

Cloacothermie, une solution pour les EcoQuartiers

Marie-Hélène AZAM - Hélène HORSIN MOLINARO

école normale supérieure paris – saclay

Edité le 06/10/2017

Cette ressource est issue du dossier industriel agrégation externe de Sciences Industrielles de l'Ingénieur, option Ingénierie des constructions de Marie-Hélène Azam.

L'aménagement urbain constitue un enjeu prioritaire pour améliorer la qualité de vie et pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Un des leviers est la mise en œuvre de la ville durable qui préserve les ressources. Dans ce cadre, un ÉcoQuartier est un projet d'aménagement urbain qui respecte les principes du développement durable tout en s'adaptant aux caractéristiques de son territoire. C'est un projet d'aménagement multifacettes qui intègre tous les enjeux et principes de la ville et des territoires durables.

La démarche ÉcoQuartier est portée par le Ministère de la Cohésion des Territoires [1], elle vise à favoriser l'émergence d'une nouvelle façon de concevoir, de construire et de gérer la ville durablement. Le label ÉcoQuartier fondé sur vingt engagements, c'est actuellement 174864 logements construits ou rénovés (dont 38% de logements sociaux).

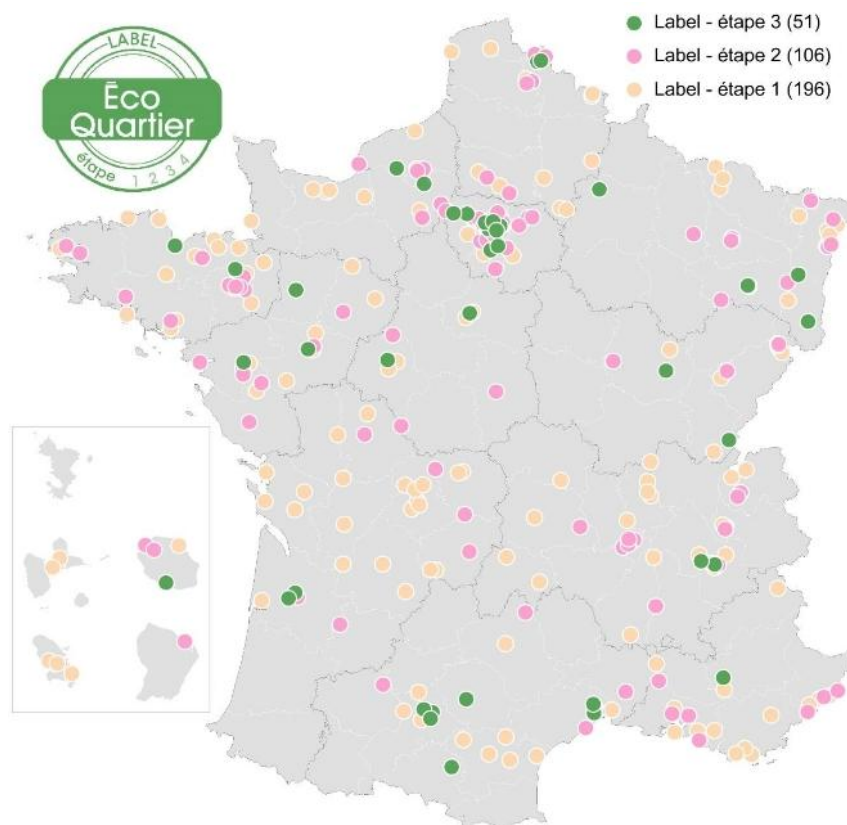


Figure 1 : Carte de France répertoriant les EcoQuartiers au 8 décembre 2016, source DGALN - AD4 [2]

Cette ressource permet d'illustrer sur un exemple d'EcoQuartier, le potentiel de récupération d'énergie de la cloacothermie exposée dans la ressource « *La cloacothermie ou l'énergie renouvelable des eaux usées* ». Après une présentation du contexte de l'étude, il est proposé l'étude du potentiel du réseau des eaux usées et son dimensionnement, le choix de la technologie de l'échangeur et son dimensionnement.

1 – Contexte

La commune de Bois-Colombes très urbanisée (96% de sa superficie couverte par des espaces urbains construits) a une politique actuelle encourageant sa rénovation. La principale action de réhabilitation concentrée sur un quartier, a débuté par la construction d'un collège et se poursuit par des opérations de renouvellement urbain. Le projet présenté entre dans ce cadre, avec un double enjeu : densifier le quartier tout en proposant un espace urbain agréable.

La Zone d'Aménagement d'une superficie de 5,2 hectares, est une opération de renouvellement urbain et d'aménagement constituée de deux îlots principaux (figure 2). La commune souhaite concevoir un quartier durable en développant les aspects environnementaux, sociétaux et économiques. Dans le cadre de cette démarche, l'opération est reconnue comme engagée dans la labellisation Haute Qualité Environnementale Aménagement® et EcoQuartier® en septembre 2013.



Figure 2 : Plan de masse de la ZAC, source [3]

Le programme prévisionnel d'aménagement de la ZAC¹ prévoit la construction de 61355 m² de logements et de 7334 m² d'activités et d'équipements publics (commerces, bureaux, locaux d'artisans, crèche, centre de loisirs). Les îlots sont découpés en lots accueillant les différentes surfaces, le phasage des travaux s'étale sur les années 2016 à 2019. Les constructions devront atteindre un niveau de performance élevé, soit le label BBC-Effinergie pour les permis de construire déposés avant 2013 et au minimum RT² 2012 pour les autres.

1.1 - Besoins énergétiques

Les besoins énergétiques sont établis pour un climat de rigueur de 2300 DJU³ à partir de l'étude thermique de certains lots dont les permis de construire ont été déposés au moment de l'étude de faisabilité. Le tableau (figure 3) résume les besoins en puissance de chaque bâtiment. La consommation totale prévisionnelle est de 6594 kWh et la puissance totale prévisionnelle est de

¹ Zone d'Aménagement Concerté

² Réglementation Thermique

³ Degré Jour Unifié

2547 kW (sans surpuissance et pertes du réseau). Cette puissance est estimée pour une température extérieure de -7°C.

	Nbre logements	SHON ⁴ (m ²)	Puissances		
			Chauffage (W)	ECS (W)	Total (W)
Logements	1 088	63 870	1 616 757	730 746	
Commerces	0	7 870	199 216	0	
Total	1 088	71 740	1 815 973	730 746	2 546 719

Figure 3 : Puissance de chauffage prévisionnelle de la ZAC

1.2 - Réseau de chaleur urbain

Afin d'optimiser les systèmes énergétiques du quartier, un réseau de chaleur urbain a été choisi pour produire et distribuer l'énergie calorifique sur le périmètre de la ZAC. Ce réseau doit permettre à l'ensemble des abonnés de couvrir leurs besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire (ECS). Dans le cadre de la labellisation du quartier, la ville souhaite que ces besoins soient couverts à plus de 50% par une énergie renouvelable. Plusieurs solutions ont été envisagées et une étude de faisabilité a mis en évidence le potentiel de récupération de la chaleur par géothermie sur nappe. La solution énergétique proposée est donc composée de (figure 4) :

- Quatre forages géothermiques (deux de production et deux de réinjection) sur l'aquifère du Lutétien situé à environ 50 m de profondeur (eau à environ 14,5°C),
- L'utilisation de pompes à chaleur pour produire de l'eau chaude à température souhaitée,
- Une chaufferie gaz en appoint et en secours.

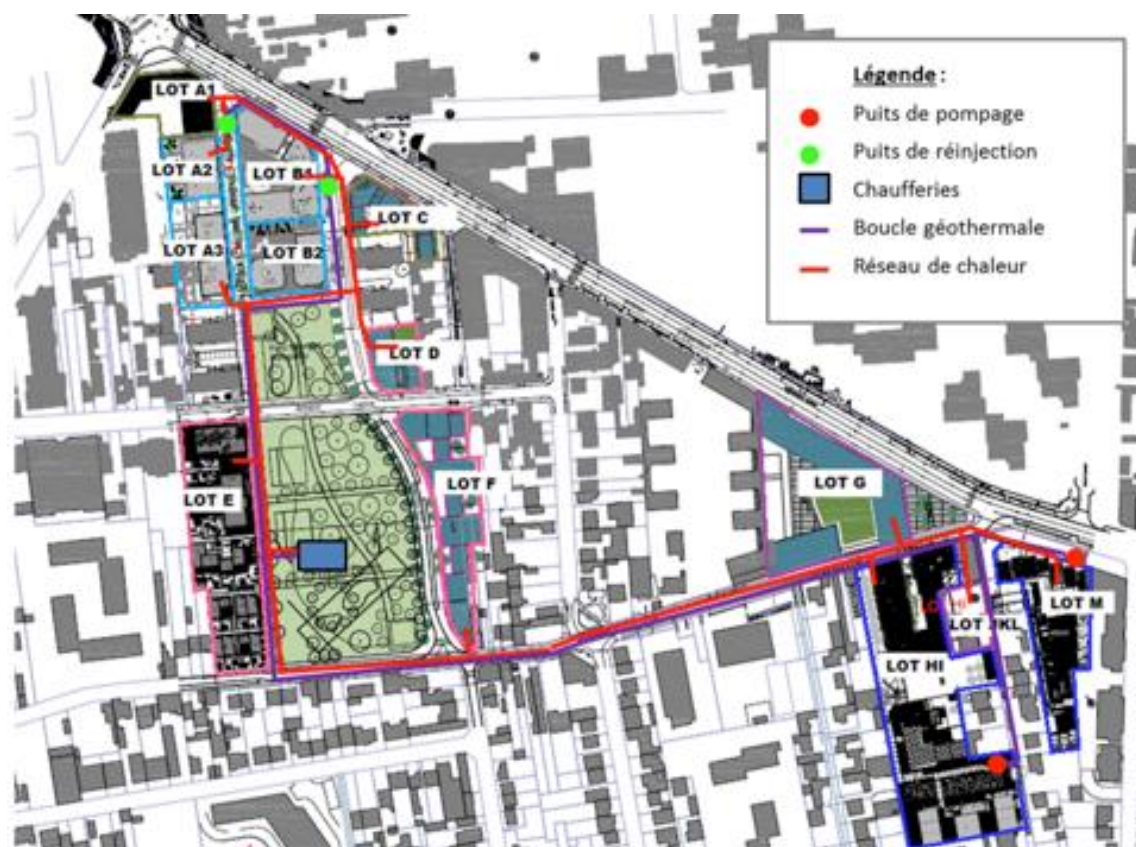


Figure 4 : Tracé du réseau, plan extrait de source [4]

⁴ Surface Hors Œuvre Nette

1.3 - Géothermie

Une étude de faisabilité a été réalisée à partir des besoins énergétiques et d'essais sur un forage de reconnaissance : la nappe est à un niveau statique de +23,59 NGF⁵ soit à 5,12 m du sol, la température de la nappe mesurée est d'environ 14,5°C, la succession lithologique est présentée dans le tableau figure 5.

Profondeur (m)	Cote NGF (m)	Description
0 à 6,50	+22,01	Remblais divers
6,50 à 11,90	+16,81	Alluvions anciennes
11,90 à 18,30	+10,41	Sables de Beauchamps
18,30 à 29,80	-1,09	Marnes et caillasses
30 à 50	-21,19	Calcaire grossier

Figure 5 : Succession lithologique, données extraites de source [5]

Les besoins du quartier imposent un débit d'exploitation maximal de 90 m³/h. Deux forages sont nécessaires avec un débit de pointe de 45-50 m³/h. La disposition des puits de pompage et de réinjection (figure 4) permet de limiter les interférences hydrauliques et thermiques pouvant se produire sur les quatre forages. Une modélisation numérique de la nappe a donc été réalisée pour une vérification. Le scénario modélisé est le suivant : deux forages de pompage de débit continu de 45 m³/h, deux forages de rejet de débit continu de 45 m³/h, une différence de température en pompage et réinjection variable au cours de l'année (octobre à mars : -7°C, avril : -6°C, mai à septembre : -5°C). Après 15 ans d'exploitation, la température des puits de pompage a diminué de 1,35°C sur le premier forage et de 1,8°C sur le second. Cette activité n'est pas sans conséquences sur la nappe, cependant la position des points de pompage et de réinjection permet d'en limiter l'effet.

1.4 - Chauffage

L'utilisation d'un réseau de chaleur urbain induit un linéaire important de canalisations et donc de pertes thermiques. Ces paramètres impactent directement le coût des travaux et donc celui de l'énergie pour l'utilisateur. Le périmètre de la ZAC est très étendu pour le nombre d'utilisateurs. Il est donc important d'implanter la chaufferie de manière stratégique au plus proche de la source et des points de distribution. Elle sera implantée dans un parc situé au cœur de la ZAC, l'espace vert actuel sera agrandi et réaménagé, et pour éviter toutes nuisances visuelles et acoustiques, la chaufferie sera complètement enterrée.

L'énergie calorifique de ce quartier est produite de manière centralisée par le biais de pompes à chaleur utilisant la géothermie sur nappe ; elle est ensuite distribuée grâce à un réseau de chaleur urbain. La suite de cette ressource propose une alternative à l'utilisation de la géothermie dans le but de limiter l'impact de l'installation dans le sous-sol et donc son appauvrissement : la cloacothermie, il s'agit de récupérer l'énergie contenue dans les eaux usées (voir ressource « *La cloacothermie ou l'énergie renouvelable des eaux usées* »). Ce système innovant complètera l'utilisation de la géothermie peu profonde. Le but de l'étude est d'évaluer la pertinence de cette variante ; cette étude comprend également le dimensionnement du système de production de la chaleur.

⁵ Nivellement Général de la France : réseau altimétrique disséminé sur le territoire métropolitain

2 – Réseau d'eaux usées de la ZAC

2.1 - Description

Le réseau d'assainissement de la ville est constitué de réseaux unitaires : l'ensemble des eaux usées et pluviales sont évacuées par un unique réseau généralement pourvu de déversoirs permettant, en cas d'orage, le rejet d'une partie des eaux par surverse, directement dans la nature.

Ce système est très ancien, et tend à disparaître pour des raisons environnementales au profit du réseau séparatif qui consiste à dissocier les eaux usées domestiques (eaux vannes et eaux ménagères) des eaux pluviales. Cependant ce type de réseau unique a l'avantage de véhiculer d'importants débits lors des épisodes pluvieux.

Dans le cas d'étude, l'échangeur peut être localisé soit dans le collecteur unitaire existant le plus important, soit dans un collecteur neuf séparatif ou unitaire. Le plan local d'urbanisme (PLU, voir « *Annexe : Relevé du réseau d'assainissement* ») permet de localiser les collecteurs existants et de préciser leurs dimensions, cependant très peu d'éléments sont disponibles sur ces collecteurs ; aucune campagne de mesures, des débits et des températures n'a été réalisée sur cette partie du réseau. Le collecteur principal existant est un collecteur unitaire dont le profil est ovoïde (180 x 105 cm) et l'écoulement se fait par gravité.

2.2 - Débit d'eaux usées des nouveaux bâtiments

Le débit d'eaux usées de chaque bâtiment est dimensionné conformément au DTU⁶ 60.11. Le débit est estimé à partir du type et du nombre d'appareils (sanitaires, douches...) par logement pondéré par un coefficient de simultanéité. Pour plus de détails sur les calculs voir « *Annexe : Estimation des débits d'eaux usées à partir du DTU 60.11* ».

Compte tenu de la position des bâtiments du quartier par rapport aux réseaux d'assainissement existants et par rapport à la localisation de la chaufferie, il semble plus logique de grouper les lots A1, A2, A3, B1 et B2 (figure 6). L'échangeur pourra donc être positionné sur un collecteur neuf en amont de la chaufferie au niveau du parc, dont le débit probable sera de 108 m³/h.

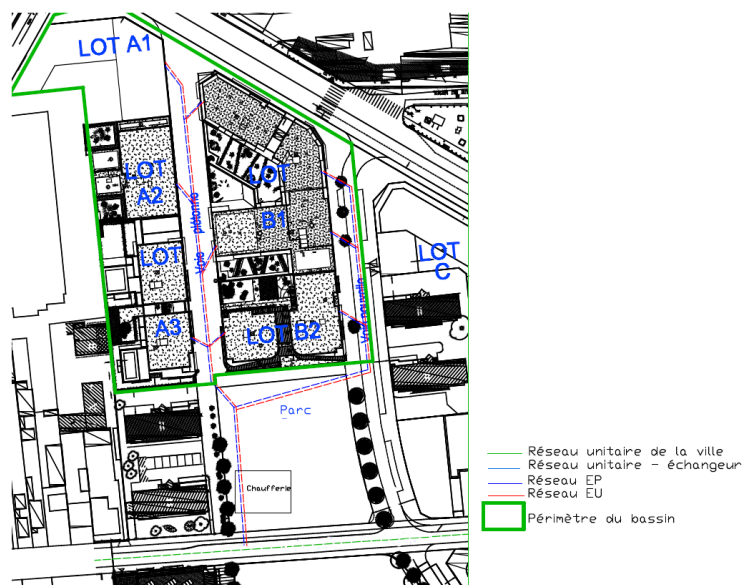


Figure 6 : Extrait de plan des réseaux, plan extrait de source [4]

⁶ Document Technique Unifié

2.3 - Estimation du débit d'eau pluviale - méthode rationnelle

L'estimation des débits d'eau pluviale pour le dimensionnement de canalisation peut être réalisée par le biais de deux méthodes : la méthode rationnelle et la méthode Caquot (ou superficielle). Le projet actuel étant à un niveau de détail peu élevé, le choix se porte sur la méthode la plus simple : la méthode rationnelle. Des hypothèses ont dû être faites pour réaliser ce dimensionnement, l'ensemble est présenté dans l'« *Annexe : Estimation des débits par la méthode rationnelle* ».

Le calcul donne un débit de pointe de 51 m³/h.

2.4 - Dimensionnement et géométrie de la canalisation

Pour le dimensionnement des ouvrages d'évacuation, il convient de prendre en compte des valeurs extrêmes :

- Débits de pointe qui conditionnent le dimensionnement de l'ouvrage,
- Débits minimaux qui permettent l'auto-curage de la canalisation avec une vitesse d'entraînement des dépôts de 0,60 m/s.

D'après le calcul, le débit de pointe pour les eaux pluviales peut être estimé à 51 m³/h, auquel il faut ajouter le débit des eaux usées de 108 m³/h, soit un débit de pointe total de 159 m³/h.

Le diamètre théorique minimum de la conduite peut être dimensionné à partir de la formule suivante :

$$D = \left[\frac{n \cdot Q_p}{f \cdot \sqrt{I}} \right]^{3/8}$$

Avec D , le diamètre théorique minimum de la conduite (m), n le coefficient de Manning⁷ ($n=0,014$ pour un collecteur avec de nombreux branchements et d'importantes singularités), I la pente hydraulique de l'ouvrage (m/m).

On obtient un diamètre de 0,217 m, or les conduits avec échangeurs ont un diamètre minimum de 0,40 m. Avec cette même formule, le débit et la vitesse pleine section peuvent être estimés. Il faut alors vérifier que la vitesse reste inférieure à 3 m/s pour ne pas détériorer le matériau de la canalisation au cours du temps.

Débit section pleine (m ³ /s)	0,193
Vitesse section pleine (m/s)	1,54

Figure 7 : Débit et vitesse lorsque la section est pleine

Prenant en compte ce diamètre, la hauteur d'eau peut être estimée avec le débit par temps sec grâce aux équations d'écoulement à surface libre, ce qui permet de définir la géométrie de la canalisation. La hauteur d'eau approximative dans la canalisation est donc de 0,10 m et la vitesse de 1,7 m/s. La géométrie du réseau peut maintenant être définie en détail (voir « *Annexe : Ecoulement à surface libre* » pour les détails du calcul).

⁷ Robert Manning (1816-1897), Ingénieur irlandais

Surface eaux usées (m ²)	S_{EU}	0,0246
Surface d'air (m ²)	S_A	0,1011
Surface totale (m ²)	S	0,1257
Périmètre mouillé (m)	P_{EU}	0,419
Rayon hydraulique (m)	R_{H-EU}	0,059

Figure 8 : Définitions de paramètres de la géométrie

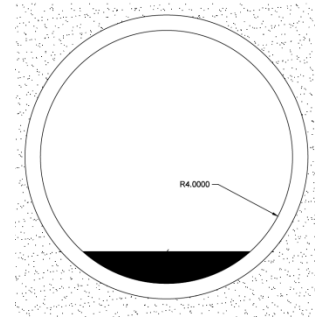


Figure 9 : Section de la canalisation

3 – Choix de la technologie de l'échangeur

Dans le cas d'une canalisation neuve, plusieurs technologies d'échangeurs sont disponibles (voir ressource « *La cloacothermie ou l'énergie renouvelable des eaux usées* »). Pour vérifier quelle serait la technologie la plus intéressante, une modélisation de la canalisation est réalisée. Le choix a été fait de réaliser le bilan des flux dans la canalisation de manière numérique avec le code de calcul aux éléments finis *Cast3m*. Dans un premier temps, la canalisation est modélisée seule pour observer la répartition du flux de chaleur en régime permanent, le but est d'évaluer le potentiel de récupération de la chaleur sur ce système.

3.1 - Géométrie

La canalisation est modélisée en deux dimensions (géométrie décrite figure 10) :

- Surface de la canalisation en rouge,
- Sol en périphérie en orange,
- Le contour des eaux usées,
- Le contour de l'air.

Les surfaces sont discrétisées avec des éléments triangulaires. La limite extérieure du sol a une densité de maillage de 0,2 alors que la limite intérieure ainsi que le reste des surfaces ont une densité de 0,02.

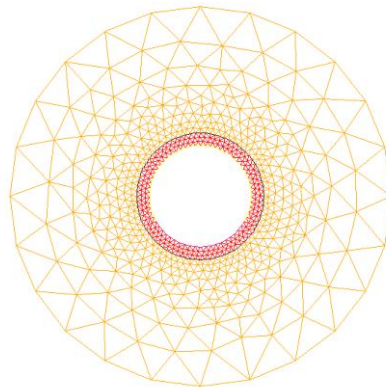


Figure 10 : Maillage de la canalisation

3.2 - Bilan des flux

L'échangeur est dimensionné dans un cas défavorable et courant, soit le débit probable par temps sec du collecteur. Un bilan permet d'identifier les flux en jeu à modéliser :

- Conduction dans la paroi de la canalisation et dans le sol,
- Convection sur le contour des eaux usées et de l'air.

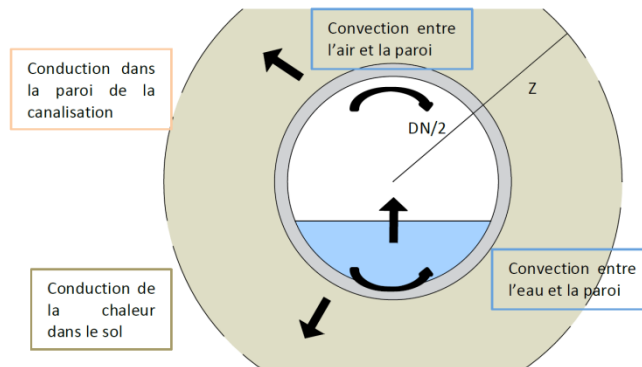


Figure 11 : Bilan des flux dans la canalisation

Conduction dans les différents matériaux

À l'intérieur des différents solides, le transfert de la chaleur par conduction est modélisé avec les caractéristiques des matériaux indiquées dans le tableau figure 12 (le développement du biofilm est négligé pour simplifier la modélisation, voir ressource « La cloacothermie ou l'énergie renouvelable des eaux usées »).

Surface	Matériaux	Epaisseur (cm)	λ (W/m.K)	ρ (Kg/m ³)	C_p (J/Kg.K)
Paroi	Béton	5	2,2	2300	1000
Sol	Sable	50	2	2000	1000

Figure 12 : Caractéristiques des matériaux

Vitesse de l'air dans la canalisation

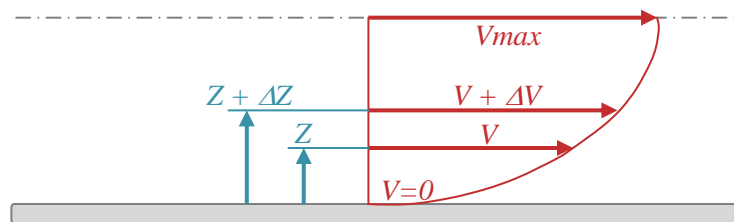


Figure 13 : Profil de vitesse d'un écoulement à surface libre

Pour tout type d'écoulement, la vitesse n'est pas homogène sur une section ; la figure 13 permet d'illustrer la répartition de la vitesse lors d'un écoulement à surface libre. D'après Dürrenmatt et Wanner [6] la vitesse moyenne de l'air peut être estimée à la moitié de la vitesse moyenne des eaux usées, le débit d'air peut donc être déterminé à partir du débit d'eaux usées (EU).

$$v_{Air} = 0,5 \cdot v_{EU-surf}$$

La vitesse est maximale en surface (figure 13), Fischer et al [7] proposent une relation pour relier la vitesse moyenne à la vitesse en surface. Ce paramètre est ensuite utile pour l'estimation des coefficients de convection.

$$v_{EU-surf} = v_{EU} + v_{EU} \cdot \left(\frac{3}{2} + 2,3 \cdot \log \left(\frac{2 \cdot h'}{D} \right) \right)$$

$$v_{EU}^* = \sqrt{g \cdot S_{EU} \cdot R_H}$$

Flux de convection entre l'air, les eaux usées et la paroi

Le bilan des flux de cette canalisation met en jeu plusieurs flux de convection :

- Flux entre l'air (A) et la paroi (P) : $\varphi_{A-P} = \alpha_{A-P} (T_A - T_P)$
- Flux entre les eaux usées (EU) et la paroi (P) : $\varphi_{EU-P} = \alpha_{EU-P} (T_A - T_{EU})$

Ces équations dépendent d'un coefficient de convection difficile à estimer de manière précise.

Convection entre l'air et la paroi :

L'air est entraîné par l'eau en mouvement, la convection est alors forcée. Incropera et DeWitt [8] proposent une expression pour déterminer le coefficient de convection entre le fluide et la paroi à partir des nombres adimensionnels. Cette expression est valable pour un nombre de Reynolds⁸ $Re > 1000$ et un nombre de Prantl⁹ compris entre 0,7 et 160. Pour le coefficient de convection entre l'air et la canalisation, les caractéristiques de l'air à 15 °C sont utilisées.

On obtient un coefficient de convection entre l'air et la paroi de 6,70 W/K.

Convection entre l'eau et la paroi :

Pour le coefficient entre les eaux usées et la paroi, les caractéristiques utilisées sont celles de l'eau à 10 °C, (à défaut de données plus précises) l'écoulement est gravitaire, la convection est donc libre. Ce coefficient est déterminé par corrélation pour un fluide en convection libre utilisant le nombre de Grashof¹⁰. L'écoulement est turbulent car le nombre de Reynolds est supérieur à $3 \cdot 10^5$.

On obtient un coefficient entre l'eau et la paroi de 454 W/K.

L'ordre de grandeur est cohérent dans le cas d'eau en convection naturelle (entre 300-500). Les équations et les calculs réalisés pour aboutir à ce résultat sont présentés « *Annexe : Estimation des coefficients de convection* ».

Condition limite de température

Si l'étude était réalisée en régime transitoire, le sol et la paroi pourraient être considérés comme un milieu semi-infini. Dans ce cas la variation de la température dans un sol à différentes profondeurs est fortement liée à l'onde thermique imposée en surface. Son amplitude s'atténue et se déphase lorsque la profondeur croît. À partir d'une certaine profondeur, le signal journalier est totalement amorti. Il est donc inutile de modéliser le sol au-delà. On peut donc imposer une condition limite de température.

Cette distance z_d dépend des caractéristiques du sol ; la profondeur z à partir de laquelle le signal est amorti à 95% peut être estimée $A(z)$. Avec les caractéristiques du sol de l'étude, on peut considérer que la température est constante, à l'échelle d'une journée, à partir de 0,5 m autour de la canalisation. L'étude est réalisée en régime permanent, cependant le choix a été fait de se baser sur ce critère pour imposer une condition de température à une profondeur donnée.

$$z_d = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{sol}}{w_a}} \quad A(z) = A_j e^{-\frac{z}{z_d}}$$

Caractéristiques du sol	α (m ² /s)	0,000001
	μ (W/m.K)	2
	$Cp * \rho$ (J/m ³ .k)	2000000
Profondeur d'amortissement	z_d	0,17
Pulsation journalière	w_j	$7,3 \cdot 10^{-5}$
Profondeur d'amortissement à 95%	z	0,50

Figure 14 : Estimation de la profondeur pour la condition limite en température dans le sol

⁸ Mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds (1842-1912), ingénieur et physicien irlandais

⁹ Nommé ainsi en l'honneur de Ludwig Prantl (1875-1953), ingénieur et physicien allemand

¹⁰ Franz Grashof (1826-1893), ingénieur allemand, professeur à l'Institut de Technologie de Karlsruhe

Initialisation des températures

Ne disposant pas de mesures concrètes de la température en France dans les différentes parties, cette modélisation se base sur les données mesurées en Italie lors de l'étude de Durrenmatt et Wanner [6].

Surface	Température initiale (°C)
Sol	5,5
Air	8,3
Eaux usées	12
Canalisation	5,5

Figure 15 : Conditions initiales en température

3.3 - Résultats de la modélisation

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cette modélisation :

1. En partie basse les eaux usées réchauffent la paroi de la canalisation. Il y a donc un flux important de chaleur entre les eaux usées et le sol et donc un fort potentiel de récupération.
2. En partie supérieure, la paroi de la canalisation a une température moins élevée mais constante. Celle-ci est réchauffée par l'air de la canalisation. Une partie de ce flux contribue à réchauffer le sol à proximité de la canalisation. Il y a donc un potentiel de récupération de calories à cet endroit également, ce qui explique la géométrie des échangeurs Frank (voir paragraphe 3.3 de la ressource « *La cloacothermie ou l'énergie renouvelable des eaux usées* »). Cependant le flux récupéré sera plus faible qu'en partie basse.

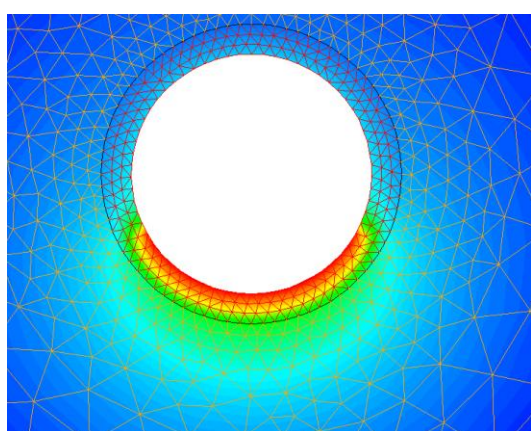


Figure 16 : Répartition des températures sur la surface modélisée

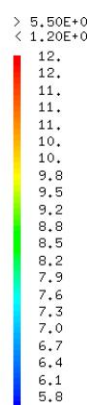


Figure 17 : Zoom répartition des températures sur la canalisation

4 – Dimensionnement de l'installation avec production centralisée

4.1 - Principe de l'installation

La construction des lots est réalisée suivant un plan de phasage (figure 2) s'étalant sur trois années :

- Phase n°1 : Construction des lots A1, A2, A3, B1, B2, C et M
- Phase n°2 : Construction des lots D, E, F, HI, JKL
- Phase n°3 : Construction du lot G

Les premiers lots étant situés non loin de la chaufferie, localisée dans le parc, celle-ci sera directement installée à sa position définitive. Le réseau sera alors étendu dans le temps aux phases 2 et 3. La chaufferie devra recevoir les pompes à chaleur centralisées ainsi que la chaufferie d'appoint et secours au gaz.

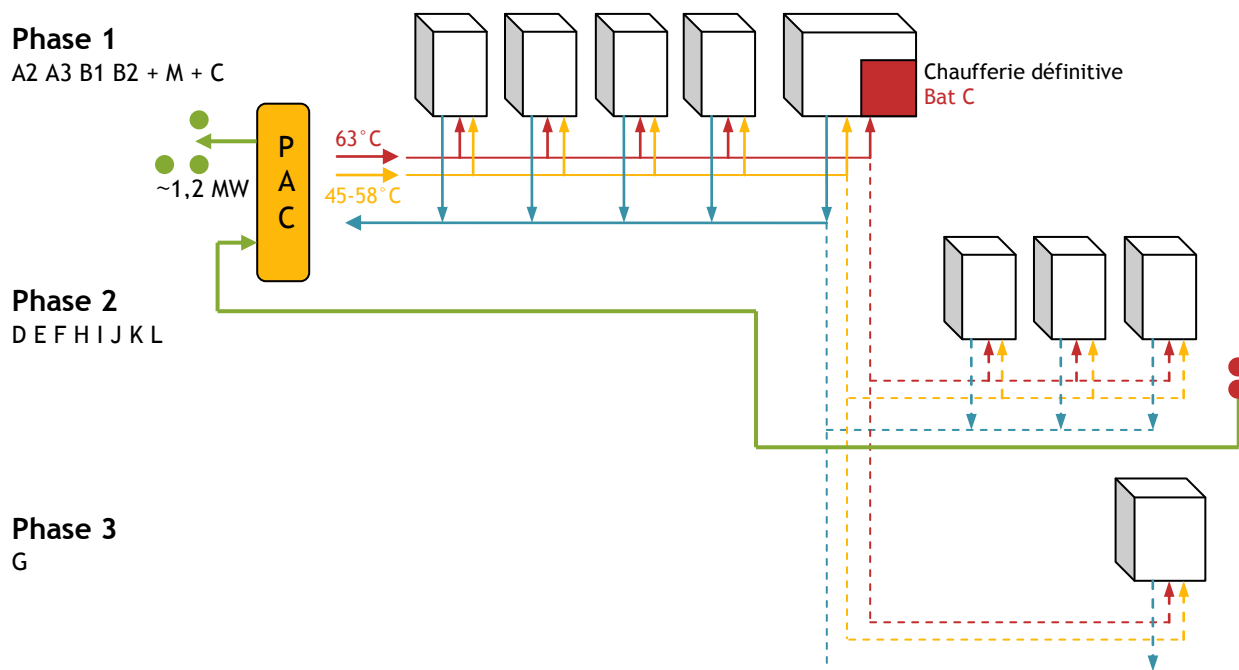


Figure 18 : Schéma du réseau et de son phasage, image d'après source [9]

4.2 - Choix du régime de température

Plusieurs critères sont à prendre en compte pour choisir le régime de température d'un réseau de chaleur urbain, en voici quelques uns :

1. Plus l'écart de température entre l'aller et le retour est élevé, plus les sections des canalisations seront faibles.

Ce principe est illustré par la formule qui suit : pour une puissance donnée si on augmente l'écart de température, on diminue le débit et donc la section.

$$P = Q_m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

2. Le deuxième critère porte sur la température moyenne du réseau. Plus celle-ci est basse plus les pertes thermiques sont limitées. On élimine donc le réseau haute température.

3. Le régime doit être compatible avec le mode de production de la chaleur et celui d'émission. Les bâtiments seront équipés de radiateur basse température ou planchers chauffants. Le régime d'émission est donc faible : température moyenne de 40°C. Par ailleurs le réseau de chaleur doit pouvoir fournir l'eau chaude sanitaire à une température de 60°C. Il faut donc produire l'eau à une température supérieure et prendre en compte les pertes. Le bureau d'étude (BURGEAP [9]) a ainsi fait le choix d'un réseau 3 tubes :

- Aller du réseau ECS : 63°C (écart de 18°C avec le retour),
- Aller du réseau de chauffage : 58°C (écart de 13°C avec le retour),
- Retour commun aux deux réseaux : 45°C.

Pour ce qui est de la source froide de la pompe à chaleur (PAC), le régime d'eau a été établi lors de l'étude de potentiel géothermique. L'étude [5] démontre qu'un régime de température 7-14°C permet de limiter l'appauvrissement de la nappe tout en maximisant la puissance récupérée.

4.3 - Principe de dimensionnement

Pour optimiser l'installation, les pompes à chaleur ont été dimensionnées pour répondre aux besoins réels du quartier. En effet la puissance estimée par la maîtrise d'ouvrage est, conformément à la RT2012, calculée pour une température extérieure de -7°C . Il s'agit d'un cas défavorable peu courant dans la région parisienne. Les pompes à chaleur seront dimensionnées pour ces besoins afin d'optimiser leur fonctionnement annuel.

Il est prévu d'installer en complément et en secours une chaudière gaz qui a pour but de couvrir l'appel de puissance complémentaire (si la température atteint -7°C et si on dépasse la courbe) mais également l'ensemble des besoins en cas de dysfonctionnement du système. La chaudière gaz est donc dimensionnée pour couvrir l'ensemble des besoins estimés par l'étude thermique.

4.4 - Besoins de chaleur : monotones

Les études thermiques de certains lots ont été réalisées lors du dépôt du permis de construire. Les coefficients de déperditions réels des bâtiments des lots B1, B2, A1 et A3 sont donc disponibles. Pour les autres bâtiments, une estimation du coefficient de déperditions de l'enveloppe est utilisée, ce coefficient a été estimé à partir de l'étude thermique des autres lots à $0,7 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

L'estimation du coefficient de déperditions total du quartier va nous permettre de tracer les Monotones¹¹. Il faut ajouter les besoins en ECS. L'estimation des consommations a été réalisée avec les hypothèses suivantes pour des logements RT2012 : chauffage 30 kWh/m^2 et ECS : 4 kWh/m^2 . Le tableau suivant résume l'ensemble de ces estimations :

Lot	Surface (m^2)	Coefficients déperditions (w/K)	Consommations ECS/jour (kWh)	Consommations ECS/heure (kWh/h)
M	4953	3446	401,50	16,73
E	5600	3920	378,60	15,78
HI	8907	6234	406,50	16,94
F	5300	3710	698,57	29,11
C	4131	2891	369,70	15,40
D	2535	1774	355,55	14,81
B1*	8081	5001	253,50	10,56
B2*	3282	2458	560,00	23,33
A1*	4847	2520	530,00	22,08
A2	3027	2118	1139,67	47,49
A3*	3606	2672	789,30	32,89
G	13350	9555	80,00	3,33
JKL	800	560	444,89	18,54
Coefficient total (W/K)		46863,58	Total (kWh/h)	266,99

* : besoin estimé à partir de l'étude RT2012

Figure 19 : Coefficient de déperditions et consommation en ECS des bâtiments

¹¹ Une année comprend 8760 heures. A chacune de ces heures correspond un niveau de puissance appelée par le réseau ; en ordonnant ces valeurs par ordre décroissant, on obtient la monotone de consommation.

Pour tracer la monotone du quartier (figure 20), les besoins en chauffage sont calculés heure par heure pour un climat H1a (zone climatique de la RT 2012). Les besoins en ECS heure par heure sont ajoutés. L'aire sous la courbe représente les besoins totaux en kWh du quartier. La base de la courbe représente les besoins en ECS continus au cours de l'année. Le pic de la courbe illustre l'appel de puissance nécessaire lors de l'heure la plus froide de l'année du fichier météo.

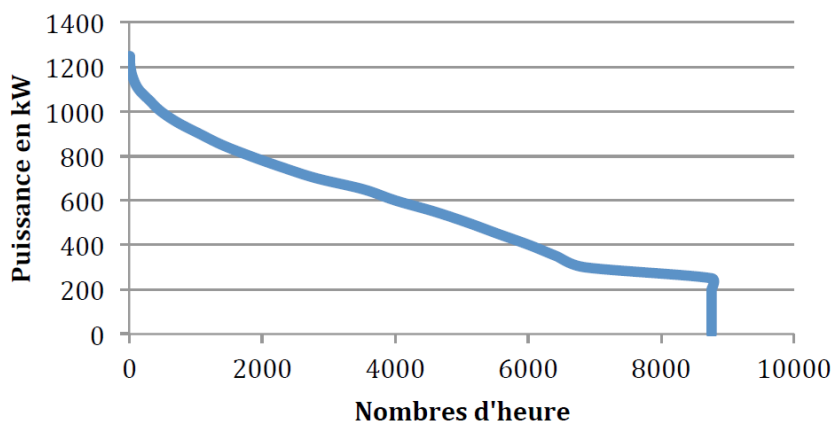


Figure 20 : Monotone du quartier de l'étude

4.5 - Dimensionnement de la pompe à chaleur et de l'appoint gaz

Pour dimensionner correctement l'installation, deux cas sont à prendre en compte :

- Cas été, production uniquement d'ECS : 270 kW,
- Cas hiver, production de chaleur et d'ECS.

Les pompes à chaleur ont une température de condensation 5°C plus élevée que la température de production d'eau chaude, soit 68°C . La température de l'évaporation est fixée par rapport à la température de la source froide. D'après l'étude réalisée sur la nappe, l'eau est pompée à 14°C et réinjectée à 7°C . Il faut donc évaporer 5°C en dessous de la température de réinjection de la nappe soit 2°C .

Avec ces données, il a été choisi d'installer 4 PAC similaires avec les caractéristiques suivantes :

- Puissance au condenseur : 284,1 kW,
- Puissance à l'évaporateur : 206,3 kW,
- Puissance électrique : 77,8 kW.

Une pompe à chaleur à elle seule couvre les besoins en ECS. En hiver, lors des périodes les plus froides, un complément de puissance est nécessaire de 142 kW. Cet appoint est réalisé par une chaudière gaz centralisée qui a aussi pour rôle de couvrir l'appel de puissance maximum soit 2546,7 kW hors coefficient de sécurité ou pertes du réseau. Un coefficient de sécurité de 1,2 peut être appliqué pour couvrir ces besoins, ce qui donne 3056 kW. La chaudière gaz doit être dimensionnée pour cette puissance.

D'après l'arrêté du 23 juin 1978 relatif aux installations de chaufferie et sous-station, la puissance calorifique maximale ne doit pas dépasser 5 MW si le local se trouve à l'extérieur des bâtiments ; dans le cas contraire, il faut prévoir un autre local. L'appoint ne doit pas être trop surdimensionné la puissance totale étant de 4192,4 MW ($4 \times 284,1 + 3056$).

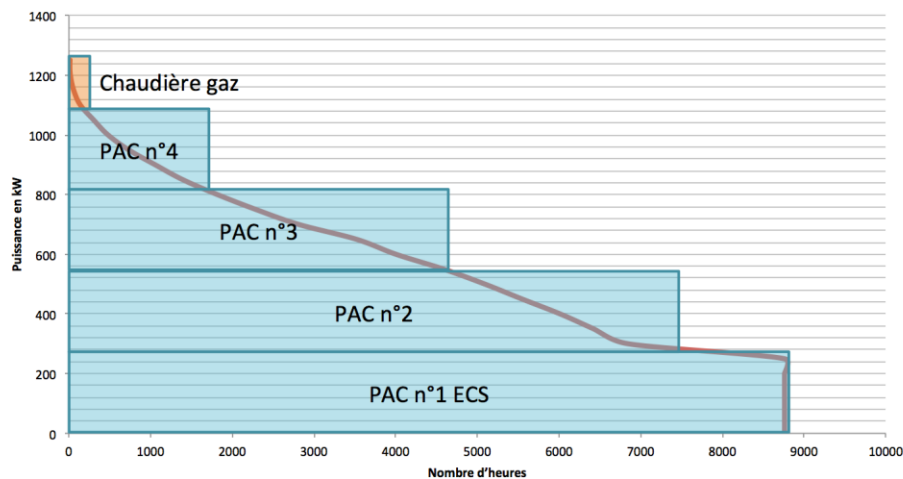


Figure 21: Monotone du quartier, couverture des besoins en ECS et chauffage

4.6 - Dimensionnement du réseau

Boucle primaire

La boucle primaire concerne tout ce qui est en amont des pompes à chaleur, soit les échangeurs sur le réseau d'assainissement et la boucle géothermale. La source froide entre dans l'évaporateur à 7°C et en sort à 4°C avec un débit de 56,1 m³/h pour chaque pompe à chaleur soit un débit total de 224,4 m³/h. La boucle géothermale est conçue pour un régime de température 14-7°C avec un débit de 90 m³/h.

Boucle secondaire

Le réseau de chaleur urbain ou boucle secondaire est constitué de trois tubes :

- Aller de l'ECS à 63°C,
- Aller du chauffage à 58°C,
- Retour commun à 45°C.

Les débits sur le réseau de chaleur urbain peuvent être calculés avec la puissance nécessaire donnée pour chaque bâtiment en chauffage et ECS, un coefficient de surpuissance de 1,20 est appliqué.

Les réseaux sont enterrés pour éviter le gel des canalisations au niveau des sous-stations et de la chaufferie, les circuits primaires et secondaires sont à l'eau glycolée à 30%. Les débits nous permettent de dimensionner les réseaux. Ces résultats sont présentés dans la note de calcul en « *Annexe : Dimensionnement de la boucle primaire et secondaire* ».

4.7 - Schéma de l'installation

Ce schéma se trouve en « *Annexe : Schéma de l'installation* ».

5 – Dimension de l'échangeur

D'après les résultats de la modélisation, la technologie proposée par Frank (voir paragraphe 3.3 de la ressource « *La cloacothermie ou l'énergie renouvelable des eaux usées* ») est la plus avantageuse. La position de l'échangeur en périphérie de la canalisation est représentée figure 22. Afin de dimensionner la surface d'échange, plusieurs paramètres sont à prendre en compte : il faut estimer le coefficient d'échange de la paroi, puis estimer la longueur utile de l'échangeur.

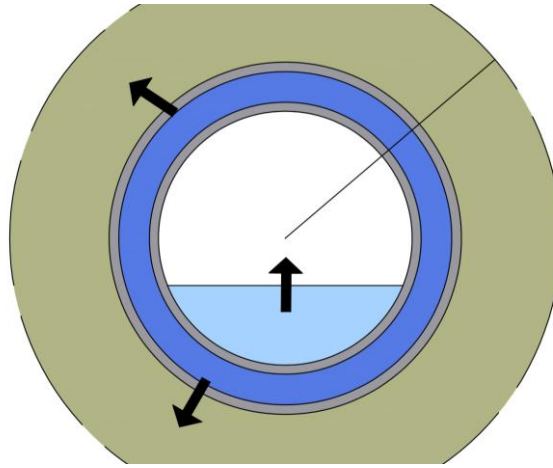


Figure 22: Schéma de l'échangeur

5.1 - Bilan des flux

Pour réaliser ce dimensionnement, trois flux sont à considérer :

- Le flux échangé entre les eaux usées et l'eau glycolée de l'échangeur,
- Le flux échangé entre l'air et l'eau glycolée de l'échangeur,
- Le flux échangé entre l'eau glycolée et le sol.

5.2 - Calcul du coefficient d'échange de la paroi

Résistance entre les eaux usées et l'eau glycolée

La résistance équivalente entre le nœud des eaux usées et de l'eau glycolée peut être calculée grâce à l'équation :

$$R_{EG-EU} = \frac{1}{h_{EU} \cdot P_{EU}} + \frac{1}{h_{EG} \cdot P_{EU}} + \frac{\ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right)}{k \cdot 2 \cdot \pi \cdot \lambda}$$

Elle dépend du coefficient de convection entre les eaux usées et la paroi de 454 W/K, de la résistance de la paroi de polyéthylène d'épaisseur 0,025 m, et du coefficient de convection entre l'eau glycolée et la paroi qui reste à déterminer.

Coefficient de convection entre l'eau glycolée et la paroi :

$$N_U = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{d_e}{d_i}\right)^{0,14}$$

Plusieurs corrélations peuvent être proposées pour estimer le coefficient de convection entre des tubes concentriques. Le choix s'est porté sur la corrélation suivante qui est valable pour ces conditions :

- Régime d'écoulement forcé,
- $10^4 < Re < 1,2 \cdot 10^5$,
- $0,7 < Pr < 100$.

Le fluide en périphérie circule à une vitesse de 2 m/s. Le nombre de Reynolds vaut alors 36000 et le nombre de Prandtl vaut 7,7. On obtient donc un coefficient de convection forcée de 1810 W/m².K et une résistance totale équivalente de 0,080 W/K.

Résistance entre l'air et l'eau glycolée

La résistance équivalente entre le nœud d'air et de l'eau glycolée dépend du coefficient de convection entre l'air et la paroi de 6,7 W/K, de la résistance de la paroi de polyéthylène d'épaisseur 0,025 m, et du coefficient de convection entre l'eau glycolée et la paroi de 1810 W/K

$$R_{EG-a} = \frac{1}{h_a \cdot P_a} + \frac{1}{h_{EG} \cdot P_a} + \frac{\ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right)}{k \cdot 2 \cdot \pi \cdot \lambda}$$

On obtient alors une résistance totale équivalente de 0,214 W/K.

Résistance entre le sol et l'eau glycolée

La résistance équivalente entre le sol et de l'eau glycolée dépend de la résistance de la paroi de polyéthylène d'épaisseur 0,010 m, et du coefficient de convection entre l'eau glycolée et la paroi de 1810 W/K.

$$R_{EG-sol} = \frac{1}{h_{EG} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1} + \frac{\ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda}$$

On obtient alors une résistance totale équivalente de 0,014 W/K.

5.3 - Longueur de l'échangeur

Hypothèses :

- La longueur disponible est de 50 m,
- L'eau glycolée entre à une température de 4°C,
- La température minimale du sol est de 5,5°C,
- La température des eaux usées est de 12°C
- La température minimale de l'air est de 8,3°C

Nous recherchons la température en sortie de l'échangeur, pour cela la température à chaque mètre est estimée par un bilan des flux (figure 23). Les calculs sont présentés dans « *Annexe : Dimensionnement de la boucle primaire et secondaire* ».

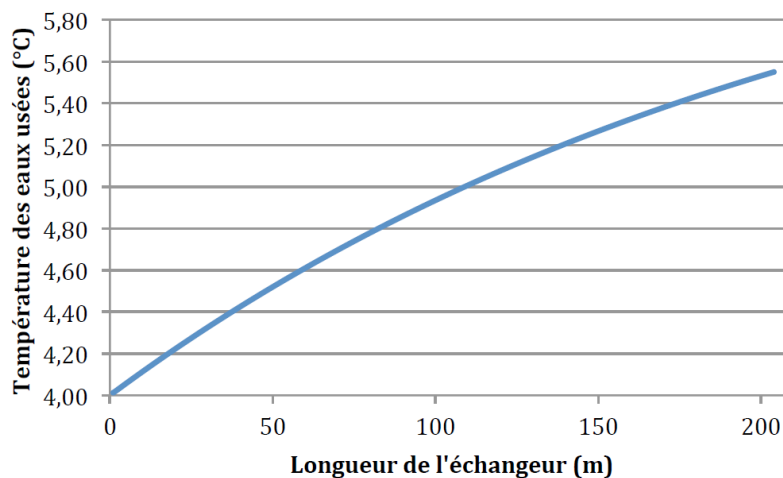


Figure 23: Evolution de la température dans l'échangeur

Plusieurs conclusions peuvent être tirées :

- Il faudrait 170 ml d'échangeur pour atteindre la température du sol et profiter à la fois de la chaleur du sol et des eaux usées. Au delà de cette température une partie du flux de chaleur est perdu dans le sol.
- Avec une longueur de 50 m on atteint une température de 4,52°C. On récupère donc une puissance de 9,95 kW.
- La température des eaux usées en sortie de l'échangeur est de 11,97°C. L'impact est donc minime sur les eaux usées.

5.4 - Estimation de la température de réinjection de la nappe

La température de réinjection dans la nappe peut être estimée à partir de la puissance récupérable sur les eaux usées et des besoins à l'évaporateur. La récupération de chaleur sur les eaux usées permet d'augmenter la température de réinjection de 0,08°C : ce qui est très faible.

Besoin évaporateur (kW)	825,20
Eaux usées (kW)	9,96
Besoin nappe (kW)	815,24
Température de réinjection (°C)	7,08

Figure 24 : Estimation de la température de réinjection dans la nappe

6 – Conclusion

Pour évaluer la pertinence de ce système, plusieurs études complémentaires devraient être mises en œuvre :

1. Etudier le potentiel de récupération des calories sur le collecteur unitaire existant : pour cela une campagne de mesure est nécessaire afin d'estimer le débit et la température réelle.
2. Estimer le coût de cette installation.
3. Estimer, par une nouvelle modélisation du forage géothermique, l'impact de cette solution sur l'appauvrissement de la nappe.

Plusieurs pistes d'améliorations sont envisageables :

- Diminuer la température de production de l'eau chaude en produisant de manière individuelle l'ECS. Ceci permettrait d'augmenter la différence de température entre les deux sources et donc d'améliorer le COP et diminuer les besoins à l'évaporateur.
- Placer l'échangeur dans le réseau existant pour profiter de débits plus importants.

Références :

[1]: Ministère de la cohésion des territoires, <http://www.ecoquartiers.logement.gouv.fr/>

[2]: http://www.cohesion-territoires.gouv.fr/IMG/pdf/ok-bat_5-12-2016-_rapport_jund_ecoquartier-48_pages.pdf

[3]: Mairie de Bois-Colombes, <http://www.bois-colombes.com>

[4]: Convention de Délégation de service public ZAC PLM : document programme, Ville de Bois-Colombes

[5]: Modélisation numérique de la nappe du Lutétien pour la production d'énergie par pompe à chaleur sur nappe, juin 2012, Rapport A66366/B, Antea Group, Agence de Paris Centre Normandie

[6]: Dürrenmatt, D. J., & Wanner, O. (2014). A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers. *Water Research*, 48, 548-558

[7]: Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H., 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press, New York.

[8]: Incropera, F.P., DeWitt, D.P., 2002. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley and Sons Inc., New York.

[9]: Etude d'approvisionnement énergétique complémentaire de la ZAC PLM, avril 2016, BURGEAP. <http://www.burgeap.fr/index.php/fr/>