



HAL
open science

Mise en place des échangeurs à chaleurs dans les égouts parisiens

Vivien Maillard

► **To cite this version:**

Vivien Maillard. Mise en place des échangeurs à chaleurs dans les égouts parisiens. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2014. dumas-01579666

HAL Id: dumas-01579666

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01579666>

Submitted on 5 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Vivien Maillard

Formation en apprentissage

3^{ème} année

11/08/2014

Travail de Fin d'Etude
Mise en place d'échangeur à chaleur
Dans les égouts parisiens



Maître d'apprentissage	Tuteur école
Monsieur Ferrandez	Monsieur Finaud-Guyot et Monsieur Wittner

Remerciements :	7
Résumé :	8
Abstract:	8
Abréviation	9
Introduction:	10
1 Récupération de chaleur	11
1.1 Etat des lieux et réglementation	11
1.1.1 <u>Lieux possibles de récupération thermique</u>	11
1.1.2 <u>Réglementation</u>	14
1.2 Principe de fonctionnement	15
1.2.1 <u>Récupération de chaleur dans les collecteurs</u>	16
1.2.2 <u>Récupération des calories présentes dans les eaux usées</u>	16
1.2.3 <u>Transport de l'énergie jusqu'à la chaufferie</u>	17
1.2.4 <u>La pompe à chaleur (PAC) : le cœur de la récupération de l'énergie des eaux usées</u>	18
1.2.5 <u>Le réseau de chauffage</u>	19
2 Choix des sites	21
2.1 Description des ouvrages et des bâtiments	21
2.1.1 <u>Collecteur de Clichy</u>	21
2.1.2 <u>Ecole de Clichy</u>	22
2.1.3 <u>Les données du collecteur de la Chapelle</u>	23
2.1.4 <u>Piscine Hébert</u>	24
2.2 Le fonctionnement hydraulique des collecteurs de Clichy et de la Chapelle	30
2.2.1 <u>Cas de temps sec</u>	30
2.2.2 <u>Synthèse des résultats</u> :	31
2.2.3 <u>Cas en temps de pluie (6 mois)</u>	31
2.2.4 <u>Résultat</u> :	33
2.2.5 <u>Cas du temps sec du collecteur de la Chapelle</u>	34
2.2.6 <u>Cas en temps pluie (6mois)</u>	35
2.2.7 <u>Résultat</u>	36
2.3 Fonctionnement du chauffage	37
2.3.1 <u>L'école de Clichy</u>	37
2.3.1.1 <u>Détail des formules et hypothèses</u>	37
2.3.1.2 <u>Calcul du nombre de DJU</u>	38
2.3.2 <u>Donnée sur la consommation de chauffage</u> :	38
2.3.2.1 <u>Calcul de la puissance appelée</u>	39
2.3.3 <u>Présentation des graphiques</u>	39
2.3.3.1 <u>La consommation mensuelle de l'école de Clichy</u>	39
2.3.3.2 <u>Puissance appelée mensuelle</u>	40
2.3.4 <u>La piscine Hébert</u>	40
2.3.4.1 <u>Détail des formules et hypothèses</u>	40
2.3.4.2 <u>Calcul du nombre de DJU</u>	41

2.3.4.3	<u>Donnée sur la consommation de chauffage</u>	41
2.3.4.3.1	<u>Calcul Q (eau chaude sanitaire)</u>	41
2.3.4.3.2	<u>Calcul Qréchauffage du bassin</u>	42
2.3.4.3.3	<u>Calcul Qchauffage :</u>	42
2.3.4.4	<u>Calcul des puissances appelées</u>	43
2.3.5	<u>Interprétation graphique</u>	43
3	<u>Mise en œuvre</u>	45
3.1	<u>Dimensionnement des échangeurs à chaleur</u>	45
3.1.1	<u>Principe de dimensionnement des échangeurs à plaque</u>	45
3.1.1.1	<u>Etape1 : Evaluation du coefficient de convection</u>	45
3.1.1.2	<u>Etape 2 :Choix du module</u>	46
3.1.1.3	<u>Etape 3 : Evaluation du nombre d'unité de transfert</u>	47
3.1.1.4	<u>Etape 4 : Evaluation de l'efficacité de l'échangeur</u>	47
3.1.1.5	<u>Etape 5 : Détermination du nombre de module</u>	48
3.1.1.6	<u>Etape 6 : Calcul du nombre de passe</u>	49
3.1.1.7	<u>Etape 7 : Calcul de la puissance cédée par les échangeurs</u>	49
3.1.2	<u>Dimensionnement d'un échangeur à chaleur coaxial</u>	49
3.1.2.1	<u>Etape1 :Evaluation du coefficient de convection</u>	49
3.1.2.2	<u>Etape 2 :Choix du module</u>	50
3.1.2.3	<u>Etape 3 : Evaluation du nombre d'unité de transfert</u>	50
3.1.2.4	<u>Etape 4 :Evaluation de l'efficacité de l'échangeur</u>	51
3.1.2.5	<u>Etape 5 : Détermination du nombre de module</u>	51
3.1.2.6	<u>Etape 6 : Calcul de la puissance cédée par les échangeurs</u>	52
3.1.3	<u>Etude de cas de la piscine Hébert et Ecole de Clichy</u>	53
3.1.4	<u>Résultat</u>	55
3.1.5	<u>A retenir</u>	56
3.2	<u>Mise à sec des collecteurs</u>	56
3.2.1	<u>Etude de mise à sec du collecteur de Clichy</u>	56
3.2.1.1	<u>Consigne de travaux</u>	56
3.2.1.2	<u>Caractéristique des bassins versants</u>	57
3.2.1.3	<u>Méthodologie</u>	58
3.2.1.4	<u>Débit de temps sec</u>	59
3.2.1.4.1	<u>Détermination des débits de temps sec</u>	59
3.2.1.5	<u>Débit de temps pluie</u>	59
3.2.1.5.1	<u>Pluie projet</u>	59
3.2.1.5.2	<u>Sélection des pluies</u>	60
3.2.1.6	<u>Mise en place des déviations amonts</u>	61
3.2.1.7	<u>Partie du collecteur: entre le collecteur de la Victoire et la Place de Clichy : 1024 m</u>	62
3.2.1.8	<u>De l'aval de la rue de Londres à la Place de Clichy</u>	63
3.2.2	<u>Etude de la mise à sec du collecteur la Chapelle</u>	64
3.2.2.1	<u>Consigne travaux</u>	64
3.2.2.2	<u>Caractéristique des bassins versants</u>	65
3.2.2.3	<u>Méthodologie</u>	65
3.2.2.4	<u>Etude du temps sec pour le collecteur de la Chapelle</u>	66
3.2.2.4.1	<u>Les hypothèses de calculs :</u>	67
3.2.2.4.2	<u>Résultat</u>	68
3.2.2.5	<u>Etude du débit de temps de pluie</u>	68

3.2.2.5.1	Création d'une pluie	68
3.2.3	Etude de la première solution : barrage vers l'intercepteur du collecteur Coteaux-La Chapelle	71
3.2.4	Etude de la seconde solution : un barrage vers l'intercepteur du collecteur Coteaux – La chapelle et un barrage vers le boulevard Ordener en faisant un pompage de relevage	73
3.2.5	A retenir pour la mise à sec :	74
3.3	Mise en place des échangeurs à chaleurs.....	74
3.3.1	Prescription générale	74
3.3.1.1	Prescriptions liées à l'échangeur	74
3.3.1.2	Mise en œuvre du réseau de transport d'énergie	74
3.3.1.3	Raccordement du réseau au bâtiment.....	74
3.3.1.4	Description de l'installation.....	75
3.3.1.4.1	Ecole de Clichy :	75
3.3.1.4.2	Piscine Hébert :	76
3.4	L'exécution des travaux :	76
4	Bilan énergétique et économique	79
4.1	Le coefficient de performance du système	79
4.1.1	Calcul de la COP machine.....	79
4.2	Le bilan énergétique des deux bâtiments chauffés par la pompe à chaleur	80
4.3	Le coût des travaux.....	83
5	Conclusion :	85
Annexe 1 : Caractéristique de la pompe à chaleur E-WMHW-R410A		87
Annexe 2 : Création d'un CD-Rom		89
Annexe 3 : Courbes Hauteurs d'eau et Vitesses.....		90

Table des Figures

Figure 1:	Les différentes sources de chaleur. Source: ADEME	11
Figure 2:	Hôtel CUB à Bordeaux. Source : Lyonnaise des eaux-Degré Bleu.....	12
Figure 3:	Mairie de Valenciennes. Source : Lyonnaise des eaux- Degré Bleu.....	13
Figure 4 :	Piscine Levallois (Source: Lyonnaise des eaux-Degré bleu)	14
Figure 5 :	Récupération de chaleur dans les collecteurs (source Suisse Energie).....	16
Figure 6:	En coupe : canalisation avec échangeur thermique et fluide caloporteur. Source : Ville de Paris	17
Figure 7:	Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur. Source : Raphaël Arnaud.....	18
Figure 8 :	Schéma de principe de basse et haute température. Source : Suisse Energie	20
Figure 9:	Coupe du collecteur Clichy	21
Figure 10:	Position de l'école élémentaire de Clichy Source: géoportail	22
Figure 11:	Coupe du collecteur de la Chapelle	24
Figure 12:	Position de la Piscine Hébert à Paris. Source : Géoportail.....	24
Figure 13:	Courbe débit temps collecteur de la Chapelle.....	30
Figure 14:	Courbe de débit dans le collecteur de Clichy temps de pluie.....	32
Figure 15:	Ensablement dans le collecteur de Clichy.....	34

Figure 16: Courbe débit temps sec du collecteur la Chapelle	34
Figure 17: Courbe des débits du collecteur de la Chapelle en temps de pluie	36
Figure 18: Quantité chauffage de l'école de Clichy en kW.h	39
Figure 19: Histogramme puissance appelée pour l'école de Clichy.....	40
Figure 20: Répartition des besoins de la piscine Hébert	44
Figure 21: Histogramme Puissance appelée de la piscine Hébert	44
Figure 22: Carte de mise à sec du collecteur de Clichy Source : Ville de Paris	64
Figure 23: Courbe intensité (mm/h)	69
Figure 24: Hyétoqramme de la pluie 1 mois	70
Figure 25: Carte de mise à sec collecteur la Chapelle source: Ville de Paris	72
Figure 26: Carte de mise à sec de la deuxième solution.....	73
Figure 27: Courbe hauteur d'eau temps sec Clichy	90
Figure 28: Courbe vitesse dans le collecteur de Clichy temps sec.....	90
Figure 29: Courbe hauteur d'eau dans le collecteur de Clichy temps de pluie	90
Figure 30: Hauteur d'eau du collecteur de Clichy.....	91
Figure 31: Courbe vitesse du collecteur de la Chapelle en temps sec.....	91
Figure 32: Hauteur d'eau du collecteur la Chapelle	91
Figure 33: Courbe de vitesse du collecteur de la Chapelle en temps de pluie	92

Table des tableaux

Tableau 1: Informations générales. Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert	25
Tableau 2 : Horaire fréquentation. Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert	25
Tableau 3: Fréquentation et consommation 2012 Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert.....	25
Tableau 4 : Production de chaleur. Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert	26
Tableau 5 : Panoplie hydraulique. Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert	27
Tableau 6 : Eau chaude sanitaire. Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert	28
Tableau 7: Distribution d'eau chaude sanitaire Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert.....	29
Tableau 8: Synthèse des résultats Clichy temps sec.....	31
Tableau 9: Synthèse des résultats dans le collecteur de Clichy par temps de pluie.....	33
Tableau 10: Synthèse des résultats en temps sec du collecteur de la Chapelle.....	35
Tableau 11: Synthèse des résultats du collecteur de la Chapelle.....	36
Tableau 12: Volume du bâtiment	37
Tableau 13: Nombre de DJU mensualisé pour l'école de Clichy.....	38
Tableau 14: Puissance moyenne appelée Clichy	40
tableau 15: Nombre de DJU pour la piscine Hébert	41
Tableau 16: Hypothèse des effluents	53
Tableau 17: Hypothèse des échangeurs à chaleur	54
Tableau 18: Hypothèse d'entrée du Solveur Excel	54
Tableau 19: Résultats des différents sites	55

<u>Tableau 20 : Récapitulatif pour le dimensionnement des échangeurs à chaleurs</u>	56
<u>Tableau 21: Des bassins versants et des collecteurs Source : SEGIC</u>	58
<u>Tableau 22: temps sec du collecteur Clichy Amont Source : SEGIC</u>	59
<u>Tableau 23: Echantillons des pluies sélectionnées Source: SEGIC</u>	61
<u>Tableau 24: Sélection du bassin versant Source: SEGIC</u>	63
<u>Tableau 25: Hypothèse de calcul pour le temps sec</u>	67
<u>Tableau 26: Calcul de temps sec</u>	68
<u>Tableau 27: Intensité (mm/h)</u>	69
<u>Tableau 28: Création de la pluie Chicago</u>	70
<u>Tableau 29: Débit pluie en incluant tous les bassins versants</u>	71
<u>Tableau 30: Débit 1 mois avec Dérivation (chapelle-coteaux)</u>	72
<u>Tableau 31: Débit 1 mois de la 2ème solution</u>	73
<u>Tableau 32: température du fluide caloporteur entrée</u>	79
<u>Tableau 33: COP machine pour chaque projet</u>	80
<u>Tableau 34: COP système annuel pour chaque projet</u>	80
<u>Tableau 35: consommation annuelle électrique</u>	81
<u>Tableau 36: consommation annuelle</u>	82
<u>Tableau 37: Emission de gaz à effet de serre Piscine Hébert plaque à chaleur</u>	82
<u>Tableau 38: Coûts des Travaux</u>	84

Remerciements :

J'exprime toute ma gratitude et mes remerciements aux personnes de la division des Grands Travaux de la Ville de Paris et aux professeurs de L'ENGEES pour leur soutien apporté durant ces quatre années de formation.

Résumé :

En hiver, il est courant de voir l'air chaud se dégager des bouches d'égout et constituer de ce fait un énorme potentiel énergétique à la fois non récupéré et inexploité.

L'extraction de chaleur issue des eaux usées est aujourd'hui possible grâce à un système novateur développé depuis plus de dix ans par la société suisse Rabtherm et en France par la Lyonnaise des Eaux (degré-bleu).

Le système comprend un échangeur de chaleur en acier inoxydable installé à l'intérieur de l'égout, une conduite de transfert de chaleur vers le bâtiment et une pompe à chaleur, combinés dans la plupart des projets, au système de chauffage de pointe nécessaire pour des températures inférieures à 0°C.

Dans la présente étude de faisabilité, les échangeurs thermiques sont des plaques à chaleur et des tubes coaxiaux. Les bâtiments utilisés sont deux bâtiments municipaux : l'école de Clichy et la Piscine Hébert. Les eaux usées des collecteurs de Clichy et de la Chapelle fournissent l'énergie pour chauffer les deux bâtiments. Les échangeurs thermiques sont dimensionnés pour récupérer l'énergie calorifique des eaux usées dans les collecteurs parisiens et pour le chauffage.

L'intérêt du procédé est double : permettre l'économie d'énergie et limiter l'émission des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère.

Abstract:

In winter it is common to see the hot air vents clear of sewage and a huge potential of energy is therefore lost both untapped and not recovered. The extraction of heat from wastewater is now possible thanks to an innovative system developed ten years ago by the Swiss company Rabtherm and in France by la Lyonnaise des Eaux.

The system includes a heat exchanger in stainless steel inside the sewer, a transfer of heat to the building used in combination with a heat pump, in most projects heating peak required for temperatures below 0°C.

In this feasibility study, the heat exchangers are plate heat and coaxial tubes. Buildings used are two municipal school buildings in Clichy School and Pool Hébert. Wastewater collectors Clichy and Chapel provide energy to heat the two buildings. Heat exchangers are designed to recover heat energy from wastewater collectors in Paris and for heating.

The interest is a twofold process: You can save energy and reduce the emission of greenhouse gases (GES) in the atmosphere. The establishment of such a process in the Paris area is possible through special arrangements in the sewage systems

Abréviation

COP : Coefficient de performance

CPCU : Compagnie parisienne de chauffage urbain

DGT : Division des Grands Travaux

DJU : Degré jour unifié

ECS : Eau chaude sanitaire

G : Déperdition volumique

Nu : Nombre de Nusselt

NUT : Nombre d'unité de transfert

PAC : Pompe à chaleur

Introduction:

Les dégagements de vapeur chaude constatés en hiver au droit des bouches d'égout du réseau d'assainissement sont la traduction d'un gisement énergétique.

Le profil thermique des eaux usées circulant dans les réseaux d'assainissement (entre 10 et 20°C) est plus chaud que l'air extérieur et peut être exploité pour les besoins de chauffage.

Ce procédé connaît depuis une dizaine d'année un fort développement en Suisse, en Allemagne, en Autriche et aux Etats-Unis. Il se compose d'un échangeur de chaleur installé dans le réseau d'assainissement, d'un circuit caloporteur et d'une pompe à chaleur.

Dans un contexte où les enjeux nationaux portent principalement sur la maîtrise des dépenses énergétiques et la protection de l'environnement, ce système présente un double intérêt d'économie d'énergie grâce à la pompe à chaleur et de réduction des gaz à effet de serre (GES).

L'objet du rapport est d'étudier la faisabilité de ce procédé de récupération de chaleur dans deux collecteurs d'assainissement parisien pour fournir le chauffage de deux équipements publics.

Dans ce projet, nous allons développer les aspects suivants :

- La récupération de chaleur
- Le choix des sites avec le fonctionnement en chauffage des bâtiments et le fonctionnement des collecteurs
- La mise en œuvre : l'implantation en égout, le dimensionnement des échangeurs à chaleur, la mise à sec des collecteurs et l'exécution des travaux
- Le bilan énergétique et économique des différents projets

1 Récupération de chaleur

1.1 Etat des lieux et réglementation

D'après l'ADEME, Les premières installations suisses datent d'une dizaine d'année. Elles exploitent le potentiel énergétique contenu dans les eaux usées, qui est renouvelable. La technologie actuelle permet de chauffer les bâtiments en exploitant la chaleur issue des eaux usées. Il faut installer un échangeur de chaleur dans les collecteurs et utiliser la chaleur ainsi récupérée comme source d'énergie par une pompe à chaleur (PAC). La récupération de la chaleur dans les réseaux d'assainissement est pratiquée à Berlin et à Oslo pour alimenter d'importants réseaux de chauffage à distance.

1.1.1 Lieux possibles de récupération thermique

Deux rapports « Evaluation du potentiel de récupération d'énergie thermique dans les réseaux d'assainissements de la région Provence-Alpes-Côtes-d'Azur » de l'Ademe et celui de Raphaël Arnaud « Récupération des eaux de sortie de station d'épuration pour le chauffage des locaux du SIVOM » ont servi de référence. L'énergie des eaux usées peut être récupérée à de nombreux endroits : dans les stations d'épuration, dans les collecteurs du réseau d'assainissement (ouvrages assurant la collecte et le transport des eaux usées : canalisations, conduites,) et dans des bâtiments ayant une forte consommation d'eau, comme l'illustre la figure 1 suivante :

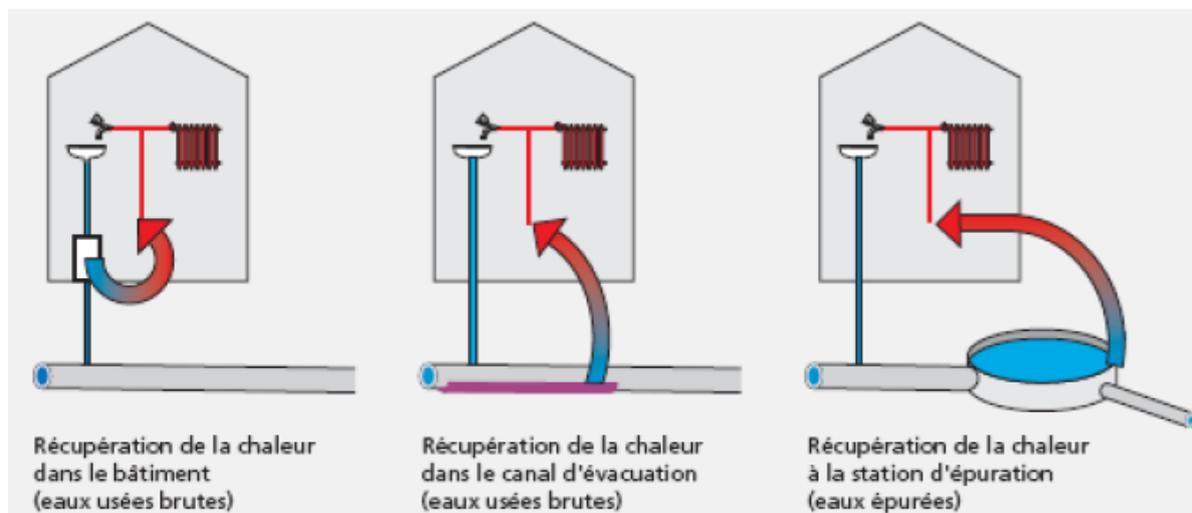


Figure 1: Les différentes sources de chaleur. Source: ADEME

Dans le cadre de ce projet, on s'intéresse à la récupération de chaleur à l'intérieur des collecteurs parce que le réseau parisien est composé de collecteurs.

Nous présentons ci-après les informations collectées concernant les réalisations suisses :

- Binningen, canton de Bâle : 330 kW pour chauffage et ECS : la société Wärmeverorgung Binningen SA exploite cinq réseaux de chauffage à distance et approvisionne quelques 70 immeubles en énergie. Parmi ceux-ci, des bâtiments publics, comme l'administration communale et une école, mais aussi des maisons d'habitation représentant un total de 600 appartements. L'exploitation des eaux usées s'effectue sur un collecteur cantonal auquel sont raccordées quelque 30 000 personnes. L'échangeur de chaleur de 140 m de long aménagé dans la canalisation se compose de 47 éléments et dispose d'une puissance de transfert de 330 kW.

- Chésière, canton de Vaud : échangeur de 35m² assurant une puissance minimum de 50 kW + PAC de 70 kW pour chauffer un complexe immobilier constitué de quatre immeubles de vacances et d'une piscine extérieure.

Nous présentons ci-après l'ensemble de quelques sites réalisés en France. La Suisse est plus avancée que nous, avec une trentaine de sites. A l'avenir, les eaux usées seront de plus en plus utilisées parmi les énergies renouvelables.

- Bordeaux (33) : la Communauté urbaine envisage de chauffer l'hôtel de communauté existant et le nouveau bâtiment de la CUB grâce aux eaux usées dont la température moyenne est de 16°C. La CUB estime ainsi pouvoir économiser 4 tonnes de CO₂ par an ainsi que 750000 euros de frais de fonctionnement au bout de 15 ans. Les travaux qui comprennent la réalisation d'un échangeur de 200 mètres de long sont estimés à 1,5 million €. Les échangeurs assurent le chauffage et le refroidissement (Récapitulatif figure 2)

Caractéristiques techniques :

- Circulaire **2500 mm**
- Débit **140 l/s**
- Puissance fournie par l'échangeur : **640 kW** (chauffage)
- Puissance dissipée par l'échangeur : **1050 kW** (refroidissement)
- Longueur d'échangeur : **200 m**

Bénéfices :

- Economique d'exploitation: **28 k€ de diminution annuelle de la facture énergétique (50% d'économie)**



Figure 2: Hôtel CUB à Bordeaux. Source : Lyonnaise des eaux-Degré Bleu

- Valenciennes (59) : les calories des eaux usées sont récupérées grâce à un échangeur de chaleur placé dans la canalisation pour chauffer l'Hôtel de Ville (Bâtiment administratif de 8500 m² ; Besoin annuel 1300 MWh/an pour 5500 heures de chauffe par an) :

- Puissance de la pompe à chaleur : 300 kW, soit 1000 MWh fournis/an (Débit de 120 m³/heure d'eaux usées) ;
- Couverture des besoins énergétiques : 77% des besoins totaux, 90% des Besoins en basse température. (Récapitulatif figure 3).

Caractéristiques techniques :

- Pseudo Ovoïde **2000 x 2000 mm**
- Débit **33 l/s**
- Puissance fournie par l'échangeur : **225 kW**
- Longueur d'échangeur : **84 m**

Bénéfices :

- Economique : **45 k€ de diminution annuelle de la facture énergétique**
- Environnemental : **63% de réduction d'émission de CO₂**



Figure 3: Mairie de Valenciennes. Source : Lyonnaise des eaux- Degré Bleu

-Levallois-Perret (92) : depuis fin novembre 2009, 80 m d'égouts d'une des rues de la ville ont été aménagés et une pompe à chaleur électrique installée dans la chaufferie de sa nouvelle piscine. Le centre nautique consomme environ 3600 MWh par an et la nouvelle installation Degrés Bleus vient en complément du système de chauffage actuel en fournissant environ 800 MWh, permettant de couvrir environ 90 % des besoins liés au maintien en température des bassins. Toutes ces données sont précisées dans la figure 4.

Caractéristiques techniques :

- Ovoïde **T180/100**
- Débit **15 l/s**
- Puissance fournie par l'échangeur : **90 kW**
- Longueur d'échange : **80 m**



Bénéfices :

- Economique : **48 k€ de diminution annuelle de la facture énergétique**
- Environnemental : **66% de réduction d'émission de CO2**

Figure 4 : Piscine Levallois (Source: Lyonnaise des eaux-Degré bleu)

1.1.2 Réglementation

La loi Programme des Orientations de la Politique Energétique du 13 juillet 2005 (loi POPE) a défini les objectifs et grandes orientations de la politique énergétique de la France et complète la législation par des mesures de la maîtrise de l'énergie et des énergies renouvelables en mettant en place de nouveaux outils comme une réduction de l'intensité énergétique finale de 2% par an d'ici à 2015 et 2,5% d'ici à 2030. Des incitations ont été mises en place par le gouvernement : dispositif de certificats d'économies d'énergie, obligation de fournir un diagnostic de performance énergétique à la construction.

Les collectivités locales doivent intervenir dans le domaine de la maîtrise de l'énergie par l'utilisation d'énergie renouvelable telle que le procédé de récupération des calories des eaux usées et ainsi apporter leur soutien à un objectif international d'une division par 2 des émissions mondiales des gaz à effet de serre d'ici à 2050.

"Promouvoir la sobriété énergétique, économiser les ressources et lutter contre les changements climatiques" est le premier axe d'action de l'Association des Maires de France dans la Charte des Maires pour l'Environnement de Novembre 2007. Le recours aux énergies alternatives et renouvelables est un axe d'action identifié.

La Directive 2009/28/CE du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables donne comme objectif pour 2020 :

- 20% d'émissions de gaz à effet de serre en moins,
- 20% d'économie d'énergie,
- 20% d'énergie renouvelable.

Aujourd'hui, l'objectif est de diminuer l'émission de CO₂, ceci permet de réduire le gaz à effet de serre.

Il n'existe pas à ce jour en France de dispositif législatif ou réglementaire spécifique aux installations de récupération de chaleur dans les réseaux d'assainissement.

Pour intégrer ce type de projet dans les contrats d'exploitation déjà en cours, le propriétaire de la canalisation doit généralement compléter le contrat le liant à l'exploitant du réseau pour pouvoir mettre en place l'échangeur, et en parallèle établir un protocole de mise à disposition du réseau avec

le propriétaire du bâtiment raccordé. Ce dernier doit compléter le contrat d'exploitation de sa chaufferie pour intégrer les nouveaux équipements puis réaliser un contrat d'entretien de l'échangeur avec l'exploitant du réseau d'assainissement.

La plupart des installations de chauffage fonctionnant à partir des eaux usées est réalisée sur la base d'une contractualisation entre les parties qui fixent les modalités de la fourniture d'énergie, le régime de propriété et les limites de responsabilité dans des bâtiments publics ou privés.

La durée du contrat correspond à la durée de vie assurée de l'installation, qui varie de 15 à 30 ans. Le propriétaire de l'immeuble confie alors l'approvisionnement énergétique à une entreprise spécialisée. C'est elle qui conçoit, construit, finance, exploite et entretient les installations. Toutes ces prestations sont comprises dans le prix de la chaleur fournie et facturée au client. Le maître d'ouvrage n'a pas d'investissement à sa charge.

1.2 Principe de fonctionnement

Dans les zones urbaines et périphériques, les eaux circulent dans les réseaux d'assainissement avec une température entre 13°C et 20°C. En hiver, les eaux sont plus chaudes que l'air extérieur ainsi la chaleur peut être récupérée pour le chauffage de bâtiment. En été, on peut effectuer l'inverse. C'est à dire faire du froid (climatisation).

La récupération de chaleur s'effectue par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur couplé à une pompe à chaleur.

Ce procédé demande beaucoup d'investissements. L'installation sera rentable à condition d'avoir une puissance minimale de 150 kW et d'être à proximité d'une station d'épuration ou d'une conduite exploitable.

La valorisation énergétique des eaux usées pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude sanitaire nécessitent une installation comprenant des échangeurs de chaleur, une pompe à chaleur et le plus souvent une chaudière de pointe. La chaleur utile consommée se compose typiquement comme suit :

- Production de chaleur des eaux usées : 57%.
- Production d'électricité de la pompe à chaleur (coeff. de perf. (COP) de 3,5) : 23%. La performance énergétique d'un climatiseur ou d'une pompe à chaleur se traduit par le rapport entre la quantité de chaleur produite par celle-ci et l'énergie électrique consommée par le compresseur. Ce rapport est le coefficient de performance (COP) de la pompe à chaleur. Plus le chiffre est élevé, plus le système est performant. Le plafond est actuellement de 7.
- Production de chaleur de la chaudière de pointe : 20%.

Dans ce contexte, le coût global du kWh thermique sera d'autant plus intéressant que le potentiel de récupération de chaleur dans les eaux usées sera important et que la distance entre les échangeurs et les utilisateurs sera réduite.

1.2.1 Récupération de chaleur dans les collecteurs

Ce système a l'avantage de pouvoir se situer proche des sources de chaleur (collecteurs).

Les collecteurs principaux présentent dans la plupart des cas un potentiel intéressant de récupération et une pompe à chaleur permet d'augmenter l'énergie calorifique fournie par les échangeurs. Ce procédé permet d'alimenter un chauffage à distance. Comme la figure 5 le présente :

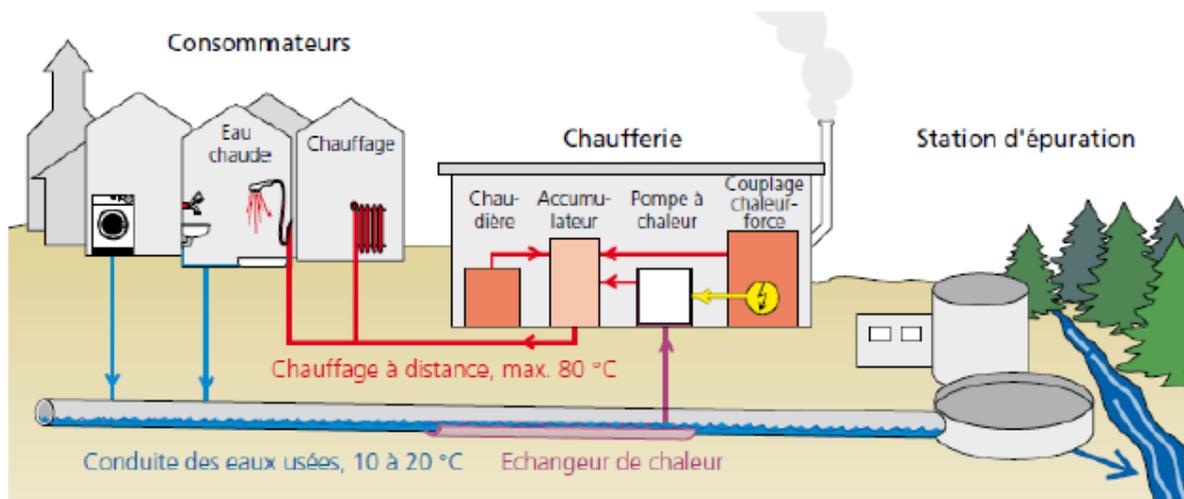


Figure 5 : Récupération de chaleur dans les collecteurs (source Suisse Energie)

1.2.2 Récupération des calories présentes dans les eaux usées

Principe :

La température des eaux usées (12-15°C) n'est pas suffisante pour être valorisée. Cette chaleur, récupérée à travers un échangeur par un fluide caloporteur est insuffisante pour être utilisée seule pour le chauffage. L'ajout d'une pompe à chaleur permet d'obtenir une température de l'ordre de 65°C utilisable par exemple pour chauffer des bâtiments. L'échangeur évite tout risque de mélange entre eaux usées et fluide caloporteur et permet de respecter l'environnement. Ce système est réversible : l'hiver la température des canalisations étant plus chaude que l'air ambiant, on l'utilise comme chauffage tandis que l'été la température des canalisations étant plus froide que l'air ambiant, on l'utilise comme rafraîchissement, voire comme climatisation. Le procédé utilisé est simple et met en œuvre : un échangeur pour capter l'énergie dans les eaux usées, une pompe à chaleur qui refroidit ou chauffe selon la saison les bâtiments existants.

Ce système de récupération de calories des eaux usées a été mis au point par la société suisse Rabtherm®. Il permettrait de réduire les émissions de gaz carbonique (CO₂) de 30 à 85%. La chaleur récupérée dans les égouts dépasse largement le potentiel d'autres formes d'énergies renouvelables comme le bois, la biomasse ou le solaire. En effet, les eaux usées sont une source inépuisable d'énergie, pouvant être exploitée directement sur place car les échangeurs sont installés au niveau des canalisations.

L'échangeur de chaleur collecte l'énergie via un liquide caloporteur. Il peut être aussi bien intégré dans des canalisations d'égouts existants. Lors de rénovations, il est utilisé de plus en plus souvent des canalisations préfabriquées avec échangeur de chaleur intégré. Cette solution réduit à la fois le temps d'installation et l'investissement.

La puissance dépend en grande partie du débit et de la température de l'effluent dans le collecteur, ainsi que de la forme et de la pente de la canalisation.

1.2.3 Transport de l'énergie jusqu'à la chaufferie

Le réseau caloporteur transporte les calories récupérées jusqu'à la chaufferie où se trouve la pompe à chaleur. Il s'agit d'un circuit fermé avec une pompe de circulation. La figure 6 montre la canalisation en coupe et permet de voir l'échangeur thermique et le fluide caloporteur (schéma Ville de Paris®).

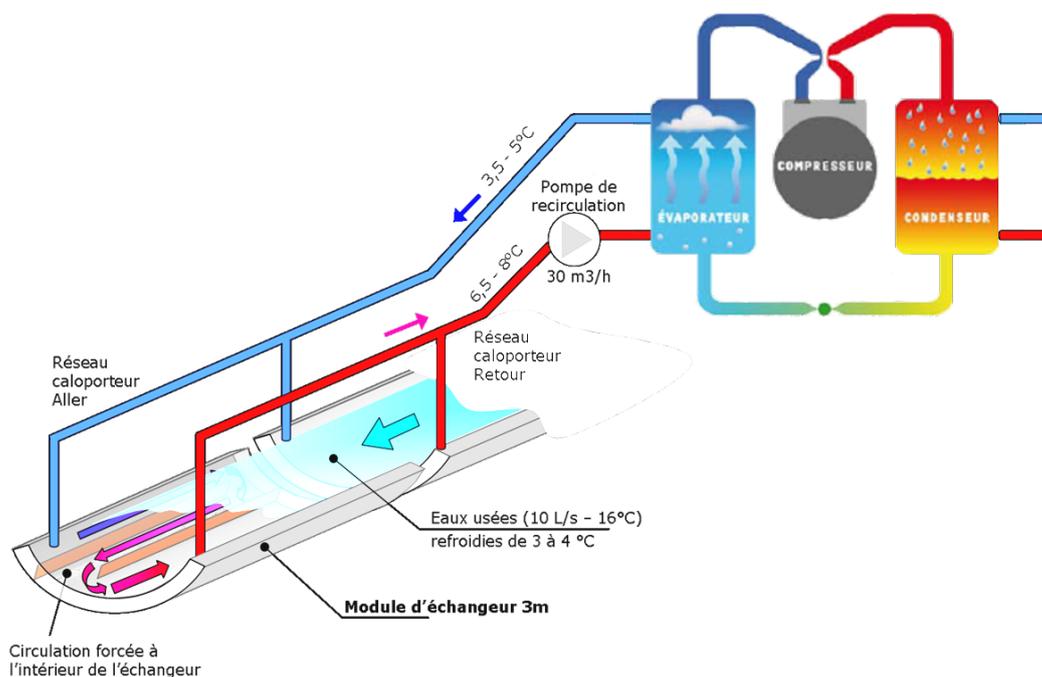


Figure 6: En coupe : canalisation avec échangeur thermique et fluide caloporteur. Source : Ville de Paris

1.2.4 La pompe à chaleur (PAC) : le cœur de la récupération de l'énergie des eaux usées

La température des eaux usées n'est pas suffisante pour être valorisée telle quelle. Une pompe à chaleur est indispensable pour l'élever à un niveau exploitable. La pompe à chaleur permet d'augmenter la température pour obtenir une eau d'environ 65°C. La figure 7 montre le principe de fonctionnement de la pompe à chaleur eau-eau.

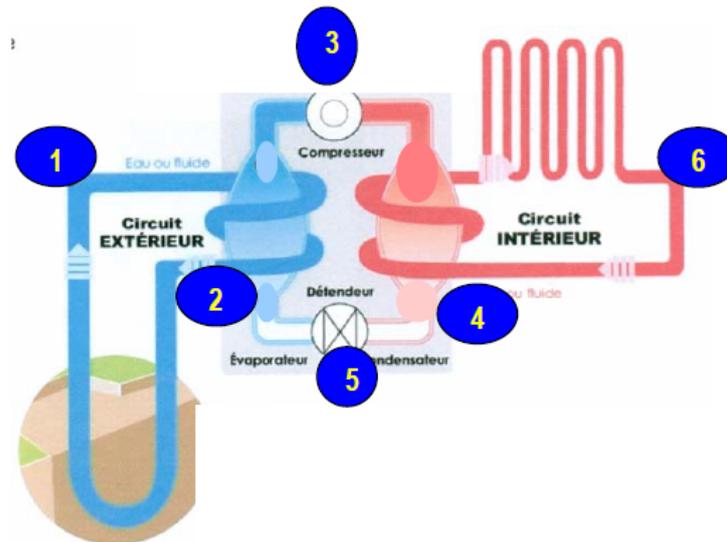


Figure 7: Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur. Source : Raphaël Arnaud

Les différentes étapes :

1. Les calories des eaux usées captées par l'échangeur sont récupérées par le liquide caloporteur. La pompe à chaleur fait passer un "fluide frigorigène" par différents états et températures.
2. Au niveau de l'évaporateur, la chaleur prélevée du liquide caloporteur est transmise au fluide frigorigène alors à l'état liquide. La température du fluide augmente et se transforme en vapeur (comme de l'eau qui bout lorsqu'elle est portée à température élevée).
3. Cette vapeur est aspirée par le compresseur actionné par un moteur électrique puis comprimé sous haute pression. Le fluide gazéifié atteint une température de l'ordre de 90°C.
4. Dans le condenseur, le fluide gazéifié cède alors sa chaleur par exemple à un circuit de chauffage (6) revenant ainsi à l'état liquide.
5. Le fluide passe ensuite dans un détendeur, revient à un niveau de basse pression puis sera à nouveau absorbée dans l'évaporateur et compressée en vapeur haute pression lors de son passage dans le compresseur puis condensée dans le condenseur et ainsi de suite.
6. Les calories dégagées dans le condenseur sont captées par le réseau de chauffage.

1.2.5 Le réseau de chauffage

Les types de réseaux

Deux types de réseaux sont possibles :

- Réseau à basse température

L'énergie est produite de manière décentralisée par plusieurs unités d'un réseau interconnecté. L'eau est transportée à basse température (8 à 15°C). Cette solution est généralement mise en œuvre lorsqu'il y a une grande distance entre le lieu de captage de l'énergie (conduite des eaux usées, station d'épuration) et les consommateurs. La figure 8 montre ce dispositif.

Ses avantages sont les suivants :

- Réduction des pertes de chaleur,
- Possibilité d'employer des conduites en matériaux synthétiques non isolées, donc meilleur marché,
- Utilisation possible sur des distances de plus de 1 km,
- Prise en compte de différentes conditions de température en fonction des besoins des consommateurs,
- Possibilité de réalisation par étapes.

- Réseau haute température

La chaleur est produite à un seul endroit puis transportée à des températures élevées (65 à 80°C) jusqu'aux différents consommateurs. Les canalisations doivent être isolées, ce qui implique des investissements importants. Ce système s'applique principalement lorsque les consommateurs sont proches les uns des autres. La figure 8 décrit ce dispositif.

Les avantages sont les suivants :

- Maintenance et entretien centralisés et simplifiés,
- Conditions de contracting plus simples,
- Investissements spécifique moins élevés pour une seule grande chaufferie que pour plusieurs petites,
- Espace nécessaire réduit pour les installations techniques dans les bâtiments raccordés.

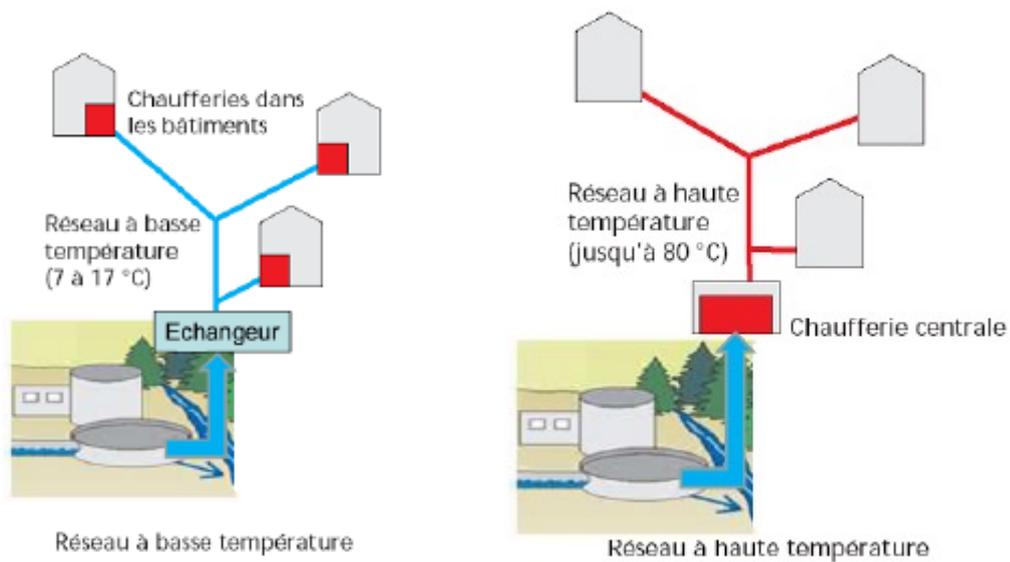


Figure 8 : Schéma de principe de basse et haute température. Source : Suisse Energie

Bilan : Ce chapitre est un état des lieux des modes de chauffages pour la récupération de chaleur en égout. Le but était d'expliquer comment fonctionne le système de chauffage (échangeur à chaleur-Pompe à Chaleur-Bâtiment). Lors des prochains chapitres, on déterminera les différents sites à chauffer par des échangeurs à chaleur. Les échangeurs à chaleur et la pompe à chaleur (du côté évaporateur) seront dimensionnés pour ces bâtiments à travers des calculs scientifiques émis par différents auteurs et des catalogues (pompes à chaleur). Cette étude sera suivi d'un bilan énergétique et de l'économie réalisée par ce système de chauffage.

2 Choix des sites

Méthode du choix des sites :

Les sites ont été choisis en fonction de leurs capacités pour garantir le bon fonctionnement des échangeurs.

- Les sites sont proches de sites de mesures (vitesse, débitmètre)
- Les bâtiments à chauffer doivent être des bâtiments municipaux et chacun ont un fonctionnement spécifique (piscine Hébert et école Clichy)
- Les égouts (Clichy et la Chapelle) ont de bonnes capacités hydrauliques (hauteur d'eau, débit, vitesse).

2.1 Description des ouvrages et des bâtiments

Le collecteur de Clichy alimentera en chaleur l'école de Clichy. Le collecteur de la Chapelle chauffera la piscine Hébert.

2.1.1 Collecteur de Clichy

Les plans et les coupes (figure 9) ont été recueillis au sein de la Division des Grands Travaux (DGT) auprès des dessinateurs. La cunette du collecteur est de forme quasi-rectangulaire :

- hauteur de 2 m
- largeur de 3,1 m

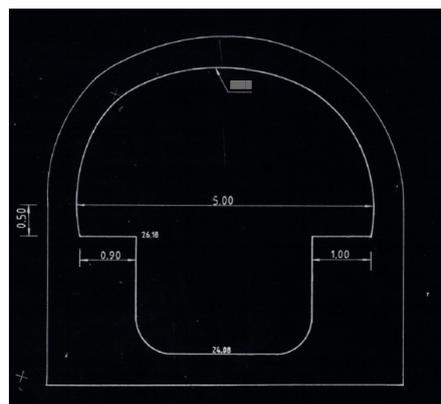


Figure 9: Coupe du collecteur Clichy

2.1.2 Ecole de Clichy

L'école située au 10 Rue de Clichy (figure 10) accueille des enfants de 6 à 11 ans. Le nombre de classes est de 10 avec 243 élèves. Il y a 3 logements.

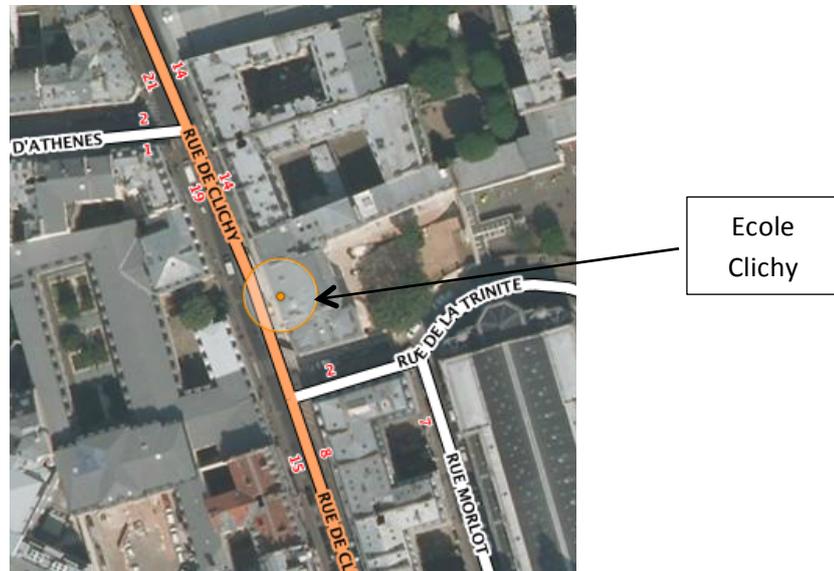


Figure 10: Position de l'école élémentaire de Clichy Source: géoportail

Description de l'installation existante :

<p style="text-align: center;">Description</p> <ul style="list-style-type: none"> - Production d'eau chaude sanitaire - Production CPCU <ul style="list-style-type: none"> - 2 ballon d'eaux chaudes de 500 L - 7 pompes de circulation d'eau - 1 circuit plancher chauffant - 1 circuit logements - 1 circuit école - 1 circuit cuisine - 1 circuit salle de classe - 1 circuit radiateur cuisine - 1 circuit radiateur Bureaux inspection 	
<p style="text-align: center;">Etat/commentaire</p> <ul style="list-style-type: none"> • Chaufferie neuve. <p style="text-align: center;">La production de chaleur pourrait être parfaitement performante</p>	
<p style="text-align: center;">Préconisation</p>	<p style="text-align: center;">Aucune</p>

L'énergie utilisée pour chauffer les locaux ainsi que la production d'eau chaude sanitaire est la vapeur .

2.1.3 Les données du collecteur de la Chapelle

Les plans proviennent de la Division des Grands Travaux (figure 11). L'égout est de forme en U :

- Hauteur 0,91 m
- Largeur 0,80 m

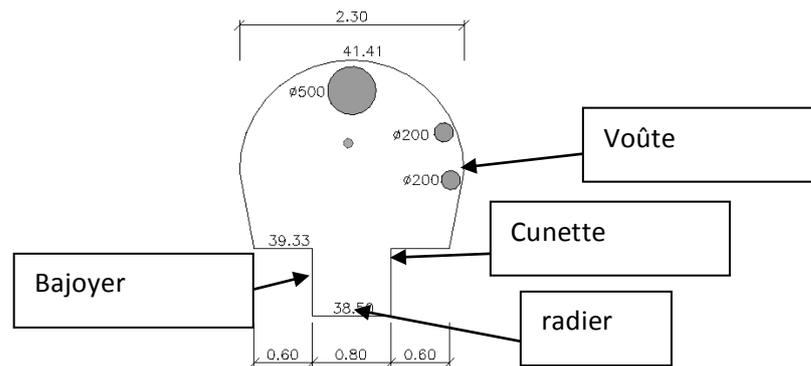


Figure 11: Coupe du collecteur de la Chapelle

2.1.4 Piscine Hébert

La piscine Hébert à Paris se trouve dans le 18^{ème} arrondissement. Elle est située 2 rue des Fillettes. Elle est équipée de 2 bassins : un 25 x 15 m et l'autre de 14 x 12 m, avec un toit ouvrant et la façade entièrement vitrée située dans un parc arboré.

De nombreuses activités y sont proposées : aquagym, jardin aquatique (4-6 ans), cours de natation, nager avec palmes, water-polo, sauvetage. Les informations générales sont données dans le tableau 3, 4,5. Ces informations proviennent du rapport « Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert ».



Figure 12: Position de la Piscine Hébert à Paris. Source : Géoportail

Informations générales :

Tableau 1: Informations générales. Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert

Année de construction	1896		Type d'établissement		Piscine – bains douches
Rénovation majeure	1992/1995		Travaux récents	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilation (partielle) en 2013 • Chaufferie en 2013 • Production et distribution ECS en 2013 	
Surfaces des locaux de la piscine	SHON totale	Hall bassin	Zones d'accueil	Vestiaires	Autres (bureaux, locaux du personnel...)
	1 337 m ²	765 m ²	96 m ²	376 m ²	196 m ²
	Grand Bassin (GB)			Petit Bassin (PB)	
Surface bassin	25 m x 11,75 m = 293.75 m ²			11,75 m x 11,75 m = 138.07 m ²	
Volume bassin	600 m ³			111 m ³	

Horaire fréquentation :

Tableau 2 : Horaire fréquentation. Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert

HORAIRES		Période scolaire Petites vacances scolaires		Grandes vacances d'été
Fréquentation	Lundi	10h – 22h00		NC
	Mardi	7h – 22h00		
	Mercredi	7h – 22h00		
	Jeudi	7h – 22h00		
	Vendredi	7h – 22h00		
	Samedi	7h – 18h00		
	Dimanche	8h – 18h00		
Volume horaire annuel par type de public.		Scolaire	Associatif	Grand public
		666 h	1040 h	3334 h
Vidanges	1 semaine mi-février		1 semaine fin août	

Fréquentation et consommation 2012 :

Tableau 3: Fréquentation et consommation 2012 Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert

Superficie totale des bassins			431.8 m ²	
Nombre de jours de fermeture en 2012			26.0 jours	
Fréquentation annuelle 2012	Scolaire	Associatif	Grand public	Total
	44 222	14 960	40 040	99 222

Chauffage :

Les données sont issues d'un rapport de la ville de Paris intitulé « Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert » et classées dans des tableaux 4, 5, 6 et 7.

11/08/2014	Vivien Maillard	Page 25 sur 92
------------	-----------------	----------------

Généralité sous-station principale

Tableau 4 : Production de chaleur. Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert

<p style="text-align: center;">DESCRIPTION</p> <ul style="list-style-type: none">• Chaufferie neuve réalisée en 2013. (chantier encore non réceptionné)• 2 chaudières « haut rendement » De Dietrich GT430 avec tableau de commande DIEMATIC.• 2 brûleurs modulants CUENOD• 1 Bouteille de découplage primaire.• Un récupérateur sur fumées De Dietrich RCI 400 en by-pass sur chacun des carnaux de fumée des chaudières. Celui de la chaudière 2 condense sur l'eau du grand bassin et celui de la chaudière 1 condense sur le retour du circuit CTA n° 1-2-5-6.• 1 Mono-split chauffage/climatisation dans l'accueil.	
<p style="text-align: center;">ETAT / COMMENTAIRES</p> <ul style="list-style-type: none">• Chaufferie neuve.• La production de chaleur pourrait être parfaitement performante mais deux points diminueront significativement le rendement annuel de l'installation :<ul style="list-style-type: none">○ Pas d'isolation hydraulique des chaudières (cf. partie suivante)○ Un des récupérateurs sur fumées condense sur le retour du réseau CTA qui, malgré qu'il soit pré-régulé, sera toujours à température élevée (au moins 50°C). Or, au-dessus de 53°C, les fumées ne sont plus condensées ce qui réduit le rendement.	<p style="text-align: center;">Production de chaleur</p> 
<p style="text-align: center;">PRECONISATIONS</p> <ul style="list-style-type: none">• Modifier le circuit de condensation sur le récupérateur sur condensats et choisir un réseau basse température. Idéalement, il serait préférable de faire passer le réseau du petit bassin mais dans le cas où sa capacité tampon s'avérerait trop faible, on pourrait choisir le réseau plancher chauffant ou radiateurs. (0 – 5 ans).• Réfection chaufferie dans 15 – 20 ans.	<p style="text-align: center;">Récupérateur sur fumées</p>

Panoplie hydraulique

Ce tableau permet de connaître l'état des canalisations.

Tableau 5 : Panoplie hydraulique. Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert

<p style="text-align: center;"><u>DESCRIPTION</u></p> <ul style="list-style-type: none">• 1 pompe simple de charge Salmson pour chaque chaudière.• 1 pot à boue magnétique sur la boucle primaire avec pompe de charge Salmson.• 6 circuits hydrauliques secondaires :<ul style="list-style-type: none">✓ 1 circuit constant ECS✓ 1 Circuit constant CTA 3-4 + chauffage bassin avec 2 V3V en amont des batteries de CTA et deux échangeurs à plaques pour les bassins (neuf) dans le local filtration. Echangeurs de marque VITHERM. Le by-pass sur le cricuit du GB est équipé d'une pompe double in-line spéciale piscine.✓ Circuit pré-régulé (60°C) CTA 1-2-5-6 avec V3V en amont des batteries.✓ 2 Circuits régulés radiateurs.✓ Circuit régulé pour le plancher chauffant des plages.✓ Tous les circuits sont équipés de pompes doubles à débit variable Salmson.• Un système de remplissage avec bac de disconnection, pompe de charge et compteur d'appoint d'eau.• Un groupe de maintien en pression Pneumatex de 200L.	
<p style="text-align: center;"><u>ETAT / COMMENTAIRES</u></p> <ul style="list-style-type: none">• Panoplie hydraulique neuve avec calorifuge en chaufferie en laine de roche avec coquille aluminium de très bonne qualité.• Les chaudières ne sont pas isolées hydrauliquement avec une V2V ce qui réduit le rendement de l'installation.	<p style="text-align: center;">Panoplie hydraulique</p>  <p style="text-align: center;">Système désembouage</p>
<p style="text-align: center;"><u>PRECONISATIONS</u></p> <ul style="list-style-type: none">• Isolation hydraulique des chaudières avec V2V dans 0 – 5 ans.• Réfection partielle (pompes...) de la panoplie hydraulique (5 – 10 ans).• Réfection complète de chaufferie et autres échangeurs, V3V... dans 15 – 20 ans.	 <p style="text-align: center;">Groupe de maintien en pression.</p>

Eau chaude sanitaire :

Tableau 6 : Eau chaude sanitaire. Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert

<p style="text-align: center;"><u>DESCRIPTION</u></p> <ul style="list-style-type: none">• 1 préparateur ECS Hoval de 2013 en chaufferie.	 <p style="text-align: center;">Production ECS</p>
<p style="text-align: center;"><u>ETAT / COMMENTAIRES</u></p> <ul style="list-style-type: none">• Production ECS neuve et adaptée.• Température en sortie de ballon de 64°C. <p>Pas de problème de légionellose à prévoir au niveau de la production avec ce type d'équipement à faible volume de stockage.</p>	
<p style="text-align: center;"><u>PRECONISATIONS</u></p> <ul style="list-style-type: none">• Remplacement production ECS dans 15 – 20 ans.	

Distribution d'eau chaude sanitaire :

Tableau 7: Distribution d'eau chaude sanitaire Source : Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert

<p style="text-align: center;">DESCRIPTION</p> <ul style="list-style-type: none">• Distribution ECS complète de l'établissement refaite en 2013.• 1 V3V de pré-mitige à 60°C en sortie de préparateur.• 2 bouclages ECS en Inox avec mitigeur au niveau des points de puisage. De nombreuses reprises en cuivre dans les locaux.• 1 pompe double de bouclage Salmson sur le retour.• Les bouclages sont calorifugés en Armaflex avec raccord de calorifuge en papier adhésif.• 1 apport d'eau froide avec compteur ECS et dispositif anti-tarte électronique COMAP.• 1 dispositif anti-tarte électronique sur le retour de bouclage ECS.	<p style="text-align: center;">mitigeur au niveau des douches</p> 
<p style="text-align: center;">ETAT / COMMENTAIRES</p> <ul style="list-style-type: none">• Bien que le réseau ECS est neuf : on relève de nombreuses malfaçons et/ou non-respect des règles de l'art :<ul style="list-style-type: none">○ Problème d'équilibrage des 2 bouclages ECS. Un des bouclages est très mal alimenté et on peut attendre très longtemps avant d'avoir de l'eau chaude dans la douche. Les vannes d'équilibrage TA placées sur les réseaux ne semblent pas résoudre le problème○ Le calorifuge type Armaflex est mal posé par endroit et les raccords en adhésifs ne tiendront pas. De plus, on relève quelques fuites sur le réseau dans les galeries techniques.○ Certains branchements hydrauliques (notamment dans les locaux AT) sont réalisés très anarchiquement. De plus, toutes les traversées de parois n'ont pas été rebouchées après passage.• Le principal problème reste la faible circulation d'un des 2 bouclages ce qui a déjà créé un problème de légionellose depuis les travaux.	<p style="text-align: center;">Réseau ECS dans les locaux des AT</p> 
<p style="text-align: center;">PRECONISATIONS</p> <ul style="list-style-type: none">• Dans le cadre des réserves des opérations préalables à la réception et/ou de l'année de parfait achèvement, il convient à minima de régler les problèmes suivants :<ul style="list-style-type: none">○ Séparation des 2 deux bouclages (hormis pour la production ECS) avec mise en place d'une deuxième pompe double.○ Reprise du calorifuge○ Comblement des traversées de parois○ Réparation des fuites• Réfection pompes et mitigeurs dans 5 – 10 ans.	<p style="text-align: center;">Passage du réseau ECS à travers une paroi</p> 

Bilan :

L'école de Clichy sera chauffée par le collecteur de Clichy. Le collecteur est de forme quasi-rectangulaire. L'alimentation en chauffage est la vapeur (CPCU).

La piscine Hébert sera chauffée par le collecteur de la Chapelle. L'égout est en U. L'alimentation en chauffage est le gaz. La piscine est ouverte à peu près 10 h / jour et les deux bassins à chauffer font un volume de 711 m³. Elle accueille 99 722 baigneurs. Dans les deux bâtiments, l'ensemble du matériel est correct.

2.2 Le fonctionnement hydraulique des collecteurs de Clichy et de la Chapelle

Suite au choix des deux bâtiments (Piscine Hébert et Ecole de Clichy) et à leur égout associé (Chapelle et Clichy), l'étude portera sur le fonctionnement hydraulique des deux collecteurs à tout moment de la journée.

La méthode :

Pour connaître le fonctionnement général des collecteurs, le temps sec et une pluie (6 mois) seront étudiés. L'étude porte sur les horaires de 0 à 6 heures du matin (cas le plus défavorable) et sur les heures de consommations de pointe (8 h à 12 h et de 16 h à 22 h).

Les échangeurs à chaleur doivent être immergés dans l'eau en permanence pour fonctionner correctement, c'est-à-dire en cas de temps sec. On utilise le logiciel de simulation MIKE URBAN.

2.2.1 Cas de temps sec

Débit :

Le débit de temps de sec se passe sur une durée de 24 h. Le débit minimum est à minuit. Il augmente jusqu'au débit de pointe à 8 h 15 et ensuite le débit décroît. Tout ceci est décrit sur la courbe figure 13.

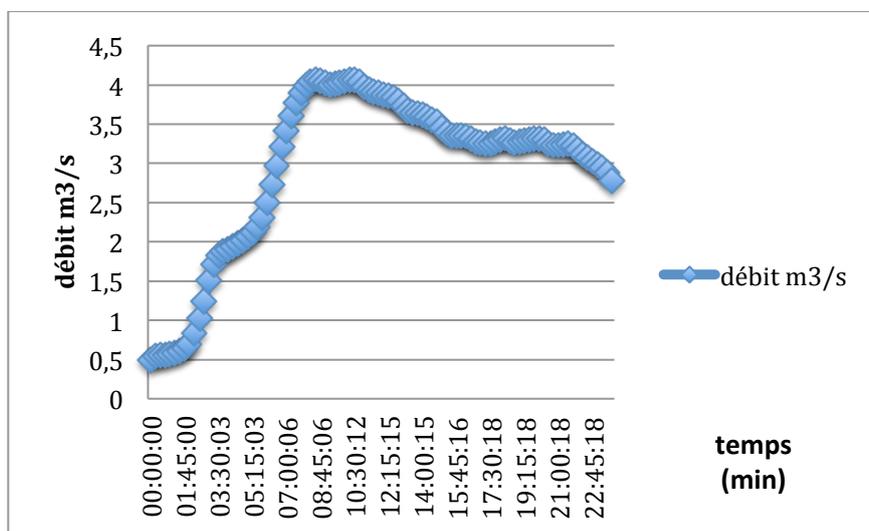


Figure 13: Courbe débit temps collecteur de la Chapelle

Hauteur d'eau :

La hauteur reflète la courbe du débit de temps sec. A minuit, la hauteur d'eau est au minimum et son maximum est à l'heure de pointe à 8 H 15. Ensuite elle diminue (la figure 27) :

La vitesse

La vitesse est minimum à minuit et maximum à 8 h 15. Ces résultats sont présents sur la figure 28.

2.2.2 Synthèse des résultats :

Le tableau 8 est une synthèse des résultats présentés sur les courbes précédentes.

Tableau 8: Synthèse des résultats Clichy temps sec

heure 0 à 6H		
débit minimal (m ³ /s)	hauteur d'eau (m)	Vitesse (m/s)
0,50	0,344	0,53
débit maximal (m ³ /s)		
2,50	0,899	0,85
débit moyen (m ³ /s)		
1,37	0,62	0,68
débit de pointe 8H-12H		
débit minimal (m ³ /s)	hauteur d'eau (m)	Vitesse (m/s)
3,88	1,21	0,93
débit maximal (m ³ /s)		
4,07	1,23	0,96
débit moyen (m ³ /s)		
4,00	1,22	0,95
débit de pointe 16h-22h		
débit minimal (m ³ /s)	hauteur d'eau (m)	Vitesse (m/s)
3,17	1,07	0,89
débit maximal (m ³ /s)		
3,35	1,10	0,90
débit moyen (m ³ /s)		
3,27	1,09	0,89

Les préconisations :

Pour le bon fonctionnement des échangeurs à chaleur, la hauteur d'eau est garantie et faible. La vitesse mesurée est de 0,53 m/s. Elle est au-dessus de 0,3 m/s pour un 1/10 du débit et proche de 0,6 m/s pour 1/100 du débit, donc on respecte les conditions d'autocurage. Il faut vérifier l'ensablement.

2.2.3 Cas en temps de pluie (6 mois)

La durée est de minuit jusqu'à 18h.

Débit :

Le débit minimum est à 00h 40. Son maximum est atteint à 3h 15 et ensuite décroît (figure 14).

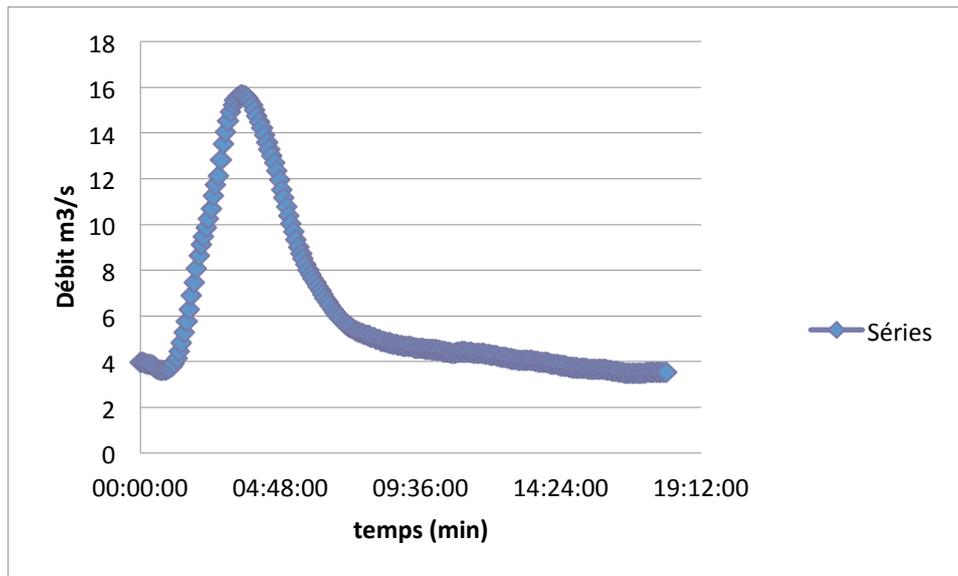


Figure 14: Courbe de débit dans le collecteur de Clichy temps de pluie

Hauteur d'eau :

Les courbes du débit et de la hauteur d'eau en temps de pluie sont similaires. Le minimum est atteint à 00 h 40 et son maximum à 3h 15. (figure 29)

2.2.4 Résultat :

Le tableau 9 récapitule les résultats importants décrits par les courbes précédentes en temps de pluie.

Tableau 9: Synthèse des résultats dans le collecteur de Clichy par temps de pluie

heure 0 à 6H		
débit minimal (m³/s)	hauteur d'eau (m)	Vitesse (m/s)
3,61	1,156	0,65
débit maximal (m³/s)		
15,67	2,84	0,93
débit moyen (m³/s)		
9,59	2,10	0,84
débit de pointe 8H-12H		
débit minimal (m³/s)	hauteur d'eau (m)	Vitesse (m/s)
4,29	1,46	0,61
débit maximal (m³/s)		
5,04	1,65	0,60
débit moyen (m³/s)		
4,56	1,58	0,57

Les préconisations à retenir pour le collecteur de Clichy :

Pour le bon fonctionnement des échangeurs à chaleur, la hauteur d'eau est garantie et élevée. La vitesse est de 0,652 m/s. Elle est au-dessus de 0,3 m/s pour un 1/10 du débit et au-dessus de 0,6 m/s pour 1/100 du débit donc l'autocurage se réalisera automatiquement.

L'ensablement dans le collecteur de Clichy :

Dans ce collecteur, l'ensablement est élevé de 0,20 cm (figure 15). En revanche par expérience, La mise en place des échangeurs à chaleur au niveau du radier n'est pas suggérée à cause d'un éventuel ensablement.

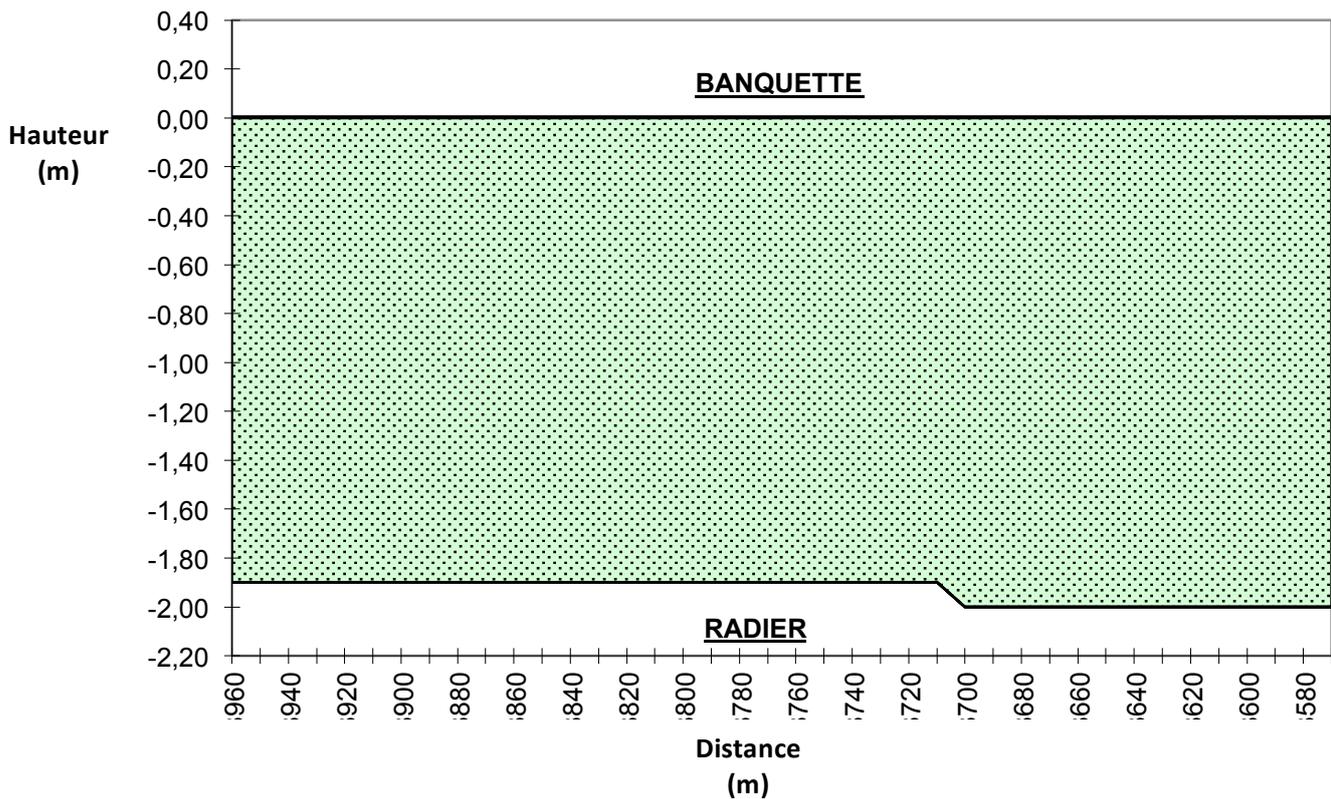


Figure 15: Ensalement dans le collecteur de Clichy

2.2.5 Cas du temps sec du collecteur de la Chapelle

Les paramètres ont été calculés à partir de MIKE URBAN :

Débit :

Le plus bas débit est de $0,046 \text{ m}^3/\text{s}$ à minuit. Il augmente jusqu'à 9 h à $0,214 \text{ m}^3/\text{s}$. Ensuite il diminue. (Figure 16)

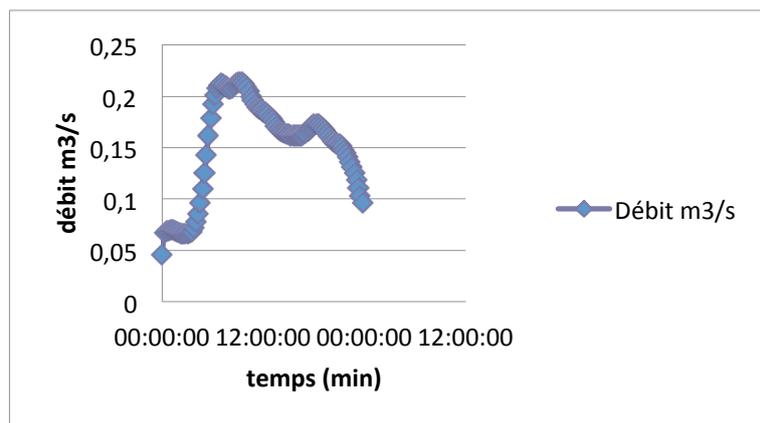


Figure 16: Courbe débit temps sec du collecteur la Chapelle

Hauteur d'eau :

La plus petite hauteur est de 1.24 m à minuit. Elle augmente jusqu'à 9 H à 1.37 m. Ensuite elle diminue. (Figure 30)

La vitesse :

La plus petite vitesse est de 0,646 m/s à minuit. Elle augmente jusqu'à 9 h à 1,15 m/s. Ensuite elle diminue. Comme le montre la figure 31.

Les résultats

Le tableau 10 est un récapitulatif des données importantes des courbes précédentes.

Tableau 10: Synthèse des résultats en temps sec du collecteur de la Chapelle

heure 0 à 6H		
débit minimal (m³/s)	hauteur d'eau (m)	vitesse (m/s)
0,05	1,246	0,646
débit maximal (m³/s)		
0,19	1,36	1,11
débit moyen (m³/s)		
0,09	1,28	0,85
débit de pointe 8H-12H		
débit minimal (m³/s)	hauteur d'eau (m)	Vitesse (m/s)
0,18	1,36	1,11
débit maximal (m³/s)		
0,21	1,38	1,16
débit moyen (m³/s)		
0,20	1,37	1,14
débit de pointe 16h-22h		
débit minimal (m³/s)	hauteur d'eau (m)	Vitesse (m/s)
0,14	1,33	1,03
débit maximal (m³/s)		
0,17	1,35	1,09
débit moyen (m³/s)		
0,16	1,34	1,06

Les préconisations :

Pour le bon fonctionnement des échangeurs à chaleur, la hauteur d'eau est garantie et très élevée. La vitesse mesure 0,643 m/s. Elle est au-dessus 0,3 m/s pour un 1/10 du débit et au-dessus de 0,6 m/s pour 1/100 du débit donc l'autocurage se réalisera automatiquement. Il faut vérifier l'ensablement.

2.2.6 Cas en temps pluie (6mois)

Débit :

Le débit le plus bas est en temps de pluie est de 0,145 m³/s à 00 h 25. Il atteint son maximum à 2h15 avec un débit de 1,68 m³/s. Ensuite il diminue. (Figure 17)

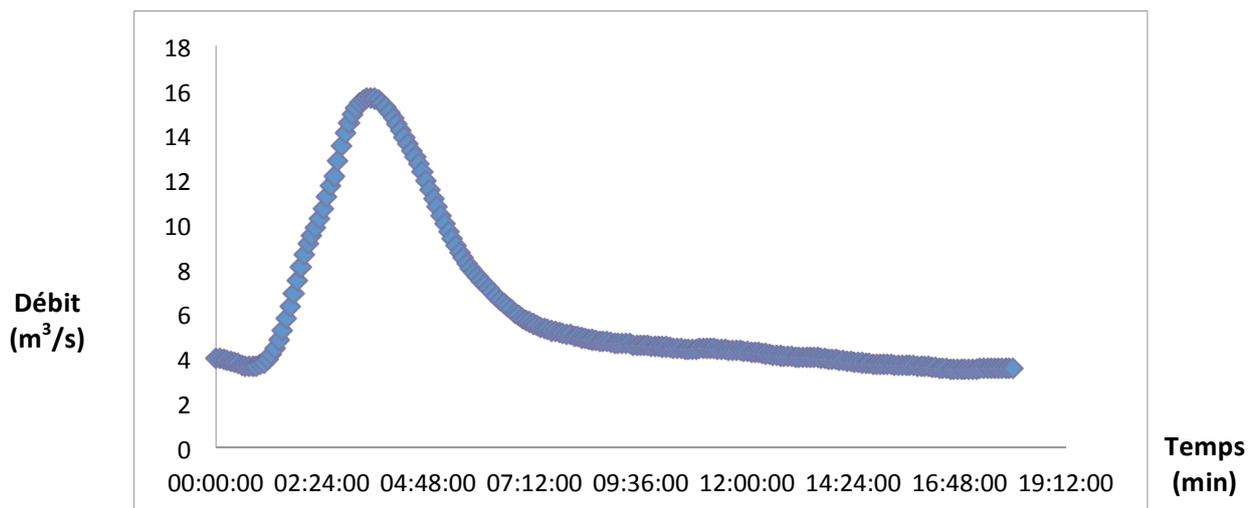


Figure 17: Courbe des débits du collecteur de la Chapelle en temps de pluie

Hauteur d'eau :

La hauteur d'eau la plus basse en temps de pluie est de 1,33 m à 00 h 25. Elle atteint son maximum à 2h15 avec une hauteur de 2 m. Ensuite elle diminue. (Figure 32)

Vitesse :

La vitesse (m/s) est maximale à 2 h 15 et atteint 1,65 m/s. Ensuite elle diminue pour stagner à 1,11 m/s. (Figure 33)

2.2.7 Résultat

Tableau 11: Synthèse des résultats du collecteur de la Chapelle

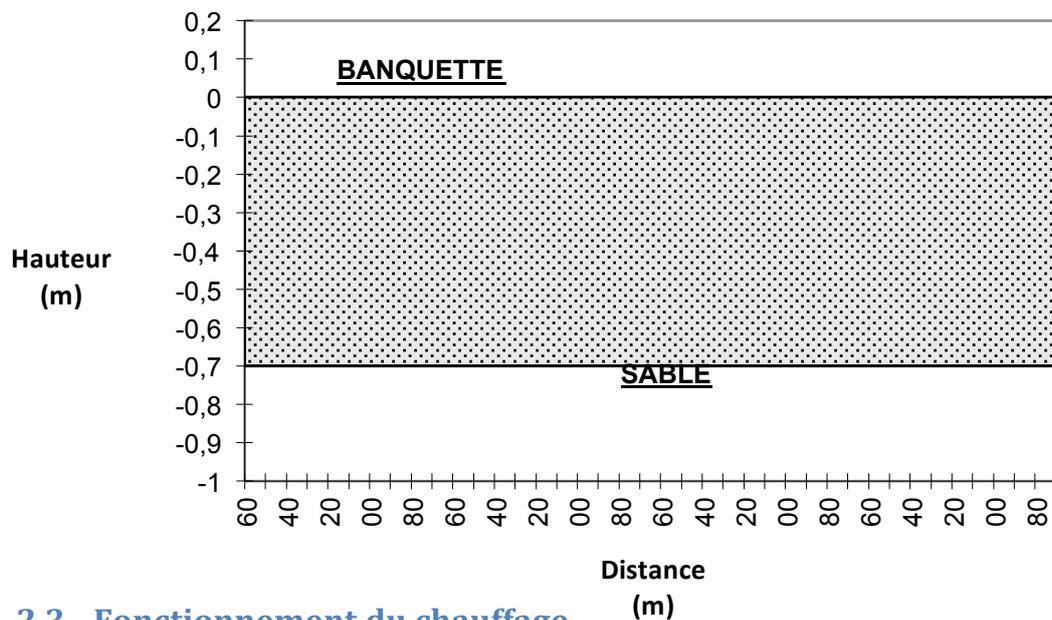
heure 0 à 6H		
débit minimal (m ³ /s)	hauteur d'eau (m)	vitesse (m/s)
0,13	1,32	0,94
débit maximal (m ³ /s)		
1,71	2,04	1,65
débit moyen (m ³ /s)		
0,68	1,62	1,30
débit de pointe 8H-12H		
débit minimal (m ³ /s)	hauteur d'eau (m)	Vitesse (m/s)
0,18	1,36	1,11
débit maximal (m ³ /s)		
0,21	1,38	1,16
débit moyen (m ³ /s)		
0,20	1,37	1,14

Les Préconisations :

Pour le bon fonctionnement des échangeurs à chaleur, la hauteur d'eau est garantie et très élevée. La vitesse mesure 0,94 m/s. Elle est au-dessus 0,3 m³/s pour un 1/10 du débit et au-dessus de 0,6 m/s pour 1/100 du débit donc les conditions d'autocurage sont respectés. Il faut vérifier l'ensablement.

L'ensablement dans le collecteur de Chapelle :

C'est-à-dire que dans ce collecteur, l'ensablement est plutôt élevé de 0,30 cm (figure 22). En revanche par expérience, la mise en place des échangeurs à chaleur au niveau du radier n'est pas suggérée à cause d'un éventuel ensablement.



2.3 Fonctionnement du chauffage

On étudie la consommation de chauffage de chaque bâtiment (Ecole de Clichy et Piscine Hébert). Les formules proviennent d'un rapport réalisé par deux ingénieurs de la ville de Paris intitulé « Rapport sur le déploiement du « Degré bleu » dans le périmètre parisien » d'Emmanuel Tomi et d'Arnaud Heinrich et d'autres formules utilisées par un agent de la Ville de Paris de la direction de la Jeunesse et des Sports. L'objectif est de trouver une puissance appelée pour dimensionner l'échangeur à chaleur et la pompe à chaleur. On commencera par l'école de Clichy et ensuite par la piscine Hébert. Pour l'école de Clichy, les calculs concernent que le chauffage et pour la piscine Hébert, les calculs seront sur l'eau chaude sanitaire et le réchauffement de la piscine. La méthode est expliquée et détaillée au fur et à mesure du cheminement.

2.3.1 L'école de Clichy

2.3.1.1 Détail des formules et hypothèses

Calcul du volume :

Nous avons mesuré le volume pour chaque niveau et les surfaces sont calculées sur les plans délivrés par la SLA du 9^{ème} arrondissement. (Tableau 12)

Tableau 12: Volume du bâtiment

11/08/2014	Vivien Maillard	Page 37 sur 92
------------	-----------------	----------------

Niveau étage	Surface m ²	Hauteur (m)	Volume (m ³)
0	755,7	6,8	7405,86
1	582	4,92	2863,44
2	723,6	3,63	2626,66
3	719,8	2,64	1900,27
4	546,5	2,7	1475,55
5	214,8	1,92	412,41

Le total du volume du bâtiment à chauffer est de 16681 m³

2.3.1.2 Calcul du nombre de DJU

Le nombre de DJU (degré jour unifié) est calculé sur l'année 2012 parce que les données sont complètes. Les autres années, des informations manquent. Les degrés jour unifiés (DJU, aussi appelé « Base 18 »), permettent de réaliser des estimations de consommations d'énergie thermique en proportion de la rigueur de l'hiver ou de la chaleur de l'été.

Les températures sont prises au maximum et au minimum pour chaque jour de l'année 2012 (annexe). Ces données ont été récoltées sur le site internet de Météociel.

Pour obtenir le nombre DJU de chaque mois, on utilise l'équation suivante (équation 1) :

$$DJU = (20 - Text)$$

Équation 1

Le nombre de DJU hebdomadaire a été additionné pour chaque mois. Ceci donne le nombre de DJU mensualisé (tableau 13)

Tableau 13: Nombre de DJU mensualisé pour l'école de Clichy

Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
DJU	379,5	351,5	243,0	135,8	123,3	73,0	0,0	0,0	90,9	149,2	279,3	407,9

2.3.2 Donnée sur la consommation de chauffage :

La consommation de chauffage figure dans le logiciel de la Direction du patrimoine et de l'architecture (DPA) appelée Prométhée. Ce dernier donne les consommations mensuelles en kW.h. Ceci va nous permettre de calculer la déperdition volumique G pour chaque mois (équation 2).

$$G = \frac{Q \times 1000 \times \text{Rendement}}{24 \times V \times DJU}$$

Équation 2

Notation utilisée :

Q= consommation mensuelle kW.h

Rendement =0.8

V= volume du bâtiment à chauffer m³

DJU= le nombre de DJU mensualisé

2.3.2.1 Calcul de la puissance appelée

Après avoir calculé la déperdition volumique, on calcule la puissance appelée (équation 3) :

$$P = G \times V \times \frac{(T_{int} - T_{ai}) - T_{ext}}{1000}$$

Équation 3

Hypothèse utilisée :

P= Puissance appelé kW par mois

V= Volume du bâtiment 16681 m³

T_{int}= température intérieur du bâtiment 20°C

T_{ext} = température extérieur la plus basse du mois

T_{ai} = apport interne 3°C (imposer)

2.3.3 Présentation des graphiques

Nous avons construit deux histogrammes

- la consommation mensuelle de l'école de Clichy (figure 18)
- la Puissance appelé mensuelle de cette école (figure 19)

2.3.3.1 La consommation mensuelle de l'école de Clichy

Ce graphique nous montre les besoins de chauffage nécessaire pour le bâtiment.

La plus basse consommation est au mois de Juillet, Août et Septembre. Les raisons sont :

- l'école est fermée
- la température extérieure est suffisante pour chauffer l'intérieur du bâtiment.

La plus haute consommation est au mois de Décembre car c'est la période la plus froide.

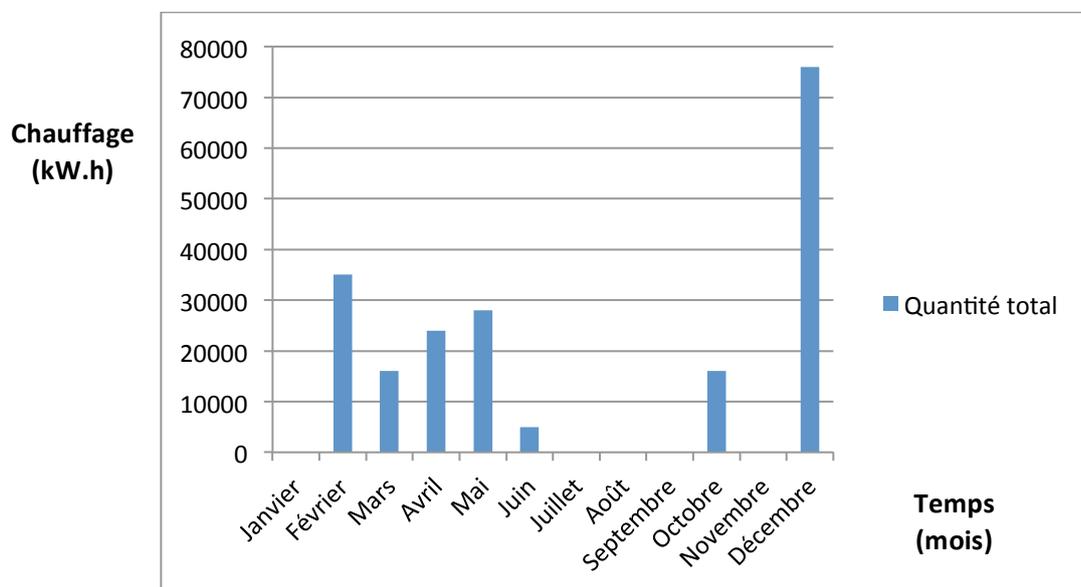


Figure 18: Quantité chauffage de l'école de Clichy en kW.h

2.3.3.2 Puissance appelée mensuelle

On a construit cet histogramme. Il donnera une valeur surdimensionnée de la puissance appelée et ainsi une valeur pour mettre en place la PAC. Comme le montre la figure 19 :

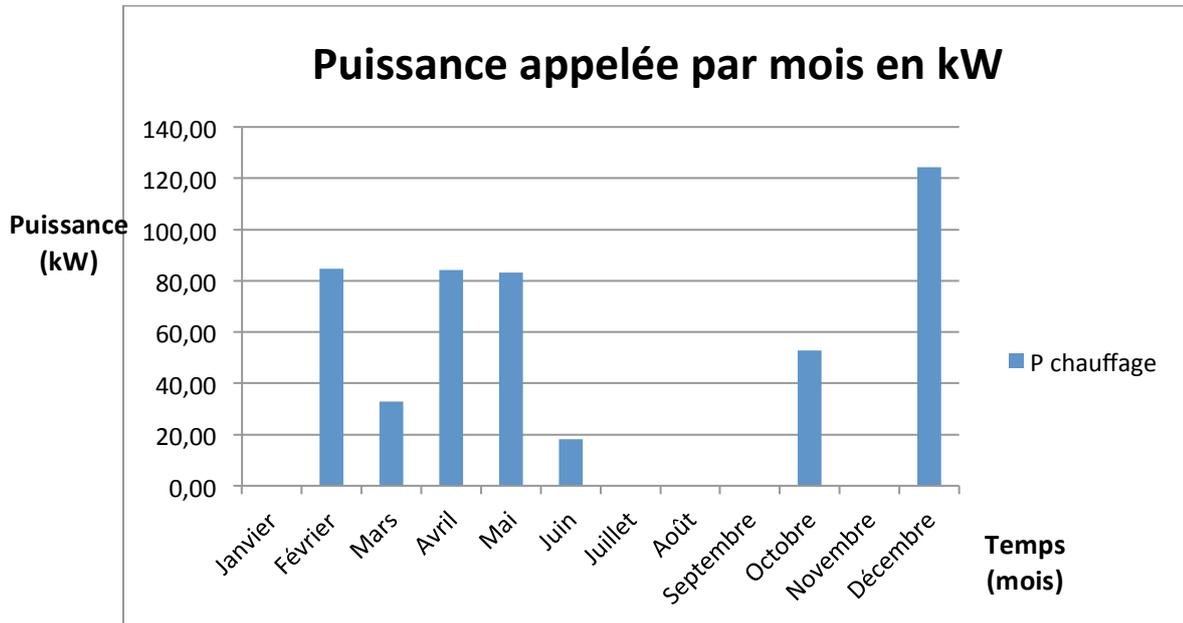


Figure 19: Histogramme puissance appelée pour l'école de Clichy

Mais avec des données heures par heures, on aurait pu construire une courbe monotone. Elle aurait été plus précise que les calculs.

Donnée du graphique :

Pour dimensionner la PAC, on prendra la valeur maximale de 124,23 kW. Ceci correspond à la valeur moyenne de l'année (Tableau 14)

Tableau 14: Puissance moyenne appelée Clichy

	minimum	maximum	Moyenne
Puissance appelée kW	18,04	124,23	68,62

2.3.4 La piscine Hébert

2.3.4.1 Détail des formules et hypothèses

Calcul du volume :

Le total du volume du bâtiment à chauffer est de 15372 m³

2.3.4.2 Calcul du nombre de DJU

Le nombre de DJU est pris sur l'année 2012 parce que les données sont complètes.

Les températures sont prises au maximum et au minimum pour chaque jour de l'année 2012 (annexe). Ces données ont été récoltées sur le site internet de Météociel. Après la moyenne arithmétique a été calculée pour chaque température maximale et minimale pour chaque journée et ensuite, une autre moyenne a été réalisée pour chaque mois pour avoir la température moyenne mensualisée.

Pour avoir le nombre DJU pour chaque mois (équation 4), la température moyenne à la journée a été utilisée en la soustrayant à la température de chauffage du bâtiment. C'est-à-dire 25°C.

$$DJU = (25 - Text)$$

Équation 4

On additionne le nombre de DJU hebdomadaire pour chaque mois. Ceci donne le nombre de DJU mensualisé. (tableau 15) :

tableau 15: Nombre de DJU pour la piscine Hébert

Mois	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
DJU	553	624	404	465	270	245	192	110	285	370	531	562

2.3.4.3 Donnée sur la consommation de chauffage

La mesure de la consommation de chauffage est donnée par le logiciel de la Direction du patrimoine et de l'architecture (DPA) appelée Prométhée. Ce logiciel donne les consommations mensuelles en KW.h.

2.3.4.3.1 Calcul Q (eau chaude sanitaire)

$$ECS = \text{Consommation du compteur général} - \text{consommation d'eau réglementée}$$

Équation 5

$$ECS = 16373 - 10656 = 5717m^3$$

Équation 6

$$\frac{l}{\text{baigneur}} = \frac{5717 \times 1000}{99222} = 58 l. \text{ baigneur}$$

Équation 7

Cela est légèrement au-dessus des données entre 30 et 50 litres par baigneurs (équation 7 et la démarche équation 5,6) toutefois la nouvelle réglementation sur la légionnelle (divisé par 10) depuis 1er janvier 2012 a pour conséquence d'obliger à faire des purges tous les matins ce qui justifie ces chiffres en plus il est pris en compte aussi les WC, rinçage des plages etc

$$\text{Nombre de baigneur. mois} = \frac{99222}{\text{jour dans le mois}}$$

Équation 8

Formule pour passer d'une consommation d'eau de ville autour de 10°C à un dimensionnement des besoins eau sanitaire à 60°C (équation 9)

$$V_{60^{\circ}C} = V_{\text{eau douche à } 37^{\circ}C} \times \frac{37 - 10}{60 - 10} \times \text{Nombre de baigneur. mois}$$

Équation 9

$$Q_{ecs} = V_{60^{\circ}C} \times 1.16 \times \frac{60 - 10}{1000}$$

Équation 10

Par cette formule, on obtient une estimation mensuelle de la consommation de l'eau chaude sanitaire. (Équation 10).

2.3.4.3.2 Calcul Qréchauffage du bassin

Détail du réchauffage du bassin :

$$\frac{\text{consommation d'eau réglementée} \times 1000}{\text{fréquentation}} = l. \text{ baigneur}$$

Équation 11

On utilise l'équation 11 :

$$L. \text{ baigneur} = \frac{10656 \times 1000}{99222} = 108 l. \text{ baigneur}$$

Remarque :

- C'est une moyenne la réglementation impose 30l/J/baigneur donc à contrôler tous les jours (normalement la perte d'eau par le(s) pédiluve correspond à la perte réglementaire
- Elle prend en compte les lavages de filtre environ 40m³/semaine

$$Q_{\text{réchauffage bassin}} = 1,16 \times l. \text{ baigneur} \times \text{Nombre baigneur. mois} \times \frac{(27 - 8)}{1000}$$

Équation 12

Par cette formule, on obtient une estimation de la consommation mensuelle pour le réchauffement du bassin. (Équation 12)

2.3.4.3.3 Calcul Qchauffage :

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{chauffage}} + Q_{\text{ecs}} + Q_{\text{renouvellement}}$$

Équation 13

$$Q_{\text{chauffage}} = Q_{\text{total}} - Q_{\text{ecs}} - Q_{\text{renouvellement}}$$

Équation 14

Grâce aux équations 13 et 14, ceci va nous permettre de calculer le G, la déperdition volumique pour chaque mois (équation 15)

$$G = \frac{Q_{\text{chauffage}} \times 1000 \times \text{Rendement}}{24 \times V \times DJU}$$

Équation 15

Hypothèse utilisée :

Q= consommation mensuelle kW.h

Rendement =0,8

V= volume du bâtiment à chauffer

DJU= le nombre de DJU mensualisé

2.3.4.4 Calcul des puissances appelées

Pour calculer, la puissance appelée du chauffage, on utilise l'équation 3 :

$$P_{\text{chauffage}} = G \times V \times \frac{(T_{\text{int}} - T_{\text{ai}}) - T_{\text{ext}}}{1000}$$

Pour calculer les puissances appelées en eau chaude sanitaire, on utilise les démarches (équation 16,17) et la formule (équation 18) :

$$V_{60 \text{ pour ecs}} = l. \text{ baigneur} \times \frac{37 - 10}{60 - 10} = 57 \times \frac{27}{50} = 31 l. \text{ baigneur}$$

Équation 16

$$\begin{aligned} \text{baigneur par quart d'heure} &= \text{baigneur.jour} \times \text{amplitude d'ouverture} \times \frac{V_{60 \text{ pour Ecs}}}{24 \times 4} \\ &= 297 \times 10 \times \frac{31}{24 \times 4} = 952 \end{aligned}$$

Équation 17

$$P_{\text{ecs}} = 1,16 \times \text{baigneur par } \frac{1}{4} \text{ h} \times \frac{60 - 10}{1000} = 55 \text{ kW}$$

Équation 18

Pour calculer la puissance appelée de réchauffement maximale en cas de vidange de la piscine (avec 9 jours de remplissages et contrôler 8 h par un agent de la ville), on utilise l'équation 19 :

$$P_{\text{réchauffement}} = 1,16 \times V_{\text{bassin}} \times \frac{27 - 8}{76} = 1,16 \times 711 \times \frac{27 - 8}{76} = 206 \text{ kW}$$

Équation 19

Hypothèse utilisée

P= Puissance appelé kW par mois

V= Volume du bâtiment m³

Tint= température intérieur du bassin 27°C

Text = température extérieur la plus basse du mois

Tai = apport interne 2°C

2.3.5 Interprétation graphique

Nous avons construit deux histogrammes

- la consommation mensuelle de la piscine Hébert (figure 20)
- la Puissance appelé mensuelle (figure 21)

Répartition des besoins de la piscine Hébert (kW.h)

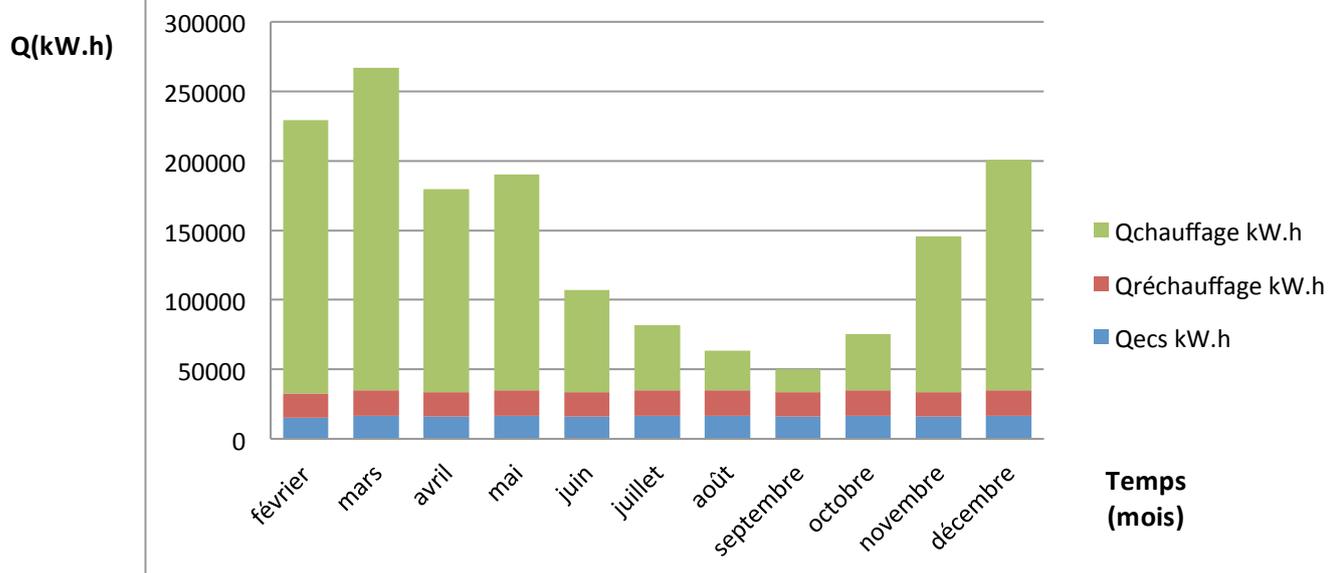


Figure 20: Répartition des besoins de la piscine Hébert

Puissance appelée de la piscine Hébert kW

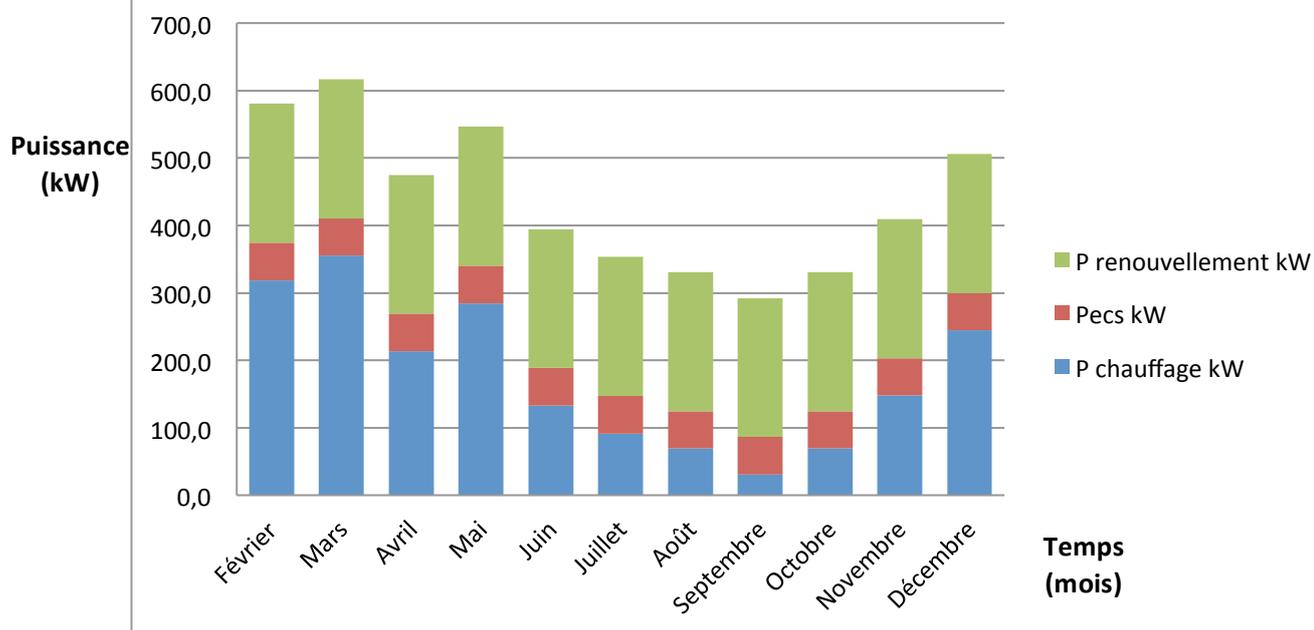


Figure 21: Histogramme Puissance appelée de la piscine Hébert

Pour dimensionner la PAC, on prendra la valeur maximale de 261 kW avec la vidange du bassin et l'eau chaude sanitaire.

A retenir pour l'école de Clichy et pour la piscine Hébert :

11/08/2014	Vivien Maillard	Page 44 sur 92
------------	-----------------	----------------

Suite à une rétrospective de la consommation de chauffage des deux bâtiments, on peut retenir deux résultats principaux et significatifs pour la suite du dimensionnement. La puissance appelée du bâtiment de Clichy est de 124 kW et de la piscine Hébert de 261 kW.

3 Mise en œuvre

Dans ce chapitre, la mise en œuvre des travaux commencera d'abord par le dimensionnement des échangeurs à chaleur, ensuite par la mise à sec des collecteurs, puis l'exécution des travaux pour leur mise en place dans les collecteurs.

3.1 Dimensionnement des échangeurs à chaleur

3.1.1 Principe de dimensionnement des échangeurs à plaque

Pour ce paragraphe, les formules proviennent d'un rapport celui d'Emmanuel TOMI et Arnaud HEINRICH, de deux cours de Jacques PADET (« chapitre 3 : Méthode générale de calcul pour les échangeurs et chapitre 4 : Détermination des coefficients d'échanges dans les échangeurs à fluides séparés ») et d'une notice commerciale pour connaître les caractéristiques de la pompe à chaleur (« Carrier ») présente en annexe 1.

3.1.1.1 Etape1 : Evaluation du coefficient de convection

Le coefficient d'échange par convection est une propriété de l'écoulement, sa détermination passe donc par le calcul de grandeurs caractéristiques de l'écoulement, à savoir le rayon hydraulique et le nombre de Reynolds.

A partir de la mesure de la hauteur d'eau et connaissant la géométrie de la cunette, il faut d'abord déterminer le périmètre mouillé et la section mouillée. On obtient alors le rayon hydraulique par application de la formule suivante (équation 20) :

$$R_H = \frac{S_m}{P_m}$$

Équation 20

avec : $[R_H] = m$ Rayon hydraulique
 $[S_m] = m^2$ Section mouillée
 $[P_m] = m$ Périmètre mouillé

Connaissant le rayon hydraulique, on obtient le nombre de Reynolds par application de la formule suivante (équation 21) :

$$Re_1 = \frac{\rho_1 R_{H1}}{\mu_1 S_{m1}} q_1$$

Équation 21

Re= nombre de Reynolds

P1= masse volumique de l'eau usée
 Rh= rayon hydraulique (m)
 μ= viscosité hydraulique
 q1= débit de l'eau

Le coefficient de convection s'obtient en calculant le nombre de Nusselt au moyen de la corrélation expérimentale de Colburn qui est utilisable en régime turbulent ($10^4 < Re < 1.2 \cdot 10^5$). On utilise cette formule (équation 22) pour les effluents.

$$h_1 = 0,023 \frac{\lambda_1}{R_{H1}} Re_1^{0,8} Pr_1^{0,33}$$

Équation 22

H₁= coefficient de convection W.m²/K
 λ₁= conductivité de l'eau
 Rh= rayon hydraulique (m)
 Re= Nombre de Reynolds
 Pr₁= Nombre de Prandtl

Pour le fluide caloporteur à l'intérieur de l'échangeur à plaque, le régime d'écoulement est laminaire (Re < 2100). Dans les conditions courantes rencontrées avec les échangeurs, la corrélation de **Sieder et Tate** (1936) donne des ordres de grandeur corrects (équation 23).

$$Re < 2100; Pr > 0,5; \frac{\mu}{\mu_p} < 10; \frac{L}{d} < 0,08 Pe$$

$$St = 1,86 \times Pe^{-2/3} \times L/d^{-1/3} \times \mu/\mu_p^{0,14}$$

L= longueur du tube

Équation 23

Le nombre de Sieder et Tate donne une convection (équation 24) :

$$h_3 = \rho \times Cp \times V \times St$$

Équation 24

Enfin on calcule le coefficient global (équation 25) :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{0,002}{16} + \frac{1}{h_3}}$$

Équation 25

Il servira à déterminer le nombre d'unité de transfert (étape 3)

3.1.1.2 *Etape 2 : Choix du module*

L'échangeur sera 1-n. Cela signifie un passage des effluents et de n passages du fluide caloporteur. A surface d'échange égale, son efficacité est donc supérieure à celle d'un échangeur à co-courant et inférieure à celle d'un échangeur à contre-courant.

3.1.1.3 Etape 3 : Evaluation du nombre d'unité de transfert

La méthode du Nombre d'Unités de Transfert (équation 26) permet le dimensionnement des échangeurs au moyen d'une relation entre trois paramètres sans dimensions caractéristiques de l'échangeur. Ces trois grandeurs sont respectivement :

K= coefficient global pour un seul module $W/m^2.K$

S= surface pour un seul module m^2

P= masse volumique eau caloporteur

μ =viscosité de l'eau caloporteur

q= débit de l'eau caloporteur dans les serpentins

$$NUT = \frac{K \times S}{\rho \times \mu \times q \times 1000}$$

Équation 26

NUT sert à calculer le rendement

3.1.1.4 Etape 4 : Evaluation de l'efficacité de l'échangeur

L'échangeur que nous utilisons est tel que les effluents font un passage en enveloppe et le fluide caloporteur 2n passages en passes.

Ayant choisi le débit de fonctionnement d'un module, le projeteur calcule d'abord le rapport de déséquilibre au moyen de la formule suivante (équation 27) :

$$R = \frac{q_2}{q_1}$$

Équation 27

avec : R Rapport de déséquilibre (sans dimension)
 $[q_2] = m^3.s^{-1}$ Débit volumique du fluide caloporteur dans un module
 $[q_1] = m^3.s^{-1}$ Débit volumique des effluents

Le rendement de l'échangeur à chaleur est donné par cette formule (équation 28) :

$$\eta = \frac{2}{1 + R + \sqrt{1 + R^2} \frac{1 + \exp(-NUT\sqrt{1 + R^2})}{1 - \exp(-NUT\sqrt{1 + R^2})}}$$

Équation 28

La vérification est possible de la façon suivante (équation 29)

$$NUT = \frac{-1}{\sqrt{1 + R^2}} \ln \frac{2 - \eta(1 + R + \sqrt{1 + R^2})}{2 - \eta(1 + R - \sqrt{1 + R^2})}$$

Équation 29

3.1.1.5 Etape 5 : Détermination du nombre de module

Dans un premier temps, le projeteur calcule le facteur de refroidissement (équation 30) qui est le produit de l'efficacité de l'échangeur par le rapport de déséquilibre. Ce terme caractérise le refroidissement des effluents, et donc le comportement des modules d'échange successifs.

$$\text{facteur de refroidissement} = \eta R$$

Équation 30

Dans un second temps, le projeteur évalue l'offre en énergie des effluents et la compare aux besoins du bâtiment. Pour ce faire, le projeteur relève dans le catalogue du constructeur la puissance calorifique échangée dans l'évaporateur de la pompe à chaleur choisie. Il s'agit de la puissance à extraire de la source froide. Il calcule ensuite la puissance limite (équation 31) pouvant être extraite des effluents au moyen de la formule suivante :

$$P_{lim} = 4186 \times q_1 \times (T_{ref} - 4)$$

Équation 31

avec : $[P_{lim}] = kW$ Puissance limite pouvant être extraite des effluents
 $[q_1] = m^3 \cdot s^{-1}$ Débit volumique des effluents
 $[T_{ref}] = ^\circ C$ Température de dimensionnement de l'échangeur

(Température moyenne des effluents au mois de février)

Nous devons évaluer la puissance calorifique de la pompe à chaleur. En se basant sur un COP machine de 4, la puissance à extraire de la source froide (équation 32) vaut :

$$P_f = P \text{ du site } \left(1 - \frac{1}{4}\right)$$

Équation 32

Le projeteur compare l'offre à la demande en effectuant le rapport des deux puissances précédentes et calcule ainsi le rapport d'adéquation (équation 33) du site au moyen de la formule :

$$\text{rapport d'adéquation} = \frac{P_f}{P_{lim}} = \frac{P_f}{4186 \times q_1 \times (T_{ref} - 4)}$$

Équation 33

Il faut toutefois veiller à ce que la valeur choisie pour le dimensionnement soit supérieure au COP machine de la pompe à chaleur dans les conditions réelles de fonctionnement, de sorte que l'échangeur ne soit pas sous-dimensionné

Ensuite on détermine le nombre de module N (équation 34) à mettre en place :

$$N = \frac{\text{rapport d'adéquation}}{\text{facteur de refroidissement}}$$

Équation 34

3.1.1.6 Etape 6 : Calcul du nombre de passe

Pour la plaque à chaleur, on calcule le nombre de passe (équation 35) à mettre en place :

$$n = \frac{\text{Surface d'un module}}{\text{Périmètre mouillé caloporteur} \times \text{longueur d'un module}}$$

Équation 35

3.1.1.7 Etape 7 : Calcul de la puissance cédée par les échangeurs

Enfin, on calcule la puissance cédée par les échangeurs à chaleur (équation 36) pour retrouver la puissance cédée par la source d'eau froide (évaporateur).

$$P_{\text{cédée}} = \rho_{\text{effluent}} \times C_p \text{ effluent} \times Q_{\text{effluent}} \times (T_{\text{ce}} - T_{\text{fe}}) \times (1 - (1 - \eta \times R)^N)$$

Équation 36

Tce= entrée effluent

Tfe= entrée fluide caloporteur

η = rendement d'un échangeur à chaleur

R= rapport de déséquilibre

3.1.2 Dimensionnement d'un échangeur à chaleur coaxial

3.1.2.1 Etape1 : Evaluation du coefficient de convection

Le coefficient d'échange par convection est une propriété de l'écoulement, sa détermination passe donc par le calcul de grandeurs caractéristiques de l'écoulement, à savoir le rayon hydraulique et le nombre de Reynolds.

A partir de la mesure de la hauteur d'eau et connaissant la géométrie de la cunette, il faut d'abord déterminer le périmètre mouillé et la section mouillée. On obtient alors le rayon hydraulique par application de la formule suivante (équation 20) :

$$R_H = \frac{S_m}{P_m}$$

avec : $[R_H] = m$ Rayon hydraulique

$[S_m] = m^2$ Section mouillée

$[P_m] = m$ Périmètre mouillé

Connaissant le rayon hydraulique, on obtient le nombre de Reynolds par application de la formule suivante (équation 21) :

$$Re_1 = \frac{\rho_1 R_{H1}}{\mu_1 S_{m1}} q_1$$

Re= nombre de Reynolds

P1= masse volumique de l'eau usée
 Rh= rayon hydraulique (m)
 μ= viscosité hydraulique
 q1= débit de l'eau

Le coefficient de convection s'obtient en calculant le nombre de Nusselt au moyen de la corrélation expérimentale de Colburn qui est utilisable en régime turbulent ($10^4 < RE < 1.2 \cdot 10^5$). On utilise cette formule (équation 22) pour les effluents.

$$h_1 = 0,023 \frac{\lambda_1}{R_{H1}} Re_1^{0,8} Pr_1^{0,33}$$

h1= coefficient de convection W.m²/K
 λ1= conductivité de l'eau
 Rh= rayon hydraulique (m)
 Re= Nombre de Reynolds
 Pr1= Nombre de Prandtl

Pour le fluide caloporteur à l'intérieur de l'échangeur à plaque, le régime d'écoulement est laminaire (Re<2100). Dans les conditions courantes rencontrées avec les échangeurs, la corrélation de Nusselt (équation 37) devient :

$$Nu = 1.86 \times (Re \times Pr \times (\frac{Di + De}{L}))^{1/3}$$

Équation 37

Le coefficient de convection (équation 38 et 39) donne une convection :

$$h_3 = \frac{Nu \times \lambda_3}{Lc}$$

Équation 38

$$Lc = 4 \times Rh \text{ caloporteur}$$

Équation 39

Enfin on calcule le coefficient global (équation 40) :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1 \times \ln(\frac{r_3}{r_1})}{16} + \frac{r_1}{r_3 \times h_3}}$$

Équation 40

3.1.2.2 Etape 2 : Choix du module

Le module choisit est un tube coaxial co-courant.

3.1.2.3 Etape 3 : Evaluation du nombre d'unité de transfert

La méthode du Nombre d'Unités de Transfert (équation 26) permet le dimensionnement des échangeurs au moyen d'une relation entre trois paramètres sans dimensions caractéristiques de l'échangeur. Ces trois grandeurs sont respectivement :

K= coefficient global pour un seul module $W/m^2.K$

S= surface pour un seul module m^2

P= masse volumique eau caloporteur

μ =viscosité de l'eau caloporteur

q= débit de l'eau caloporteur

$$NUT = \frac{K \times S}{\rho \times \mu \times q \times 1000}$$

3.1.2.4 Etape 4 : Evaluation de l'efficacité de l'échangeur

L'échangeur que nous utilisons est tel que les effluents et le fluide caloporteur ne font qu'un seul passage. La relation entre les trois grandeurs supra (équation 41) est donc :

$$NUT = \frac{-1}{1 + R} \ln(1 - \eta(1 + R))$$

Équation 41

Ayant choisi le débit de fonctionnement d'un module, le projeteur calcule d'abord le rapport de déséquilibre au moyen de la formule suivante (équation 27) :

$$R = \frac{q_2}{q_1}$$

avec : R Rapport de déséquilibre (sans dimension)
 $[q_2] = m^3 \cdot s^{-1}$ Débit volumique du fluide caloporteur dans un module
 $[q_1] = m^3 \cdot s^{-1}$ Débit volumique des effluents

Pour les échangeurs coaxiaux, le sens des liquides sera co-courant. C'est-à-dire dans le même sens de circulation.

Le rendement de l'échangeur à chaleur est donné par cette formule (équation 42) :

$$\eta = \frac{1 - \exp(-NUT(1 + R))}{1 + R}$$

Équation 42

3.1.2.5 Etape 5 : Détermination du nombre de module

Dans un premier temps, le projeteur calcule le facteur de refroidissement (équation 32) qui est le produit de l'efficacité de l'échangeur par le rapport de déséquilibre. Ce terme caractérise le refroidissement des effluents, et donc le comportement des modules d'échanges successifs.

$$\text{facteur de refroidissement} = \eta R$$

Dans un second temps, le projeteur évalue l'offre en énergie des effluents et la compare aux besoins du bâtiment. Pour ce faire, le projeteur relève dans le catalogue du constructeur la puissance calorifique échangée dans l'évaporateur de la pompe à chaleur choisie. Il s'agit de la puissance à extraire de la source froide. Il calcule ensuite la puissance limite (équation 33) pouvant être extraite des effluents au moyen de la formule suivante :

$$P_{lim} = 4186 \times q_1 \times (T_{ref} - 4)$$

avec : $[P_{lim}] = kW$ Puissance limite pouvant être extraite des effluents
 $[q_1] = m^3 \cdot s^{-1}$ Débit volumique des effluents
 $[T_{ref}] = ^\circ C$ Température de dimensionnement de l'échangeur

(Température moyenne des effluents au mois de février)

Nous devons évaluer la puissance calorifique de la pompe à chaleur. En se basant sur un COP machine de 4, la puissance à extraire de la source froide (équation 34) vaut :

$$P_f = P \text{ du site } \left(1 - \frac{1}{4}\right)$$

Il faut toutefois veiller à ce que la valeur choisie pour le dimensionnement soit supérieure au COP machine de la pompe à chaleur dans les conditions réelles de fonctionnement, de sorte que l'échangeur ne soit pas sous-dimensionné

Le projeteur compare l'offre à la demande en effectuant le rapport des deux puissances précédentes et calcule ainsi le rapport d'adéquation du site (équation 34) au moyen de la formule :

$$\text{rapport d'adéquation} = \frac{P_f}{P_{lim}} = \frac{P_f}{4186 \times q_1 \times (T_{ref} - 4)}$$

Ensuite on détermine le nombre de module N (équation 35) à mettre en place :

$$N = \frac{\text{rapport d'adéquation}}{\text{facteur de refroidissement}}$$

3.1.2.6 Etape 6 : Calcul de la puissance cédée par les échangeurs

Enfin, on calcule la puissance cédée par les échangeurs à chaleur (équation 36) pour retrouver la puissance cédée par la source d'eau froide (évaporateur).

$$P_{cédée} = \rho_{effluent} \times C_p \text{ effluent} \times Q_{effluent} \times (T_{ce} - T_{fe}) \times (1 - (1 - \eta \times R)^N)$$

T_{ce}= entrée effluent

T_{fe}= entrée fluide caloporteur

η= rendement d'un échangeur à chaleur

R= rapport de déséquilibre

3.1.3 Etude de cas de la piscine Hébert et Ecole de Clichy

Tableau 16: Hypothèse des effluents

Hypothèse des effluents	Piscine hébert plaque à chaleur	Piscine Hébert tube coaxial	Piscine Hébert tube coaxial 2	Ecole de Clichy plaque à chaleur	Ecole de Clichy tube coaxial	Unité
Température des effluents	13					°C
Température fluide caloporteur	4					°C
Longueur d'un module	9	6	6	6	6	m
Masse volumique	1000					Kg/m ³
Viscosité dynamique	0,001					Pa.s
Conductivité thermique	0,6					W/m.K
Capacité calorifique	4,186					Kj/Kg.K
Débit	0,16	0,144	0,094	0,5	0,144	m ³ /s
Rayon hydraulique	0,216	0,1	0,075	0,296	0,1	m
Section mouillée	0,8	0,126	0,071	1,464	0,126	m ²
Reynolds	48607	114592	99737	101093	114592	
Prandlt	7					

Tableau 17: Hypothèse des échangeurs à chaleur

hypothèse échangeur à chaleur	Piscine Hébert plaque à chaleur	Piscine Hébert tube coaxial	Piscine Hébert tube coaxial 2	Ecole de Clichy plaque à chaleur	Ecole de Clichy tube coaxial	Unité
Débit serpentin ou annulaire	0,0013	0,0015	0,0010	0,0005	0,0006	m ³ /s
Vitesse max serpentin ou annulaire	1	0,21	0,21	1	0,1	m/s
Diamètre intérieur serpentin ou annulaire	0,04	0,41	0,31	0,025	0,41	m
Rayon hydraulique serpentin ou annulaire	0,010	0,0025	0,0025	0,006	0,0025	m
Surface mouillée serpentin ou annulaire	0,0014	0,132	0,075	0,0005	0,132	m ²
Périmètre mouillé serpentin ou annulaire	0,13	1,28	0,974	0,08	1,29	m
Reynolds serpentin ou annulaire	1307	67,20	69,84	832	32	
Prandtl serpentin ou annulaire	60,4	60,4	60,4	60,4	60,4	
Péclet	78974	4060	5420	50299	1978	
LC	Rien	0,01	0,01	Rien	0,01	m

Tableau 18: Hypothèse d'entrée du Solveur Excel

Hypothèse d'entrée du solveur	Piscine Hébert	Ecole de Clichy	Unité
valeur cible module	Min	Min	
Reynolds caloporteur ou annulaire	<2100	<2100	
Vitesse caloporteur ou annulaire	<1,5	<1,5	m/s
débit caloporteur ou annulaire	<15	<8,5	l/s

Les hypothèses utilisées dans les tableaux 17, 18 et 19 sont optimales pour faire fonctionner une pompe à chaleur dans chacun des sites choisis avec les différents échangeurs à chaleur. En revanche la longueur des tubes coaxiaux peut être surdimensionnée. Il faudra peut-être réduire leur longueur. Ceci intervient seulement dans le nombre de module à installer.

3.1.4 Résultat

Tableau 19: Résultats des différents sites

Résultat	Piscine Hébert plaque à chaleur	Piscine Hébert tube coaxial	Piscine Hébert tube coaxial 2	Ecole de Clichy plaque à chaleur	Ecole de Clichy tube coaxial	Unité
Coefficient de convection	315	320	334	457	318	K
Module longueur	9	6	6	3	3	m
Module largeur	0,7	rien	Rien	0,7	Rien	m
Epaisseur plaque Inox	0,002	rien	Rien	0,002	Rien	m
Surface d'un module	6,3	7,54	5,65	2,1	3,76	m ²
Nombre de passe	6	rien	Rien	8	Rien	
Débit de fonctionnement	15	15	15	7	7	l/s
Débit serpentin ou annulaire	1.3	1,3	1,3	1	0,6	l/s
Unité de transfert	0,45	0,5	0,5	0,51	0,5	NUT
Rapport de déséquilibre	0,007	0,01	0,01	0,001	0,0039	
Rendement	0,35	0,39	0,39	0,4	0,4	
Facteur de refroidissement	0,0027	0,003	0,004	0,00036	0,0015	
Puissance source froide	196	196	195,75	93	93	kW
Puissance limite des effluents	6028	5425	3541	18837	5425	kW
Rapport d'adéquation	0,032	0,04	0,06	0,0049	0,017	
NB de module	12	11	14	14	11	
Puissance échangeur	192.87	192,64	195	92	92	kW
Pompe de circulation	12	11	11	5	2	kW

Les résultats sont cohérents par rapport aux hypothèses utilisées et aussi aux contraintes appliquées par rapport à la pompe à chaleur. De plus la puissance de source froide est égale à la puissance des échangeurs à chaleur donc les résultats avec les formules utilisées sont corrects.

3.1.5 A retenir

Le bilan de cette section sera sous forme de tableau 20 :

Tableau 20 : Récapitulatif pour le dimensionnement des échangeurs à chaleurs

	Ecole de Clichy	Piscine Hébert
Echangeur à plaque	14	12
Echangeur tube coaxial	11	11 ou 14

3.2 Mise à sec des collecteurs

Dans cette section, la mise à sec des collecteurs signifie que les eaux ne circulent plus sur un tronçon donné pendant une période donnée à l'intérieur de la cunette tout en assurant un fonctionnement satisfaisant du collecteur. La méthode et les calculs sont développés tout au long de cette partie.

3.2.1 Etude de mise à sec du collecteur de Clichy

Cette étude provient d'un rapport de l'entreprise de SEGIC intitulée « Mise à sec du Clichy AMONT à Paris (1^{er}, 2^{ème} et 9^{ème} arrondissement) ». Elle a été réalisée pour la réhabilitation du collecteur. La mise à sec concerne le tronçon entre le collecteur de la Victoire et Place de Clichy.

3.2.1.1 Consigne de travaux

Les consignes de travaux sur le collecteur sont les suivantes :

- absence de rejet dans le milieu naturel (rejets en Seine) par temps sec, période de retour de protection du chantier : en temps de pluie ; le dispositif de mise à sec d'un collecteur devra assurer une protection du chantier pour des pluies d'occurrence de 1 mois. Au-delà de cette occurrence, le chantier sera susceptible d'être inondé, surcharge acceptable le long des ouvrages : la montée de la ligne d'eau générée par la mise en place d'un barrage devra causer un minimum de désagrément (refoulement) au niveau des branchements particuliers.
- dimension des busages : le diamètre intérieur sera de 800mm (voir 1000 mm) maximum pour des contraintes de mise en oeuvre et de réalisation des travaux,
- durée des travaux : les travaux se dérouleront en dehors des périodes d'orages, soit sur 7 mois de l'année d'octobre à avril.

La démarche suivante a été appliquée pour la réalisation de l'étude de mise à sec :

- détermination des bassins versants drainés par le collecteur Clichy,
- détermination de la pluie de retour 1 mois et des débits associés à prendre en compte,
- détermination des apports directs au collecteur par temps sec,
- détermination des apports directs au collecteur par temps de pluie,
- étude et analyse des mises à sec faites antérieurement sur les collecteurs Sébastopol Nord et Sud,
- étude des principes généraux de déviation,
- définition des principes de busage et dimensionnement.

11/08/2014	Vivien Maillard	Page 56 sur 92
------------	-----------------	----------------

3.2.1.2 Caractéristique des bassins versants

En plus de ses propres bassins d'apports, le collecteur de Clichy amont reçoit en tête :

- le collecteur Sébastopol « nord » qui draine les collecteurs :
 - Vertbois,
 - du Centre.
- le collecteur Sébastopol « sud » qui draine les collecteurs :
 - Rivoli,
 - du Temple,
 - Vieille du Temple,
 - St Gilles,
 - des Quais.

La surface des bassins versants d'apports propre au collecteur Clichy amont est estimée à 3.09 km² (309 ha).

Les 4 bassins versants les plus importants sont ceux associés au :

- Collecteur des Petits Champs,
- Collecteur Rivoli Ouest,
- Collecteur de la Victoire,
- Collecteur St Lazare.

Les bassins versants d'apport du collecteur Clichy ont été divisés en 3 bassins principaux en fonction des possibilités de déviation des effluents et de maillage du réseau :

- Bassin amont : du boulevard Sébastopol à la rue des Petits Champs : 30 antennes adjacentes, soit 0.42 km² - bassin dérivable vers l'intercepteur Clichy – Capucine (portion 1 de travaux),
- Bassin intermédiaire : de la rue des Petits Champs à la rue de la Victoire : 14 antennes adjacentes, soit 1.26 km² bassin en partie dérivable vers l'intercepteur Clichy-Capucine et la galerie Capucine et le collecteur d'Asnières (portion 2 de travaux),
- Bassin aval : de la rue de la Victoire à la Place Clichy : 7 antennes adjacentes, soit 1.41 km² : bassin non dérivable (portion 3 de travaux).

Le tableau 21 ci-après récapitule la liste des petites lignes et collecteurs adjacents et les bassins versants associés :

11/08/2014	Vivien Maillard	Page 57 sur 92
------------	-----------------	----------------

Tableau 21: Des bassins versants et des collecteurs Source : SEGIC

Portion	Rive (Droite/ Gauche)	Voie ou n° plaque	Distance (ml)	PK (collecteur)	Surface (en km²)	Surface (en ha)
Portion 1	D	Bd Sebastopol impair - P220	16,9	7104,0		
	G	Bd Sebastopol impair - (> P213)	16,9	7104,0		
	D	rue de St Denis	63,0	7060,0		0,000
	G	rue de St Denis	70,0	7060,0	0,025	2,530
	D	rue des Innocents (avec 3)	138,0	6988,0		
	G	rue des Halles pair (avec 4)	201,0	6929,0		
	G	rue du Pont Neuf pair	335,0	6795,0	0,028	2,630
	D	rue Baltard	351,0	6779,0	0,090	9,010
	G	rue du Pont Neuf impair (avec 7)	360,0	6770,0		
	D	rue des Prouvaires	418,0	6712,0	0,003	0,260
	G	rue du Roule	418,0	6712,0		
	G	rue du Louvre pair	619,0	6511,0	0,011	1,050
	D	rue du Louvre pair	619,0	6511,0	0,025	2,490
	G	rue du Louvre impair	632,0	6498,0		
	D	rue du Louvre impair	632,0	6498,0	0,005	
	D	rue St Honore	692,0	6438,0		
	D	rue Jean Jacques Rousseau	744,0	6378,0	0,048	4,830
	D	rue Croix des Petits Champs	785,0	6338,0	0,016	1,560
	D	rue des Bons Enfants	875,0	6250,0	0,012	1,160
	D	rue de Valois	920,0	6205,0	0,034	3,380
	G	Place du Palais Royal pair	930,0	6193,0	0,022	2,230
	G	Place du Palais Royal impair (avec 19)	1006,0	6124,0		
	D	Galerie Nemours	1027,0	6103,0		
	G	rue du Rohan 1	1067,0	6063,0	0,028	2,820
	D	Place Colette	1078,0	6052,0	0,009	0,850
	G	rue du Rohan 2	1085,0	6045,0		
	D	rue Richelieu	1100,0	6030,0	0,050	4,990
	D	rue Molière	1210,0	5914,0	0,006	0,580
	G	rue St Anne	1264,0	5864,0	0,007	0,680
	D	rue Thérèse	1448,0	5682,0	0,008	0,760
	D	rue Vantadour (avec 30)	1462,0	5662,0		
	D	Vanne intercepteur Capucine	1542,0	5588,0		0
	Portion 2	D	Collecteur des Petits Champs	1555,0	5575,0	0,541
D		rue Gaillon	1574,0	5556,0	0,0828	8,28
G		rue des Petits Champs/Danielle Casanova	1591,0	5530,0	0,0827	
D		Bd des Capucines impair	1975,0	5155,0	0,0207	
G		Bd des Capucines impair = Rivoli ouest	1980,0	5150,0	0,307	
G		Bd des Capucines pair = Galerie Capucine	2004,0	5126,0	0,0413	4,13
D		rue Auber pair	2180,0	4950,0	0,0023	0,23
D		rue Scribe pair	2200,0	4930,0	0,0211	2,11
G		rue Scribe impair	2290,0	4840,0	0,012	1,2
G		Bd Haussmann impair	2322,0	4808,0	0,017	1,7
D		Bd Haussmann pair	2350,0	4780,0	0,0061	0,61
G		rue de Provence	2452,0	4678,0	0,06	6
D		rue de Provence	2455,0	4675,0	0,067	6,7
D	rue Joubert	2495,0	4631,0	0,0018	0,18	
Portion 3	D	rue de la Victoire (collecteur)	2540,0	4590,0	0,577	57,7
	G	rue de la Victoire	2540,0	4590,0	0,0022	0,22
	D	rue St Lazare impair	2660,0	4470,0		
	G	rue St Lazare pair	2680,0	4450,0	0,27	27
	D	Ouvrage St Lazare	2690,0	4440,0	0,396	39,6
	G	rue de Londres	2715,0	4415,0	0,183	2,76
	D	collecteur des coteaux	3500,0			
Total		Place de Clichy - Fin des travaux (P219-Coteau	3580,0		3,054	

3.2.1.3 Méthodologie

La démarche utilisée pour l'étude de mise à sec a suivi les étapes suivantes :

Etude du temps sec, pour valider les clés de répartition entre les apports :

- détermination des courbes de temps sec des points de mesures et donc des apports journaliers sur l'ensemble du tronçon Clichy amont entre le bd Sébastopol et la Place de Clichy ;
- estimation par calcul théorique des apports du collecteur Rivoli Est ;
- détermination des apports journaliers de temps sec sur les antennes adjacentes ;
- contrôle de la cohérence des valeurs par mesure sur site des débits d'apports par temps sec des principales antennes adjacentes ;

Etude du temps de pluie :

- détermination des journées correspondant à une période de retour 1 mois ;

- détermination des débits d'apports journaliers sur le tronçon Clichy amont entre le bd Sébastopol et la Place de Clichy pour ces périodes de retour 1 mois ;
- estimation des apports de temps de pluie du collecteur Rivoli Est ;
- détermination des débits d'apport de temps de pluie de chaque antenne adjacente au prorata des surfaces de bassins versants associés ;
- Détermination des débits à collecter sur le collecteur de Clichy.

3.2.1.4 Débit de temps sec

3.2.1.4.1 Détermination des débits de temps sec

Le débit amont du collecteur de Clichy est constitué des apports du collecteur Sébastopol Nord, du collecteur Sébastopol Sud, du collecteur Rivoli Est et du collecteur des Quais. Le débit amont est considéré égal à la somme des débits des points P213 + P220 et du débit du collecteur Rivoli Est. Le débit aval est celui du point de mesures P219 situé juste en amont de l'arrivée du collecteur des coteaux. Les débits maximum de temps sec du collecteur Rivoli Est et des antennes adjacentes au collecteur Sébastopol Sud entre le point 213 et le collecteur de Clichy ont été estimés à partir des bassins versants drainés, de la densité de la population dans le centre de paris et la consommation d'eau sur Paris. Ces débits sont présentés dans le tableau 22 ci-après.

Tableau 22: temps sec du collecteur Clichy Amont Source : SEGIC

Rive (Droite/ Gauche)	Voie ou n° plaque	Observations	Surface (en ha)	Qts (m3/s)
G	quai de Gesvres	BV54	0,790	0,003
G	quai de la mégisserie	BV55	0,760	0,003
D	Rivoli Est	BV53	70,000	0,245
G	avenue Victoria	BV51	3,160	0,011
D	rue Nicolas Flamel	BV52	0,800	0,003
Total			75,510	0,264

L'ensemble des mesures a été validé, notamment en supprimant les données aberrantes (valeurs extrêmes isolées).

Les courbes de temps sec peuvent évoluer en fonction des configurations des réseaux en amont, mais le débit d'apport sur le collecteur de Clichy reste stable.

Le débit de temps sec propre au collecteur Clichy amont (sans les débits amont) est de l'ordre de 1 m³/s.

Ce débit est cohérent avec les 1,08 m3/s du calcul théorique effectué à partir de la surface de bassin versant drainé par le collecteur de Clichy (3,08 km²).

Le débit d'apport de temps sec propre au collecteur Clichy amont a ensuite été réparti sur les collecteurs d'apport adjacents au prorata de leurs surfaces de bassins versants respectifs (par rapport à la surface totale de 3,08 km²).

3.2.1.5 Débit de temps pluie

3.2.1.5.1 Pluie projet

Les débits de temps de pluie ont été calculés pour une période de retour 1 mois, période usuellement fixée pour la mise à sec des collecteurs. La pluie retenue pour le dimensionnement sera d'une durée de 30 minutes, valeur moyenne du temps de concentration des bassins versants étudiés.

La SAP réalise dans le cadre de ses bilans annuels une analyse des périodes de retour des pluies. La période de 1 mois est traitée mais sur des durées variant de 1 heure à 24 heures.

La valeur d'intensité moyenne sur 30 minutes a été appréhendée suivant 2 approches :

- l'application des ratios donnés par l'instruction technique de 77 : Méthode 1,

Soit $i(t,F)$ l'intensité maximale de la pluie de durée t et de fréquence de dépassement F .

$i(t,F) = a(F) \times t \times b(F)$ avec $i(t,F)$ en mm/minute et t en minutes.

Le secteur étudié correspond à deux zones servant de base de données disposant chacune de valeurs distinctes pour a (10ans) et b (10ans).

ZONE	a (10ans)	b (10ans)	$i(30\text{min},10\text{ans})$ en mm/min	$i(30\text{min},10\text{ans})$ en mm/h
REGION I	5,9	-0,59	0,7931	47,59
PARIS MONTSOURIS	5,2	-0,52	0,8695	52,17

En appliquant les ratios données par l'instruction technique de 77 afin d'estimer les débits d'orage de période de retour inférieure à 1 an à partir de la période de retour 10 ans, les résultats suivants sont obtenus :

Période de retour	Ratio à appliquer $i(30\text{min},X)$ en mm/h	sur $i(30\text{min},10\text{ans})$	
		REGION I	PARIS MONTSOURIS
1 mois	12%	5,71	6,26

3.2.1.5.2 Sélection des pluies

Les données pluviométriques utilisées sont issues de 5 pluviomètres de la SAP (PL03, PL04, PL09, PL11, PL13) sur la période de septembre à mai des années 2007 à 2010. Les données pluviométriques ont été analysées avec une moyenne glissante.

Les pluies sélectionnées présentent un cumul entre 2,4 et 3,6 mm sur 30 minutes, correspondant à une intensité pluviométrique entre 4,8 à 7,2 mm/h.

Les pluies retenues correspondent aux pluies de période de retour d'un mois environ, classées préférentiellement par les pluviomètres en amont des bassins versants, dont les mesures des 3 points de mesures de débits sont disponibles, ainsi que les pluviomètres.

53 événements pluvieux ont été ainsi sélectionnés, dont seul 18 disposent des mesures

sur les trois points.

L'étude a été menée sur 4 années de mesures de septembre à mai soit statistiquement 64 pluies. L'échantillon sélectionné est donc cohérent avec la période de retour. (Tableau 23)

Tableau 23: Echantillons des pluies sélectionnées Source: SEGIC

Horodatage	Cumul Maximum (mm) sur 30 mn					Débit maximum (m ³ /s) journalier						Cumul pluviométrique journalier						
	PL03	PL11	PL04	PL13	PL09	Q-P213	Q-P220	Rivoli Est	Gamont	Q-P219	Apports	PL03	PL11	PL04	PL13	PL09		
13/11/2007 20:00	3,8	0,2	0,6	1,4	0	2,07	1,27	0,40	3,74	4,66	0,92	7,0	3,8	4,0	2,8	6,6		
06/04/2009 22:30	3,6		3	0	1,4	1,85	0,94	0,38	3,16	4,45	1,29	5,8	4,4	4,6	0,2	0,0		
03/12/2007 03:30	3,4		2,4	2,6	0,8	2,10	0,77	0,36	3,22	4,55	1,33	6,0	5,4	5,2	5,6	0,0		
30/04/2008 08:30	2,4	0,2	2,4	1,4	0	1,32	0,51	0,25	2,08	3,42	1,34	6,8	0,0	6,2	4,0	5,0		
18/04/2008 18:00	2,8	0,8	1,8	2,2		1,52	0,95	0,29	2,77	4,39	1,62	8,4	0,0	6,6	7,2	9,0		
05/01/2008 03:00	3		3,4	3	2,4	2,26	1,25	0,31	3,83	5,54	1,71	8,2	7,2	8,0	6,0	0,0		
06/10/2009 04:30	3,4		3,4	0,8	1,2	2,92	0,25	0,36	3,52	5,47	1,95	10,4	6,4	9,8	6,4	0,0		
01/09/2009 12:30	2,4	4,8	3	2,6	0,6	1,75	0,29	0,25	2,29	4,63	2,35	8,2	7,0	13,8	8,0	14,0		
28/09/2007 13:30	2,8		3,2	1	0,6	1,43	0,62	0,29	2,35	4,76	2,41	12,2	9,2	10,2	12,6	0,0		
08/11/2007 21:00	4	2,6	2,6	3,8	1,6	2,31	1,11	0,42	3,83	6,32	2,49	4,4	4,8	3,6	4,4	4,8		
01/02/2008 02:00	2,4	0	4,4	1,8	1	2,56	1,12	0,25	3,93	6,44	2,51	28,2	23,0	47,6	22,6	0,0		
01/10/2007 10:00	2,8		1,6	2,4		1,15	0,89	0,29	2,34	6,01	3,67	2,8	10,8	8,2	2,6	0,0		
05/10/2009 10:00	2,6		2,6	1,6	2,4	2,71	0,26	0,27	3,24	7,22	3,98	12,6	11,6	11,0	11,8	0,0		
14/09/2009 20:00	2,4	3,2	3,4	2,4	1,6	2,89	0,30	0,25	3,45	7,86	4,42	8,4	9,4	10,0	5,6	28,0		
27/05/2008 23:30	4,2	1,6	2,8	4	0,8	2,21	0,31	0,44	2,97	7,47	4,51	20,0	22,2	22,2	14,4	20,6		
02/04/2010 12:00	2,8	2	2,4	2	1,2	2,01	0,38	0,29	2,68	7,89	5,21	6,4	4,0	6,0	4,6	8,0		
30/03/2010 03:00	2,4	2	0	1	0,6	1,99	0,40	0,25	2,64	7,89	5,25	4,6	6,8	7,8	7,2	13,6		
Moyenne	3,012	1,74	2,529		2	1,08		2,06	0,68	0,32	3,06	5,82	2,76	9,4	8,0	10,9	7,4	6,4

Les débits du collecteur Rivoli Est ont été calculés par la méthode rationnelle. Les mesures du 12/05/2009 ont été supprimées suite à des apports très faibles. Les mesures de la période de février à avril 2010 correspondraient à des configurations particulières liées à des chômages de réseaux amont (mais non confirmé par la SAP).

Les valeurs de débit varient fortement sur l'ensemble des événements pluvieux : de 0,92 à 5,25 m³/s.

Les pluies du 01/09/09 et du 14/09/09 sont semblables. Elles sont temporellement proches (donc avec la même configuration des réseaux), avec des intensités maximales (2,4 mm sur 30 mn) et cumulées sur la journée similaires (8,2/8,4 mm). Pourtant les débits d'apports varient du simple au double (2,35 pour 4,42 m³/s).

Les débits suivent une évolution régulière avec une fracture entre 2,51 (01/02/08) et 3,67 m³/s (01/10/07). La valeur moyenne de 2,76 m³/s se situe au niveau de cette discontinuité.

Le calcul de débit d'apport (propre au collecteur Clichy) par la méthode rationnelle Q=CIA avec un coefficient de 0,5 (données ville de Paris) et une intensité de 6,26 mm conduit au résultat de 2,80 m³/s.

L'ensemble de ces informations (étude statistique des mesures de la SAP, calcul théorique, expérience) conduit à proposer un débit d'apport propre au collecteur de Clichy de **3 m³/s**.

3.2.1.6 Mise en place des déviations amonts

L'analyse des mises à sec faites sur les collecteurs Sébastopol Nord et Sud ont conduit au principe de déviation suivant à l'amont du collecteur Clichy:

- 1) Mise en place d'un barrage n°1 dans le collecteur des Quais à l'aval du siphon Cuvier et fonctionnement du Siphon Cuvier en sens inverse. Tous les effluents arrivant en amont du siphon Cuvier y sont envoyés via l'usine Mazas.
- 2) Mise en place :
 - d'un barrage n°2 dans le collecteur Sébastopol nord à l'aval du collecteur Centre,
 - d'une station de pompage de 350l/s (temps sec dans le collecteur Centre au niveau de l'intersection avec Sébastopol) La station de pompage renvoie les effluents de temps sec vers le Collecteur des Petits Champs.

Les effluents de temps de pluie 1 mois s'écoulent vers Sébastopol Nord et le collecteur des Coteaux (passage d'un point au niveau de la rue Notre Dame de Nazareth)

- 3) Mise en place :
 - d'un barrage n°3 dans le collecteur Sébastopol sud à l'aval de l'intersection avec le collecteur Rivoli Est,
 - d'un barrage n°4 dans le collecteur Quai de la Mégisserie au niveau du point haut,
 - d'une station de pompage de 1225l/s dans Sébastopol sud au niveau de l'intersection avec le collecteur Rivoli Est et en amont du barrage n°3.

La station de pompage renvoie les effluents de temps sec et de temps de pluie 1 mois derrière le barrage n°4 Quai de la Mégisserie.

De plus afin de limiter les apports du Collecteur Centre, il sera envisagé de :

- fermer le siphon Richard Lenoir Sur le collecteur centre (point n°5),
- mettre en place un barrage n°6 dans le collecteur Centre à l'aval de l'intersection avec le collecteur Crussol-Amelot, pour envoyer une partie des effluents du Collecteur Centre et ceux de Crussol-Amelot vers le collecteur des Coteaux.

Après la mise en place de ces systèmes de déviations, les apports subsistants en amont du Collecteur Clichy sont de l'ordre de 300l/s (275l/s : Sébastopol nord entre le collecteur Centre et le collecteur Clichy et 25l/s de Sébastopol sud entre le collecteur Rivoli Est et le collecteur Clichy).

3.2.1.7 Partie du collecteur: entre le collecteur de la Victoire et la Place de Clichy : 1024 m

La partie du collecteur entre le collecteur de la Victoire et la Place de Clichy est longue de 1024 m et concerne les collecteurs adjacents (tableau 24) suivants :

11/08/2014	Vivien Maillard	Page 62 sur 92
------------	-----------------	----------------

Tableau 24: Sélection du bassin versant Source: SEGIC

Portion	Rive (Droite/ Gauche)	Voie ou n° plaque	Distance (m)	PK (collecteur)	Section Ø (mm) T (m)	Observations	Surface (en km²)	Débit pluie 1 mois	Débit à collecter	Diamètre des buses
Portion 3	D	rue de la Victoire (collecteur)	2540,0	4590,0	1,95x1,90		0,577	0,559	0,559	vers Galerie Capucines
	G	rue de la Victoire	2540,0	4590,0	2,15x1,55		0,0022	0,002	0,002	Ø800
	D	rue St Lazare Impair	2660,0	4470,0		avec BV 50		0,000	0,002	Ø800
	G	rue St Lazare pair	2680,0	4450,0	3,80x2,70		0,27	0,262	0,264	Ø800
	D	Ouvrage St Lazare	2690,0	4440,0	3,80x2,10		0,395	0,384	0,348	2Ø800
	G	rue de Londres	2715,0	4415,0	2,30x1,60		0,163	0,158	0,806	2Ø800
	D	collecteur des coteaux	3500,0					0,000	0,806	2Ø800
	D	Place de Clichy - Fin des travaux (P218-Coteaux)	3580,0					0,000	0,806	2Ø800

3.2.1.8 De l'aval de la rue de Londres à la Place de Clichy

- Mise en œuvre des dispositifs de déviation en amont du collecteur Clichy décrits

Précédemment

- Mise en place :
 - d'un barrage n°13 dans le collecteur Clichy à l'aval du collecteur de la rue de Londres,
 - d'un barrage n°14 dans le collecteur des Coteaux à l'aval de l'intercepteur Coteaux Nord Est, qui permet de renvoyer les eaux du collecteur Coteaux vers l'intercepteur Coteaux Nord Est,
 - d'un barrage anti retour n°15 dans le collecteur de Clichy au niveau de la Place de Clichy à l'aval du collecteur de Coteaux
- de busages 2Ø800 entre les barrages n°13 et n°15 (pour reprendre le surplus de débit à l'amont du barrage 13).

Les flux en amont de la galerie Capucines et les flux entre le barrage n°12 et la galerie Capucines (écoulement gravitaire inversé : écart de radier de 23 cm (24.78 – 24.55)) sont déviés dans la galerie Capucines (autant que possible) qui fonctionnera elle aussi en gravitaire inversé vers le collecteur d'Asnières. Si besoin, il sera mis en place un barrage anti-retour et un pompage de 80 l/s dans le collecteur de Provence (raccordement fil d'eau avec Clichy) vers le collecteur Clichy. Si l'intercepteur de la Galerie Capucines est capable de reprendre également la totalité des flux amont sans mise en place des dispositifs de déviation, ces derniers ne seront pas mis en oeuvre. Il faudra vérifier qu'aucun barrage hydraulique ne se crée au niveau de l'intersection de la galerie Capucine et le collecteur d'Asnières.



Figure 22: Carte de mise à sec du collecteur de Clichy Source : Ville de Paris

Echelle :1/40 000

3.2.2 Etude de la mise à sec du collecteur la Chapelle

Cette étude a été réalisée au sein de la Division des Grands Travaux par des calculs théoriques.

3.2.2.1 Consigne travaux

Les consignes de travaux sur le collecteur sont les suivantes :

- absence de rejet dans le milieu naturel (rejets en Seine) par temps sec, période de retour de protection du chantier : en temps de pluie ; le dispositif de mise à sec d'un collecteur devra assurer une protection du chantier pour des pluies d'occurrence de 1 mois. Au-delà de cette occurrence, le

chantier sera susceptible d'être inondé, surcharge acceptable le long des ouvrages : la montée de la ligne d'eau générée par la mise en place d'un barrage devra causer un minimum de désagrément (refoulement) au niveau des branchements particuliers,

- dimension des busages : le diamètre intérieur sera de 600mm maximum pour des contraintes de mise en œuvre et de réalisation des travaux,

- durée des travaux : les travaux se dérouleront en dehors des périodes d'orages, soit sur 7 mois de l'année d'octobre à avril, impliquant un phasage sur plusieurs années.

La démarche suivante a été appliquée pour la réalisation de l'étude de mise à sec :

- détermination des bassins versants drainés par le collecteur la Chapelle,
- détermination de la pluie de retour 1 mois et des débits associés à prendre en compte,
- détermination des apports directs au collecteur par temps sec,
- détermination des apports directs au collecteur par temps de pluie,
- étude des principes généraux de déviation,
- définition des principes de busage et dimensionnement.

3.2.2.2 Caractéristique des bassins versants

La surface des bassins versants d'apports propre au collecteur la Chapelle amont est estimée à 0.79 km² (309 ha) jusqu'à la rue des Roses.

Les bassins versants d'apport du collecteur Clichy ont été divisés en 2 bassins principaux en fonction des possibilités de déviation des effluents et de maillage du réseau :

- Bassin amont : de l'avenue Achelle pair à la rue Sevestre : 12 antennes adjacentes, soit 0.33 km² - bassin dérivable vers l'intercepteur La chapelle – Coteaux (portion 1 de travaux),
- Bassin intermédiaire : de la rue Sevestre à la rue des Roses : 13 antennes adjacentes, soit 0.45 km² bassin en partie dérivable vers un autre collecteur entre le collecteur la Chapelle et le boulevard Ordener impair (portion 1 de travaux),

3.2.2.3 Méthodologie

La démarche utilisée pour l'étude de mise à sec et les étapes suivantes :

Etude du temps sec, pour valider les clés de répartition entre les apports :

- estimation par calcul théorique des apports du collecteur La chapelle ;
- détermination des apports journaliers de temps sec sur les antennes adjacentes ;

Etude du temps de pluie :

- création d'une pluie projet avec les données de Météo France;
- estimation des apports de temps de pluie du collecteur La chapelle ;
- détermination des débits d'apport de temps de pluie de chaque antenne adjacente au prorata des surfaces de bassins versants associés ;

3.2.2.4 Etude du temps sec pour le collecteur de la Chapelle

Le débit moyen journalier (Qm) de rejet d'eaux usées domestiques d'une zone homogène peut être évalué en prenant la consommation d'eau par habitant et par vingt-quatre heures correspondant aux plus fortes consommations journalières de l'année estimées ou calculées à partir des volumes d'eau vendus. Il est à noter que l'eau consommée tant par les usagers que par les services publics ne parvient pas en totalité au réseau ; l'eau d'arrosage des jardins et plantations est vouée à l'infiltration dans le sol ou à l'évaporation dans l'atmosphère, l'eau de lavage des espaces publics est recueillie dans les ouvrages pluviaux ou dans les ouvrages unitaires grossissant le débit de temps sec. Pour étudier le temps sec, l'équation 43 (Hydraulique et hydrologie urbaine en réseau d'assainissement) a été utilisée :

$$Q_{edm} = \frac{N_h \times C_m}{86400}$$

Avec : Qedm : débit moyen journalier en L/s

Nh : nombre d'habitants raccordés

Cm : Consommation moyenne en L/j/Habitant

Équation 43

Le nombre d'habitant a été estimé par la densité de population sur Paris. Elle est d'environ 26000 hab/km². La consommation moyenne est une donnée de la ville de Paris (308 L/j/hab). Le tableau 28 récapitule les hypothèses utilisées.

3.2.2.4.1 Les hypothèses de calculs :

Tableau 25: Hypothèse de calcul pour le temps sec

Amont					
Rue	surface (m ²)	surface (km ²)	nombre d'habitant	surface (ha)	consommation (l/j/h)
avenue Rachel pair	5119	0,005	133	0,51	308
 cité Veron	8815	0,009	229	0,88	308
 rue Lepic	120139	0,120	3127	12,01	308
 rue Coustou	31691	0,032	825	3,17	308
 rue Germain Pion	23784	0,024	619	2,38	308
impasse de guelma	7733	0,008	201	0,77	308
 rue André Antoine	6924	0,007	180	0,69	308
 Rue Houdon	14486	0,014	377	1,45	308
 rue des Martyrs	32450	0,032	845	3,25	308
 rue Dancourts	44926	0,045	1169	4,49	308
 rue de Steinkerque	9385	0,009	244	0,94	308
 rue Briquet	9504	0,010	247	0,95	308
 rue Sevestre	19020	0,019	495	1,90	308
impasse du Cadran	2619	0,003	68	0,26	308
 rue de Clignancourt	35793	0,036	932	3,58	308
 boulevard Barbes impaire	63728	0,064	1659	6,37	308
 Boulevard Barbes pair	30343	0,030	790	3,03	308
 rue Caplat	11366	0,011	296	1,14	308
 Rue fleury	50200	0,050	1307	5,02	308
 rue Jean-François Lepine	8754	0,009	228	0,88	308
 passage Ruelle	5004	0,005	130	0,50	308
 cité de la Chapelle	4730	0,005	123	0,47	308
 Rue Douteauville	28500	0,029	742	2,85	308
 rue Ordener impair	8990	0,009	234	0,90	308
 Impasse de la Chapelle	17534	0,018	456	1,75	308
 rue des Roses	183872	0,184	4786	18,39	308
 Aval					

3.2.2.4.2 Résultat

Il faut additionner chaque bassin versant en série pour connaître le débit de temps sec à la rue des Roses. (Tableau 26)

Tableau 26: Calcul de temps sec

volume (l)	Qmed (l/s)	Qmts (l/s)	Cp calculé	Cp corrigé	Qedp (l/s)
41041,83	0,48	0,95	5,1	4	1,90
111716,51	1,29	2,59	3,7	4	5,17
1074936,71	12,44	24,88	2,2	3	27,48
1329020,83	15,38	30,76	2,1	3	32,88
1519710,19	17,59	35,18	2,1	2	36,87
1581709,89	18,31	36,61	2,1	2	38,16
1637223,39	18,95	37,90	2,1	2	39,31
1753365,59	20,29	40,59	2,1	2	41,70
2013535,02	23,30	46,61	2,0	2	47,03
2373731,38	27,47	54,95	2,0	2	54,31
2448976,07	28,34	56,69	2,0	2	55,83
2525174,85	29,23	58,45	2,0	2	57,36
2677668,61	30,99	61,98	1,9	2	61,98
2698666,57	31,23	62,47	1,9	2	62,47
2985638,66	34,56	69,11	1,9	2	69,11
3496580,96	40,47	80,94	1,9	2	80,94
3739857,42	43,29	86,57	1,9	2	86,57
3830984,87	44,34	88,68	1,9	2	88,68
4233465,78	49,00	98,00	1,9	2	98,00
4303651,40	49,81	99,62	1,9	2	99,62
4343771,21	50,28	100,55	1,9	2	100,55
4381694,21	50,71	101,43	1,9	2	101,43
4610194,33	53,36	106,72	1,8	2	106,72
4682272,08	54,19	108,39	2,0	2	108,39
4822851,77	55,82	111,64	2,0	2	111,64
6297054,36	72,88	145,77	2,0	2	145,77

On obtient un temps sec de 0.145 m³/s. Ceci correspond au donnée de simulation effectuée sur le logiciel de Mike Urban avec 0.200 m³/s.

3.2.2.5 Etude du débit de temps de pluie

3.2.2.5.1 Création d'une pluie

La pluie a été créée à partir de hauteurs d'eau estimée par Météo France du tableau 27. Les données de Météo France sont :

On calcul l'intensité (mm/h) grâce à la courbe de tendance de la figure 23 :

11/08/2014	Vivien Maillard	Page 68 sur 92
------------	-----------------	----------------

Tableau 27: Intensité (mm/h)

durée (fraction jours)	durée (fraction heures)	hauteur estimée (mm)	intensité (mm/h)
00:06	0,10	2,2	22,0
00:15	0,25	3,2	12,8
00:30	0,50	4,1	8,2
01:00	1,00	5,2	5,2
02:00	2,00	6,5	3,3
03:00	3,00	7,5	2,5

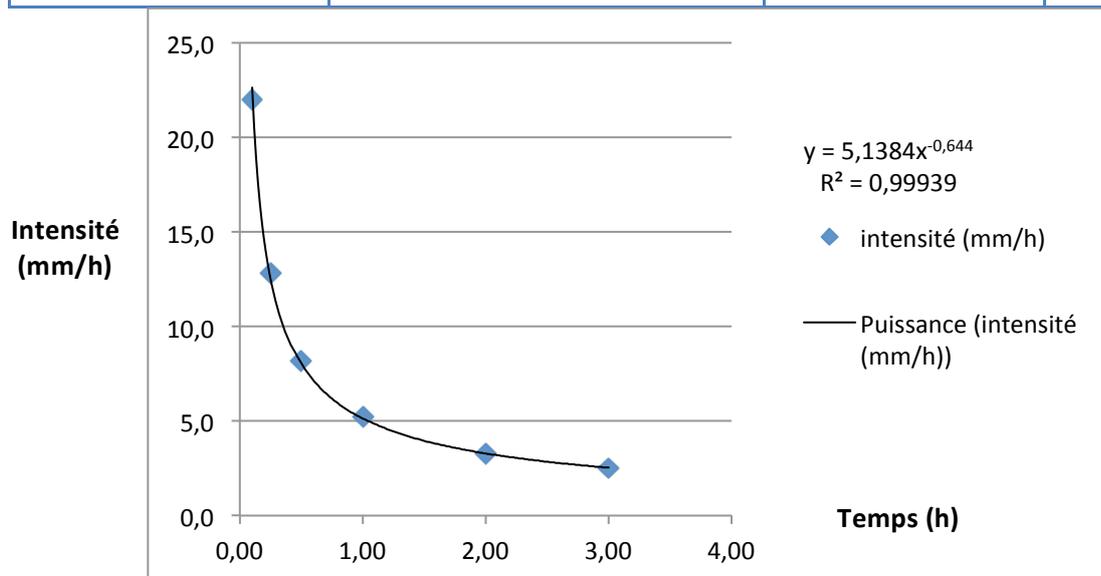


Figure 23: Courbe intensité (mm/h)

On obtient les coefficients de Montana pour une pluie 1 mois sur Paris :

A= 5,1384

B= -0,644

On construit la pluie à l'aide de la méthode de Chicago (tableau 28) pour avoir une pluie correcte :

- La pluie aura une durée de 2 h
- Pas de temps 15 min

Tableau 28: Création de la pluie Chicago

temps	durée (minutes) pas de temps 15 min	durée (fraction heures)	lame d'eau (mm)	Intensité (mm/h)
00:00	0	0	0	0
0:07:30	7,5	2	0,2	1,22
0:22:30	15	1,75	0,4	1,42
0:37:30	15	1,25	0,5	1,85
0:52:30	15	0,75	0,8	3,00
1:07:30	15	0,25	3,1	12,55
1:22:30	15	0,75	0,8	3,00
1:37:30	15	1,25	0,5	1,85
1:52:30	15	1,75	0,4	1,42
2:00:00	7,5	2	0,2	1,22
2:00:00	0	0	0,0	0

On obtient ce hyétogramme :

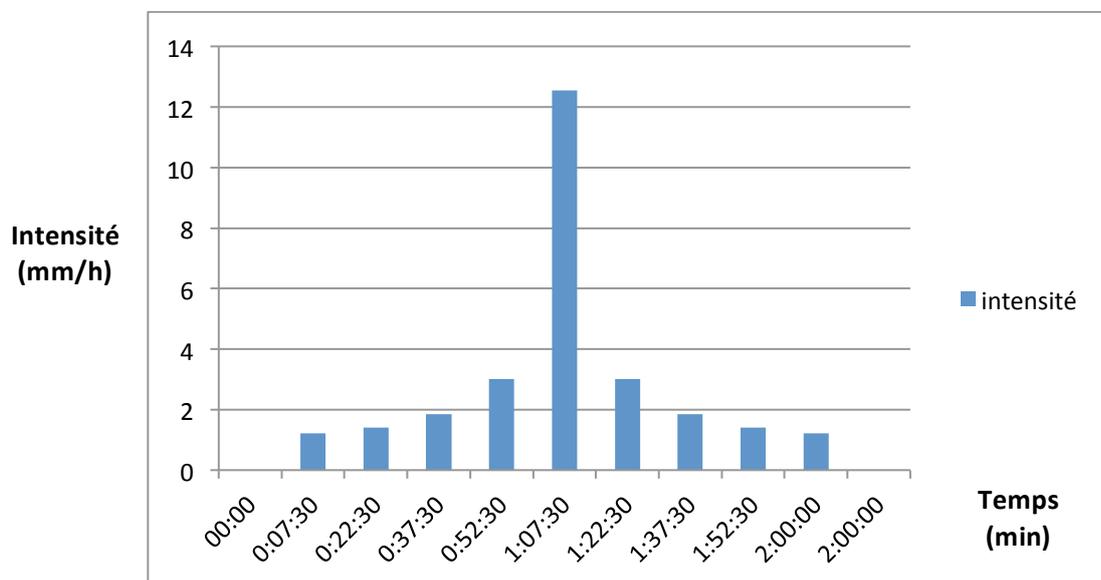


Figure 24: Hyétogramme de la pluie 1 mois

Ce hyétogramme (figure 24) est correct car on peut retrouver la hauteur estimée sur 2 h.

Une autre pluie a été réalisée pour une pluie de 2 h avec un pas de temps de 6 min mais l'intensité était beaucoup trop élevée. Ce qui donnait en calcul un débit très élevé proche de 6 mois.

Calcul des débits à l'aide de la formule rationnelle (équation 44) et les résultats sont dans le tableau 32 :

$$Q = C \times S \times I$$

Équation 44

C= coefficient de ruissellement 0.73 pour l'ensemble des bassins versants

S= au surface des bassins versants en série. Ils s'additionnent les uns avec les autres

I= Intensité mm/h. Estimation du débit en incluant tous les bassins versants jusqu'à la rue des Roses :

Tableau 29: Débit pluie en incluant tous les bassins versants

Intensité (mm/h)	Q total (l/s)
0	0
1,22	70,02
1,42	81,18
1,85	106,07
3,00	172,16
12,55	719,40
3,00	172,16
1,85	106,07
1,42	81,18
1,22	70,02
0	0

On obtient un débit maximal de 0.719 m³/s. Le débit est très élevé pour réaliser un busage. Pour faire la mise à sec, il faut effectuer des dérivations. Nous avons deux solutions pour réaliser notre busage :

- soit de créer un barrage vers l'intercepteur du collecteur Coteaux- La Chapelle.
- soit de faire un barrage vers l'intercepteur du collecteur Coteaux – La Chapelle, créer un barrage vers le boulevard Ordener en faisant un pompage de relevage.

3.2.3 Etude de la première solution : barrage vers l'intercepteur du collecteur Coteaux- La Chapelle

Les bassins versants de l'avenue Rachel pair jusqu'à la rue Sevestre (figure 25) ne sont pas pris en compte dans ce calcul car ces eaux sont déviées dans l'intercepteur du collecteur Coteaux-la Chapelle. Ainsi on obtient un débit de 0.413 m³/s. Ce résultat est présent dans le tableau 30.

Le busage aura un diamètre de 600 mm calculé à partir de la formule de Manning-Strickler.

Tableau 30: Débit 1 mois avec Dérivation (chapelle-coteaux)

Intensité (mm/h)	Q avec dérivation (chapelle-coteaux) l/s
0	0
1,22	40,25
1,42	46,66
1,85	60,97
3,00	98,95
12,55	413,50
3,00	98,95
1,85	60,97
1,42	46,66
1,22	40,25
0	0

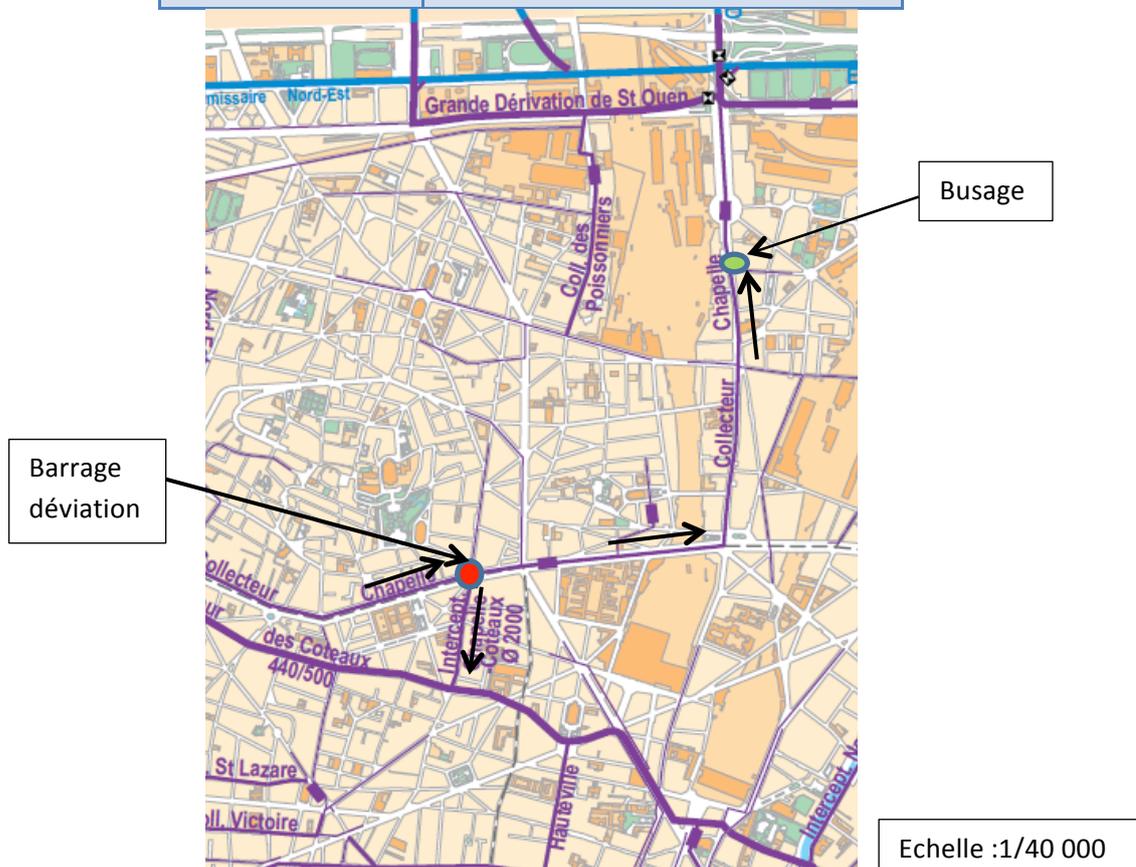


Figure 25: Carte de mise à sec collecteur la Chapelle source: Ville de Paris

3.2.4 Etude de la seconde solution : un barrage vers l'intercepteur du collecteur Coteaux - La chapelle et un barrage vers le boulevard Ordener en faisant un pompage de relevage

Dans cette étude, on prend en compte l'intercepteur du collecteur Coteaux- la Chapelle. On construit un barrage vers la rue Ordener (figure 26). Avec ces modifications, on observe un débit de 0.184 m³/s (tableau 31).

Ainsi Le busage aura un diamètre de 400 mm calculé à partir de la formule de Manning-Strickler avec un coefficient de 70 pour du PVC neuf avec une vitesse de 0,72 m/s. On peut prendre une station de pompage de 13,8 kW avec une perte de charge de 7m pour conduire l'eau usée dans le collecteur Ordener.

Tableau 31: Débit 1 mois de la 2ème solution

Intensité (mm/h)	Q jusqu'à Ordener (l/s)
0	
1,22	17,96
1,42	20,82
1,85	27,20
3,00	44,15
12,55	184,48
3,00	44,15
1,85	27,20
1,42	20,82
1,22	17,96
0	0,00

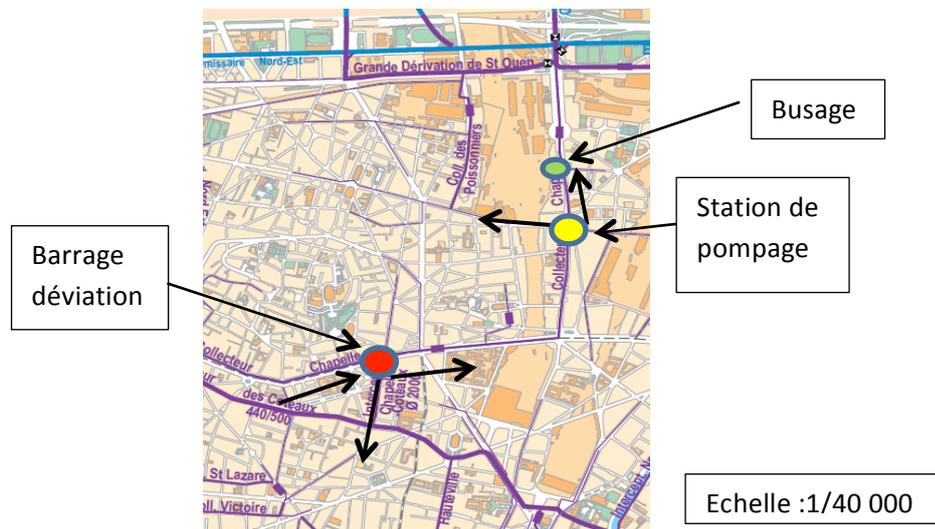


Figure 26: Carte de mise à sec de la deuxième solution

Préconisation

La première solution semble la plus plausible parce qu'elle est plus simple à gérer et moins coûteuse.

La deuxième solution nécessite l'installation de deux barrages et d'une pompe de relevage. La première solution est retenue.

3.2.5 A retenir pour la mise à sec :

Pour le collecteur de Clichy, la mise à sec sur le tronçon demande des dérivations à l'amont, deux installations de pompage et deux busages de 800 mm. Pour le collecteur de la Chapelle, le busage sera de 600 mm (première solution) avec un barrage à l'amont vers l'interception Chapelle-Coteaux .

3.3 Mise en place des échangeurs à chaleurs

3.3.1 Prescription générale

3.3.1.1 Prescriptions liées à l'échangeur

L'échangeur thermique doit être équipé d'un aménagement ou d'un dispositif permettant au minimum la formation de bio-film sur sa surface au contact des eaux usées. L'objectif est de maintenir l'efficacité de l'échangeur et sa capacité d'échange de chaleur pour limiter les interventions de nettoyage. L'échangeur doit résister aux conditions normales d'exploitation du réseau d'assainissement pour le passage d'égoutiers ou l'intervention de matériel de curage. Il faut protéger l'ensemble de l'ouvrage contre une montée en charge des eaux suite à des pluies.

3.3.1.2 Mise en œuvre du réseau de transport d'énergie

Le transport d'énergie se fera par le biais d'un fluide caloporteur fonctionnant en circuit fermé, reliant le dispositif de récupération et le point d'utilisation. Le réseau sera réalisé en PEHD et des essais seront réalisés afin de garantir son étanchéité. Le fluide caloporteur choisi ne doit pas détériorer le bon fonctionnement du système de récupération de chaleur : en particulier risques de gel, coactivité en égout et risques de corrosion.

Circulation du fluide caloporteur :

Le fonctionnement de la boucle de fluide caloporteur sera assuré par un système de pompe de recirculation.

3.3.1.3 Raccordement du réseau au bâtiment

Raccordement à l'échangeur :

Des canalisations appropriées feront la jonction entre les canalisations principales et les modules de l'échangeur. Ces jonctions seront réalisées dans un matériau approprié à la performance de l'installation.

Fonctionnement du réseau :

Le circuit caloporteur sera indépendant du circuit existant en chaufferie. La chaufferie reste à sa place initiale et sera utilisé comme chauffage d'appoint en cas de manque d'efficacité des échangeurs thermiques.

Raccordement aux bâtiments municipaux

Le circuit caloporteur passera pour chaque bâtiment à l'intérieur du branchement particulier qui est une galerie visitable.

3.3.1.4 Description de l'installation

3.3.1.4.1 Ecole de Clichy :

Réalisation d'un puits d'accès :

Le collecteur de Clichy est implanté en profondeur sous la rue. Il faut prévoir la réalisation d'un puits de service qui servira d'accès et pour la maintenance.

Un puits d'accès (2x2 m) sera construit jusqu'à la chambre d'accès avec une profondeur de 6 m. Il est réalisé pour descendre les échangeurs à chaleur et mettre en place les tuyaux caloporteurs aller-retour entre l'égout supérieur relié au branchement particulier et au collecteur de Clichy. Les échangeurs à chaleur ayant atteint la chambre atteindront le collecteur de Clichy par les escaliers.

Plaques à chaleur :

Les plaques à chaleur seront placées dans le bajoyer de la cunette. Elles mesurent 3 m de longeurs, 0.7 m de largeurs et elles sont composées de 14 modules posés en série.

Tubes coaxiaux :

Les tubes coaxiaux seront placés à l'intérieur de la banquette. Ils mesurent 3 m de long, 410 mm de diamètre et elles sont composées de 11 modules mis en série.

La création de chenal est indispensable pour dériver les effluents dans le tube central (une prise amont et une prise aval) . Par contre le système de vanne dans le collecteur pour forcer la circulation des effluents dans le tube n'est pas une obligation du fait d'une pente des tubes coaxiaux supérieurs à celle du collecteur.

Il était projeté que les échangeurs thermiques mesuraient 6m. Suite à des problèmes de mise en œuvre pour descendre les échangeurs à chaleurs et accéder au collecteur de Clichy, les modules ont été dimensionnés pour 3 m de longs. Cette solution a un avantage et un inconvénient :

- Chaque module a un meilleur rendement de chauffage
- Il faut installer plus de modules

réseau aller- retour du fluide caloporteur

Dans les deux cas, les tuyaux caloporteurs aller-retour sont intégrés à l'intérieur de la banquette du collecteur à proximité des échangeurs à chaleur. Ces tuyaux circulent dans le puits d'accès pour rejoindre l'égout supérieur qui cheminent jusqu'au branchement particulier de l'école.

11/08/2014	Vivien Maillard	Page 75 sur 92
------------	-----------------	----------------

Cette boucle est irriguée par une pompe de circulation à débit constant de 7 l/s pour les plaques à chaleur et pour les tubes coaxiaux.

3.3.1.4.2 Piscine Hébert :

Installations des échangeurs à chaleur :

Les échangeurs thermiques passeront à l'intérieur du bassin de dessablement placé sur le collecteur de la Chapelle. Ils seront acheminés avec un engin à jusqu'à leur place (indiqué sur le plan).

Les plaques à chaleur :

Les plaques seront positionnées sur le bajoyer de la cunette. Elles mesurent 9 m de longs, 0.7 m de large et elle est composée de 12 modules en série.

Les tubes coaxiaux :

Les tubes seront installés dans la banquette. Ils mesurent 6 m de longs, de diamètre 310 mm Ils sont composés de 14 modules en série. Il faudra créer un chenal avec un système de vanne pour l'arrivée des eaux usées dans le tube central.

Deux dimensionnements ont été réalisés pour les tubes coaxiaux. La première solution est un diamètre 410 mm. Les tubes coaxiaux sont difficiles à intégrer et provoquent des travaux importants au niveau de la structure du collecteur. La deuxième solution est plus facile d'implantation car les tubes coaxiaux et caloporteurs s'encastrent à l'intérieur de la banquette.

Réseau du fluide caloporteur :

A proximité des échangeurs à chaleurs, le circuit caloporteur aller-retour est implanté à l'intérieur de la banquette du collecteur de la Chapelle.

La boucle caloporteur circule dans le collecteur de La Chapelle et pénètre dans un égout secondaire Rue des Roses pour rejoindre le local technique de la piscine Hébert par l'intermédiaire du branchement particulier (voir schéma hydraulique et plan de La Chapelle).

Cette boucle est irriguée par une pompe de circulation à débit constant de 17.5 l/s pour les plaques à chaleur et pour les tubes coaxiaux.

3.4 L'exécution des travaux :

Les informations proviennent d'un agent de maîtrise de la DGT (Division des Grands Travaux).

Travaux dans le collecteur de la Chapelle et de Clichy :

11/08/2014	Vivien Maillard	Page 76 sur 92
------------	-----------------	----------------

On rédige des papiers administratifs pour réaliser les travaux :

- Faire un bilan sur l'amiante en égout.
- Autorisation de descente en égout.
- Effectuer une DARR.
- Rendez-vous avec la police voirie pour les emprises.
- Rentrer les emprises dans le logiciel CTV.

Le déroulement de Travaux :

- On buse. On dévie en amont la masse d'eau.
- On pose des busages en amont et on buse en diamètre 600mm à la Chapelle et 2 diamètres 800 mm dans le collecteur de Clichy. On reprend les bouches d'égout et les branchements de particulier au niveau de chaque collecteur. Ces données sont enregistrées dans le logiciel TIGRE.
- On pompe l'eau stagnante entre les busages normalement on pose une pompe de 100 m³/h.
- On cure les collecteurs.
- On nettoie le collecteur à la Haute Pression.
- Pour le collecteur de Chapelle, on descend les échangeurs à plaque par le bassin de dessablement. Pour le collecteur de Clichy les échangeurs à chaleur passent par un puits d'accès. Il faut prévoir aussi un engin de levage et un engin de manutention.
- Positionner et fixer les échangeurs à chaleur.
- Poser les 2 canalisations principales et les objets d'isollements.
- Epreuve d'étanchéité.
- Scellement des échangeurs et de la cornière pour le passage du wagon.
- Travaux de finition de maçonnerie.
- Pour la pose des échangeurs, le calepinage de ces derniers tiendra compte des branchements particuliers situés sous banquette.
- Prévoir une réception partielle de l'installation
- On replie le chantier :

Fin de DARR.

Fin de CTV.

Attention :

Vérifier au préalable si des échangeurs de 9 m de long passe par les trappes du bassin ou bien prévoir un puits de service.

Les échangeurs coaxiaux dans la banquette du collecteur de la Chapelle et de Clichy :

- La préparation du chantier est identique à celle décrit pour la pose des plaques à chaleurs. Compte tenu de la géométrie de ces échangeurs coaxiaux, la démolition totale d'une banquette est nécessaire, ce qui demande une démolition par plots alternés.
- Une fois le collecteur à sec et nettoyé, attaque la démolition du 1^{er} plot pour reconstruire une structure en Béton armé reprenant les charges du et du radier.
- Ensuite descendre les tubes et isolement par soudage.

11/08/2014	Vivien Maillard	Page 77 sur 92
------------	-----------------	----------------

- On coffre et on bétonne la banquette.
- Prévoir à l'amont, deux rangées de glissières de même largeur de façon à obstruer la cunette et à envoyer les effluents dans le diamètre 400 mm.

4 Bilan énergétique et économique

L'objectif est de calculer le coefficient de performance (COP) de chaque projet pour calculer dans un bilan d'émission de gaz à effet de serre.

4.1 Le coefficient de performance du système

4.1.1 Calcul de la COP machine

La COP machine est fourni par la pompe à chaleur. L'expression pour le *COP* machine (équation 45) est la suivante en fonction de la température d'entrée du fluide caloporteur dans l'échangeur :

$$COP_{machine} = 0,7 \frac{273,15 + T_c + 8}{T_c + 8 - (T_{e2} - 8)}$$

Équation 45

Pour la production d'ECS (eau chaude sanitaire), l'eau doit être chauffée à 60°C et donc dans notre cas $T_c = 60^\circ\text{C}$.

Il faut estimer les variations annuelles de la température d'entrée du fluide caloporteur en fonction de la température des effluents :

D'autre part, nous avons vu lors du dimensionnement de l'échangeur que cette puissance (équation 46) s'écrit aussi :

$$P_2 = \dot{q}_1(T_{e1} - T_{e2})(1 - (1 - \eta R)^n)$$

Équation 46

Hypothèse :

Q1= débit massique des effluents

Te1= température entrée des effluents

Te2= température entrée du fluide caloporteur

N= Nombre de module

R= rapport de déséquilibre

η = rendement

Le tableau 32 ci-dessous donne les valeurs mensuelles de T_{e2} calculées à partir de l'équation précédente.

Tableau 32: température du fluide caloporteur entrée

température entrée caloporteur	fevrier	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
clichy plaque °C	4,56	6,46	10,66	12,66	15,96	17,66	15,46	15,16	12,36	7,16	4,46
clichy tube coaxial °C	4,56	6,46	10,66	12,66	15,96	17,66	15,46	15,16	12,36	7,16	4,46
piscine plaque °C	3,62	5,52	9,72	11,72	15,02	16,72	14,52	14,22	11,42	6,22	3,52
piscine tube coaxial °C	5,67	7,57	11,77	13,77	17,07	18,77	16,57	16,27	13,47	8,27	5,57
piscine tube coaxial 2 °C	3,63	5,53	9,73	11,73	15,03	16,73	14,53	14,23	11,43	6,23	3,53

Ensuite on évalue la COP machine à l'aide de l'équation 46 dans le tableau 33

Tableau 33: COP machine pour chaque projet

cop machine	fevrier	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
clichy plaque	3,34	3,43	3,65	3,77	3,98	4,09	3,94	3,93	3,75	3,47	3,34
clichy tube coaxial	3,34	3,43	3,66	3,77	3,98	4,09	3,94	3,93	3,75	3,47	3,34
piscine plaque	3,30	3,39	3,60	3,71	3,92	4,03	3,88	3,87	3,70	3,42	3,29
piscine tube coaxial	3,40	3,49	3,72	3,84	4,05	4,17	4,02	4,00	3,82	3,53	3,39
piscine tube coaxial 2	3,30	3,39	3,60	3,72	3,92	4,03	3,88	3,87	3,70	3,42	3,30

L'expression du COP système (équation 47) est alors la suivante :

$$COP_{système} = \frac{P_c}{\frac{P_c}{COP_{machine}} + P_{elec}}$$

Équation 47

Hypothèse

Pc=puissance du site W

Pelec= puissance électrique de la pompe de circulation W

COP machine= coefficient de performance machine mensuel

On établit un tableau mensuel comme la COP machine. Mais le tableau 34 suivant montre les COP système annuel pour chaque projet

Tableau 34: COP système annuel pour chaque projet

cop système	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	Total
clichy plaque	2,91	2,98	3,14	3,23	3,38	3,46	3,35	3,34	3,21	3,00	2,90	3,17
clichy tube coaxial	3,15	3,24	3,43	3,53	3,71	3,81	3,68	3,67	3,52	3,27	3,15	3,47
piscine plaque	2,82	2,89	3,04	3,12	3,26	3,34	3,24	3,23	3,11	2,91	2,82	3,07
piscine tube coaxial	2,97	3,04	3,21	3,30	3,46	3,54	3,43	3,42	3,29	3,07	2,96	3,24
piscine tube coaxial 2	2,89	2,96	3,12	3,21	3,36	3,44	3,33	3,32	3,20	2,99	2,89	3,16

4.2 Le bilan énergétique des deux bâtiments chauffés par la pompe à chaleur

Les données sont issues de la pompe de chaleur de WESPER. Dans le cadre de ce projet, on utilise la pompe à chaleur EWMH-W-R410A avec des données correspondant à la puissance appelée pour les deux bâtiments.

On récupère l'intensité et la tension de la pompe à chaleur. Pour les deux pompes à chaleurs, la tension sera de 400 V. L'intensité est différente pour les deux sites (pour Clichy, ce sera 55.6 A et pour la piscine Hébert, ce sera 112 A). Après on utilise cette équation 48 pour trouver la puissance :

$$P = \frac{T \times I}{1000}$$

Équation 48

P= puissance en kW

T= tension en V

I= intensité en A

Ensuite, on multiplie cette puissance par le nombre d'heure d'utilisation journalier pour obtenir une consommation (kW.h).

$$P1 = P \times h$$

Équation 49

P1= consommation journalière en kW.h

P= consommation de la pompe à chaleur en kW

H= heure d'utilisation

Pour les deux sites, l'utilisation de la pompe à chaleur est

- 4 et 10 h pour l'Ecole de Clichy
- 7 h pour la piscine Hébert

De cette consommation journalière, on calcule la consommation annuelle électrique de la pompe à chaleur (tableau 35).

Tableau 35: consommation annuelle électrique

	Ecole de Clichy	Piscine Hébert
Eté (kW.h)	16 457,6	65 587
Hiver (kW.h)	23 796,8	54 476
Total(kW.h)	40 254,4	120 064

La consommation du fournisseur actuel des deux sites est connue grâce au logiciel Prométhé. (voir chapitre du fonctionnement des bâtiments).

Pour obtenir la production de chaleur, la consommation électrique est multipliée par le coefficient de performance. Le tableau 36 suivant représente la consommation annuelle des deux sites :

Tableau 36: consommation annuelle

	Ecole de Clichy Plaque à Chaleur	Ecole de Clichy Tube coaxial	Piscine Hébert Plaque à chaleur	Piscine Hébert Tube coaxial	Piscine Hébert Tube coaxial 2
COP système	3.17	3.5	3.17	3.22	3.12
PAC (kW.h)	127 606	139 682	368 596	389 007	379 402
Consommation du fournisseur actuel (kW.h)	211 500	211 500	415 698	415 698	415 698

Emission de carbone :

Les données d'émission de dioxyde de carbone qui seront utilisées dans l'équation 50 sont :

- 180 g/kW.h pour l'électricité
- 207.2 g/kW.h pour le gaz
- 184 g /kW.h pour CPCU donnée de 2014

$$\text{consommation en énergie CO}_2 = P1 \times E \times 10^{-6}$$

Équation 50

Consommation en énergie CO₂= Teq CO₂

P1= Puissance annuelle kW.h

E= donnée d'émission de dioxyde de carbone g/kW.h

Le tableau 37 est un exemple de consommation en énergie d'émission de gaz en effet de serre :

Tableau 37: Emission de gaz à effet de serre Piscine Hébert plaque à chaleur

intérêt environnemental				
consommation actuelle gaz	415 698	kW.h	86,13	Teq CO ₂
Bilan CO2			86,13	Teq CO ₂
consommation électrique PAC	65 587,2	kW.h	11,81	Teq CO ₂
	54 476,8	kW.h	9,81	Teq CO ₂
Fourniture chaleur PAC	368 596,48	kW.h	-76,37	Teq CO ₂
Bilan CO2			31,37	Teq CO ₂
Economie annuelle			54,76	Teq CO ₂
			63,58	%

Les résultats d'émission de gaz à effet de serre pour chacun des projets :

- Ecole de Clichy plaque à chaleur : économie de 15.72 Teq CO₂ (40%)

- Ecole de Clichy tube coaxial : économie de 18.39 Teq CO₂ (48%)
- Piscine Hébert tube coaxial : économie de 58.99 Teq CO₂ (68%)
- Piscine Hébert tube coaxial : économie de 57 Teq CO₂ (66%)

La piscine Hébert réalise une économie de 66 % seulement sur l'eau chaude sanitaire et le réchauffement de la piscine. Nous n'avons pas pris en compte le chauffage du bâtiment et se seront les même conséquences pour les autres projets sur la piscine Hébert. Il faut garder la chaufferie pour combler ces lacunes.

Pour les deux bâtiments, il faut garder la chaufferie existante car le système d'échangeur thermique à des conditions d'utilisation et ne comble pas tous les domaines d'exploitation. Il faut 1 m d'eau minimum garantir leur fonctionnement.

4.3 Le coût des travaux

Le coût des travaux est réalisé avec des données de la division des Grands Travaux et des fournisseurs dans le tableau 38.

Tableau 38: Coûts des Travaux

Désignation	Description	Ecole de Clichy plaque à chaleur Prix € (HT)	Ecole de Clichy Tube coaxial Prix € (HT)	Piscine Hébert plaque à chaleur Prix € (HT)	Piscine Hébert tube coaxial Prix € (HT)	Piscine Hébert tube coaxial 1 Prix € (HT)
Installation de chantier	L'installation du chantier sur la chaussée et comprend l'installation en égout et la construction du puits d'accès	89 717	89 717	74 430	74 430	74 430
Mise à sec du collecteur	comprend la mise en place de barrage, de busage et de station de pompage	787 272	789 366	13 119	13 119	13 119
Pose d'échangeur à chaleur sous la banquette	comprend l'installation des échangeurs à chaleur sous la banquette de l'égout. - Démolition de maçonnerie : cela conduit à la démolition de la banquette pour mettre en place les échangeurs à chaleur. - Coffrage ; -pose les modules d'échangeurs à chaleur avec leur pièce de fixation et les tuyaux caloporteurs en PEHD.	114 723	162 098	282 758	261 392	262 334
Pose du circuit primaire Aller-Retour	pose du circuit primaire caloporteur dans les collecteurs. Ceci inclut la pose et la fourniture de tuyaux en PEHD pour conduire le fluide caloporteur des échangeurs jusqu'au bâtiment.	9822	9822	161238	156518	156518
Essais hydrauliques	Les essais hydrauliques sont effectuées sur le réseau caloporteur	480	480	800	800	800
Coût total		1 104 499	1 154 308	585 579	556 607	557 762
Coût total arrondi		1 105 000	1 160 000	586 000	557 000	558 000

Le détail estimatif sera mis dans le CD.

5 Conclusion :

Les deux sites Ecoles de Clichy et la piscine Hébert peuvent être chauffé par des échangeurs à chaleurs placés dans les collecteurs.

Les collecteurs ont suffisamment de capacité pour récupérer les calories permettant de chauffer les deux sites. On a déterminé le nombre de module d'échangeur à chaleur pour les deux bâtiments.

Le coût des travaux se situe entre 550 000 et 1 100 000 euros. L'objectif est la réduction d'émission de carbone pour ces deux sites. La réduction d'émission de gaz à effet de serre est conséquente :

- 65 % : l'eau chaude sanitaire et le réchauffage des bassins pour la piscine Hébert ;
- 45 % : le chauffage pour l'école de Clichy.

Pour maintenir une bonne exploitation des échangeurs à chaleur, il faudrait nettoyer les plaques ou les tubes annulaires à la haute pression. Suivant l'encrassement des échangeurs à chaleur, on devrait les nettoyer une fois par mois et faire une mise à sec des collecteurs. Cette installation est compliquée à mettre en œuvre et représente un investissement très élevé. Un entretien régulier augmente le coût d'exploitation.

Pour garantir le fonctionnement des échangeurs à chaleur, Il faudrait introduire des débitmètres pour le premier et le dernier échangeur à chaleur pour connaître la répartition du débit. Le problème est un risque de déséquilibre du débit circulant dans le circuit caloporteur. Il faudrait introduire un bridage vers chaque émetteur de chaleur pour équilibrer le débit. Le bridage d'une vanne réduit le débit dans le circuit d'échangeurs à chaleur de celle-ci mais augmente dans les autres circuits.

Une autre solution est d'ajuster le débit de l'ensemble du réseau en intercalant une vanne d'équilibrage dite « générale » qui aura pour rôle de réduire proportionnellement les débits dans les échangeurs à chaleur concernées. En revanche, cette solution est difficile à mettre en œuvre à l'intérieur de l'égout. C'est un milieu agressif pour le matériel (risque de corrosion). Un autre problème est l'accès aux égouts pour un agent pour relever les mesures à cause des forts débits comme dans le collecteur de Clichy et la Chapelle.

Ce sont les points sensibles qu'il faut exploiter pour garantir la réussite du projet.

Bibliographie

- Lyonnaise des eaux- Degré Bleu. (2012, octobre 18). Géothermie sur les eaux usées.
- ADEME. (2011). *Evaluation du potentiel de récupération d'énergie thermique dans les réseaux d'assainissements de la région Provence-Alpes-Côte d'azur.*
- Arnaud, R. (2010-2011). *Récupération des eaux de sortie de station d'épuration pour le chauffage des locaux du SIVOM.* Digne-les-Bains.
- Google map. (2014, Août). Paris, Paris, France.
- Padet, J. (s.d.). *chapitre 3: Méthode Générale de calcul pour les échangeurs.*
- Padet, J. (s.d.). *chapitre 4: Détermination des coefficients d'échanges dans les échangeurs à fluides séparés.*
- Padet, J. (s.d.). *Chapitre 7 : les réseaux d'échangeurs.*
- Rabtherm. (2005). *Using Heat from Sewage.* Suisse.
- SEGIC. (2010). *Mise à sec du collecteur Clichy Amont à Paris 1er, 2ème et 9 ème arrondissement.* Paris.
- Tomi, A. H.-E. (2009). *Rapport sur le déploiement du "procédé Degré Bleu" dans le périmètre parisien.* Paris.
- Ville de Paris. (2010). *Diagnostic technique et fonctionnel de la piscine Hébert.* Paris.

Annexe 1 : Caractéristique de la pompe à chaleur E-WMHW-R410A

TAILLES EWMH-W		70.1	70.2	90.1	90.2	120.1	120.2
MODE DE FONCTIONNEMENT ÉTÉ (1)							
Puissance frigorifique	kW	80,9	83,0	106,0	105,0	132,0	132,0
Puissance absorbée des compresseurs	kW	20,3	19,3	25,9	25,4	32,7	32,3
Intensité de fonctionnement des compresseurs [OA]	A	41,5	39,8	47,8	47,2	60,5	60,0
Débit d'eau évaporateur	m³/h	13,9	14,3	18,2	18,1	22,7	22,6
Pertes de charge évaporateur	kPa	50	29	46	29	48	38
Débit d'eau condenseur	m³/h	17,5	17,7	22,8	22,7	28,6	28,4
Pertes de charge condenseur	kPa	60	37	52	36	53	47
MODE DE FONCTIONNEMENT HIVER (2)							
Puissance calorifique	kW	103,0	99,2	135,0	134,0	169,0	177,0
Puissance absorbée des compresseurs	kW	25,4	24,4	32,6	31,8	41,0	38,5
Intensité de fonctionnement des compresseurs [OA]	A	48,5	46,7	56,6	55,6	70,6	70,1
Débit d'eau évaporateur	m³/h	13,4	14,3	17,6	17,5	21,9	23,8
Pertes de charge évaporateur	kPa	47	25	43	27	45	36
Débit d'eau condenseur	m³/h	13,9	12,9	18,2	18,1	22,7	22,6
Pertes de charge condenseur	kPa	39	24	35	24	34	28
RÉCUPÉRATION DE CHALEUR PARTIELLE (3)							
Puissance calorifique	kW	12,1	-	15,9	-	19,9	-
Débit d'eau	m³/h	2,1	-	2,7	-	3,4	-
Pertes de charge	kPa	6,6	-	6,7	-	7,3	-
COMPRESSEURS							
Type					Scroll		
Nombre		2	2	2	2	2	2
Intensité max.	A	68	68	80	80	97	97
Intensité de démarrage	A	207	207	265	265	321	321
Nombre d'étages de puissance		2	2	2	2	2	2
ÉVAPORATEUR							
Nombre		1	1	1	1	1	1
Volume d'eau	l	4,7	6,4	5,8	6,7	7,2	8,3
Débit d'eau max.	m³/h	19,5	20,1	25,5	25,3	31,8	31,7
CONDENSEUR							
Nombre		1	1	1	1	1	1
Volume d'eau	l	4,7	6,4	5,8	6,7	7,2	8,3
Débit d'eau max.	m³/h	24,5	24,8	31,9	31,8	40,0	39,8
ÉCHANGEUR RÉCUPÉRATION DE CHALEUR PARTIELLE							
Nombre		1	-	1	-	1	-
Volume d'eau	l	1,0	-	1,7	-	2,1	-
Débit d'eau max.	m³/h	1,7	-	2,3	-	2,8	-
RÉFRIGÉRANT							
Type					R410A		
Charge totale de réfrigérant (accessoires exclus)	kg	6,6	8,1	8,7	10,4	10,7	12,7
Nombre de circuit frigorifique		1	2	1	2	1	2
ALIMENTATION ÉLECTRIQUE							
Tension d'alimentation	V/Ph/Hz	400/3/50	400/3/50	400/3/50	400/3/50	400/3/50	400/3/50

TAILLES EWMH-W		150.1	150.2	170.2	175.1	190.2	200.1
MODE DE FONCTIONNEMENT ÉTÉ (1)							
Puissance frigorifique	kW	172,0	170,0	200,0	195,0	228,0	222,0
Puissance absorbée des compresseurs	kW	41,5	41,2	45,8	48,6	51,3	53,0
Intensité de fonctionnement des compresseurs [OA]	A	74,8	74,3	88,9	90,2	94,9	94,7
Débit d'eau évaporateur	m³/h	29,5	29,2	34,3	33,5	39,0	38,1
Pertes de charge évaporateur	kPa	46	42	42	56	34	46
Débit d'eau condenseur	m³/h	37,0	36,6	42,6	42,2	48,3	47,6
Pertes de charge condenseur	kPa	45	47	70	78	42	61
MODE DE FONCTIONNEMENT HIVER (2)							
Puissance calorifique	kW	217,0	216,0	250,0	249,0	276,0	279,0
Puissance absorbée des compresseurs	kW	52,2	51,8	57,2	60,9	64,0	65,1
Intensité de fonctionnement des compresseurs [OA]	A	89,4	88,8	104,0	105,0	112,0	112,0
Débit d'eau évaporateur	m³/h	28,3	28,3	33,2	33,5	36,5	36,8
Pertes de charge évaporateur	kPa	44	40	39	51	29	43
Débit d'eau condenseur	m³/h	29,5	29,2	34,3	32,4	39,0	38,1
Pertes de charge condenseur	kPa	30	32	44	53	33	41
RÉCUPÉRATION DE CHALEUR PARTIELLE (3)							
Puissance calorifique	kW	25,7	25,7	30,1	29,4	33,1	33,3
Débit d'eau	m³/h	4,4	4,4	5,2	5,1	5,7	5,7
Pertes de charge	kPa	9,3	7,5	10,2	7,2	7,2	9,2
COMPRESSEURS							
Type				Scroll			
Nombre		2	2	4	3	4	2
Intensité max.	A	131	131	148	146	160	164
Intensité de démarrage	A	375	375	333	369	345	466
Nombre d'étages de puissance		2	2	2	3	2	2
ÉVAPORATEUR							
Nombre		1	1	1	1	1	1
Volume d'eau	l	8,7	12,3	12,3	11,1	20,3	20,7
Débit d'eau max.	m³/h	41,3	41,9	48	46,9	54,6	53,3
CONDENSEUR							
Nombre		1	1	1	1	1	1
Volume d'eau	l	8,7	12,3	12,3	11,1	20,3	20,7
Débit d'eau max.	m³/h	51,8	51,2	59,6	59,1	67,6	66,6
ÉCHANGEUR RÉCUPÉRATION DE CHALEUR PARTIELLE							
Nombre		1	2	2	1	2	1
Volume d'eau	l	4,0	2,0	2,0	5,3	3,4	5,3
Débit d'eau max.	m³/h	3,6	3,6	4,3	4,1	4,7	4,7
RÉFRIGÉRANT							
Type				R410A			
Charge totale de réfrigérant (accessoires exclus)	kg	12,4	17,0	17,8	16,0	23,9	22,4
Nombre de circuit frigorifique		1	2	2	1	2	1
ALIMENTATION ÉLECTRIQUE							
Tension d'alimentation	V/Ph/Hz	400/3/50	400/3/50	400/3/50	400/3/50	400/3/50	400/3/50

Annexe 2 : Création d'un CD-Rom

Le CD-ROM comporte toutes les données utilisées, les calculs réalisés sur Excel et les plans des sites.

Il comporte 6 dossiers :

- Catalogue : les fichiers sont des données sur la pompe à chaleur
- Chauffage : des fichiers Excel sur le chauffage des bâtiments
- Dimensionnements des échangeurs à chaleur : ce sont des feuilles Excel pour calculer les différents échangeurs thermiques de chaque bâtiment et sur les dimensions des pompes de circulation
- Economie et énergie : ce dossier comprend des feuilles de calculs sur le coefficient de performance, l'énergie des bâtiments et l'économie des projets.
- Mise à sec : ce sont des feuilles de calculs sur le collecteur de la Chapelle
- Plan : Ce dossier est composé vues en plan, des coupes et de schéma hydraulique correspondant aux différents projets.

Annexe 3 : Courbes Hauteurs d'eau et Vitesses

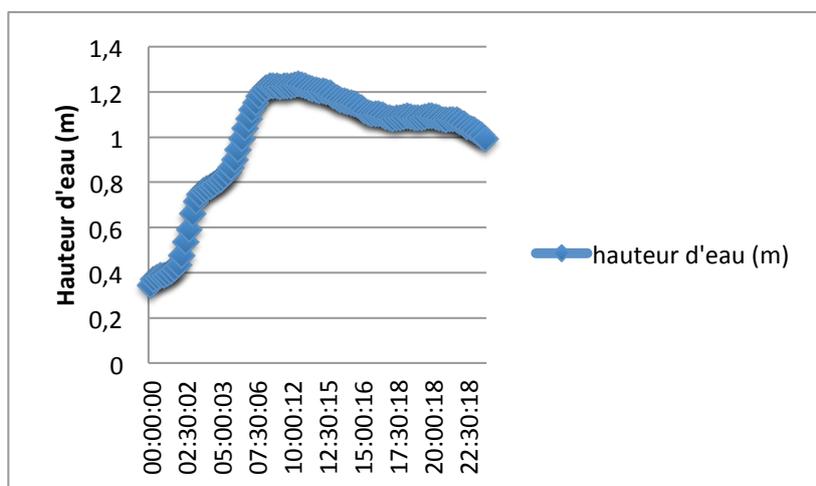


Figure 27: Courbe hauteur d'eau temps sec Clichy

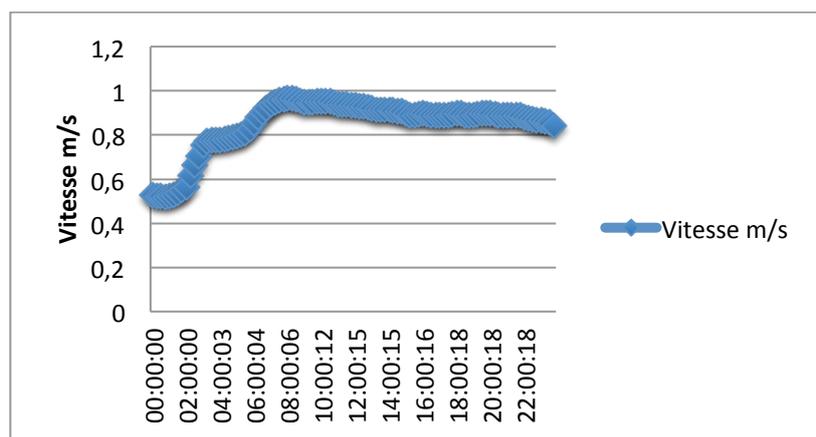


Figure 28: Courbe vitesse dans le collecteur de Clichy temps sec

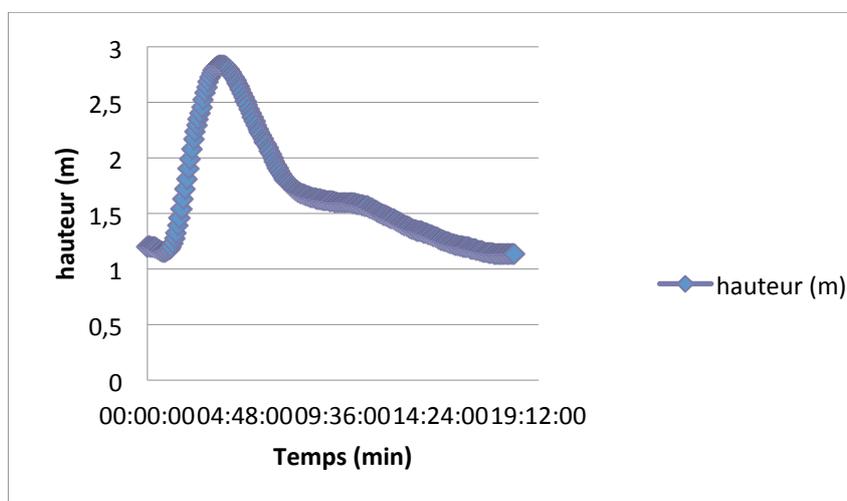


Figure 29: Courbe hauteur d'eau dans le collecteur de Clichy temps de pluie

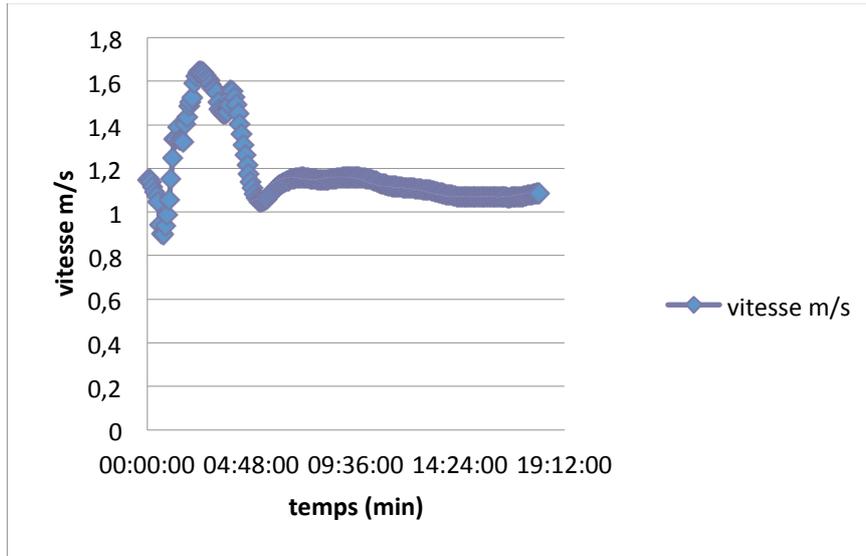


Figure 33: Courbe de vitesse du collecteur de la Chapelle en temps de pluie