.2	0.0
81.5	0.0	0.0	5.9	87.3	83.1	0.0	0.0	5.9	89.0	83.1	0.0
71.3	0.0	21.0	5.9	98.2	72.8	0.0	0.0	21.0	99.6	72.8	0.0
71.3	0.0	14.0	5.9	91.2	72.8	0.0	0.0	14.0	92.6	72.8	0.0
96.5	0.0	0.0	5.9	102.3	98.4	0.0	0.0	0.0	104.3	98.4	0.0
137.2	0.0	0.0	5.9	143.0	140.0	0.0	0.0	0.0	145.9	140.0	0.0
190.7	0.0	0.0	5.9	196.6	194.7	0.0	0.0	0.0	200.5	194.7	0.0
216.4	0.0	0.0	5.9	222.3	220.9	0.0	0.0	0.0	226.8	220.9	0.0
€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an
1 776.7	0.0	35.0	70.4	1 882.1	1 813.3	0.0	0.0	35.0	1 918.7	1 813.3	70.4
1 538.3	0.0	0.0	Dont PACg	1 576.8	1 576.8	0.0	0.0	0.0	1 576.8	1 576.8	Dont PACg
238.4	0.0	35.0	Dont Circulation	236.5	236.5	0.0	0.0	35.0	236.5	236.5	Dont Circulation

Tableau 38 : Résultats économiques, Orléans, 1 000 m² – Tarif Bleu Base.

Résultats essentiels sur l'investissement				Important : Validité à usage macroéconomique exclusivement							
GTH sur Doublet		Doublet de Référence		SGV		Horizontal		Doublet			
Profondeur ouvrage :	50	20	m	50	50	50	m	50	m		
Quantité ouvrages :	2	2	Nb ou m ²	23	780	2	Nb ou m ²	2	Nb ou m ²		
Coûts standards ouvrages :	11 178.0	11 178.0	€ TTC	19 404.0	9 200.0	7 800.0	€ TTC	11 178.0	€ TTC		
Coûts raccordements :	0.0	0.0	€ TTC	3 880.8	6 560.0	9 300.0	€ TTC	0.0	€ TTC		
Modulation éventuelle :	6 368.4	2 547.4	€ TTC	0.0	0.0	0.0	€ TTC	6 368.4	€ TTC		
Investissement Ouvrages GTH :	17 546.4	13 725.4	€ TTC	23 284.8	15 760.0	17 100.0	€ TTC	17 546.4	€ TTC		
Résultats essentiels sur le fonctionnement				Important : Validité à usage macroéconomique exclusivement							
Orléans/Bricy (FAFB)		Surface Raccordée :		1 000 m ²		Tarif élec. : Bleu HC Pro					
Demande (kWh/m ² .an)	ECS : 26.0	Chauffage :	28.0	Clim. : 0.0	géocooling : 6.0						
Nominal GTH (kWh/m ² .an)	19.5	Heures fonctionnement	1 342 heures	21.0	0.0						
Machine thermo.	COP chaud 4.00	Machine thermo.	1 445 heures	COP froid 5.20	0 heures						
Puissance PACg + frais	4.7 kW elec	Puissance PACg + frais	14.7 kW GTH chaud	0.0 kW GTH clim.	15.5 kW GTH frais						
Ouvrage(s) Géothermique(s) de -50m à -50m				Refrroidissement en fin de saison de chauffage : 0°C et Dérive reportée fin cycle 1 : 0°C							
Ouvrage GTH de -50m à -50m, Tinitiale : 13.98°C au 1er octobre				Solution de référence sur aquifère, T=-13.08°C à -20.0m							
Charges de fonctionnement (électricité)											
Part proportionnelle			Part fixe			Part proportionnelle			Part fixe		
ECs+Chauffage	Clim.	frais	ECs+Chauffage	Clim.	frais	ECs+Chauffage	Clim.	frais	ECs+Chauffage	Clim.	frais
€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois
233.9	0.0	14.8	248.7	238.7	0.0	238.7	0.0	14.8	253.5	14.8	253.5
231.7	0.0	14.8	246.5	236.4	0.0	236.4	0.0	14.8	251.3	14.8	251.3
197.0	0.0	14.8	211.8	201.0	0.0	201.0	0.0	14.8	215.9	14.8	215.9
118.6	0.0	14.8	133.4	121.1	0.0	121.1	0.0	14.8	135.9	14.8	135.9
86.2	0.0	14.8	101.0	88.0	0.0	88.0	0.0	14.8	102.8	14.8	102.8
60.1	0.0	14.8	74.9	61.4	0.0	61.4	0.0	14.8	76.2	14.8	76.2
52.6	0.0	15.5	82.9	53.7	0.0	53.7	0.0	15.5	84.0	14.8	84.0
52.6	0.0	10.3	77.8	53.7	0.0	53.7	0.0	10.3	78.9	14.8	78.9
71.2	0.0	14.8	86.0	72.7	0.0	72.7	0.0	14.8	87.5	14.8	87.5
101.2	0.0	14.8	116.1	103.3	0.0	103.3	0.0	14.8	118.1	14.8	118.1
199.2	0.0	14.8	214.0	203.3	0.0	203.3	0.0	14.8	218.1	14.8	218.1
226.1	0.0	14.8	240.9	230.7	0.0	230.7	0.0	14.8	245.6	14.8	245.6
€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an
1 630.5	0.0	25.9	1 834.1	1 664.1	0.0	1 664.1	0.0	25.9	1 867.7	177.8	1 867.7
1 411.7	0.0	0.0	Dont PACg	1 447.0	0.0	1 447.0	0.0	Dont PACg			
218.8	0.0	25.9	Dont Circulation	217.1	0.0	217.1	0.0	Dont Circulation			

Janv.
Fév.
Mars
Avril
Mai
Juin
Juillet
Août
Sept.
Oct.
Nov.
Déc.

Tableau 39 : Résultats économiques, Orléans, 1 000 m², Tarifi Bleu Pro.

Sensibilité du Doublet à 50 m à la tarification électrique – Bâti de 7 500 m²

Cette fois-ci, la sensibilité va être examinée pour une surface raccordée de 7 500 m², toujours pour du bâti BBC-rénovation (tab. 40). La puissance électrique du compresseur avoisinant 36 kW, on fera l'hypothèse de comparer les tarifs domestique Bleu-HC et Bleu-Pro (36 kW d'abonnement) et le tarif Jaune (42 kW d'abonnement).

Toujours pour une surface raccordée de 7 500 m² et du bâti BBC-rénovation (tab. 41), le tarif Bleu-Pro permet d'abaisser de 300 €TTC la facture électrique chaque année vis-à-vis du tarif Bleu-HC domestique.

Le tarif Jaune option UM (utilisation moyenne) (tab. 42), malgré une prime fixe plus élevée produit une nette diminution vis-à-vis des tarifs bleus, de l'ordre de 2 000 €TTC/an. À noter que la puissance géothermique (170 kW) est obtenue avec un débit d'eau typique compris entre 17 m³/h et 30 m³/h selon le ΔT (moins de 6 °C).

Sensibilité vis-à-vis de la technique géothermique – Bâti de 7 500 m²

Le cas ci-après (tabl. 43) reprend la même demande qu'en page précédente mais en remplaçant le doublet géothermique à 50 m de profondeur par des sondes géothermiques (indépendantes) ; le tarif Jaune étant conservé. On constate une augmentation de 1 000 €TTC/an du fonctionnement due à la baisse de température du sol en cours de saison de chauffe et une forte augmentation de l'investissement (multiplié par 4).

Cas du champ de sondes géothermiques – Bâti de 7 500 m²

Pour traiter le cas du champ de sondes géothermiques (tab. 44), il faut admettre qu'il y a une part de régénération thermique qui, ici, va résulter de l'injection estivale de chaleur **grâce à la climatisation**. Par contre, il faut densifier les SGV, ce qui en abaisse la puissance unitaire moyenne et augmente mécaniquement l'investissement. On constate alors que le fonctionnement du champ de sonde est plus économique que la solution de référence sur aquifère, ce qui s'annule pour les SGV indépendantes.

Cas des sondes géothermiques indépendantes – Bâti de 7 500 m²

Le tableau 45 ci-après synthétise les résultats pour le cas SGV indépendantes raccordées à une climatisation. L'économie est substantielle sur l'investissement (-47 000 €TTC) mais le fonctionnement annuel est augmenté d'environ 1 000 €TTC. Avec les paramètres par défaut du modèle, l'intérêt du champ de sonde vis-à-vis des sondes indépendantes ne semble donc pas visible.

Résultats essentiels sur l'investissement				Important :				Validité à usage macroéconomique exclusivement			
GTH sur Doublet		Doublet de Référence		SGV		Compacts		Horizontal		Doublet	
Profondeur ouvrage :	50	20	m	50	50	50	50	50	50	50	m
Quantité ouvrages :	2	2	Nb ou m ²	167	167	5 820	2	27 239.0	27 239.0	27 239.0	€ TTC
Coûts standards ouvrages :	27 239.0	27 239.0	€ TTC	139 401.0	66 800.0	58 200.0	0.0	0.0	0.0	0.0	€ TTC
Coûts raccordements :	0.0	0.0	€ TTC	27 880.2	38 240.0	59 700.0	0.0	0.0	0.0	0.0	€ TTC
Modulation éventuelle :	14 712.7	5 885.1	€ TTC	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	€ TTC
Investissement Ouvrages GTH :	41 951.7	33 124.1	€ TTC	167 281.2	105 040.0	117 900.0	0.0	0.0	0.0	0.0	€ TTC
Résultats essentiels sur le fonctionnement											
Orléans/Bricy (FAFB)				Surface Raccordée :				Tarif élec. : Bleu HC domestique			
Demande (kWh/m ² .an)		ECS : 26.0		Chauffage : 28.0		Clim. : 0.0		géocooling : 6.0			
Nominal GTH (kWh/m ² .an)		19.5		21.0		0.0		6.0			
Heures fonctionnement		1 342 heures		1 445 heures		0 heures		387 heures			
Machine thermo.		COP chaud 4.00		COP froid 5.20		COP froid 5.20		Sans objet			
Puissance PACg + frais		35.4 kW elec		109.9 kW GTH chaud		0.0 kW GTH clim.		116.4 kW GTH frais			
Ouvrage(s) Géothermique(s) de -50m à -50m											
Ouvrage GTH de -50m à -50m, Tinitiale : 13.98°C au 1er octobre											
Refrroidissement en fin de saison de chauffage : 0°C et Dérive reportée fin cycle 1 : 0°C											
Charges de fonctionnement (électricité)				Charges de fonctionnement (électricité)				Charges de fonctionnement (électricité)			
Part proportionnelle		Part fixe		Grand Total		Part proportionnelle		Part fixe		Grand Total	
ECS+Chauffage	Clim.	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois
1 856.4	0.0	0.0	64.3	1 920.8	1 894.7	0.0	0.0	64.3	1 959.0	1 940.9	1 940.9
1 838.7	0.0	0.0	64.3	1 903.0	1 876.5	0.0	0.0	64.3	1 940.9	1 659.9	1 659.9
1 563.4	0.0	0.0	64.3	1 627.7	1 595.6	0.0	0.0	64.3	1 659.9	988.2	988.2
905.2	0.0	0.0	64.3	969.5	923.8	0.0	0.0	64.3	988.2	735.7	735.7
657.8	0.0	0.0	64.3	722.2	671.4	0.0	0.0	64.3	735.7	532.6	532.6
458.8	0.0	0.0	64.3	523.1	468.2	0.0	0.0	64.3	532.6	592.5	592.5
401.5	0.0	118.4	64.3	584.2	409.7	0.0	118.4	64.3	592.5	553.0	553.0
401.5	0.0	78.9	64.3	544.7	409.7	0.0	78.9	64.3	553.0	618.8	618.8
543.2	0.0	0.0	64.3	607.6	554.4	0.0	0.0	64.3	618.8	852.7	852.7
772.5	0.0	0.0	64.3	836.8	788.4	0.0	0.0	64.3	852.7	1 678.0	1 678.0
1 581.1	0.0	0.0	64.3	1 645.5	1 613.7	0.0	0.0	64.3	1 678.0	1 895.6	1 895.6
1 794.3	0.0	0.0	64.3	1 858.6	1 831.2	0.0	0.0	64.3	1 895.6	14 006.7	14 006.7
€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an
12 774.2	0.0	197.3	772.1	13 743.6	13 037.3	0.0	197.3	772.1	14 006.7	11 059.9	11 059.9
11 059.9	0.0	0.0	Dont PACg	Dont PACg	11 336.8	0.0	0.0	Dont PACg	11 059.9	1 714.4	1 714.4
1 714.4	0.0	197.3	Dont Circulation	Dont Circulation	1 700.5	0.0	197.3	Dont Circulation	1 714.4		

Janv.
Fév.
Mars
Avril
Mai
Juin
Juillet
Août
Sept.
Oct.
Nov.
Déc.

Tableau 40 : Résultats économiques, Orléans, 7 500 m², Tarif Bleu-HC domestique.

Résultats essentiels sur l'investissement				Important :			
GTH sur Doublet				Doublet de Référence			
GTH sur Doublet				Doublet de Référence			
GTH sur Doublet				Doublet de Référence			
Profondeur ouvrage :	50	20	m	SGV	50	50	50
Quantité ouvrages :	2	2	Nb ou m ²	Compacts	167	5 820	2
Coûts standards ouvrages :	27 239.0	27 239.0	€ TTC	Horizontal	58 200.0	27 239.0	Nb ou m ²
Coûts raccordements :	0.0	0.0	€ TTC		27 880.2	38 240.0	0.0
Modulation éventuelle :	14 712.7	5 885.1	€ TTC		0.0	0.0	14 712.7
Investissement Ouvrages GTH :	41 951.7	33 124.1	€ TTC		167 281.2	105 040.0	41 951.7
Résultats essentiels sur le fonctionnement				Important :			
Orléans/Bricy (FAFB)				Surface Raccordée :			
Demande (kWh/m ² .an)				Chauffage :			
Nominal GTH (kWh/m ² .an)				ECS : 26.0			
Heures fonctionnement				1.342 heures			
Machine thermo.				COP chaud 4.00			
Puissance PACg + frais				35.4 kW elec			
Ouvrage(s) Géothermique(s) de -50m à -50m				109.9 kW GTH chaud			
Ouvrage GTH de -50m à -50m. Tinitiale : 13.98°C au 1er octobre				Refroidissement en fin de saison de chauffage : 0°C et Dérive reportée fin cycle 1 : 0°C			
Charges de fonctionnement (électricité)				Solution de référence sur aquifère, T=13.08°C à -20.0m			
Part proportionnelle		Part fixe		Part proportionnelle		Part fixe	
ECS+Chauffage	Clim.	ECS+Chauffage	Clim.	ECS+Chauffage	Clim.	ECS+Chauffage	Clim.
€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois
1 754.3	0.0	88.9	1 843.2	1 790.5	0.0	88.9	1 879.4
1 737.5	0.0	88.9	1 826.4	1 773.3	0.0	88.9	1 862.2
1 477.4	0.0	88.9	1 566.3	1 507.8	0.0	88.9	1 596.7
889.7	0.0	88.9	978.6	908.0	0.0	88.9	996.9
646.6	0.0	88.9	735.5	659.9	0.0	88.9	748.8
450.9	0.0	88.9	539.8	460.2	0.0	88.9	549.1
394.6	0.0	88.9	599.9	402.7	0.0	88.9	608.0
394.6	0.0	88.9	561.1	402.7	0.0	88.9	569.2
533.9	0.0	88.9	622.8	544.9	0.0	88.9	633.8
759.2	0.0	88.9	848.2	774.9	0.0	88.9	863.8
1 494.2	0.0	88.9	1 583.1	1 524.9	0.0	88.9	1 613.9
1 695.6	0.0	88.9	1 784.5	1 730.5	0.0	88.9	1 819.4
€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an
12 228.6	0.0	1 066.9	13 489.4	12 480.4	0.0	1 066.9	13 741.2
10 587.4	0.0	0.0	Dont PACg	10 852.5	0.0	0.0	Dont PACg
1 641.1	0.0	194.0	Dont Circulation	1 627.9	0.0	194.0	Dont Circulation
Janv.							
Fév.							
Mars							
Avril							
Mai							
Juin							
Juillet							
Août							
Sept.							
Oct.							
Nov.							
Déc.							

Tableau 41 : Résultats économiques, Orléans, 7 500 m², Tarif Bleu-HC Pro.

Résultats essentiels sur l'investissement				Important : Validité à usage macroéconomique exclusivement			
GTH sur Doublet		Doublet de Référence		SGV		Doublet	
Profondeur ouvrage :	50	20	m	50	50	50	m
Quantité ouvrages :	2	2	Nb ou m²	167	5 820	2	Nb ou m²
Coûts standards ouvrages :	27 239.0	27 239.0	€ TTC	66 800.0	58 200.0	27 239.0	€ TTC
Coûts raccordements :	0.0	0.0	€ TTC	38 240.0	59 700.0	0.0	€ TTC
Modulation éventuelle :	14 712.7	5 885.1	€ TTC	0.0	0.0	14 712.7	€ TTC
Investissement Ouvrages GTH :	41 951.7	33 124.1	€ TTC	105 040.0	117 900.0	41 951.7	€ TTC
Résultats essentiels sur le fonctionnement				Important : Validité à usage macroéconomique exclusivement			
Orléans/Bricy (FAFB)		Surface Raccordée :		7 500 m²		Tarif élec. : Jaune UM	
Demande (kWh/m².an)	ECS : 26.0	Chauffage :	28.0	Clim. :	0.0	géocooling :	6.0
Nominal GTH (kWh/m².an)	19.5	21.0		0.0		6.0	
Heures fonctionnement	1 342 heures	1 445 heures		0 heures		387 heures	
Machine thermo.	COP chaud 4.00			COP froid 5.20		Sans objet	
Puissance PACg + frais	35.4 kW elec	109.9 kW GTH chaud		0.0 kW GTH clim.		116.4 kW GTH frais	
Ouvrage(s) Géothermique(s) de -50m à -50m				Refroidissement en fin de saison de chauffage : 0°C et Dérive reportée fin cycle 1 : 0°C			
Ouvrage GTH de -50m à -50m, Tinitiale : 13.98°C au 1er octobre				Solution de référence sur aquifère, T=13.08°C à -20.0m			
Charges de fonctionnement (électricité)				Charges de fonctionnement (électricité)			
Part proportionnelle		Part fixe		Grand Total		Grand Total	
ECS+Chauffage	Clim.	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois
1 593.0	0.0	1 728.4	1 35.3	1 634.9	0.0	1 35.3	1 770.2
1 574.3	0.0	1 709.7	1 35.3	1 615.8	0.0	1 35.3	1 751.1
1 284.3	0.0	1 419.7	1 35.3	1 319.8	0.0	1 35.3	1 455.2
509.7	0.0	645.0	1 35.3	523.6	0.0	1 35.3	659.0
365.3	0.0	500.6	1 35.3	372.8	0.0	1 35.3	508.2
254.8	0.0	390.1	1 35.3	260.0	0.0	1 35.3	395.3
222.9	0.0	443.2	1 35.3	227.5	0.0	84.9	447.8
222.9	0.0	414.9	1 35.3	227.5	0.0	56.6	419.5
301.7	0.0	437.0	1 35.3	307.9	0.0	1 35.3	443.2
428.9	0.0	564.3	1 35.3	437.8	0.0	1 35.3	573.1
1 303.0	0.0	1 438.4	1 35.3	1 338.9	0.0	1 35.3	1 474.3
1 527.6	0.0	1 662.9	1 35.3	1 568.1	0.0	1 35.3	1 703.4
€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an
9 588.5	0.0	11 354.2	1 624.1	9 834.6	0.0	1 624.1	11 600.3
8 301.7	0.0	0.0	Dont PACg	8 551.9	0.0	0.0	Dont PACg
1 286.8	0.0	141.5	Dont Circulation	1 282.8	0.0	141.5	Dont Circulation

Tableau 42 : Résultats économiques, Orléans, 7 500 m², Tarif jaune MU.

Résultats essentiels sur l'investissement				Important :			
				Validité à usage macroéconomique exclusivement			
GTH sur		Doublet		SGV		Horizontal	
SGV		de Référence		Compacts		Doublet	
Profondeur ouvrage :	52.5	20	m	52.5	52.5	52.5	m
Quantité ouvrages :	2 350	2	Nb ou m ²	2 350	168	5 870	2
Coûts standards ouvrages :	140 595.0	27 239.0	€ TTC	140 595.0	67 200.0	58 700.0	27 239.0
Coûts raccordements :	28 119.0	0.0	€ TTC	28 119.0	38 460.0	60 200.0	0.0
Modulation éventuelle :	0.0	5 885.1	€ TTC	0.0	0.0	0.0	15 448.3
Investissement Ouvrages GTH :	168 714.0	33 124.1	€ TTC	168 714.0	105 660.0	118 900.0	42 687.3
Résultats essentiels sur le fonctionnement				Important :			
				Validité à usage macroéconomique exclusivement			
Orléans/Bricy (FAFB)		Surface Raccordée :		7 500 m ²		Tarif élec. : Jaune UM	
Demande (kWh/m ² .an)		ECS : 26.0		Chauffage : 28.0		Clim. : 0.0	
Nominal GTH (kWh/m ² .an)		19.5		21.0		0.0	
Heures fonctionnement		1 435 heures		1 599 heures		0 heures	
Machine thermo.		COP chaud 4.00		COP froid 5.20		Sans objet	
Puissance PACg + frais		35.4 kW elec		117.2 kW GTH chaud		0.0 kW GTH clim.	
Ouvrage(s) Géothermique(s) de -5m à -100m		Refrondissement en fin de saison de chauffage : -4°C et Dérive reportée fin cycle 1 : 0°C					
Ouvrage GTH de -5m à -100m, Tinitiale : 14.05°C au 1er octobre		Solution de référence sur aquifère, T=-13.08°C à -20.0m					
Charges de fonctionnement (électricité)				Charges de fonctionnement (électricité)			
Part proportionnelle		Part fixe		Part proportionnelle		Part fixe	
Clim.		€TTC/mois		Clim.		€TTC/mois	
€TTC/mois		€TTC/mois		€TTC/mois		€TTC/mois	
Grand Total		Grand Total		Grand Total		Grand Total	
ECS+Chauffage		ECS+Chauffage		ECS+Chauffage		ECS+Chauffage	
€TTC/mois		€TTC/mois		€TTC/mois		€TTC/mois	
Clim.		Clim.		Clim.		Clim.	
€TTC/mois		€TTC/mois		€TTC/mois		€TTC/mois	
Grand Total		Grand Total		Grand Total		Grand Total	
€TTC/mois		€TTC/mois		€TTC/mois		€TTC/mois	
Janv.		1 803.2		0.0		1 803.2	
Fév.		1 780.4		0.0		1 780.4	
Mars		1 432.4		0.0		1 432.4	
Avril		558.8		0.0		558.8	
Mai		384.2		0.0		384.2	
Juin		263.7		0.0		263.7	
Juillet		214.1		0.0		214.1	
Août		219.2		0.0		219.2	
Sept.		314.3		0.0		314.3	
Oct.		455.2		0.0		455.2	
Nov.		1 454.6		0.0		1 454.6	
Déc.		1 723.6		0.0		1 723.6	
€TTC/an		€TTC/an		€TTC/an		€TTC/an	
10 603.7		0.0		141.5		1 624.1	
9 332.9		0.0		0.0		Dont PACg	
1 270.9		0.0		141.5		Dont Circulation	

Tableau 43 : Résultats économiques, Orléans, 7 500 m², SGV indépendantes.

Résultats essentiels sur l'investissement				Important : Validité à usage macroéconomique exclusivement			
GTH sur		Doublet de Référence		Warming : Dimensionnement pas nécessairement OK			
SGV				SGV	Compacts	Horizontal	Doublet
Profondeur ouvrage :	52.5	20	m	52.5	52.5	52.5	52.5
Quantité ouvrages :	2 890	2	Nb ou m²	2 890	186	6 490	2
Coûts standards ouvrages :	172 833.0	27 239.0	€ TTC	172 833.0	74 400.0	64 900.0	27 239.0
Coûts raccourcissements :	34 566.6	0.0	€ TTC	34 566.6	42 420.0	66 400.0	0.0
Modulation éventuelle :	0.0	5 885.1	€ TTC	0.0	0.0	0.0	15 448.3
Investissement Ouvrages GTH :	207 399.6	33 124.1	€ TTC	207 399.6	116 820.0	131 300.0	42 687.3
Résultats essentiels sur le fonctionnement				Important : Validité à usage macroéconomique exclusivement			
Orleans/Bricy (FAFB)		Surface Raccordée :		7 500 m²		Tarif élec. : Jaune UM	
Demande (kWh/m².an)	ECS : 26.0	Chauffage :	28.0	Clim. :	6.0	géocooling : 0.0	
Nominal GTH (kWh/m².an)	19.5	Heures fonctionnement	21.0	571 heures	7.2	0.0	
Machine thermo.	1 268 heures	COP chaud 4.00	1 413 heures	COP froid 5.20	Sans objet		
Puissance PACg + frais	35.4 kW elec	129.8 kW GTH chaud	100.4 kW GTH clim.	0.0 kW GTH frais			
Ouvrage(s) Géothermique(s) de -5m à -100m							
Ouvrage GTH de -5m à -100m, Tinitiale : 14.05°C au 1er octobre							
Charges de fonctionnement (électricité)							
Part proportionnelle		Part fixe		Part proportionnelle		Part fixe	
€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois
1 589.3	0.0	135.3	1 724.6	1 634.9	0.0	135.3	1 770.2
1 568.7	0.0	135.3	1 704.0	1 615.8	0.0	135.3	1 751.1
1 254.3	0.0	135.3	1 389.6	1 319.8	0.0	135.3	1 455.2
489.6	0.0	135.3	625.0	523.6	0.0	135.3	659.0
342.8	80.6	135.3	558.7	372.8	74.0	135.3	582.1
232.6	152.9	135.3	520.8	260.0	136.5	135.3	531.9
200.9	206.6	135.3	542.8	227.5	182.1	135.3	544.9
201.2	195.4	135.3	532.0	227.5	172.6	135.3	535.4
278.6	121.7	135.3	535.7	307.9	110.0	135.3	553.2
409.0	40.7	135.3	585.0	437.8	37.9	135.3	611.1
1 274.3	0.0	135.3	1 409.6	1 338.9	0.0	135.3	1 474.3
1 517.3	0.0	135.3	1 652.7	1 568.1	0.0	135.3	1 703.4
€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an
9 358.6	797.8	0.0	11 780.6	9 834.6	713.1	0.0	12 171.8
8 064.4	625.1	0.0	Dont PACg	8 551.9	544.3	0.0	Dont PACg
1 294.3	172.8	0.0	Dont Circulation	1 282.8	168.7	0.0	Dont Circulation

Janv.
Fév.
Mars
Avril
Mai
Juin
Juillet
Août
Sept.
Oct.
Nov.
Déc.

Tableau 44 : Résultats économiques, Orléans, 7 500 m², Champ de sondes.

Résultats essentiels sur l'investissement				Important : Validité à usage macroéconomique exclusivement							
GTH sur SGV		Doublet de Référence		SGV		Compacts		Horizontal		Doublet	
Profondeur ouvrage :		20		52.5		52.5		52.5		52.5	
Quantité ouvrages :		2		2 220		159		5 550		2	
Coûts standards ouvrages :		27 239.0		132 834.0		63 600.0		55 500.0		27 239.0	
Coûts raccordements :		0.0		26 566.8		36 480.0		57 000.0		0.0	
Modulation éventuelle :		5 885.1		0.0		0.0		0.0		15 448.3	
Investissement Ouvrages GTH :		33 124.1		159 400.8		100 080.0		112 500.0		42 687.3	
Résultats essentiels sur le fonctionnement				Important : Validité à usage macroéconomique exclusivement							
Orléans/Bricy (FAFB)		Surface Raccordée :		7 500 m ²		Tarif élec. : Jaune UM					
Demande (kWh/m ² .an)		ECS : 26.0		Chauffage : 28.0		Clim. : 6.0		géocoooling : 0.0		0.0	
Nominal GTH (kWh/m ² .an)		19.5		21.0		7.2					
Heures fonctionnement		1 431 heures		1 595 heures		507 heures				0 heures	
Machine thermo.		COP chaud 4.00				COP froid 5.20				Sans objet	
Puissance PACg + frais		35.4 kW elec		110.9 kW GTH chaud		110.9 kW GTH clim.				0.0 kW GTH frais	
Ouvrage(s) Géothermique(s) de -5m à -100m				Refroidissement en fin de saison de chauffage : -4°C et Dérive reportée fin cycle 1 : 0°C							
Ouvrage GTH de -5m à -100m, Tinitiale : 14.05°C au 1er octobre				Solution de réference sur aquifère, T=13.08°C à -20.0m							
Charges de fonctionnement (électricité)				Charges de fonctionnement (électricité)							
Part proportionnelle		Part fixe		Grand Total		Part proportionnelle		Part fixe		Grand Total	
ECS+Chauffage	Clim.	ECS+Chauffage	Clim.	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois
€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois	€TTC/mois
1 803.2	0.0	0.0	135.3	1 938.5	1 634.9	0.0	0.0	135.3	1 770.2	135.3	1 770.2
1 780.4	0.0	0.0	135.3	1 915.7	1 615.8	0.0	0.0	135.3	1 751.1	135.3	1 751.1
1 432.4	0.0	0.0	135.3	1 567.8	1 319.8	0.0	0.0	135.3	1 455.2	135.3	1 455.2
558.8	0.0	0.0	135.3	694.2	523.6	0.0	0.0	135.3	659.0	135.3	659.0
378.6	73.2	0.0	135.3	587.1	372.8	74.0	0.0	135.3	582.1	135.3	582.1
256.7	138.8	0.0	135.3	530.8	260.0	136.5	0.0	135.3	531.9	135.3	531.9
221.6	187.4	0.0	135.3	544.4	227.5	182.1	0.0	135.3	544.9	135.3	544.9
222.1	177.4	0.0	135.3	534.8	227.5	172.6	0.0	135.3	535.4	135.3	535.4
307.6	110.5	0.0	135.3	553.5	307.9	110.0	0.0	135.3	553.2	135.3	553.2
451.8	37.0	0.0	135.3	624.1	437.8	37.9	0.0	135.3	611.1	135.3	611.1
1 454.6	0.0	0.0	135.3	1 589.9	1 338.9	0.0	0.0	135.3	1 474.3	135.3	1 474.3
1 723.6	0.0	0.0	135.3	1 858.9	1 568.1	0.0	0.0	135.3	1 703.4	135.3	1 703.4
€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an	€TTC/an
10 591.4	724.2	0.0	1 624.1	12 939.8	9 834.6	713.1	0.0	1 624.1	12 171.8	1 624.1	12 171.8
9 319.9	554.9	0.0	Dont PACg	Dont PACg	8 551.9	544.3	0.0	Dont PACg	Dont PACg	0.0	Dont PACg
1 271.5	169.3	0.0	Dont Circulation	Dont Circulation	1 282.8	168.7	0.0	Dont Circulation	Dont Circulation	0.0	Dont Circulation

Tableau 45 : Résultats économiques, Orléans, 7 500 m², Sondes indépendantes.

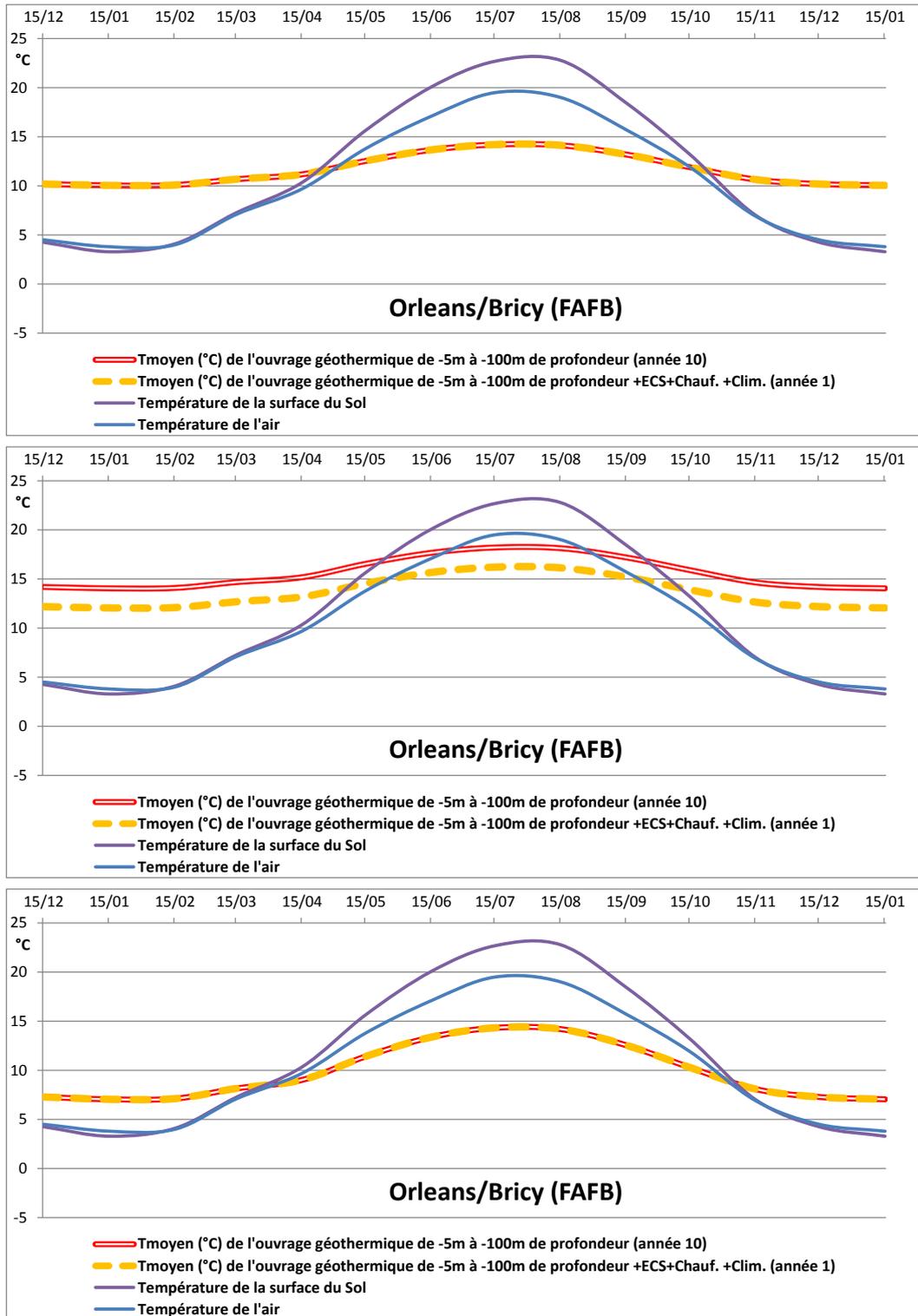


Figure 53 : Températures moyennes du sol imposées par le modèle au voisinage des sondes. Sondes indépendantes pour le panneau du haut - Champ de sonde pour le panneau du milieu - Illustration d'une autre possibilité du modèle pour le panneau du bas.

7. Vers une transposition à l'échelle macro-économique - Esquisse de cahier des charges

7.1. PROBLÉMATIQUE

7.1.1. Avant-propos

Pour produire une analyse de « la géothermie » à l'échelle macroéconomique, une difficulté majeure réside dans le nombre des techniques et de leurs variantes, surtout si on doit définir un « coût global » qui implique la prise en compte de l'exploitation, de la maintenance et de la fin de vie.

Il faudra, en particulier, confirmer que le paramétrage « générique » de la structure des coûts proposés par la présente étude reste valide lors de l'agrégation à l'échelle macroéconomique et propage bien les sensibilités représentées à l'échelle élémentaire.

L'échelle macroéconomique va probablement nécessiter une formalisation pertinente d'indicateurs énergétiques, économiques et environnementaux ; ces indicateurs devant évidemment autoriser une comparaison avec d'autres solutions non géothermiques : consommations d'énergies (primaires, renouvelables...), efficacité énergétique, taux d'EnR dans l'énergie finale / utile, émission de gaz à effet de serre (GES), dépendance vis-à-vis de l'approvisionnement en énergie...

Cette question devra être traitée de manière analogue à ce qui a été effectué dans la présente étude pour la solution non géothermique de référence qui est usuellement, une solution thermique de type gaz à condensation mais qui n'est pas pertinente puisqu'elle présente l'inconvénient de ne pas représenter les services de type rafraîchissement ou climatisation.

7.1.2. Questionnements

Hypothèses fiscales et comptables

Les volets fiscaux et comptables (dont l'amortissement) pourront difficilement être considérés définitivement en raison des fréquentes évolutions sur la période traitée par une analyse et d'une disparité entre les différentes techniques à comparer.

Par contre, pouvoir examiner la sensibilité à ces hypothèses serait probablement une fonctionnalité à modéliser avec soin, ce qui, à ce jour, ne semble pas avoir été engagé dans les différents secteurs de la géothermie, probablement faute de données cohérentes et fiables. Un travail de collecte et/ou compilation des informations pertinentes serait donc à initier en ce sens.

Coûts d'investissement

Lors de la réalisation de la présente étude focalisée sur la modélisation des techniques de géothermie TBE, on a pu constater que l'estimation des coûts des investissements (et de la maintenance) n'étaient pas à périmètres comparables.

La présente étude a donc proposé une approche qui homogénéise le paramétrage mais sans doute faudra-t-il collecter les retours sur opérations réelles pour caler (automatiquement ?) les modèles ou aider l'analyste à bien renseigner les paramètres. Pour cela, seraient par exemple à collecter :

- les estimations des coûts de programmation, de conception et de réalisation ;
- les méthodes de répartition de ces coûts dans le temps appliquées par les différents acteurs et indexation appliquée aux différents postes de coûts. Le cas échéant, montant des provisions pour couvrir des aléas de chantier ;
- le montant de l'investissement total, toutes dépenses confondues, à financer et les origines des financements (prêts bancaires, subventions, autres financements publics ou parapublics éventuels...).

De même une difficulté résultera de la prise en considération des différents mécanismes d'aide qui sont intervenus ou peuvent être envisagés. Aussi, en général, les analyses sont effectuées « hors aides publiques ». Pourtant, ces mécanismes sont souvent une clé de l'économie des projets et il serait donc judicieux de renseigner :

- les avances remboursables ;
- les aides et subventions à l'investissement et au fonctionnement ;
- les dispositions fiscales particulières ;
- les éventuelles avances sur rémunération (cas d'une société d'exploitation) ;
- ...

On va retrouver le même questionnement vis-à-vis des frais financiers des maîtrises d'ouvrage qui sont difficilement comparables, ce qui incite à produire des analyses économiques « hors frais financier », mais est-ce pertinent ?

Reste la problématique de la TVA et autres taxes qui peuvent être intégrées sans que cela soit renseigné, ce qui introduit une dispersion des données.

Coûts et recettes d'exploitation

En principe, une analyse (macro)-économique prévoit des projections à 20 ou 30 ans en distinguant les postes suivants :

- estimation des coûts d'exploitation, de maintenance, de gros entretien et de renouvellement et choix des coefficients d'indexation à appliquer aux différents postes de coût ;

- estimations, sur la durée de vie de l'opération (quelle signification ?), des coûts de gestion et d'exploitation (maître d'ouvrage et/ou exploitant) ;
- estimation des recettes de valorisation éventuelles (recettes commerciales, vente d'énergie...).

La question qui se pose, outre la difficulté à collecter les données pertinentes, portent sur les mécanismes rapportés qui alimentent (ou ponctionnent) le compte d'exploitation, par exemple, un contrat de performance énergétique et/ou des bonus / malus.

VAN avant prise en compte monétaire des risques

Des questions seront posées pour définir une méthode homogène d'évaluation de la valeur actualisée nette (VAN) des coûts (avant prise en compte des risques) pour produire les éléments d'appréciation pertinents :

- justification des périodes retenues et, pour la comparaison, choix des périodes identiques ou non ?
- estimation des valeurs actuelles des flux nets selon quelles hypothèses ?
- éventuelle incidence des calendriers de conception-réalisation différents selon les techniques afin de faire ressortir les avantages et ou inconvénients (gains, recettes, dépenses...) ?

7.1.3. Risques (économiques) et VaR (Valeur à Risque)

Un risque est un événement, un facteur ou une influence qui menace la bonne marche du projet ou d'une opération en agissant, notamment, sur les délais, les coûts ou la performance ou la qualité du service rendu (ou du produit livré). En principe, les risques s'apprécient, au cas par cas, selon les caractéristiques propres à chaque technique géothermique ou à chaque opération, cette analyse s'établissant par phases et par postes en donnant lieu à une appréciation aussi complète que possible des coûts éventuels à y associer.

Alors que, à ce jour, l'évaluation du risque économique serait envisageable pour les opérations importantes, en particulier celles pour lesquelles les postes de maintenance et renouvellement sont significatifs (géothermie basse enthalpie), serait-il possible et/ou judicieux de généraliser une telle évaluation ?

Un des objectifs serait de modéliser l'impact économique des risques sur les délais (phase de réalisation) et indisponibilités (phases d'exploitation et maintenance). La démarche consisterait à :

- établir une matrice qualitative (par poste et par phase) ;
- monétariser chaque risque afin de les répercuter sur la VAN (coûts globaux actualisés) :
 - déterminer la probabilité d'occurrence,

- évaluer la sévérité,
- déduire l'incidence sur le coût fonction de la sévérité pondérée par la probabilité d'occurrence : estimer les VaR,
- analyser comparativement des solutions en fonction des VaR.

VAN après prise en compte monétaire des risques

La question serait d'examiner la possibilité et/ou l'intérêt d'introduire cette approche dans l'analyse économique en étant toutefois bien conscient qu'il s'agit là plus d'un indicateur que d'un résultat quantitatif. La démarche générale serait la suivante :

- estimation qualitative ;
- valorisation monétaire des risques : estimations des VaR (Valeurs à Risque) ;
- estimation des valeurs actuelles des flux nets après prise en compte des VaR.

Dans la pratique, une modélisation produirait :

- une analyse de sensibilité ;
- une estimation des éventuelles valeurs de basculement entre solutions (par exemple par comparaison de la VAN) pour apprécier la robustesse relative sur les principaux paramètres (travaux, entretien, exploitation...).

Valeur résiduelle (éventuellement valeur à l'échéance)

La valeur résiduelle dont il s'agit ici n'est pas la valeur résiduelle comptable, mais la valeur résiduelle technico-économique. Il s'agit donc d'un indicateur qui reflète la valeur d'usage des ouvrages et équipements à une échéance fixée du projet ou contrat, cette valeur venant en déduction de la valeur actuelle nette des coûts. La prise en considération de la valeur résiduelle pour une opération géothermique à une date donnée nécessite les actions suivantes :

- estimation de la durée de vie restante au-delà de la période traitée ;
- estimation des charges pour maintenir en opération jusqu'à la fin de vie (estimée) ;
- évaluation des coûts de démantèlement et/ou fermeture ;
- évaluation du remplacement par une installation neuve de même nature qui interviendrait avant la fin de vie (uniquement si les charges de fonctionnement et maintenance et/ou une dégradation des performances sont envisageables). Le remplacement sera calculé par indexation et actualisation des postes de l'investissement initial.

7.2. DÉMARCHE EN COÛT GLOBAL (OU COÛT DU CYCLE DE VIE - CCV)

Présentation

Sous réserve de pertinence des informations injectées dans les modèles, la démarche en Coût Global peut s'appliquer à toutes les techniques géothermiques pour établir un bilan prévisionnel (actualisé) pour toute la durée d'exploitation (prévisionnelle).

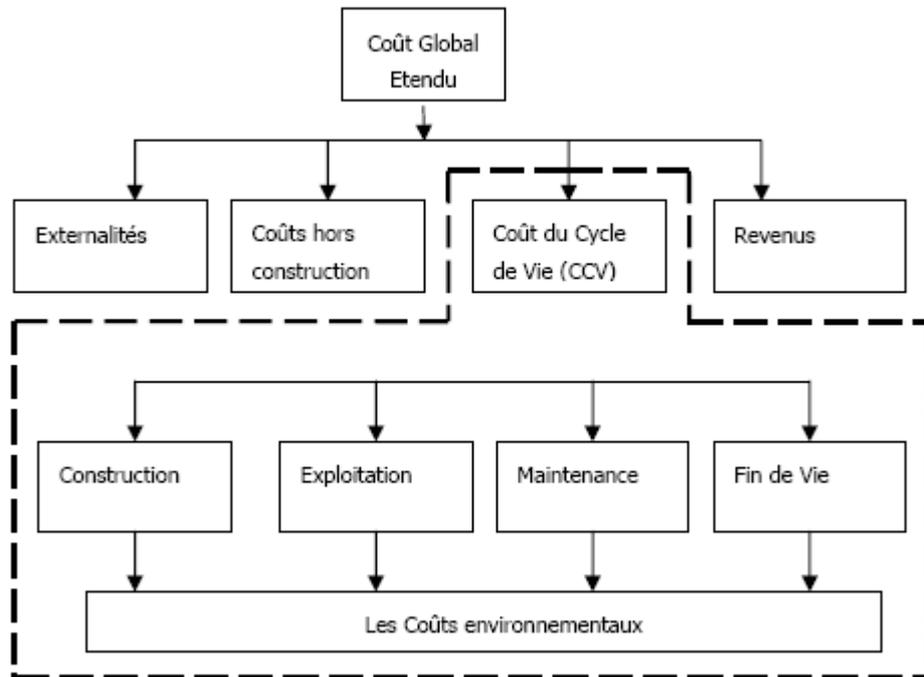


Figure 54 : Éléments du Coût Global et du Coût du Cycle de Vie
(H. Joumni, ISO/DIS 15686-5 ISO).

L'approche en coût global (ou coût global élémentaire) vise à proposer au maître d'ouvrage une estimation des coûts et bénéfices intervenant sur l'ensemble du cycle de vie d'un ouvrage et une prise en compte de leurs impacts dans le choix d'investissement ; ce choix restant à ce jour motivé essentiellement par la volonté de minimiser les coûts afférant à l'ouvrage tout en maximisant les bénéfices potentiels liés à son exploitation. Un tel exercice suppose l'intégration, dans le cadre d'une approche coût-bénéfices, des décisions d'investissement sur une échelle temporelle englobant les différentes phases du cycle de vie d'un ouvrage (Haitham Joumni, « L'approche en Coût Global : Éléments de méthodologie, critères d'arbitrage et démarche d'évaluation dans le champ de la construction », *Économie et développement urbain durable / Coordonné par Jean Carassus et Bruno Duplessis*, p. 117-140, Presse des Mines, février 2010).

Par extension, un Coût Global Etendu (CGE) peut être obtenu en intégrant d'autres coûts et flux financiers tels que les revenus issus de l'exploitation ou de la cession d'une partie de l'ouvrage, les externalités occasionnées par le projet ou encore les coûts hors construction.

Considérations pratiques

Ce qu'il faut retenir : Le coût global présente l'avantage de mettre l'accent sur l'exploitation-maintenance d'un ouvrage et de relativiser ainsi les « surcoûts d'investissement » d'une installation géothermique, par exemple vis-à-vis d'une installation de référence. Plus qu'un outil de prévision économique, c'est avant tout un outil d'aide à la décision pour le maître d'ouvrage.

Le coût global est une notion qui, bien qu'ancienne, peine à être intégrée dans le secteur de la géothermie. Pourtant, en montrant que les coûts différés peuvent largement dépasser les coûts d'investissement, le coût global incite à l'établissement d'une stratégie d'exploitation-maintenance lors de la programmation et de la conception, et à associer toute recherche d'économies (d'investissement) sur le coût des travaux à une analyse de leur impact sur le fonctionnement. **Autrement dit, certaines économies peuvent coûter cher en géothermie !**

Pour les projets de géothermie, une difficulté proviendra de l'estimation de la valeur résiduelle à une échéance fixée et/ou en fin de vie. Par exemple, on constate une absence de données pertinentes hors les opérations de fermeture des opérations en géothermie basse énergie au Dogger. Une autre difficulté résidera dans la prise en considération de divers mécanismes environnementaux (certificats d'économie d'énergie par exemple), incitatifs ou de pénalisation.

L'approche en coût global porte en général sur l'ensemble des composantes de l'ouvrage même si elle peut se focaliser sur l'une ou plusieurs d'entre elles. Il comprend les **coûts d'investissement**, qui correspondent à l'ensemble des dépenses engagées depuis l'origine du projet jusqu'à la réception définitive des travaux, ainsi que les **coûts différés** qui recouvrent différents postes de dépenses :

- les coûts d'exploitation ;
- les coûts de maintenance (petit et gros entretien, contrats de maintenance des installations techniques...) ;
- les coûts d'éventuels travaux liés à des modifications fonctionnelles ;
- le coût de pilotage de l'exploitation-maintenance (moyens humains et informatiques, internes et externes) ;
- éventuellement, le coût de fin de vie (démantèlement).

Finalité

L'analyse (en coût global) doit permettre des choix sur le double critère des coûts d'investissement et des coûts différés, ces derniers pouvant être en faveur des techniques géothermiques en comparaison à d'autres solutions ou à une solution géothermique de référence :

- l'investissement peut poser problème lorsque les possibilités (d'investissement) sont limitées. En effet, parce qu'une technique durable est susceptible de mobiliser plus

de compétences, de recourir à des produits et procédés techniques onéreux et des mises en œuvre plus soignées, son coût de réalisation peut être impacté ;

- les coûts différés d'une technique durable sont, en revanche, réputés faibles, grâce à la maîtrise des consommations énergétiques notamment, qui permet à la fois de réduire l'un des postes de dépenses d'exploitation les plus importants et d'obtenir une source significative de gains environnementaux.

Sur le second point, la présente étude est parvenue à représenter finement les dépenses énergétiques (en kWh et en Euros 2011), lesquelles représentent le poste le plus déterminant. Par contre, la maintenance n'a pas pu être modélisée.

Limitations et incertitudes

Toutefois, l'estimation des coûts différés présente certaines limites car les taux d'inflation sont incertains, tout comme l'évolution des prix des énergies pour lesquels on constate actuellement des scénarii très divergents, certains prévoyant des augmentations comparables du gaz et de l'électricité ces prochaines années (de 9 % par an par exemple), d'autres prévoyant une nette divergence en faveur de l'électricité et au détriment des énergies fossiles.

Plus vraisemblablement, et c'est la position adoptée dans la présente étude qui détaille les effets de la saisonnalité et des heures creuses / heures pleines, on s'attend à une profonde évolution des structures tarifaires de l'électricité (et peut être aussi, de l'énergie thermique en réseaux) allant vers des périodes à forte incitation et/ou pénalités, la technologie du smart-grid étant emblématique de cette tendance.

On constate également des incertitudes très importantes sur la durée de vie de certains équipements du système géothermique, et sur les surcoûts d'entretien que ces techniques durables peuvent générer avant qu'elles ne se généralisent et que les coûts ne baissent en lien avec le développement du marché.

Resteront difficilement quantifiables les coûts différés externes, ceux qui ne concernent ni le maître d'ouvrage, ni les utilisateurs mais sur lesquels portent la plupart des gains d'une technique durable (maîtrise des impacts sur l'effet de serre, amélioration de la santé publique, maîtrise de la dégradation de la biodiversité, maîtrise des pollutions de proximité, des déchets ultimes induits, des déplacements...).

Tout ce qui vient d'être évoqué dans les paragraphes qui précèdent est essentiel à l'échelle macroéconomique même si certains points sont éloignés du domaine de la géothermie.

Néanmoins, il sera, sans doute, judicieux de compléter l'analyse en coût global par divers autres indicateurs explicitant l'efficacité énergétique et la performance environnementale.

7.2.1. Démarche en Temps de Retour (sur investissement)

Cette approche diffère de la démarche en **coût globale** dans la mesure où elle suppose des recettes d'exploitation qui annulent l'ensemble des charges à un moment donné : **temps de retour**. En cela, le **Temps de Retour (TDR)** se rapproche de la notion de **coût global étendu (CGE)**.

En absence de recette, l'approche en temps de retour ne peut pas être **directement** appliquée à une solution géothermique (chez un particulier). Elle peut être également délicate en micro-réseau ou en réseau de PACg distribuées.

Toutefois, cette démarche peut être développée **indirectement** en établissant une comparaison avec une technique de référence donnée ; par exemple une solution au gaz naturel ou, mieux encore, une solution géothermique, virtuelle ou réaliste.

Cette solution géothermique de référence (sur aquifère) se caractérisant par des paramètres très stables de son fonctionnement, il paraît donc raisonnablement envisageable, sous réserve de scénarii sérieux, de la comparer à une solution au gaz (par exemple), mais ce n'était pas là le sujet de la présente étude.

Dans la pratique, du fait d'une solution géothermique de référence, la démarche en TDR permettra de considérer que seuls quelques postes diffèrent entre une technique géothermique étudiée et la solution de référence appliquée exactement au même contexte. On pourra alors établir un temps de retour différentiel en s'affranchissant de certains postes pour lesquels les incertitudes sont grandes.

La présente étude est allée dans ce sens en formalisant des modèles simplifiés qui, pour chaque cas étudié, produisent le montant des investissements et le détail des dépenses énergétiques du fonctionnement en les rapportant à la solution géothermique de référence sur nappe aquifère qui serait raccordée exactement au même système et qui fournirait exactement **les** mêmes services : ECS, Chauffage, Climatisation et/ou Rafraîchissement direct (géocooling).

Pour le passage à l'échelle macroéconomique, il faudra généraliser cette démarche et pour cela procéder à une validation, par exemple avec les étapes suivantes :

- identification de cas réels raccordés à une technique géothermique et pour lesquels on dispose de **toutes** les données pour détailler le coût global ;
- formuler (en détail également) le coût global pour une solution au gaz ;
- formuler (en détail également) le coût global pour la solution géothermique de référence ;
- exprimer les TDR différentiels entre :
 - a) technique géothermique étudiée et solution au GAZ,
 - b) technique géothermique de référence et solution au GAZ,
 - c) technique géothermique étudiée et technique géothermique de référence,
- vérifier que le TDR c) permet bien de déduire le TDR a) connaissant le TDR b).

7.3. PRINCIPE DE SUPERPOSITION / AGRÉGATION

Les grandeurs macro-économiques seront évaluées sur la base de l'observation de la VAN et du TDR (rapporté à la solution de référence) avec, en complément, la prise en considération d'indicateurs économiques (TRI, sensibilité...), énergétiques et environnementaux (CO₂, Taux d'EnR, taux de couverture...). Dans l'optique d'une analyse macro-économique à l'échelle d'un territoire, il faudra valider l'agrégation des analyses simplifiées. Sur le principe, cela consiste :

- à établir différentes bibliothèques :
 - bibliothèque de techniques géothermiques (présente étude),
 - bibliothèque de demandes de bâtiments (exprimé selon RT) ;
- à formuler des scénarii de répartition sur le territoire :
 - sélection de techniques géothermiques à répartir sur le territoire,
 - scénarisation des demandes à raccorder aux géothermies,
 - agrégation des analyses économiques : Demandes x Géothermies x Territoire ;
- à tester la sensibilité aux paramètres influents :
 - résultats et indicateurs économiques (VAN, TDR, TRI...),
 - indicateurs énergétiques et environnementaux.

La transposition à l'échelle macroéconomique (territoire, région...) est obtenue en superposant les opérations élémentaires. Selon la technique géothermique, les raisonnements peuvent être différents, par exemple :

- Pour la géothermie TBE, les demandes d'énergie thermique hivernale (chauffage) **et** estivale (rafraîchissement) et d'ECS sont décrites en tenant compte de la saisonnalité matérialisée par la température extérieure afin d'établir des chroniques mensuelles de consommation ; ce pas de temps permettant de filtrer les fluctuations, notamment, horaires ou hebdomadaires.

Les analyses de chaque opération géothermique élémentaire sont rapportées à la technique géothermique TBE de référence sur nappe aquifère. La transposition à l'échelle macroéconomique (territoire, région...) est obtenue par superposition (agrégation) des opérations élémentaires.

Un critère de foisonnement doit être introduit pour la prise en compte éventuelle des puissances crêtes appelées sur les réseaux (électricité, gaz...).

- Pour la géothermie BE, les demandes, hors ECS, sont décrites en fonction de la température extérieure en exprimant la monotone du réseau ou sa courbe de charge. Les analyses des opérations géothermiques sont traitées en fonction de la localisation géo-climatique.

La solution de référence peut être le gaz (à condensation) car il n'y a pas de prise en considération du rafraîchissement ou de la climatisation mais on pourra préférer une solution sur nappe aquifère superficielle en géothermie TBE. La transposition à l'échelle macroéconomique (territoire, région...) est obtenue par superposition des opérations élémentaires.

Le foisonnement est déjà traité au niveau du réseau de chaleur.

8. Conclusions

On peut constater au travers des exemples ci-avant que les modèles simplifiés développés dans le cadre de la présente étude sont validés sur leurs principes, en particulier pour le paramétrage qui permet de représenter l'ensemble des effets et des sensibilités technico-économiques des quatre grands groupes de techniques géothermiques de très basse énergie (TBE). La force de la modélisation est d'être parvenue à un modèle unique, simple de prise en main et peu exigeant en ressources informatiques puisqu'il est implémenté dans le tableur EXCEL sans qu'une seule ligne de code VBA ne soit employée. Le modèle reste évolutif, par exemple pour faire évoluer le paramétrage sur la base des retours sur expériences que, par ailleurs, l'on souhaite instamment afin de finaliser les modèles simplifiés. En effet, tant la représentation de la maintenance que celle de la valeur résiduelle n'ont pu être envisagées faute de connaissances suffisantes.

Néanmoins, l'introduction du concept de « technique géothermique de référence sur nappe aquifère » permet de contourner certaines lacunes en rendant un premier niveau de comparaison possible sans avoir à maîtriser l'ensemble du système puisque tous les composants hors-sol sont pratiquement identiques. De ce fait, l'investissement pour le composant géothermique et les dépenses énergétiques de fonctionnement constituent déjà un très bon indicateur qui, de plus, est facilement transposable à une échelle macroéconomique si le seul élément à analyser est la composante géothermique à associer à des demandes thermiques.

La présente étude a également introduit les outils pour analyser la saisonnalité des fonctionnements ; le pas de temps mensuel ayant été retenu. Les restitutions sous forme de chroniques mensuelles distinguent alors, pour chacun des quatre usages thermiques du bâti raccordé (ECS, Chauffage, Climatisation et Rafraîchissement direct) les chroniques des temps des fonctionnements et les chroniques des coûts unitaires décomposés en heures creuses, heures pleines et prime fixe. De la sorte, il y a une possibilité immédiate de constater où se produisent les éventuels écarts vis-à-vis de la solution géothermique de référence qui constitue une source à température constante insensible aux fluctuations saisonnières ou aux sollicitations par le système thermique.

Cette faculté du modèle proposé à distinguer les fluctuations saisonnières est essentielle, car c'est là que se différencient les solutions géothermiques vis-à-vis des solutions fossiles ou bois-énergie par exemple. Toutefois, il reste évident que, contrairement au solaire thermique, la géothermie est disponible 24h/24. C'est la raison pour laquelle le modèle est préconfiguré pour prendre en considération les apports solaires intermittents, la base de données géoclimatiques ayant été renseignée pour le rayonnement solaire incident.

La présente étude contient également une première approche de la modélisation simplifiée de la géothermie basse énergie et une esquisse de cahier des charges pour une transposition des modèles simplifiés à l'échelle macroéconomique.

Annexe 1

Définitions des termes économiques

TAUX D'ACTUALISATION (OU ACTUALISATION)

Le **taux d'actualisation** (généralement noté : i) est utilisé pour déprécier des flux futurs et déterminer leur valeur actuelle c'est à dire leur valeur ramenée à la date d'aujourd'hui. Le **taux d'actualisation** est toujours positif. Il est conventionnellement fixé, pour les calculs de valeur actuelle. Le taux d'actualisation est généralement le même que le taux utilisé (par le maître d'ouvrage) pour l'endettement sur la période considérée.

VALEUR ACTUELLE

Le calcul de la **valeur actuelle** ramène à la date déterminée (actuelle) une chronique de flux de trésorerie. Il s'agit de tenir compte de l'éloignement plus ou moins grand dans le temps de la réalité de la valeur (dépense ou recette). Ce calcul fait appel au **taux d'actualisation** :

$$V = \sum_0^n \frac{V_n}{(1+i)^n}$$

où n est le nombre de périodes (années en général),
 V_n le montant pour la période considérée,
 et i le taux d'actualisation.

CASH-FLOWS OPÉRATIONNELS

Ce sont les flux financiers liés uniquement à l'exploitation (Investissements, Recettes et charges d'exploitation). Le Cash-flow est la somme de tous les produits encaissables. On en déduit la somme de toutes les charges décaissables. N'entrent donc pas dans le calcul les immobilisations ni les amortissements. De fait, le Cash-flow ne tient pas compte du mode de financement. Le Cash-flow représente les flux de liquidités que génère une entreprise. C'est donc un bon indicateur de la solvabilité.

FLUX FINANCIERS VERS INVESTISSEURS

On obtient le **flux financier vers investisseurs** en additionnant le **cash-flow opérationnel** et le remboursement des emprunts. Le taux d'actualisation qui annule la valeur nette de ces séries de flux est appelé TRA (Taux de Rentabilité Actuariel)

VALEUR ACTUELLE NETTE (VAN) - FLUX FINANCIERS VERS INVESTISSEURS CUMULÉS

La **valeur actuelle nette** (VAN) est la somme des flux monétaires actualisés (dans ce document : somme des Cash-flows actualisés) moins le montant de l'investissement initial. Elle représente le montant de la création de valeur anticipée sur l'investissement. Elle correspond à ce qu'on peut appeler « **flux financiers vers**

investisseurs cumulés ». La VAN permet de comparer les gains à l'investissement initial. D'un point de vue purement financier, un investissement peut être entrepris dès lors que sa VAN est positive (ce qui signifie qu'il peut y avoir création de valeur). Si la VAN est négative, alors le projet n'est pas rentable. La VAN est un indicateur qui est préféré au TRI (ou TIR) lorsqu'il faut choisir entre deux investissements mutuellement exclusifs.

TRI (OU TIR : TAUX INTERNE DE RENTABILITÉ)

On rappelle que le **TRI** (taux de rentabilité interne – à ne pas confondre avec le Temps de Retour sur Investissement) est un outil de décision d'investissement qui ne dépend pas du mode de financement. Pour qu'un projet soit jugé « rentable », il faudrait que son **TRI** soit suffisamment supérieur au taux bancaire, notamment pour compenser le risque propre à l'opération. D'un point de vue mathématique, le **TRI** est le taux d'actualisation annulant la **VAN**.

TRI MINIMAL OU TAUX DE REJET

L'usage est de considérer une valeur de TRI minimale de 10 % pour l'approbation d'un investissement. Cette valeur minimale de TRI est appelée aussi **taux de rejet**.

TEMPS DE RETOUR (TDR) SUR INVESTISSEMENT

Le **temps de retour sur investissement** (ou ROI : Return On Investment) avec financement bancaire est le nombre d'années qu'il faut pour que la somme des flux annuels (actualisés) sur ces années compense l'investissement initial. Le nombre d'années peut être fractionnaire. Le **temps de retour sur investissement** est défini comme la période de temps minimale théoriquement nécessaire pour récupérer l'investissement initial sous forme de flux de trésorerie (cash-flow).

$$\text{Temps de retour sur investissement} = \frac{\text{Investissement fixe amortissable}}{\text{Cash-Flow moyen}}$$

Un **temps de retour sur investissement sans** financement bancaire correspond à un financement sur fonds propres. Ce mode de financement est 'généralement' considéré comme aberrant car il revient à imposer à l'investisseur l'immobilisation d'un capital très important pendant plusieurs années. Néanmoins, ce scénario d'investissement permet de comparer la rentabilité de différents cas d'étude, notamment lorsqu'explicitement un plan de financement particulier est impossible. Le temps de retour sur investissement réel (avec financement bancaire) doit, en principe, être inférieur à celui-ci.

On peut calculer un temps de retour sur investissement **sans** tenir compte du financement bancaire (financement sur fonds propres). On considère alors qu'un temps de retour sur investissement est acceptable s'il est inférieur à 10 ans (valeur qui revient dans la plupart des projets relevant du secteur de l'énergie).

Annexe 2

Glossaire

Terme	Description
Aquifère	<p>Aquifère : Formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable, constituée de roches perméables et capable de la restituer naturellement et/ou par exploitation. On distingue :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 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) : dans une 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.
Champ de sondes géothermiques	Installation sous-sol comportant plusieurs sondes géothermiques verticales. Celles-ci doivent être suffisamment espacées les unes des autres pour éviter des interférences thermiques entre les sondes pouvant nuire à leur bon fonctionnement (risque de gel des terrains)
COP	<p>Coefficient de performance. Le COP machine est égal au rapport entre la puissance thermique restituée au condenseur et la puissance consommée (puissance électrique pour les systèmes les plus courants) Le COP annuel est égal au rapport entre l'énergie thermique livrée (restituée au condenseur) et l'énergie consommée (consommation électrique en général)</p>
Doublet	Ensemble de deux forages géothermiques, l'un assigné à la production, l'autre à la réinjection dans l'aquifère d'origine, afin de préserver l'équilibre hydraulique.
Geo-cooling	<p>Ou Free-Cooling ou Rafraîchissement direct Dans le cas d'utilisation de système géothermiques, il s'agit d'utiliser la capacité de refroidissement sans utiliser de PAC.</p>
Gradient géothermique	Élévation de la température du sol avec la profondeur. Près de la surface terrestre, il est en moyenne de l'ordre de 3 C/100 m.
Sonde géothermique verticale	Une sonde géothermique est constituée par un forage équipé pour fonctionner comme un échangeur de chaleur. Une boucle en polyéthylène, dans laquelle circule en circuit fermé un fluide caloporteur (généralement de l'eau additionnée de glycol). La profondeur d'une sonde est de quelques dizaines de mètres (typiquement 100 m) mais peut techniquement atteindre 200 m, voire 300 m
EnR	Énergie(s) renouvelable(s)
EnR&R	quantité d'énergie renouvelable ou de récupération produite par rapport à la quantité totale d'énergie produite
Géothermie intermédiaire	Désigne généralement des opérations géothermiques autres qu'individuelles qui nécessitent, au moins pour les usages de chauffage, l'adjonction d'une pompe à chaleur (PAC)
Géothermie profonde	Désigne généralement des opérations géothermiques autres qu'individuelles qui sont destinées exclusivement aux usages de chauffage (dont ECS) par exploitation directe de la chaleur (sans adjonction d'une pompe à chaleur)
Géothermie superficielle	Désigne généralement des opérations géothermiques, individuelles ou collectives, qui atteignent des profondeurs situées à moins de 10 m ou 30 m. L'exploitation directe est alors envisager pour le rafraîchissement. Hors usages particuliers, la production de la chaleur nécessite une pompe à chaleur.

Terme	Description
Valeur résiduelle	La valeur résiduelle correspond à l'estimation de la valeur monétaire de l'investissement à la fin de la durée de calcul diminué de diverses dépenses (mensualités restantes, dépenses dues à la vente...).
Coûts de déconstruction	Les coûts de déconstruction sont constitués par les coûts de démolition/déconstruction et par les coûts de traitement des déchets. Les installations géothermiques profondes (au-delà d'une dizaine de mètres) ne sont pas démantelables. Des coûts pour l'abandon sont alors substitués.
Coût Global ou Coût Global de Possession	Le Coût Global de Possession (CGP) ou Coût du Cycle de Vie (CCV) est une approche technique utilisée pour estimer les coûts globaux liés au 'produit' acheté sur une durée donnée d'utilisation. Elle prend en considération non seulement les coûts de l'achat du produit, mais aussi les coûts de son utilisation, de son entretien, de sa mise à disposition et de sa fin de vie. Ce procédé est également souvent dénommé Coût de Cycle de Vie (CCV, LCC en anglais).
Gros entretien et renouvellement	Le GER désigne le plan établi par l'opérateur pour effectuer le gros entretien-renouvellement de l'ouvrage et de ses équipements principaux. Ce plan (souvent quinquennal) est revu périodiquement en fonction de l'état de l'ouvrage. Le plan de GER peut être financé de différentes façons : provision, dette...).
Indexation	revalorisation (annuelle le plus souvent) du montant d'une prestation ou d'une charge, initialement calculée à une date donnée, en fonction de l'évolution subséquente d'un indice
Degrés Jours Unifiés DJU	Il s'agit d'un intermédiaire de calcul usuel chez les thermiciens. Pour chaque jour de la période de considérée (par exemple 232 jours de chauffage), on calcule la différence entre 18 °C et la température extérieure moyenne du jour ; 18 °C correspondant à une température de consigne elle-même représentative d'une température de confort. Le cumul des valeurs obtenues donne le nombre de DJU de chauffage. Selon la finalité, le calcul des DJU peut être affiné ou étendu. Par exemple, on peut définir les DJU pour la climatisation (souvent référencé à 10 °C – température extérieure à laquelle des locaux tertiaires mettent la climatisation en marche). On peut également définir des DJU pour le rafraîchissement des locaux d'habitation avec une température de référence qui peut, selon les approches et la réglementation aller de 18 °C à 26 °C (température de confort).
Énergie utile	Énergie dont dispose réellement le consommateur final après la dernière conversion par ses propres appareils pour satisfaire ses besoins de chaleur ou de force. Dans le cas de l'énergie thermique, cela correspond à la demande.
Énergie finale	Énergie fournie / livrée aux consommateurs pour être convertie en énergie utile. En raison des pertes, l'énergie finale est inférieure aux énergies primaires à partir desquelles elle est produite.
Énergie primaire	L'énergie primaire correspond à l'énergie des produits énergétiques bruts pour les formes non renouvelables : charbon, pétrole, gaz naturel, uranium, pour les formes qui ne sont pas renouvelables et à l'énergie fournie par la nature pour les formes renouvelables : hydraulique, solaire, éolienne, biomasse, géothermie, marémotrice. Certains bois et les déchets peuvent être considérés différemment selon les pays.

ACRONYMES

Terme	Description
NASA	National Aeronautics and Space Administration
REEEP	Renewable Energy & Energy Efficiency Partnership
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement En Anglais UNEP : - United Nations Environment Programme
FEM	Fonds pour l'environnement mondial En Anglais : GEF - Global Environment Facility
TES	Thermal Energy Storage
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage
BTES	Borehole Thermal Energy Storage (champ de sondes)
EER	Energy Efficiency Ratio (Coefficient d'Efficacité Énergétique) ou COP en mode froid
ECS	Eau Chaude Sanitaire
PAC	Pompe A Chaleur
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
TEP	tonne équivalent pétrole = 11,63 MWh
DJU	Degrés Jours Unifiés

Annexe 3

Stations géo-climatiques modélisées

La base de données géo-climatiques implémentée dans le modèle EXCEL de la présente étude comporte les 154 stations suivantes, certaines étant situées hors territoire métropolitain :

Abbeville (80)	Cap-Pomegues (13)	Le-Puy (43)	Pertusato (20)
Agen (47)	Cap-Sagro (20)	Le-Talut (56)	Pointe-Du-Raz (29)
Ajaccio (20)	Carcassonne (11)	Lille (59)	Poitiers (86)
Albi (81)	Carpentras (84)	Limoges (87)	Pau (64)
Alencon (61)	Cazaux (33)	Lons-Le-Saunier (39)	Porquerolles (83)
Alfred-Faure (Ant.)	Chambery (73)	Lorient (56)	Port-En-Bessin (14)
Amberieu (01)	Charles-De-Gaulle (95)	Luxeuil (70)	Port-Aux-Francais (Kerg.)
Angers (49)	Charleville (08)	Lyon-Bron (69)	La-Hague (50)
Angouleme (19)	Chartres (28)	Lyon-Satolas (69)	Quimper (29)
Arras (62)	Chassiron (17)	Macon (71)	Reims (51)
Auch (32)	Chateauroux (36)	Marennes (17)	Rennes (35)
Aurillac (15)	Chaumont (52)	Marseille (13)	Rouen (76)
Auxerre (89)	Cherbourg (50)	Martin-De-Vivies (Ant.)	Saint-Sauveur (85)
Bale (68)	Clermont (63)	Melun (77)	Saint-Yan (71)
Bastia (20)	Cognac (16)	Metz (57)	Saint-Brieuc (22)
Beaune (21)	Colmar (68)	Millau (12)	Saint-Nazaire (44)
Beauvais (60)	Dieppe (76)	Mont-De-Marsan (40)	Sens (89)
Belfort (90)	Dijon (21)	Montelimar (26)	Sete (34)
Bergerac (24)	Dinard (35)	Montlucon (03)	Socoa (64)
Besancon (25)	Dunkerque (59)	Mont-Aigoual (30)	Solenzara (20)
Biarritz (64)	Embrun (05)	Nancy (54)	St.Dizier (52)
Biscarosse (40)	Evreux (27)	Nancy-Ochey (54)	St.Girons (09)
Bordeaux (33)	Figari (20)	Nantes (44)	St.Quentin (02)
Boulogne-Sur-Mer (62)	Frejorgues (34)	Nevers (58)	St-Auban (04)
Bourg-en-Bresse (01)	Gourdon (46)	Nice (06)	St-Etienne (42)
Bourges (18)	Grenoble (38)	Nimes (30)	Strasbourg (67)
Bourg-St.Maurice (73)	Grouin-De-Cancale (35)	Nimes-Garons (30)	Tarbes (65)
Brehat (22)	Hyeres (83)	Niort (79)	Toulon (83)
Brest (29)	Ile-Rousse (20)	Noirmoutier (85)	Toulon-Levant (83)
Brignogan (29)	Istres (13)	Odeillo (66)	Toulouse (31)
Brive (19)	La-Chiappa (20)	Orange (84)	Tours (37)
Caen (14)	La-Roche (85)	Orleans (45)	Trappes (78)
Calvi (20)	La-Rochelle (17)	Ouessant (29)	Troyes (10)
Cap-Ferret (33)	Langres (52)	Paris-St-Maur (94)	Ussel (19)
Cap-Bear (66)	Lannion (22)	Paris-Le-Bourget (93)	Vannes (56)
Cap-Cepet (83)	Laval (53)	Paris-Orly (94)	Vichy (03)
Cap-Corse (20)	Le-Havre (76)	Paris-Montsouris (75)	Villacoublay (78)
Cap-Couronne (13)	Le-Luc (83)	Penmarch (29)	
Cap-Ferrat (06)	Le-Mans (72)	Perpignan (66)	

Annexe 4

Grandeurs indicatives pour les sols

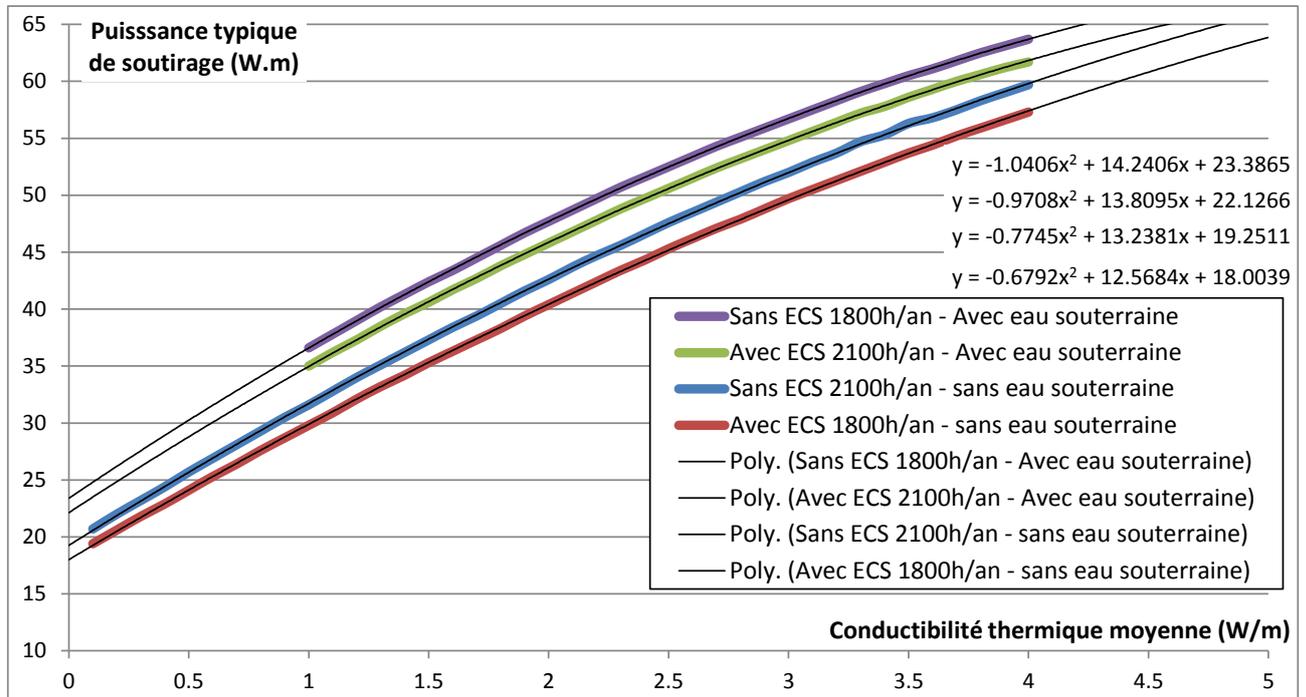


Figure 55 : Puissances thermiques de soutirage en fonction de la conductivité thermique du terrain, ECS = eau chaude sanitaire (selon B. Sanner, 1999).

SOUS-SOL	Conductivité thermique		Puissance indicative d'extraction		Longueur indicative de sonde (en m) par kW de puissance thermique			
	(W/m K)		(W/m)		COP = 3		COP = 3.5	
	mini	maxi	mini	maxi	mini	maxi	mini	maxi
Roches indurées à conductivité 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, aquifère	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	2.89		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	3.40		70		9.5	12	10	13

Tableau 46 : Valeurs empiriques pour le « dimensionnement sommaire » d'une installation de sonde géothermique dans différentes roches (source CREGE, Suisse).

	Porosité	Perméabilité	Conductivité thermique		Capacité calorifiques volumique	
	P	K _D	W/m.K		MJ/m ³ .K	
	[% vol]	[ms ⁻¹]	Sec	Saturé	Sec	Saturé
Roches meubles						
Argile	50 – 70	10-8 – 10-10	0,2 – 0,3	1,2 – 1,6	0,3 – 0,6	2,1 – 3,2
Limon	30 – 50	10-5 – 10-8	0,2 – 0,3	1,4 – 2,5	0,6 – 1,0	2,1 – 2,4
Sable	20 – 30	10-3 – 10-4	0,3 – 0,4	2,0 – 3,2	1,0 – 1,3	2,2 – 2,4
Gravier	10 – 25	10-1 – 10-3	0,3 – 0,4	2,5 – 3,3	1,2 – 1,6	2,2 – 2,4
Calcaire	0,5 – 5	10-6 – 10-7	2,8 – 3,3	2,8 – 3,3	2,2 – 2,4	2,2 – 2,4
Marne	20 – 40	10-7 – 10-9	1,5 – 1,8	2,3 – 2,9	1,0 – 1,5	2,0 – 2,5
Grès (molasse)	5 – 20	10-4 – 10-6	1,8 – 3,5	2,3 – 4,0	1,8 – 2,4	2,3 – 2,6
Dolomie	0,5 – 5	10-6 – 10-7	2,8 – 3,8	3,5 – 4,5	2,6 – 2,8	2,7 – 3,0
Roches Cohérentes						
Granit	0,2 – 2	10-7 – 10-8	2,6 – 3,8	2,7 – 3,8	2,3 – 2,5	2,3 – 2,5
Gneiss	0,2 – 4	10-7 – 10-8	2,4 – 3,3	2,5 – 3,5	2,3 – 2,5	2,3 – 2,5
Schiste	0,5 – 1	10-8 – 10-9	1,4 – 2,5	1,4 – 2,6	2,3 – 2,5	2,3 – 2,5
Conglomérat	2 – 15	10-5 – 10-6	1,5 – 2,0	2,9 – 3,3	1,7 – 2,2	2,2 – 2,6

Tableau 47 : Paramètres des sols selon les directives SIA D025 et DO136 (inspirées de la VDI Richlinien 4640, part 2, 2001).

	masse volumique (ρ)	chaleur spécifique (c _p)	conductivité-thermique (λ)	diffusivité-thermique (a)
	en 10 ⁻³ kg/m ³	en kJ/(kg.K)	en W/(m.K)	en m ² /s
Asphalte	2,1200	0,92	0,700	3.58901E-07
Béton	2,4000	0,88	2,100	9.94318E-07
Glace (0 °C)	0,9170	2,04	2,250	1.20277E-06
Humus (grossier)	2,0400	1,84	0,520	1.38534E-07
Sol sableux (sec)	1,6500	0,80	0,270	2.04545E-07
Sol sableux (humide)	1,7500	1,00	0,580	3.31429E-07
Argile	1,4500	0,88	1,280	1.00313E-06
Gypse	2,3000	1,09	0,510	2.03430E-07
Granit	2,7500	0,89	2,900	1.18488E-06
Liège (matériau)	0,1900	1,88	0,041	1.14782E-07
Marbre	2,6000	0,80	2,800	1.34615E-06
Calcaire dur	2,4500	0,88	2,400	1.11065E-06
Calcaire tendre	1,6500	0,88	1,000	6.89489E-07
Air	0,0013	1,01	0,026	1.98020E-05

Tableau 48 : Paramètres thermiques des matériaux (compilation).



Centre scientifique et technique
Département géothermie
3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34