

Etude d'opportunité de production couplée de géothermie et d'eau potable pour le quartier de Saint- Christol à Pézenas

Rapport final

BRGM/RP-67583-FR

Janvier 2018



Etude d'opportunité de production couplée de géothermie et d'eau potable pour le quartier de Saint- Christol à Pézenas

Rapport final

BRGM/RP-67583-FR

Janvier 2018

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

C. Maragna

Avec la collaboration de

L. André

Vérificateur :

Nom : Mikael PHILIPPE

Fonction : Responsable scientifique
du programme « Centre technique
Géothermie et Bâtiment »

Date : 05/02/2018

Signature :



Approbateur :

Nom : Ariane BLUM

Fonction : Directrice BRGM Occitanie

Date : 05/02/2018

Signature :



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

Mots-clés : Géothermie – Chauffage - Eau chaude sanitaire – Eau potable – Economie - Réglementation

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

Maragna C. – Andre L. (2018) – Etude d'opportunité de production couplée de géothermie et d'eau potable pour le quartier de Saint-Christol à Pézenas. Rapport final. BRGM/RP-67583-FR, 41 p., 32 fig., 10 tabl.

© BRGM, 2018, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La Ville de Pézenas souhaite aménager le quartier de Saint-Christol pour y construire, de manière prévisionnelle, 57 000 m² de bâtiment. La Ville a missionné le BRGM pour étudier l'opportunité technique et économique de l'utilisation d'une ressource géothermale pour couvrir les besoins en énergie thermique de ce quartier. Cette ressource, située à environ 1 000m de profondeur, a été qualifiée sur le territoire de la ville par l'expertise d'un forage profond (pz2), actuellement exploité à faible débit. La ressource géothermale pourrait, après refroidissement, rejoindre le réseau d'alimentation en eau potable. Sa température et son débit sont estimés à 37 °C et 200 m³.h⁻¹ respectivement.

Le BRGM propose un réseau de chaleur équipé de deux pompes à chaleur pour la valorisation de la ressource géothermale afin de produire simultanément eau chaude sanitaire (ECS), chauffage et eau potable. Pour 57 000 m² construits, les besoins en chauffage et eau chaude sanitaire sont estimés à 1 577 MWh.an⁻¹, fournis via un réseau long de 3,1 km, soit une énergie livrée de 0,5 MWh.an⁻¹.ml⁻¹. Dans les calculs réalisés, la température de retour du réseau est fixée à 30 °C, ce qui implique l'utilisation d'émetteurs à basse température dans les surfaces desservies par le réseau. Le contenu carbone de l'énergie livrée s'établirait aux alentours de 50 kgCo2eq.MWh⁻¹ avec prise en compte des matériaux immobilisés dans la boucle et de l'électricité consommée, soit bien moins que si la chaleur était produite par des chaudières gaz (de l'ordre de 240 kgCo2eq.MWh⁻¹).

Les besoins en eau potable de la Pézenas sont estimés en moyenne annuelle à 128 m³.h⁻¹. Pour une installation disposant de simples échangeurs de chaleur (sans aéroréfrigérants), de l'ordre de 6 % de cette demande peut être couverte par le refroidissement de l'eau géothermale pour l'alimentation du réseau de chauffage et ECS projeté à Saint-Christol. Une production accrue d'eau potable par le forage géothermique nécessite la mise en place d'aéroréfrigérants, 2 aéroréfrigérants d'une puissance nominale de 850 kW permettront de couvrir 95 % de la consommation en eau potable. L'ajout de 2 000 m² de panneaux solaires (surface optimale) permet de légèrement diminuer les consommations électriques et ainsi de minimiser le coût complet calculé sur 20 ans (durée retenue par l'ADEME pour les instructions de dossier Fonds Chaleur) du projet 7,8 M€, composé à 52 % d'investissement (hypothèses suivantes d'évolution des variables macro-économiques : inflation : +1,37 %/an, actualisation : +4,17 %/an, électricité : +3 %/an).

A l'horizon de 20 ans, plusieurs scénarios d'investissements et de fonctionnement ont été étudiés. Pour l'hypothèse de production et de vente de chaleur (chauffage + ECS + Eau potable), avec mise en œuvre de 2 aéroréfrigérants et de panneaux photovoltaïques, on peut établir que **les couples de recettes (valeurs de prix de vente de l'eau potable produite par le forage et de prix de vente de la chaleur) s'équilibrent avec le coût complet**. Il convient de noter que, sous l'hypothèse de 57 000 m² bâtis, **pour ramener le prix de vente de la chaleur aux alentours de 60 € HT/MWh, ce qui constitue une valeur représentative des réseaux de chaleur alimentés par des ENR&R, l'eau potable extraite du forage doit être facturée à 0,37 € HT.m⁻³**. Sachant que le prix de vente moyen du m³ d'eau potable s'établit à 2 € HT/m³, le projet présente un intérêt certain.

Sommaire

1. Problématique	9
2. Solution proposée	11
3. Données	13
3.1. ESTIMATION DE LA RESSOURCE GEOTHERMALE	13
3.2. ESTIMATION DES BESOINS	13
3.2.1. Chauffage, rafraîchissement et eau chaude sanitaire (quartier Saint-Christol)	14
3.2.2. Eau potable (ville de Pézenas).....	16
3.3. PRE-DIMENSIONNEMENT DU RESEAU DE CHALEUR	18
3.3.1. Tracé	18
3.3.2. Equipement du forage	19
3.3.3. Production et distribution de l'énergie thermique	20
3.3.4. Aéroréfrigérants.....	23
3.3.5. Panneaux solaires photovoltaïques.....	24
3.4. CONTRAINTES REGLEMENTAIRES	24
3.4.1. Production d'eau potable.....	24
3.4.2. Géothermie.....	24
3.5. ESTIMATION DES COUTS.....	24
3.5.1. Investissement (P4).....	24
3.5.2. Entretien (P2 et P3).....	25
3.5.3. Energie (P1)	25
3.5.4. Evolution des paramètres macro-économiques	26
3.5.5. Indicateur économique	26
3.6. CONTENUS CARBONE DE L'ENERGIE DISTRIBUEE	27
3.7. EVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU PRELEVEE	27
4. Modélisation du système	29
5. Etude des différentes variantes	31
5.1.1. Exploitation géothermique sans aéroréfrigérant, sans PV	31
5.1.2. Exploitation géothermique avec aéroréfrigérant, sans PV	32
5.1.3. Influence de la densité de bâtiment, sans PV	34
5.1.4. Exploitation géothermique avec aéroréfrigérant et avec PV	36

6. Conclusions	39
6.1. CONSIDERATIONS ECONOMIQUES.....	39
6.2. SCENARIO DE REFERENCE	39
7. Eléments de bibliographie	41

Liste des figures :

Figure 1 : Solution proposée	11
Figure 2 : Logement (gauche) et bureau (droite) modélisés par POLITO dans le cadre du projet Interreg Espace Alpin GRETA	14
Figure 3 : Estimation de la puissance nécessaire à la production d'ECS à partir d'eau du réseau d'eau, à la température représentée en figure de droite.....	16
Figure 4 : Quartier Saint-Christol : Evolution sur un an des puissances de chauffage et de rafraîchissement et d'eau chaude sanitaire (gauche). Relation entre taux de couverture en énergie et en puissance (droite).	16
Figure 5 : Production d'eau potable de Pézenas.	17
Figure 6 : Prélèvement hebdomadaire pour alimentation du réseau EP. Données de 2016. Semaine 1 = 1 ^{ère} semaine de janvier.	17
Figure 7 : Débit mesuré au compteur Voltaire (gauche). Modulation horaire du débit hebdomadaire.	18
Figure 8 : Estimation de la consommation annuelle en eau potable de Pézenas au pas de temps horaire. Gauche : t = 0 correspond au 1 ^{er} janvier. Droite : Courbe monotone (consommation classée par valeurs décroissantes).....	18
Figure 9 : Tracé du réseau de chaleur	19
Figure 10 : Estimation de la consommation électrique de la pompe.	19
Figure 11 : Production et distribution de chauffage.....	20
Figure 12 : Coefficient de performance en chauffage, incluant consommation des circulateurs et du compresseur de la pompe à chaleur, calculé pour la puissance maximale en chauffage (P = 1,46 MW)	21
Figure 13 : Débit d'eau potable produit par la PAC 2 (chauffage) pour la puissance appelée maximale (P = 1,46 MW)	21
Figure 14 : Production et distribution d'ECS	22
Figure 15 : Coefficient de performance de la production d'ECS, incluant consommation des circulateurs et du compresseur de la pompe à chaleur, calculé pour la puissance maximale de production d'ECS.....	22
Figure 16 : Débit d'eau potable produit par la PAC produisant l'ECS.....	23
Figure 17 : Aéroréfrigérant CIAT VEXTRA	23
Figure 18 : Influence des diamètres de conduite (boucle ECS et boucle chauffage) sur les indicateur-clés énergétiques.	31
Figure 19 : Influence des diamètres de conduite (boucle ECS et boucle chauffage) sur les indicateur-clés.	32
Figure 20 : Influence des diamètres de conduite (boucle ECS et boucle chauffage) sur les indicateur-clés énergétiques.	33

Figure 21 : Répartition des coûts (SANS aéroréfrigérant)	33
Figure 22 : Répartition des coûts (avec 2 aéroréfrigérants).....	34
Figure 23 : Sensibilité du coût aux paramètres macro-économiques (actualisation et évolution du cout de l'électricité) sans aéroréfrigérant (à gauche) et avec deux aéroréfrigérants (à droite).	34
Figure 24 : Influence de la surface construite sur les indicateur-clés énergétiques (sans aéroréfrigérant)	35
Figure 25 : Influence de la surface construite sur les indicateur-clés	35
Figure 26 : Répartition de la consommation électrique en fonction du nombre d'aéroréfrigérants et de la surface construite.	36
Figure 27 : Influence de la surface de panneaux PV sur les indicateur-clés. Surface construite = 57 000 m ²	36
Figure 28 : Répartition des coûts avec 2 aéroréfrigérants et 2 000 m ² de panneaux PV	37
Figure 29 : Influence de la surface de panneaux PV sur les indicateur-clés. S construite = 57 000 m ²	37
Figure 30 : Influence de la surface de panneaux construite sur les indicateur-clés. Surface construite = 57 000 m ² . 2 aéroréfrigérants.....	38
Figure 31 : Influence de la surface de panneaux construite sur les indicateur-clés. Surface construite = 57 000 m ² . 2 aéroréfrigérants.....	38
Figure 32 : Prix de vente HT de la chaleur à l'année 1 en fonction du prix de vente HT de l'eau potable à l'année 1 pour 3 valeurs de surface batie.	39

Liste des tableaux

Tableau 1 : Notations et valeurs retenues par défaut.....	12
Tableau 2 : Logements mentionnés dans tableau de synthèse de la programmation	13
Tableau 3 : Commerces mentionnés dans tableau de synthèse de la programmation	13
Tableau 4 : Degré-jours chauffage et climaticien dans les 6 climats étudiés par POLITO.	14
Tableau 5 : Coefficients d'équivalence pour le calcul de l'ECS.....	15
Tableau 6 : Aide forfaitaire en fonction du diamètre nominal du réseau, prise égale au coût du mètre linéaire de réseau.	25
Tableau 7 : Relation utilisée pour les postes P2 (r22 - conduite et entretien courant) et P3 (r23 - gros entretien et renouvellement). r21 correspond au P1 (énergie) qui est évalué suivant la méthodologie donnée au paragraphe suivant.....	25
Tableau 8 : Evolution des paramètres macro-économiques.	26
Tableau 9 : Contenu carbone des matériaux du réseau.....	27
Tableau 10 : Répartition des coûts et recettes pour le scénario de référence.....	40

1. Problématique

La Ville de Pézenas souhaite aménager le quartier de Saint-Christol pour y construire, de manière prévisionnelle, 57 000 m² de bâtiment. La Ville souhaite étudier la faisabilité technique et économique de l'utilisation d'une ressource géothermale pour couvrir les besoins en énergie thermique de ce quartier.

La ressource géothermale est celle des calcaires jurassiques situé à environ 1000 m de profondeur, elle a été identifiée par un ancien forage pétrolier, situé à 1,5 km de distance, actuellement exploité, à faible débit, pour le chauffage d'une piscine. La température de l'eau est de 37 °C¹ et le débit exploitable est de l'ordre de 200 m³/h.

Outre l'exploitation géothermique de cette ressource, la Ville souhaite étudier la faisabilité technique et économique d'alimentation en eau potable (AEP) à l'aide de la ressource géothermale refroidie.

Le rapport est organisé comme suit : Une solution technique est proposée en section 2 pour la production d'eau chaude sanitaire, de chauffage et d'eau potable. Les données relatives à la ressource géothermique, aux besoins, au tracé du réseau et aux coûts sont exposées en section 3, ainsi que les contraintes réglementaires s'appliquant au projet. La modélisation du système est présentée en section 4. Les performances techniques (coefficient de performance), environnementales (tonnes équivalent CO₂ émises) et économiques (coût complet du projet sur 20 ans) sont étudiés en section 5 pour différentes variantes du système.

¹ La valeur de 37°C représente, à priori, la température de l'eau des calcaires jurassique vers 1000 m de profondeur. Le forage de Castillonne, situé à une dizaine de km à l'ouest de Pézenas, d'une profondeur de 1100 m n'a en réalité qu'une température de 26°C. Seul un forage de reconnaissance sur le secteur de Saint-Christol permettra de confirmer l'hypothèse de calcul de 37°C prise en compte pour la présente étude.

2. Solution proposée

Le système proposé permet de valoriser la ressource géothermale pour la production d'eau chaude sanitaire, de chauffage et d'eau potable (Figure 1 et Tableau 1). L'eau chaude sanitaire et le chauffage sont produits de manière centralisée et distribués aux bâtiments du quartier Saint-Christol via un réseau de chaleur. Le principe de fonctionnement du système est le suivant :

- la pompe à chaleur (PAC 1) produit de l'eau chaude sanitaire (ECS) en refroidissant une partie de l'eau géothermale pour la production d'eau potable. La boucle fonctionne en eau morte : au niveau du consommateur l'eau du réseau est réchauffée sans prélèvement d'eau sur la boucle. La température de retour de la boucle est fixée à 45 °C ;
- le chauffage est produit par un échangeur et une PAC (PAC 2). L'échangeur assure le préchauffage du retour de réseau de chauffage, tandis que la PAC refroidit le fluide géothermal à l'évaporateur, et réchauffe le départ du réseau de chauffage à une température optimale. Afin de minimiser la consommation électrique de la PAC, la température de retour de cette boucle est fixée à 30 °C. **Un point important est que cela implique l'utilisation d'émetteurs à basse température dans les logements** (par ex. planchers chauffants) ;
- en complément des PAC 1 et 2, un aéro-réfrigérant amène le fluide géothermal de 37 °C à 25 °C avant de l'injecter sur le réseau d'eau potable, tel qu'imposé par la réglementation (cf. section 3.4.1).

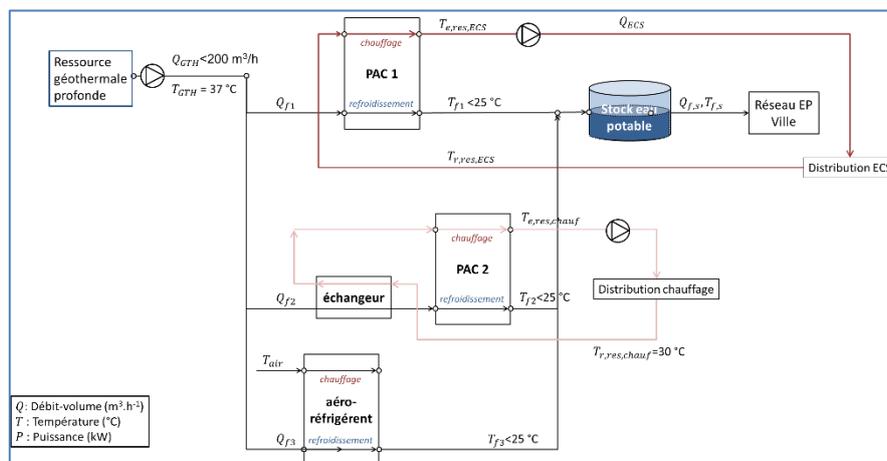


Figure 1 : Solution proposée

Grandeur	Symbole	Valeur par défaut
Débit géothermal maximal (extractible du puits)	Q_{GTH}	200 m ³ .h ⁻¹
Température géothermale, en sortie de puits	T_{GTH}	37 °C
Température maximale de production de l'EP	$T_{EP,max}$	25 °C
Température de retour du réseau de chaleur	$T_{r,res,chauff}$	30 °C
Température de retour du réseau d'ECS	$T_{r,res,ECS}$	45 °C
Débit géothermal refroidi par la PAC produisant l'ECS	$Q_{f,1}$	
Débit géothermal refroidi par la PAC alimentant le réseau de chaleur	$Q_{f,2}$	
Débit géothermal refroidi par l'aéroréfrigérant	$Q_{f,3}$	
Débit dans le réseau de chaleur	Q_{res}	
Débit dans le réseau ECS	Q_{ECS}	

Tableau 1 : Notations et valeurs retenues par défaut

3. Données

3.1. ESTIMATION DE LA RESSOURCE GEOTHERMALE

L'expertise² menée sur le forage profond existant (PZ2), dont la ressource en eau chaude à 37°C est utilisée pour le chauffage de la piscine, a permis de préciser que le gisement des calcaires jurassiques, situé à environ 1000 m de profondeur, peut être exploité à un débit égal à 200 m³/h, avec une température stable dans le temps de 37°C.

Les valeurs retenues pour la présente étude ont donc été : **un débit-volume géothermal $Q_{v,GTH,max} = 200 \text{ m}^3/\text{h}$ et une température en sortie de puits $T_{GTH} = 37 \text{ °C}$.**

Malgré tout, il convient de préciser que pour le lotissement St-Christol, le forage n'existe pas et que seul l'ouvrage à forer d'une profondeur de l'ordre de 800 à 1000 m permettra de confirmer³ les valeurs retenues de débit et de température.

3.2. ESTIMATION DES BESOINS

Les besoins de chauffage, rafraîchissement et eau chaude sanitaire ont été estimés sur la base du tableau de synthèse de la programmation en date du 24 mai 2017 communiqué par l'urbaniste mandataire ARGOS, indiquant 52 422 m² de logement et 4 593 m² de commerces en surface de plancher (cf. Tableau 2 et Tableau 3).

DESIGNATION	NOMBRE DE LOGEMENT	SURFACE DE PLANCHER (m ²)
Mas Nouveaux (5) RDC, R+1 , R+2	493	32 031
Centralité (R+1 & R+2)	70	4 566
Logement intermédiaire R+1 et R+2 (54%)	147	8 820
Collectif "geste architectural"	42	2 700
Maison Dune - Habitat individuel	35	4 305
TOTAL	787	52 422

Tableau 2 : Logements mentionnés dans tableau de synthèse de la programmation

DESIGNATION	SURFACE DE PLANCHER (m ²)
Commerces de proximité de la centralité et Artisanat d'art (RDC centralité)	2 283
Halle (RDC & R+1)	2 310
TOTAL	4 593

Tableau 3 : Commerces mentionnés dans tableau de synthèse de la programmation

² Rapport BRGM RP-63222-FR de février 2014

³ Le risque hydrogéologique existe pour tout forage. Le forage à réaliser devra préciser, au droit du site de Saint-Christol, les valeurs de débit et de température retenues pour la présente étude.

3.2.1. Chauffage, rafraîchissement et eau chaude sanitaire (quartier St-Christol)

Les caractéristiques architecturales et thermiques des logements et commerces prévus sur le quartier Saint-Christol ne sont pas encore définies, ce qui ne permet pas de modéliser finement les consommations énergétiques de chaque bâtiment.

Les besoins de chauffage et de rafraîchissement des logements et des commerces ont été estimés à partir des simulations thermiques dynamiques réalisées par l'Ecole Polytechnique de Turin (POLITO) pour des logements et des bâtiments tertiaires (bureaux) situés dans des climats différenciés⁴ (cf. Figure 2). Ces simulations se veulent réalistes car elles prennent en compte de nombreux paramètres (isolation différenciées des surfaces, taux d'occupation et température de consignes variables, etc.) et ont été choisies pour cette étude pour cette raison.

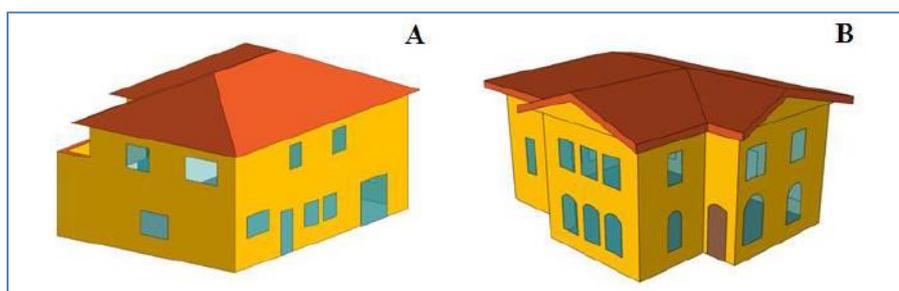


Figure 2 : Logement (gauche) et bureau (droite) modélisés par POLITO dans le cadre du projet Interreg Espace Alpin GRETA

POLITO a établi ces courbes de besoins pour 6 climats de l'espace alpin, qui sont classifiés suivant les valeurs des degrés jours chauffage et climaticien, estimés tous deux à la température de référence de 18 °C (cf. Tableau 4). En première approximation, les DJ chauffage et climaticien sont proportionnels respectivement aux besoins de chauffage et de climatisation.

Ville	Climat	Degrés jours chauffage (°C.j)	Degrés jours climaticien (°C.j)
Genoa (IT)	A	1375	558
Koper (SLO)	B	1995	504
Laigueglia (IT)	C	1459	419
Turin (IT)	D	2453	322
Graz (AU)	E	3528	27
Davos (CH)	F	5356	0

Tableau 4 : Degré-jours chauffage et climaticien dans les 6 climats étudiés par POLITO.

Les DJ chauffage et climaticien à Pézenas ont été calculés sur la base des fichiers de données météorologiques RT 2012 de la méthode de calcul Th-B-C-E 2012 approuvée par arrêté du 20 juillet 2011. Pézenas est situé dans la zone H₃ de la réglementation thermique où les DJ chauffage et climaticien à 18 °C valent respectivement 1420 °C.j et 685 °C.j.

La commune étant situé à moins de 200 m d'altitude, il n'y pas lieu de corriger ces valeurs par l'altitude. Dans la mesure où la solution étudiée produit de l'ECS, du chauffage mais pas de

⁴ http://www.alpine-space.eu/projects/greta/deliverables/d3.2.1_catalogue_operational_criteria.pdf

climatisation, le climat de Pézenas est assimilé à celui de Laigueglia, car il s'agit de la plus proche valeur de DJ chauffage. Les commerces sont assimilés aux bureaux modélisés par POLITICO.

Les besoins de chauffage sont estimés à 11,54 kWh/m² et 10,86 kWh/m² respectivement pour les logements et les bureaux. Les besoins de rafraîchissement sont estimés à 11,18 kWh/m² et 36,69 kWh/m² respectivement. Seuls les besoins en chauffage et en ECS seront couverts par le réseau de chaleur, dans la mesure où celui-ci est alimenté par une source à 37 °C, les besoins de rafraîchissement ne seront pas couverts par ce réseau.

La consommation d'eau chaude sanitaire pour les 787 logements a été estimée à partir d'une méthode développée par le COSTIC et l'ADEME. Cette méthode établit que, pour un logement de référence (un T3 du parc social), la consommation journalière moyenne d'ECS à la température d'utilisation $T_u = 40$ °C est de $Q_{ref} = 125$ l.j⁻¹. Des coefficients d'équivalence permettent de calculer le nombre de logements standards équivalent au parc réel en fonction du nombre de pièces par logements et du type de parc (cf. Tableau 5). Une fonction de correction horaire $f(t)$, prenant en compte les variabilités horaires, journalières et mensuelles, est ensuite appliquée. Cette fonction a été établie pour un immeuble de 269 logements, et prend en compte le foisonnement, c'est-à-dire la réduction des pics de consommation lorsqu'un grand nombre de consommateurs sont alimentés par un système de production centralisé.

Type de logement	Parc privé	Parc social
T1	0.6	0.6
T2	0.7	0.7
T3	0.9	1
T4	1.1	1.4
T5	1.3	1.8
T6 ou plus	1.4	1.9

Tableau 5 : Coefficients d'équivalence pour le calcul de l'ECS

A partir du tableau de synthèse de la programmation, on a estimé que les 35 logements individuels (maisons Dune) se répartissent équitablement entre T4 et T5, et entre parc privé et social, d'où un coefficient d'équivalence de 1,4. Les 752 logements restants sont assimilés à des T3 se répartissant équitablement entre parc privé et social, d'où un coefficient d'équivalence de 0,95. Le nombre de logements équivalents est alors $N_{eq} = 763,4$.

La puissance nécessaire en P_{ECS} en fonction du temps est alors calculé comme suit (cf. Figure 3) :

$$P_{ECS}(t) = f(t)N_{eq}Q_{ref}C_p(T_u(t) - T_f(t)) \quad (1)$$

Avec :

- $f(t)$: fonction de correction horaire,
- N_{eq} : nombre de logements équivalents,
- $Q_{ref} = 125$ l.j⁻¹ : consommation journalière moyenne d'ECS du logement de référence,
- T_u : la température d'utilisation de l'ECS (40 °C),
- T_f : la température d'eau froide du réseau d'eau, extrait des fichiers de la réglementation thermique RT2012 dans la zone H3 (cf. Figure 3 d),

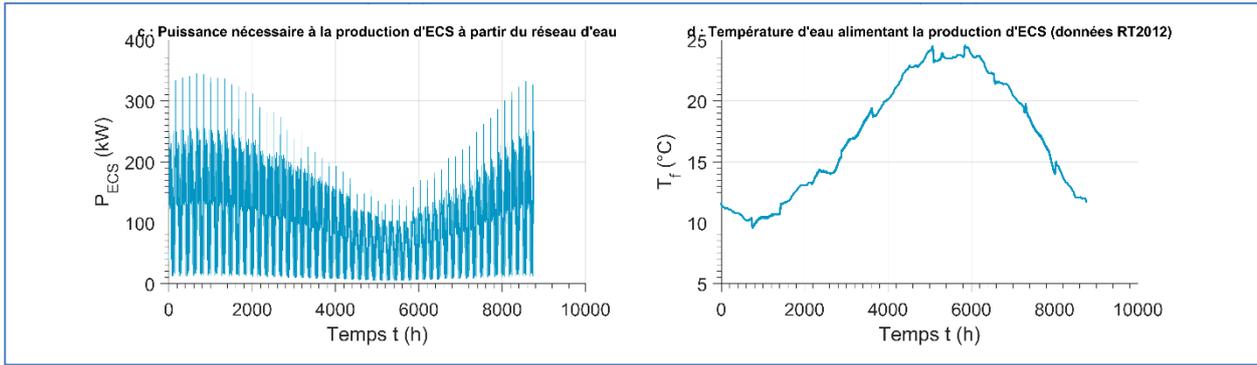


Figure 3 : Estimation de la puissance nécessaire à la production d'ECS à partir d'eau du réseau d'eau, à la température représentée en figure de droite.

Le besoin de chauffage se caractérise par de forts appels de puissance, et donc un temps équivalent de fonctionnement à pleine charge (ratio énergie / puissance de pointe) faible à respectivement à 500 h/an. Le temps équivalent pour l'ECS est bien plus élevé, à 2 669 h/an.

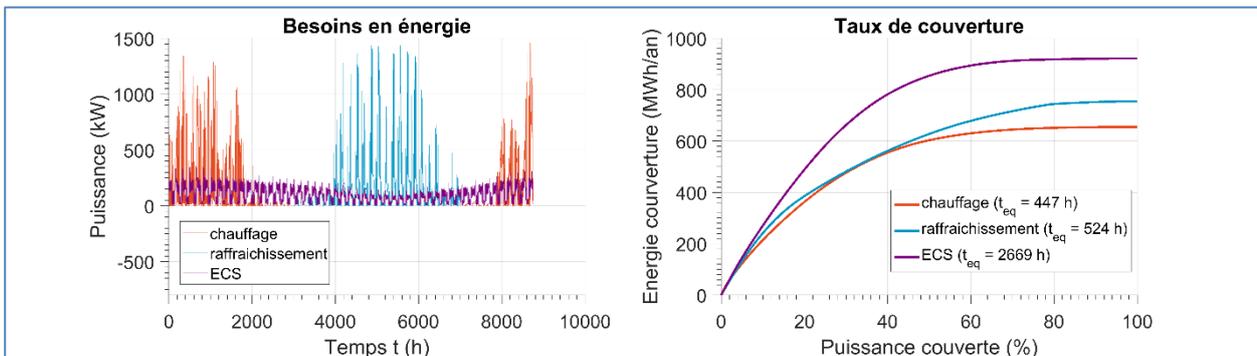


Figure 4 : Quartier Saint-Christol : Evolution sur un an des puissances de chauffage et de rafraîchissement et d'eau chaude sanitaire (gauche). Relation entre taux de couverture en énergie et puissance (droite).

En conclusion, sur le quartier de Saint Christol :

- les besoins de chauffage sont estimés à 655 MWh/an ;
- les besoins en eau chaude sanitaire (ECS) à 922 MWh/an.

3.2.2. Eau potable (ville de Pézenas)

Le réseau d'eau potable de la ville de Pézenas est alimenté par deux forages sur l'Hérault, qui alimentent un bassin de 2 700 m³ et un château d'eau de 1 000 m³, et quatre secteurs de distribution (Porte Faugères, Voltaire, Ville historique, Hameau de Conas).

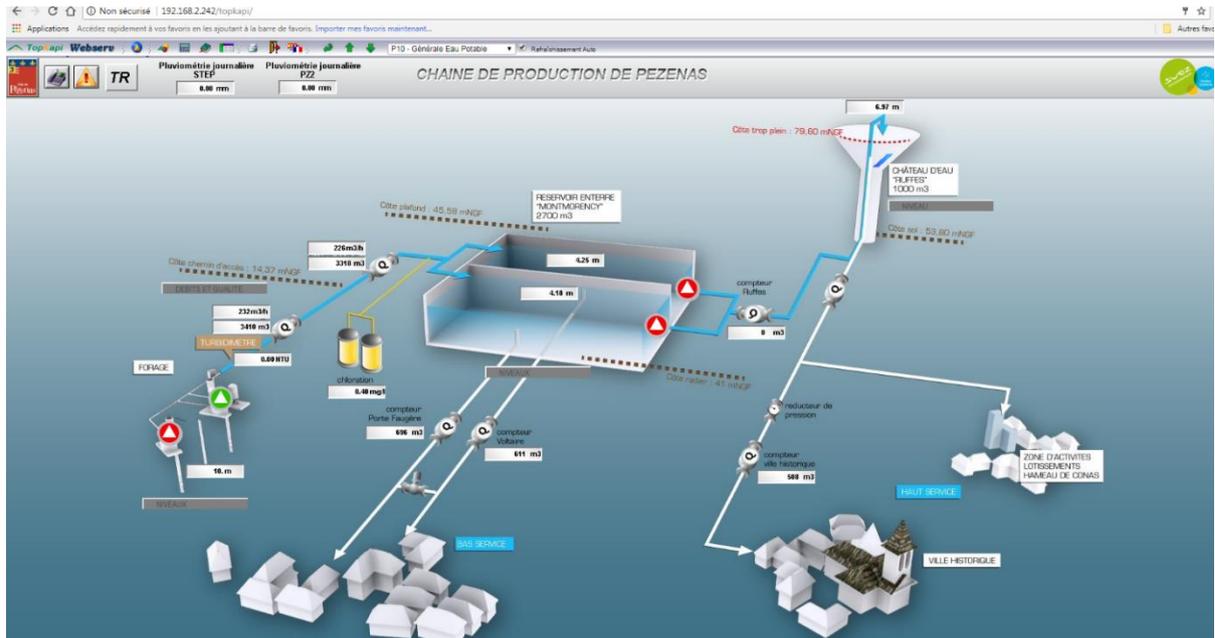


Figure 5 : Production d'eau potable de Pézenas.

Les données suivantes fournies par la Ville de Pézenas ont été exploitées :

- un bilan hebdomadaire de production et de consommation (cf. Figure 6) ;
- débits mesurés au compteur Ville historique du 30 août au 6 septembre 2017 et au compteur Voltaire du 25 mai au 06 septembre 2017 (cf. Figure 7 gauche).

Le débit extrait annuellement de l'Hérault pour l'alimentation du réseau d'eau potable (EP) est de 1 122 764 m³.an⁻¹, soit un **débit moyen prélevé de 128,1 m³.h⁻¹**, avec une légère augmentation de la consommation en été. Ni la consommation de l'ensemble de Pézenas, ni la production aux forages n'étaient disponibles au pas de temps horaire ou inférieur sur au moins une année. On a estimé cette chronique en déterminant une modulation horaire du débit hebdomadaire à partir d'une semaine de mesure au compteur Voltaire jugée représentative du 26 mai au 06 juin 2017 (cf. Figure 7 droite). La modulation obtenue est appliquée au débit prélevé mesuré hebdomadairement représenté en Figure 6 pour aboutir à une chronique au pas de temps horaire sur un an représentée en Figure 8. (moyenne de 128,1 m³.h⁻¹, minimum de 68,5 m³.h⁻¹, maximum de 264,0 m³.h⁻¹) .

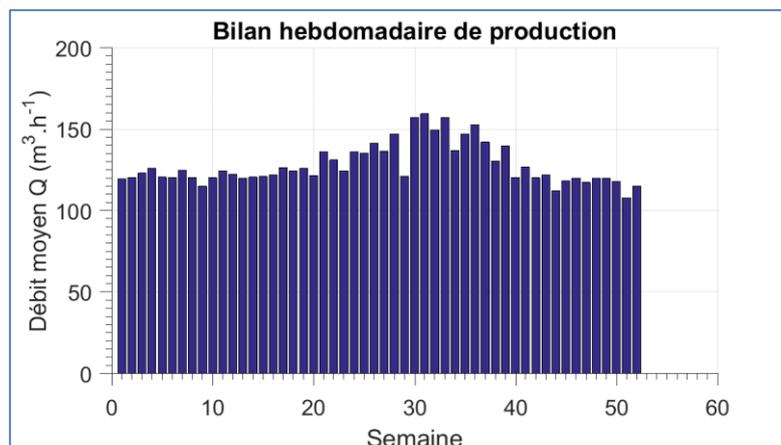


Figure 6 : Prélèvement hebdomadaire pour alimentation du réseau EP. Données de 2016. Semaine 1 = 1^{ère} semaine de janvier.

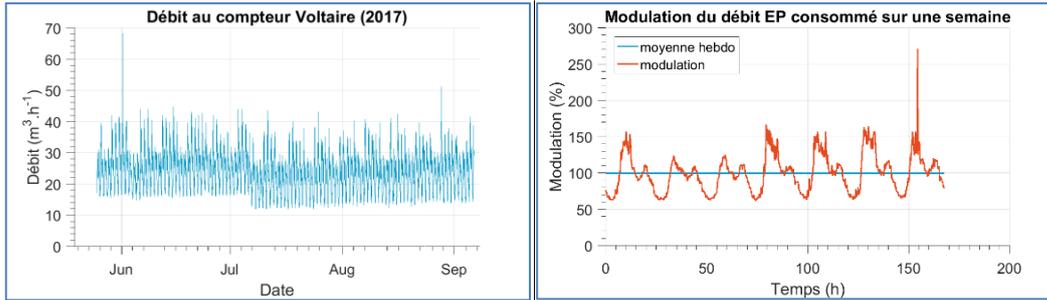


Figure 7 : Débit mesuré au compteur Voltaire (gauche). Modulation horaire du débit hebdomadaire.

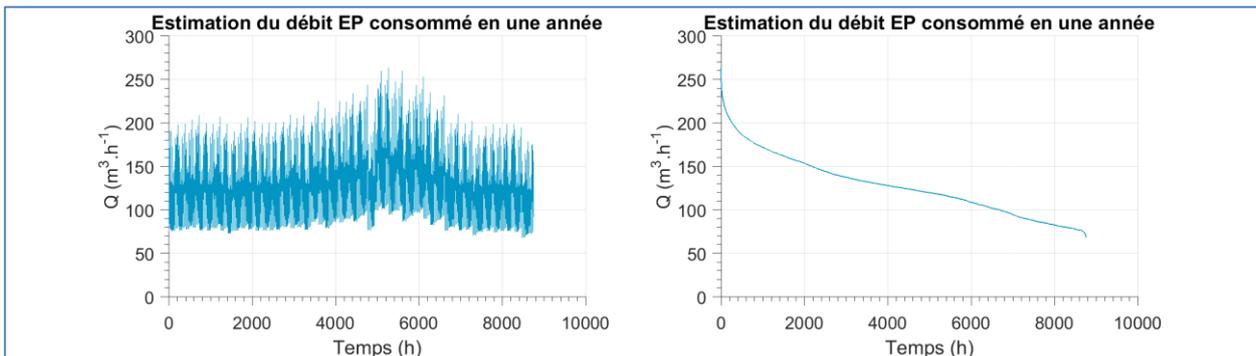


Figure 8 : Estimation de la consommation annuelle en eau potable de Pézenas au pas de temps horaire. Gauche : $t = 0$ correspond au 1^{er} janvier. Droite : Courbe monotone (consommation classée par valeurs décroissantes)

3.3. PRE-DIMENSIONNEMENT DU RESEAU DE CHALEUR

3.3.1. Tracé

L'urbaniste mandataire ARGOS nous a communiqué le plan du schéma directeur d'aménagement provisoire du Quartier Saint-Christol en date du 12 mai 2017, ce qui nous a permis de tracer un réseau de chaleur desservant l'ensemble des bâtiments mentionnés dans tableau de synthèse de la programmation. La longueur des tranchées est alors de 3 127 m (cf. Figure 9).

3.3.3. Production et distribution de l'énergie thermique

On a estimé le coefficient de performance (COP) en distribution de chauffage pour la puissance maximale appelée, soit le ratio entre l'énergie de chauffage livrée et consommations électriques de la PAC et du circulateur (cf. Figure 6).

Le fabricant de pompes à chaleur CIAT nous a indiqué que la température d'eau « glacée » (température de sortie de l'évaporateur) de ses machines était limitée à 17 °C, hypothèse que nous retenons pour la suite. L'eau potable produite par les pompes à chaleur est donc bien inférieur au seuil légal de 25 °C.

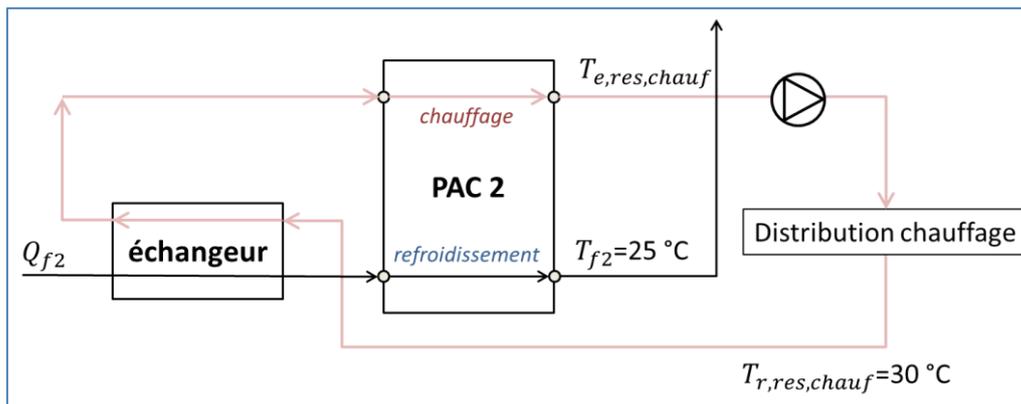


Figure 11 : Production et distribution de chauffage.

Trois paramètres affectent le COP chauffage :

- augmenter le diamètre des conduites d_{int} , réduit les pertes de charges et augmente le COP, bien que l'augmentation de la surface de contact avec le sol augmente les pertes thermiques du réseau ;
- l'épaisseur d'isolant autour des conduites e diminue les pertes thermiques du réseau ;
- l'écart de température entre l'entrée et la sortie du réseau ΔT_{chauff} : pour une puissance appelée donnée, augmenter l'écart de température diminue le débit, les pertes de charge et donc la consommation du circulateur, mais diminue la performance de la pompe à chaleur qui doit fonctionner avec une température de condensation plus élevée.

Suivant les configurations, le COP en chauffage varie entre 2 et 7 en fonction du diamètre de la conduite et de l'écart de températures (cf. Figure 12). On a intérêt à augmenter la température de condensation (de départ du réseau), ce qui dégrade un peu le COP de la PAC, mais diminue le débit et réduit les pertes de charge pour la même énergie livrée. Pour la puissance maximale appelée par le réseau de chaleur (1,46 MW) , le débit en eau potable est de l'ordre de 40 à 55 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ (cf. Figure 13).

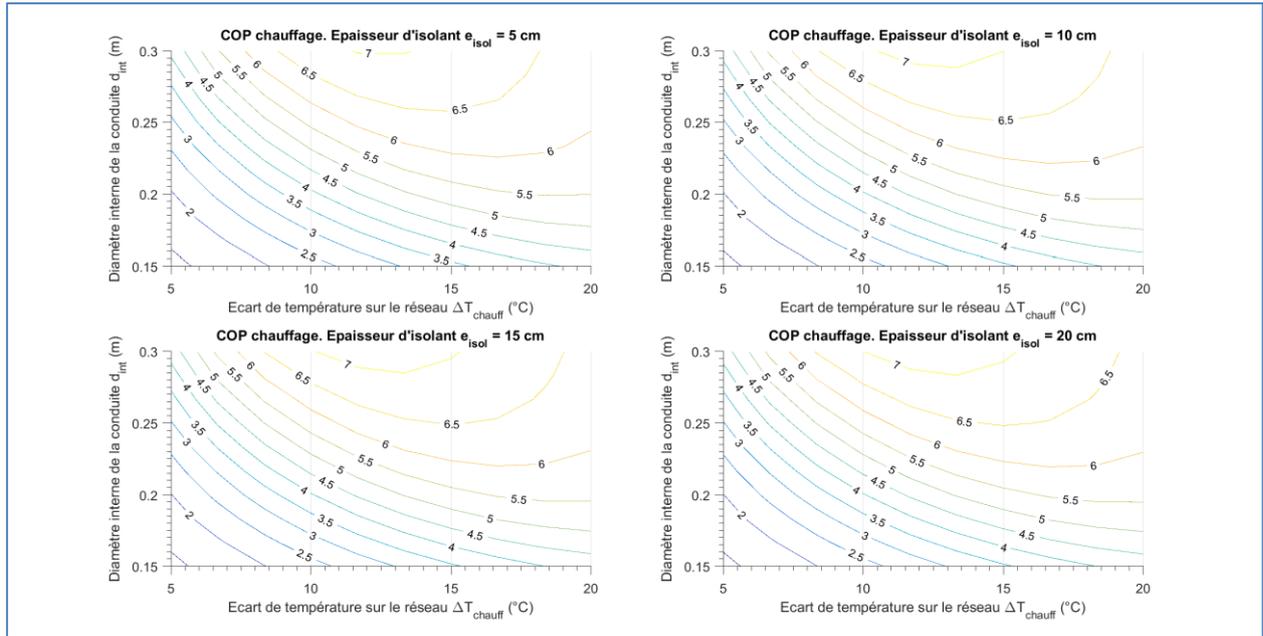


Figure 12 : Coefficient de performance en chauffage, incluant consommation des circulateurs et du compresseur de la pompe à chaleur, calculé pour la puissance maximale en chauffage ($P = 1,46 \text{ MW}$)

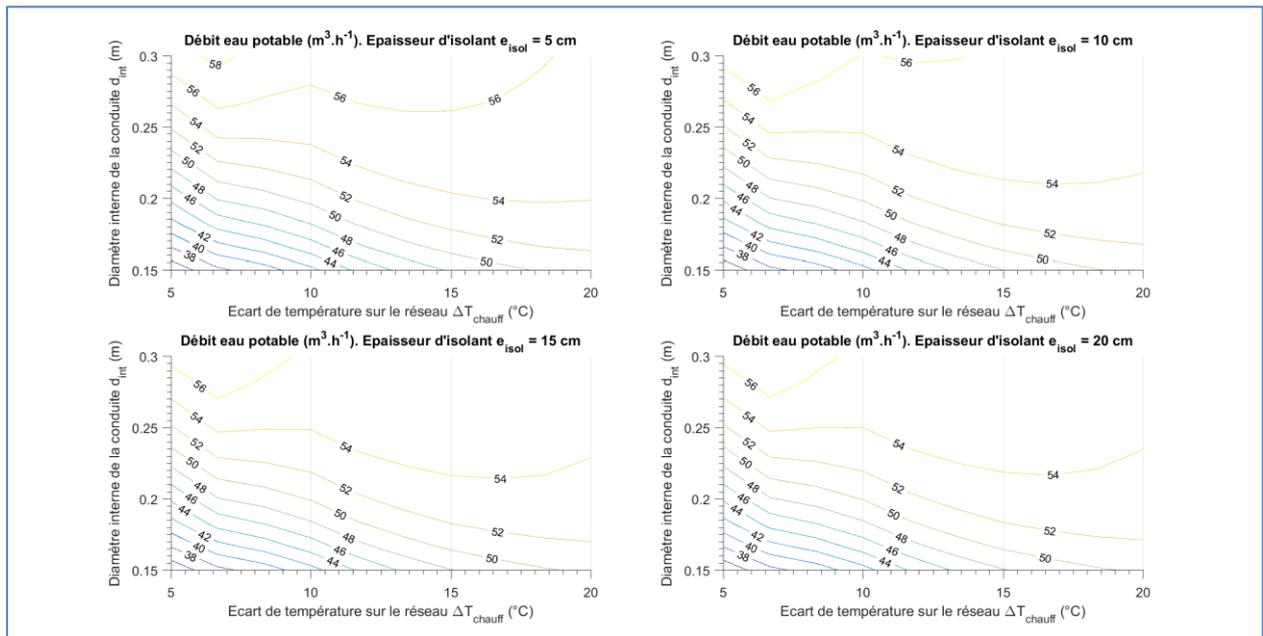


Figure 13 : Débit d'eau potable produit par la PAC 2 (chauffage) pour la puissance appelée maximale ($P = 1,46 \text{ MW}$)

Suivant les configurations, le COP en ECS varie entre 2 et 4 en fonction du diamètre de la conduite (cf. Figure 14 et Figure 15). Pour la puissance maximale appelée par le réseau de chaleur (1,46 MW), le débit en eau potable étant de l'ordre de $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (cf. Figure 16).

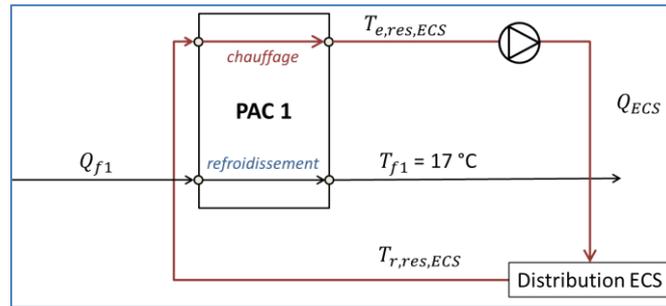


Figure 14 : Production et distribution d'ECS

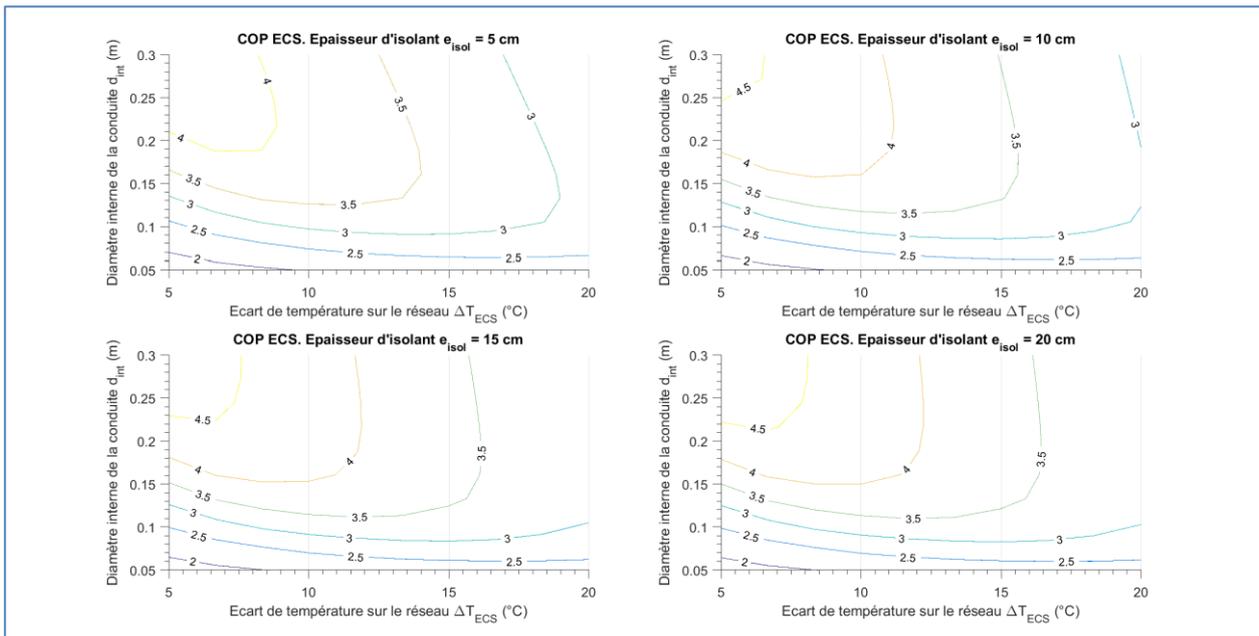


Figure 15 : Coefficient de performance de la production d'ECS, incluant consommation des circulateurs et du compresseur de la pompe à chaleur, calculé pour la puissance maximale de production d'ECS

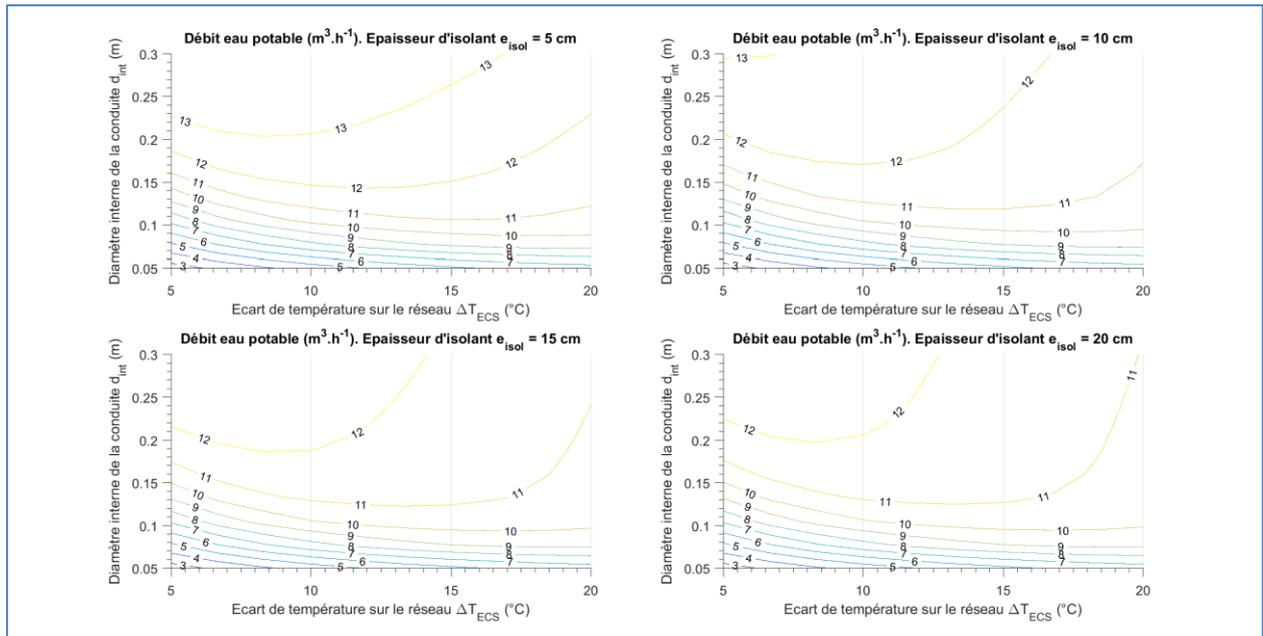


Figure 16 : Débit d'eau potable produit par la PAC produisant l'ECS

Aux puissances maximales appelées en chauffage et ECS, le débit d'eau potable produit (au maximum $\approx 65 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) reste inférieur au débit maximal estimé productible par le puits ($200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

3.3.4. Aéroréfrigérants

Contacté, le fabricant CIAT nous a proposé de disposer en parallèle plusieurs aéroréfrigérants référencés 1185 UI 900A8A 12A1 (cf. Figure 17). Chaque machine a une puissance thermique de 850 kW, ce qui correspond à un débit d'eau de $61,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à refroidir de 37 °C à 25 °C . Lorsque la température de l'air est supérieure à 23 °C , l'aéroréfrigérant brumise de l'eau, afin de profiter de la chaleur latente de vaporisation. Le débit d'eau à brumiser est de $1,30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ d'eau fraîche à prélever sur le réseau d'eau potable. Au-delà de 31 °C , l'aéroréfrigérant cesse de fonctionner. La consommation électrique de chaque machine se décompose en une consommation du moteur entraînant les pales (18 kW), la consommation de la pompe de circulation (estimée à 1,3 kW) et la consommation de la pompe de brumisation le cas échéant (5,7 kW).

A noter, le fabricant CIAT insiste sur la nécessité de disposer d'un dispositif de mise hors gel de l'aéroréfrigérant. Il peut s'agir d'une circulation d'eau prélevée sur le réseau EP.



Figure 17 : Aéroréfrigérant CIAT VEXTRA

3.3.5. Panneaux solaires photovoltaïques

On a aussi considéré l'ajout de panneaux solaires photovoltaïques (PV) dont la production fournira en direct l'électricité aux pompes, pompes à chaleur, circulateur, aérorefrigérants.

Les cellules PV sont en silicium monocristallin, ce qui permet d'obtenir des rendements de l'ordre de 13 à 15 % (on retient ici 13 %). La dégradation du rendement avec l'augmentation de la température de l'air est de $4.5 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (Skoplaki & Palyvos, 2009).

Les panneaux sont orientés plein sud et inclinés de 30 ° par rapport à l'horizontal, angle qui maximise la production solaire. A partir des fichiers RT2012 (zone H3) indiquant le rayonnement direct normal au rayonnement solaire et le rayonnement diffus et de l'azimut et l'élévation angulaire du soleil, est calculé à chaque heure de l'année le rayonnement incident sur le plan des panneaux. La production électrique est estimée à 225,7 kWh.m².an⁻¹.

3.4. CONTRAINTES REGLEMENTAIRES

3.4.1. Production d'eau potable

L'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique fixe les limites de qualité des eaux brutes de toute origine utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux de source conditionnées. La température limite est de 25 °C. **L'eau géothermale sera donc refroidie à 25 °C avant d'alimenter le stock d'eau potable** (températures de sortie d'évaporateur des 3 pompes à chaleur égales à 25 °C).

3.4.2. Géothermie

L'exploitation géothermique s'inscrit dans le cadre du code minier, en particulier le décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015. Dans la mesure où la profondeur du forage est supérieure à 200 m, et la température de la ressource inférieure à 150 °C, le projet est soumis à autorisation de recherches et permis d'exploitation. A noter que la demande d'autorisation de recherches ou de permis d'exploitation et la demande d'autorisation d'ouverture des travaux peuvent être présentées simultanément. Le préfet de département soumet la demande d'autorisation de recherches ou de permis d'exploitation à une enquête publique dans les conditions prévues respectivement par les articles L. 124-6 et L. 134-10 du code minier. Le préfet de département recueille l'avis des services déconcentrés intéressés, des services militaires, de l'agence régionale de santé, des conseils municipaux des communes intéressées. Il leur transmet à cet effet un exemplaire de la demande d'autorisation de recherches ou de permis d'exploitation dès la mise à l'enquête. L'avis est réputé favorable s'il n'a pas été émis dans le mois qui suit la réception de cet exemplaire.

3.5. ESTIMATION DES COUTS

3.5.1. Investissement (P4)

L'investissement se décompose comme suit :

- le coût du forage à 1000 m, incluant les travaux et la maîtrise d'ouvrage, est estimé à 1 M€ HT. Le coût de la station de pompage équipée a été estimé par la société CHEM INDUSTRIE à 373 k€ HT ;

- le coût des pompes à chaleur géothermique en chauffage a été estimé par le fabricant CIAT à 162 k€ ;
- le coût de chaque aéroréfrigérant est estimé par CIAT à 119 k€ ;
- le coût du réseau de chaleur est estimé sur la base du Fonds Chaleur de l'ADEME pour la création d'un réseau de chaleur de moins de 500 tep/an (= 5,8 GWh/an, le réseau distribuant 1,57 GWh/an d'ECS et chauffage) (cf. Tableau 6). Le réseau proposé comportant deux boucles (une pour le chauffage et une pour l'ECS), le coût est estimé sur la base sur d'un tube équivalent de même section que les deux tubes (chauffage et ECS) ;
- le coût du solaire PV est estimé à 1,8 € / W installé⁵, soit 246 €/m², les panneaux fournissant 137 W/m².

Type de réseau	Diamètre Nominal du réseau	Aide forfaitaire €/ml*
Basse pression (eau chaude)	DN 150 à DN 250	522
	DN 80 à DN125	382
	DN 65 et moins	331

Tableau 6 : Aide forfaitaire en fonction du diamètre nominal du réseau, prise égale au coût du mètre linéaire de réseau.

3.5.2. Entretien (P2 et P3)

On a estimé les postes de dépense P2 (r22 - conduite et entretien courant) et P3 (r23 - gros entretien et renouvellement) en se basant sur une évaluation des coûts d'exploitation des chaufferies biomasse conduite par l'ADEME en 2010 (ADEME, 2010) (projet PERDURANCE). Bien que cette étude ait été menée pour des chaufferies biomasse, elle permet d'avoir quelques ordres de grandeur de ces deux postes de dépenses (cf. Tableau 7).

Pbois référence (MW)	r21 (EUR HT / MWh utile)		r22 (EUR HT / MWh utile)		r23 (% vs. investissement : Production Chaleur + 40 % réseau)	
	Plage de variation	Valeur moyenne	Plage de variation	Valeur moyenne	Plage de variation	Valeur moyenne
1	2 à 4	2,75	14 à 21	14,7	0,1 à 2,0 %	1,0 %
2			9 à 16	11,7	0,3 à 2,0 %	1,2 %
4,5			9 à 13	11,1	0,6 à 1,9 %	1,3 %
10			10 à 12	10,6	0,9 à 1,7 %	1,3 %

Tableau 7 : Relation utilisée pour les postes P2 (r22 - conduite et entretien courant) et P3 (r23 - gros entretien et renouvellement). r21 correspond au P1 (énergie) qui est évalué suivant la méthodologie donnée au paragraphe suivant.

3.5.3. Energie (P1)

Coût de l'électricité

Il n'existe plus de tarif réglementé pour les gros consommateurs (>36kVA) (ce qui est le cas pour le réseau envisagé), qui sont nécessairement en offre de marché. Néanmoins, en l'absence de modèles de coût de l'électricité sur cette offre de marché, on a appliqué la grille tarifaire des tarifs

⁵ <http://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/reduire-impacts/produire-utiliser-energies-renouvelables/energies-renouvelables-electriques/dossier/production-deelectricite/solaire-photovoltaïque>

réglementés (Tarif Bleu) au 1er janvier 2015, en option base à 120,0 €HT/MWh. Le tarif du kWh d'électricité est constant quel que soit le jour ou l'heure de consommation.

On considère que la production solaire PV ne dégage pas de revenus lorsqu'elle excède la consommation.

3.5.4. Evolution des paramètres macro-économiques

L'évolution des paramètres macro-économiques retenue comme hypothèse de référence est résumée en Tableau 8. Ces hypothèses nous ont été communiquées par l'ADEME. L'augmentation du prix de l'électricité est estimée à 3%/an, valeur totalement arbitraire. L'influence de l'évolution des paramètres macro-économiques sur le coût complet de production de la chaleur fait l'objet d'une analyse de sensibilité.

Paramètre	Evolution
Taux actualisation	4,17 %.an ⁻¹
Inflation (P2 et P3)	1,37 %.an ⁻¹

Tableau 8 : Evolution des paramètres macro-économiques.

3.5.5. Indicateur économique

L'indicateur économique considéré est le coût complet de production de la chaleur sur 20 ans, où valeur actualisée nette (VAN) :

$$VAN = I + \sum_{n=1}^{20} C_n \left(\frac{1 + \alpha}{1 + a} \right)^n \quad (2)$$

Avec :

- I : investissement initial (€)
- C_n : coût de fonctionnement à l'année n (€)
- a : actualisation (%/an)
- α_i : augmentation du coût de fonctionnement (%an)

A titre indicatif, on donne aussi le coût du MWh produit, soit le ratio entre la VAN et l'énergie produite par le réseau.

On introduit aussi les prix de vente de la chaleur et de l'eau potable produites qui s'équilibrent avec la VAN :

$$\sum_{n=1}^{20} E_{th} p_{th} \left(\frac{1 + i}{1 + a} \right)^n + \sum_{n=1}^{20} V_{eau} p_{eau} \left(\frac{1 + i}{1 + a} \right)^n - VAN = 0 \quad (3)$$

Avec :

- E_{th} : quantité de chaleur vendue annuellement par le réseau (MWh.an⁻¹)
- p_{th} : prix de vente de la chaleur (€.MWh⁻¹)
- V_{eau} : volume d'eau vendu annuellement (m³.an⁻¹)
- p_{eau} : prix de vente de l'eau potable (€.m⁻³)
- i : l'inflation (%an)
- a : actualisation (%/an)

On suppose que l'évolution des prix de vente de la chaleur et de l'eau potable suit l'inflation.

3.6. CONTENUS CARBONE DE L'ENERGIE DISTRIBUEE

On a estimé le contenu carbone de l'énergie thermique (chauffage + ECS) produite, en prenant en compte le contenu carbone immobilisé dans les tubes du réseau de chaleur. Il s'agit là d'une première étape, qui mériterait d'être affinée en prenant en compte les contenus CO₂ des PAC, des aérorefrigérants, du forage, etc.

Néanmoins, cette étude permet d'avoir quelques ordres de grandeur. Les contenus carbone sont extraits de la Base Carbone de l'ADEME (<http://bilans-ges.ademe.fr/>), et de l'IPCC 2013 GWP 100 a (cf. Tableau 9). On retient les valeurs de la Base Carbone de l'ADEME pour le Gaz naturel (243 kgCO₂eq / MWhPCI), l'électricité à finalité chauffage (209 kgCO₂eq / MWh), le mix moyen de l'électricité pour la production de l'ECS, le pompage et le fonctionnement des aérorefrigérants (82 kgCO₂eq / MWh) et l'électricité produite par Moyen de production d'électricité photovoltaïque (55 kgCO₂eq / MWh).

Pour les systèmes comportant des panneaux PV, le contenu carbone de l'électricité produite par les moyens de production d'électricité photovoltaïque remplace le contenu carbone du mix moyen de l'électricité pour la production de l'ECS, le pompage et le fonctionnement des aérorefrigérants à hauteur de l'électricité PV produite.

	PEHD	Isolant polyuréthane
Contenu CO ₂ (kgCO ₂ eq.kg ⁻¹)	2,09 ⁶	5,19 ⁷
Masse volumique (kg.m ⁻³)	953	35
Contenu CO ₂ (kgCO ₂ eq.m ⁻³)	1 992 ²	155,7 ³

Tableau 9 : Contenu carbone des matériaux du réseau

3.7. EVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU PRELEVEE

Le logiciel PHREEQC a été utilisé pour étudier la physico-chimie de l'eau prélevée et son évolution en cas de refroidissement, sur la base d'une analyse menée sur le forage PZ2, situé à environ 1,5 km de distance de Saint-Christol.

L'eau PZ2 analysée est de type bicarbonatée calcique et magnésienne. C'est une eau dure (dureté totale de l'ordre 25°f), très peu minéralisée qui présente un pH proche de la neutralité (pH calculé de 7.24 à 37°C). C'est une eau proche de l'équilibre avec la calcite et la dolomite à 37°C, et présentant une pression partielle en CO₂ de l'ordre de 0.017 bar. Cette eau contient relativement peu d'éléments, ou en quantité négligeables (concentrations inférieures aux limites de détection). Il est à noter l'absence de nitrates et la présence de traces de phosphates. Seul le fer a une concentration relativement élevée (0.4 mg/L). Il est difficile, sur cette seule valeur, d'en tirer des conclusions sur l'état du fer en solution (formes colloïdales, particules de fer en suspension,...). Des analyses plus poussées sur cet élément seraient néanmoins nécessaires. Une baisse de la température (de 37 à 25°C) ne semble pas modifier la composition chimique du fluide et déclencher de dépôts particuliers (à l'exception des hydroxydes de fer). Seul un dégazage important du CO₂ dissout (conjointement à la baisse de température) pourrait provoquer des dépôts de carbonates.

⁶ Base Carbone de l'ADEME (<http://bilans-ges.ademe.fr/>)

⁷ l'IPCC 2013 GWP 100 a

4. Modélisation du système

Un modèle du système complet représenté en Figure 1 a été développé dans le logiciel MATLAB®. La simulation est menée au pas de temps horaire en prenant en compte les besoins de chaleur, d'ECS et d'eau potable. A chaque pas de temps, le débit dans le réseau est optimisé afin de trouver le meilleur compromis entre consommation électrique des PAC et consommation des circulateurs. On obtient ainsi les indicateur-clés suivants :

- la consommation électrique totale du système, incluant la consommation de la pompe d'exhaure, des pompes à chaleur et des pompes de circulation ;
- le contenu CO₂ du projet calculé sur 20 ans ;
- le coût complet du système calculé sur 20 ans ;
- la quantité d'eau potable produite par le forage géothermique.

On indique aussi les indicateurs ramenés au MWh produit :

- le SPF (*seasonnal performance factor*) annuel, rapport de l'énergie thermique délivrée en ECS et en chauffage sur la consommation électrique totale du système ;
- le contenu CO₂ équivalent de l'énergie produite ;
- le coût du MWh (rapport entre le coût du système calculé sur 20 ans et la quantité de chaleur produite sur cette même période).

5. Etude des différentes variantes

5.1.1. Exploitation géothermique sans aéroréfrigérant, sans PV

On a considéré une épaisseur d'isolant de 10 cm sur les deux canalisations, au-delà de cette épaisseur les gains de performances étant négligeables (cf. section 3.3.3). Le coefficient de performance du système est compris entre 3,5 et 4,4, et augmente avec le diamètre des conduites, du fait de la réduction des pertes de charge (cf. Figure 18 et Figure 26). Le contenu carbone de la chaleur livrée montre un optimum résultant d'un compromis entre les deux effets concurrents : augmenter le diamètre des conduites diminue les consommations électriques, et donc les émissions CO₂, mais nécessite d'immobiliser une plus grande quantité de PEHD et d'isolant dans le réseau. La quantité d'eau potable produite par le forage est faible, de l'ordre de 6,5 à 8,0 m³.h⁻¹ en moyenne annuelle. Le coût du projet se situe entre 5 et 6 M€, avec un coût de la chaleur produit entre 160 et 180 €.MWh⁻¹ (cf. Figure 19).

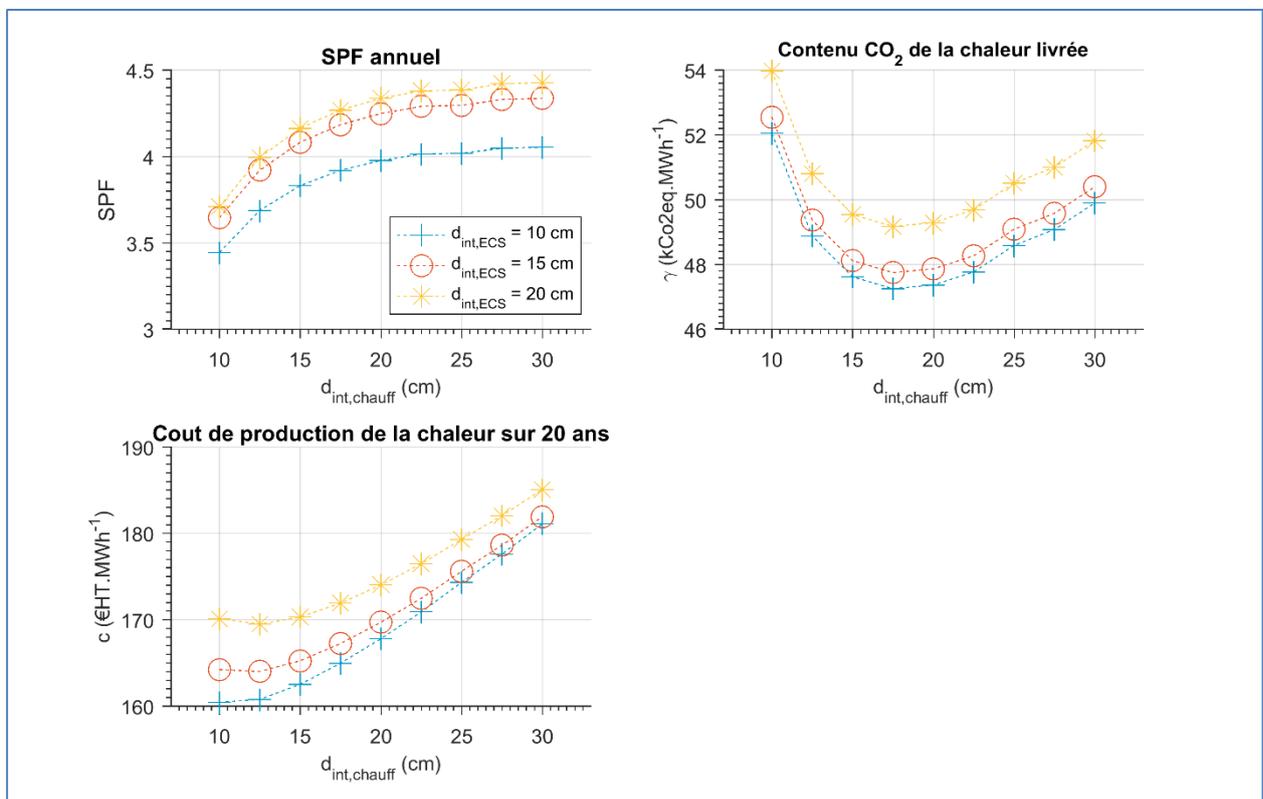


Figure 18 : Influence des diamètres de conduite (boucle ECS et boucle chauffage) sur les indicateurs-clés énergétiques.

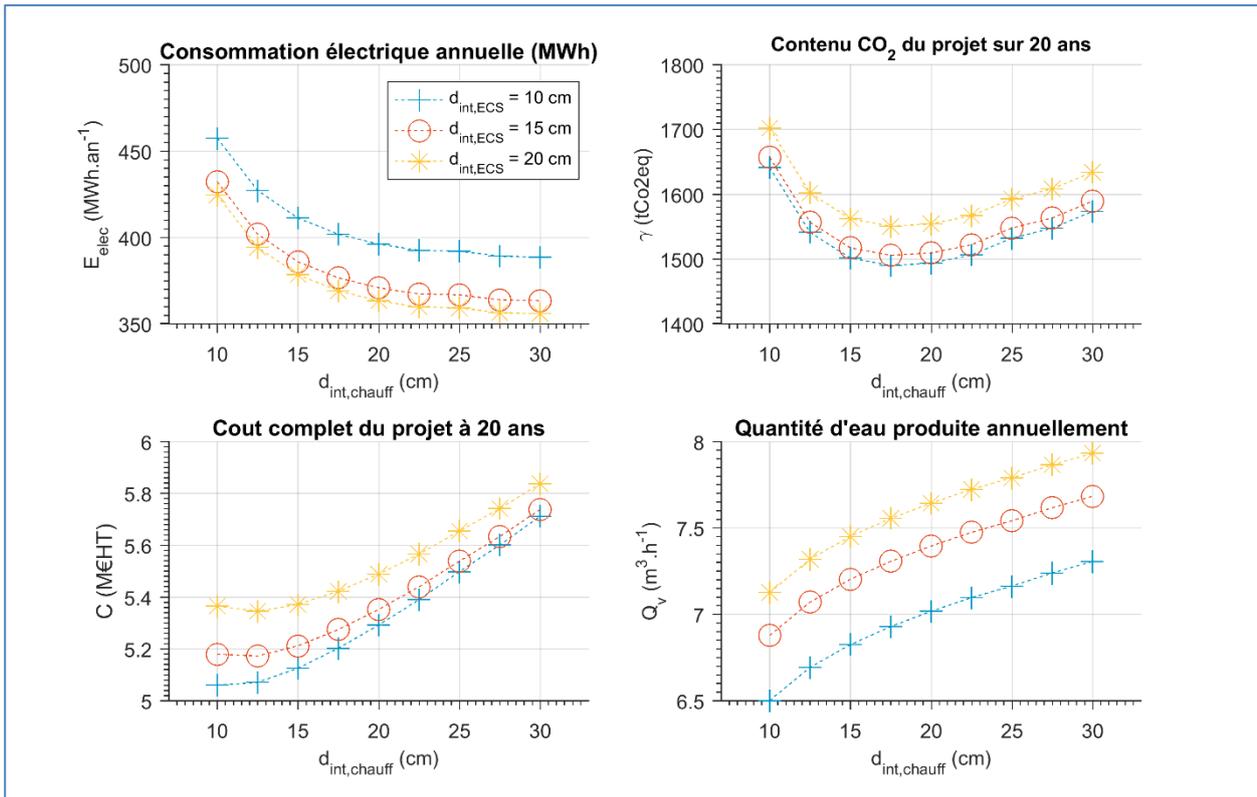


Figure 19 : Influence des diamètres de conduite (boucle ECS et boucle chauffage) sur les indicateurs-clés.

5.1.2. Exploitation géothermique avec aérorefrigérant, sans PV

On étudie la mise en place de 1, 2 ou 3 aérorefrigérants pour la production d'eau potable. On choisit des diamètres de conduite de 17,5 cm pour le chauffage et 10 cm pour l'ECS, qui permettrait d'atteindre le minimum de contenu carbone émis.

L'installation de deux aérorefrigérants fournit tout au long de l'année un débit de 121 m³.h⁻¹, ce qui permettrait de couvrir environ 95 % de la consommation d'eau potable de Pézenas. La consommation électrique supplémentaire induite par ces deux aérorefrigérants est de 1000 MWh.an⁻¹, avec un surcoût calculé sur 20 ans de 3 M€ (8,3 M€ au lieu de 5,3 M€ sans aérorefrigérant, cf. Figure 21 et Figure 22). L'installation d'un troisième aérorefrigérant n'apporte qu'un gain marginal. Le coût complet sur 20 ans varie entre 7,6 à 10 M€ suivant que l'augmentation du coût de l'électricité est de 1 %/an ou 5 %/an (cf. Figure 23).

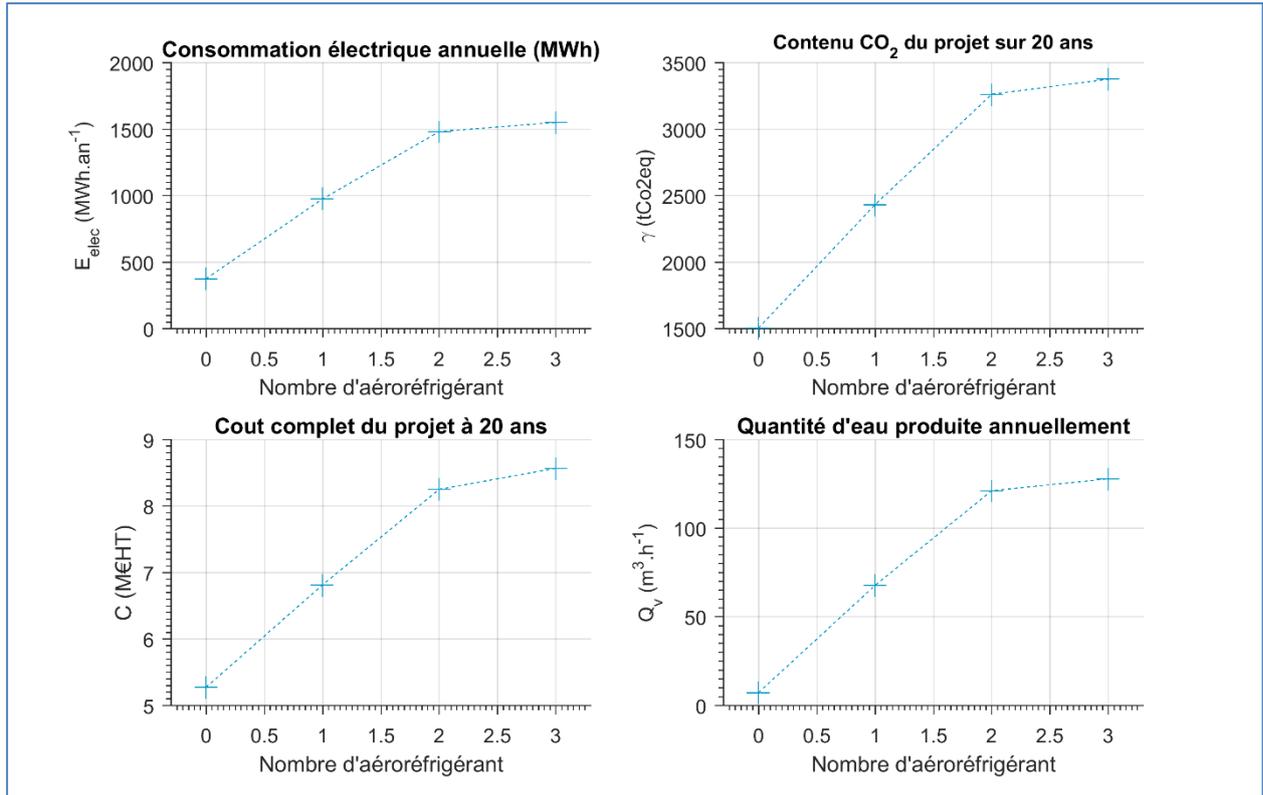


Figure 20 : Influence des diamètres de conduite (boucle ECS et boucle chauffage) sur les indicateurs-clés énergétiques.

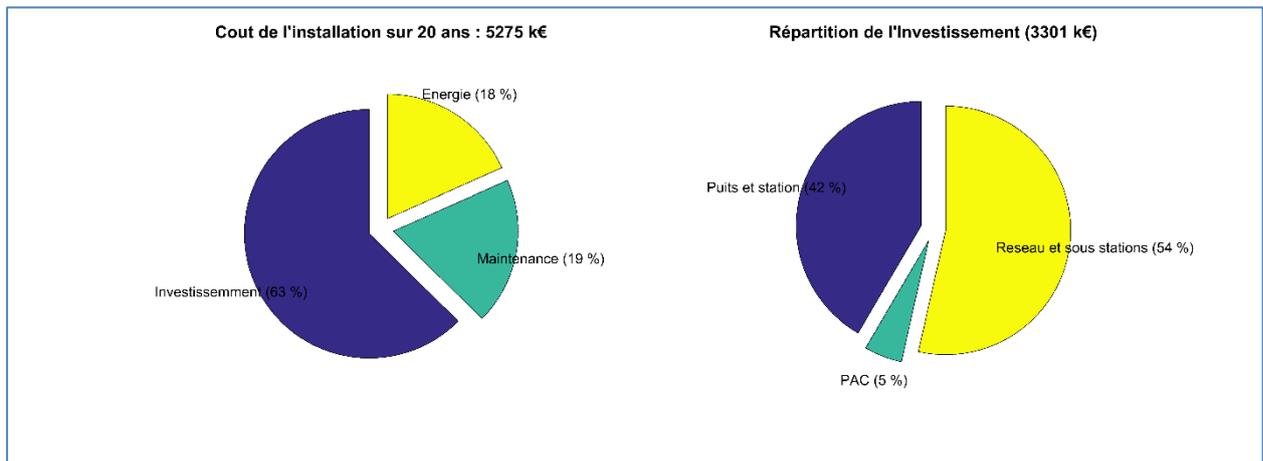


Figure 21 : Répartition des coûts (SANS aéroréfrigérant)

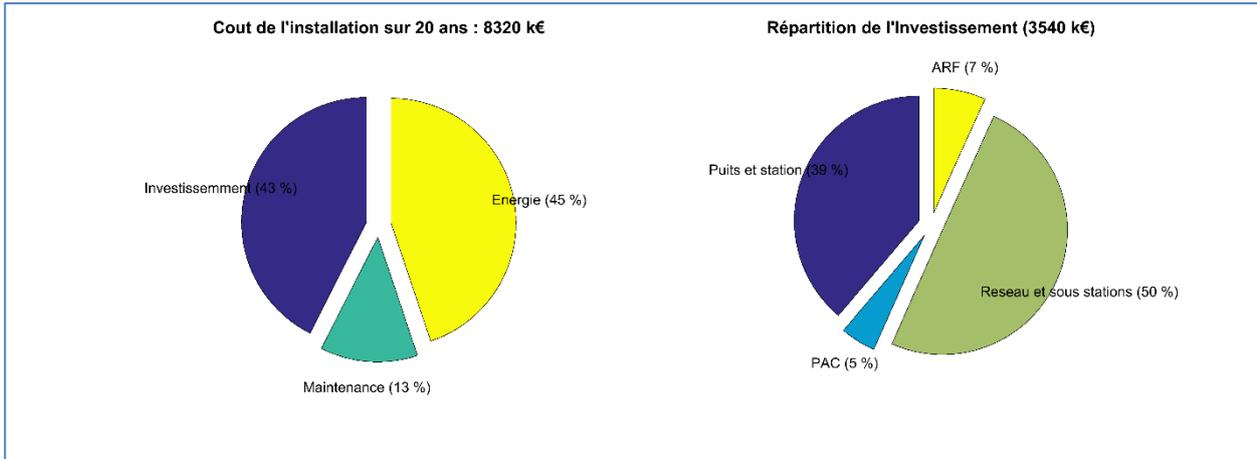


Figure 22 : Répartition des coûts (avec 2 aéroréfrigérants)

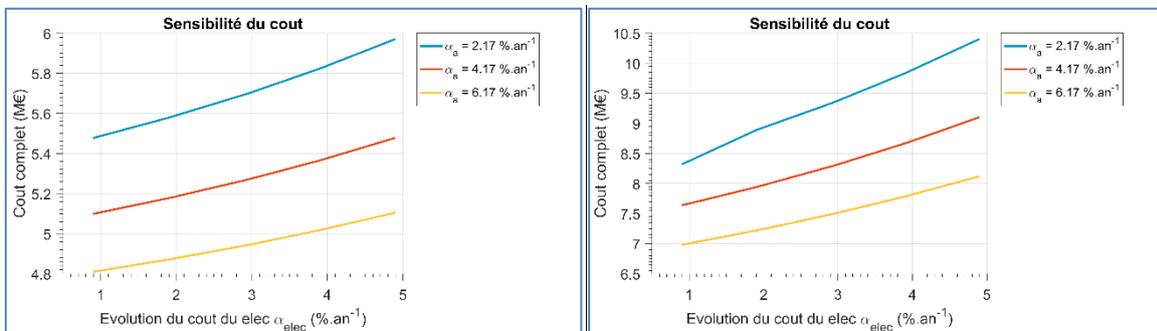


Figure 23 : Sensibilité du coût aux paramètres macro-économiques (actualisation et évolution du cout de l'électricité) sans aéroréfrigérant (à gauche) et avec deux aéroréfrigérants (à droite).

5.1.3. Influence de la densité de bâtiment, sans PV

Le schéma prévisionnel prévoit la construction de 57 000 m² de bâtiment, avec 92 % de logement et 8 % de bâtiments tertiaires. L'influence de la densité de bâtiment a été étudiée en conservant 3,1 km de réseau de chaleur et le même ratio logement / tertiaire, et en faisant varier la surface de 57 000 m² à 200 000 m². Les diamètres des conduites ont été choisis en appliquant une règle empirique :

$$d_{int,chauff} [cm] = 17,5 [cm] + 7,5 [cm] \times \left(\frac{S [m^2]}{57000 [m^2]} - 1 \right) \tag{4}$$

$$d_{int,ECS} [cm] = 10,0 [cm] + 10,0 [cm] \times \left(\frac{S [m^2]}{57000 [m^2]} - 1 \right)$$

En l'absence d'aéroréfrigérant, le coefficient de performance SPF annuel augmente avec la surface chauffée, de 4,1 à 4,9 (cf. Figure 20). En effet, la valeur relative des consommations électriques des circulateurs et les pertes thermiques des conduites tendent à diminuer pour la même longueur de conduite. De même, le contenu carbone diminue de 43,9 à 33,8 kgCO₂eq.MWh⁻¹. Pour 200 000 m², le cout de production de la chaleur sur 20 ans s'établirait à 91 €.MWh⁻¹, et 18 % du besoin en eau potable de Pézenas serait couvert par le forage géothermique.

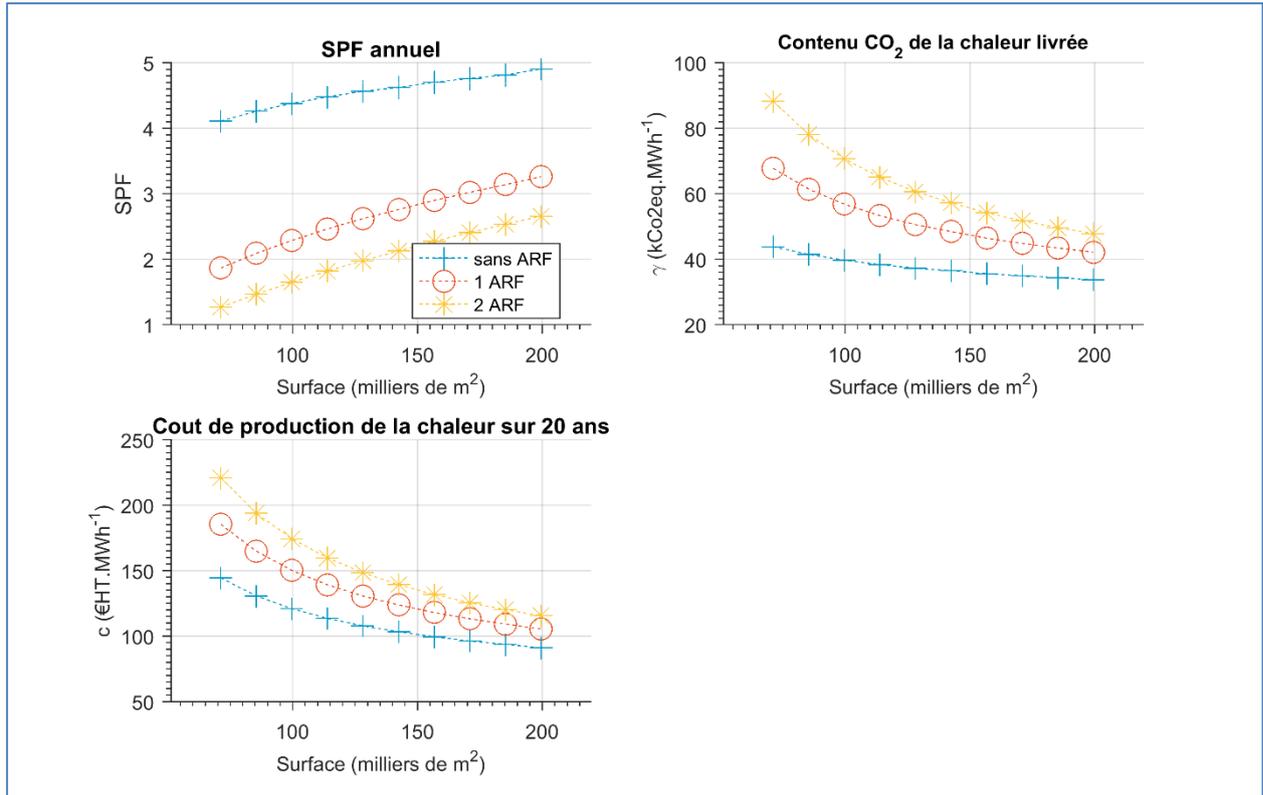


Figure 24 : Influence de la surface construite sur les indicateurs-clés énergétiques (sans aéroréfrigérant)

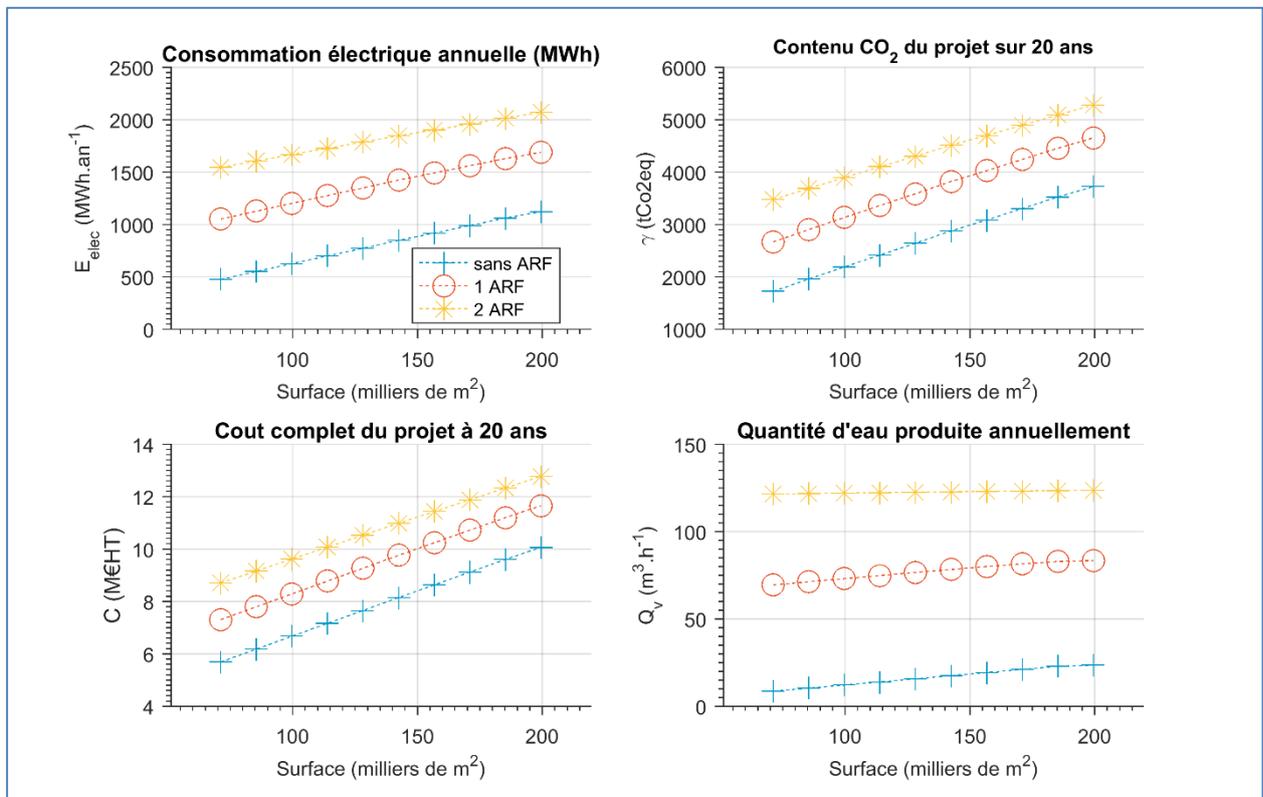


Figure 25 : Influence de la surface construite sur les indicateurs-clés

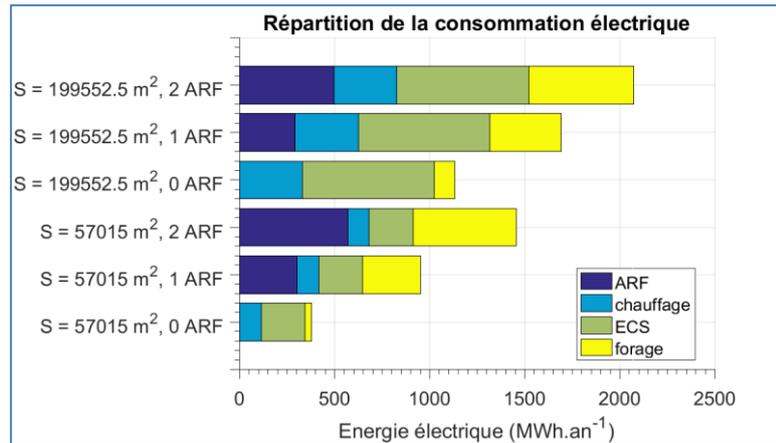


Figure 26 : Répartition de la consommation électrique en fonction du nombre d'aéroréfrigérants et de la surface construite.

5.1.4. Exploitation géothermique avec aéroréfrigérant et avec PV

La surface PV permettant de minimiser le coût est de 1 500 m² pour un ARF et 2 000 m² pour deux ARF (cf. Figure 20). Pour deux ARF et 2 000 m² de panneaux, le coût complet sur 20 ans est alors ramené d'environ 8,3 M€ à 7,8 M€, l'installation des PV ne représentant que 12 % de l'investissement initial (cf. Figure 21). Le PV couvre alors 28 % de la consommation électrique annuelle (cf. Figure 29).

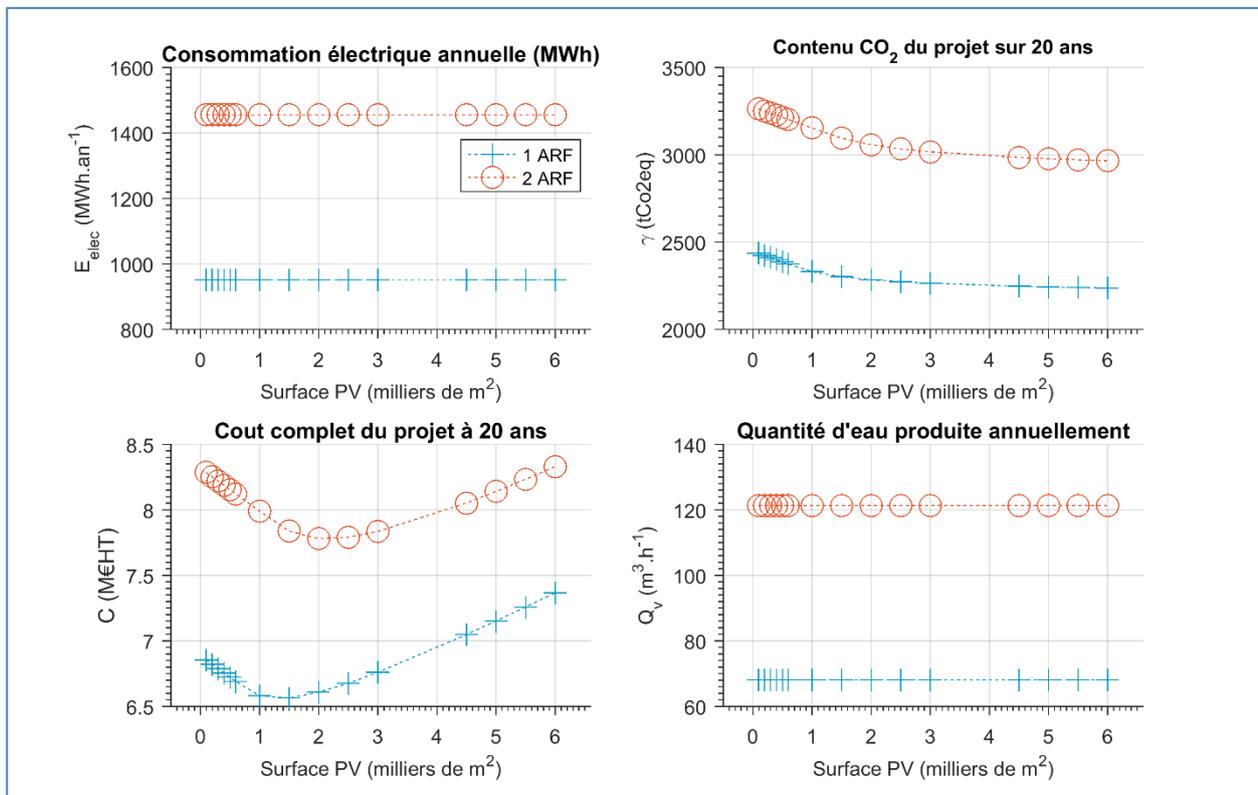


Figure 27 : Influence de la surface de panneaux PV sur les indicateurs-clés. Surface construite = 57 000 m²

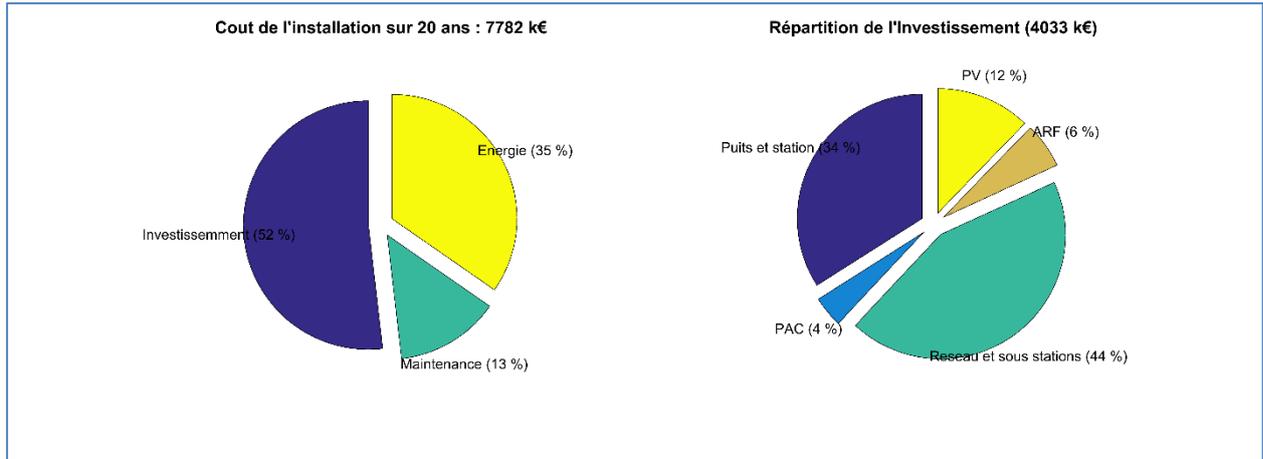


Figure 28 : Répartition des coûts avec 2 aéroréfrigérants et 2 000 m² de panneaux PV.

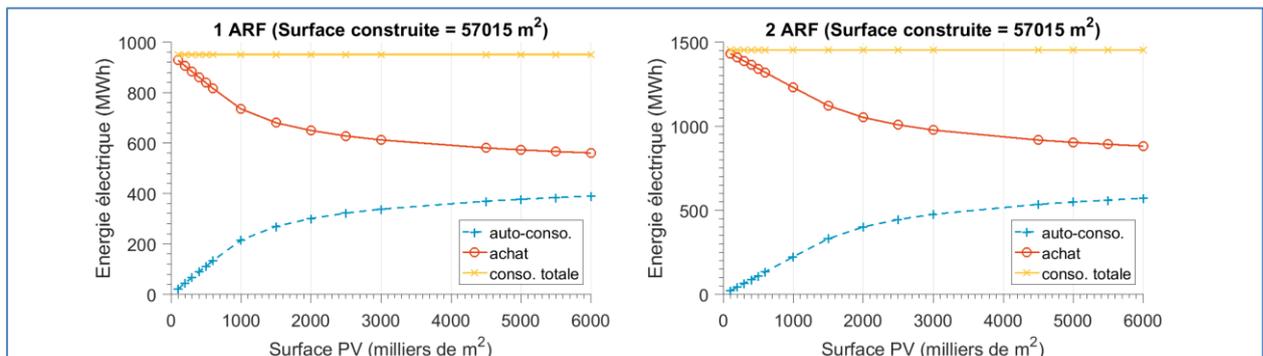


Figure 29 : Influence de la surface de panneaux PV sur les indicateurs-clés. S construite = 57 000 m²

Une étude paramétrique a montré que la surface optimale de PV (minimisant le coût du projet) varie linéairement avec la surface bâtie entre 2 000 m² pour 57 000 m² construit et 3 000 m² pour 200 000 m² construit. La mise en place du PV permet de réduire le coût complet du projet sur 20 ans de 700 k€ environ (cf. Figure 30 et Figure 31).

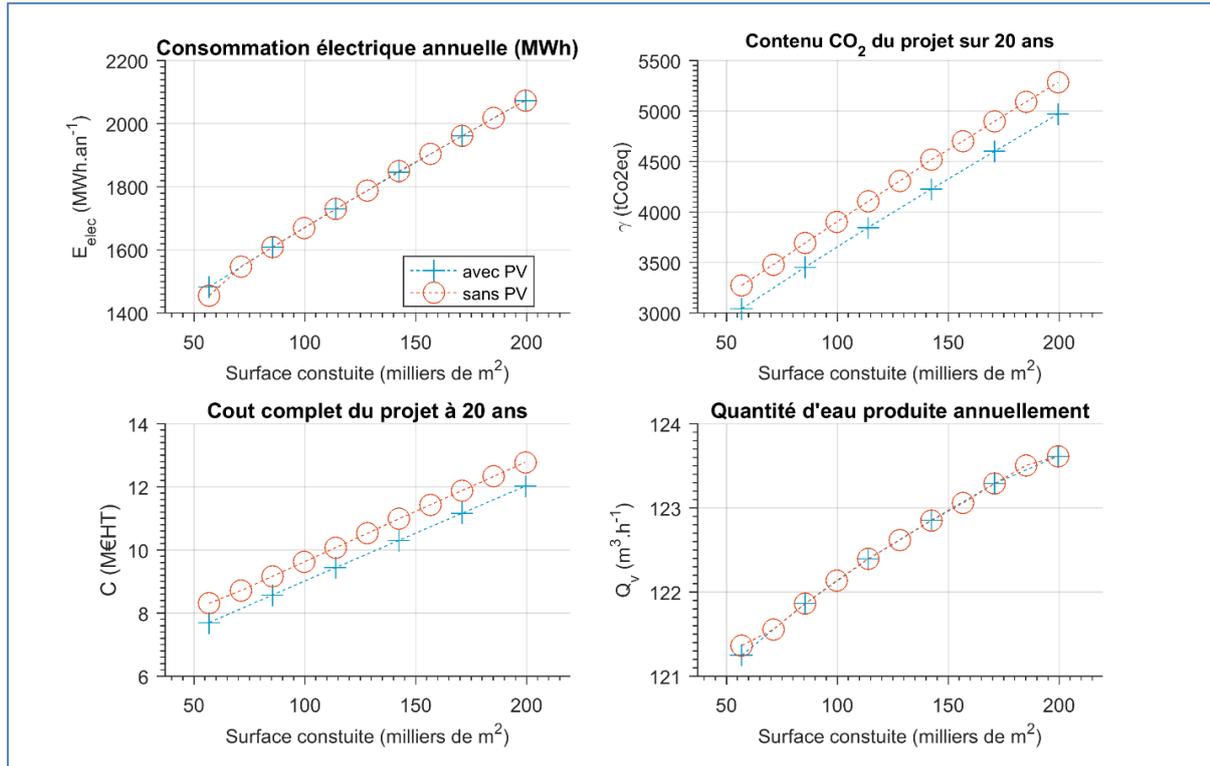


Figure 30 : Influence de la surface de panneaux construite sur les indicateurs-clés. Surface construite = 57 000 m². 2 aérofrigorifères

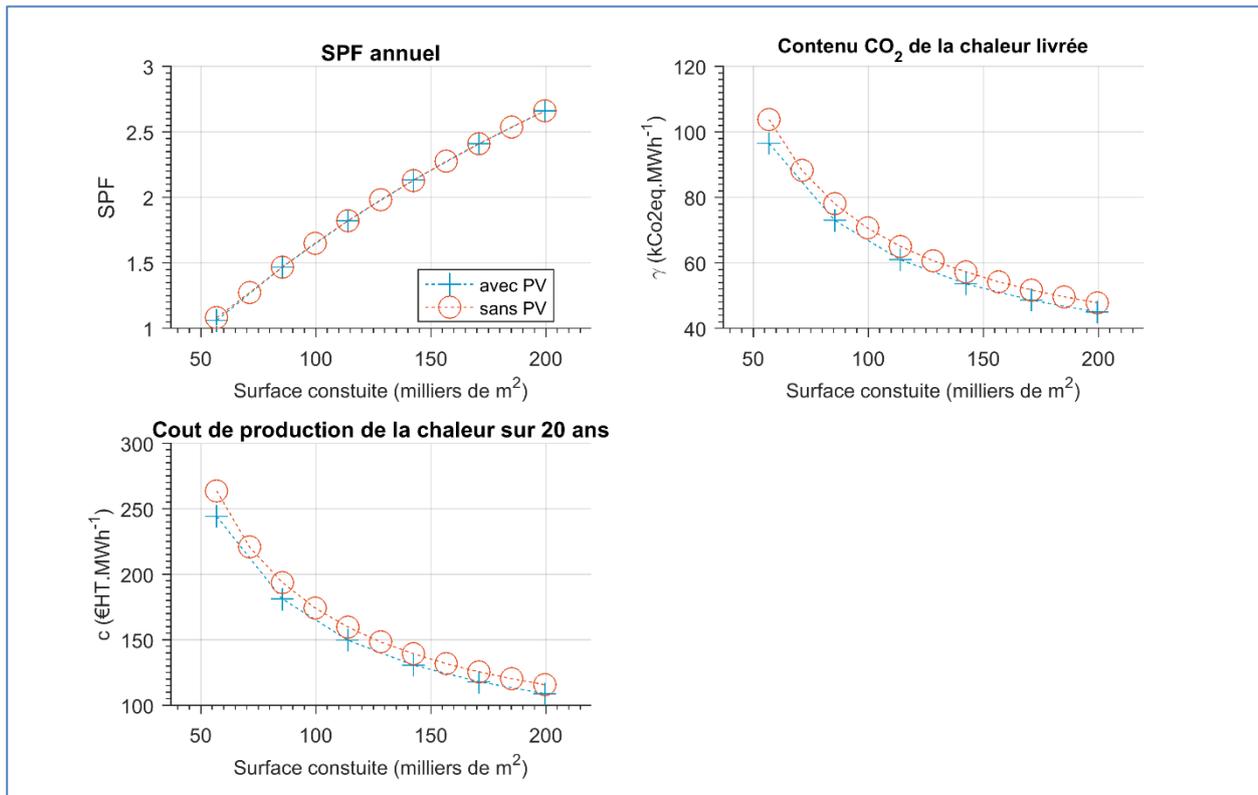


Figure 31 : Influence de la surface de panneaux construite sur les indicateurs-clés. Surface construite = 57 000 m². 2 aérofrigorifères

6. Conclusions

6.1. CONSIDERATIONS ECONOMIQUES

D'après l'AMORCE et l'ADEME, le prix de vente moyen de la chaleur sur des réseaux alimentés à > 50 % par des énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) était de 61,8 € HT.MWh⁻¹ en 2013 et 70,1 € HT.MWh⁻¹ en 2014 (AMORCE & ADEME, 2016).

Si le quartier de Saint-Christol est desservi par un réseau de chaleur avec deux ARF, le coût complet de la chaleur calculé sur 20 ans est compris entre 244 € HT.MWh⁻¹ (57 000 m² bâti) et 109 € HT.MWh⁻¹ (200 000 m² bâti), ce qui est bien supérieur au prix de vente de la chaleur constaté sur des réseaux alimentés par EnR&R.

Ainsi, si on se place à un horizon de 20 ans, on peut établir les **couples de valeurs de prix de vente de l'eau potable produite par le forage et de prix de vente de la chaleur** pour conduire à un équilibre avec le coût complet (cf. Figure 32).

On note que pour ramener le prix de vente de la chaleur aux alentours de 60 €.MWh⁻¹, l'eau potable extraite du forage doit être facturée entre 0,37 €HT.m⁻³ (57 000 m² bâti) et 0,43 €HT.m⁻³ (200 000 m² bâti).

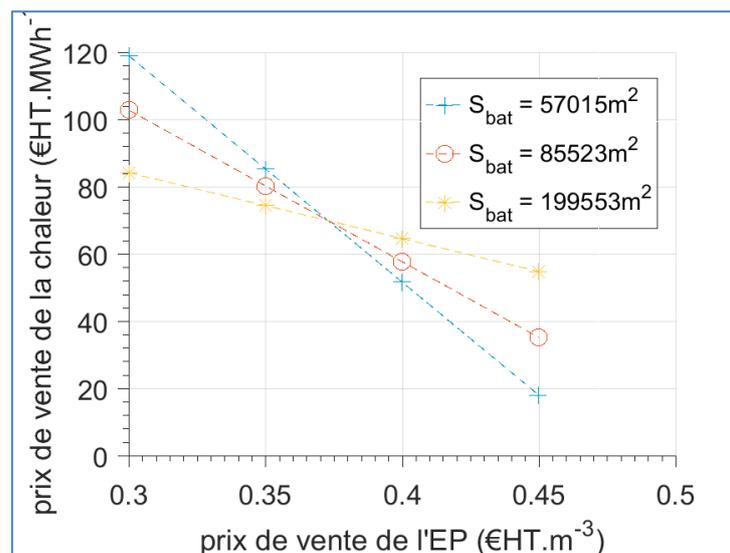


Figure 32 : Prix de vente HT de la chaleur à l'année 1 en fonction du prix de vente HT de l'eau potable à l'année 1 pour 3 valeurs de surface bâtie.

Nota : Pour la figure précédente, les hypothèses économiques retenues pour l'étude sont : calcul sur 20 ans - évolutions des valeurs macro-économiques selon : inflation = +1,37 %/an, actualisation = +4,17 %/an, électricité = + 3 %/an.

6.2. SCENARIO DE REFERENCE

En conclusion, un scénario de référence mérite d'être présenté pour juger de l'intérêt économique du projet Saint-Christol.

Ce scénario est établi sur la base des données suivantes :

- Surface bâtie = 57 000 m² ;
- Durée du scénario = 20 ans ;
- Inflation = + 1.37%/an ;
- Coût électricité = + 3%/an ;
- Prix de vente chaleur = 60 €.MWh⁻¹
- Prix de vente de l'eau (départ installation) = 0,37 €HT.m⁻³

Cout complet sur 20 ans (k€ HT)			
P1	Energie	2762,1	
P2/P3	Maintenance et renouvellement	1039,5	
	Investissement	Forage	1000
		Pompage	373
		Réseau et sous-stations	1637,9
		PAC	162
		Aéroréfrigérants	238,2
P4	Panneaux solaires	493,2	
		7705,9	
			7706

Tableau 10 : Répartition des coûts et recettes pour le scénario de référence

Ce scénario de référence montre, selon les hypothèses retenues, que le projet Saint-Christol présente un intérêt certain. En effet l'hypothèse de prix de vente de l'eau potable retenue est inférieur au prix de vente moyen de l'eau potable en France et, ainsi, le temps de retour de l'investissement devrait être inférieur à 20 ans.

Au-delà de l'étude d'opportunité qui vient d'être conduite, il convient de ne pas négliger les différents aspects suivants lors de la future étude de préfaisabilité :

- les besoins de chauffage et eau chaude sanitaire des bâtiments de Saint-Christol doivent être calculés précisément, en prenant en compte les caractéristiques architecturales, fonctionnelles et thermiques de ces bâtiments, par exemple aux moyens de simulations thermiques dynamiques ;
- le bilan doit être établi avec un prix de vente de l'eau qui intègre également les coûts transport, traitement et assainissement ;
- l'hypothèse sur la température de l'eau qui sera extraite du nouveau forage à créer est à prendre avec précaution dans la mesure où des écarts de température ont été observés sur le niveau profond des calcaires jurassique (37°C à Pézenas et 26°C à Castillonne) ;
- la perspective d'une utilisation de l'eau chaude extraite du nouveau forage pour un usage AEP doit être discutée avec l'administration au regard des réglementations qui régissent les usages eau potable et géothermie.

7. Eléments de bibliographie

ADEME. (2010). *Evaluation des couts d'exploitation associés aux chaufferies biomasse.*

AMORCE, & ADEME. (2016). *Comparatif des modes de chauffage et Prix de vente de la chaleur en 2014 – RCE 25.* Retrieved from <http://www.amorce.asso.fr/fr/espace-adherents/publications/rdc/>

Dewandel B., Vigouroux P. (2014) – Ville de Pézenas – Projet Thermoludique – Expertise ressource – Rapport final – Rap BRGM RP-63222-FR

Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency / power correlations, 83, 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin - BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Occitanie
1039 rue de Pinville
34000 Montpellier – France
Tél. : 04 67 15 79 91